



Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
Commission fédérale de la sécurité des installations nucléaires
Commissione federale della sicurezza degli impianti nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Commission

KSA 23/170

**Stellungnahme zum
Entsorgungsnachweis für
abgebrannte Brennelemente,
verglaste hochaktive sowie
langlebige mittelaktive Abfälle
(Projekt Opalinuston)**

August 2005

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
1 Einleitung	4
1.1 Geschichtlicher Hintergrund	4
1.2 Entsorgungsnachweis 2002 mit Anträgen der Nagra	5
1.3 Auftrag und Umfang der Stellungnahme	5
1.4 Zum Vorgehen der KSA	6
2 Beurteilungsgrundlagen	7
2.1 Gliederung des Entsorgungsnachweises	7
2.2 Strahlenschutzgesetzgebung	7
2.3 Richtlinien	8
2.4 IAEO Übereinkommen von 1997 ("Joint Convention")	9
2.5 EKRA-Konzept	9
2.6 Kernenergiegesetzgebung	11
3 Sicherheitsnachweis	13
3.1 Robustheit und Konservativität	13
3.2 Sicherheitsbericht der Nagra	15
3.3 Beurteilung von Robustheit und Konservativität	27
3.4 Behältermaterial und korrosionsbedingte Gase	31
3.5 Beurteilung des Sicherheitsnachweises	37
4 Standortnachweis	39
4.1 Anforderungen an den Standort	39
4.2 Nachvollziehbarkeit und Stichhaltigkeit des Nachweises	41
5 Machbarkeitsnachweis	43
5.1 Einführung, Rahmen und Umfang der Stellungnahme der KSA	43
5.2 Grundlagen der Planung	43
5.3 Auslegung und bautechnische Machbarkeit der Anlage	45
5.4 Monitoring / Instrumentierung	47
5.5 Lagerverschluss	49
5.6 Rückholbarkeit der Abfälle	49
5.7 Zusammenfassende Beurteilung der KSA zum Machbarkeitsnachweis	50

6	Stellungnahme zum Gutachten der HSK	52
6.1	Standortnachweis	52
6.2	Machbarkeitsnachweis	57
6.3	Sicherheitsnachweis	61
6.4	Zusammenfassende Beurteilung des Gutachtens der HSK	71
7	Stellungnahme zu weiteren Expertisen	72
7.1	Expertenprüfung der Langzeitsicherheitsanalyse durch das NEA-IRT	72
7.2	Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit durch die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE)	79
8	Grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiver Abfälle	84
8.1	Forschung und Entwicklung	84
8.2	Koordination des Entsorgungsprogramms	85
8.3	Qualitätsmanagement	88
8.4	Verfahren	90
8.5	Wissensmanagement	90
9	Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Empfehlungen	93
9.1	Schlussfolgerung	93
9.2	Zusammenfassung und Empfehlungen	93
9.3	Grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiver Abfälle	98
	Referenzen	101
	Liste von wiederholt benützten Abkürzungen	106
	Anhang: Dosen für "What-if"-Fälle	108

Diese vorab erstellte elektronische Version kann sich in redaktionellen Details von der gedruckten Version unterscheiden. Verbindlich ist die gedruckte Version.

Kurzfassung

Im Dezember 2002 reichte die Nagra den "Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle" (Entsorgungsnachweis 2002) ein und beantragte dem Bundesrat:

- *"von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr gemäss Beschluss des Bundesrates vom 3. Juni 1988 im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen,"*
- *"und der Fokussierung künftiger Untersuchungen im Hinblick auf eine geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, verglasten hochaktiven Abfälle sowie langlebigen mittelaktiven Abfälle BE/HAA/LMA in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland zuzustimmen."*

In Anlehnung an die Vorgaben in Art. 2 der KSA-Verordnung nimmt die KSA zum eingereichten Entsorgungsnachweis sowie zum zugehörigen Gutachten der HSK und weiteren Expertisen Stellung. Der zweite Antrag der Nagra wird in dieser Stellungnahme nicht beurteilt.

Bei der Beurteilung des Entsorgungsnachweises – bestehend aus den drei Teilnachweisen Sicherheitsnachweis, Standortnachweis und Machbarkeitsnachweis – richtet sich die KSA nach der Kernenergiegesetzgebung (Kernenergiegesetz, Kernenergieverordnung) und der Strahlenschutzgesetzgebung. In die am 1.2.2005 in Kraft getretene Kernenergiegesetzgebung sind die wesentlichen Elemente des Lagerkonzepts der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) aus dem Jahr 2000 und die wesentlichen Anforderungen aus der Richtlinie HSK-R-21 eingeflossen. Ausserdem berücksichtigt die KSA internationale Verpflichtungen der Schweiz, namentlich das im Rahmen der IAEO abgeschlossene "Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle".

Auf Grund der Prüfung und Beurteilung der Dokumentation der Nagra, des Gutachtens der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), des Berichts einer internationalen Expertengruppe der Kernenergieagentur (NEA) der OECD und des Expertenberichts der Kommission für Nukleare Entsorgung (KNE) sowie unter Berücksichtigung weiterer Fachkenntnisse und Literaturdaten kommt die KSA zum Schluss, dass der Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle in einem geologischen Tiefenlager erbracht ist.

Im Rahmen der Beurteilung des Entsorgungsnachweises wurden durch HSK, KNE, NEA und KSA Fragen aufgeworfen, Hinweise und Empfehlungen formuliert sowie Bedarf für Forschung und Entwicklung identifiziert. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage der für die Abfallbehälter verwendeten Werkstoffe. Nach Auffassung der KSA soll die Nagra – begleitend zum Entsorgungsprogramm gemäss Art. 32 KEG und Art. 52 KEV – die erwähnten Punkte im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms weiter verfolgen.

Zusätzlich macht die KSA zu grundsätzlichen Aspekten der Entsorgung der radioaktiven Abfälle Empfehlungen, welche beim weiteren Vorgehen berücksichtigt werden sollen.

1 Einleitung

1.1 Geschichtlicher Hintergrund

Mit dem Bundesbeschluss zum Atomgesetz von 1978 (BB/AtG) [9] wurde für neue Kernanlagen die Rahmenbewilligungspflicht eingeführt. Für Kernkraftwerke wurde deren Erteilung von einem Entsorgungsnachweis abhängig gemacht (Art. 3 Abs. 2 BB/AtG): *"Die Rahmenbewilligung für Kernreaktoren wird nur erteilt, wenn die dauernde, sichere Entsorgung und Endlagerung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle gewährleistet und die Stilllegung sowie der allfällige Abbruch ausgedienter Anlagen geregelt ist."* Den Betriebsbewilligungen der Kernkraftwerke, die sich damals bereits im Bau oder in Betrieb befanden, fügte das Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (EVED, heute UVEK) in der Folge entsprechende Bestimmungen an. Diese Zusatzbestimmungen hielten fest, dass die Betriebsbewilligung dahinfallen würde, wenn bis zum 31. Dezember 1985 kein Projekt vorliege, welches für die sichere Entsorgung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle Gewähr biete.

Die 1972 für die Umsetzung der Entsorgungspflicht gegründete Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) reichte 1985 einen Entsorgungsnachweis ein (im Folgenden: "Projekt Gewähr 1985"). Dieser beruhte für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) auf der Endlagerung in alpinen Mergelgesteinen am Oberbauenstock; für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle (HAA/LMA) sah er die Endlagerung im kristallinen Untergrund der Nordschweiz vor.

In seinem Entscheid vom 3. Juni 1988 zum "Projekt Gewähr 1985" [61] teilte der Bundesrat den Nachweis der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle in die drei Teile Sicherheits-, Machbarkeits- und Standortnachweis auf. Laut Beschluss des Bundesrats wurden mit dem "Projekt Gewähr 1985" für die SMA alle drei Teilnachweise erbracht. Für die HAA/LMA erachtete der Bundesrat den Sicherheits- und den Machbarkeitsnachweis als erbracht, nicht aber den Standortnachweis. Die Nagra wurde aufgefordert, bei den weiteren Arbeiten zur Erbringung dieses Nachweises auch Sedimentgesteine in ihre Abklärungen einzubeziehen. Bezüglich Betriebsbewilligungen der bestehenden Kernkraftwerke wurde gleichzeitig festgelegt, dass diese bis zum Entscheid des Bundesrats über den Standortnachweis in Kraft bleiben würden. Das per 1.2.2005 in Kraft gesetzte Kernenergiegesetz (KEG) [10] verlangt in Art. 106 Abs. 2 den Nachweis für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle innert zehn Jahren. Da die drei Teilnachweise sachlich miteinander verknüpft sind, erfordert ein neuer Standortnachweis, insbesondere wenn er in Verbindung mit einem neuen Wirtgestein steht, dass der gesamte Entsorgungsnachweis für die entsprechende Abfallkategorie neu zu erbringen ist.

Auf Grund der Ergebnisse der Sedimentstudie 1988 [40] wurden der Opalinuston der Nordwestschweiz und die Untere Süsswassermolasse im Mittelland eingehender untersucht. Aus dem darauf folgenden Einengungsverfahren ging 1994 im Konsens mit den Aufsichtsbehörden und Experten des Bundes der Opalinuston im Zürcher Weinland als Gebiet erster Priorität für die weiteren Untersuchungen hervor. Im Rahmen der standortbezogenen Erkundungen wurde dieses Gebiet 1996/97 3D-seismisch aufgenommen, d.h. die Schichtungen im Untergrund des Untersuchungsgebiets mittels Schwingungswellen räumlich (also in drei Dimensionen, 3D) ermittelt, und 1998/99 auf dem Gebiet der Gemeinde Benken eine Sondierbohrung durchgeführt. Zur weiteren Charakterisierung des Wirtgesteins wurden zudem Experimente im Opalinuston des Felslabors Mont Terri (Kanton Jura) sowie Vergleichsstudien an Opalinuston und mit ausländischen Tonvorkommen, die für geologische Lager untersucht werden, durchgeführt.

1.2 Entsorgungsnachweis 2002 mit Anträgen der Nagra

Auf Grund der Ergebnisse der erwähnten Untersuchungen und erforderlichen Analysen reichte die Nagra im Dezember 2002 den "Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle" (im Folgenden: Entsorgungsnachweis 2002; kurz: EN 2002) ein. Dieser ist in den folgenden vier übergeordneten Berichten dokumentiert:

- Zusammenfassender Überblick [48]
- Sicherheitsbericht
(Safety Report, NTB 02-05) [45]
- Erdwissenschaftlicher Bericht
(Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungen, NTB 02-03) [44]
- Anlagen- und Betriebskonzept (NTB 02-02) [43]

Mit dem Einreichen des EN 2002 beantragte die Nagra dem Bundesrat [48]

- *"von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr gemäss Beschluss des Bundesrates vom 3. Juni 1988 im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen,"*
(im Folgenden: Antrag 1)
- *"und der Fokussierung künftiger Untersuchungen im Hinblick auf eine geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, verglasten hochaktiven Abfälle sowie langlebigen mittelaktiven Abfälle BE/HAA/LMA in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland zuzustimmen."*
(im Folgenden: Antrag 2)

1.3 Auftrag und Umfang der Stellungnahme

Die KSA behandelt den EN 2002 in Anlehnung an die Vorgaben in Art. 2 der KSA-Verordnung [12] wie ein Bewilligungsgesuch. Somit nimmt die KSA zum eingereichten Entsorgungsnachweis sowie zum zugehörigen Gutachten der HSK und weiteren Expertisen Stellung:

- Gutachten der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) [25]
- Bericht der internationalen Expertengruppe der OECD-Kernenergieagentur (Nuclear Energy Agency, NEA) [56]
- Expertenbericht der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) [37]

Gemäss Art. 2 Abs. 4 der KSA-Verordnung [12] äussert sich die Kommission insbesondere zu grundsätzlichen Fragen. Dem entsprechend spricht die KSA speziell in Kap. 8 auch Punkte an, die nicht direkt zum Entsorgungsnachweis gehören, die ihr aber im vorliegenden Zusammenhang für die weiter führenden Schritte auf dem Weg zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers wesentlich erscheinen.

Auf eine entsprechende Anfrage der KSA hin präziserte das Bundesamt für Energie (BFE) den Auftrag an die KSA bezüglich des Antrags 2 der Nagra (Fokussierung der weiteren Arbeiten auf das Zürcher Weinland, siehe oben). Im Schreiben vom 10.2.2005 [5] wies das BFE auf die bundesrätliche Position hin, wonach die Standortwahl für ein Lagerprojekt in einem transparenten Verfahren im Rahmen eines Sachplans nach Raumplanungsgesetz [6] erfolgen soll. Antrag 2 der Nagra greife diesem Verfahren vor. Deshalb sollte die KSA nach Ansicht des BFE dazu nicht Stellung nehmen. Dem entsprechend nimmt die KSA zum Antrag 2 nicht Stellung.

Mit der Ausklammerung des Antrags 2 kann auch auf die Beurteilung des Verfahrens, das zur Wahl des Referenzstandortgebiets Zürcher Weinland führte, verzichtet werden. Massgebend für die Beurteilung des Entsorgungsnachweises ist die Frage, ob das Referenzstandortgebiet den Anforderungen hinsichtlich Grösse des Wirtgesteinskörpers, Langzeitsicherheit und Machbarkeit genügt. Weiter reichende, insbesondere gesellschaftspolitische Anforderungen werden im Rahmen des Verfahrens zur Standortwahl zu berücksichtigen sein.

1.4 Zum Vorgehen der KSA

Auf Grund der Sichtung der obgenannten Dokumente und eigener Überlegungen zur Gasproduktion infolge Korrosion der Lagerbehälter (vgl. Unterkapitel 3.4) richtete die KSA mit Schreiben vom 14. Mai 2004 Fragen zum EN 2002 an die Nagra [39]. In Reaktion auf diese Fragen erfolgte eine mündliche Präsentation durch die Nagra am 1. Sept. 2004 (434. KSA-Sitzung); sodann fanden am 2. Sept. 2004 und am 21. Oktober 2004 Fachgespräche zwischen Vertretungen der Nagra und der KSA statt. Anschliessend legte die Nagra ihre Antworten in schriftlicher Form vor.

Ein Mitglied der KSA, T. Flüeler, nahm als Beobachter an der einwöchigen Schlussbefragung der Nagra teil, welche die von der NEA organisierte internationale Expertengruppe (International Review Team, IRT) im November 2003 vor der Schlussredaktion ihres obgenannten Berichts durchführte.

Nach seinem Ausscheiden aus der Kommission per Ende 2004 wirkte T. Flüeler als Experte bei der Erarbeitung der vorliegenden Stellungnahme mit.

2 Beurteilungsgrundlagen

Auf der Basis der in Unterkapitel 1.1 zitierten ursprünglichen Forderung nach einem Entsorgungsnachweis gemäss Art. 3 Abs. 2 BB/AtG wurden Anforderungen zum Inhalt des Entsorgungsnachweises in der Praxis genauer umschrieben, siehe Unterkapitel 2.1. Diese Anforderungen richten sich nach dem allgemeinen Grundsatz der Berücksichtigung von Erfahrung sowie Stand von Wissenschaft und Technik, wie er in der Kernenergie- und der Strahlenschutzgesetzgebung verankert ist.

Seit der Einreichung des "Projekts Gewähr 1985" und dem zugehörigen Bundesratsentscheid von 1988 sind verschiedene Entwicklungen eingetreten, die für die Beurteilung des Entsorgungsnachweises durch die KSA massgebend sind. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln zusammengefasst.

2.1 Gliederung des Entsorgungsnachweises

In seinem Entscheid von 1988 zum "Projekt Gewähr 1985" [61] gliederte der Bundesrat den Entsorgungsnachweis in drei Teilnachweise. Später wurden die Anforderungen an diese Teilnachweise von Bundesinstanzen wie folgt umschrieben [2, Beilage 1]:

- Der Sicherheitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein, mit den auf Grund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie den technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers gewährleistet ist.
- Der Standortnachweis muss auf Grund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte.
- Der Machbarkeitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein ein geologisches Tiefenlager, unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann.

In den Kapiteln 3 bis 5 der vorliegenden Stellungnahme wird auf diese Teilnachweise eingegangen.

2.2 Strahlenschutzgesetzgebung

Das Strahlenschutzgesetz (StSG) [13] vom 22. März 1991 und die Strahlenschutzverordnung (StSV) [14] vom 22. Juni 1994 bilden den Kern der schweizerischen Strahlenschutzgesetzgebung. Sie traten per 1. Oktober 1994 in Kraft und wurden letztmals im Zusammenhang mit der Inkraftsetzung der neuen Kernenergiegesetzgebung revidiert. In der heutigen Form verweist das StSG für Kernanlagen, nukleare Güter und radioaktive Abfälle auf das KEG (Art. 3 Bst. a StSG). Insbesondere sind die Grundsätze zum Umgang mit radioaktiven Abfällen (Art. 25 StSG) identisch mit den entsprechenden Formulierungen im KEG. Zudem wurden die Regelungen betreffend Konditionierung, Zwischenlagerung, Beseitigung und Ausfuhr von radioaktiven Abfällen im Zusammenhang mit der neuen Kernenergiegesetzgebung von der StSV in die KEV überführt.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Stellungnahme kommt folgenden Festlegungen eine gewisse Bedeutung zu: Der Dosisgrenzwert für nichtberuflich strahlenexponierte Personen beträgt 1 mSv pro Jahr (Art. 37 StSV). Die Bewilligungsbehörde beschränkt erforderlichenfalls die aus einer Anlage für Personen in der Umgebung resultierende Dosis. Dazu legt sie einen quellenbezogenen Dosisrichtwert fest (Art. 7 Abs. 1 und Abs. 3 StSV). Dieser ist nach dem Prinzip der Optimierung (Art. 6 StSV) so tief wie vernünftigerweise erreichbar festzulegen und darf nicht höher als der obgenannte Dosisgrenzwert sein.

2.3 Richtlinien

2.3.1 Schutzziele für die Endlagerung (HSK-R-21)

Die von HSK und KSA gemeinsam herausgegebene Richtlinie "Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle" (HSK-R-21) [21] wurde im November 1993 in Kraft gesetzt. Darin ist das Ziel der Endlagerung (heute: "geologische Tiefenlagerung") wie folgt umschrieben: Die radioaktiven Abfälle sind so zu beseitigen, dass der Schutz von Mensch und Umwelt dauernd gewährleistet ist und künftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden. Dieses Ziel wird in drei Schutzzielen konkretisiert:

- Schutzziel 1
"Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0,1 mSv überschreiten."
- Schutzziel 2
"Das aus einem verschlossenen Endlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit einen Millionstel übersteigen."
- Schutzziel 3
"Nach dem Verschluss eines Endlagers sollen keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein. Das Endlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können."

Schliesslich folgen Hinweise und Erläuterungen zum Sicherheitsnachweis. Darin wird u. a. ausgeführt, dass die Dosisberechnungen mindestens bis zum Zeitpunkt des Dosis-Maximums gerechnet werden müssen.

Die Nagra beansprucht im EN 2002 Schutzziel 2 nicht. Dieses spielt deshalb in der vorliegenden Stellungnahme keine Rolle.

2.3.2 Anforderungen an die Konditionierung (HSK-R-14)

Die HSK-Richtlinie "Anforderungen an die Konditionierung radioaktiver Abfälle" (HSK-R-14) wurde im März 2004 in revidierter Form herausgegeben. Sie enthält im Vergleich zur Vorläuferin vom Dezember 1988 bzw. Januar 1993 (Neudruck) mit dem Titel "Konditionierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle" einige Anpassungen an die Strahlenschutzgesetzgebung; ausserdem wurden die Ausführungen zur Zwischenlagerung ausgegliedert in die Richtlinie "Anforderungen an die Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle" (HSK-R-29) vom März 2004.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Stellungnahme von besonderer Bedeutung sind Aussagen in HSK-R-14 betreffend Gehalt an organischen Stoffen, Gasbildung und Endlagerfähigkeit der einzulagernden radioaktiven Abfälle. Diese Punkte sind materiell von der Revision 2004 der HSK-R-14 nicht betroffen und somit in der alten und neuen Ausgabe inhaltlich gleich.

2.4 IAEA Übereinkommen von 1997 ("Joint Convention")

Das "Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" [28] (im Folgenden: Joint Convention) wurde im Rahmen der IAEA am 5. Sept. 1997 abgeschlossen und trat am 18. Juni 2001 in Kraft.

Die Bestimmungen der Joint Convention erfordern umfassende Massnahmen für die Gewährleistung eines hohen Sicherheitsstandes im Umgang mit nuklearen Abfällen und somit des Schutzes von Mensch und Umwelt. Verlangt werden ein entsprechender innerstaatlicher Rechtsrahmen und eine unabhängige staatliche Aufsicht. Die Einhaltung der Vertragsbestimmungen soll durch Berichterstattungspflichten und Überprüfungstagungen aller unterzeichnenden Staaten sichergestellt werden.

Grundsätzlich sind die Vorgaben der Joint Convention durch die schweizerische Kernenergie- und die Strahlenschutzgesetzgebung sowie die Organisation der Verwaltung bzw. der Aufsicht abgedeckt. Die Vorgaben des Übereinkommens sind wie erwähnt umfassend und erfordern entsprechende Massnahmen über sämtliche Stufen der Regulierung bis in die Verwaltungspraxis hinein. Im 1. Nationalen Bericht (gemäss Art. 32 des Übereinkommens) zur Umsetzung der Verpflichtungen aus der Joint Convention kommt das UVEK zum Schluss, dass die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und der Behandlung radioaktiver Abfälle in der Schweiz die Anforderungen des Übereinkommens erfüllt. [68]

In der vorliegenden Stellungnahme nimmt die KSA fallweise auf Regelungen der Joint Convention Bezug.

2.5 EKRA-Konzept

Im Juni 1999 setzte der Vorsteher des UVEK die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) ein. Sie war beauftragt, verschiedene Entsorgungskonzepte, insbesondere die geologische Endlagerung, die kontrollierte und rückholbare Langzeitlagerung und die Zwischenlagerung unter den Aspekten aktive und passive Sicherheit, Überwachung und Kontrolle sowie Rückholbarkeit hinsichtlich technischer und gesellschaftlicher Fragen zu vergleichen.

Die EKRA entwickelte im Rahmen dieses Auftrags das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung [16], das unter der Bezeichnung geologische Tiefenlagerung in die Kernenergiegesetzgebung Eingang fand. Dieses Konzept kombiniert das hinsichtlich Langzeitsicherheit bevorzugte Lagerkonzept, das geologische Endlager, mit Elementen, die den Forderungen nach Überwachung, Kontrolle und erleichterter Rückholbarkeit entsprechen. Die folgenden Elemente kennzeichnen die so genannte geologische Tiefenlagerung [17] (vgl. Abb. 2.5-1):

- Das Testlager oder mehrere örtlich getrennte Testlagerbereiche dienen als Felslabor zur Durchführung standortspezifischer Untersuchungen. Bei den Versuchen werden keine radioaktiven Abfälle verwendet; möglich sind Versuche mit radioaktiven Markierstoffen (Tracer). Die gewonnenen Informationen dienen der

Standortcharakterisierung und fliessen in den Sicherheitsnachweis für das Abfalllager ein.

Das Testlager wird als erster Lagerteil nach Vorliegen der Rahmenbewilligung gebaut und in Betrieb genommen. Es kann auch während des Betriebs des Haupt- und Pilotlagers weiterbetrieben werden. Die Betriebsdauer beträgt voraussichtlich einige Jahrzehnte. Nach Abschluss der Untersuchungen wird es oder werden Teile davon verfüllt.

- Das Pilotlager muss vom Hauptlager hydraulisch getrennt, aber an hydrochemisch und hydraulisch repräsentativer Stelle angelegt werden. Es dient in einer ersten Funktion der Überwachung des Langzeitverhaltens der technischen Barrieren und des Nahfeldes. Die Überwachung soll sicherstellen, dass allfällige ungünstige Entwicklungen frühzeitig erkannt und die notwendigen Massnahmen ergriffen werden, u. U. auch eine Rückholung der Abfälle. Die Überwachung kann Entscheide über die Beobachtungsdauer oder den Lagerverschluss stützen. Damit kein ungeregelter Zustand entsteht, muss ein erster Satz entsprechender Kriterien frühzeitig entwickelt werden. Als zweite Grundfunktion liefert das Pilotlager Daten für die Überprüfung (Verifizierung) von Modellannahmen zum langfristigen Verhalten des Tiefenlagers.

Das Pilotlager wird als erster Lagerteil nach Erteilung der nuklearen Betriebsbewilligung mit Abfällen gefüllt. Diese entsprechen einem kleinen, aber bezüglich Eigenschaften für die Langzeitsicherheit repräsentativen Teil der Abfälle, die insgesamt zur Einlagerung im betreffenden Lagersystem vorgesehen sind. Die Betriebsdauer ist mindestens so lange, wie Einlagerungen im Hauptlager stattfinden. Darüber hinaus ist die Betriebsdauer vom Konzept her offen; die EKRA geht von insgesamt hundert oder mehr Jahren aus. Wenn das Pilotlager seinen Zweck erfüllt hat und die Entscheidung zur Beendigung der Überwachung getroffen ist, wird es verfüllt und versiegelt. Anschliessend werden auch die noch offenen Zugänge und Lagerteile verfüllt und das gesamte Lager verschlossen.

- Das Hauptlager nimmt den grössten Teil der radioaktiven Abfälle auf. Der Lagerbereich ist in Kavernen aufgeteilt. Weil die geologische Tiefenlagerung die bestmögliche Sicherheit bietet, sollte das Hauptlager in Betrieb genommen werden, sobald endlagerfähige Abfälle vorliegen. In Etappen sollten jeweils Lagerkavernen aufgefahren, möglichst zügig mit Abfällen befüllt und unmittelbar anschliessend verfüllt und versiegelt werden; dadurch können die einzelnen Kavernen schnellstmöglich in einen Zustand passiver Sicherheit überführt werden. Die Zugänge zu den versiegelten Kavernen können für die Überwachung offen bleiben bis zum Abschluss der Beobachtungsphase und zum endgültigen Verschluss des Lagers.
- Die Beobachtungsphase entspricht zeitlich der oben beschriebenen Betriebsdauer des Pilotlagers. Innerhalb der Beobachtungsphase kann unterschieden werden zwischen einem ersten Teil, während welchem im Hauptlager Einlagerungen vorgenommen werden und die verfüllten Lagereinheiten überwacht werden. Mit Versiegelung der letzten Lagerkavernen des Hauptlagers beginnt der zweite Teil, während welchem die Überwachung des Pilotlagers weitergeführt wird. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse über die Aufsättigung des Lagerbereichs mit Wasser bilden eine wesentliche Grundlage für den Entscheid über Fortsetzung oder Abschluss der Beobachtungsphase. Sie endet mit dem Entscheid zum Verschluss des Lagers. Während der Beobachtungsphase sind die Abfälle ohne grossen Aufwand rückholbar.
- Mit Massnahmen für den raschen Verschluss soll sichergestellt werden, dass die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers auch in Krisensituationen gewährleistet ist. Die EKRA unterschied zwischen Schnellverschluss, d.h. Verfüllung und Versiegelung durch menschliches Handeln innerhalb relativ kurzer Zeit (Monate bis wenige Jahre), und Selbstverschluss, d.h. selbsttätig ablaufender Vorgang bei gewissen Ereignissen (z.B. Überflutung).

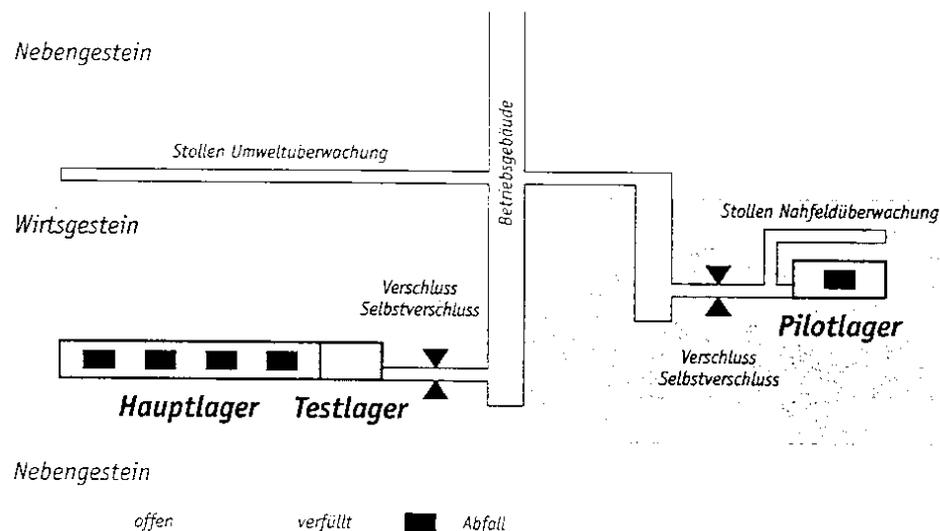


Abb. 2.5-1: Lagerkonzept "Kontrolliertes Geologisches Langzeitlager KGL" der EKRA [16].

2.6 Kernenergiegesetzgebung

Das Kernenergiegesetz (KEG) [10] vom 21. März 2003 und die Kernenergieverordnung (KEV) [11] vom 10. Dezember 2004 traten am 1. Februar 2005 in Kraft und lösten damit das Atomgesetz (AtG, SR 732.0) [8] von 1959 und den zugehörigen Bundesbeschluss von 1978 (BB/AtG) [9] ab. Weitere Verordnungen im Rahmen der neuen Kernenergiegesetzgebung sind in Vorbereitung.

Die alte Gesetzgebung enthielt sehr wenige Bestimmungen betreffend radioaktive Abfälle und Entsorgung. Wie in Unterkapitel 1.1 erwähnt, wurde mit dem BB/AtG von 1978 im Zusammenhang mit der Rahmenbewilligung der Entsorgungsnachweis gefordert. Ein weiterer Artikel betraf die Entsorgungspflicht der Betreiber von Kernanlagen. Demgegenüber sind in der neuen Kernenergiegesetzgebung die gesetzlichen Anforderungen an den Umgang mit radioaktiven Abfällen umfassend geregelt. Vorgegeben werden die allgemeinen Sicherheitsanforderungen und die Verfahren für die Bewilligung von entsprechenden Anlagen.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Stellungnahme ist hervorzuheben, dass das von der EKRA entwickelte Konzept der geologischen Tiefenlagerung (vgl. Abschnitt 2.5) in der Kernenergiegesetzgebung verbindlich vorgegeben ist. Eine Einschränkung betrifft die EKRA-Vorgabe für den raschen Verschluss. Dazu wird in Art. 11 Abs. 2 Bst. d KEV nur festgehalten, "dass das Lager inert einiger Jahre verschlossen werden kann." Die Variante Selbstverschluss ist somit nicht erwähnt.

Mit Art. 51 Bst. b KEV wurde die Abfallkategorie "alphatoxische Abfälle" (ATA: Abfälle, deren Gehalt an Alphastrahlern den Wert von 20 000 Becquerel pro Gramm konditionierten Abfalls übersteigt) neu eingeführt. Diese ersetzt die von der Nagra dem EN 2002 zu Grunde gelegte Kategorie LMA. Die ATA umfassen zusätzlich eine beschränkte Menge weiterer Abfälle. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der für die geologische Tiefenlagerung relevanten Eigenschaften nur unwesentlich von den LMA. Falls der Entsorgungsnachweis für die LMA erbracht werden kann, ist er somit auch für die ATA erbracht.

Anforderungen in der Kernenergiegesetzgebung an die Behandlung von Abfällen und an geologische Tiefenlager werden in der vorliegenden Stellungnahme berücksichtigt, soweit sie für den Entsorgungsnachweis relevant sind. Dies betrifft einerseits das Lagerkonzept, welches dem EKRA-Konzept [16] entspricht, und andererseits die Anforderungen an die Langzeitsicherheit, welche auch durch die HSK-R-21 abgedeckt sind. Die Nagra bezieht sich auf die entsprechenden, bereits während der Arbeiten zum EN 2002 bekannten Anforderungen. Somit entsprechen die dem EN 2002 zu Grunde gelegten Anforderungen der aktuellen gesetzlichen Basis, obschon der Nagra bei ihren Arbeiten von der neuen Kernenergiegesetzgebung lediglich der Entwurf vom 3.7.2001 zum KEG zur Verfügung stand.

3 Sicherheitsnachweis

Im vorliegenden Kapitel wird der Sicherheitsnachweis beurteilt. Dessen zentraler Teil ist die Sicherheitsanalyse. Zugehöriges übergeordnetes Dokument der Nagra ist der Sicherheitsbericht [45]^{1,2}. Die KSA beschränkt sich bei der Beurteilung auf Aspekte, welche ihr von besonderer Wichtigkeit erscheinen, und schliesst mit einer zusammenfassenden Beurteilung.

Eine umfassende und detaillierte Beurteilung des Sicherheitsnachweises hat die HSK vorgenommen [25, Kap. 4]. Die KSA geht auf diese Beurteilung in Unterkapitel 6.3 der vorliegenden Stellungnahme ein. Der geologische Datensatz, auf welchen der Sicherheitsnachweis abgestützt ist, wurde von der entsprechenden Fachkommission des Bundes, der KNE, im Detail überprüft und beurteilt. Die KSA geht darauf in Unterkapitel 7.2 ein.

Gemäss Unterkapitel 2.1 gilt: *"Der Sicherheitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein, mit den auf Grund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie den technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers gewährleistet ist."* Somit muss gezeigt werden, dass der Schutz von Mensch und Umwelt langfristig gewährleistet ist. Dies erfolgt primär dadurch, dass die Einhaltung der behördlich vorgegebenen Schutzziele (HSK-R-21; vgl. Abschnitt 2.3.1) nachgewiesen wird. Im Rahmen des Sicherheitsnachweises kann es zweckdienlich sein, neben den Schutzzielen auch Sicherheitsindikatoren zu betrachten, welche ein Hinweis für die radiologische Gefährdung von Mensch und Umwelt durch das Lagersystem sind. Eine gesetzliche Verpflichtung ist dies allerdings nicht, die Berücksichtigung verschiedenartiger Indikatoren entspricht aber internationalen Empfehlungen [30].

Für die zur Diskussion stehenden Kategorien radioaktiver Abfälle (BE/HAA/LMA) erfordert die Sicherheitsanalyse Aussagen über sehr lange Zeiträume. Da Prognosen für die Langzeitentwicklung immer mit Unsicherheiten verbunden sind, muss nachgewiesen werden, dass die Sicherheitskriterien auch bei ungünstigen Annahmen eingehalten sind.

3.1 Robustheit und Konservativität

3.1.1 Robustheit

Bei der Auslegung und Bewertung von technischen Systemen werden in der Regel umhüllende Lastfälle oder Szenarien ("worst case") betrachtet und/oder Sicherheitsmargen für bestimmte Auslegungsgrössen zugeschlagen. Bei der Bewertung der Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers sind diese Konzepte schwierig anzuwenden, weil in der Langzeitperspektive eine grosse Vielfalt von Ereignissen und Vorgängen mit potenziell negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit denkbar ist. Auch setzt das Festlegen eines "worst case" ein vollständiges Systemverständnis voraus. Die Kumulation aller ungünstigen Aspekte führt zudem zu einem höchst unrealistischen

¹ Der Sicherheitsbericht [45] ist in englischer Sprache abgefasst. Im Fall von Unschärfen der Übersetzung in der vorliegenden Stellungnahme ist der englische Originaltext massgebend.

² Nachfolgend wird die Referenz [45] für den Nagra-Sicherheitsbericht durch das Akronym NSB ersetzt. Entsprechende Referenzangaben erfolgen in geschwungener Klammer, fallweise ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurennummer usw.

umhüllenden Szenarium. Die Nagra hat zum Nachweis der Lagersicherheit ein an die Worst-case-Methode angelehntes Konzept gewählt: Sie weist die so genannte Robustheit des Lagersystems mittels ausgewählter Szenarien und Rechenfälle nach, wobei diese Szenarien und Rechenfälle Ungewissheiten der Modellannahmen und auch unerwartete Entwicklungen des Lagersystems abdecken.

Angaben der Nagra

Einerseits bezeichnet die Nagra mit Robustheit eine Eigenschaft des Lagersystems. Sie umschreibt diese Eigenschaft an verschiedenen Stellen im Sicherheitsbericht situationsbezogen etwas anders. Zwei Beispiele dafür sind:

- *Ein Lagersystem ist robust, wenn erstens keine offenen Fragen die Sicherheit und die Fähigkeit der Projektantin zur Nachweiserbringung infrage stellen und zweitens die verbleibenden Unsicherheiten keine schwer erfüllbaren (englisch: "undue") Anforderungen an die Standortcharakterisierung sowie an Forschungs- und Entwicklungsprogramme stellen.*³ {NSB, S. 22}
- *Die Leistung des Lagersystems darf infolge der Unsicherheiten, welche sich durch das Spektrum der vernünftigerweise zu betrachtenden künftigen Entwicklungen ergeben, nicht übermässig (englisch: "unduly") beeinflusst werden. Für ein robustes System lässt sich ungeachtet der noch bestehenden Unsicherheiten ein überzeugender Sicherheitsnachweis erbringen.*³ {NSB, S. 34}

Laut Nagra {NSB, Fig. 2.4-1} *gewährleistet ein robustes System, dass*³

- *die Abfälle, inklusive spaltbare Materialien, gesichert sind sowie Mensch und Umwelt gegen schädigende Wirkungen der Strahlung geschützt sind und*
- *die Sicherung und die Sicherheit nicht beeinträchtigt werden durch nachteilige Phänomene und Unsicherheiten (im Sinn der oben zitierten Beispiele).*

Andererseits verwendet die Nagra den Begriff Robustheit für eine Eigenschaft des Sicherheitsnachweises. Sie umschreibt diese wie folgt:

- *Der Sicherheitsnachweis muss robust sein, d. h. er muss alle vernünftigerweise vorstellbaren Aspekte berücksichtigen und auf belastbare Begründungen für die Sicherheit abgestützt sein.*³ {NSB, 2.5.2}

Bemerkungen der KSA

Allgemein gesprochen, ist ein System robust, wenn es auf bedeutsame Änderungen von Parametern, z. B. infolge äusserer Einflüsse, nicht empfindlich reagiert. Robustheit kann als Mass für die Unempfindlichkeit der integralen Barrierenwirksamkeit gegenüber (inneren und äusseren) Einflüssen und Unsicherheiten angesehen werden. Der Nachweis der Robustheit des Tiefenlagersystems und die Robustheit des Entsorgungsnachweises im Sinne der Nagra sind miteinander verknüpft: Der Nachweis der Robustheit des Lagersystems setzt voraus, dass in der Sicherheitsanalyse die vernünftigerweise vorstellbaren Ausgangszustände und Entwicklungen des Lagers berücksichtigt sind und für diese die Einhaltung der Schutzziele nachgewiesen ist. Bei der Auswahl der Fälle muss also mit einer geeigneten Systematik vorgegangen werden, sodass die betrachteten Fälle die Unsicherheiten des Lagersystems in ihrer Gesamtheit abdecken.

Eine weitergehende Robustheit des Lagersystems ist dann gegeben, wenn auch bei den ungünstigsten der vernünftigerweise vorstellbaren Ausgangszustände und Entwicklungen hinsichtlich der Einhaltung der Schutzziele noch Reserven bestehen oder bei zwar noch

³ aus dem Englischen übersetzt

denkbaren, aber unrealistischen Ausgangszuständen und Entwicklungen die Schutzziele eingehalten sind.

Die KSA beurteilt die Robustheit des von der Nagra betrachteten Lagersystems in Unterkapitel 3.3.

3.1.2 Konservativität

Angaben der Nagra

Den Begriff Konservativität verwendet die Nagra im Zusammenhang mit dem Sicherheitsnachweis bzw. der Sicherheitsanalyse. Sie umschreibt den Begriff wie folgt:

- Konservativität ist gegeben bei Verwendung von Konzeptannahmen bzw. Parameterwerten, die zu einer Überschätzung der radiologischen Folgen führen und von denen bekannt ist, dass sie ausserhalb des Bereichs des Möglichen liegen.³ {NSB, Anhang 5}

Die Nagra trifft in der Sicherheitsanalyse zwei Arten von konservativen Annahmen:

- Sie hat in der Sicherheitsanalyse Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge ("features, events and processes", FEPs), welche aus Sicht der Sicherheit vorteilhaft sind, bewusst nicht berücksichtigt. Da solche FEPs im Rahmen einer verfeinerten Sicherheitsanalyse wieder aufgenommen werden können, nennt sie diese Reserve-FEPs.
- Sie verwendet bei gewissen Rechenfällen Werte für Modellparameter, die ausserhalb des Bereichs des Möglichen liegen.

Bemerkungen der KSA

Mit Konservativitäten (konservativen Annahmen) können einerseits Unsicherheiten und andererseits auch die aus vereinfachenden Modellierungen resultierenden Ungenauigkeiten im Sinn einer Überschätzung der radiologischen Folgen abgedeckt werden.

Darüber hinaus können konservative Annahmen insbesondere auch über die Robustheit des Lagersystems Auskunft geben: Wenn in der Sicherheitsanalyse unter Verwendung konservativer Annahmen die Schutzziele eingehalten werden können, weist dies darauf hin, dass das Lagersystem bezüglich der konservativ getroffenen Annahmen eine mehr oder weniger ausgeprägte Robustheit aufweist.

Die KSA geht in Abschnitt 3.3.2 auf die konservativen Annahmen ein, welche die Nagra dem Referenzfall zu Grunde gelegt hat. Weitere konservative Annahmen hat die Nagra u. a. bei den "What-if"-Fällen getroffen, auf welche die KSA in Abschnitt 3.3.3 eingeht.

3.2 Sicherheitsbericht der Nagra

Nach dem Verständnis der Nagra {NSB, S. XIV} besteht der Sicherheitsnachweis *"aus einer Reihe von Argumenten und Analysen, welche die Schlussfolgerung begründen, dass ein spezifisches Lagersystem sicher sein wird. Dazu gehört insbesondere der Nachweis, dass die behördlichen Schutzziele eingehalten werden. Der Sicherheitsnachweis und die dazugehörigen Hintergrunddokumente beschreiben die Auslegung des Systems und seine Sicherheitsfunktionen und zeigen die Wirksamkeit der verschiedenen Barrieren und des Gesamtsystems auf. ..."*

Die Nagra strebt mit der Sicherheitsanalyse die folgenden Ziele an {NSB, S. XIV}:

- *"Beurteilung der Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland als mögliches Wirtgestein für ein Tiefenlager aus Sicht der Langzeitsicherheit.*
- *Verbesserung des Kenntnisstands bezüglich der vielfältigen Sicherheitsfunktionen des betrachteten Lagersystems.*
- *Bewertung der Robustheit des Lagersystems bezüglich der verbleibenden Ungewissheiten und der Auswirkungen von Phänomenen, welche die Barrierenwirkung des Lagers beeinträchtigen könnten.*
- *Bereitstellung einer Diskussionsgrundlage für eine Vielzahl von mit der Entsorgung zusammenhängenden Themen und der Grundlagen für die künftige Planung der Entsorgung. ..."*

Nachfolgend geht die KSA auf die Inhalte einzelner Kapitel des Sicherheitsberichts [45] ein und bringt Bemerkungen dazu an. Die Beurteilung durch die KSA erfolgt in Unterkapitel 3.5.

3.2.1 Einleitung {NSB, 1}

In der Einleitung {NSB, 1} stellt die Nagra den Sicherheitsnachweis in den nationalen Rahmen der Nutzung der Kernenergie und der Entsorgung der radioaktiven Abfälle, der gesetzlichen Vorschriften, des vorgesehenen Zweilagerkonzepts (ein Lager für SMA, ein Lager für BE/HAA/LMA) sowie des Programms für die Entsorgung von BE/HAA/LMA und dessen schrittweise Umsetzung. Sodann hält sie die Zielsetzung des vorliegenden Entsorgungsnachweises und der Sicherheitsanalyse fest, weist auf den übergeordneten Charakter der von ihr eingereichten Berichte [43] [44] [45] [46] und auf wichtige Referenzberichte hin. Abschliessend wird die Struktur des NSB erläutert.

3.2.2 Vorgaben für die Gestaltung des Lagersystems und die Sicherheitsanalyse {NSB, 2}

In diesem Kapitel legt die Nagra die Grundelemente der vorgelegten Sicherheitsanalyse dar.

Aussagen der Nagra

Gemäss Nagra sind auf internationaler Ebene von der IAEA, der NEA und der ICRP Prinzipien und Anforderungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle {NSB, 2.2} formuliert worden. Auf nationaler Ebene sind die Schutzziele für die Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen in der von HSK und KSA gemeinsam formulierten Richtlinie HSK-R-21 festgehalten, welche auf die Atom- und Strahlenschutzgesetzgebung abgestützt ist. Zu den Anforderungen an einen möglichen Standort wird auf das Beurteilungskonzept der HSK [22] verwiesen. Im Weiteren führt die Nagra den Entwurf zum KEG vom 3.7.2001 an, in welchem entsprechend dem Entsorgungskonzept der EKRA [16] u. a. vor dem definitiven Verschluss des Lagers eine Überwachungsphase verlangt wird.

Die Wahl der geologischen Tiefenlagerung zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle steht im Einklang mit der nationalen Gesetzgebung und mit den internationalen Empfehlungen {NSB, 2.3}. Die konkrete Auslegung entspricht dem Stand der Wissenschaft, den nationalen Anforderungen sowie dem von der EKRA vorgeschlagenen Konzept mit Haupt-, Test- und Pilotlager {NSB, 2.4}.

In {NSB, 2.5} werden das Vorgehen bei der Sicherheitsanalyse und die zu Grunde gelegten Prinzipien beschrieben.

Ziele und Prinzipien, die bei der Entwicklung des Lagersystems und bei der Durchführung der Sicherheitsanalyse zur Darlegung der Lagersicherheit zu beachten sind, werden in {NSB, 2.6} wie folgt zusammengefasst:

- Die übergeordneten Ziele der geologischen Tiefenlagerung sind {NSB, 2.6.1}:
 - die Langzeitsicherung der radioaktiven Abfälle, inklusive der Spaltmaterialien;
 - die Langzeitsicherheit von Mensch und Umwelt vor radioaktiver Strahlung.
- Das Lagersystem soll gewährleisten, dass {NSB, 2.6.2}
 - die radioaktiven Abfälle inklusive die Spaltmaterialien dauerhaft gesichert sowie Mensch und Umwelt vor radioaktiver Strahlung geschützt sind und das Lagersystem hinsichtlich Einhaltung dieser Ziele robust ist (vgl. dazu Abschnitt 3.1.1);
 - die Wahrscheinlichkeit und die Konsequenzen unbeabsichtigten menschlichen Eindringens klein sind.

Um die vorgenannten Ziele zu erreichen, muss das Lagersystem die folgenden Sicherheitsfunktionen erfüllen {NSB, 2.6.2.1}:

- Isolation der Abfälle (inklusive Spaltmaterialien) vom menschlichen Lebensraum;
- langfristiger Einschluss und Zerfall innerhalb des Lagersystems;
- Verminderung der Freisetzung in die Umwelt.

Die genannten generellen Ziele sollen mit folgenden Prinzipien erreicht werden:

- Prinzipien betreffend Sicherheit und Robustheit des Gesamtsystems {NSB, 2.6.2.2}:
 - Multibarrierensystem, wobei passive Barrieren des Lagers und der umgebenden Geologie die Langzeitsicherheit garantieren;
 - Stabilität und Langlebigkeit, indem eine stabile geologische Formation gewählt und langlebige Materialien für die technischen Barrieren verwendet werden;
 - nachteilige Phänomene sollen vermieden oder durch das Lagersystem gemildert werden;
 - Menschliches Eindringen soll eine beschränkte Wahrscheinlichkeit und beschränkte Konsequenzen haben.
- Prinzipien betreffend Standortwahl {NSB, 2.6.2.3}:
 - tektonische Stabilität mit geringen Hebungs- und Senkungsraten;
 - günstige Wirtgesteinseigenschaften, namentlich bezüglich Hydrogeologie, Geochemie und bautechnischer Eignung;
 - die Sicherheit beeinträchtigende Phänomene vermeiden durch Standort in einer geologisch ruhigen Lage und mit sicherheitsrelevanten Eigenschaften, welche durch das Lager im Grossen und Ganzen nicht nachteilig beeinflusst werden;
 - Unempfindlichkeit gegen die Sicherheit beeinträchtigende Phänomene;
 - gute Explorierbarkeit, insbesondere dank einfacher geologischer Situation und homogener Verhältnisse;
 - gute Prognostizierbarkeit der künftigen Entwicklung, namentlich dank gutem Verständnis der geologischen Geschichte.

- Prinzipien betreffend Auslegung und Bau des Lagers {NSB, 2.6.2.4}:
 - Die technischen Barrieren müssen durch ihre physikalischen und geochemischen Eigenschaften zum Einschluss und zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen.
 - Während der Zeit mit starker Wärmeentwicklung und hohem Radiotoxizitätsinventar soll das Lager die Abfälle vollständig einschliessen.
 - Zur Vorsicht und zur Kompensation von Unsicherheiten sollen die technischen Barrieren und deren Komponenten so gewählt bzw. dimensioniert werden, dass sie redundante Wirkung erzielen.
 - Durch die Materialwahl, die Lagerauslegung und geeignete Lagerbewirtschaftung soll die Empfindlichkeit gegen Phänomene, welche die Sicherheit beeinträchtigen, möglichst klein gehalten werden.
 - Bei der Realisierung des Lagers sollen günstige Standortwahl, geringe Störung des Standortes durch den Lagerbau, Einsatz bewährter Techniken und Bewahrung einer genügenden Flexibilität zur Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher und technischer Erkenntnisse sowie neuer Abfallformen (Konditionierung, Verpackung) zur Absicherung der Lagerqualität beitragen.
 - Das Lager soll so geplant werden, dass es innerhalb weniger Jahre verschlossen werden kann.
 - Zur Verbesserung der Prognostizierbarkeit ihrer künftigen Entwicklung sollen die technischen Anlagen mit einer kleinen Zahl verschiedener, gut bekannter, gegenseitig verträglicher Materialien gebaut werden.

Ziele im Zusammenhang mit der schrittweisen Verwirklichung sind {NSB, 2.6.3}:

- Verpflichtung zu systematischem Lernen während des ganzen Entsorgungsprozesses;
- Einbezug der Akteure und Betroffenen (stakeholder involvement);
- Möglichkeit zur Anpassung an neue Erkenntnisse und Forderungen;
- Möglichkeit zur längerfristigen Überwachung des Lagers gemäss EKRA-Konzept;
- Einsatz spezifischer Schutzmassnahmen für jede Lagerphase;
- Vertrauen in einfache, gut verstandene Elemente zur Lagerung, sei es im Bereich der Massnahmen, sei es im Bereich der technischen Barrieren.

Prinzipien des Sicherheitsnachweises {NSB, 2.6.4}: Eine Schlüsselrolle der Sicherheitsanalyse ist gemäss Nagra die Gewinnung quantitativer und qualitativer Informationen, anhand welcher die Sicherheit des vorgeschlagenen Lagersystems beurteilt werden kann und welche eine Hilfe für den Entscheid über das weitere Vorgehen zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers bieten; die Analyse soll insbesondere zeigen, wie sich das System im Laufe der Zeit entwickeln kann und welcher Grad an Sicherheit erwartet werden kann. Der resultierende Sicherheitsnachweis soll robust sein, d.h. er muss alle vernünftigerweise zu erwartenden Fälle berücksichtigen und auf vertrauenswürdigen Argumenten beruhen. Diese Ziele können bei Beachtung der folgenden Prinzipien erreicht werden:

- Die Schwerpunkte des Sicherheitsnachweises hängen vom aktuellen Stand des Projekts ab. Beim HAA-Programm liegen sie gegenwärtig bei der Beurteilung der Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung der BE/HAA/LMA sowie der Bereitstellung von Grundlagen für den Entscheid, ob die weiteren Arbeiten auf den Opalinuston in der potenziellen Standortregion Zürcher Weinland fokussiert werden sollen. Neben der Beurteilung der erwarteten Sicherheit soll namentlich die Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems ausgewiesen werden.

- Da das wissenschaftliche Verständnis die zentrale Basis für den Sicherheitsnachweis ist, muss überzeugend nachgewiesen werden, dass dieses ausreichend ist, um über den aktuellen Schwerpunkt des Sicherheitsnachweises begründete Aussagen zu machen. Wichtige Aspekte sind dabei die Identifizierung der für die Sicherheit relevanten Schlüsselphänomene und allfälliger offener Fragen, welche die Zuverlässigkeit dieser Schlüsselphänomene infrage stellen könnten.
- Um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, muss der Sicherheitsnachweis, abgestützt auf eine klar definierte Methode, systematisch aufgebaut sein. Dabei sind insbesondere folgende Aspekte zu beachten: systematisches Vorgehen beim Zusammentragen von Information und deren Behandlung, Prüfung der Vollständigkeit, strenge Beachtung von Unsicherheiten und Identifizierung nicht weiter reduzierbarer Unsicherheiten, Entwicklung und Validierung von Modellen und Datenbasen, Verifizierung von Rechencodes, interne und externe Begutachtung, Beachtung der (geologischen) Zeitskalen.
- Im Sinn der mehrfachen Argumentation soll sich die Diskussion zur Sicherheit nicht auf die von den Behörden festgelegten Anforderungen (z. B. Schutzziele in der Richtlinie HSK-R-21) beschränken, sondern zusätzliche Gesichtspunkte einbeziehen; dazu gehören weitere Sicherheitsindikatoren, nicht berücksichtigte sicherheitsfördernde Phänomene (Reserve-FEPs) sowie der Nachweis, dass keine der offenen Fragen den Sicherheitsnachweis infrage stellen kann.
- Die Entwicklung des Sicherheitsnachweises soll gut dokumentiert und nachvollziehbar sein.

Bemerkungen der KSA

Bei der Ausarbeitung des Sicherheitsberichts stand der Nagra von der heute in Kraft stehenden Kernenergiegesetzgebung (KEG und KEV) lediglich ein Entwurf des KEG zur Verfügung. Da in die Gesetzgebung zum Lagerkonzept die wesentlichen Elemente des Lagerkonzepts der EKRA [16] und Anforderungen aus der Richtlinie HSK-R-21 übernommen worden sind, erfüllt das von der Nagra dem Sicherheitsnachweis zu Grunde gelegte Lagerkonzept die Anforderungen der aktuellen Gesetzgebung. Für den Sicherheitsnachweis selber sind in der Kernenergiegesetzgebung für die Stufe Entsorgungsnachweis keine spezifischen Anforderungen festgelegt. Diese sind primär in der Richtlinie HSK-R-21 formuliert, auf welche sich die Nagra abgestützt hat. Die Nagra hat somit beim Sicherheitsnachweis alle aus heutiger Sicht relevanten Anforderungen berücksichtigt.

Im Zusammenhang mit dem Vorgehen betont die Nagra zu Recht, dass ein Entsorgungsprogramm schrittweise realisiert werden muss. So muss der Projektant zu jeder Verfahrensstufe eine aktualisierte Sicherheitsanalyse beibringen, die jeweils von den verschiedenen Gremien überprüft wird. Auch dies trägt zur Robustheit des Gesamtsystems bei.

Die Darlegungen der Nagra zu den grundsätzlichen Aspekten des Sicherheitsnachweises sind vollständig und nachvollziehbar. Es sind alle Schlüsselemente berücksichtigt, welchen beim Sicherheitsnachweis auf der Stufe Entsorgungsnachweis grosses Gewicht beizumessen ist. Hierzu gehört namentlich das Multibarrierensystem (oder Mehrfachbarrierensystem): Die Sicherheit und die Robustheit des Lagersystems beruht auf einem System von gestaffelten, in ihrer Wirkung voneinander unabhängigen Barrieren. Der Umsetzung dieses Konzepts ist deshalb besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

3.2.3 Methodik zur Ausarbeitung des Sicherheitsnachweises {NSB, 3}

Die Nagra erläutert in {NSB, 3} die für die Sicherheitsanalyse verwendete Methodik. Dabei berücksichtigt sie die in {NSB, 2} aufgelisteten Anforderungen.

Aussagen der Nagra

Die Schwerpunkte im vorliegenden Kapitel sind {NSB, S. XVII}:

- Beschreibung der einzelnen Schritte der Sicherheitsanalyse;
- Festlegung der wichtigsten Themen, die für den Nachweis der Sicherheit zu behandeln sind.

Die gewählte Methodik {NSB, 3.2} beruht auf den bisherigen Erfahrungen und auf Empfehlungen von NEA, IAEA und ICRP. In {NSB, 3.3} wird auf die Zielrichtungen der Methodik und in diesem Zusammenhang u. a. auf die aktuellen Schwerpunkte des Sicherheitsnachweises eingegangen:

- genereller Nachweis der Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung der BE/HAA/LMA in der Schweiz;
- Robustheit des untersuchten Lagersystems;
- Bereitstellung von Grundlagen für den Entscheid, ob die weiteren Arbeiten auf den Opalinuston in der potenziellen Standortregion Zürcher Weinland fokussiert werden sollen.

Der Sicherheitsnachweis wurde in folgenden Schritten entwickelt {NSB, 3.5}:

- Festlegung des Standorts und Auslegung des Lagers;
- Zusammenstellung der Kenntnisse über das Lagersystem und seine künftige Entwicklung, inklusive der relevanten Unsicherheiten;
- Analyse des Sicherheitskonzepts, d.h. der Art, wie das Lagersystem nachweisbare Sicherheit bieten wird;
- Darlegung der radiologischen Auswirkungen des Lagers anhand eines breiten, die Unsicherheiten abdeckenden Spektrums von Rechenfällen;
- Zusammenfassung der Argumente und Analysen, welche den Sicherheitsnachweis bilden.

Bemerkungen der KSA

Die von der Nagra beschriebene und für den Sicherheitsnachweis angewendete Methodik ist transparent dargelegt, nachvollziehbar und angemessen. Die Wahl einer konkreten Standortregion ist eine Folge des Umstands, dass im Rahmen des Entsorgungsnachweises auch ein Standortnachweis zu erbringen ist (vgl. Unterkapitel 2.1).

Der im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbrachte Sicherheitsnachweis ist eine wichtige, aber nicht die einzige Grundlage für den Entscheid, ob die weiteren Arbeiten auf den Opalinuston im Zürcher Weinland konzentriert werden sollen, und damit auch für das Standortauswahlverfahren. Bei diesem Auswahlverfahren werden namentlich auch soziale, politische, wirtschaftliche und landesplanerische Aspekte einbezogen werden müssen. Zudem werden für weitere potenzielle Standortregionen angepasste Sicherheitsbetrachtungen vorliegen müssen, damit im Vergleich der technischen Sicherheitsaspekte sowie der vorerwähnten weiteren Aspekte eine Standortwahl getroffen werden kann. Dafür vorgesehen ist ein Verfahren im Rahmen eines Sachplans nach Raumplanungsgesetz (vgl. Unterkapitel 1.3).

3.2.4 Beschreibung des Lagersystems für BE/HAA/LMA im Opalinuston {NSB, 4}

In diesem Kapitel {NSB, 4} beschreibt die Nagra das Lagersystem. Darauf basierend werden in den nachfolgenden Kapiteln die künftige Systementwicklung und die Rechenfälle diskutiert.

Aussagen der Nagra

Der Opalinuston im Zürcher Weinland zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus {NSB, 4.2}:

- Einfachheit der geologischen Struktur, der Hydrogeologie und der Geochemie sowie Homogenität und Ausdehnung des Wirtgesteins;
- tektonische Stabilität mit geringer Hebungsrate und damit verbundener Erosion sowie durchschnittlichen In-situ-Spannungen und Wärmeflüssen;
- Plastizität und Selbstheilungsvermögen;
- vernachlässigbarer advektiver Wasserfluss bzw. Dominanz des diffusiven Wassertransportes;
- kein Ressourcenpotenzial;
- geochemische Stabilität und hohe Rückhaltekapazität für Radionuklide;
- geotechnische Machbarkeit der Anlagen.

Anschliessend wird die geologische und hydrogeologische Situation hinsichtlich der für das Lagersystem entscheidenden Parameter der geologischen Barriere im Detail dargestellt {NSB, 4.2.1–4.2.6}. In {NSB, 4.3} werden die wesentlichen Kenngrössen der Umwelt an der Erdoberfläche, wie Hydrologie und Wasserressourcen, Klima, Boden, Besiedlung und Landnutzung beschrieben.

Abschliessend folgt eine Beschreibung der Anordnung der Untertagbauten des Lagers (*Layout*) {NSB, 4.5.1}.

In {NSB, 4.5.2} werden die Abfallmengen und die Eigenschaften der eingelagerten Abfallgebinde beschrieben. Bezüglich Annahmebedingungen für die Abfälle bzw. für die Auslegung des Lagers werden folgende Kriterien beachtet:

- definiertes Aktivitätsinventar der Gebinde,
- maximale thermische Leistung der Gebinde,
- Gewährleistung der dauernden Unterkritikalität beim BE-Lagerteil,
- Auswirkungen der radioaktiven Strahlung auf die Barrierenmaterialien ausserhalb der Abfallgebinde,
- Gasbildung innerhalb der Abfallgebinde (zur Gasbildung infolge Korrosion der Lagerbehälter vgl. Unterkapitel 3.4),
- chemische Beständigkeit.

In {NSB, 4.5.3} werden das System der technischen Barrieren und die Anordnung der verschiedenen Untertagbauten des Lagers beschrieben:

- Der bereits für das "Projekt Gewähr 1985" untersuchte Stahlbehälter wird als bevorzugter Lagerbehälter für BE und HAA bezeichnet. Andere mögliche Behältermaterialien sind Kupfer und im Rahmen des Entsorgungsnachweises nicht betrachtete alternative Werkstoffe. Gemäss der Richtlinie HSK-R-21 muss der

vollständige Einschluss der Abfälle für eine Dauer von etwa 1000 Jahren garantiert sein.

- Die Lagerbehälter für BE/HAA werden in (unverkleideten) Lagerstollen auf Bentonitblöcken gelagert und der verbleibende Stollenraum mit Bentonitgranulat verfüllt.
- Die in Lagercontainer verpackten LMA-Gebinde werden in Lagertunnels (mit Wandauskleidung) eingelagert, wobei die verbleibenden Zwischenräume mit Zementmörtel ausgegossen sind.
- Nach dem Verfüllen und Versiegeln der Lagerkavernen ist vor dem endgültigen Verfüllen und dem Verschluss des Lagers eine Überwachungsphase mit entsprechendem Monitoring geplant. Das Konzept sieht ein schrittweises Vorgehen unter Beachtung der spezifischen Funktionen von Haupt-, Test- und Pilotlager vor.

Bemerkungen der KSA

Die Nagra behandelt in {NSB, 4} das gesamte Lagersystem. Inhaltlich äussert sich die KSA in der vorliegenden Stellungnahme zur geologischen Situation, den Kenntnissen und Unsicherheiten des Lagersystems bzw. der geologischen Barrieren in Kapitel 4 (Standortnachweis), Kapitel 6 (Stellungnahme zum Gutachten der HSK) und Kapitel 7 (Stellungnahme zu den Expertisen der NEA und der KNE). Der Problematik der Barrieren und deren gegenseitiger Beeinflussung ist Unterkapitel 3.4 gewidmet und der Frage der Robustheit des Lagersystems Unterkapitel 3.3. Das Layout, der Lagerbetrieb und das Monitoring sind in Kapitel 5 (Machbarkeitsnachweis) der vorliegenden Stellungnahme behandelt.

3.2.5 Zeitliche Entwicklung des Lagersystems {NSB, 5}

In diesem Kapitel {NSB, 5} beschreibt die Nagra ihre detaillierte Analyse der möglichen zeitlichen Entwicklung des verschlossenen Lagers und seiner Umgebung. Dabei werden auch Unsicherheiten erörtert.

Aussagen der Nagra

Vorerst werden in {NSB, 5.2.1} die Klimaentwicklung und deren möglicher Einfluss auf natürliche Prozesse, wie Erosion (Glazialerosion, Flusserosion) und Sedimentation an der Erdoberfläche betrachtet. Bei der Ermittlung der Dosen werden die heutigen Essgewohnheiten zu Grunde gelegt. Dabei wird aber vom Verzehr ausschliesslich lokal produzierter Nahrungsmittel ausgegangen. Zudem wird angenommen, dass sich die Menschen während ihres ganzen Lebens in der Region aufhalten.

In {NSB, 5.2.2} wird die geologische und tektonische Entwicklung über einen Zeitraum einer Million Jahre betrachtet. Auch unerwartete und seltene Ereignisse werden erwähnt.

Der Entwicklung des Nahfeldes ist {NSB, 5.3} gewidmet. Im Zusammenhang mit strahlungsbedingten Prozessen werden der radioaktive Zerfall und die Wärmeproduktion von BE/HAA betrachtet. Sodann folgt eine Analyse der hydromechanischen Entwicklung des Nahfeldes, inkl. Gasproduktion und Gastransport durch den Bentonit. Im Rahmen der Darstellung der chemischen Entwicklung im Nahfeld des BE/HAA-Lagers {NSB, 5.3.4} werden die Entwicklung der Porenwasserchemie, die mineralogischen Veränderungen im Bentonit, die Korrosion der Lagerbehälter, die chemischen Prozesse nach einem Lagerbehälterbruch und die Auflösungsprozesse der Brennstoff- und der Glasmatrix behandelt. Bei der Nuklidmigration wird auch der Sorption im Bentonit Beachtung geschenkt.

In {NSB, 5.4} sind die Betrachtungen zum Nahfeld für LMA wiedergegeben.

Die Bildung und Migration von Gasen, vor allem aus der Korrosion der Lagerbehälter, ist in {NSB, 5.5} (Entwicklung des Fernfeldes) behandelt. Die Autoren kommen zum Schluss {NSB, S. 158–159}, dass verschiedene Mechanismen dazu beitragen, dass sich das Gas im Opalinuston verteilen wird. Die Entwicklung von Klüftung ("Gas fracs") ist nicht möglich. Hingegen wird es in den Lagerstollen infolge der Gasentwicklung zu einem Druckaufbau kommen, welcher den Wasserfluss und damit den Nuklidtransport in der Zugangsrampe und im Schacht beeinflusst. Es wird {NSB, S. 160} auch auf die Möglichkeit hingewiesen, im Bedarfsfall andere, korrosionsfestere Materialien zu verwenden, um die Gasproduktion zu reduzieren.

Nach der Betrachtung der Bedingungen für den Nuklidtransport durch Wasser {NSB, 5.5.3}, Betrachtungen zu alternativen Mechanismen und zu unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen {NSB, 5.6}, werden die Ergebnisse in {NSB, 5.7} zusammengefasst.

Bemerkungen der KSA

Die KSA beurteilt die Struktur der Analyse der Entwicklung des Lagersystems durch die Nagra als korrekt. Inhaltlich äussert sich die Kommission in Kapitel 4 (Standortnachweis) und Unterkapitel 7.2 (Stellungnahme zur Expertise der KNE) der vorliegenden Stellungnahme zur Frage der geologischen Entwicklung. Zur Entwicklung von Nah- und Fernfeld betrachtet die KSA die Frage der Gasbildung und -migration als Schlüsselfrage (vgl. 3.4). Nach Ansicht der KSA kann nicht ausgeschlossen werden, dass die geologische Barriere durch die Eigenschaften einer technischen Barriere – im vorliegenden Fall korrosionsbedingte Gasproduktion – geschwächt werden könnte, was im Widerspruch zu Grundsätzen der Lagersicherheit stehen würde: Aus den prinzipiellen Anforderungen {NSB, 2.6.2} betreffend mehrfache passive Barrieren, Redundanz sowie Unempfindlichkeit gegenüber schädigenden Auswirkungen folgt, dass eine Barriere in einem Mehrfachbarrierensystem die Funktion einer anderen Barriere nicht schwächen darf.

3.2.6 Sicherheitskonzept und Bestimmung der quantitativ zu analysierenden Fälle {NSB, 6}

Aussagen der Nagra

Ausgehend von der Systembeschreibung und der Analyse der Systementwicklung {NSB, 4} bezweckt dieses Kapitel {NSB, 6} Folgendes:

- qualitative Beschreibung, auf welche Weise die Barrieren Schutz bieten (Beschreibung des Sicherheitskonzepts);
- quantitative Modellierung der Freisetzung und Ausbreitung der Radionuklide im Lager und in dessen Umgebung bei den gegebenen Barriereigenschaften;
- Testen der Sensitivität des Systems mit probabilistischen und deterministischen Methoden;
- Bestimmung von repräsentativen Fällen, anhand derer Unsicherheiten und Lageroptionen beurteilt werden können.

Bei der Gewährleistung der Sicherheit kommt folgenden gut verstandenen und wirksamen Eigenschaften des Lagersystems, den "Pfeilern der Sicherheit", eine Schlüsselfunktion zu {NSB, 6.2}:

- Platzierung des Lagers im tiefen, geologisch stabilen Untergrund;
- äusserst gering durchlässiges Wirtgestein;
- günstiges chemisches Umfeld;
- Bentonitverfüllung beim Lagerteil für BE/HAA ;
- BE/HAA-Lagerbehälter;
- BE/HAA-Abfallmatrizen.

Beim Referenzszenarium wird davon ausgegangen, dass die verschiedenen Barrieren für bestimmte Zeiträume eine Schutzwirkung ausüben {NSB, Fig. 6.3-1). Die Berechnung der Freisetzung beginnt im Referenzfall mit dem Versagen des Lagerbehälters.

Ein Schlüsselkapitel stellt die Behandlung von Unsicherheiten {NSB, 6.8} dar. Hier werden neben dem Referenzszenarium als Alternativen einerseits die Freisetzung gasförmiger Radionuklide entlang von spezifischen Gaspfaden und andererseits Szenarien des unbeabsichtigten Eindringens und der Lageraufgabe ohne vollständigen Verschluss betrachtet. Ein weiterer Analyseteil betrifft so genannte "Was-wenn"-Fälle ("What-if"-Fälle), wo Szenarien und Prozesse betrachtet werden, welche nach Ansicht der Nagra ausserhalb dessen liegen, was vernünftigerweise als möglich gilt. Mit diesen Fällen soll vor allem die Robustheit getestet werden.

Im Rahmen der betrachteten Änderungen am Lagersystem wird auch der Ersatz der Stahlbehälter durch Kupferbehälter untersucht {NSB, 6.8.3}.

Bemerkungen der KSA

Die von der Nagra durchgeführten Modellrechnungen folgen einem klassischen Vorgehen und sind nachvollziehbar. Die Resultate hängen von der Wahl der Modellparameter ab. Die KSA hat diese Modellrechnungen nicht nachgerechnet, sondern hat sich in Unterkapitel 3.3 der vorliegenden Stellungnahme darauf konzentriert, den Nachweis der Robustheit des betrachteten Lagersystems zu beurteilen.

3.2.7 Ermittlung der Schutzwirkung des Lagersystems {NSB, 7}

Ziel des Kapitels {NSB, 7} ist die Ermittlung der Wirksamkeit des Lagersystems durch quantitative Analyse der in {NSB, 6} bestimmten Rechenfälle.

Aussagen der Nagra

Das breite Spektrum der Fälle, welche in der Sicherheitsanalyse betrachtet und quantitativ erfasst werden, dokumentiert das Sicherheitsniveau des Lagersystems. Gleichzeitig wird auch der Einfluss verschiedener möglicherweise schädigender Einflüsse und Unsicherheiten ausgewiesen.

Nach Angaben zu den verwendeten Messgrössen und der Referenzierung der mathematischen Modelle und Computercodes werden die für den Referenzfall aus den gelagerten BE/HAA/LMA errechneten Individualdosen präsentiert {NSB, 7.4.2}. Sodann werden die Parameter, wie z.B. das Abfallinventar pro Lagerbehälter, die Lebensdauer der Behälter usw., variiert und die Dosenberechnungen wiederholt. Für den Referenzfall und die betrachteten Parametervariationen bleiben die errechneten Individualdosen um zwei bis

drei Grössenordnungen unterhalb des Schutzziels von 0,1 mSv/a gemäss Richtlinie HSK-R-21.

Sodann werden im Rahmen des Referenzszenariums die Auswirkungen von folgenden Annahmen untersucht:

- löslichkeitsbegrenzte Auflösung des Brennstoffs {NSB, 7.4.3};
- Beeinträchtigung des Bentonits infolge Wärmeeinwirkung {NSB, 7.4.4};
- Durchflussänderungen im Opalinuston infolge wiederholter Vergletscherung der Erdoberfläche {NSB, 7.4.5};
- Einbezug der Barrierenwirkung der Rahmengesteine {NSB, 7.4.6};
- zusätzlicher Freisetzungspfad über Zugangstollen und Lagerschacht {NSB, 7.4.7};
- Stollenschumpfung zum Zeitpunkt des Versagens der Lagerbehälter nicht abgeschlossen {NSB, 7.4.8};
- erhöhte Porenwasserverdrängung infolge der Gasproduktion {NSB, 7.4.9}.

In zwei alternativen Szenarien werden die Freisetzung flüchtiger Radionuklide entlang von Gaswegen {NSB, 7.5} sowie die Anbohrung des Lagers, die Wassergewinnung aus dem Malm-Aquifer und die Aufgabe des Lagers ohne korrekte Verfüllung und Versiegelung der Zugangsrampe untersucht {NSB, 7.6}.

Bei allen Szenarien bleiben die errechneten Dosen um Grössenordnungen unterhalb des Dosiswerts von 0,1 mSv/a gemäss Schutzziel 1 von HSK-R-21. Am nächsten kommt man diesem Dosiswert bei unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen, wo der Abstand zum Schutzziel eine Grössenordnung beträgt {NSB, Fig. 7.6-2}.

So genannte "What-if"-Fälle werden in {NSB, 7.7} zur Illustration der Lagerrobustheit untersucht. Diese Fälle beschreiben extreme Bedingungen des Lagersystems und werden in Abschnitt 3.3.3 der vorliegenden Stellungnahme näher betrachtet. Gemäss {NSB, Fig. 7.7-7} unterschreiten die Dosen das Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21 für alle "What-if"-Fälle um mindestens eine Grössenordnung.

In {NSB, 7.8} werden Auslegungs- und Systemoptionen untersucht. Für den Fall eines erhöhten Abfallinventars sind die errechneten Dosen proportional zum Inventar erhöht. Für LMA, welche durch COGEMA mit einer alternativen Methode behandelt wurden, ergeben sich gegenüber dem Referenzfall keine Veränderungen der Dosen. Schliesslich wird auch der Fall der Ummantelung der Stahlbehälter für BE/HAA mit einer Kupferhülle untersucht. Daraus ergäben sich gemäss {NSB, 7.8.4} eine Reduktion der errechneten Individualdosen um 10 % und eine Verschiebung des Zeitpunkts der Freisetzung in die Biosphäre um 100'000 Jahre.

In {NSB, 7.9} werden die durch Unsicherheiten in der Biosphäre bedingten Auswirkungen auf die Dosis analysiert. Gemäss dieser Analyse, sei es auf Grund des Referenzszenariums, sei es auf Grund eines unterschiedlichen Szenariums zu Klimaentwicklung oder Geomorphologie, bleiben die Dosen immer noch um mindestens zwei Grössenordnungen unterhalb des Dosiswerts gemäss Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21.

Die Resultate aus der Evaluation der Leistungsfähigkeit des Lagersystems sind in {NSB, 7.10} zusammengefasst.

Bemerkungen der KSA

Das Referenzszenarium mit seinen Variationen und die gerechneten Abweichungen vom Referenzfall decken ein breites Feld von Möglichkeiten der künftigen Entwicklung des Lagersystems ab, welches aus Sicht des Stands des heutigen Wissens bis an die Grenzen der vorstellbaren Abweichungen reicht. Die KSA ist der Ansicht, dass der Referenzfall und die betrachteten Abweichungen und Variationen korrekt gewählt wurden. Mit den "What-if"-Fällen geht die Analyse noch über diese Grenzen hinaus und testet die Robustheit des Lagersystems in erweitertem Rahmen. Dieser Schritt der Analyse, d.h. der erweiterte Test der Robustheit, wird in Abschnitt 3.3.3 der vorliegenden Stellungnahme näher betrachtet.

3.2.8 Der Sicherheitsnachweis: wichtigste Schlussfolgerungen und Resultate {NSB, 8}

In {NSB, 8} sind die Argumente aus den vorhergehenden Kapiteln des Sicherheitsberichts zusammengefasst.

Aussagen der Nagra

In {NSB, 8.2.8.1} sind die Werte der Individualdosen für die verschiedenen Rechenfälle zusammengestellt, in {NSB, 8.2.8.2} für den Referenzfall die zeitlichen Verläufe der Werte von zusätzlich untersuchten Sicherheitsindikatoren. Diese zusätzlichen Sicherheitsindikatoren sind:

- Radiotoxizität der Abfälle;
- Toxizitätsfluss vom Lager zur Ober- und Untergrenze Opalinuston;
- Konzentration der Radiotoxizität im Opalinuston;
- Verteilung der Radiotoxizität in den verschiedenen Teilen des Lagersystems;

Die Analyse kommt zum Schluss, es sei kein Fall identifiziert worden, in welchem die Sicherheit gefährdet würde.

Betrachtungen zur weiteren Planung und Entwicklung weisen namentlich auf Experimente im Rahmen des Mont-Terri-Projekts hin, auf Vergleiche mit Tongesteinen in Frankreich und Belgien sowie mit Projekten in Schweden und Finnland.

Beurteilung durch die KSA

Die Zusammenstellung in {NSB, 8} entspricht den Aussagen in den vorangehenden Kapiteln der Sicherheitsanalyse. Bezüglich der Schutzziele und Sicherheitsindikatoren sei auf die Aussagen in Unterkapitel 3.3 der vorliegenden Stellungnahme verwiesen. Die Nagra konzentriert sich auf den Nachweis der Einhaltung von Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21. Sie weitet die Sicherheitsanalyse sodann auf Toxizitätsbetrachtungen aus und zieht Varianten mit unterschiedlichen Abgabepfaden in ihre Betrachtungen mit ein.

3.3 Beurteilung von Robustheit und Konservativität

3.3.1 Realisierung von Robustheit

Aussagen der Nagra

Folgende Auslegungsmerkmale führen zu Sicherheit und Robustheit des Lagersystems {NSB, 2.6.2.2}:

- das Multibarrierenprinzip mit passiven auf diversitären Mechanismen beruhenden technischen und geologischen Barrieren;
- die Stabilität und die Langlebigkeit, gewährleistet durch die Wahl einer stabilen geologischen Situation und die Verwendung langlebiger Materialien für die technischen Barrieren;
- das Vermeiden von Phänomenen, welche die Sicherheit nachteilig beeinflussen, bzw. die Unempfindlichkeit des Lagers gegenüber derartigen Phänomenen;
- die Reduktion der Wahrscheinlichkeit und der Konsequenzen unbeabsichtigten menschlichen Eindringens, erzielt durch Sicherstellung der Information über das Lager für künftige Generationen, durch Vermeiden von Ressourcenkonflikten, durch die Verteilung der BE und HAA auf getrennt gelagerte Einzelgebände und weit auseinander liegende Lagerstollen bzw. durch die beschränkte Grösse der Lagertunnels für die LMA sowie durch die Verfestigung und Verpackung der Abfälle.

Nach Auffassung der Nagra tragen insbesondere auch die "Pfeiler der Sicherheit" (vgl. Unterkapitel 3.2.6) zur Robustheit bei {NSB, S. 54}.

Platzierung und Auslegung des Lagersystems führen zu Eigenschaften, welche die Sicherheit unterstützen und nachteilige Phänomene vermeiden oder mildern sowie die Unsicherheiten einschränken. Die Sicherheitsanalyse zeigt, dass das Lagersystem gegen verschiedene nachteilige Phänomene und Unsicherheiten robust ist. Die Nagra verweist zudem auf weitere Möglichkeiten, um das Vertrauen in die Robustheit zu erhöhen.

Die Nagra hält zusammenfassend fest: "Das System ist robust, d. h. die verbleibenden Unsicherheiten können die Sicherheit nicht infrage stellen." {NSB, S. 344}

Beurteilung durch die KSA

Auch die KSA ist überzeugt, dass das gewählte Lagerkonzept und die spezifischen Auslegungsmerkmale, wie die als "Pfeiler der Sicherheit" bezeichneten Eigenschaften, ein hohes Mass an Robustheit zur Folge haben. Wesentliche Beiträge leisten das sehr dichte Wirtgestein und die Platzierung im tiefen Untergrund mit einfachem geologischem Aufbau in einer tektonisch ruhigen Gegend. Diese Platzierung erhöht nicht nur die Robustheit, sondern vereinfacht auch die Sicherheitsanalyse.

Ein wichtiges Element der Robustheit ist die funktionale Unabhängigkeit der einzelnen Barrieren. Insbesondere sollen in keiner Barriere Prozesse ablaufen, welche das Potenzial haben, sich in entscheidendem Ausmass nachteilig auf die Rückhaltefähigkeit von anderen Barrieren auszuwirken. Da beim betrachteten Lagersystem hinsichtlich Sicherheit und Robustheit den sehr günstigen Eigenschaften des ungestörten Wirtgesteins die massgebende Rolle zukommt (Abschnitt 3.3.3), hat nach Auffassung der KSA die Gewährleistung der Integrität dieser Barriere grösste Bedeutung. Die KSA kommt auf dieses Thema in Unterkapitel 3.4 zurück.

Mit der Fokussierung auf das Zürcher Weinland werden Entscheidungsalternativen ausgeschlossen, obschon laut Nagra die Wahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Optionen ein weiteres Element der Robustheit ist {NSB, Fig. 2.4-1}.

3.3.2 Konservativitäten des Referenzfalls

Nachfolgend legt die KSA die von der Nagra beim Referenzfall unterstellten Konservativitäten dar und leitet daraus Aussagen über die Robustheit des Lagersystems ab.

Angaben der Nagra

Dem Referenzfall sind konservative konzeptionelle Annahmen und Parameterwerte zu Grunde gelegt. Konkret werden folgende FEPs als Reserve-FEPs bezeichnet und beim Referenzfall nicht berücksichtigt:

- der sehr lange Zeitraum, bis das Lager und seine Umgebung wieder mit Wasser gesättigt sind, und die damit verbundene Verzögerung des Beginns der Korrosion der Gebinde und der Auflösung der Abfallmatrizen; {NSB, S. 240 und 243}
- die Mitfällung von Radionukliden mit andern aus dem Brennstoff, der Glasmatrix und der Behälterkorrosion stammenden Mineralien wird nur beim Radium berücksichtigt; {NSB, S. 240}
- die Transportverzögerung der Radionuklide innerhalb der Abfallgebände; {NSB, S. 241}
- die Sorption der Radionuklide durch die Behälterkorrosionsprodukte; {NSB, S. 240 und 242}
- die durch die bereits vorhandenen natürlichen Isotope bedingte, zusätzliche Reduktion der effektiven Löslichkeit von Radionukliden im Porenwasser des Bentonit; {NSB, S. 188 und 240}
- die Phase des vollständigen Einschlusses der Abfälle in den Fässern und Behältern bei den LMA. {NSB, S. 242}
- die infolge der langsamen Korrosion der metallischen Materialien verzögerte Freisetzung von Radionukliden bei den LMA; {NSB, S. 242}
- die Langzeitimmobilisierung in der Geosphäre. {NSB, S. 246}

Darüber hinaus sind im Referenzfall u. a. nach Auffassung der Nagra folgende Annahmen konservativ:

- Alle BE- und HAA-Lagerbehälter versagen gleichzeitig nach 10'000 Jahren. {NSB, S. 188}
- Die Auflösungsrate des Brennstoffs wird durch die radiolytische Produktion von Oxidationsmitteln kontrolliert. {NSB, S. 238}
- Die BE- und die HAA-Lagerbehälter behindern nach ihrem Versagen weder den Wasserzutritt noch die Radionuklidfreisetzung. {NSB, S. 188}
- Bei den LMA wird angenommen, dass nach 100 Jahren die Radionuklide in der Abfallmatrix nicht mehr zurückgehalten werden und umgehend ins Porenwasser freigesetzt werden. {NSB, S. 189}
- Bei den LMA wird der infolge der pH-Fahne (Ausbreitungsgebiet im Wirtgestein mit erhöhtem pH-Wert) erwartete Selbstheilungseffekt in der Auflockerungszone nicht berücksichtigt. {NSB, S. 175}

- Der Barriereneffekt der Rahmengesteine sowie der weiteren unter und über dem Opalinuston liegenden Sedimente wird nicht berücksichtigt. {NSB, S. 190}
- Die Verzögerung der Radionuklide in den lokalen und regionalen Aquiferen wird nicht berücksichtigt. {NSB, S. 177}
- Die betroffenen Personen verzehren ausschliesslich lokal produzierte Nahrungsmittel und verbringen das ganze Leben in der Region. {NSB, S. VII und 119}

Beurteilung durch die KSA

Wie die obigen Aufzählungen zeigen, hat die Nagra beim Referenzfall mehrere FEPs nicht berücksichtigt und darüber hinaus mehrere konservative Annahmen getroffen. Nach Auffassung der KSA hat sie weitere konservative Annahmen getroffen, welche aber nicht als solche deklariert werden.

Die Nagra hat nach Ansicht der KSA in Einzelfällen aber auch eher optimistische Annahmen getroffen: Dies trifft z. B. für die Annahme zu, alle Lagerbehälter für die BE und die HAA seien dicht. Auch die von der Nagra verwendeten Löslichkeitslimiten für Radionuklide im Porenwasser der Bentonitverfüllung scheinen der KSA auf Grund der Erfahrungen mit Deponiewässern eher auf der optimistischen Seite zu liegen.

In Abwägung aller Aspekte kommt die KSA zu Schluss, dass beim Referenzfall die konservativen Annahmen die eher optimistischen stark überwiegen und der Referenzfall als konservativ eingestuft werden kann. Die Tatsache, dass für diesen Fall die ermittelte maximale Individualdosis trotzdem ca. vier Zehnerpotenzen unter dem in der Richtlinie HSK-R-21 in Schutzziel 1 vorgegebenen Wert von 0,1 mSv/a liegt, weist auf grosse Robustheit des Lagersystems hinsichtlich Einhaltung dieses Schutzziels hin.

Den Rahmengesteinen wird beim Referenzfall keine Barrierenwirkung beigemessen, weil gemäss Nagra die entsprechende Datenbasis zu wenig gesichert ist. Mit zwei auf dem Referenzszenarium basierenden Rechenfällen klärt die Nagra allerdings die Auswirkungen dieser zusätzlichen geologischen Barriere auf die Individualdosen ab: In einem Fall ergibt sich eine Dosis, die um ca. einen Faktor 2 kleiner ist als jene im Referenzfall, und im anderen um ca. einen Faktor 20. Die KSA ist der Meinung, dass die Rahmengesteine eine wichtige geologische Barriere darstellen und deshalb deren Wirkung genauer abgeklärt werden sollte. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 3-1

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

3.3.3 "What-if"-Fälle

Angaben der Nagra

Um die Robustheit des Lagersystems zu überprüfen, hat die Nagra eine Reihe von "What-if"-Fällen untersucht {NSB, 7.7}. Bei diesen unterstellt sie Phänomene und Parameterwerte, die nach ihrer Auffassung ausserhalb des Bereichs liegen, der auf Grund wissenschaftlicher Erkenntnisse als möglich erachtet wird. Um deren Anzahl zu beschränken, wurde die Überprüfung auf Störungen beschränkt, welche Auswirkungen auf die Schlüsseigenschaften der "Pfeiler der Sicherheit" haben. Konkret hat die Nagra die folgenden "What-if"-Fälle analysiert:

- Fall 1: Der vertikale Wasserfluss im Opalinuston ist 100-mal grösser als im Referenzfall. {NSB, S. 293}
- Fall 2: Die Ausbreitung erfolgt entlang von tektonischen, nicht lagerbedingten Störungen im Opalinuston. Im Basisfall wird hier eine Störung mit der Transmissivität $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ und einem hydraulischen Gradienten von 1 unterstellt; diese tangiert alle 27 BE/HAA-Lagerstollen und führt in jedem die aus einem Behälter ins Nahfeld freigesetzte Aktivität ab. Als Variante werden zwei tektonische Störungen vorausgesetzt, welche aus jedem Stollen die aus zwei Behältern ins Nahfeld freigesetzte Aktivität abführen. Als Parametervariation wird zudem angenommen, dass die Transmissivität der Störungen 10-mal grösser ist, d. h. $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. {NSB, S. 296}
- Fall 3: Es werden um den Faktor 10 bzw. 100 erhöhte Brennstoffauflösungsraten unterstellt. {NSB, S. 297}
- Fall 4: Eine Redox-Front durchdringt das Nahfeld. Im Bereich der Lagerbehälter entsteht somit ein oxidierendes Milieu, wodurch die Löslichkeits- und die Sorptionswerte im Nahfeld sowie die Auflösungsraten der Abfallmatrizen bei den BE und den LMA um den Faktor 10 erhöht werden. Bei den LMA-1-Abfällen wird nur die Variante "Hochdruckverpresste Abfälle" betrachtet. Beim Transport durch den Opalinuston werden die Löslichkeitslimiten nicht berücksichtigt. {NSB, S. 300}
- Fall 5: Beim LMA-Lager fliesst das infolge der Gasentwicklung verdrängte kontaminierte Porenwasser ausschliesslich über die Stollen weg. Es werden ein mittlerer Wasserfluss von $0,05 \text{ m}^3/\text{a}$ angenommen und das Zeitintervall von 10'000 bis 40'000 Jahre betrachtet bzw. als Parametervariation $0,3 \text{ m}^3/\text{a}$ und 1'000 bis 10'000 Jahre; im ersten Fall fließen 50 % und im zweiten 100 % der mobilen Aktivität des Lagers über den Stollen weg. {NSB, S. 301}
- Fall 6: Das C-14 liegt in flüchtiger Form vor. Das C-14-haltige Gas füllt zuerst den freien Porenraum im Nahfeld und in der Auflockerungszone. Dann diffundiert es ungehindert durch den Opalinuston in den Wedelsandstein. Die Gasakkumulation im Wedelsandstein wird berücksichtigt. Im Weiteren wird unterstellt, dass weder im Tunnel noch im Opalinuston Gas horizontal wegströmt. Es wird eine Stahlkorrosionsrate von $1 \mu\text{m}/\text{a}$ zu Grunde gelegt. Dieser Fall wird für die Werte der Permeabilität des Opalinuston für Gas von 10^{-23} m^2 (Basisfall), 10^{-22} m^2 und 0 m^2 durchgerechnet. Bei der Ermittlung der Dosen werden nichtflüchtige Radionuklide nicht berücksichtigt. {NSB, S. 302}
- Fall 7: Unterstellt werden das Versagen der Behälter mit den BE und HAA nach 100 Jahren bzw. der Behälter mit den LMA nach null Jahren, 10-mal höhere Brennstoff- und Hüllrohrauflösungsraten als im Referenzfall sowie ungünstige chemische Eigenschaften des Nahfelds und der Geosphäre. Als Parametervariationen werden Rechnungen mit einem 10- bzw. 100-mal höheren Wasserfluss im Opalinuston durchgeführt.
- Fall 8: Der Transport der Radionuklide durch das Nahfeld und die Geosphäre erfolgt ausschliesslich mittels Diffusion.
- Fall 9: Die Hüllrohrauflösungsrate ist um einen Faktor 10 erhöht.
- Fall 10: Es wird angenommen, dass das Iod weder im Nahfeld noch in der Geosphäre sorbiert wird. Die Werte der Sorptionskoeffizienten von Iod sind im Referenzfall: $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ für Bentonit, $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ für Zement und $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ für Opalinuston.
- Fall 11: Die Transportdistanz im Opalinuston beträgt nur 30 m anstelle von 40 m im Referenzfall.

Gemäss Nagra liegen die für die "What-if"-Fälle ermittelten Dosen maximal um bis zu zwei Grössenordnungen höher als die für den Referenzfall ermittelten. Sie bleiben aber in

allen Fällen um mindestens einen Faktor 10 unter dem in der HSK-R-21 festgelegten Schutzziel von 0,1 mSv/a. Beim Fall 8 sind die Dosen kleiner als im Referenzfall. {NSB, S. 306}

Beurteilung durch die KSA

Die für die "What-if"-Fälle ermittelten maximalen Individualdosen liegen, trotz zum Teil sehr konservativer Annahmen, alle um mindestens eine Grössenordnung unter dem in der Richtlinie HSK-R-21 in Schutzziel 1 vorgegebenen Wert von 0,1 mSv/a. Dies weist auf zusätzliche Robustheit des Lagersystems hin.

Bei allen Fällen mit ungünstigen Annahmen bezüglich Eigenschaften des Opalinuston sind die Dosiswerte deutlich höher als jener für den Referenzfall: (vgl. Anhang)

- im Fall 1 (100-mal höherer Wasserfluss im Opalinuston) ca. einen Faktor 40;
- in den Fällen 2 (durchgehende Störzonen im Opalinuston) und 7 (erhöhter Wasserdurchfluss im Opalinuston kombiniert mit ungünstigen Nahfeldeigenschaften) bis ca. einen Faktor 200.

Dies zeigt, dass die guten Rückhalteeigenschaften des Opalinuston für die Langzeitsicherheit und die Robustheit des Lagers zentral sind. Es müssen deshalb alle Vorkehrungen getroffen werden, um eine mögliche Beeinträchtigung dieser Barriere auszuschliessen. Die KSA kommt auf diesen Punkt in Unterkapitel 3.4 zurück.

Nach Ansicht der KSA sind die "What-if"-Fälle zweckmässig gewählt. Wie aber die Nagra selber bemerkt, sind sie in ihrer Gesamtheit nicht abdeckend. Beispielsweise sollte auch der Fall untersucht werden, wenn das infolge Gasentwicklung verdrängte kontaminierte Porenwasser aus den BE- und HAA-Lagerstollen über die Stollen und den Zugangstunnel bzw. Entlüftungsschacht abfliesst. Es ist nämlich nicht anzunehmen, dass die Gasentwicklung sofort zum Stillstand kommt, wenn die Lagerbehälter undicht geworden sind.

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 3-2

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.

3.4 Behältermaterial und korrosionsbedingte Gase

Wie aus Abschnitt 3.3.3 hervorgeht, dominiert der Opalinuston mit seinen hervorragenden Eigenschaften das insgesamt sehr gute Rückhaltevermögen des vorgeschlagenen Lagersystems. Es stellt sich deshalb für die Beurteilung der Robustheit des Gesamtsystems die Frage, ob die Eigenschaften des Opalinustons allenfalls durch Prozesse beeinträchtigt werden könnten, die durch das Lager selber induziert sind. Nach Ansicht der KSA sind speziell die thermische Belastung durch Nachzerfallswärme und die mechanische Belastung durch Gasfreisetzung sowie kombinierte Wirkungen zwischen diesen und andern Vorgängen zu beachten.

Im Vordergrund steht die Gasproduktion durch Korrosion der aus Stahl bestehenden Lagerbehälter. Zusätzlich wird Gas durch Radiolyse gebildet; allerdings ist die Menge im Vergleich zur Korrosion vernachlässigbar. Allfällige Gasproduktion infolge Zersetzung von

eingelagerten Organika wird nicht berücksichtigt. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich daher auf das BE/HAA-Lager.

3.4.1 Ausgangslage

Nach Verfüllung und Stollenverschluss in Porenräumen verbliebene Luft wird durch langsam aus dem Opalinuston einsickerndes Wasser verdrängt. In der Folge setzt im sauerstoffarmen Milieu in Gegenwart des Wassers anaerobe Korrosion ein. Dabei wird vor allem Eisen der Lagerbehälter mit Wasser oxidiert und der im Gegenzug reduzierte Wasserstoff in Form von Gas freigesetzt.

Die Korrosionsreaktionen zwischen metallischem Behälterwerkstoff und wässriger Umgebung werden von verschiedenen thermodynamischen und reaktionskinetischen Faktoren bestimmt. Aus thermodynamischer Sicht ist die treibende Kraft für die Wasserstoffentwicklung umso grösser, je "unedler" das Metall ist. Die Reaktionskinetik wird durch verschiedene Faktoren wie Bildung von Oxidschichten, Zusammensetzung der Metalllegierung und Stoffaustausch an der Metalloberfläche beeinflusst.

Die Korrosionsrate wird auf Grund von Messungen bei den vorgesehenen Lagerbehältern aus Stahl im Langzeitmittel auf etwa 1 µm/Jahr geschätzt. Anfänglich werden die Werte wesentlich höher sein. Grund für die Abnahme sind Oberflächenschichten (z.B. Magnetit), die wie oben dargelegt die Korrosionsrate herabsetzen. Falls derartige Schichten von Korrosionsprodukten abplatzen, sind auch kurzfristig wieder erhöhte Gasproduktionsraten denkbar.

Die Gasproduktionsrate ist direkt gekoppelt mit der Korrosionsrate. Entsprechend wird auch die Gasproduktion zu Beginn relativ hoch sein und danach abnehmen. Basierend auf dem Langzeitmittelwert für die Korrosionsrate von 1 µm/Jahr geht die Nagra von 0,1 Normalkubikmeter Gas pro Jahr und Behälter aus.

3.4.2 Angaben der Nagra

Auf Grund von theoretischen Analysen und experimentellen Erfahrungen aus verschiedenen Versuchen wurde ein vereinfachtes Modell des Gastransports von den korrodierenden Behältern in das Verfüllmaterial – im Falle des BE/HAA-Lagers Bentonit – und in den Opalinuston entwickelt. Das Modell beruht auf Annahmen zu folgenden gestaffelten Prozessen [50, S. 75-76]:

- Gasentwicklung durch anaerobe Korrosion;
- Gaslösung im Porenwasser des Nahfeldes und Diffusion von gelöstem Gas in den Opalinuston;
- Druckaufbau der Gasphase bis zum Porenwasserdruck (ca. 6,5 MPa; dies entspricht dem hydrostatischen Druck auf Lagerebene) und anschliessend Porenwasserverdrängung und – falls die Gasfreisetzungsrates die Aufnahmefähigkeit durch Lösung und Diffusion sowie Porenwasserverdrängung übersteigt – darüber hinaus;
- Kapillarleckagen in den Opalinuston ab einem Druck von ca. 11,5 MPa;
- Bei weiterem Druckanstieg bilden sich ab ca. 13 MPa dilatante Strömungspfade im Opalinuston. Sie breiten sich auf Grund der vorherrschenden Spannungsverhältnisse im Wirtgestein bevorzugt in der Lagerebene aus und vergrössern so das mittels Kapillarleckagen erschliessbare Volumen für die Gasaufnahme.

- Freisetzung in den Wedelsandstein nach Durchdringen des Wirtgesteins und/oder nach Gasmigration entlang Rampe bzw. Schacht.

Die Abb. 3.4-1 und 3.4-2 zeigen die Langzeitentwicklungen des Gasdrucks und der Länge der dilatanten Risse bei einer Korrosionsrate von 1 µm/Jahr.

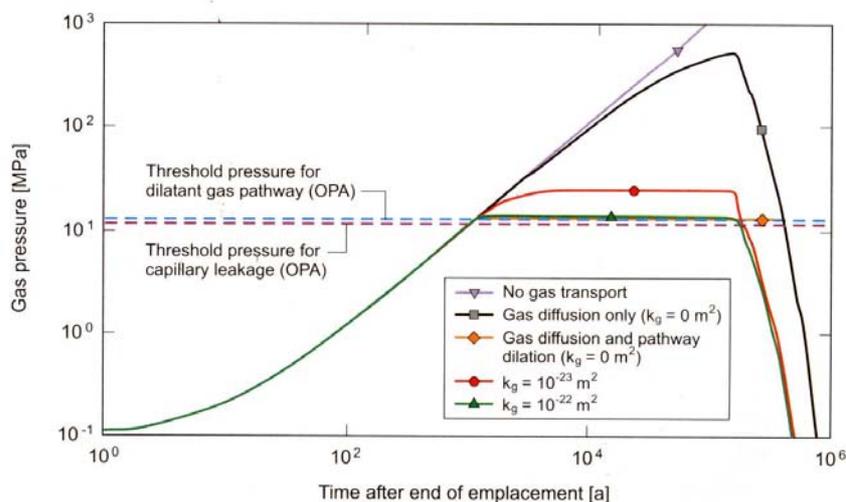


Abb. 3.4-1: Verlauf des Gasdrucks in einem Lagerstollen für BE unter Berücksichtigung von Gasdiffusion und Kapillarleckage durch 2-Phasen-Strömung (Korrosionsrate 1 µm/Jahr).⁴ [50, Fig. 5.2-8]

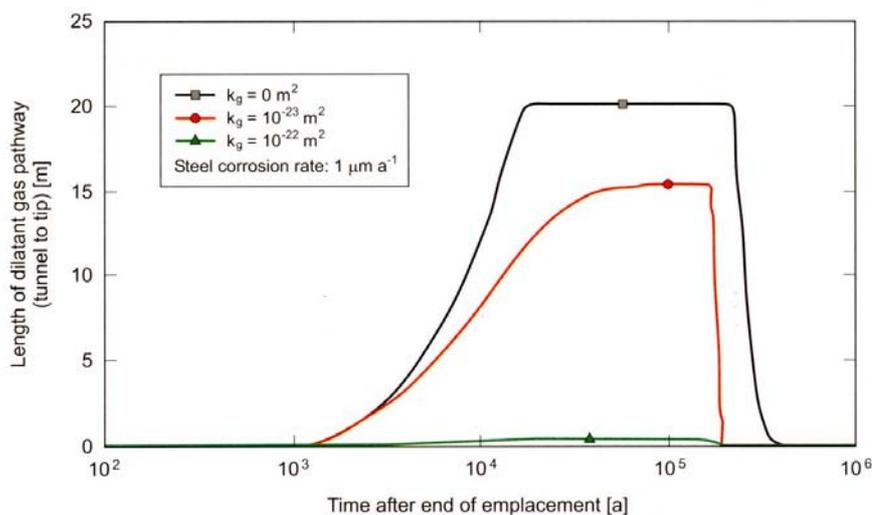


Abb. 3.4-2: Wachstum eines repräsentativen dilatanten Gas-Strömungspfad von einem Lagerstollen für BE in den Opalinuston unter Berücksichtigung von Diffusion und Kapillarleckage durch 2-Phasen-Strömung ab Stollen und horizontalen dilatanten Strömungspfaden; Berechnung der Nagra für einen Druck von 13 MPa und eine Korrosionsrate von 1 µm/Jahr.⁴ [50, Fig. 5.2-9]

Je nach Modellannahmen bauen sich Drücke zwischen 10 und 25 MPa im Stollenbereich auf (Abb. 3.4-1). Die Modellrechnungen zeigen auf, dass die Ausbreitung der

⁴ aus dem Englischen übersetzt

hydraulischen Störung im Opalinuston (Front der Druckstörung) bei 13 MPa Porendruck je nach Modellannahme für die Gaspermeabilität im Bereich von 15–20 m liegen kann (Abb. 3.4-2). Gemäss diesen Modellrechnungen wird nach etwa 20'000 Jahren ein quasistationärer Zustand erreicht.

Die Nagra geht davon aus, dass die entstehenden Mikrorisse wieder heilen, sobald der Porenwasserdruck sinkt. Diese Annahme stützt sich auf verschiedene Experimente an Bohrkernen aus dem Felslabor Mont Terri und von der Sondierbohrung Benken. [51, S. 22–23]

3.4.3 Beurteilungen durch die KSA

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, wie der sich aufbauende Gasdruck in den Stollen auf den umhüllenden Bentonit und den Opalinuston wirken wird, und ob die Gasaufnahme in der geologischen Barriere die Transporteigenschaften dieser Barriere für gelöste Radionuklide verändert.

3.4.3.1 Auswirkungen Gasproduktion

Das in Abschnitt 3.4.2 angesprochene vereinfachte Modell der Nagra stützt sich auf Best-estimate-Annahmen und ist nachvollziehbar. Das Verhalten von schwerlöslichen Gasen unter hohem Druck im Opalinuston ist aber sehr komplex und die den Berechnungen der Nagra zu Grunde liegenden Modellannahmen sind mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Nach Ansicht der KSA ist das Langzeitverhalten des Opalinustons unter der Beanspruchung von Gasen unter hohem Druck nicht genügend abgeklärt.

Die KSA hat mit einfachen und konservativen Modellannahmen die Gasausbreitung abgeschätzt. Wie im Modell der Nagra wird angenommen, dass das Gas Porenwasser verdrängen kann. In der einfachen Modellierung der KSA wird jedoch unterstellt, dass sich Mikrorisse in alle Richtungen gleichermassen ausbreiten und erhalten bleiben sowie keine "dilatanzkontrollierte" Gasausbreitung stattfindet.

Sowohl das Best-estimate-Modell als auch das konservative Modell zeigen, dass sich das H₂-Gas in vertikaler Richtung bis an den Rand des Opalinustons ausbreiten kann. Es stellt sich die Frage, ob dieses Phänomen die Transporteigenschaften des Opalinustons für Radionuklide verändern kann, indem sich die viel schnellere Ausbreitung in radialen Mikrorissen dem langsamen Transport durch Diffusion überlagert und damit die Barrierenwirkung des Opalinustons schwächt.

Nach Meinung der KSA ist die Selbstheilung von mechanischen Störungen im Opalinuston ein wichtiger Prozess für dessen hervorragende Barriereeneigenschaft. Die angeführten Versuche und Erfahrungen der NAGRA liefern jedoch keine abschliessenden Beweise, wie sich der Opalinuston über grosse Zeiträume von mehreren tausend Jahren unter hoher Druckbelastung von schwerlöslichem Gas verhält. Insbesondere bestehen keine Erfahrungen, ob mit der Bildung der Mikrorisse in den ersten 20'000 Jahren gleichzeitig auch der Transport beschleunigt wird. Ausserdem ist noch nicht genügend geklärt, wie sich die über längere Zeit andauernde Temperaturerhöhung auf die Eigenschaften des Opalinustons auswirken.

Das IRT hält fest [56, S. 84], dass die Nagra in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte im Verständnis und in der Modellierung der Gasmigration gemacht habe. Die unterschiedlichen Prozesse seien im Sicherheitsbericht gut dargelegt und die Gasthematik habe in der gegenwärtigen Projektphase ausreichende Beachtung gefunden. Das IRT stellt aber auch fest, dass die Gasmigration durch gering durchlässige Formationen komplizierte Prozesse mit sich bringe, welche noch nicht vollständig bekannt und verstanden seien. Das IRT empfiehlt, die experimentellen Untersuchungen der

Gastransportprozesse fortzuführen. Auch sollte die Modellierung der Gastransportprozesse in Bezug auf eine erhöhte Durchlässigkeit infolge Mikroriss-Erzeugung verbessert werden. Ferner seien weitere Anstrengungen notwendig, um die grundlegenden Ansätze zum Zweiphasenfluss und die entsprechenden Rechencodes zu validieren.

Die deutsche Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) stellt fest [59], dass durch Korrosion von Metall, bakterielle Zersetzung organischer Abfallinhaltsstoffe und Radiolyse in einem Endlager Gase entstehen können. Diese könnten zu Veränderungen des chemischen Milieus im Nahfeld und zum Aufbau von Gasdrücken führen, die für die Integrität des Wirtsgesteins als geologische Barriere problematisch sein könnten. Diese Auswirkungen müssten gegebenenfalls bei der Auslegung eines Endlagers und beim Sicherheitsnachweis berücksichtigt und durch Gegenmassnahmen vermieden oder gemildert werden.

3.4.3.2 Alternative Werkstoffe zur Reduktion der Wasserstoff-Entwicklung

Auf Grund der erwähnten noch bestehenden Unsicherheiten ist die KSA der Ansicht, dass neben den möglichen Auswirkungen der Gasentwicklung auf den Bentonit und den Opalinuston auch Wege zur Reduktion der Gasentwicklung abgeklärt werden sollten, indem für die Behälter alternative Materialien gesucht werden.

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.

Alternative metallische Werkstoffe

Der für die Endlagerbehälter vorgeschlagene Stahl ist bezüglich Gasproduktion verglichen mit vielen anderen metallischen Werkstoffen ein ungünstiges Material. Sogar Gusseisen zeigt bei 50 °C in granitischem Grundwasser und in Grundwasser im Gleichgewicht mit Bentonit eine fünfmal tiefere Wasserstoffproduktion als Kohlenstoffstahl [65]. Als Ursache dafür wurde entweder eine unterschiedliche Oxidschicht, bedingt durch Unterschiede in der Zusammensetzung und im Gefüge des Grundmaterials, oder eine bessere Haftung der Oxidschicht auf Gusseisen als auf Kohlenstoffstahl vermutet. Bei 85 °C Umgebungstemperatur wurden allerdings fast identische Wasserstoffproduktionsraten für Gusseisen und für Kohlenstoffstahl gefunden.

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 [66].

Auch die Konsequenzen von Schweisssfehlern sind analysiert worden [36]. Hierbei kamen die Autoren zum Schluss, dass Schweisssfehler keinen negativen Einfluss auf die lokale Korrosion von Kupferbehältern haben können.

Ein Vorteil des Konzepts von Behältern mit einer Kupferplattierung ist, dass in Schweden und Finnland bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden (z.B. [35]). In neuesten Arbeiten werden Methoden zur Echtzeitverfolgung der Kupferkorrosion untersucht; mit diesen Methoden ist es möglich, gleichmässige und lokale Korrosion zu detektieren [58]. Um die Eignung von Kupferbehältern für das Schweizer Konzept zu beurteilen, sollte jedoch die spezifische Umgebung berücksichtigt werden. Allgemein bekannt ist, dass Kupferkorrosion u. a. stark durch mikrobiologische Einflüsse oder durch die Präsenz von Sulfiden beeinflusst werden kann. Auch die Kompaktheit des Bentonits hat einen Einfluss auf die Kupferkorrosion [60].

Auch viele andere als Behältermaterial vorgeschlagene metallische Werkstoffe, wie beispielsweise nicht rostende Stähle, Nickellegierungen (Alloy 22) oder Titan, zeigen im Vergleich zu Kohlenstoffstahl stark reduzierte Wasserstoffproduktionsraten. Der Grund dafür ist eine stabile, passive Schutzschicht. Auch diese Materialien sind bezüglich des Korrosionsverhaltens in Endlagern für radioaktive Abfälle untersucht worden (z.B. [64] [15]). Diese Werkstoffe haben zwar den Vorteil niedriger Gasbildungsrate, lassen aber vor allem Fragen bezüglich der Anfälligkeit auf lokale Korrosionsangriffe offen (nicht rostende Stähle, Alloy 22).

Alternative nichtmetallische Werkstoffe

Bei nichtmetallischen Werkstoffen (z. B. Keramik, Glas) sind die Degradationsprozesse nicht elektrochemischer Natur. Deshalb ist eine allfällige Degradation eines Keramikbehälters keine Quelle für Wasserstoff.

In der Literatur ist nur wenig zur Anwendung nichtmetallischer Werkstoffe als Behältermaterialien zu finden. Die mechanischen Eigenschaften (z. B. Sprödigkeit) sind typischerweise kritischer als bei Metallen. Es sollte jedoch abgeklärt werden, wie weit neuere Werkstoffkonzepte dieses Problem schon zu lösen vermögen.

In einer anderen Literaturquelle werden Graphit und Siliziumkarbid als geeignet für Behältermaterialien erwähnt, jedoch ohne genauere Angaben [69]. Das Materialverhalten von Siliziumkarbid und Verbundwerkstoffe aus Siliziumkarbid ist im Zusammenhang mit anderen Anwendungen ausführlich untersucht worden.

In älterer Literatur sind Untersuchungen zu Aluminiumoxid als Behälterwerkstoff zu finden [1] [20]. Die Autoren in [1] kommen zum Schluss, dass mit Behältern aus Aluminiumoxid wahrscheinlich sehr lange Einschusszeiten (Millionen von Jahren) erreicht werden können.

Keramische Werkstoffe könnten auch zum Beschichten von Stahlbehältern eingesetzt werden. Bei genügender Langzeitstabilität der Beschichtung würde dies die Stahlkorrosion und dadurch die Gasentwicklung verhindern.

3.4.4 Folgerungen der KSA

In Übereinstimmung mit der Nagra stellt die KSA fest, dass sich durch Korrosion der Stahlbehälter grosse Gasmengen entwickeln werden. Die KSA ist der Meinung, dass die damit verbundenen Einwirkungen und Auswirkungen auf das Wirtgestein nicht vollständig geklärt sind. Auf Grund des heutigen Kenntnisstands kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass der Opalinuston seine hervorragenden Barriereigenschaften durch Rissbildungen infolge der Gasfreisetzung zum Teil verlieren könnte. Da damit die dominante Barriere im vorgeschlagenen Lagersystem geschwächt würde, muss alles daran gesetzt werden, den Gaseintrag zu minimieren, sodass die Geologie möglichst wenig zusätzlich gestört wird.

Es ist nahe liegend, Behältermaterialien zu prüfen, die eine wesentlich geringere oder keine Korrosion mit Gasentwicklung in der gegebenen geologischen Umgebung aufweisen. Bei der Wahl von inerten Behältermaterialien würden die angesprochenen Unsicherheiten bezüglich des Langzeitverhaltens des Opalinustons wegfallen. Die Nagra hat alternative Behältermaterialien in Betracht gezogen und vor allem auf die Erfahrungen mit Kupferbehältern in Finnland und Schweden hingewiesen [50, S. 27]. Die Nagra verfolgt derartige Alternativen jedoch nicht aktiv, sondern erwähnt sie im Sinn einer Rückfallposition.

Da die Eignungsprüfung für neuartige Werkstoffkonzepte mit sehr viel Forschungsaufwand und entsprechendem Zeitbedarf verbunden ist, empfiehlt die KSA, möglichst rasch ein entsprechendes Forschungsprogramm zu starten. Um einerseits kreative Werkstoff- und Behälterkonzepte zu evaluieren, sollen neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaften einbezogen werden; andererseits sollen speziell im Bereich Keramik bzw. Glas Kenntnisse und Erfahrungen, die aus andern Anwendungen stammen, im Sinn maximaler Produktsicherheit bzw. minimaler Entwicklungsrisiken systematisch ausgewertet werden.

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 3-3

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.

3.5 Beurteilung des Sicherheitsnachweises

Die KSA gelangt zu folgenden Resultaten:

- Die Methodik des Sicherheitsnachweises ist adäquat und entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- Die Tatsache, dass sich das betrachtete Lager im tiefen, geologisch einfach aufgebauten und ruhigen Untergrund befindet, wirkt sich nicht nur positiv auf die Sicherheit aus, sondern vereinfacht auch die Sicherheitsanalyse und damit die Führung des Sicherheitsnachweises, da beispielsweise die Zahl der möglichen Freisetzungspfade stark eingeschränkt ist.
- In der Sicherheitsanalyse wird die Barrierenwirkung der Rahmengesteine nur in einem Rechenfall berücksichtigt. Dieser Fall zeigt, dass Rahmengesteine einen positiven Beitrag zur Sicherheit leisten können. Die KSA empfiehlt deshalb, nach erfolgter Standortwahl die Eigenschaften der Rahmengesteine genauer abzuklären und deren Barrierenwirkung in der Sicherheitsanalyse zu berücksichtigen.
- Als zentralen Aspekt erachtet die KSA die Robustheit des Lagersystems. Robustheit kann als Mass für die Unempfindlichkeit der integralen Barrierenwirksamkeit gegenüber (inneren und äusseren) Einflüssen und Unsicherheiten angesehen werden. Die Tatsache, dass im Referenzfall das Schutzziel 1 mit grossen Reserven eingehalten wird, obwohl eine ganze Reihe von konservativen Annahmen getroffen ist, weist auf eine grosse Robustheit des Lagersystems hin. Dieser Eindruck wird durch die Resultate der Untersuchung der "What-if"-Fälle verstärkt. Die KSA ist aber der Auffassung, dass im Rahmen der Weiterführung des Programms die Robustheit

des Lagersystems durch die Analyse weiterer Fälle systematisch und umfassender untersucht werden sollte.

- Ein wichtiger Aspekt der Sicherheit und der Robustheit eines geologischen Tiefenlagersystems ist die funktionelle Unabhängigkeit der einzelnen Barrieren. Die KSA ist der Meinung, dass auf Grund des heutigen Kenntnisstands nicht ausgeschlossen werden kann, dass die hervorragenden Barriereneigenschaften des Opalinuston durch die Gasfreisetzung infolge Korrosion der aus Stahl bestehenden Lagerbehälter beeinträchtigt werden. Nach ihrer Auffassung sollten Wege zur deutlichen Verminderung der Gasentwicklung gesucht werden. Sie empfiehlt deshalb, im Rahmen eines Forschungsprogramms alternative Behälterwerkstoffe und Behälterkonzepte zu evaluieren.
- Weiterhin könnten im Lagerteil für die abgebrannten Brennelemente und die hochaktiven Abfälle die über längere Zeit erhöhten Drücke und Temperaturen einen Einfluss auf die Wirksamkeit der Barrieren haben. Nach Auffassung der KSA sollten deshalb die Auswirkungen der über längere Zeit erhöhten Temperaturen und Drücke auf das Transportverhalten von Opalinuston und Bentonit untersucht werden.

Die KSA kommt zu folgendem Schluss:

Der Sicherheitsnachweis der Nagra ist nachvollziehbar. Die Resultate der Sicherheitsanalyse weisen darauf hin, dass das betrachtete Tiefenlagersystem hinsichtlich der Einhaltung des in der HSK-R-21 festgelegten Schutzziels 1 von 0,1 mSv pro Jahr grosse Robustheit aufweist. Damit ist aus Sicht der KSA der Sicherheitsnachweis erbracht. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms besteht Bedarf für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten; von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage der für die Abfallbehälter verwendeten Werkstoffe.

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms macht die KSA folgende Empfehlungen:

Empfehlung 3-1

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

Empfehlung 3-2

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.

Empfehlung 3-3

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.

4 Standortnachweis

Im vorliegenden Kapitel wird der Standortnachweis beurteilt. Zugehöriges übergeordnetes Dokument der Nagra ist der Geosynthesebericht [44]⁵.

Gemäss Unterkapitel 2.1 gilt: *"Der Standortnachweis muss auf Grund dokumentierter Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existiert, so dass die Realisierung eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte."* Bei ihrer Beurteilung des Standortnachweises prüft die KSA die Vollständigkeit der Anforderungen an den Standort und die Frage, ob der Nachweis nachvollziehbar und stichhaltig ist.

Beim angesprochenen Standortgebiet handelt sich nicht um die Bezeichnung eines effektiven Lagerstandorts und somit nicht um eine Standortwahl. Dafür ist ein Verfahren im Rahmen eines Sachplans nach Raumplanungsgesetz vorgesehen (vgl. Unterkapitel 1.3), wobei sicherheitstechnische, soziale, politische, wirtschaftliche und raumplanerische Aspekte einbezogen werden müssen (vgl. Bemerkungen der KSA in Abschnitt 3.2.3).

4.1 Anforderungen an den Standort

Angaben der Nagra

Gemäss {NGS, S. 9} sind die wichtigsten sicherheitstechnischen Anforderungen an die geologische Umgebung eines Tiefenlagers, *"dass sie sowohl einen langzeitigen Schutz der technischen Barrieren liefert und damit deren Langzeitstabilität und -dauerhaftigkeit gewährleistet als auch eine effektive stabile Barriere für die Migration von Radionukliden darstellt, welche aus den technischen Barrieren freigesetzt werden. Ferner muss es in der Praxis möglich sein, überzeugend nachzuweisen, dass diese Anforderungen an die geologische Umgebung erfüllt sind und dass die bautechnische Machbarkeit gewährleistet ist. Daraus abgeleitet sollte ein Standort folgende Prinzipien erfüllen:*

- *Geologische Langzeitstabilität: Ein stabiles geologisches Umfeld mit einer optimalen Schutzwirkung für einen Betrachtungsraum von einer Million Jahren und mehr an einem Standort zu finden, der in einem tektonisch stabilen Gebiet mit geringen Hebungs- und Erosionsraten liegt.*
- *Günstige Wirtgesteinseigenschaften: Günstige hydrogeologische und geochemische Bedingungen – geringe hydraulische Durchlässigkeit und stabile, reduzierende geochemische Verhältnisse – sind essenziell, sowohl im Hinblick auf das allgemeine Verhalten und die Langzeitentwicklung der technischen Barrieren wie auch bezüglich der Eigenschaften und des Verhaltens des Wirtgesteins als Radionuklid-Barriere. Ebenso wichtig sind die geotechnischen (felsmechanischen) Eigenschaften des Wirtgesteins im Hinblick auf die technische Machbarkeit des Tiefenlagers (Bau, Betrieb, Verschluss).*
- *Genügende Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers: Es muss ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit den im Sicherheitsnachweis festgehaltenen Eigenschaften existieren, damit hinsichtlich Platzierung eines Tiefenlagers den Befunden der Exploration Rechnung getragen werden kann.*

⁵ Nachfolgend wird die Referenz [44] für den Nagra-Geosynthesebericht durch das Akronym NGS ersetzt. Entsprechende Referenzangaben erfolgen in geschwungener Klammer, fallweise ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurennummer usw.

- *Vermeidung von Störeinflüssen: Das geologische Umfeld eines Tiefenlagers kann prinzipiell von einer Anzahl von Phänomenen negativ beeinträchtigt werden. Diese umfassen geologische Ereignisse, menschliche Aktivitäten sowie Effekte, welche durch das Lager selbst induziert werden. Es werden deshalb Standorte gesucht, die geologisch ruhig und stabil sind, und aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich interessanten natürlichen Ressourcen beinhalten, die ein Risiko für menschliches Eindringen darstellen.*
- *Robustheit gegenüber Störeinflüssen: In der Praxis können nicht alle Störeinflüsse vermieden werden; deshalb werden Standorte mit Eigenschaften, welche diese Störeinflüsse abschwächen, bzw. ihre Auswirkungen klein halten, bevorzugt.*
- *Explorierbarkeit: Der gewählte Standort muss in einem Ausmass zuverlässig charakterisierbar sein, dass der Sicherheitsnachweis überzeugend erbracht werden kann. Ein einfacher geologischer Bau eines Standorts und ein möglichst homogenes Wirtgestein kann deren Charakterisierung erleichtern und zuverlässiger machen. Das Vorhandensein seismischer Kontraste in Gesteinsschichten ober- und unterhalb des Wirtgesteins ist günstig für die Erfassung der vertikalen und lateralen Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers sowie für die Erkennung von Bruchstrukturen.*
- *Prognostizierbarkeit: Die geologische Entwicklungsgeschichte des Standortgebiets sollte gut bekannt und verstanden sein, zumindest im Zeitmassstab, der in der Sicherheitsanalyse betrachtet wird. Dies erlaubt eine Einengung möglicher Entwicklungspfade des Standorts über eine ähnliche Zeitdauer in der Zukunft. Ein geologisch-tektonisch ruhiges Umfeld erleichtert die Prognostizierbarkeit der Entwicklung.*

Diese Grundanforderungen sind konsistent mit den im Beurteilungskonzept für den Standortnachweis [22] formulierten 'Grundanforderungen an das Standortgebiet'"

Beurteilung und Bemerkungen der KSA

Die KSA ist der Ansicht, dass die oben aufgelisteten Anforderungen im Allgemeinen stichhaltig, bezüglich geologischer Kriterien vollständig und internationalem Standard gemäss definiert sind.

Zu den einzelnen Anforderungen bringt die KSA folgende ergänzenden Bemerkungen an:

- **Geologische Langzeitstabilität:** Diese Stabilität betrifft interne (endogene) geologische Prozesse, welche beispielsweise mit Gebirgsbildungen, Grabenbrüchen oder Vulkantätigkeit verbunden sind. Die Frage der regionalen Ausdehnung des Gebietes, welches der Anforderung geologischer Langzeitstabilität entsprechen muss, ist im Vorland der Alpen von Wichtigkeit, wirkte sich doch die Alpenfaltung auf ganz Zentraleuropa, von der Alpenfront bis in die Sedimentbecken von Südengland aus. Generell gilt die Anforderung, dass die stabile Zone die Ausdehnung des Lagerbereichs für die jeweils betrachteten Prozesse angemessen übertreffen muss, sodass eventuelle geologische Ereignisse, welche ausserhalb oder an der Grenze der stabilen Zone wirksam sind, die Sicherheit des Lagers nicht beeinträchtigen.
- **Günstige Wirtgesteinseigenschaften:** Ein kritischer Aspekt dieser Anforderung liegt in der grundsätzlich nicht auszuschliessenden gegenseitigen Beeinflussung zwischen technischen Barrieren (Abfall und Abfallmatrix, Lagerbehälter, Verfüllung und Versiegelungsbauwerke) und geologischen Barrieren (Wirtgestein und Geosphäre). So kann eine Wirtgesteinseigenschaft, in Abhängigkeit der Anordnung und Dimensionierung der verschiedenen Elemente des geologischen Tiefenlagers (Test-, Haupt- und Pilotlager; Lagerbereiche für BE/HAA und LMA), aber auch der Wahl der Materialien für die technischen Barrieren (z.B. Abfallbehälter), mehr oder weniger günstig sein. Dieser Umstand bedingt im Verlaufe des Projekts eine permanente

Prüfung der möglichen Wechselwirkungen zwischen technischen und geologischen Barrieren.

- Genügende Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers: Die Erfüllung dieser Anforderung hängt wiederum von der wechselseitigen Beziehung zwischen Wirtgesteinsgeometrie und Anordnung und Dimensionierung der verschiedenen Lagerelemente ab (siehe hierzu Kapitel 5 "Machbarkeitsnachweis"). Vgl. auch Spiegelstrich "Geologische Langzeitstabilität".
- Prognostizierbarkeit: Die Forderung nach Prognostizierbarkeit deckt sich teilweise mit der Anforderung nach geologischer Langzeitstabilität, bezieht aber weitere Prozesse mit ein. Der Nachweis der Prognostizierbarkeit ist ein wissenschaftlich schwieriges Unterfangen, dessen Resultate wohl immer wieder angefochten werden können. Erschwert wird der Nachweis namentlich durch von Menschen verursachte Ereignisse und durch Ereignisse, die in der Erdgeschichte noch nie registriert wurden. Ein sehr breiter Konsens in der Welt der Wissenschaft und der Öffentlichkeit ist in diesem Punkt notwendig, um das erforderliche Mass an Vertrauen in eine Entsorgungslösung zu erreichen.

4.2 Nachvollziehbarkeit und Stichhaltigkeit des Nachweises

Angaben der Nagra

In {NGS, Fig. 1.2-1} ist der Aufbau des Standortnachweises dargelegt. Dieser folgt dem Schema:

- Einleitung und Grundsätze {NGS, 1}; im Speziellen: Komponenten und allgemeine zeitliche Entwicklung eines geologischen Tiefenlagers {NGS, 1.3};
- Begründung der Fokussierung der Untersuchungen auf Tongesteine {NGS, 1.4};
- Begründung der Fokussierung der Untersuchungen auf die Nordschweiz auf Grund eines Satzes von geologischen Kriterien {NGS, 2.1 und 2.2};
- Abklärung der Wirtgesteinsoptionen {NGS, 2.3};
- Festlegung der Option Opalinuston im Zürcher Weinland {NGS, 2.3.3 und 2.3.4};
- Ergebnisse der erdwissenschaftlichen Untersuchungen in der Nordschweiz, geologische und hydrogeologische Verhältnisse und Eigenschaften des Wirtgesteins im Zürcher Weinland {NGS, 3 bis 5};
- Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland und hydrogeologische Barrierenwirkung {NGS, 6};
- Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtgestein und die Entwicklung des Stollenumfeldes {NGS, 7};
- Geologische Langzeitentwicklung {NGS, 8};
- Geologischer Datensatz für den Standortnachweis, den Nachweis der Langzeitsicherheit und der Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers {NGS, 9};
- Projektbezogene Schlussfolgerungen und Bewertung des Kenntnisstands {NGS, 10}.

Beurteilung durch die KSA

Der Standortnachweis der Nagra ist aus Sicht der KSA nachvollziehbar. Dabei hält die Kommission aber fest, dass die Fokussierung auf das Zürcher Weinland keiner Anforderung des Entsorgungsnachweises im Sinne des Gesetzes entspricht.

Die sachgerechte Durchführung des Nachweises und vor allem die geologisch-hydrogeologischen Aspekte werden im Expertenbericht der KNE [37] im Detail beurteilt. Die KSA geht in Unterkapitel 7.2 näher auf diesen Expertenbericht ein. Die KNE kommt zum Schluss, dass der Standortnachweis erbracht ist. Ausserdem formulierte sie zahlreiche Empfehlungen für ergänzende Untersuchungen im Rahmen der nächsten Projektphase. Die KSA hält die Argumentationen und die Schlussfolgerung der KNE für stichhaltig und schliesst sich generell deren Empfehlungen an.

5 Machbarkeitsnachweis

Im vorliegenden Kapitel wird der Machbarkeitsnachweis beurteilt. Zugehöriges übergeordnetes Dokument der Nagra ist der Bericht zum Anlagen- und Betriebskonzept [43]⁶.

Gemäss Unterkapitel 2.1 gilt: *"Der Machbarkeitsnachweis muss zeigen, dass im gewählten Wirtgestein ein geologisches Tiefenlager, unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften, mit den heute vorhandenen technischen Mitteln gebaut, betrieben und langfristig sicher verschlossen werden kann."*

5.1 Einführung, Rahmen und Umfang der Stellungnahme der KSA

In der Einleitung {NAB, 1} hält die Nagra fest, dass der Nachweis auf die Gegebenheiten im Opalinuston des Zürcher Weinlands ausgerichtet sei und auf dem Konzept der geologischen Tiefenlagerung beruhe. Mit letzterem referenziert die Nagra das so genannte "EKRA-Konzept" [16] [17], welches im Wesentlichen in die neue Kernenergiegesetzgebung (KEG/KEV) aufgenommen worden ist.

Die KSA konzentriert sich bei ihrer Beurteilung der Machbarkeit auf die grundsätzlichen Fragen der Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung gemäss KEG/KEV, unter Berücksichtigung des diesem Gesetz zu Grunde liegenden Konzepts der EKRA (siehe hierzu Abschnitt 2.5).

5.2 Grundlagen der Planung

Angaben der Nagra

In {NAB, 2} beschreibt die Nagra die Grundlagen der Lagerplanung:

– Rechtsgrundlagen:

Die Nagra verweist auf die (alte) Atomgesetzgebung, auf Gesetze und andere Regelwerke zu den Bereichen Transport, Umweltschutz, Raumplanung, Gewässerschutz, Arbeitsschutz und Brandschutz sowie auf fachspezifische Regeln und Normen. Auf diese Unterlagen wird in den weiteren Kapiteln des Nagra-Berichts fallweise verwiesen.

– Auslegungsgrundlagen:

Die Auslegung des Lagers beruht auf dem Sicherheitskonzept, welches die Begrenzung der Freisetzung der Radionuklide mit Hilfe von gestaffelten Sicherheitsbarrieren (Mehrfachbarrieren) bezwecke. Diese Barrieren seien

- (a) die technischen Barrieren bestehend aus Abfallmatrix, Behälter und Verfüllmaterial und
- (b) die natürlichen Barrieren, bestehend aus Wirtgestein und Geosphäre.

⁶ Nachfolgend wird die Referenz [43] für den Nagra-Bericht zum Anlagen- und Betriebskonzept durch das Akronym NAB ersetzt. Entsprechende Referenzangaben erfolgen in geschwungener Klammer, fallweise ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurennummer usw.

Im Abschnitt zum Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung werden das Konzept und seine technischen Elemente (Testlager, Pilotlager und Hauptlager) sowie deren Funktionen beschrieben. In einem ergänzenden Bericht [53] wird das Konzept der Untersuchungen im Test- und Pilotlager ausführlicher behandelt.

- Projektgrundlagen bezüglich Standort und geologische Verhältnisse:
Hier beschreibt die Nagra die lokalen geologischen Verhältnisse (Lagertiefe, Schichtmächtigkeit, Schichtneigung, hydrogeologische Verhältnisse, Felsmechanik), welche dem Projekt zu Grunde gelegt werden {NAB, 2.3; siehe hierzu auch NGS}.
- Einzulagernde Abfälle:
Der Beschreibung der Abfalltypen und Gebindeabmessungen legt die Nagra für die BE und die HAA (Glaskokillen der Wiederaufbereitungsabfälle) Lagerbehälter aus Stahl zu Grunde. {NAB, 2.4}
Der Referenzfall für Abfallmengen und –gewichte entspreche dem erwarteten Abfallanfall, falls die bestehenden Kernkraftwerke während 60 Jahren betrieben würden (Stromproduktion 192 GWa). Es werde davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahme des Lagers ein grosser Teil der zu erwartenden Gesamtabfallmenge vorliege und entsprechend den Bedürfnissen des Lagerbetriebs angeliefert werden könne. Der Baubeginn werde entsprechend festgelegt. Als Optionen bezüglich Abfallmengen wird die Ausdehnung auf gewisse MIF-Abfälle betrachtet bzw. von einer grösseren Stromproduktion (300 GWa) ausgegangen.

Beurteilung durch die KSA

- Rechtsgrundlagen:
Die Aufzählung der Rechtsgrundlagen im Hinblick auf die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers ist nicht vollständig. Auf nationaler Ebene ist beispielsweise die Umweltschutz- und Raumplanungsgesetzgebung nicht erwähnt. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Berichte zum Entsorgungsnachweis lag von der Kernenergiegesetzgebung erst ein Entwurf des KEG vor. Sodann fehlt eine Betrachtung zu Verpflichtungen der Schweiz aus internationalen Abkommen (Convention on Nuclear Safety [26], Joint Convention [28]).
- Auslegungsgrundlagen:
Im Basisdokument {NAB}, ergänzt durch den nachgereichten Bericht [53] werden die Vorstellungen bezüglich Testlager und Pilotlager sowie Überwachung dem aktuellen Stand des Projekts entsprechend ausgeführt. Insgesamt sind die zentralen Anforderungen von KEG und KEV, welche sich auf das Konzept der EKRA berufen, wie "Kontrollierbarkeit", "Beobachtungsphase", "Rückholbarkeit", "(rascher) Verschluss" in den vorliegenden Unterlagen aber nicht so weit konkretisiert, dass sie abschliessend bewertet werden können. Die endgültigen Konzepte zur Überwachung des Pilotlagers können zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht den Einbezug technologischer und wissenschaftlicher Fortschritte bis zur Realisierung des geologischen Tiefenlagers. Die anstehenden Probleme zeigen aber, dass teilweise Neuland betreten wird, weshalb frühzeitig an Konzeptionen und Lösungen gearbeitet werden muss (vgl. Unterkapitel 5.4).
Die erforderlichen Abklärungen zum Pilotlager sind nach Ansicht der KSA zu einem grossen Teil abgedeckt durch die Informationen im ergänzenden Bericht [53] der Nagra. Die Frage nach dem von der EKRA vorgeschlagenen Selbstverschlussbauwerk, welches das Pilot- und das Hauptlager bei Bedarf ohne menschlichen Eingriff verschliesst, bleibt allerdings unbeantwortet. Dieses Bauwerk könnte nach Ansicht der KSA einen wertvollen Beitrag zur passiven Sicherheit des Lagers leisten. Daraus leitet die KSA im Hinblick auf die Weiterführung des Programms folgende Empfehlung ab:

Empfehlung 5-1

Die Machbarkeit eines Selbstverschlussbauwerks soll in einer Studie abgeklärt werden.

Die KSA ist mit der generellen Umschreibung des Sicherheitskonzepts {NAB, 2.2.1} einverstanden. Nach ihrer Ansicht sollten die Funktionen, welche den einzelnen Barrieren innerhalb des Barrierensystems zukommen, festgehalten und daraus für die einzelnen Barrieren Mindestanforderungen bzw. Auslegungskriterien, wie beispielsweise Druckfestigkeit der Behälter oder Rückhaltevermögen des Verfüllmaterials, abgeleitet werden. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 5-2

Für die einzelnen Barrieren sollen Mindestanforderungen bzw. Auslegungskriterien festgelegt werden.

Insgesamt beurteilt die KSA die vorliegenden Angaben zu den Auslegungsgrundlagen im Stadium des Entsorgungsnachweises als genügend.

– Standort und geologische Verhältnisse:

Die Unterlagen zeigen, dass die Lagerkonzeption unter technischen Gesichtspunkten wie Lagertiefe, Schichtmächtigkeit, Schichtneigung, hydrogeologische Verhältnisse und Felsmechanik für ein geologisches Tiefenlager im Referenzstandortgebiet Zürcher Weinland zweckmässig ist.

– Einzulagernde Abfälle:

In ihren Aussagen zu den einzulagernden Abfällen postuliert die Nagra, dass die Menge und die Eigenschaften der Abfälle sowie der Zeitpunkt für deren Einlagerung weitgehend durch den Betrieb der Kernanlagen (z.B. Höhe des Abbrandes, Einsatz von MOX) vorgegeben seien. Aus der Sicht der KSA bedeutet dies bezüglich BE/HAA, dass beispielsweise auch bei der Kernauslegung und der Festlegung des maximalen Abbrandes den Erfordernissen der Entsorgung bis und mit geologischer Tiefenlagerung Rechnung getragen werden muss. Dies entspricht – in sinngemässer Erweiterung auf den Betrieb von Kernkraftwerken – auch der Zielrichtung von Art. 4 Abs. iii der Joint Convention [28], wonach die geeigneten Massnahmen zu treffen sind, "um die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Schritten der Behandlung abgebrannter Brennelemente zu berücksichtigen." Entsprechend sind LMA so zu behandeln und zu konditionieren, dass sie möglichst wenig organische Stoffe enthalten [28, Art. 11 Abs. iii]. Die KSA leitet daraus im Hinblick auf die Weiterführung des Programms folgende Empfehlung ab:

Empfehlung 5-3

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 Abbrandes, hinsichtlich LMA für den Gehalt an organischen Stoffen.

5.3 Auslegung und bautechnische Machbarkeit der Anlage

Angaben der Nagra

Die Nagra gibt in {NAB, 3.1} einen Überblick über das Layout der Gesamtanlage. Sodann beschreibt sie die oberirdischen Anlagen {NAB, 3.2}, die unterirdischen Anlagen {NAB, 3.3} mit Zugangstunnel, Testlager, zentralem Bereich, Haupttunnel, Lagerzone

BE/HAA, Lagerbereich LMA, Schacht und Schachtfuss. Es folgt eine Beschreibung der technischen Ausrüstungen im Tiefenlager {NAB, 3.4}, namentlich hinsichtlich Lüftung, elektrotechnischer Einrichtungen, Wasserhaltung, u. a. m. Den Handhabungseinrichtungen für die Abfälle ist {NAB, 3.5} gewidmet. {NAB, 3.6} legt das Konzept für die Strahlenschutz zonen dar und {NAB, 3.7} zeigt Varianten für die Auslegung der Gesamtanlage.

Eng verbunden mit dem Layout der Anlage ist die Frage der bautechnischen Machbarkeit, welche in {NAB, 4} behandelt ist. Nach einer ausführlichen Einführung {NAB, 4.1} belegt die Nagra anhand felsmechanischer Berechnungen die Dimensionierung der Untertagebauwerke {NAB, 4.2 und 4.3} und zeigt auf, mit welchen technischen Methoden diese erstellt werden sollen. Die Realisierung ist unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte in mehreren Etappen vorgesehen {NAB, 4.4 und 4.5}.

Aussagen der KNE

Das Layout und die bautechnische Machbarkeit des Lagers wurden durch die KNE im Detail geprüft. Dabei kam diese Expertenkommission zu folgendem Schluss [37, S. H16]:

"Zusammenfassend kann die bautechnische Machbarkeit des von der Nagra vorgelegten Konzeptes für ein geologisches Tiefenlager im OPA (Opalinuston) auf einer mittleren Tiefe von 650 m ... im Zürcher Weinland bestätigt werden. Die aufgeworfenen Fragen und Kritikpunkte können im Rahmen der nachfolgenden Bearbeitungsstufen gelöst werden."

Die Bemerkungen und Empfehlungen der KNE, unter Einbezug der Angaben im ergänzenden Bericht der Nagra [49], sind folgende:

- Optimierung der Linienführung des Zugangstunnels;
- Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht;
- Erstellung eines dritten Stollens beim Pilotlager;
- Nochmalige Überprüfung der Tunnel- und Schachtquerschnitte;
- Überprüfung der Zweckmässigkeit des Raisedrillverfahrens bei der Schachterstellung im Tiefenbereich 330 m bis 670 m unter Geländeoberfläche;
- Überprüfung der Wasserhaltung;
- Klärungen zum Einsatz einer Tunnelbohrmaschine;
- Untersuchungen zur Frage der Ausbruchsicherung;
- Überprüfung der technischen Ausrüstung des Schachtes;
- Detaillierte Ausführung der Flucht- und Rettungsmöglichkeiten;
- Ermittlung der Brandlasten im Rahmen eines Sicherheitskonzeptes ab Bauetappe 3;
- Erhöhung der Luftmengen zur Belüftung in Bauetappe 3;
- Prüfung zusätzlicher Kühlungsmöglichkeiten sowie rauchfreie Luftversorgung in Rettungsbombe und Zugangsbereich;
- Prüfung verschiedener Optimierungsmöglichkeiten.

Beurteilung durch die KSA

Die Ausführungen der KNE sind aus der Sicht der KSA nachvollziehbar, hinsichtlich Machbarkeit umfassend und stichhaltig. Die KSA schliesst sich den Ausführungen und Empfehlungen der KNE an.

Ergänzend stellt die KSA fest, dass die EKRA gemäss Konzeptskizze (Abb. 2.5-1) 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 [16][17] 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.

5.4 Monitoring / Instrumentierung

Mit der Übernahme der Vorgaben aus dem EKRA-Konzept der kontrollierten geologischen Tiefenlagerung in die Gesetzgebung stellt sich neu das Problem der Überwachung bzw. des Monitoring der Lagerelemente. Dazu Art. 66 Abs. 1 und 2 KEV:

- ¹ *Im Pilotlager ist das Verhalten der Abfälle, der Verfüllung und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase zu überwachen. Bei der Überwachung sind im Hinblick auf den Verschluss Daten zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises zu ermitteln.*
- ² *Die Ergebnisse der Überwachung müssen auf die Vorgänge im Hauptlager übertragbar sein. Sie bilden die Grundlage für den Entscheid über den Verschluss des Tiefenlagers.*

Angaben der Nagra

Im Bericht "Konzept der Untersuchungen im Test- und Pilotlager sowie der übertägigen Anlagenüberwachung" [53] listet die Nagra die Möglichkeiten auf, die sich bezüglich Experimenten und Untersuchungen nach dem heutigen Stand der Technik anbieten. Der vorläufige Charakter dieser Auflistung wird explizit festgehalten; das definitive Programm für die Arbeiten im Test- und Pilotlager könne erst wenige Jahre vor der Realisierung der Lagerkomponenten erarbeitet werden, basierend auf dem dazumal gültigen Entwicklungsstand.

Im Testlager werden im Wesentlichen Experimente und Messungen vorgesehen, wie sie schon aus den Felslabors bekannt sind. Dank der einfacheren Zugänglichkeit ist die Instandhaltung der Instrumentierung im Testlager möglich. Problematischer in dieser Hinsicht präsentiert sich das Pilotlager. Ausgehend von einer Dauer der Beobachtungsphase von bis zu 100 Jahren werden die Schwierigkeiten einer In-situ-Instrumentierung erläutert: Einerseits sollte die Instrumentierung möglichst keine physischen Verbindungen mit der Aussenwelt aufweisen, um nicht hydraulische Kurzschlüsse oder potenzielle Transportwege für Radionuklide zu bilden; andererseits können solche Systeme, wenn sie sich selbst überlassen werden, Abwanderungen in der Messgenauigkeit (Drift) unterliegen oder Fehlfunktionen bis hin zum vollständigen Ausfall aufweisen.

Die Nagra sieht als mögliche Lösungen:

- Einsatz von diversitären Messprinzipien und Messsensoren bei der Erfassung der geophysikalischen Grössen, damit die erfassten Werte gegenseitig validiert werden können.
- Durchführung von Simulationstests: Im Testbereich oder allenfalls auch übertäglich sollen 1:1-Mock-ups der BE-Lagerbehälter möglichst gleich gelagert und

instrumentiert werden wie ein Behälter des Pilotlagers. In den Mock-ups wird die Zerfallswärme elektrisch simuliert. Falls die Instrumentierung von Behältern im Pilotlager und von Mock-up zur gleichen Zeit in Betrieb genommen und den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt werden, kann deren Verhalten in Funktion der Zeit direkt verglichen werden. Sollten Probleme auftreten, so würden die Ursachen beim Mock-up analysiert.

Die Nagra erwähnt auch neuartige, auf Glasfasern basierende Sensoren sowie Messsysteme mit kabelloser Übertragung, die allerdings auf eine In-situ-Energiequelle angewiesen sind. Generell sei auf diesem Gebiet der Erfahrungsrückfluss bezüglich Langzeitverhalten noch zu gering.

Bezüglich zeitraffender Experimente postuliert die Nagra die Möglichkeit eines Demonstrationstests mit Mock-up und künstlicher Aufsättigung, um die Prozesse und somit die Langzeitentwicklung im Nahfeld zu beschleunigen.

Für das Hauptlager erfolgt das Monitoring von der Oberfläche aus; eine In-situ-Instrumentierung wird nicht erwähnt.

Beurteilung durch die KSA

Nach Auffassung der KSA ist das Monitoringkonzept relevant für den Betrieb des geologischen Tiefenlagers und hier speziell für den Entscheid bezüglich des Abschlusses der Überwachungsphase bzw. des definitiven Verschlusses.

Damit die notwendige Forschung und Entwicklung effizient vorangetrieben werden können, ist ein Monitoringkonzept zu erstellen. Dieses soll darlegen, welche physikalischen Grössen zu erfassen sind und bei welchen Grenzwerten eine Fortsetzung des Lagerbetriebs infrage gestellt wird.

Damit die Komponenten der Messkette ingenieurmässig konzipiert werden können, sollen die dazu notwendigen Randbedingungen wie Messgenauigkeit, Messfrequenz, Umgebungsbedingungen und die einsetzbaren Werkstoffe angegeben werden. Sollte eine Umsetzung für die postulierte Einsatzdauer nicht möglich sein, sind die Bedingungen für den Einsatz einer austauschbaren oder erneuerbaren Messeinrichtung zu spezifizieren.

Bezüglich der neuen Sensoren auf Glasfaser-Basis weist die KSA darauf hin, dass Glasfasern in der Kommunikationstechnik seit über zwanzig Jahren eingesetzt werden. Um Aspekte des Langzeitverhaltens zu analysieren, können z.B. die Eigenschaften von Glasfasern nachgeprüft werden, die über längere Zeit im Innern von Erdseilen von Stromleitungen den rauen Umweltbedingungen ausgesetzt waren. Ein weiterer Problemkreis ist der Schutz der wenige Mikrometer dünnen Glasfasern bei der Verlegung im Wirtgestein; für die Identifizierung einer geeigneten Ummantelung besteht Forschungsbedarf.

Es ist zu erwarten, dass die technische Lebenszeit der eingesetzten Auswertegeräte einiges kürzer sein wird als die Beobachtungsphase. In einem Konzept soll festgehalten werden, wie die erfassten Daten und die Datendarstellung bei periodisch erneuerten Systemen konsistent erhalten werden kann. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 5-4

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

5.5 Lagerverschluss

Angaben der Nagra

In {NAB, 8} beschreibt die Nagra ihr Konzept für den Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Die Nagra sieht eine stufenweise Verfüllung und Versiegelung bis zum vollständigen Verschluss der Gesamtanlage vor. Das Konzept beruhe auf der Absicht, unter Wahrung einer der Stufe angepassten Reversibilität in jeder Situation einen optimalen Schutz der Abfälle vor internen und externen Einwirkungen sowie Einwirkungen Dritter zu erreichen {NAB, 8.2}. Es folgen Ausführungen zu den Verschlussmassnahmen im Einlagerungsbetrieb, zu Überwachung und Verschluss des Hauptlagers, Überwachung des Pilotlagers und Verschluss der Gesamtanlage.

Mit der Versiegelung solle, in Verbindung mit der streckenweisen Verfüllung, die Barrierenwirkung des durch Bauaktivitäten verletzten Wirtgesteins als Transportbarriere wieder hergestellt und auch eine gebirgsstützende Wirkung erzielt werden {NAB, 8.3}. Die Nagra beschreibt vier Gruppen von Versiegelungen: V1 für den laufenden Verschluss der jeweils gefüllten BE/HAA-Lagerstollen, V2 und V3 für den Verschluss der Bau- und Betriebstunnel bzw. des Bau- und Lüftungsschachts beim Verschluss des Hauptlagers, und schliesslich V4 für den Verschluss des Zugangstunnels beim Verschluss der Gesamtanlage.

Die Verfüllung und Versiegelung {NAB, 4} könne bei Einsatz von mehreren Equipen innerhalb von etwa 5 bis 6 Jahren erfolgen.

Beurteilung durch die KSA

Das Konzept der Nagra zu Verschluss und Versiegelung der verschiedenen Lagerteile ist realistisch und machbar. Im vorliegenden Bericht fehlen allerdings genaue Angaben zu der mit diesen Massnahmen erreichten Barrierenwirkung. Im Konzept der EKRA ist für den Verschluss im Falle eines unvorhergesehenen Ereignisses (Naturkatastrophe, Krieg oder wirtschaftlicher Niedergang) auch der rasche Verschluss bzw. der Selbstverschluss vorgesehen. Die KSA empfiehlt daher, die Machbarkeit eines Selbstverschlusses in einer Studie zu untersuchen (Empfehlung 5-1). Ferner empfiehlt sie im Hinblick auf die Weiterführung des Programms:

Empfehlung 5-5

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

5.6 Rückholbarkeit der Abfälle

Angaben der Nagra

In {NAB, 9} stellt die Nagra ein Konzept zur Rückholung der Abfälle vor. Diese könne während des Einlagerungsbetriebs, nach dem Verschluss einzelner Lagerteile oder nach dem Verschluss der Gesamtanlage erfolgen. Je nachdem müsse der Betriebstunnel wieder aufgefahren und der Zugang zu den Lagerstollen wieder freigelegt oder auch der gesamte Zugang zur Lagerzone wieder geschaffen werden. Im Lagerbereich werde mit Gesteinstemperaturen bis gegen 100 °C und darüber gerechnet werden müssen. Der Abbau des Bentonits der Lagerstollen und der Ausbau der Abfallgebinde würden mit automatisierten Geräten erfolgen. Diese Informationen werden ergänzt durch einen technischen Lösungsvorschlag für die automatisierte Rückholung der Lagerbehälter [41].

Weitere Angaben sind im Zusatzdokument "Präzisierungen der Nagra zur Frage der Rückholbarkeit ..." [52] enthalten. Danach hat die Nagra für die Studien zur Rückholung vorgegeben, dass eine Rückholung während der Betriebs- oder Beobachtungsphase, also vor dem Lagerverschluss erfolge. Dabei geht die Nagra von einer Beobachtungsphase von etwa 100 Jahren aus. In der gleichen Aktennotiz legt die Nagra dar, dass innerhalb der genannten Zeitperiode auch bei einem lecken Lagerbehälter nicht mit einer Kontamination im Bentonit zu rechnen sei, die den Radiotoxizitätsindex von Uranerz mit einem Urangehalt von 8 % übersteige.

Beurteilung durch die KSA

Beim Vorgehen, wie es von der Nagra für die Rückholung der Abfälle vorgeschlagen wird, können die Temperatur vor Ort und allenfalls die Verstrahlung problematisch sein. Nach Ansicht der KSA muss auch von Störungen an den Rückbaugeräten ausgegangen werden. Weiterer Abklärungsbedarf betrifft die zum Rückbau und zur Abfallbehandlung im Falle des Rückbaus notwendigen Oberflächenanlagen. Die KSA empfiehlt deshalb im Hinblick auf die Weiterführung des Programms:

Empfehlung 5-6

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.

Mit Art. 37 Abs. 1 Bst. b KEG wird für die Erteilung der Betriebsbewilligung vorausgesetzt, dass "die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne grossen Aufwand möglich ist." Die der Rückholstudie der Nagra zu Grunde gelegte zeitliche Vorgabe erfüllt diese Gesetzesbestimmung, sofern die Zeitvorgabe von 100 Jahren für die Beobachtungsphase nicht wesentlich ausgedehnt werden soll. Soweit die Anforderungen an den Machbarkeitsnachweis betroffen sind, kann die KSA diese Vorgabe akzeptieren. Im Übrigen ist die KSA der Ansicht, dass die Lagergeometrie dem Anliegen einer allfälligen Rückholung Rechnung trägt.

5.7 Zusammenfassende Beurteilung der KSA zum Machbarkeitsnachweis

Die KSA kommt auf Grund ihrer Beurteilung zum Schluss, dass der Machbarkeitsnachweis grundsätzlich erbracht ist und dass ein Lager im Opalinuston in der vorgesehenen Tiefe aus technischer Sicht erstellt, betrieben und sicher verschlossen werden kann. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms macht die KSA zusätzlich zu jenen der KNE folgende Empfehlungen:

Empfehlung 5-1

Die Machbarkeit eines Selbstverschlussbauwerks soll in einer Studie abgeklärt werden.

Empfehlung 5-2

Es sollen Auslegungskriterien für die einzelnen Barrieren des Lagersystems festgelegt werden.

Empfehlung 5-3

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.

Empfehlung 5-4

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

Empfehlung 5-5

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

Empfehlung 5-6

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.

6 Stellungnahme zum Gutachten der HSK

Die HSK hat ihr Gutachten zum Entsorgungsnachweis 2002 [25] in die Themen Standortnachweis, Machbarkeitsnachweises und Sicherheitsnachweis gegliedert. Das Gutachten schliesst mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse. Die nachfolgende Stellungnahme der KSA orientiert sich an der Gliederung des Gutachtens. Hinweise in geschweiften Klammern beziehen sich auf die entsprechenden Teile des HSK-Gutachtens.

6.1 Standortnachweis

Den im Rahmen des Entsorgungsnachweises zu erbringenden Standortnachweis diskutiert und beurteilt die HSK in Kapitel 2. Sie legt vorerst die Beurteilungsgrundlagen dar und betont, dass sie sich bei der Beurteilung auf diejenigen Aspekte beschränke, die im Rahmen eines Entsorgungsnachweises notwendig seien. Das Auswahlverfahren, das zum Zürcher Weinland geführt habe, werde deshalb nicht beurteilt.

6.1.1 Geologie des Zürcher Weinlands {2.2}

In diesem Unterkapitel sichtet und beurteilt die HSK den Datensatz der Nagra zur Geologie des Zürcher Weinlands.

Aussagen der HSK

Die HSK stellt der Nagra für die durchgeführten regionalen Arbeiten ein gutes Zeugnis aus. Einige Aspekte der regionalen geologischen Entwicklung seien allerdings weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen, und es sei auch in Zukunft mit neuen Interpretationen zu rechnen. {2.2.1}

Die auf Sondierbohrungen und Untersuchungen im Felslabor Mont Terri basierende Charakterisierung der lithologischen Eigenschaften des Opalinuston sei von hoher wissenschaftlicher Qualität. Die HSK würde allerdings eine Verbesserung der genetischen Interpretation lithologischer Variationen begrüßen, da diese die Prognosen hinsichtlich der Geometrie und Verbreitung dieser Lagen und damit die stratigraphische Korrelation verbessern könnten. Auf Grund der Resultate einer Diskussion mit der Nagra stuft die HSK eine von der KNE empfohlene bautechnische Optimierung als praktisch keine Vorteile bringend ein. {2.2.3}

Zur Temperaturgeschichte des Opalinuston kommt die HSK zum Schluss, dass den durch die Nagra abgeschätzten Höchstwerten von 70-85 °C eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden könne. {2.2.4}

Die Untersuchungen der Nagra zu den Rahmengesteinen werden gewürdigt. Die HSK hält aber fest, dass diese Gesteine nicht mit dem gleichen Aufwand charakterisiert worden seien wie das Wirtgestein, weil in der Sicherheitsanalyse deren Rückhaltefähigkeit nicht berücksichtigt worden sei. Bei einer Fortführung des Projekts soll nach Auffassung der HSK trotzdem die Barrierenwirkung dieser Gesteinsformationen besser charakterisiert werden. {2.2.5}

Beurteilung durch die KSA

Die HSK hat den Datensatz der Nagra zur Geologie des Zürcher Weinlands einer gründlichen Beurteilung unterzogen. Ihre Beurteilung ist nachvollziehbar und plausibel.

Die Höchstwerte der Temperatur, welche der Opalinuston im Verlauf der Entwicklungsgeschichte aufgewiesen hat, sind insofern wichtig, als sie die Quelfähigkeit des Tons und damit das Heilungsvermögen für Risse und Klüfte beeinflussen.

Die KSA unterstützt die Empfehlungen der HSK zum Vorgehen bei einer allfälligen Fortführung des Projekts. Die daraus resultierenden Zusatzerkenntnisse sind jedoch für die Erbringung des Entsorgungsnachweises nicht von Bedeutung. Sie können aber im Hinblick auf eine spätere Standortwahl und Optimierung des Lagersystems bzw. der besseren Charakterisierung der Robustheit des Lagersystems von Bedeutung sein. In diesem Sinne weist die KSA darauf hin, dass bei der Weiterführung des Programms 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 sollen.

6.1.2 Tektonische Strukturen im Untersuchungsgebiet {2.3}

In diesem Unterkapitel werden die Kenntnisse über den strukturellen Aufbau des Untergrunds im Untersuchungsgebiet dargelegt und bewertet. Dabei stützt sich die HSK auf auch auf den Bericht der KNE [37] ab.

Aussagen der HSK

Nach Auffassung der HSK ist der regionale strukturelle Aufbau sorgfältig und umfassend untersucht. Für den Fall einer Fortführung des Projekts schliesst sich die HSK der Anregung der KNE an, weitere Studien zur Entwicklungsgeschichte des heute noch tektonisch aktiven Hegau-Bodensee-Grabens durchzuführen. {2.3.1}

Hinsichtlich der Analyse des lokalen geologischen Störungsmusters und dessen Aktivität kommt die HSK zum Schluss, dass die Annahmen der Nagra gerechtfertigt seien, dass sich das tektonische Spannungsfeld im Untersuchungsgebiet in der kommenden Million Jahre nicht grundlegend verändern werde und allfällige tektonische Bewegungen sich an den bekannten, heute als aktiv geltenden Störungen abspielen würden. {2.3.2}

Die Analyse der Deformation des Wirtgesteinskörpers führt zur Feststellung, dass im Untersuchungsgebiet offene Klüfte fehlen und Kalzit-Klüfte und -Adern selten auftreten würden und auf kleinräumigen Stofftransport zurückzuführen seien. Es wird auch darauf hingewiesen, dass hydraulische Tests der tektonisch belasteten Zonen überall Durchlässigkeiten ergeben hätten, die sich nicht vom ungestörten Opalinuston unterscheiden. {2.3.3}

Beurteilung durch die KSA

Die Beurteilung der tektonischen Strukturen und die Empfehlungen der HSK sind nachvollziehbar. Die KSA weist darauf hin, dass bei der Weiterführung des Programms weitere Abklärungen zur Vertiefung der Kenntnisse zur Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Störungszonen im Wirtgestein (Brüchen und Rissen) vorgenommen werden sollen.

6.1.3 Hydrogeologie {2.4}

In diesem Unterkapitel werden die Untersuchungsergebnisse der Nagra zur Wasserdurchlässigkeit der verschiedenen geologischen Schichten im Untersuchungsgebiet, die Fliessverhältnisse in den Grundwasserleitern, das Alter der tiefen Grundwässer sowie der Wasserfluss durch ein allfälliges Grundwasser diskutiert und bewertet. Dabei stützt die HSK ihre Aussagen wiederum auch auf den Bericht der KNE [37] ab.

Aussagen der HSK

Die HSK bestätigt den ausgeprägten Stockwerkbau von Aquiferen (Grundwasserleiter) und Aquitarden (Grundwasserstauer, "Barrieren"), welcher eine direkte Verbindung zwischen den Grundwasserleitern ausschliesse. Sie attestiert, dass die Ermittlung der sehr geringen Werte für die Wasserdurchlässigkeit des Opalinustons gemäss dem internationalen Stand der Technik durchgeführt wurde und breit abgestützt ist. Die für die andern geologischen Schichten von der Nagra verwendeten Werte für die Wasserdurchlässigkeiten stuft sie als vernünftig ein, wobei sie empfiehlt, im Referenzfall beim Stubensandstein den in der Bohrung Benken gemessenen höheren Wert zu verwenden. {2.4.1}

Nach Auffassung der HSK entwässern die Aquifere im Untersuchungsgebiet in Richtung Rhein. Beim unmittelbar über dem Opalinuston liegenden Wedelsandstein seien die Fliessverhältnisse wegen der schmalen Datenbasis noch nicht geklärt. Die Modellierung der Grundwasserzirkulation stuft die HSK als dem Stand der Technik entsprechend ein. {2.4.2}

Gemäss HSK lässt sich aus den chemischen und isotopenspezifischen Analysen ableiten, dass die Grundwässer in den Grundwasserleitern nahe der Oberfläche, sodann aber auch in den tiefen Aquiferen der Trias jung sind. Dazwischen lägen alte Grundwässer mit hoher Salinität und Verweilzeiten von einigen hunderttausend bis Millionen von Jahren. Das Porenwasser im Opalinuston sei als ehemaliges marines Formationswasser zu interpretieren. Nach Ansicht der HSK sollten bei künftigen Bohrungen die Wässer im Übergangsbereich zwischen den oberen Rahmengesteinen und dem Malm-Aquifer ebenfalls analysiert werden. {2.4.3}

Zentrale Bedeutung misst die HSK der Abklärung des Grundwasserflusses entlang der Auflockerungszone bei. Sie hat deshalb zur Überprüfung der entsprechenden Angaben der Nagra bei der ETHZ eine Expertise in Auftrag gegeben [19]. Die Modellierung der ETH hat zu etwas höheren Wasserflüssen durch das Lager geführt. Zudem musste der Sättigungswert der Wasserflüsse, welcher sich bei immer grösser werdenden Durchlässigkeiten der Auflockerungszone ergibt, nach oben korrigiert werden.

In der Zusammenfassung schliesst die HSK auf ein solides und nachvollziehbares Bild der hydrogeologischen Verhältnisse. Aus hydrogeologischer Sicht sei der Opalinuston grundsätzlich geeignet: Alle Daten der Nagra ergäben sehr geringe Wasserdurchlässigkeiten im Opalinuston und global für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers vorteilhafte hydrogeologische Eigenschaften. Die Vervollständigung und Bestätigung des Datensatzes, insbesondere zu den Rahmengesteinen (vgl. auch 7.1.1), werde bei einer allfälligen Weiterführung des Projekts in der nächsten Phase noch erfolgen müssen.

Beurteilung durch die KSA

Aus Sicht der KSA hat die HSK die Erkenntnisse und Aussagen der Nagra zu den hydrogeologischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet eingehend und vollständig überprüft. Die Unterschiede zwischen den von der Nagra und der ETHZ ermittelten Wasserflüssen durch das Tiefenlager sind nach Auffassung der KSA nicht von grundlegender Bedeutung, da sie sich im Bereich eines Faktors 2 bewegen.

Die KSA unterstützt die in Hinsicht auf die Weiterführung des Programms gemachte Empfehlung der HSK und weist darauf hin, dass die lateralen Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse des Wirtgesteins und der Rahmengesteine über das Zürcher Weinland hinaus, namentlich im nördlichen Mittelland und im Tafeljura, präzisiert werden sollen.

6.1.4 Langzeitenwicklung {2.5}

Dieses Unterkapitel ist Fragen der möglichen regionalen Veränderungen von Landschaft und Geologie des Zürcher Weinlandes gewidmet. Die HSK stützt sich dabei wiederum auch auf den Bericht der KNE [37] sowie auf einen Expertenbericht der Universität Zürich zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre [67].

Aussagen der HSK

Unsicherheiten bei Prognosen der Langzeitentwicklung eines geologischen Tiefenlagers begegne die Nagra, indem sie die Spannweite möglicher Veränderungen der Geosphäre umreisse. Die natürlichen Ereignisse würden dabei in langsam ablaufende geologische Vorgänge wie Erosion und Sedimentation sowie in Extremereignisse wie starke Erdbeben oder grosse Bergstürze eingeteilt. {2.5.1}

Zur Beurteilung der Hebungsraten hat die HSK die geodynamischen und die geomorphologischen Grundlagen sowie die geodätischen Messungen und die Daten aus der Beckenmodellierung analysiert. Sie kommt zum Schluss, dass die Annahme einer andauernden Hebung des Zürcher Weinlands um 0,1 mm pro Jahr vernünftig sei. Einige Aspekte zur dieser Frage seien allerdings Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion. Für den Fall der Weiterführung des Projekts regt die HSK an, mit zusätzlichen Untersuchungen die Abläufe von Sedimentation und Erosion feiner zu erfassen, um die Daten zur Hebung des Gebiets besser abzustützen. Zudem sollten laufend neue wissenschaftliche Erkenntnisse in die Langzeitanalysen Eingang finden. {2.5.2}

Die HSK erachtet die von der Nagra aus ihren Untersuchungen abgeleiteten Gesteinhärten als konservativ. Eine Freilegung des Lagers bzw. der Umgebungsgesteine des Lagers infolge glazialer Tiefenerosion, insbesondere auch durch Bildung neuer Erosionstäler, hält sie selbst bei extremen Annahmen für unwahrscheinlich. Sie empfiehlt, den zurzeit rasanten Fortschritt der Forschung auf diesem Gebiet zu verfolgen. Zudem sollte die Nagra im Falle einer Weiterführung des Projekts eines Tiefenlagers im Zürcher Weinland zur Gewinnung von weiteren Informationen zur Tiefenerosion im Gebiet der grossen glazialen Übertiefung des unteren Thurtals eine Bohrung abteufen. {2.5.3}

Die Überlegungen zur Entwicklung des lokalen Reliefs im Zürcher Weinland zeigen gemäss der HSK nachvollziehbar auf, dass die Überdeckung eines geologischen Tiefenlagers über einen Zeitraum von einer Million Jahren intakt bleiben würde. In diesem Zeitraum wird die Radiotoxizität der eingelagerten Abfälle bereits stark abgeklungen sein. Die HSK stellt fest, dass es unter Annahme einer starken Hebung, verbunden mit Erosion, über längere Zeiträume zu Veränderungen hydrogeologischer Parameter (namentlich Sauerstoffgehalt) kommen könne. Es sei in einem weiteren Stadium der Arbeiten angezeigt, solche Szenarien durchzurechnen. {2.5.4}

In der Beurteilung der Daten zur Neotektonik (junge und rezente Bewegungen der Erdkruste) und Erdbeben (aktuelle, schockartige Bewegungen der Erdkruste) analysiert die HSK zuerst die Angaben zum Spannungsfeld. Sie bestätigt, dass das Untersuchungsgebiet in einem kompressiven Spannungsfeld liegt, in welchem die maximale Horizontalspannung in N-S-Richtung im Bereich des Opalinuston das 1,3- bis 1,5-fache der vertikalen Auflast betrage. Neueste Untersuchungen (Paläoseis 2002, Sellami et al. 2004) haben gemäss der HSK bestätigt, dass das Zürcher Weinland in der Schweiz zu den Gebieten mit dem geringsten Erdbebenrisiko gehört. Sie weist aber auf Unsicherheiten bei der Bestimmung des Erdbebenrisikos hin, die jedoch durch geeignete Bemessung, insbesondere der Untertagebauwerke, weitgehend kompensiert werden können. Die HSK erachtet es als sinnvoll, den Vorgang der erdbebeninduzierten Bruchbildung durch einen Lagerstollen näher zu untersuchen. Sie empfiehlt weiterhin, beim Lager einen Sicherheitsabstand von 100 bis 200 m zu bestehenden

Sockelstörungen einzuhalten. Auf Grund der sehr alten Porenwässer geht die HSK davon aus, dass Erdbeben keine für ein allfälliges Tiefenlager sicherheitsrelevanten Änderungen im Opalinuston des Zürcher Weinlandes verursachen können. {2.5.5}

Beurteilung durch die KSA

Nach Auffassung der KSA sind die Argumentationen und Beurteilungen der HSK nachvollziehbar. Sie schliesst sich den Empfehlungen der HSK an.

Die Prognosen für Langzeitentwicklungen sind zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden. Hinzu kommt, dass menschliche Aktivitäten Einfluss auf die Langzeitentwicklung der Geosphäre – beispielsweise Änderung der Denudation infolge von anthropogen bedingten Klimaänderungen – haben können. Die HSK weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass gemäss Nagra zum Teil bereits die heutigen Denudationsraten stark anthropogen beeinflusst sind (Abschnitt 2.5.3.1). Die KSA erachtet es deshalb 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.

Mit der grössten Unsicherheit hinsichtlich Abdeckung des Tiefenlagers dürfte die glaziale Tiefenerosion verbunden sein. 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. Andererseits soll bei der Standortwahl die Möglichkeit des Ausweichens in Gebiete mit geringer Talbildung geprüft werden.

Die Gefährdung des Tiefenlagers durch Erdbeben ist auch aus Sicht der KSA gering. Einerseits zeigt die Erfahrung, dass unterirdische Bauten durch Erdbeben generell kaum geschädigt werden. Andererseits kann durch eine geeignete Standortwahl und Massnahmen bei der konkreten Auslegung die Gefahr der Schädigung auch bei schweren Erdbeben zusätzlich reduziert werden. So wäre im Untersuchungsgebiet genügend Platz, um einen allfälligen Standort so zu wählen, dass alle Lager einen ausreichenden Abstand von den dort vorhandenen Sockelstörungen Neuhauser Störung, Strukturzone Niederholz und Flexur Rafz–Marthalen hätten.

6.1.5 Geothermie und Rohstoffe {2.6}

In diesem Unterkapitel prüft die HSK die Angaben der Nagra zur Frage der Nutzungskonflikte des tiefen Untergrundes hinsichtlich Geothermie und Rohstoffe und der damit verbundenen Möglichkeit unbeabsichtigter menschlicher Eingriffe.

Aussagen der HSK

Die HSK beurteilt das geothermische Potenzial als eher bescheiden und sieht daher kaum einen Konflikt hinsichtlich einer durch ein Tiefenlager eingeschränkten Nutzung tieferer Schichten. Sie führt dafür vor allem wirtschaftliche Gründe an. Oberflächennahe Sonden könnten problemlos erstellt werden.

Bei den Bodenschätzen wird die Nutzung von Kohle, Kohlegas, Kohlenwasserstoffen, Salzvorkommen und Mineral- und Thermalwasser untersucht. Die HSK hält fest, im Gebiet des Zürcher Weinlands seien keine bedeutenden Vorkommen an diesen Bodenschätzen festgestellt worden. Das Salzvorkommen, welches in der Bohrung Benken erschlossen worden sei, sei für eine Ausbeutung zu stark verschmutzt.

Beurteilung durch die KSA

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.

6.1.6 Beurteilung des Standortnachweises {2.7}

In diesem Unterkapitel beurteilt die HSK den Entsorgungsnachweis als Ganzes.

Aussagen der HSK

Auf Grund einer eingehenden Prüfung der in der Geosynthese der Nagra vorgelegten erdwissenschaftlichen Grundlagen kommt die HSK zum Schluss, dass der Standortnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle erbracht ist. Für den Fall einer Weiterführung des Projekts hat sie drei Erwartungen bezüglich ergänzender Untersuchungen. Diese betreffen die Charakterisierung der Rahmengesteine, den hydrogeologischen Datensatz und die glaziale Tiefenerosion.

Beurteilung durch die KSA

Die Schlussfolgerungen der HSK und Forderungen zu ergänzenden Untersuchungen bei der Weiterführung des Projekts sind gut belegt und plausibel. Die KSA hat in den entsprechenden Abschnitten weiter führende Hinweise gemacht.

6.2 Machbarkeitsnachweis

Den im Rahmen des Entsorgungsnachweises zu erbringenden Machbarkeitsnachweis behandelt und beurteilt die HSK in Kapitel 3. Sie erläutert vorerst ihre Beurteilungsgrundlagen. Anschliessend beurteilt sie das Bauprojekt, den Betrieb des Lagers, die Rückholbarkeit der Abfälle sowie die Überwachung und den Verschluss des Lagers.

6.2.1 Beurteilungsgrundlagen {3.1}

In diesem Unterkapitel nimmt die HSK einerseits Bezug auf die von der Nagra zur Beurteilung der Aspekte der Machbarkeit vorgelegten Unterlagen und andererseits auf die Gesetze, Richtlinien und Normen, welche entsprechende Beurteilungskriterien enthalten.

Aussagen der HSK

Gemäss der HSK muss bei der Beurteilung der technischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands auf Grund der von der Nagra eingereichten Unterlagen geprüft werden, ob mit den heutigen technischen Mitteln das Lager gebaut, betrieben, überwacht und schliesslich unter Gewährung der Langzeitsicherheit verschlossen werden kann. Beurteilungsgrundlagen seien dabei neben

den Angaben der Nagra der Stand der Technik und die massgebenden gesetzlichen Vorschriften und Normen: der Bundesbeschluss zum Atomgesetz [9], das Strahlenschutzgesetz [13], die Strahlenschutzverordnung [14], die Richtlinien der HSK, Normen der SIA sowie das Kernenergiegesetz [10] und die Kernenergieverordnung [11]. Die Bestimmungen der Kernenergieverordnung seien der Nagra zur Zeit der Einreichung des EN 2002 noch nicht im Detail bekannt gewesen.

Beurteilung der KSA

Die HSK hat im Wesentlichen dieselben Beurteilungsgrundlagen verwendet wie die KSA. Eine Ausnahme bildet der Bericht der EKRA, in welchem diese ihr Konzept der geologischen Tiefenlagerung darlegt. Da die wesentlichen Elemente dieses Konzepts in die Kernenergiegesetzgebung eingeflossen sind, hat dies faktisch keinen Unterschied zur Folge.

6.2.2 Bautechnisches Projekt {3.3}

In diesem Unterkapitel äussert sich die HSK zur Frage, ob das vorgeschlagene Tiefenlager aus bautechnischer Sicht mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln auch im Opalinuston des Untersuchungsgebiets realisiert werden könnte. Sie stützt sich dabei auch auf eine Expertise von Emch+Berger [18] zu den felsmechanischen Verhältnissen im Opalinuston und zur bautechnischen Machbarkeit ab.

Aussagen der HSK

Auf Grund einer Überprüfung durch einen Experten kommt die HSK zum Schluss, dass die Bestimmung des Spannungsfelds auf angenommener Tiefenlagerebene nach dem Stand der Technik erfolgt sei, die Fehlerbandbreiten aber grösser seien als von der Nagra angegeben. Sollte schliesslich das Lager im Untersuchungsgebiet realisiert werden, müsste dem Spannungszustand vor Baubeginn Rechnung getragen werden.

Die HSK wertet die Angaben der Nagra zu den felsmechanischen Eigenschaften und Kennwerten für die Stufe Entsorgungsnachweis als genügend. Genauere Eingrenzungen könnten im Zuge der nachfolgenden Projektphasen erfolgen. Sie macht darauf aufmerksam, dass bei ungehindertem Quellvorgang das Gestein entfestigt wird.

Die Auslegung des Tiefenlagers wird als zweckmässig beurteilt. Für den Fall einer Realisierung weist die HSK auf die Notwendigkeit der Klassierung der Bauwerke der Aussenanlagen gemäss HSK-R-04 (Erdbebensicherheit) und die Berücksichtigung der entsprechenden SIA-Normen hin. Bezüglich Linienführung der Zugangsrampe, Wasserhaltung und Belüftung sieht die HSK noch Optimierungsmöglichkeiten. Die Querschnitte der einzelnen Anlagenteile seien zum Teil eher knapp bemessen. Die HSK empfiehlt, die Tunnel- und Schachtquerschnitte in der nachfolgenden Planungsphase auf der Grundlage des benötigten Betriebsraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und die zu erwartenden Verengung des Profils infolge des Gebirgsdrucks zu optimieren.

Nach Auffassung der HSK kann das Lager mit dem vorgesehenen Bauverfahren grundsätzlich erstellt werden. Für den Fall einer Realisierung des Konzepts müssten aber die Zweckmässigkeit des Raisedrillverfahrens zum Schachtvortrieb (Fragen der Sicherheit beim Vortrieb), das Wasserhaltungskonzept (der Opalinuston soll nicht mit Wasser in Kontakt geraten) und den Einsatz einer Tunnelbohrmaschine zur Auffahrung der BE/HAA-Lagerstollen näher abgeklärt werden. Während der Phase der Einlagerung von BE/HAA-Lagerbehälter ist nach Auffassung der HSK wegen der Wärmeabgabe der Behälter eine Erhöhung des Luftdurchsatzes bei der Lüftung erforderlich. Ausserdem macht die HSK einige Anregungen auf Grund des Vergleichs mit ausländischen Anlagen.

Beurteilung durch die KSA

Nach Ansicht der KSA hat die HSK die bautechnische Machbarkeit umfassend beurteilt. Die von der HSK angesprochenen weiteren Abklärungen und Präzisierungen stellen die Machbarkeit des Baus des Lagersystems nicht infrage, weil es sich um Aspekte handelt, welche aus Sicht des heutigen Stands der Bautechnik gelöst werden können.

6.2.3 Betrieb des Lagers {3.4}

In diesem Unterkapitel analysiert die HSK die Angaben der Nagra über den Betrieb des Lagers während der Einlagerungsphase.

Aussagen der HSK

Für die HSK ist der Betrieb aus Sicht des heutigen technischen Stands grundsätzlich machbar, da er in vielen Aspekten dem Alltag der heute bestehenden Zwischenlageranlagen entspreche.

Kritische Sicherheits- und Sicherheitsaspekte sieht die HSK keine. Wegen der Überlappung von Bau- und Betriebsphase erachtet sie es aber als wichtig, dass die Massnahmen bei möglichen untertägigen Störfällen noch verfeinert werden.

Die möglicherweise lange Zeit erfolgende Datenerhebung im Pilotlager erfordert nach Auffassung der HSK innovative Entwicklungen im Bereich Messsysteme.

Aus Gründen des Strahlenschutzes schlägt die HSK eine leichte Änderung der Ausrichtung eines Lagertunnels vor.

Beurteilung durch die KSA

Auf die Stabilität der unterirdischen Bauten während der mehrere Jahrzehnte langen Betriebsphase und der möglicherweise noch länger dauernden Beobachtungsphase geht die HSK nicht ein. Die KSA interpretiert das dahin gehend, dass die HSK wie die KSA keine Probleme sieht, welche die Machbarkeit grundsätzlich infrage stellen könnten.

Zur Frage des Betriebs, insbesondere von langlebigen Messsystemen, sei auf die Aussagen der KSA in Unterkapitel 5.4 der vorliegenden Stellungnahme verwiesen.

6.2.4 Rückholbarkeit der Abfälle {3.4}

In diesem Unterkapitel äussert sich die HSK primär zur Rückholbarkeit der Abfälle während der Betriebsphase und während der Beobachtungsphase.

Aussagen der HSK

Die HSK wirft verschiedene Fragen auf, welche die folgenden Aspekte betreffen:

- die Erhaltung der Übertageanlagen im Hinblick auf eine eventuelle Rückholung,
- eine Anpassung der Studie von ROWA (1999) an die nunmehr höher eingeschätzten Temperaturen,
- die Frage der Erhaltung der Schienen,
- die Machbarkeit der Nachsicherung der Kavernen bei einer allfälligen Rückholung der Abfälle.

Die HSK äussert die Auffassung, die Detailausführungen zur Rückholung der Abfälle müssten, falls das Projekt weitergeführt werde, im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch noch genauer erarbeitet werden und dabei auch die verschiedenen möglichen Szenarien aufzeigen, die zum Entscheid eines Rückholens der Abfälle führen könnten.

Beurteilung durch die KSA

Nach Meinung der KSA hat die HSK die Frage der Rückholung der Abfälle umfassend und kritisch beurteilt. Die KSA pflichtet der HSK bei, dass die von ihr identifizierten offenen Punkte die Rückholbarkeit nicht grundsätzlich infrage stellen.

6.2.5 Überwachung und Verschluss des Lagers {3.5}

In diesem Unterkapitel beurteilt die HSK die Überwachung des Tiefenlagers während der Beobachtungsphase und den stufenweisen Verschluss des Lagers.

Aussagen der HSK

Die HSK stellt fest, dass die Nagra in ihren technischen Berichten die wichtigsten Aspekte der Überwachung und des stufenweisen Verschlusses des geologischen Tiefenlagers darlegt. Sie sieht keine Argumente, welche die technischen Überwachungsmaßnahmen grundsätzlich infrage stellen könnten. Nach Auffassung der HSK besteht aber Bedarf nach weiteren Abklärungen in folgenden Bereichen:

- Charakterisierung des hydrogeologischen und radiologischen Zustandes des Standortes (Nullmessung) vor dem Bau und Monitoring während des Baus,
- Vertiefung der Kenntnisse zu den Eigenschaften des Bentonitgranulats,
- Konkretisierung des Verfüll- und Versiegelungskonzeptes.

Als Folgerung aus ihren Analysen ist nach Ansicht der HSK die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers unter den felsmechanischen Gegebenheiten im Opalinuston des Zürcher Weinlandes in der vorgeschlagenen Tiefenlage machbar. Verbunden ist diese Beurteilung mit einer Anzahl bereits vorstehend genannten Forderungen im Falle der Weiterführung des Projektes.

Beurteilung durch die KSA

Mit den Angaben und ergänzenden Forderungen der HSK ist die KSA einverstanden. Zur Frage der Überwachung bzw. zu den Untersuchungen im Test- und im Pilotlager hat die KSA der Nagra eine Anzahl zusätzlicher Fragen gestellt, auf welche die Nagra in [53] erste Antworten gegeben hat (siehe hierzu Kapitel 5).

6.2.6 Beurteilung des Machbarkeitsnachweises {3.6}

In diesem Unterkapitel beurteilt die HSK, ob der Machbarkeitsnachweis nach ihrer Auffassung erbracht ist, und fasst die von ihr geforderten ergänzenden Abklärungen zusammen.

Aussagen der HSK

Nach Auffassung der HSK ist ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands in der vorgeschlagenen Tiefe machbar. Für den Fall der Realisierung hält sie

aber bei einigen Aspekten der Auslegung und des Baus weitere Abklärungen für erforderlich.

Beurteilung durch die KSA

Die abschliessende technische Beurteilung der Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers ist für die KSA nachvollziehbar. In Anlehnung an ihre etwas breitere Interpretation der Anforderungen an den Entsorgungsnachweis weist die Kommission in Kapitel 5 der vorliegenden Stellungnahme auf die Notwendigkeit weiterer Abklärungen hin.

6.3 Sicherheitsnachweis

6.3.1 Beurteilungsgrundlagen {4.1}

Aussagen der HSK

Die HSK ist der Auffassung, dass das Projekt im Rahmen des Entsorgungsnachweises nicht bis ins Detail festgelegt sein müsse. Es müsse jedoch grundsätzlich an denselben Anforderungen gemessen werden wie ein Projekt im Rahmen eines Bewilligungsverfahrens: Das Resultat der Beurteilung könne in dieser Phase aber unter Umständen auch positiv ausfallen, wenn der Sicherheitsnachweis nicht bis ins letzte Detail geführt sei. Entscheidend sei die Gewissheit, dass mit allfällig notwendigen Detailanpassungen die erforderliche Sicherheit erreicht werden könne.

Die wesentlichen Anforderungen, welche das Projekt zu erfüllen habe, seien in der Kernenergiegesetzgebung und der Richtlinie HSK-R-21 festgelegt. Dies seien u. a. die folgenden:

- Die Langzeitsicherheit müsse durch ein System von gestaffelten, auf diversitären Prinzipien funktionierenden passiven Barrieren gewährleistet sein.
- Das Lagerkonzept müsse den entsprechenden Anforderungen in der Kernenergiegesetzgebung genügen, wobei die Massnahmen für eine nicht befristete Beobachtungsphase und einer erleichterten Rückholung der Abfälle bis zum Verschluss des Lagers die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen dürften.
- Für die Phase mit merklicher Wärmeentwicklung müsse möglichst ein vollständiger Einschluss der Abfälle angestrebt werden.
- Die in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegten Schutzziele müssten eingehalten werden. Darüber hinaus müssten die radiologischen Auswirkungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik weiter reduziert werden.
- Die Berechnung der radiologischen Auswirkungen müsse nach den in der HSK-R-21 festgelegten Randbedingungen erfolgen.

Weitere Beurteilungsgrundlagen bilden für die HSK der Stand von Wissenschaft und Technik und die Beurteilung des Entsorgungsnachweises durch das Expertenteam der NEA.

Beurteilung durch die KSA

Die KSA stimmt mit der HSK überein, dass das Projekt bei einem Entsorgungsnachweis noch nicht in allen Details festgelegt und die Langzeitsicherheitsnachweis bis in alle

Details geführt sein muss. Es dürfen aber keine Fragen offen sein, welche die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers grundsätzlich infrage stellen könnten.

Nach Auffassung der KSA hat die HSK die für den Sicherheitsnachweis wesentlichen Beurteilungskriterien berücksichtigt. Im Rahmen des Entsorgungsnachweises kommt nicht allen Kriterien dieselbe Bedeutung zu. Zentral sind aus Sicht der KSA insbesondere

- die Realisierung eines Mehrfachbarrierensystems und die Umsetzung des EKRA-Konzepts,
- der Nachweis der Einhaltung des Schutzziels 1 aus der HSK-R-21 (realistischerweise anzunehmende Vorgänge und Ereignisse sollen zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen von mehr als 0,1 mSv führen),
- die korrekte Ermittlung der radiologischen Auswirkungen.

Wichtig ist, dass das Tiefenlagersystem eine genügende Robustheit aufweist, sodass ungünstige Antworten auf die offenen Fragen und Unsicherheiten abgedeckt sind.

6.3.2 Sicherheitskonzept {4.2}

Aussagen der HSK

Nach Auffassung der HSK sind im Sicherheitskonzept der Nagra bereits wesentliche Aspekte des in der Kernenergiegesetzgebung und der Richtlinie HSK-R-21 geforderten Mehrfachbarrierensystems vorhanden. Für eine vollständige Bewertung aller Aspekte des Mehrfachbarrierensystems verweist die HSK auf die Unterkapitel 4.5. bis 4.8 ihres Gutachtens.

Als weitere Elemente zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit nennt die HSK die langfristige Aufbewahrung der Information über das Lager, die Abwesenheit von Bodenschätzen sowie die Festlegung eines Schutzbereichs gemäss Art. 40 des KEG.

Die HSK weist darauf hin, dass beim Sicherheitsnachweis nicht alle Komponenten und Eigenschaften, welche Barrierenwirkung haben, einbezogen worden seien, weshalb das Lagersystem über das ausgewiesene Mass hinaus zusätzliche Sicherheit biete. Nach ihrer Auffassung entspricht das Konzept dem internationalen Standard, was auch von der Expertengruppe der NEA bestätigt worden sei.

Beurteilung durch die KSA

Die KSA teilt die Meinung der HSK, dass das Sicherheitskonzept der Nagra den in der Gesetzgebung und den behördlichen Richtlinien festgelegten Anforderungen gerecht wird. Die Tatsache, dass beim Sicherheitsnachweis nicht alle Barrierenwirkung ausübenden Komponenten und Eigenschaften berücksichtigt sind, lässt auf weitere Sicherheitsreserven schliessen.

6.3.3 Methodik des Sicherheitsnachweises {4.3}

Aussagen der HSK

Vorerst legt die HSK die Zielsetzungen der Methodik des Sicherheitsnachweises sowie die Systematik der Kategorisierung der von der Nagra untersuchten Rechenfälle dar: Szenarien, Konzeptualisierung, Parametervariationen und die so genannten "What-if"-Fälle. Sie verweist darauf, dass die Nagra bei der Ermittlung der radiologischen Auswirkungen das Hauptgewicht auf den Zeitraum bis zu einer Million Jahre gelegt hat.

Gemäss HSK gibt es in der Welt nur wenige Projekte zur geologischen Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen. Deshalb gebe es zwischen den angewendeten Methodiken im Detail Unterschiede. Auch das Expertenteam der NEA [56] habe aber bestätigt, dass die von der Nagra verwendete Methodik alle Anforderungen erfülle, welche an einen modernen Sicherheitsnachweises gestellt würden. Nach Auffassung der HSK hat die Nagra FEP-Datenbank grosser Sorgfalt erstellt.

Im Zusammenhang mit der Qualitätskontrolle anerkennt die HSK, dass die beiden Tätigkeiten Erarbeitung des Sicherheitsnachweises und Qualitätskontrolle von zwei verschiedenen Teams wahrgenommen werden. Im Umstand, dass den beiden Team zum Teil dieselben Personen angehören, sieht sie aber eine gewisse Gefahr für die ideelle Unabhängigkeit der beiden Teams.

Die HSK bestätigt, dass die Nagra bei der Behandlung von Ungewissheiten anerkannte Verfahren angewendet hat und die verwendeten Rechenmodelle geprüft und qualifiziert sind. Sie verweist zudem darauf, dass die Nagra neben den in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegten Schutzziele weitere Sicherheitsindikatoren betrachtet und dabei nachgewiesen hat, dass der radioaktive Inhalt des Abfalls innerhalb einiger Millionen Jahre auf eine mit Uranerzvorkommen vergleichbare Nuklidmischung abklingt.

Mängel sieht die HSK bei der Interpretation der Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen. Diese seien zwar im Zusammenhang mit dem Entsorgungsnachweis nicht von Bedeutung, müssten aber künftig korrigiert werden.

Positiv wertet die HSK, dass einige wichtige Begriffe definiert worden sind. Sie merkt aber, dass u. a. die Begriffe "konservativ", "Szenarium" und "Referenzszenarium" eine andere Bedeutung haben als in Kristallin-I.

Gemäss HSK ist der Umgang mit den nur schwer abzuschätzenden Ungewissheiten hinsichtlich der Entwicklung der Erdoberfläche und der menschlichen Gesellschaft in Einklang mit der Richtlinie HSK-R-21 und gemäss dem Expertenteam der NEA auch mit den internationalen Gepflogenheiten. Das von der Nagra gewählte Vorgehen lasse zudem einen Vergleich der Freisetzungen zu verschiedenen Zeiten zu.

Die HSK akzeptiert vorerst das Vorgehen der Nagra, den Ermittlungen der Dosen innerhalb der ersten Million Jahre grösseres Gewicht beizumessen als in der nachfolgenden Zeit. Sie begründet dies mit den Unsicherheiten der Prognosen für die fernere Zukunft.

Beurteilung durch die KSA

Die KSA teilt die Meinung der HSK, dass die Methodik des von der Nagra vorgelegten Sicherheitsnachweises adäquat ist und dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

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.

Die Tatsache, dass wichtige Begriffe zum Teil eine andere Bedeutung haben als im Bericht zu Kristallin-I, kann zwar allfällige Vergleiche erschweren, ist aber für die Erbringung des Sicherheitsnachweises nicht von Bedeutung. So kann beispielsweise die Definition des Referenzszenariums zwar eine Auswirkung auf dessen Konservativität haben, was aber nicht von entscheidender Bedeutung ist. Wichtig ist, dass mit der Gesamtheit aller untersuchten Rechenfälle das Spektrum der möglichen Anfangszustände

und der möglichen künftigen Entwicklung abgedeckt ist und gezeigt werden kann, dass die Schutzziele in allen Fällen eingehalten sind.

Die KSA ist ebenfalls der Meinung, die Entwicklung der Erdoberfläche und der menschlichen Gesellschaft in sehr fernen Zeiten seien die am schwierigsten zu prognostizierenden Aspekte.

Die KSA ist der Meinung, dass die Einhaltung der Schutzziele bis zu jenen Zeitpunkt nachgewiesen werden soll, zu welchem beim jeweiligen Rechenfall das Dosismaximum zu erwarten ist.

6.3.4 Abfallinventar {4.4}

Im Tiefenlager sollen drei Kategorien von Abfällen gelagert werden:

- abgebrannte Brennelemente aus den schweizerischen Kernkraftwerken (BE),
- verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus den schweizerischen Kernkraftwerken (HAA),
- primär bei der Wiederaufarbeitung anfallende langlebige mittelaktive Abfälle (LMA).

Aussagen der HSK

Auf Grund ihrer Überprüfung kommt die HSK zum Schluss, dass die Angaben der Nagra zur Menge, zum Aktivitätsinhalt und zur Wärmeleistung der einzulagernden BE und HAA nachvollziehbar sei. Für allfällige weitere Projektschritte empfiehlt sie, 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. Das Kriterium zur Bestimmung der sicherheitsrelevanten Nuklide erachtet die HSK als zweckmässig. {4.4.1}

Hinsichtlich Menge der anfallenden LMA bestehen gemäss der HSK noch Unsicherheiten, weshalb das von der Nagra vorgesehene grosse Reservevolumen angebracht sei. Die HSK bestätigt, dass die Temperaturerhöhung von 10 K in den LMA-Tunneln nur einen begrenzten Einfluss haben kann. {4.4.2}

Beurteilung durch die KSA

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 infrage. 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 $48 \text{ GWd}/t_{SM}$ 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.

Die Unsicherheiten hinsichtlich der Menge der anfallenden LMA sind nach Ansicht der KSA nicht von grundsätzlicher Bedeutung. Sie misst der Tatsache, dass ein Teil dieser Abfälle einen grösseren Anteil an organischen Materialien aufweist, aus Sicht der Sicherheit eine grössere Bedeutung zu (vgl. dazu Kapitel 3).

6.3.5 Technische Barrieren im BE/HAA-Lager {4.5}

Beim BE/HAA-Lager bilden die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter und die Bentonitverfüllung die technischen Barrieren.

Aussagen der HSK

Der Anteil des Aktivitätsinventars, welcher nach dem Versagen der Behälter kurzfristig freigesetzt wird, bestimmt gemäss Angaben der HSK im Referenzfall die maximale Dosis in der Biosphäre. Die von der Nagra für die einzelnen Radionuklide vorgeschlagenen Anteile stuft sie in einzelnen Fällen als zu pessimistisch bzw. zu optimistisch ein. Sie ortet allgemein Unsicherheiten bei der Bestimmung dieser Anteile wie auch bei der Bestimmung der Auflösungsrate des Brennstoff, sieht aber dadurch die Einhaltung der Schutzziele nicht infrage gestellt. Die Anwesenheit von Wasserstoffgas reduziert die Auflösungsrate des Brennstoffs, höherer Abbrand vergrössert sie. Auch bei den Auflösungsraten der Glasmatrizen würden noch Unsicherheiten bestehen, welche weitere Abklärungen erfordern würden. Gemäss HSK haben aber grössere Auflösungsraten wegen der limitierten Löslichkeit vieler Radionuklide im Porenwasser und der Rückhaltungswirkung der technischen und geologischen Barrieren einen geringen Einfluss auf die Einhaltung der Schutzziele. {4.5.1}

Die HSK sieht bei den für den Referenzfall gewählten Lagerbehältern aus Stahlguss, insbesondere auch bei der durch Korrosion des Behältermaterials bedingten, vergleichsweise hohen Wasserstoffproduktion, Vor- und Nachteile. Abklärungsbedarf sieht sie noch beim Langzeitverhalten der Schweissnähte sowie zur Festigkeit der Lagerbehälter unter anisotroper Belastung. Als alternative Lösung nennt sie Behälter aus Kupfer und erwähnt Keramik als Alternativmaterial für den Innenbehälter. {4.5.2}

Gemäss HSK ist auch in andern Ländern vorgesehen, die Lagerstollen mit Bentonit zu verfüllen. Sie bewertet die Eigenschaften des Bentonits positiv, weist aber darauf hin, dass das vorgesehene Einbringen in zwei Formen (druckverpresste Blöcke bzw. Granulat) neu ist und Aspekte der Machbarkeit noch nachzuweisen seien. Als entscheidendes Auslegungskriterium betrachtet die HSK die maximale Temperatur im Bentonit; mit der Grenztemperatur von 125 °C betrete die Nagra noch schwach abgesichertes Neuland. Die maximalen Temperaturen im Bentonit und im Opalinuston seien für die langfristige Beständigkeit dieser Barrieren wichtig. Die HSK empfiehlt, im Falle der Weiterführung des Projekts die Grundlagen für die thermischen Parameter zu erweitern und die thermischen Modelle zu Verfeinern. Nur wenige Erkenntnisse liegen nach ihrer Ansicht über den Transport und die Auswirkungen des bei der Korrosion der Lagerbehälter entstehenden Wasserstoffgases im Bentonit vor. Sie erwartet, dass bei einer Weiterführung des Projekts weiterführende Experimente durchgeführt werden. Hinsichtlich der chemischen Eigenschaften des Nahfelds seien der Nagra Daten für 25 °C zur Verfügung gestanden. Bei frühem Behälterversagen (nach 1000 Jahren) sei aber im Bentonit mit einer maximalen Temperatur von 90 °C zu rechnen, weshalb eine signifikante Abweichung der chemischen Eigenschaften nicht auszuschliessen sei. Die Löslichkeiten der Radionuklide im Porenwasser des Bentonit und Sorptionskoeffizienten im Bentonit hat die HSK einzeln überprüft. Basierend darauf schlägt sie in einzelnen Fällen vorsichtigere Werte vor. {4.5.3}

Beurteilung durch die KSA

Die HSK sieht zwar offene Fragen im Zusammenhang mit dem Transport und den Auswirkungen des bei der Korrosion der Stahlbehälter entstehenden Wasserstoffgases. Diese stellen aber offensichtlich die Sicherheit des Tiefenlagers aber nicht grundsätzlich infrage. Auch Fragen bezüglich Spannungsrisskorrosion und Lochfrass werden nicht weiter vertieft. Entsprechend regt sie keine Forschung zu alternativen Behältermaterialien an. Die KSA spricht sich demgegenüber in der vorliegenden

Stellungnahme klar auch für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu alternativen Behältermaterialien aus (vgl. 3.4), weil es ihrer Auffassung nach besser ist, die Gasproduktion gering zu halten, als nachzuweisen, dass sie die Sicherheit nicht in entscheidendem Masse beeinflussen kann.

Wie die HSK ist auch die KSA der Auffassung, dass weitere Abklärungen zum Temperaturverhalten von Bentonit und Opalinuston erforderlich sind (vgl. 3.4).

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.

6.3.6 Technische Barrieren im LMA-Lager {4.6}

Aussagen der HSK

Die HSK begrüsst, dass die stark nitrathaltigen Abfälle getrennt von den übrigen gelagert werden sollen und die Lagercontainer aus einem Material bestehen, dessen Korrosion mit Gasbildung verbunden ist. {4.6.1}

Die Verfüllung mit hochporösem Zementmörtel habe gute mechanische Eigenschaften, verzögere den Transport von Radionukliden und könne in einem gewissen Masse Gase speichern. {4.6.2}

Sowohl von den Abbauprodukten der Zellulose als auch des Bitumens sei nicht zu erwarten, dass sich diese in entscheidendem Masse beschleunigend auf den Transport ausüben würden. {4.6.3}

Die HSK erklärt sich mit den chemischen Eigenschaften einverstanden, welche die Nagra für das Nahfeld unterstellt hat. Beim Redoxpotenzial, wo grosse Unsicherheiten bestehen würden, habe die Nagra im Sinne der Sicherheit die pessimistischen Werte verwendet. Der Umstand, dass die von der Nagra verwendete Porenwasserzusammensetzung für eine Temperatur von 20 °C gelte, im Lager die Temperatur aber 50 °C betrage, habe keinen entscheidenden Einfluss. {4.6.4}

Basierend auf einer detaillierten Überprüfung der Löslichkeits- und Sorptionswerte schlägt auch hier die HSK für einzelne Radionuklide höhere bzw. tiefere Werte vor. (4.6.5 und 4.6.6]

Eingehend geht die HSK auf die Gasproduktion ein, welche hier im Gegensatz zu den BE und HAA primär aus den Abbauprozessen der in den Abfällen enthaltenen organischen Stoffe stammt. Sie äussert die Auffassung, dass die Nagra diese Thematik im Sinn der Sicherheit im Wesentlichen konservativ abgehandelt hat und kommt zum Schluss, dass die Gase ohne irreversible Verletzung der Barrieren entweichen können. Im Falle einer Weiterführung des Projekts müsste aber der Einfluss der erhöhten Temperatur auf die Gasproduktion berücksichtigt werden. {4.6.7}

Beurteilung durch die KSA

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.

Hinsichtlich der Löslichkeiten und Sorptionskoeffizienten gilt dieselbe Anmerkung wie im vorangehenden Abschnitt.

6.3.7 Die natürliche Barriere Wirtgestein {4.7}

In diesem Unterkapitel zählt die HSK vorerst die primären Aufgaben des Wirtgesteins auf: technische Barrieren schützen, Wasserfluss zum Nahfeld beschränken und Transport der Radionuklide aus dem Nahfeld verzögern. Da sie die ersten beiden Punkte im Kapitel zum Standortnachweis abgehandelt hat, beschränkt sie sich in der Folge auf die Beurteilung der Mechanismen, welche den Nuklidtransport beeinflussen können.

Aussagen der HSK

Die HSK verweist auf die grosse Bedeutung der Tonmaterialien im Opalinuston für die Rückhaltung ional gelöster Stoffe. Sie erachtet die Modellierung der Diffusion, des dominanten Transportprozesses für die Radionuklide, als zweckmässig. Die Nichtberücksichtigung des Radionuklidtransports durch Sorption auf Kolloide ist für sie nachvollziehbar. {4.7.1}

Das Vorgehen zur Ermittlung der Zusammensetzung des Porenwassers ist nach Ansicht der HSK gut dokumentiert. Unsicherheiten bei der Bestimmung einzelner Parameter sei Rechnung getragen. Zweifel äussert sie an der Verlässlichkeit der Methode zur Bestimmung des pH-Werts und empfiehlt, bei einer Weiterführung des Projekts, den pH neu zu bestimmen. Der beim Referenzfall verwendete Wert für das Redoxpotenzial scheint ihr nicht gesichert; sie ist aber der Auffassung, dass bei der Bestimmung der Sorptionskonstanten beim Redoxpotenzial eine genügende Variationsbreite berücksichtigt wurde. {4.7.2}

Bei den Sorptionskonstanten empfiehlt sie, für einzelne Radionuklide pessimistischere Werte zu verwenden. {4.7.3}

Die für die Diffusionskoeffizienten verwendeten Werte erscheinen der HSK fallweise eher zu niedrig. Sie empfiehlt für den Fall der Weiterführung des Projekts das Diffusionsverhalten weiterer Radionuklide zu untersuchen. {4.7.4}

Die HSK ist im Allgemeinen mit den von der Nagra verwendeten Modellen und Parametern einverstanden. Ihr erscheinen die von der Nagra für den Gastransport im Opalinuston berücksichtigten Prozesse keine wesentlichen Lücken aufzuweisen. Die HSK zitiert eine Expertise von Emch+Berger zur Gasproduktion und kommt Schlussfolgerung, es sei nicht mit der Bildung von Mikrorissen (Dilatanz) zu rechnen. {4.7.5}

Die HSK bescheinigt dem Opalinuston insgesamt eine sehr gute Barrierenwirkung, weil der geringe diffusive und advective Transport zusätzlich durch Sorption verlangsamt werde. Deshalb könnten nur langlebige, schwach absorbierende Radionuklide den Opalinuston in relevanten Mengen durchqueren.

Beurteilung durch die KSA

Die KSA teilt die Auffassung, dass der Opalinuston in ungestörtem Zustand eine sehr gute Barrierenwirkung aufweist. Der Transport ist durch Diffusion dominiert.

6.3.8 Das Mehrfachbarrierensystem {4.8}

In diesem Unterabschnitt äussert sich die HSK zur Funktion der einzelnen Barrieren im Barrierensystem und zu möglichen Wechselwirkungen zwischen Barrieren.

Aussagen der HSK

Die HSK erwartet vom System gestaffelter passiver Barrieren, dass die unerwartete Schwächung einer Barriere durch weitere Barrieren aufgefangen wird und nicht zu unzulässigen radiologischen Auswirkungen führt. {4.8.1}

Gemäss Berechnungen der HSK ist der Beitrag der Advektion zur Nuklid Ausbreitung im Opalinuston zwar kleiner als jener der Diffusion, aber noch in derselben Grössenordnung. Potenzielle Freisetzungspfade bilden die ausgebrochenen und wieder verfüllten und versiegelten unterirdischen Räume mit den entsprechenden Auflockerungszonen. Gemäss HSK wird erwartet, dass die Verfüllung eine hydraulische Durchlässigkeit von etwa $5 \cdot 10^{-11}$ m/s und die Versiegelung 10^{-11} m/s bis 10^{-13} m/s haben. Gestützt auf die entsprechenden Überlegungen und Berechnungen der Nagra geht die HSK jedoch davon aus, dass diese Freisetzungspfade nicht problematisch sind. {4.8.2}

Die HSK äussert sich auch zu den positiven und negativen Einflüssen, welche die Barrieren aufeinander ausüben. Positiv werden beispielsweise die Korrosionsprodukte der Stahlbehälter erwähnt, weil sie die Auflösung des Brennstoffs verlangsamen. Als negative Auswirkungen werden u. a. die Auflockerungszone im Wirtgestein und der Druckaufbau infolge des bei der Behälterkorrosion gebildeten Wasserstoffs genannt. {4.8.3}

Nach Ansicht der HSK ist der Einfluss der pH-Fahne auf den Opalinuston von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit. {4.8.4}

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass ein Mehrfachbarrierensystem im Sinne der Anforderungen in der Richtlinie HSK-R-21 vorliege, auch wenn einzelne Barrieren nicht von einander abhängig seien. Den einzelnen Barrieren komme in verschiedenen Zeiträumen unterschiedliche Bedeutung zu. Im Referenzfall würden die Radionuklide weitgehend innerhalb der technischen Barrieren zerfallen und der Opalinuston nur wenig beansprucht. An die Oberfläche würden nur jene langlebigen Radionuklide gelangen, deren Transport von Abfallmatrix, Bentonit und Opalinuston nur wenig beeinflusst werde. {4.8.5}

Beurteilung durch die KSA

Die KSA kann den Überlegungen der HSK zum Barrierensystem im Wesentlichen beipflichten. Die erwarteten hydraulischen Durchlässigkeiten der Verfüllung und der Versiegelung sind zwar grösser als jene des Opalinuston, aber absolut gesehen immer noch klein. Heute besteht noch keine Erfahrung mit dem Bau solcher Versiegelungen.

Auf den nach ihrer Auffassung wichtigsten Fall einer möglichen gegenseitigen Beeinflussung von einzelnen Barrieren und daraus zu ziehende Konsequenzen ist die KSA in 3.4 eingegangen.

6.3.9 Biosphäre und Expositionspfade {4.9}

Die Nagra hat eine Referenzbiosphäre und alternative Biosphärenmodelle in ihre Abklärungen einbezogen.

Aussagen der HSK

Die HSK hat nach eigenen Aussagen die Modellierung der Referenz-Biosphäre nur grob überprüft. Sie bestätigt, dass sich die Nagra beim Referenzbiosphärenmodell an die Vorgaben der Richtlinie HSK-R-21 gehalten und zum Teil darüber hinaus konservative Annahmen getroffen hat. Im Zusammenhang mit der Modellierung weist sie aber auf zwei grundlegende Probleme hin:

- Aussagen über die oberflächennahen Prozesse seien kaum über 1'000 Jahre hinaus vorhersagbar. Vorhersagen für einen Zeitraum von 10'000 Jahren bis einer Million Jahre seien daher im Allgemeinen stark spekulativ sind.
- Für die Modellierung müsste eine grosse Zahl von Parametern verstanden und mathematisch umgesetzt werden. Das Resultat der hänge deshalb von einer grossen Zahl von Parametern ab, deren Genauigkeit sehr unterschiedlich sei. {4.9.1}

Die betrachteten alternativen Biosphärenmodelle decken nach Auffassung der HSK ein breites Spektrum von möglichen Entwicklungen ab. Bei einzelnen Annahmen innerhalb der Biosphären Modelle stellt sie Konservativität infrage. Sie weist aber darauf hin, dass in allen Fällen die berechneten Dosen um mindestens zwei Zehnerpotenzen unterhalb des Schutzziels 1 der Richtlinie HSK-R-21 liegen. Als wichtigsten Parameter der Biosphäre sieht die HSK die Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen und den Oberflächengewässern. Bei einer Weiterführung des Projekts der Bestimmung dieses Parameters mehr Gewicht beigemessen werden. {4.9.2}

Beurteilung durch die KSA

Die KSA hat bereits darauf hingewiesen, dass u. a. in diesem Bereich wohl die grössten Unsicherheiten liegen. Diese lassen sich zum Teil aus grundsätzlichen Gründen nur schwer eingrenzen und kaum reduzieren [31] [32]. Zusätzliche Informationen kann die Verwendung eines erweiterten Spektrums von Sicherheitsindikatoren liefern [30] [33].

6.3.10 Szenarienanalyse {4.10}

Angaben der HSK

Gemäss HSK ist die Beschreibung der künftigen Entwicklung eines Tiefenlagers grundsätzlich immer mit Ungewissheiten verbunden. Diese Ungewissheiten würden wenn möglich dadurch abgedeckt, dass die maximal möglichen Auswirkungen auf die Strahlenexposition ermittelt würden. Falls dies nicht möglich sei, würden verschiedene Szenarien entwickelt und betrachtet. Die Wahl dieser Szenarien erfolge so, dass man überzeugt sein könne, dass bei mindestens einem dieser Szenarien die errechnete Strahlenexposition grösser sei als bei allen realen künftigen Entwicklungen.

Grundlage für die Szenarien seien die FEPs. Hinsichtlich der Vollständigkeit der von der Nagra erstellten Opalinuston spezifischen FEP-Datensammlung (482 FEPs, davon 447 projektrelevant [47]) hat die HSK keine Lücken festgestellt. Nach ihrer Auffassung wurde die Vollständigkeit dieser Sammlung primär durch die Art und Weise des Einbezugs der mit dem Projekt beschäftigten Wissenschaftler erzielt und weniger durch den Vergleich mit einer internationalen FEP-Liste, weil jedes Tiefenlagerprojekt spezifische Eigenheiten aufweise. Beim vorliegenden Projekt seien dies beispielsweise die hohe Temperatur und der hohe Druck im Nahfeld, welche durch die hohe Wärmeleistung der Abfälle bzw. durch die Gasbildung infolge der Korrosion der aus Eisen bestehenden Lagerbehälter zusammen mit der geringen Durchlässigkeit des Wirtgesteins bedingt seien.

Für die HSK ist das von der Nagra gewählte Verfahren zur Herleitung der Szenarien nachvollziehbar und mit den internationalen Gepflogenheiten im Einklang, auch wenn sie betont, dass der Begriff "Szenarium" im vorliegenden Fall nicht mit der üblicherweise verwendeten Definition übereinstimmt. Sie verweist aber darauf, dass die Nichtberücksichtigung von FEPs, weil diese für die Langzeitsicherheit nicht von Bedeutung seien, in einzelnen Fällen noch genauer begründet werden müsste; als Beispiel erwähnt sie mögliche bleibende Änderungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Bentonits infolge der während der ersten Jahrhunderte erhöhten

Temperatur. Ausserdem ist sie der Auffassung, dass der Einfluss des erhöhten Gasdrucks beim unbeabsichtigten Anbohren des Lagers abgeklärt werden müsste.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, auf Grund der Vorgehensweise der Nagra bestehe eine gute Zuversicht, dass mit den betrachteten Rechenfällen alle wichtigen Beiträge zum radiologischen Risiko erfasst werden könnten. Sie erinnert aber an Fragen, welche nach ihrer Auffassung zur weiteren Absicherung des Prozessverständnisses bzw. der Annahmen, welche der Berechnung der radiologischen Folgen zu Grunde gelegt sind, noch abgeklärt werden müssten.

Beurteilung durch die KSA

Die HSK schliesst primär auf Grund des Vorgehens bei der Entwicklung der Rechenfälle und insbesondere des positiven Ergebnisses der Überprüfung durch das Expertenteam der NEA, dass die Gesamtheit der Rechenfälle mit guter Zuversicht die möglichen Anfangszustände und die möglichen künftigen Entwicklungen abdeckt.

Die Forderungen nach Zusatzabklärungen sind aus Sicht der KSA begründet.

Zur Forderung nach Abklärung der Auswirkungen des hohen Gasdrucks bei unbeabsichtigtem Anbohren des Tiefenlagers ist anzumerken, dass sich diese mit der Wahl alternativer Werkstoffe für die Lagerbehälter (vgl. 3.4) erübrigen würde.

6.3.11 Radiologische Auswirkungen {4.11}

Nach Auffassung der HSK sind die Ausbreitungs- und Dosisrechnungen der Nagra nachvollziehbar und decken eine weite Spanne möglicher Zustände und Entwicklungen ab. Die zu Grunde gelegten Annahmen stuft sie als vernünftig ein. Hinsichtlich der Bedeutung der Advektion für den Transport von Radionukliden kommt sie zu einem anderen Resultat als die Nagra in den eingereichten Unterlagen, weist aber darauf hin, dass ihre Resultate durch Nachrechnungen der Nagra inzwischen bestätigt worden und auch besser im Einklang mit den Erkenntnissen aus den Isotopenprofilen des Opalinuston seien.

Als nicht unbedingt konservativ stuft die HSK die stark vereinfachten Annahmen zum Übergang der Nuklide von den technischen Barrieren ins Wirtgestein ein und erwartet bei einer Fortführung des Projekts eine verbesserte Modellierung dieser Schnittstelle.

Die HSK hat einerseits die Dosisberechnungen für den Referenzfall der Nagra mit positivem Resultat überprüft. Andererseits hat sie einen eigenen Referenzfall definiert, indem sie für einzelne Parameter etwas andere Werte verwendet hat. Die Parameter der dosisrelevanten Radionuklide wie I-129 seien aber ähnlich. Deshalb würden auch die Resultate der beiden Referenzfälle sehr gut miteinander übereinstimmen.

Die HSK hat neben dem Referenzfall sechs weitere Rechenfälle der Nagra mit Kontrollrechnungen überprüft und dabei keine Differenzen gefunden. Darüber hinaus hat sie mit vier eigenen Rechenfällen die Robustheit des Lagersystems weitergehend ausgelotet. Dabei hat sie vorausgesetzt, dass die Werte der transportrelevanten Parameter zeitlich konstant und räumlich homogen sind.

Im Zusammenhang mit den probabilistischen Betrachtungen der Nagra verweist die HSK auf die geringe Anzahl der untersuchten Rechenfälle hin, was insbesondere den Aussagewert des 95-%-Quantils relativiere. Sie kommt zum Schluss, dass das Schutzziel 1 bei allen betrachteten Parameterwerten bei weitem eingehalten ist und deshalb auch davon ausgegangen werden kann, dass das Schutzziel 2 eingehalten ist.

Beurteilung durch die KSA

Die KSA begrüsst, dass die HSK mit vier eigenen Rechenfällen die Sensitivitätsanalyse für einzelne Parameter gegenüber der Nagra erweitert hat. Drei der vier Fälle betreffen nach Ansicht der KSA Parameter, bei welchen die Nagra von eher optimistischen Annahmen ausgegangen ist.

6.3.12 Beurteilung des Sicherheitsnachweises {4.12}

Aussagen der HSK

Gemäss HSK hat die Nagra überzeugend aufgezeigt, dass der langfristige Schutz von Mensch und Umwelt mit dem beschriebenen Lagersystem erbracht werden kann und der Sicherheitsnachweis erbracht ist.

Sie weist aber darauf hin, dass bei einer Weiterführung des Projekts insbesondere folgende Punkte eingehend abzuklären seien:

- Fragen in Zusammenhang mit der Dichtigkeit, mechanischen Festigkeit und der Korrosion der Lagerbehälter für abgebrannte Brennelemente;
- das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen und bei Gasdurchbruch sowie die Eigenschaft des Bentonitgranulats;
- die Produktion von Gas im Tiefenlager und dessen Abfuhr durch die verschiedenen Barrieren.

6.4 Zusammenfassende Beurteilung des Gutachtens der HSK

Die HSK hat den Sicherheitsnachweis umfassend und in den wichtigen Bereichen auch detailliert überprüft. Nach Auffassung der KSA sind im Gutachten der HSK alle wesentlichen Punkte der Sicherheitsanalyse abgehandelt.

Positiv bewertet die KSA das Einholen von verschiedenen Expertisen zu spezifischen Themenbereichen.

Bei der Beurteilung von Einzelfragen schlägt die KSA zum Teil zusätzliche Massnahmen vor. Dies gilt insbesondere für die Gasfrage: Nach Ansicht der KSA sollten nicht nur die Fragen des Gastransports im Bentonit und im Opalinuston eingehender geklärt werden, sondern auch Wege gesucht werden, um die Produktion von Gasen möglichst gering zu halten.

Die KSA kann die Schlussfolgerungen der HSK zum Sicherheitsnachweis nachvollziehen und unterstützt deren Empfehlungen.

7 Stellungnahme zu weiteren Expertisen

7.1 Expertenprüfung der Langzeitsicherheitsanalyse durch das NEA-IRT

7.1.1 Einleitung

Das Bundesamt für Energie (BFE) ersuchte im Jahr 2003 die Kernenergieagentur (Nuclear Energy Agency, NEA) der OECD, die Begutachtung des EN 2002 mit einer internationalen Expertenprüfung der im Sicherheitsbericht [45] dargelegten Langzeitsicherheitsanalyse zu ergänzen. Die Überprüfung sollte sich mit der Methodik, der Durchführung und den Resultaten der sicherheitstechnischen Bewertung des Referenz-Lagersystems befassen und sich insbesondere auf die Sicherheit der Anlage nach dem Verschluss beziehen.

Die NEA hat dem schweizerischen Gesuch entsprochen und zur Durchführung der Überprüfung eine internationale Expertengruppe (International Review Team, IRT) zusammengestellt, die aus neun anerkannten Fachexperten bestand. Gestützt auf das Pflichtenheft sah das IRT seine Aufgabe darin zu prüfen, ob die Nagra im Hinblick auf das schrittweise Vorgehen der Schweiz bei der Entwicklung von Lagerprojekten die Langzeitsicherheit auf nachvollziehbare, dem internationalen Standard entsprechende Art bewertet hat. Dabei soll der Sicherheitsnachweis der Nagra zeigen, dass im gewählten Wirtgestein innerhalb des voraussichtlichen Standortgebietes mit den auf Grund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften sowie mit dem System der technischen Barrieren die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

7.1.2 Internationaler Vergleich

Die international bevorzugte Methode für die Entsorgung langlebiger radioaktiver Abfälle besteht in der Einlagerung der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager, wobei ein System von technischen und natürlichen Barrieren die Langzeitsicherheit gewährleistet. Das Ziel der geologischen Tiefenlagerung ist die dauerhafte Entsorgung ohne Absicht einer Rückholung (im Gegensatz zum EKRA-Konzept).

Alle modernen Entsorgungskonzepte basieren auf einer Kombination von technischen und natürlichen Barrieren, wie es die Nagra vorschlägt. Dabei muss die Auslegung den chemischen und geologischen Bedingungen angepasst werden. Ein wichtiger Gradmesser der Robustheit eines Systems ist seine Fähigkeit, dass trotz eventuell auftretender verminderter Leistungsfähigkeit einzelner Barrieren noch ein genügender Schutz gewährleistet ist.

Die Vorteile der Tone als Wirtgestein liegen in der generell geringen Durchlässigkeit, dem grossen Rückhaltevermögen für viele Radionuklide und der Fähigkeit der Selbstabdichtung. Die chemischen Bedingungen und andere Faktoren können die Wahl der technischen Barrieren beeinflussen. So kann unterschiedliches Material für die Behälter verwendet werden, je nachdem ob die Bedingungen im Wirtgestein oxidierend oder reduzierend wirken.

Gemäss dem IRT ist das Entsorgungskonzept der NAGRA mit allen massgebenden Elementen eines kontrollierten, rückholbaren geologischen Tiefenlagers ausgestattet. Die mehrfachen Sicherheitsbarrieren für BE und HAA erfüllen eine Reihe von Funktionen, die

dem chemischen und geologischen Umfeld des Lagers entsprechen. Die wichtigste Barriere im Nagra-Konzept ist das Wirtgestein.

Nach Ansicht des IRT weist die Nagra in überzeugender Weise nach, dass das geologische Umfeld des Opalinustons im Zürcher Weinland einfach strukturiert und stabil ist. Der Ton ist:

- selbstabdichtend,
- chemisch stabil,
- mit vernachlässigbarem advektivem Wasserfluss,
- mit hohem Rückhaltevermögen.

Das IRT stellt fest, dass die Nagra bisher nur eine einzige Sondierbohrung (Benken) in den Opalinuston des Zürcher Weinlandes 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 vorliegen werden.

7.1.3 Bewertung des Sicherheitsnachweises der Nagra

Laut IAEA definiert die Sicherheitsstrategie die Methode, mit der die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers entwickelt wird. Die Nagra stellt ihre Sicherheitsstrategie und ihre Ziele im Sicherheitsbericht klar dar:

- schrittweises Vorgehen bei der Entscheidungsfindung, welche die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse ermöglicht;
- iterativer Entscheidungsprozess beim Nachweis der Sicherheit nach Verschluss;
- Einhaltung der behördlichen Schutzziele bei jedem Iterationsschritt.

Zum schrittweisen Vorgehen bei der Entscheidungsfindung und unter Berücksichtigung, dass sich die Schweiz bei der Entwicklung eines Tiefenlagers noch in einem frühen Stadium befindet, kommt das IRT zum Schluss, dass der Sicherheitsbericht und die weiteren technischen Berichte der Nagra bemerkenswert ausgereift sind und in der gegenwärtigen Phase einen wertvollen Beitrag darstellen.

Zum Nachweis der Sicherheit nach Verschluss stellt das IRT fest, dass die Nagra alle Aufforderungen erfüllt habe, die an einen modernen Sicherheitsnachweis gestellt werden. Insbesondere enthält der Sicherheitsnachweis eine Zusammenstellung der Grundlagen, die aufzeigen, dass alle relevanten behördlichen Schutzziele eingehalten werden können.

7.1.3.1 Methode und Aufbau des Sicherheitsnachweises

Nach Ansicht des IRT verwendet die Nagra eine Methode für den Aufbau des Sicherheitsnachweises und für die Durchführung der Sicherheitsanalyse, die dem internationalen Stand entspricht. Der Nagra-Nachweis hebt sich jedoch von anderen nationalen Programmen durch die Klarheit des Aufbaus des Sicherheitsnachweises und die hohe Robustheit der quantitativen Sicherheitsanalyse ab.

7.1.3.2 FEP-Management

Eine wichtige Aufgabe bei der Bewertung der Sicherheit der Lagerung von radioaktiven Abfällen ist die Bezeichnung, Auswahl und Dokumentation aller Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEPs), welche die Langzeitsicherheit beeinflussen können.

Das IRT ist allgemein der Ansicht, dass die Nagra den FEP-Managementprozess wirkungsvoll eingesetzt hat, um sicherzustellen, dass alle einschlägigen Prozesse und Phänomene in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden.

7.1.3.3 Analyse und Auswirkung von Ungewissheiten

Bei der Analyse der Auswirkungen der Ungewissheiten bei den konzeptionellen Modellen und bei den entsprechenden Parametern kommt das IRT zum Schluss, dass die von der Nagra durchgeführten probabilistischen Analysen zusammen mit der hohen Zahl von deterministisch analysierten Rechenfällen ein für den jetzigen Stand des Projektes ausreichendes Vertrauen in die Robustheit des Systems schaffen. Das IRT empfiehlt jedoch den Einsatz von hoch entwickelten Werkzeugen für die Analyse der Ungewissheiten und Sensitivitäten in zukünftigen Sicherheitsanalysen.

Die Nagra verwendet so genannte "What-if"-Fälle zur Prüfung der Robustheit des Lagerkonzepts. Mit diesen ausserordentlichen Szenarien wird eine zusätzliche Stütze zum Vertrauen in die Robustheit des Sicherheitsnachweises aufgebaut. Das IRT empfiehlt, dass die Nagra einerseits für die Zukunft klare Kriterien für die Wahl der "What-if"-Fälle formuliert und andererseits trotz der günstigen Eigenschaften des Opalinustons am robusten Konzept der technischen Barrieren festhalten soll. Ausserdem soll die Nagra die Arbeiten zur Verringerung von Ungewissheiten fortführen. Im Ganzen gesehen kommt das IRT zum Schluss, dass die untersuchten Rechenfälle gut begründet und repräsentativ sind für die erwartete Entwicklung und zur Abdeckung möglicher Ungewissheiten.

7.1.3.4 Bewertung des Sicherheitsnachweises

Ein Sicherheitsnachweis muss eine Synthese der Projektunterlagen, Analysen und Argumente in Form eines so genannten "Statement of confidence" enthalten [55]. In Kapitel 8 des Sicherheitsberichtes hat die Nagra eine solche Synthese gemacht. Das IRT betrachtet diese Synthese als klar, übersichtlich und gut mit Argumenten untermauert. Die Synthese entspricht den internationalen Standards.

Das IRT stellt allerdings fest, dass der Sicherheitsbericht nicht alle Elemente eines expliziten, so genannten "Statement of confidence" enthält, wie es von der NEA empfohlen wird. Die Nagra erklärte dazu, dass sie in der gegenwärtigen Phase des Entsorgungsprogramms weder den Prozess der Entscheidungsfindung noch den Ergebnissen verschiedener Prüfverfahren vorgreifen wolle. Das IRT versteht diesen Entscheid.

7.1.3.5 Qualitätssicherung

Im Aufbau eines Sicherheitsnachweises spielt die Qualitätssicherung (QS) eine wichtige Rolle. Die Nagra hat ihre QS-Massnahmen in [46, Anhang 8] allgemein beschrieben und der IRT in einer Präsentation vorgestellt.

Allgemein fand das IRT bei der Nagra klare Hinweise für eine ausgeprägte Qualitätskultur. Das IRT empfiehlt der Nagra, mit der vorgesehenen Zertifizierung nach ISO 9001:2000 fortzufahren. Zudem schlägt das IRT der Nagra vor, in künftige Projektpläne und in ihr QS-System einen formellen Audit-Plan einzubeziehen und interne und externe Audits vorzusehen.

Das IRT stuft das Informationsmanagement als kritischen Teil der Arbeit der Nagra ein. Es besteht ein allgemeiner Bedarf an Sicherstellung, dass Daten aus der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft geordnet, aufbewahrt und leicht zugänglich gehalten werden. Das IRT ermuntert die Nagra zur Überprüfung der Instrumente und Methoden, um das Wissen langfristig zu erhalten.

7.1.4 Bewertung des Mehrfachbarrierensystems

Bei der Bewertung des geologischen Umfeldes im Untersuchungsgebiet kommt das IRT u. a. zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Das geologische Modell des Opalinustons im Zürcher Weinland ist gut untermauert.
- Die von der Nagra verwendeten Methoden zur Charakterisierung des geologischen Umfelds sind in Übereinstimmung mit der akzeptierten geologischen Praxis und die Schlussfolgerungen werden durch mehrfache Argumentationsketten gestützt.
- Die Charakterisierung des untertägigen Umfelds beinhaltet Ungewissheiten (Durchlässigkeitsschwankungen, Störungszonen), die aber in der Sicherheitsanalyse ausreichend berücksichtigt sind.
- Die Arbeiten zur Standortcharakterisierung stehen im Einklang mit den aktuellen internationalen Normen.

7.1.4.1 Inventar und Quellterme

Die Bestimmung des Abfallinventars und der zugehörigen Radionuklidquellterme ist der Startpunkt für die Berechnungen zur Nuklidfreisetzung in den geologischen Schichten und weiter in die Umwelt. Genaue Informationen über das Abfallinventar sind von zentraler Bedeutung für die Sicherheitsanalyse.

Das IRT fand weder im Sicherheitsbericht der Nagra [45] noch in den Referenzberichten genügend Informationen um die Aktivität spezifischer Radionuklide für HAA und LMA nachzuvollziehen.

Das IRT empfiehlt der Nagra, in zukünftigen Sicherheitsanalysen bessere Abschätzungen der Aktivitäten von Radionukliden für HAA und LMA zu erarbeiten, vor allem die Aktivitäten derjenigen Nuklide, die am meisten zur Dosis beitragen. Wenn möglich ist eine Übereinstimmung mit anderen Ländern anzustreben, die über ähnliche Abfallsysteme verfügen.

7.1.4.2 Barrieren und Prozesse im Nahfeld

Zu den chemisch-physikalischen Daten und Prozessen im Nahfeld zieht das IRT die Schlussfolgerung, dass das schweizerische Programm eine international führende Rolle in der Entwicklung von geochemischen Datensätzen im Zusammenhang mit der Lagerung radioaktiver Abfälle spielt.

Zum Verhalten der Behälter und Gebinde stellt das IRT fest, dass die Korrosion durch Wasser der massgebende Prozess für das Versagen der BE- und HAA-Behälter ist.

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 angemessen beurteilt, empfiehlt es, dass Kupfer auf Grund seiner Vorteile einschliesslich der längeren Lebensdauer und geringeren Gaserzeugung als Option beibehalten werden soll.

7.1.4.3 Verhalten der Abfallmatrix

Das IRT stellt fest, dass die Nagra beträchtliche Arbeiten zur Erforschung und Bewertung der Auflösung von abgebrannten Brennelementen geleistet hat, und kommt zum Schluss, dass die Sicherheitsanalyse in Bezug auf das Verhalten dieser Abfallmatrix dem neusten Kenntnisstand entspricht.

Zum Langzeitverhalten der verglasten HAA findet es das IRT bedauerlich, dass Kenntnisstand und Verständnis in Bezug auf eine international derart wichtige Abfallmatrix noch nicht ausgereift sind. Das IRT empfiehlt der Nagra, die internationalen Forschungsprogramme, die ein verbessertes Verständnis für die Langzeitauflösung von verglasten HAA unter Lagerbedingungen zum Ziel haben, zu verfolgen, und ihr Fachwissen in diesem Gebiet zu verbessern.

7.1.4.4 Verhalten des Verfüllmaterials Bentonit

Das IRT stellt fest, dass sich das von der Nagra vorgeschlagene Bentonit-Verfüllkonzept in zweierlei Hinsicht von den international üblichen Verfahrensweisen unterscheidet:

- Verwendung von Bentonitgranulat,
- Auslegung für maximale Temperaturen über 100 °C in der inneren Hälfte der Bentonitverfüllung.

Bei den Nuklid-Transportmodellen stellt das IRT fest, dass die Schnittstelle zwischen Nahfeld und Geosphäre auf vereinfachten Ansätzen basiert. Insbesondere beruht die äussere Randbedingung des Transportmodells für den Bentonit auf einem physikalisch inkorrekten und willkürlichen Ansatz. Bei zukünftigen Anwendungen sollten vermehrt voll gekoppelte Modelle zum Einsatz gelangen, um die Nachvollziehbarkeit und Genauigkeit der Analysen zu verbessern.

Zusammenfassend stellt das IRT fest, dass die Bentonitverfüllung nicht nur als günstiges chemisches Milieu, starke Einschlussbarriere und wärmeleitfähiges Medium wirkt, sondern auch einen gut verstandenen Mechanismus zur Gewährleistung der Selbstabdichtung der die Lagerstollen umgebenden Auflockerungszone liefert. Mit Bezug auf die heute bestehenden Ungewissheiten empfiehlt das IRT unter anderem:

- die Forschung zum Verhalten des Bentonits unter erhöhten Temperaturen fortzusetzen;
- die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie Grossversuche zur Verwendung von Bentonitgranulat als Verfüllmaterial weiter voranzutreiben und diese Technik für die Anwendung in den Lagerstollen zu etablieren;
- mögliche Wechselwirkungen zwischen der Bentonitbarriere und den Lagerbehältern weiter zu untersuchen.

7.1.4.5 Verhalten der Opalinuston-Barriere

Der Opalinuston im Zürcher Weinland ist die dominierende Barriere im vorgeschlagenen Lagerkonzept. Das IRT ist der Ansicht, dass gewichtige Hinweise für die von der Nagra in ihrer Modellierungen verwendeten, niedrigen Durchlässigkeitswerte vorliegen. Dies betrifft vor allem das Argument der Nagra, dass der diffuse Transport, gekoppelt mit der Sorption für viele Radionuklide, der vorherrschende Mechanismus für die Migration von gelösten Stoffen durch den Opalinuston ist.

Zusammenfassend stellt das IRT fest, dass die Nagra starke, auf mehrfachen Argumentationsketten abgestützte Hinweise vorlegt, dass sich der Opalinuston im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Abfalllager eignet.

Das IRT betrachtet die Behandlung der Diffusion und die Rückhaltung insgesamt als für die jetzige Projektphase ausreichend, insbesondere was die Art und Weise der Behandlung von Ungewissheiten in der Sicherheitsanalyse anbelangt.

Für zukünftige Projektphasen empfiehlt das IRT der Nagra jedoch:

- ihre Anstrengungen auf dem Gebiet der geochemischen Rückhaltung fortzuführen;
- ihren Ansatz, der auf der Verwendung von k_d -Werten aus Batch-Sorptionsexperimenten beruht, weiter zu validieren;
- die Stichhaltigkeit der Verwendung von natürlichen Analoga nachzuweisen;
- die Diffusionsprozesse im Opalinuston vertiefter zu untersuchen.

7.1.4.6 Gasproduktion und Transport

Mehrere Prozesse führen zur Gasproduktion im Lager. Die wichtigsten sind die anaerobe Eisenkorrosion, die Wasserstoff erzeugt und der Abbau von Organika, der Methan und Kohlendioxid erzeugt.

Die Gasproduktion führt zum Druckaufbau, der das Verhalten der technischen Barrieren und die Integrität der Geosphäre beeinflussen könnte. Sie könnte auch als treibende Kraft für die Verdrängung von radionuklidhaltigem Porenwasser wirken. Die Auswirkungen des Gasdruckaufbaus und der Gasmigration sind wichtige Fragestellungen für die Lagerung von radioaktiven Abfällen in gering durchlässigen Formationen.

Das IRT stellt fest, dass die Gasmigration durch gering durchlässige Formation komplizierte Prozesse mit sich bringt und die Kenntnisse und das Verständnis dafür nicht ausgereift sind.

Das IRT empfiehlt:

- die Fortführung der experimentellen Untersuchungen der Gastransportprozesse;
- das Verbessern der Modellierung der Gastransportprozesse in Hinsicht auf eine erhöhte Durchlässigkeit infolge Mikrorisserzeugung;
- weitere Anstrengungen zur Validierung die Grundannahmen zum Zweiphasenfluss und der entsprechenden Rechencodes.

Das IRT weist abschliessend darauf hin, dass für die BE und HAA eine Lösung zur Verfügung steht, Kupferbehälter und Behältereinsätze zu verwenden, die nicht auf Eisen basieren. Derartige Behälter vermeiden die Produktion von Gas und stellen auch dauerhaftere Einschlussbarrieren dar.

7.1.5 Verhalten der Rahmengesteine

Bis heute haben sich die Untersuchungen der Nagra zum Rahmengestein hauptsächlich auf das allgemeine Systemverständnis konzentriert. Die Entwicklung dieses Verständnisses ist noch nicht genügend weit fortgeschritten, dass die Barrierefunktionen bezüglich Dispersion und Rückhaltung ausreichend bekannt wären, um sie in den Sicherheitsnachweis einzubeziehen. Die Nagra nimmt im Referenzfall an, dass der Transport durch die Rahmengesteine in die Biosphäre ohne Verzögerung stattfindet. In Anbetracht der ausgezeichneten Eigenschaften des Opalinustons ist dieser Ansatz konservativ und vernünftig.

Zusammenfassend betrachtet das IRT die Rahmengesteine als potenziell nützliche Zusatzbarrieren (Reserve-FEP). Weitere Untersuchungen dieser Rahmengesteine trügen ebenfalls zu einem verbesserten Verständnis der Transportpfade in die Biosphäre bei.

7.1.6 Systementwicklung und Zeitskala

Hinsichtlich der Analyse der Systementwicklung empfiehlt das IRT:

- Vor der endgültigen Auslegung der Untertagebauten sollte eine sorgfältige Analyse der Wiederaufsättigungsphase nach dem Lagerverschluss durchgeführt werden (Feuchtigkeitszufluss in den Bentonit, Einfluss der Temperatur usw.).
- In zukünftigen Sicherheitsanalysen sollte bei der Präsentation der Resultate betont werden, dass Biosphärenmodelle den Charakter von Indikatoren für die Bewertung der Langzeitsicherheit haben. Es sollte nicht versucht werden, die Dosen in ferner Zukunft vorauszusagen.
- In zukünftigen Berichten sollten wegen der erhöhten Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit die Folgen der globalen Erwärmung vertieft diskutiert werden.

7.1.7 Behandlung der Biosphäre

Der Schutz der Umwelt ist eine wichtige Zielsetzung des Abfall-Managements und er ist bei der Sicherheitsbewertung der Abfalllager in Betracht zu ziehen. Gemäss der IAEA wird davon ausgegangen, dass mit dem Schutz des Menschen vor der Strahlengefahr auch die Umwelt genügend geschützt ist. Sie weist aber darauf hin, dass der Schutz der Umwelt vor ionisierenden Strahlen gegenwärtig Gegenstand internationaler Diskussionen ist.

Das IRT stellt fest, dass die vorliegende Untersuchung keine umfassende Analyse von Gaspfaden beinhaltet, da angenommen wurde, dass gasförmige Freisetzungen im Vergleich mit im Grundwasser gelösten Gasen zu tieferen Dosen führen würden.

Das IRT empfiehlt der Nagra:

- das Expertenwissen über die Biosphärenmodellierung zu erhalten;
- den Fortschritt in der ökologischen Risikoanalyse zu verfolgen;
- in zukünftigen Sicherheitsanalysen eine eingehende Bewertung des Gaspfades vorzusehen.

7.1.8 Beurteilung des Berichtes durch die KSA

Die KSA ist der Ansicht, dass das IRT die Sicherheitsanalyse der Nagra im Rahmen seines Auftrags umfassend überprüft und bewertet hat. Vor allem wurden die Vollständigkeit und die Robustheit der Modelle begutachtet und die Methoden und Ergebnisse mit dem internationalen Kenntnisstand verglichen.

Das IRT zeigt sich von der Überzeugungskraft und der Qualität des Sicherheitsnachweises beeindruckt. Das IRT hat zu jedem massgebenden Bereich der Sicherheitsanalyse wichtige Empfehlungen formuliert, die in den nächsten Projektphasen berücksichtigt werden sollten. Die KSA erachtet diese Empfehlungen als wichtig.

7.2 Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit durch die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE)

Im vorliegenden Unterkapitel äussert sich die KSA zum Expertenbericht der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) [37]⁷, den diese zuhanden der HSK erstellt hat.

7.2.1 Einleitung

In ihrem Bericht vom Februar 2005 "nimmt die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) zu den erdwissenschaftlichen und bautechnischen Aspekten des Projektes Opalinuston Stellung, mit welchem die Nagra die sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente (BE), verglaster hochaktiver Abfälle (HAA) und langlebiger mittelaktiver Abfälle (LMA) in einem geologischen Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes aufzeigt" {KNE, S. 1}. Die KNE äussert sich damit im Rahmen des Entsorgungsnachweises faktisch zum Standortnachweis und zum Machbarkeitsnachweis. Ausserdem überprüft sie Daten und Szenarien, welche in den Sicherheitsnachweis einfließen.

Der Bericht umfasst eine Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der KNE sowie Teilberichte mit Beurteilungen von fachspezifischen Themen, welche von einzelnen Mitgliedern verfasst sind.

7.2.2 Beurteilung der fachspezifischen Themen zum Standortnachweis durch die KNE

7.2.2.1 Tektonik, Geodynamik und Erosionsszenarien

Die Analyse der KNE beruht auf der "Beurteilung der tektonischen Situation des Zürcher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes" " {KNE, Teilbericht A} und der "Beurteilung der plio-/pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Zürcher Weinlandes und der Erosionsszenarien" " {KNE, Teilbericht B}.

Teilbericht A: "Beurteilung der tektonischen Situation des Zürcher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes"

Einleitend stellt die KNE den allgemeinen geodynamischen Rahmen der Nordschweiz dar, zieht Schlussfolgerungen für die Tektonik des Zürcher Weinlandes und allgemeine Schlussfolgerungen zu den hinsichtlich des Entsorgungsnachweises gestellten Fragen.

Aus Sicht der KNE ist die Tektonik der Nordschweiz gut und umfangreich untersucht und beschrieben. Ergänzende Untersuchungen im Rahmen künftiger Arbeiten schlägt die Kommission allerdings zu folgenden Themen vor:

- Ausweitung der Untersuchungen bzgl. aktiver Tektonik im Gebiet Hegau-Bodensee-Graben.
- Systematische Maturitäts-, Diagenese- und Apatitpurenanalysen in künftigen Tiefbohrungen.

⁷ Nachfolgend wird die Referenz [37] in diesem Unterkapitel durch das Akronym KNE ersetzt. Entsprechende Referenzangaben erfolgen in geschwungener Klammer, fallweise ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurennummer usw.

Das von der Nagra dargestellte geodynamische Modell sei "mit vernünftigen Argumentationen begründet", müsse aber künftig weiter entwickelt werden. Das von der Nagra postulierte Langzeitszenarium des "anhaltenden alpinen Fernschubs" hält die KNE für ein "extremes Szenarium". Sie schlägt vor, dieses im Referenzfall durch das realistischere Szenarium des "Ausklingens der alpinen NNW-SSE-Kompression und einer anhaltenden WSW-ENE gerichteten Extension des alpinen Vorlandes" zu ersetzen.

Für den Entsorgungsnachweis hält die KNE den vorgelegten Datensatz und den gegenwärtigen Kenntnisstand für genügend. Sie erwartet allerdings im Verlaufe der nächsten Projektphasen eine weiter verbesserte Charakterisierung des Wirtgesteins und eine Bestätigung der Gesteinseigenschaften.

Teilbericht B: "Beurteilung der plio-/pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Zürcher Weinlandes und der Erosionsszenarien"

In {KNE, Teilbericht B} untersucht die KNE die Prozesse, welche für die geologische Gliederung und Gestaltung der Landschaft während der erforderlichen Isolationsdauer der Abfälle, d. h. während einer Million Jahre, wichtig sind. Dabei geht sie von den Prozessen aus, welche in den vergangenen 10 Millionen Jahren die geologische Entwicklung bestimmt haben. Im betrachteten Referenzfall der Nagra befindet sich das Lager im Opalinuston auf 650 – 750 m Tiefe im Gebiet des Zürcher Weinlandes.

Neotektonik: Die KNE hält die von der Nagra mit drei verschiedenen Methoden (Geodäsie, Geomorphologie und Beckenmodellierung) ermittelten Hebungsraten des Zürcher Weinlands von ca. 0,08 bis 0,15 mm/a bzw. 100 m in einer Million Jahre für die nähere Zukunft (1 Million Jahre) für zuverlässig und für, im regionalen Rahmen betrachtet, relativ klein.

Glazialgeschichte: Die KNE unterstützt das Szenarium der Nagra, bei welchem davon ausgegangen wird, dass für die nächste Million Jahre weiterhin mit einem "Eishausklima" zu rechnen ist. Die Annahmen der Nagra zum Ausmass künftiger Vereisungsphasen und deren Erosionspotenzial seien sehr konservativ. Nach Auffassung der KNE sollte der zeitliche Ablauf der Glazialgeschichte, seine Zyklen sowie die Sedimentations- und Erosionsabläufe mit Forschungsprogrammen noch besser untersucht werden. Insbesondere sollte geklärt werden, ob die Gletscher in jeder Eiszeit den Untergrund bis auf den Fels erodiert haben oder ob die grossen Übertiefungen auf einmalige Situationen zurückzuführen sind.

Erosionsszenarien: Die KNE bestätigt die allgemeine Vorstellung, dass Vergletscherungen vor allem die Talerosion fördern. Flächenhafte Denudation spiele eine kleinere Rolle. In Warmzeiten sei die chemische Erosion wichtiger, sie würde aber die Hebungsraten nicht ausgleichen. Durch Flusserosion ergäbe sich im schlimmsten Falle (worst case) zwischen Basel und Bodensee innert einer Million Jahre eine zusätzliche Erosion von 100 m.

Die KNE ist der Ansicht, dass keines der betrachteten Erosionsszenarien zu einer Freilegung des Lagers führen könne. Solange sich Gletscher in ihrer Ausdehnung und Mächtigkeit nicht wesentlich von jenen bisheriger (vergänger) Kaltzeiten unterscheiden, dürften sie sich in alpenfernen, distalen Gebieten wie dem Zürcher Weinland an alte bzw. bestehende Täler halten.

Diese Aussagen werden allerdings relativiert durch die oben erwähnten Unsicherheiten zur Glazialgeschichte und sind daher mit einer Empfehlung zu vertiefter Erforschung verbunden.

In den Schlussfolgerungen verbindet die KNE die Erkenntnisse aus der Erdgeschichte mit Abschätzungen zum möglichen menschlichen Einfluss.

7.2.2.2 Aufbau und Ablagerungsgeschichte des Opalinuston

{KNE, Teilbericht C} enthält die "Beurteilung der sedimentologischen und lithofaziellen Verhältnisse des Opalinustons im Zürcher Weinland". Es wird erörtert, "ob es bei dem heutigen Stand der Kenntnis hinsichtlich der Sedimentologie und Lithologie des Wirtgesteins Fakten gibt, die den Opalinuston im Zürcher Weinland als Wirtgestein für radioaktive Abfälle als nicht geeignet erscheinen lassen, und das Projekt daher aufgegeben werden sollte, oder ob das Projekt weiter verfolgt werden kann".

Die Analyse der Entstehung und lithologischen Entwicklung des Opalinustons umfasst neben Informationen aus den Berichten der Nagra auch Expertenwissen und zahlreiche Literaturdaten.

Gemäss der Zusammenfassung {KNE, S. 5} ist der Opalinuston "im Gebiet der Nordschweiz recht einheitlich ausgebildet und im Zürcher Weinland etwa 110 m mächtig". Im Tongestein seien dünne Silt- und Feinsandlagen, Kalkbänkchen und Lagen mit Konkretionen im Kilometer- bis 10-Kilometer-Bereich lateral verfolgbar, ohne dass sich der tonreiche Charakter des Gesteins ändere. Insgesamt seien die Gesteinseigenschaften des Opalinustons hinsichtlich seiner Eignung zur Lagerung radioaktiver Abfälle als günstig zu beurteilen. Der hohe Tongehalt und die feinen Korngrössen hätten geringe hydraulische Durchlässigkeiten zur Folge und bestimmten das Selbstabdichtungsvermögen. Wichtig seien in diesem Zusammenhang die Gleitfähigkeit der plättchenförmigen Mineralien und das Quellverhalten der Tonmineralien. Nach der Ablagerung sei der Opalinuston von jüngeren Sedimenten überlagert worden und dabei auf eine Temperatur von 70 bis 80 °C aufgewärmt worden.

In Teilbericht C empfiehlt die KNE, in einer späteren Phase ergänzende Studien mit folgenden Zielsetzungen durchzuführen (gekürzt):

- Verfeinerung der genetischen Interpretation der lithologischen Variationen zur Optimierung der Baumassnahmen;
- Analyse der Sedimentverteilung;
- Zuordnung von wichtigen geotechnischen Eigenschaften zur Lithologie;
- genauere Temperaturgeschichte;
- alternative Gebinde-Auslegungen, damit die maximalen in der geologischen Geschichte erreichten Paläotemperaturen im Lager nicht überschritten werden;
- genauere Bestimmung und experimentelle Validierung der für die Riss- und Kluftbildung kritischen Parameterwerte.

Zusammenfassend beurteilt die KNE die lithologischen Eigenschaften des Opalinustons hinsichtlich seiner Eignung zur Lagerung radioaktiver Abfälle insgesamt als günstig. Die Lithologie habe eine geringe hydraulische Durchlässigkeit und das "Selbstabdichtungsvermögen" bei Kluftbildungen zur Folge. Weiter stellt sie fest: "Die für die Lagerung radioaktiver Abfälle günstigen lithologischen Eigenschaften werden durch den Bau eines Tiefenlagers und das Aufbringen einer thermischen Last beeinflusst. Diese Einflüsse sind im Falle der Weiterführung des Projektes noch vertieft zu untersuchen und genauer zu quantifizieren, um mögliche Risiken zu minimieren."

7.2.2.3 Hydrogeologie und Hydrochemie

Hydrogeologie und Hydrochemie werden in folgenden Teilberichten abgehandelt:

- Teilbericht D: "Beurteilung der hydrogeologischen-hydrochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen"

- Teilbericht E: "Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen"

Teilbericht D: "Beurteilung der hydrogeologischen-hydrochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen"

Die KNE betrachtet zuerst die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland: die Stockwerkstruktur der Grundwasserleiter und ihre hydraulischen Durchlässigkeiten, die chemische Zusammensetzung der Tiefengrundwässer, die Verteilung der hydraulischen Potenziale und der daraus ableitbaren Wasserflussrichtungen, den Einfluss der regionalen Hydrogeologie auf mögliche Austrittspfade von Radionukliden aus dem Tiefenlager und die Bedeutung der regionalen Hydrogeologie für den Bau und Betrieb eines Tiefenlagers. Sodann analysiert die Kommission die Aussagen und die Dokumentation der Nagra.

Die KNE bezeugt, dass die Nagra seit den 80-er Jahren sehr viel getan hat, um bestehende hydrogeologische Daten einzubeziehen und mit gezielten Untersuchungen zu ergänzen. Im Bericht zur Geosynthese [44] sei die umfangreiche Datenbasis zur regionalen Hydrogeologie sorgfältig und mit der kritischen wissenschaftlichen Distanz zusammengefasst. Den allenfalls vorhandenen Datenlücken werde in der Sicherheitsanalyse mit konservativen Annahmen/Parametersätzen oder mit der Nichtberücksichtigung einer Barrierenwirkung Rechnung getragen. Die umfangreichen Daten und ihre sorgfältige Zusammenstellung und Interpretation durch die Nagra und ihre Experten ergäben ein solides und nachvollziehbares Bild der hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland. "Obwohl nicht alle Formationen im gleichen Umfang und gleicher Breite hydrogeologisch untersucht wurden und im Detail bekannt sind, sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar und plausibel und erlauben für die jetzige Projektstufe (Entsorgungsnachweis) die Frage der Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland positiv zu beantworten. Die vorgelegten Befunde weisen auf ein sehr hohes Einschlussvermögen des Opalinustons hin (Verweilzeiten der Porenwässer im Zeitbereich von Millionen von Jahren)" {KNE, S. D6}. Die Erweiterung und Vervollständigung der Daten habe in der nächsten Projektphase zu erfolgen, wobei insbesondere die Rolle der Rahmengesteine des Opalinustons noch vertiefter zu klären sei.

Teilbericht E: "Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen"

Die kritische Sichtung der isotopengeochemischen Daten dient in erster Linie der Überprüfung der von der Nagra vorgenommenen Interpretation zu den In-situ-Transporteigenschaften des Opalinustons und der angrenzenden Rahmengesteine. Es handelt sich damit gleichzeitig um eine Überprüfung des allgemeinen hydrogeologischen Modells und der Parameter zum Fliessverhalten, welche in die Sicherheitsanalyse einfließen.

Die KNE kommt zum Schluss, dass die in [44] und [42] diskutierten Edelgasresultate "mit Vorbehalt schlüssig" seien und den Schluss zuliessen, dass Edelgase diffusiv (also nicht konvektiv) zwischen den Porenwässern (des Opalinustons) und angrenzenden Aquiferen ausgetauscht würden. Die Herkunft der Porenwässer aus fossilen marinen Wässern wird bestätigt und die Diffusionsrichtungen aus dem Opalinuston in die Aquifere, vor allem in den tiefer liegenden Stubensandstein, werden dargelegt.

Die Kommission formuliert schliesslich Empfehlungen zur Transportmodellierung und zur genaueren Untersuchung des Horizontaltransports durch das Wirtgestein.

7.2.2.4 Schlussfolgerungen der KNE

In ihrer Zusammenfassung {KNE, S. 1} kommt die KNE "nach Prüfung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen zum Schluss, dass der Standortnachweis mit dem Projekt Opalinuston erbracht ist. Die erdwissenschaftlichen Annahmen, welche die Nagra bei der Entwicklung der Szenarien für den Nachweis der Langzeitsicherheit getroffen hat, basieren auf sorgfältig zusammengetragenen und nachvollziehbaren Daten. Diese wurden entsprechend dem Stand der wissenschaftlichen Kenntnisse ausgewertet und interpretiert. Wo eine ausreichende Datenbasis heute noch fehlt, hat die Nagra konservative Annahmen getroffen. ... Die KNE hat bei der Überprüfung des Projektes Opalinuston verschiedene offene Fragen formuliert, welche im Rahmen der weiteren Untersuchungen geklärt werden müssen."

7.2.3 Beurteilung des Berichtes der KNE durch die KSA

Die KSA ist der Ansicht, dass die KNE in ihrem Bericht die erdwissenschaftlichen Aspekte des Standortnachweises im Rahmen des Entsorgungsnachweises umfassend und detailliert analysiert hat. Auf Grund ihrer Analyse kommt die KNE zum Schluss, dass der Standortnachweis erbracht ist. Ausserdem formuliert sie im Hinblick auf die nächsten Projektphasen zahlreiche Empfehlungen für ergänzende Untersuchungen. Generell unterstützt die KSA diese Empfehlungen der KNE.

8 Grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiver Abfälle

Gemäss Art. 2 Abs. 4 der Verordnung über die Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen [12] äussert sich die KSA *“insbesondere zu grundsätzlichen Fragen”*. Die Kommission nimmt daher nicht nur direkt zum Entsorgungsnachweis Stellung, sondern greift auch einige grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle auf.

Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen in geologischen Tiefenlagern ist nach menschlichem Zeitmassstab (Zeitraumen der Handlungsbestimmung durch eine Generation) ein sehr lang dauernder Prozess. Abgesehen von der für hochaktive Abfälle notwendigen Zeit für das Abklingen der Nachzerfallswärmeproduktion auf lagerverträgliche Werte erfordern die verschiedenen Projektphasen der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers – Standortauswahl und -charakterisierung, Planung, Bau und Betrieb (mit Einlagerung), Überwachung und Verschluss – einen Zeitraumen von mindestens einigen Jahrzehnten. Während der Schutz der heutigen und künftigen Generationen und Umwelten unverrückbares Ziel bleibt, können Entscheide und Konzepte im Verlaufe der Jahre veränderten Bedingungen und Erkenntnissen unterworfen sein. Um dem Rechnung zu tragen, müssen Betriebsgrundsätze und -konzepte in einem konsistenten und schrittweisen Entscheidungsfindungsprozess regelmässig und zielgerichtet überdacht und allenfalls angepasst werden.

8.1 Forschung und Entwicklung

Die Entsorgung der radioaktiven Abfälle stellt ein langfristiges Vorhaben dar. Entsprechend können und müssen viele der erforderlichen Lösungen erst stufenweise konkretisiert werden. Die Kernenergiegesetzgebung trägt der zeitlichen Entwicklung Rechnung, indem sie die Einhaltung des jeweiligen Stands des Wissens und der Technik fordert. Zudem haben die Entsorgungspflichtigen ein Entsorgungsprogramm zu erstellen, das periodisch veränderten Verhältnissen anzupassen ist (Art. 32 KEG).

Die Gutachten zum Entsorgungsnachweis zeigen in verschiedenen Punkten weitergehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf. Einige dieser Untersuchungen sollten zügig an die Hand genommen werden, da sie von grundlegender Bedeutung für die weiterführenden Arbeiten sind. Dazu zählt beispielsweise die Evaluation alternativer Behältermaterialien (vgl. Unterkapitel 3.4).

Generell ist es notwendig, klare Vorstellungen darüber zu entwickeln, welche Fragen zu welchem Zeitpunkt zu lösen sind und welchen Konkretisierungsgrad diese Lösungen erfordern. Nur so kann verhindert werden, dass unnötige Präjudizien geschaffen und durch die Notwendigkeit, bereits entwickelte Lösungen fundamental zu revidieren, unnötig Ressourcen beansprucht werden. Das in KEG Art. 32 geforderte und in KEV Art. 52 konkretisierte Entsorgungsprogramm trägt diesen Anforderungen Rechnung. Nicht angesprochen werden allerdings Forschungsarbeiten im sozialwissenschaftlichen Bereich. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-1

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.

8.2 Koordination des Entsorgungsprogramms

8.2.1 Ausgangslage

8.2.1.1 Gesetzliche Grundlagen und politische Vorgaben

Das Kernenergiegesetz (KEG) schreibt die Pflicht zur Entsorgung radioaktiver Abfälle vor. Art. 31 Abs. 1 KEG lautet:

"Wer eine Kernanlage betreibt oder stilllegt, ist verpflichtet, die aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle auf eigene Kosten sicher zu entsorgen. Zur Entsorgungspflicht gehören auch die notwendigen Vorbereitungsarbeiten wie Forschung und erdwissenschaftliche Untersuchungen sowie die rechtzeitige Bereitstellung eines geologischen Tiefenlagers."

Für die radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung, die nicht als Folge der Nutzung der Kernenergie entstehen, hat gemäss Strahlenschutzgesetzgebung der Bund die Entsorgungspflicht.

Gemäss der von der Schweiz ratifizierten Joint Convention ist die Entsorgung eine übergeordnete Aufgabe des Staates [28, Präambel xi, Art. 18, Art. 19]. Der Staat hat dabei insbesondere die gesetzlichen und regulatorischen Grundlagen für den sicheren Umgang mit abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen zu schaffen (Art. 19) und die notwendigen Massnahmen zu ergreifen, um die Bestimmungen der Konvention umsetzen zu können (Art. 18). Im ersten nationalen Bericht zur Joint Convention [68] bestätigt die Schweiz, dass sie Art. 18 und 19 erfüllt. Dazu gehört insbesondere auch die gesetzlich festgelegte klare Zuordnung der Verantwortung der beteiligten Parteien.

8.2.1.2 Nagra bzw. Entsorgerorganisation

Die Entsorgungspflichtigen (Betreiber der Kernkraftwerke und der Bund) haben im Jahre 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet. Die Nagra hat den Auftrag, die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die langfristig sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle zu erarbeiten. In Zusammenarbeit mit in- und ausländischen Forschungsinstitutionen sowie privaten Unternehmungen führt sie seit 1978 Forschungsprogramme durch. Sie betreibt das Felslabor Grimsel (Kristallin, in Betrieb seit 1983) und ist Partnerin des internationalen Felslabors Mont Terri (Opalinuston, als Forschungsprogramm in Betrieb seit 1995). Sie erarbeitet Vorschläge zu Entsorgungskonzepten, prüft die Eignung möglicher Standorte. Im Jahre 1985 unterbreitete sie dem Bund mit dem "Projekt Gewähr 1985" einen ersten Nachweis für eine sichere Entsorgung. Die vom Bund verlangte Ergänzung dieses Nachweises für hochaktive Abfälle ist von der Nagra mit den Berichten zum "Projekt Opalinuston" nun eingereicht worden und Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme.

Für die Realisierung eines Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) hatten die Betreiber zusammen mit der Gemeinde Wolfenschiessen 1994 die Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg (GNW) gegründet. Diese führte die Projektarbeiten am Wellenberg durch, wobei sie wissenschaftlich-technische Arbeiten der Nagra übertrug.

Organisatorisch ist die Nagra in die Geschäftsführung mit Stabsfunktionen und in vier Abteilungen (Lagerprojekte, radioaktive Materialien, Internationale Dienstleistungen und Projekte, Technik und Wissenschaft) gegliedert. Sie beschäftigt rund 70 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und verfügte 2004 für Forschungs- und Projektarbeiten über ein Budget von rund 22 Mio. Franken [54] [4].

8.2.1.3 Organisationen zur technisch-wissenschaftlich Begleitung der Nagra

Die Arbeiten der Nagra werden, u. a. direkt oder indirekt, durch folgende Gremien und Kommissionen des Bundes begleitet:

- *Kommission für die Nukleare Entsorgung (KNE)*: Die KNE ist eine vom UVEK bestellte Subkommission der Eidg. Geologischen Fachkommission (EGK). Ihre Aufgabe ist die fachtechnische Beratung der Bundesbehörden – des BFE und der HSK – in wichtigen erdwissenschaftlichen Fragen der nuklearen Entsorgung.
- *Arbeitsgruppe des Bundes für die Nukleare Entsorgung (AGNEB)*: Die AGNEB hat den Auftrag, die Arbeiten zur nuklearen Entsorgung in der Schweiz zu verfolgen, zuhanden des Bundesrates Stellungnahmen zu Fragen der nuklearen Entsorgung zu erarbeiten, die Bewilligungsverfahren auf Bundesebene zu begleiten und Fragen der internationalen Entsorgung zu behandeln.
- *Eidg. Kommission für die Sicherheit der Kernanlagen (KSA)*: Die KSA beurteilt die Entsorgung radioaktiver Abfälle unter grundsätzlichen Aspekten der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes. Sie berät den Bundesrat und das UVEK.
- *Bundesamt für Energie (BFE)*: Das BFE ist die zuständige Behörde für den Vollzug des KEG. Es führt die Bewilligungsverfahren durch und erarbeitet die Entscheidungsgrundlagen zuhanden des UVEK und des Bundesrates.
- *Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)*: Die HSK ist für die Aufsicht über die sicherheitstechnischen Aspekte der Entsorgung zuständig. Sie beaufsichtigt die Kernanlagen und damit die Entstehung, Konditionierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle. Sie gibt Abfallgebinde, die eine Endlagerfähigkeits-Bescheinigung der Nagra haben, für die Herstellung frei. Sie begleitet und begutachtet die Untersuchungen der Nagra für die geologische Tiefenlagerung und verfasst Gutachten zum "Projekt Gewähr 1985" und zum Projekt "Opalinuston". Sie wird die Aufsichtsbehörde über ein konkretes Tiefenlagerprojekt sein.

8.2.1.4 Gremien zu sozio-politischen Aspekten

Um den Informations- und Wissensaustausch mit den vom Entsorgungsnachweis direkt betroffenen Kantonen, dem benachbarten Ausland und der Öffentlichkeit sicherzustellen, hat das BFE drei Gremien eingesetzt:

- *Ausschuss der Regierungsvertreter*: Er besteht aus Vertretern des Bundes, Regierungsvertretern der betroffenen Kantone und des Bundeslandes Baden-Württemberg.
- *Technisches Forum*. Im Forum vertreten sind die Kantone Zürich, Aargau, Thurgau und Schaffhausen, die KSA, die KNE, die Nagra, das Forum Opalinuston und KLAR! Schweiz. Von deutscher Seite nehmen Vertreter des Landes Baden-Württemberg sowie des Landkreises Waldshut teil. Es steht unter Leitung der HSK. Im Forum können Fachleute der betroffenen Region ihre technischen Fragen und Anregungen einbringen und diskutieren.
- *Arbeitsgruppe Information und Kommunikation*: In der Arbeitsgruppe sind die Kantone Zürich, Aargau, Thurgau und Schaffhausen, das Landratsamt Waldshut, das Regierungspräsidium Freiburg sowie die HSK vertreten. Sie wird vom BFE geleitet. Die Nagra wird bei Bedarf zugezogen. Die Arbeitsgruppe koordiniert die Informations- und Kommunikationstätigkeiten im Zusammenhang mit dem Entsorgungsnachweis BE/HAA/LMA und dem weiteren Vorgehen.

Der Bund legt in einem Sachplan gemäss Raumplanungsgesetz (Art. 3 RPG) [6] die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern für die Behörden verbindlich fest (Art. 5 KEV). Damit werden gemäss

Raumplanungsverordnung neben den betroffenen Bundesstellen weitere Stellen – Behörden der betroffenen Kantone und des benachbarten Auslands sowie betroffene Organisationen und Personen des öffentlichen und privaten Rechts, die nicht der Verwaltung angehören, soweit sie mit der Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben betraut sind – sowie die Bevölkerung einbezogen (Art. 18 und 19 RPV) [7].

8.2.1.5 Aspekte der Programmorganisation

Neben den routinemässigen Projektarbeiten wie der Führung der Felslabors und der Durchführung von Forschungsprogrammen hat die Nagra folgende Projekte organisatorisch zu bewältigen:

- Erbringung des Entsorgungsnachweises;
- Erarbeitung der Grundlagen für die Standortwahl;
- Betreuung von Projekten für konkrete Standorte und für die Erlangung der Rahmen-, Bau- und Betriebsbewilligungen;
- Bau eines oder mehrerer geologischen Tiefenlager;
- Betrieb eines oder mehrerer geologischen Tiefenlager.

Für die in Zukunft zu behandelnden Projekte "geologisches Tiefenlager BE/HAA/LMA" sowie den Bau und den Betrieb des Lagers macht die Nagra einige Angaben zur Betriebsorganisation [43, 5.5]. Das Betriebskonzept geht von einer Betriebsdauer (Einlagerzeit) von ca. 17 Jahren aus. Dabei wird eine kleine, über mehrere Jahre voll beschäftigte Betriebsmannschaft von ca. 30 Mitarbeitenden zu Grunde gelegt, die im Einschichtbetrieb arbeiten. Die Aufteilung der Mitarbeitenden auf Funktionen ist in einer Tabelle dargestellt. Nicht zu den Aufgaben der Betriebsmannschaft gehören allfällige Konditionierungsarbeiten vor Ort sowie Bauarbeiten am Lager. Über die Konditionierung vor Ort wird erst später entschieden werden; die Bauarbeiten werden extern vergeben. Sollte die zu lagernde Abfallmenge wesentlich grösser sein als derzeit angenommen, so kann dies durch eine Verstärkung der Betriebsmannschaft und Zweischichtbetrieb oder eine Verlängerung der Betriebszeit von 17 auf 25 Jahre aufgefangen werden.

Angaben zur Projektorganisation für die Betreuung eines konkreten Projektes für ein geologisches Tiefenlager und für den Bau eines solchen Lagers werden keine gemacht.

Generell hält die Nagra fest, dass "die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz noch einige Jahrzehnte in der Zukunft liegt. Das vorliegende Projekt muss deshalb nicht – und kann deshalb auch nicht – jenen Umfang und Tiefgang haben, wie es zur Aufnahme von Bewilligungsverfahren zur Lagerrealisierung notwendig sein wird" [43, 1.2.4].

8.2.2 Beurteilung durch die KSA

Zur Wahrnehmung ihrer gesetzlichen Verpflichtung zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle haben die Verursacher die Nagra gegründet. Bei ihren bisherigen Arbeiten hat die Nagra gezeigt, dass sie Projekte technisch-wissenschaftlich durchführen kann und das Forschungs- und Entwicklungsprogramm fortführt. Dabei sollten in Zukunft die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf konkrete Tiefenlagerprojekte ausgerichtet werden. Die für die Realisierung des SMA-Lagers am Wellenberg zuständige GNW hat die technischen und organisatorischen Aufgaben zusammen mit der Nagra nach Meinung der KSA korrekt abgewickelt. Das Projekt scheiterte am Nein des Nidwaldner Stimmvolks.

Es ist derzeit offen, wie die Betreiber bzw. die Nagra organisatorisch ein konkretes Projekt "BE/HAA/LMA" angehen wollen. Zur Betriebsorganisation eines Lagers macht die

Nagra einige Angaben. Die KSA geht auf eine konkrete Beurteilung dieser Angaben nicht ein. Sie ist wie die Nagra der Meinung, dass zum heutigen Zeitpunkt ein tieferer Detaillierungsgrad einer konkreten Projektorganisation unnötig ist.

Die KSA hat daher keinen Anlass zu bezweifeln, dass die Nagra die bevorstehenden Arbeiten für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers technisch und organisatorisch bewältigen kann. Die Beurteilung der Eignung einer konkret vorgeschlagenen Organisation (Fachkenntnisse, Zuständigkeiten, genügend Personal, Abdeckung von Unvorhergesehenem und Störfällen, Qualitätsmanagement etc.) wird Teil des formalen Bewilligungsverfahrens sein.

Die Idee des Entsorgungsrats, die von der EKRA entwickelt und in den zwei Klausuren der involvierten Stellen des Bundes im Jahre 2003 begrüsst wurde, soll durch den Bund möglichst rasch umgesetzt werden. Damit liesse sich die direkte und indirekte Begleitung und Bewertung der gesamten Entsorgungsarbeiten durch verschiedene Gremien kohärenter und wirkungsvoller gestalten. Wesentliche Ziele sind vor allem die Vermeidung von Doppelspurigkeiten, die vermehrte Ausschöpfung von Synergien, ein effizienterer Einsatz der verfügbaren Ressourcen und die vereinfachte, klarere Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Der Entsorgungsrat könnte allenfalls die Koordination der Arbeiten der in 8.2.1.3 und 8.2.1.4 erwähnten Gremien übernehmen. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-2

Die Idee des Entsorgungsrats soll durch den Bund möglichst rasch umgesetzt werden.

8.3 Qualitätsmanagement

8.3.1 Ausgangslage

Gemäss Kernenergiegesetz müssen Programme für qualitätssichernde Massnahmen sowohl für sämtliche Bautätigkeiten (KEG Art. 16) als auch für sämtliche im Betrieb ausgeübten Tätigkeiten (KEG Art. 20) vorliegen und angewendet werden.

Der Trend in aktuellen Qualitätsmanagement-Systemen geht in Richtung Integrierter Management-Systeme. Dabei bieten die Normen ISO 9001:2000 und 9004:2000 ein generisches Managementmodell, welches durch seine Struktur und strikte Prozessorientierung die Integration des Qualitätsmanagement in ein ganzheitliches Führungssystem wesentlich erleichtert. In Integrierten Management-Systemen werden die Bereiche Qualitätsmanagement, Betrieb und Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Arbeitssicherheit, Umweltschutz etc. zusammengefasst; sie ergänzen sich und erlauben so ein effizientes Management und das Erzielen einer hohen Qualität in allen Bereichen [62].

Im Bereich der Kernenergienutzung liegt u. a. das Dokument INSAG-13 [34] der IAEO vor. Darin sind die Anforderungen für ein wirkungsvolles Sicherheitsmanagement-System zusammengestellt und Anleitung für dessen Nutzung gegeben. INSAG-13 ist auf den Betrieb von Kernkraftwerken fokussiert, seine Grundlagen sind aber auch für andere Nuklearanlagen bzw. Organisationen im Nuklearbereich anwendbar [34; Ziffer 5].

Die IAEA überarbeitet gegenwärtig ihre Dokumente zum Qualitätsmanagement [27]. Derzeit liegt ein Entwurf des neuen Dokuments vor (DS 338, Draft 7: Management Systems). Dieser basiert auf der Norm ISO 9001:2000 und empfiehlt die Anwendung eines Integrierten Management-Systems. Ziel des Dokuments ist es, Anforderungen an

ein Management-System aufzustellen, das genutzt werden muss, um die Sicherheit von Anlagen und Tätigkeiten mit ionisierender Strahlung zu gewährleisten.

8.3.2 Angaben der Nagra

Angaben über die Qualitätssicherung der Nagra sind in den Berichten [43] und [45] knapp gehalten. Qualitätssichernde Massnahmen hat die Nagra u. a. ergriffen, wenn es um die Validierung der Sicherheitsanalyse geht [45, Anhang 4: D-1 bis D-5] [46, Anhang 8: H-1 bis H-2]. Darauf wurde am Review Meeting der "NEA International Peer Review" im November 2003 hingewiesen [56, S. 55–57]: *"Bisher wurde das QS-System bei der ISO noch nicht formell zertifiziert und wurde auch noch nicht einem formellen externen Audit unterzogen, obschon ein externer QS-Spezialist hinzugezogen wurde. Die Nagra hat allerdings erklärt, dass sie eine Zertifizierung ihres QS-Systems nach ISO 9001:2000 anstrebt. Das Internationale Peer Review Team empfiehlt der Nagra mit der Zertifizierung fortzufahren. Damit wird das QS-System der Nagra einem formellen Audit unterzogen. Das Review Team 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."* Die Nagra hat ihr QS-System nach ISO 9001:2000 im Frühsommer 2005 zertifizieren lassen.

Qualitätssichernde Massnahmen für den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers umschreibt die Nagra in [43; 5.4.2], wobei diese Massnahmen zu gegebener Zeit spezifiziert werden sollen.

8.3.3 Beurteilung durch die KSA

Die Arbeiten der Nagra bei der Suche nach einem geologischen Tiefenlager und anschliessend bei der Realisierung sind einerseits äusserst komplex, andererseits sind daran zahlreiche Stellen und Organisationen beteiligt (vgl. Unterkapitel 8.2). Eine auf wenige Tätigkeiten ausgerichtete Qualitätssicherung im ursprünglichen Sinne genügt für diese Aufgaben nicht. Die Nagra als federführende Entsorgungsorganisation benötigt, um erfolgreich zu sein und das Vertrauen bei allen beteiligten Stellen aufbauen und stärken zu können, ein Management-System, welches modernen Standards entspricht. Die KSA erachtet die Zertifizierung des Management-Systems nach ISO 9001:2000 als wichtigen Schritt. Auf Grund des hohen Anspruchs an die Qualität der Arbeit der Nagra sieht die KSA die Notwendigkeit, dass die Nagra ihr Management-System über die Zertifizierung hinaus auch nach der Norm ISO 9004:2000 (Qualitätsmanagement-Systeme – Leitfaden zur Leistungsverbesserung) ausbaut. Dabei sind die Anforderungen von INSAG-13 [34] und geltender IAEA-Dokumente zu berücksichtigen. Der Stand der Management-Technik, insbesondere im Nuklearbereich, muss intensiv verfolgt werden. Es soll sichergestellt werden, dass das Qualitätsmanagement stets dem Stand des Wissens entspricht.

Die angesprochenen ISO-Normen verlangen keine Audits und Reviews durch Externe. Die KSA ist aber der Meinung, dass im Falle der Entsorgungsarbeiten, die wissenschaftlich anspruchsvoll und auch politisch relevant sind, eine periodische Überprüfung durch ein ständiges Gremium von unabhängigen externen Experten notwendig ist.

Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-3

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.

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.

8.4 Verfahren

Die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle EKRA entwickelte Beurteilungskriterien für Entsorgungskonzepte, die sich sinngemäss auf alle Verfahrensschritte, die zur Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung benötigt werden, übertragen lassen. Diese Kriterien sind: 1. Sicherheit für Mensch und Umwelt, 2. Handlungsspielraum für alle betroffenen Generationen und Gerechtigkeit, 3. Einhaltung des Verursacherprinzips und 4. Akzeptanz.

Gesellschaftliche Akzeptanz ist eine wesentliche Voraussetzung, um das Entsorgungsproblem zu lösen. Dies gilt nicht nur für diejenige Zeitspanne, in der ein bestimmter Verfahrensschritt durchlaufen wird, sondern auch langfristig: Werden Teile des Verfahrens abgewickelt, ohne auf breite gesellschaftliche Akzeptanz zählen zu können, sind negative Auswirkungen noch Jahrzehnte später zu befürchten – wie sich beispielsweise am Auswahlverfahren zeigte, das zum Standort Wellenberg führte.

Bei der geologischen Tiefenlagerung handelt es sich um eine Frage, die breite Kreise der Bevölkerung bewegt und bei der unterschiedliche Werthaltungen aufeinander treffen. Zudem ist die Lagerung der Abfälle über geologische Zeiträume mit einem hohen Mass an Unsicherheiten verbunden, das nach einer gesellschaftlichen Einigung über das akzeptable Restrisiko verlangt. Um zu einer gesellschaftlich breit abgestützten Lösung zu gelangen, sind partizipative Verfahren geeignet.

Mit dem Verfahren soll eine Lösung angestrebt werden, welche

- auf breiter und dauerhafter gesellschaftliche Unterstützung basiert und
- auch für die im Verfahren unterlegenen Gruppen annehmbar ist.

Das Bundesamt für Energie sieht im Sachplan Geologische Tiefenlagerung vor, ein partizipatives Verfahren durchzuführen.

Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-4

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.

8.5 Wissensmanagement

Unter "Wissensmanagement" wird im Folgenden Identifikation, Erwerb, Strukturierung, Entwicklung, Archivierung, Nutzung sowie Verteilung und Weitergabe von Informationen, Erkenntnissen und Daten zur Entsorgung und insbesondere zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers verstanden, mit dem Ziel, diese langfristig, d.h. zumindest

solange das geologische Tiefenlager dem Kernenergiegesetz untersteht, zu erhalten, weiter zu entwickeln und in geeigneter Form weiterzugeben.

8.5.1 Ausgangslage

8.5.1.1 Gesetzliche Grundlagen

Das Kernenergiegesetz (KEG) und die Kernenergieverordnung (KEV) enthalten Bestimmungen zur Dokumentation und zum Kenntniserhalt bei erdwissenschaftlichen Untersuchungen und Daten, bei der Aufstellung und Verfolgung des Entsorgungsprogramms, beim Betrieb eines geologischen Tiefenlagers sowie zum Schutz des Tiefenlagers nach dem Verschluss.

Art. 32 KEG und Art. 52 KEV verlangen die Erstellung eines Entsorgungsprogramms und dessen periodische Anpassung. Art. 36 KEG und Art. 72 KEV regeln den Umfang und den Aufbewahrungsort der Daten, die bei erdwissenschaftlichen Untersuchungen gewonnen werden (erdwissenschaftliche Dokumentation). Die Dokumentation des Betriebes eines geologischen Tiefenlagers wird in mehreren Artikeln behandelt: Art. 22 und 38 KEG sowie Art. 41 und 71 KEV. Die Dokumentation nach Verschluss bzw. nach der Überwachungsperiode wird in Art. 40 KEG angesprochen: Der Bundesrat hat dafür zu sorgen, dass die Informationen über das Lager, die eingelagerten Abfälle und den Schutzbereich aufbewahrt werden und die Kenntnisse darüber erhalten bleiben. Der Bundesrat schreibt auch die dauerhafte Markierung des Lagers vor.

Die HSK-R-14 [24] stellt konkrete Anforderungen an die Dokumentation von Abfallgebänden. Abfallgebände, die von den Abfallproduzenten hergestellt werden, müssen eindeutig identifizierbar und für ihre Entsorgung ausreichend charakterisiert sein. Hierzu muss für jedes Gebinde eine Dokumentation erstellt werden, welche über Herstellung, Zusammensetzung und Eigenschaften orientiert [24, 5.1]. Die Dokumentation über das Abfallgebände muss vom Abfallproduzenten bis zum Erlöschen seiner Verantwortlichkeit sicher aufbewahrt werden. Die Dokumentation muss der Organisation übergeben werden, welche anschliessend die Verantwortung für die Abfälle übernimmt. Im Weiteren ist die Dokumentation Organisationen zugänglich zu machen, welche mit der Planung der weiteren Entsorgung beauftragt wird [24, 5.3].

8.5.2 Angaben der Nagra

Die Nagra ist verantwortlich für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Zusammenhang mit der geologischen Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen. Abfallkonditionierung, Zwischenlagerung, Bau und Betrieb von geologischen Tiefenlagern verbleiben im Verantwortungsbereich der einzelnen Abfallproduzenten oder bei Organisationen, die spezifisch für einzelne Aufgaben eingesetzt werden [43, S. 3].

In der Zeit zwischen Erbringung des Entsorgungsnachweises und dem Entscheid zur Lagerrealisierung soll das Fachwissen weiter vertieft und dazu genutzt werden, die Option Opalinuston weiter zu entwickeln. Weil ein geologisches Tiefenlager für BE/HAA/LMA erst in einigen zehn Jahren gebraucht wird, verbleibt genügend Zeit, kritische Fragen mit entsprechendem Tiefgang anzugehen. Vor- und Nachteile der Optionen "nationales" und "internationales" Projekt können untersucht werden [43, S. 7].

8.5.3 Beurteilung durch die KSA

Der Umgang mit produzierten Abfallgebänden ist klar und umfassend geregelt [24]. Die erforderlichen Daten werden auch in einer zentralen Datenbank (ISRAM) abgelegt, die

von der Nagra verwaltet und von den einzelnen Abfallproduzenten gespeist wird. Die erforderliche Dokumentierung des Betriebs eines geologischen Tiefenlagers wird durch das KEG und KEV umfassend vorgeschrieben. Gemäss Art. 32 KEG und 52 KEV muss von den Entsorgungspflichtigen ein Entsorgungsprogramm erstellt, von den Behörden überprüft und periodisch angepasst werden. Die Daten erdwissenschaftlicher Untersuchungen müssen bei der Organisation, welche die Untersuchung durchführt, und bei der geologischen Informationsstelle des Bundes dokumentiert und archiviert werden.

Die Gesuchstellerin gibt an, dass bis zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA noch einige Jahrzehnte vergehen werden und dass genügend Zeit bleibt, um kritische Fragen vertieft zu untersuchen. Die KSA empfiehlt, auch die Resultate und Daten, die bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und durch Beteiligung an internationalen Projekten gewonnen wurden, von der Nagra in einer Datenbank zusammenzufassen und leicht verfügbar zu machen. Dazu gehören auch Daten, die über erdwissenschaftliche Untersuchungen hinaus, z.B. über das Verhalten von technischen Barrieren im Wirtsgestein, anfallen.

Die KSA empfiehlt weiter, die Erfassung von Erkenntnissen und Daten, die für die Entsorgung und insbesondere für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers notwendig sind, in einem Prozess "Wissensmanagement" des Qualitätsmanagement-Systems darzustellen, falls dies noch nicht vorgesehen ist (siehe auch Abschnitt x.2). Dies ist wichtig, da an den Arbeiten viele Organisationen mit unterschiedlichen Aufgaben (Betreiber, Nagra, Behörde, geologische Fachstellen etc.) beteiligt sind.

Ein Aspekt des Wissensmanagement, der nach dem Verschluss des geologischen Tiefenlagers zum Tragen kommt, ist die Weitergabe von Informationen über das Lager, die eingelagerten Abfälle und den Schutzbereich an spätere Generationen, sowie die dauerhafte Markierung des Lagers. Art. 40 KEG überbindet diese Aufgaben in sehr pauschaler Weise dem Bundesrat. Obwohl diese Aufgabe noch in weiter Ferne liegt, empfiehlt die KSA der Nagra und den Behörden, insbesondere zur Vertrauensbildung, sich an entsprechenden Forschungsarbeiten zu beteiligen sowie schon bald Konzepte und mögliche Lösungen vorzuschlagen.

Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-5

Die Erkenntnisse und Daten aus Entwicklungs- und Forschungsarbeiten der Nagra sowie weiterer beteiligter Organisationen und der Behörden, sollen von der Nagra Datenbank zusammengestellt werden. Die Nagra soll zudem in ihr QM-System einen Prozess "Wissensmanagement" aufnehmen.

Empfehlung 8-7

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

9 Schlussfolgerung, Zusammenfassung und Empfehlungen

9.1 Schlussfolgerung

Auf Grund der Prüfung und Beurteilung der Dokumentation der Nagra, des Gutachtens der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), des Berichts einer internationalen Expertengruppe der Kernenergieagentur (NEA) der OECD und des Expertenberichts der Kommission für Nukleare Entsorgung (KNE) sowie unter Berücksichtigung weiterer Fachkenntnisse und Literaturdaten kommt die KSA zum Schluss, dass der Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle in einem geologischen Tiefenlager erbracht ist.

Im Rahmen der Beurteilung des Entsorgungsnachweises wurden durch HSK, KNE, NEA-IRT und KSA Fragen aufgeworfen, Hinweise und Empfehlungen formuliert sowie Bedarf für Forschung und Entwicklung identifiziert. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage der für die Abfallbehälter verwendeten Werkstoffe. Nach Auffassung der KSA soll die Nagra die erwähnten Punkte – begleitend zum Entsorgungsprogramm gemäss Art. 32 KEG und Art. 52 KEV –im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms weiter verfolgen.

Zusätzlich macht die KSA zu grundsätzlichen Aspekten der Entsorgung der radioaktiven Abfälle Empfehlungen (vgl. Kapitel 8 bzw. Unterkapitel 9.3), welche beim weiteren Vorgehen berücksichtigt werden sollen.

9.2 Zusammenfassung und Empfehlungen

9.2.1 Einleitung (Kapitel 1)

Im Dezember 2002 reichte die Nagra den "Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle" (im Folgenden EN 2002) ein und beantragte dem Bundesrat [48]:

- "von der Erfüllung der Auflagen zum Projekt Gewähr gemäss Beschluss des Bundesrates vom 3. Juni 1988 im zustimmenden Sinne Kenntnis zu nehmen und den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen,"
- "und der Fokussierung künftiger Untersuchungen im Hinblick auf eine geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, verglasten hochaktiven Abfälle sowie langlebigen mittelaktiven Abfälle BE/HAA/LMA in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland zuzustimmen."

Die KSA behandelt den EN 2002 in Anlehnung an die Vorgaben in Art. 2 der KSA-Verordnung [12] wie ein Bewilligungsgesuch. Somit nimmt die KSA zum eingereichten Entsorgungsnachweis sowie zum zugehörigen Gutachten der HSK und weiteren Expertisen Stellung. Im Schreiben vom 10.2.2005 [5] wies das BFE auf die bundesrätliche Position hin, dass die Standortwahl für ein Lagerprojekt in einem transparenten Verfahren im Rahmen eines Sachplans nach Raumplanungsgesetzgebung [6] [7] erfolgen soll und der zweite Antrag der Nagra diesem Verfahren vorgreife. Die KSA nimmt deshalb im heutigen Zeitpunkt zum zweiten Antrag der Nagra nicht Stellung.

9.2.2 Unterlagen und Beurteilungsgrundlagen (Kapitel 2)

In seinem Entscheid zum "Projekt Gewähr 1985" der Nagra gliederte der Bundesrat den Entsorgungsnachweis im Jahr 1988 in die drei Teilnachweise Sicherheits-, Standort- und Machbarkeitsnachweis. Die Nagra dokumentierte den EN 2002 in drei Basisberichten, welche im Wesentlichen diesen Teilnachweisen entsprechen. Die KSA stützt sich bei ihrer Beurteilung des EN 2002 auf diese Basisberichte sowie weitere Berichte der Nagra mit ergänzenden bzw. detaillierten Informationen zu einigen spezifischen Fragestellungen.

Die geltende gesetzliche Basis besteht im Wesentlichen aus der Kernenergie- und der Strahlenschutzgesetzgebung. KEG und KEV als Hauptelemente der neuen Kernenergiegesetzgebung traten am 1.2.2005 in Kraft, also nach Abschluss der Nagra-Dokumente zum Entsorgungsnachweis. In die neue Kernenergiegesetzgebung wurden die wesentlichen Elemente des Lagerkonzepts der Expertengruppe "Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (EKRA) aus dem Jahr 2000 übernommen. Den entsprechenden Bericht benützte die Nagra als Referenz für die Lagerkonzeption zum Entsorgungsnachweis.

Des Weiteren berücksichtigt die KSA bei ihrer Beurteilung die von HSK und KSA gemeinsam herausgegebene Richtlinie "Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle" (HSK-R-21) [21], die Richtlinie "Anforderungen an die Konditionierung radioaktiver Abfälle" (HSK-R-14) [24] und das im Rahmen der IAEO abgeschlossene "Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle" (Joint Convention).

9.2.3 Sicherheitsnachweis (Kapitel 3)

Die KSA gelangt zu folgenden Resultaten:

- Die Methodik des Sicherheitsnachweises ist adäquat und entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- Die Tatsache, dass sich das betrachtete Lager im tiefen, geologisch einfach aufgebauten und ruhigen Untergrund befindet, wirkt sich nicht nur positiv auf die Sicherheit aus, sondern vereinfacht auch die Sicherheitsanalyse und damit die Führung des Sicherheitsnachweises, da beispielsweise die Zahl der möglichen Freisetzungspfade stark eingeschränkt ist.
- In der Sicherheitsanalyse wird die Barrierenwirkung der Rahmengesteine nur in einem Rechenfall berücksichtigt. Dieser Fall zeigt, dass Rahmengesteine einen positiven Beitrag zur Sicherheit leisten können. Die KSA empfiehlt deshalb, nach erfolgter Standortwahl die Eigenschaften der Rahmengesteine genauer abzuklären und deren Barrierenwirkung in der Sicherheitsanalyse zu berücksichtigen.
- Als zentralen Aspekt erachtet die KSA die Robustheit des Lagersystems. Robustheit kann als Mass für die Unempfindlichkeit der integralen Barrierenwirksamkeit gegenüber (inneren und äusseren) Einflüssen und Unsicherheiten angesehen werden. Die Tatsache, dass im Referenzfall das Schutzziel 1 mit grossen Reserven eingehalten wird, obwohl eine ganze Reihe von konservativen Annahmen getroffen ist, weist auf eine grosse Robustheit des Lagersystems hin. Dieser Eindruck wird durch die Resultate der Untersuchung der "What-if"-Fälle verstärkt. Die KSA ist aber der Auffassung, dass im Rahmen der Weiterführung des Programms die Robustheit des Lagersystems durch die Analyse weiterer Fälle systematisch und umfassender untersucht werden sollte.
- Ein wichtiger Aspekt der Sicherheit und der Robustheit eines geologischen Tiefenlagersystems ist die funktionelle Unabhängigkeit der einzelnen Barrieren. Die

KSA ist der Meinung, dass auf Grund des heutigen Kenntnisstands nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass die hervorragenden Barriereigenschaften des Opalinuston durch die Gasfreisetzung infolge Korrosion der aus Stahl bestehenden Lagerbehälter beeinträchtigt werden könnten. Nach ihrer Auffassung sollten Wege zur deutlichen Verminderung der Gasentwicklung gesucht werden. Sie empfiehlt deshalb, im Rahmen eines Forschungsprogramms alternative Behälterwerkstoffe und Behälterkonzepte zu evaluieren.

- Weiterhin könnte im Lagerteil für die abgebrannten Brennelemente und die hochaktiven Abfälle die über längere Zeit erhöhte Temperatur einen Einfluss auf die Wirksamkeit der Barrieren haben. Nach Auffassung der KSA sollten deshalb die Auswirkungen der über längere Zeit erhöhten Temperaturen und Drücke auf das Transportverhalten von Opalinuston und Bentonit untersucht werden.

Die KSA kommt zu folgendem Schluss:

Der Sicherheitsnachweis der Nagra ist nachvollziehbar. Die Resultate der Sicherheitsanalyse weisen darauf hin, dass das betrachtete Tiefenlagersystem hinsichtlich der Einhaltung des in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegten Schutzziels 1 von 0,1 mSv pro Jahr grosse Robustheit aufweist. Damit ist aus Sicht der KSA der Sicherheitsnachweis erbracht. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms besteht Bedarf für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten; von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage der für die Abfallbehälter verwendeten Werkstoffe.

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms macht die KSA folgende Empfehlungen:

Empfehlung 3-1

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

Empfehlung 3-2

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.

Empfehlung 3-3

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.

9.2.4 Standortnachweis (Kapitel 4)

Der Standortnachweis der Nagra ist aus Sicht der KSA nachvollziehbar. Dabei hält die Kommission aber fest, dass die Fokussierung auf das Zürcher Weinland keiner Anforderung des Entsorgungsnachweises im Sinne des Gesetzes entspricht.

Die sachgerechte Durchführung des Nachweises und vor allem die geologisch-hydrogeologischen Aspekte werden im Expertenbericht der KNE [37] im Detail beurteilt. Die KNE kommt zum Schluss, dass der Standortnachweis erbracht ist. Ausserdem macht

sie zahlreiche Empfehlungen für ergänzende Untersuchungen im Rahmen der nächsten Projektphase. Die KSA hält die Argumentationen und die Schlussfolgerung der KNE für stichhaltig und schliesst sich generell deren Empfehlungen an.

9.2.5 Machbarkeitsnachweis (Kapitel 5)

Die KSA kommt auf Grund ihrer Beurteilung zum Schluss, dass der Machbarkeitsnachweis grundsätzlich erbracht ist und dass ein Lager im Opalinuston in der vorgesehenen Tiefe aus technischer Sicht erstellt, betrieben und sicher verschlossen werden kann. Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms macht die KSA zusätzlich zu jenen der KNE folgende Empfehlungen:

Empfehlung 5-1

Die Machbarkeit eines Selbstverschlussbauwerks soll in einer Studie abgeklärt werden.

Empfehlung 5-2

Es sollen Auslegungskriterien für die einzelnen Barrieren des Lagersystems festgelegt werden.

Empfehlung 5-3

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 Kernauslegung und die Festlegung des maximalen Abbrands, hinsichtlich LMA für den Gehalt an organischen Stoffen.

Empfehlung 5-4

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

Empfehlung 5-5

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

Empfehlung 5-6

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.

9.2.6 Stellungnahme zu Gutachten und Expertisen (Kapitel 6 und 7)

9.2.6.1 Gutachten der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK):

Die HSK hat den Sicherheitsnachweis umfassend und in den wichtigen Bereichen auch detailliert überprüft. Nach Auffassung der KSA sind im Gutachten der HSK alle wesentlichen Punkte der Sicherheitsanalyse abgehandelt.

Positiv bewertet die KSA das Einholen von verschiedenen Expertisen zu spezifischen Themenbereichen.

Bei der Beurteilung von Einzelfragen schlägt die KSA zum Teil zusätzliche Massnahmen vor. Dies gilt insbesondere für die Gasfrage: Nach Ansicht der KSA sollten nicht nur die Fragen des Gastransports im Bentonit und im Opalinuston eingehender geklärt werden, sondern auch Wege gesucht werden, um die Produktion von Gasen möglichst gering zu halten.

Die KSA kann die Schlussfolgerungen der HSK zum Sicherheitsnachweis nachvollziehen und unterstützt die Empfehlungen der HSK nach weiteren Abklärungen.

9.2.6.2 Expertise des Internationalen Reviewteams (IRT) der NEA

Die KSA ist der Ansicht, dass das Internationale Reviewteam der Kernenergieagentur der OECD (NEA) die Sicherheitsanalyse der Nagra im Rahmen seines Auftrags umfassend überprüft und bewertet hat. Vor allem wurden die Vollständigkeit und die Robustheit der Modelle begutachtet und die Methoden und Ergebnisse mit dem internationalen Kenntnisstand verglichen.

Auf Grund seiner Analysen zeigt sich das IRT von der Überzeugungskraft und der Qualität des Sicherheitsnachweises beeindruckt. Das IRT hat zu jedem massgebenden Bereich der Sicherheitsanalyse wichtige Empfehlungen formuliert, die in den nächsten Projektphasen berücksichtigt werden sollten. Die KSA erachtet diese Empfehlungen als wichtig.

9.2.6.3 Expertise der Kommission für die Nukleare Entsorgung (KNE)

Die KSA ist der Ansicht, dass die KNE in ihrem Bericht die erdwissenschaftlichen Aspekte des Standortnachweises im Rahmen des Entsorgungsnachweises umfassend und in ausreichender Tiefe analysiert hat. Die KNE hat aus den Ergebnissen ihrer Analyse die richtigen Schlüsse für den Entsorgungsnachweis abgeleitet.

Auf Grund ihrer Analyse kommt die KNE zum Schluss, dass der Standortnachweis erbracht ist. Ausserdem formuliert sie im Hinblick auf die nächsten Projektphasen zahlreiche Empfehlungen für ergänzende Untersuchungen. Generell unterstützt die KSA diese Empfehlungen der KNE.

9.2.7 Umsetzung der Empfehlungen im Hinblick auf die Weiterführung des Programms zur Entsorgung der BE/HAA/LMA

Die HSK weist in ihrem Gutachten auf noch offene Fragen hin und dass diese im Falle einer Weiterführung des Projekts hinsichtlich einer Realisierung zu klären wären. [25, S. 13]

Die KNE hat bei der Überprüfung des Projektes Opalinuston verschiedene offene Fragen formuliert, welche im Rahmen der weiteren Untersuchungen geklärt werden müssen. Offene Fragen ergeben sich für die KNE vor allem im Zusammenhang mit den Veränderungen, welche im Opalinuston durch die baulichen Eingriffe und die durch die Abfalleinlagerung induzierten chemischen und physikalischen Prozesse ausgelöst werden. Sie schlägt vor, diese Fragen im Rahmen eines untertägigen Felslabors zu klären. [37, S. 1].

Das IRT hält in seiner Beurteilung u. a. fest, dass die Schwerpunkte der zukünftigen Planung und der experimentellen Forschung der Nagra [45, S. 340] nach Vorliegen der Resultate der technischen Review und der sozio-politischen Diskussion in einem detaillierten Plan zu vertiefen sind. [56, Anhang 1, S. 126]

Auch die KSA macht in der vorliegenden Stellungnahme verschiedene Empfehlungen im Hinblick auf die Weiterführung des Projekts zur Entsorgung der BE/HAA/LMA. (vgl. 9.2.3, 9.2.4 und 9.2.5)

Es erscheint der KSA wichtig, dass alle aufgeworfenen Fragen, die im Rahmen der Weiterführung des Programms zu beantworten sind, geprüft, strukturiert und zur Behandlung im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms ins Entsorgungsprogramm aufgenommen werden.

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms empfiehlt die KSA deshalb:

Empfehlung 9-1

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.

Nach Auffassung der KSA soll die Nagra die erwähnten Punkte – begleitend zum Entsorgungsprogramm gemäss Art. 32 KEG und Art. 52 KEV – im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms weiter verfolgen.

9.3 Grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiver Abfälle

Gemäss Art. 2 Abs. 4 der Verordnung über die Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen [12] äussert sich die KSA "insbesondere zu grundsätzlichen Fragen". In Kapitel 8 nimmt die Kommission daher nicht nur direkt zum EN 2002 Stellung, sondern greift auch einige grundsätzliche Aspekte zum weiteren Vorgehen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle auf.

9.3.1 Forschung und Entwicklung

Die Entsorger haben im Rahmen des Kernenergiegesetzes ein Entsorgungsprogramm zu erstellen. Generell ist es notwendig, klare Vorstellungen darüber zu entwickeln, welche Fragen zu welchem Zeitpunkt zu lösen sind und welchen Konkretisierungsgrad diese Lösungen erfordern. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-1

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.

9.3.2 Koordination des Entsorgungsprogramms

Die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers erfordert eine klare Projektorganisation, in welcher Abfallproduzenten, Entsorgerorganisationen, Behörden und Gremien der Partizipation einbezogen sind. Die Begleitung und die Bewertung der Aktivitäten zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle durch die verschiedenen Gremien des Bundes sollen

koordiniert und damit wirkungsvoller werden. Diese Aufgabe könnte der diskutierte Entsorgungsrat übernehmen. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-2

Die Idee des Entsorgungsrats soll durch den Bund möglichst rasch umgesetzt werden.

9.3.3 Qualitätsmanagement

Die Nagra als federführende Entsorgungsorganisation benötigt, um erfolgreich zu sein und das Vertrauen bei allen beteiligten Stellen aufbauen und stärken zu können, ein Management-System, welches modernen Standards entspricht. Die KSA sieht die erfolgte Zertifizierung des Management-Systems nach ISO 9001:2000 als wichtigen Schritt. Auf Grund des hohen Anspruchs an die Qualität der Arbeit der Nagra, insbesondere auch was Information und Kommunikation betrifft, sieht die KSA die Notwendigkeit, dass die Nagra ihr Management-System über die Zertifizierung hinaus auch nach der Norm ISO 9004:2000 (Qualitätsmanagement-Systeme – Leitfaden zur Leistungsverbesserung) ausbaut. Dabei sind die Anforderungen von INSAG-13 [34] und geltender IAEA-Dokumente zu berücksichtigen. Der Stand der Management-Technik, insbesondere im Nuklearbereich, muss intensiv verfolgt werden. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-3

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.

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.

9.3.4 Verfahren

Gesellschaftliche Akzeptanz ist eine wesentliche Voraussetzung, um das Entsorgungsproblem zu lösen. Bei der geologischen Tiefenlagerung handelt es sich um eine Frage, die breite Kreise der Bevölkerung bewegt und bei der unterschiedliche Werthaltungen aufeinander treffen. Um zu einer gesellschaftlich breit abgestützten Lösung zu gelangen, sind partizipative Verfahren geeignet. Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-4

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.

9.3.5 Wissensmanagement:

Das Kernenergiegesetz (KEG) und die Kernenergieverordnung (KEV) enthalten Bestimmungen zur Dokumentation und zum Kenntniserhalt bei erdwissenschaftlichen Untersuchungen und Daten, bei der Aufstellung und Verfolgung des

Entsorgungsprogramms, beim Betrieb eines geologischen Tiefenlagers sowie zum Schutz des Tiefenlagers nach dem Verschluss.

Die KSA empfiehlt, auch die relevanten Resultate und Daten, die bei Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, in der Vergangenheit und Zukunft und durch Beteiligung an internationalen Projekten gewonnen wurden, von der Nagra in einer Datenbank zusammenzufassen und leicht verfügbar zu machen. Dazu gehören auch Daten, die über erdwissenschaftliche Untersuchungen hinaus, z.B. über das Verhalten von technischen Barrieren im Wirtsgestein, anfallen.

Die KSA empfiehlt weiter, die Erfassung von Erkenntnissen und Daten, die für die Entsorgung und insbesondere für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers notwendig sind, in einem Prozess "Wissensmanagement" des Qualitätsmanagement-Systems darzustellen.

Ein Aspekt des Wissensmanagements, der nach dem Verschluss des geologischen Tiefenlagers zum Tragen kommt, ist die Weitergabe von Informationen über das Lager, die eingelagerten Abfälle und den Schutzbereich an spätere Generationen sowie die dauerhafte Markierung des Lagers. Art. 40 KEG überbindet diese Aufgaben in sehr pauschaler Weise dem Bundesrat. Obwohl diese Aufgabe noch in weiter Ferne liegt, empfiehlt die KSA der Nagra und den Behörden, insbesondere zur Vertrauensbildung in die Machbarkeit sicherer Tiefenlager, sich an entsprechenden Forschungsarbeiten zu beteiligen und schon bald mögliche Lösungen vorzuschlagen.

Die KSA empfiehlt deshalb:

Empfehlung 8-5

Die Erkenntnisse und Daten aus Entwicklungs- und Forschungsarbeiten der Nagra sowie weiterer beteiligter Organisationen und der Behörden, sollen von der Nagra Datenbank zusammengestellt werden. Die Nagra soll zudem in ihr QM-System einen Prozess "Wissensmanagement" aufnehmen.

Empfehlung 8-6

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

Die vorliegende Stellungnahme wurde von der KSA an ihrer 443. Sitzung vom 24. August 2005 verabschiedet.

EIDG. KOMMISSION FÜR DIE
SICHERHEIT VON KERNANLAGEN

Der Präsident



Prof. Dr. W. Wildi

Geht an: Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
Bundesamt für Energie (BFE)
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)

Referenzen

- [1] Ahlström P.E.; Ceramic and pure-metal canisters in buffer material for high level radioactive waste; Nuclear and Chemical Waste Management 1(1980)77.
- [2] Arbeitsgruppe Kristallin Nordschweiz; Schlussbericht der Arbeitsgruppe; HSK, Juni 1996. (KSA 23/124)
- [3] BFE; Keine Entsorgungsklausuren im 2004; Brief an KSA vom 17.7.2004. (KSA 21/166.02)
- [4] BFE; Radioaktive Abfälle sicher entsorgen; Eine Aufgabe, die uns alle angeht; Januar 2005.
- [5] BFE; Umfang der KSA-Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis; Brief an KSA vom 10.2.2005. (KSA 23/161)
- [6] Bundesrecht SR 700; Bundesgesetz über die Raumplanung (Raumplanungsgesetz, RPG) vom 22. Juni 1979 (Stand 13. Mai 2003).
- [7] Bundesrecht SR 700.1; Raumplanungsverordnung (RPV) vom 28. Juni 2000 (Stand 22. Dezember 2003).
- [8] Bundesrecht SR 732.0; Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie (Atomgesetz; hier abgekürzt: AtG) vom 23. Dezember 1959 (Stand 27. Juli 2004).
- [9] Bundesrecht SR 732.01; Bundesbeschluss zum Atomgesetz (hier abgekürzt: BB/AtG) vom 6. Oktober 1978 (Stand: 13. Februar 2001).
- [10] Bundesrecht SR 732.1; Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 (Stand: 28. Dezember 2004).
- [11] Bundesrecht SR 732.11; Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2003 (Stand: 1. Februar 2005).
- [12] Bundesrecht SR 732.21; Verordnung über die Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA-Verordnung) vom 14. März 1983 (Stand 1. Feb. 2005).
- [13] Bundesrecht SR 814.50; Strahlenschutzgesetz (StSG) vom 22. März 1991 (Stand: 28. Dezember 2004).
- [14] Bundesrecht SR 814.501; Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 (Stand: 1. Februar 2005).
- [15] Druyts F., Kurtsen B., Van Iseghem P.; Laboratory corrosion tests on candidate high-level waster container materials: Results from the Belgian programme; Proc. Eurocorr '04 (2004).
- [16] EKRA; Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle; Schlussbericht im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK); BFE, 31. Januar 2000. (KSA 21/143)

-
- [17] EKRA; Beitrag zur Entsorgungsstrategie für die radioaktiven Abfälle in der Schweiz; im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK); BFE, Oktober 2002. (KSA 21/156)
- [18] Emch+Berger; Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierten Prozesse; Expertenbericht; HSK, März 2005. (KSA 23/168)
- [19] ETHZ; Fidelibus C., Löw S.; Re-evaluation of selected hydro-mechanical processes in the near field of a potential nuclear waste repository in the Zürcher Weinland; Expert Report; HSK, November 2004. (KSA 23/167)
- [20] Fett T., Hartlieb W., Keller K., Knecht B., Münz D., Rieger W.; Subcritical crack growth in high-grade alumina. J. Nuclear Materials 184 (1991) 39
- [21] HSK, KSA; Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle; Richtlinie; HSK, 1980, rev. November 1993. (HSK-R-21)
- [22] HSK; Entsorgungsnachweis für HAA/LMA – Option Endlager im Opalinuston; Beurteilungskonzept für den Standortnachweis; HSK 23/57; 25.1.1999. (KSA 21/129.1)
- [23] HSK; Beurteilung der Entsorgungskosten der Schweizer Kernkraftwerke, Aktualisierung 2001; AN-4761; 25.6.2003. (KSA 21/172)
- [24] HSK; Anforderungen an die Konditionierung radioaktiver Abfälle; Richtlinie; HSK; März 2004. (HSK-R-14)
- [25] HSK; Gutachten zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston); HSK 35/99; Entwurf Mai 2005. (KSA 23/162); auch zitiert als {HSKG, ...}
- [26] IAEA; Convention on Nuclear Safety; IAEA, 17 June 1994. (SR 0.732.20) (KSA-AN-1803)
- [27] IAEA; Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants and other Nuclear Installations; Safety Series No. 50C/SG-Q; 1996. (KSA-AN-1933)
- [28] IAEA; Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; 5 Sept 1997. (SR 0.732.11) (KSA 21/105)
- [29] IAEA; Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste; TECDOC-1208; 2001.
- [30] IAEA; Safety indicators for the safety assessment of underground radioactive waste repositories; Sixth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal; TECDOC-1372; 2003.
- [31] ICRP; Radiation protection principles for disposal of solid radioactive waste; ICRP-Publication 46; Paris, 1985.
- [32] ICRP; Protection from potential exposure; A conceptual framework; ICRP-Publication 64; Annals of the ICRP, Vol. 23, No. 1; Paris, 1993.
- [33] ICRP; A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91; Pergamon Press, Oxford, 2002.

-
- [34] INSAG; Management of Operational Safety in Nuclear Power Plants; INSAG-13; IAEA, 1999.
- [35] King F., Ahonen L., Taxen C., Vuorinen U., Werme L.; Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository; Technical Report TR-01-23; SKB, 2001.
- [36] King F.; The effect of discontinuities on the corrosion behavior of copper canisters; Technical Report TR-04-05; SKB, 2004.
- [37] KNE; Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra; Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit; Expertenbericht zuhanden der HSK; Februar 2005. (*KSA 23/166*)
- [38] KSA; Aktuelle Fragen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz – Position der KSA; 22. September 1998. (*KSA 21/124*)
- [39] KSA; Offene Fragen der KSA zum Entsorgungsnachweis an die Nagra, 14.5.04. (*KSA 23/150 und KSA 23/150.01*)
- [40] Nagra; Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988; Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz; Oktober 1988; NTB 88-25. (*Textband KSA 23/EX15A, Beilagenband KSA 23/EX15B*)
- [41] Nagra; Technischer Lösungsvorschlag zur Rückholung eingelagerter Brennelement-Behälter; ROWA Engineering AG, Wangen SZ; NIB 99-57; Dezember 1999.
- [42] Nagra; Sondierbohrung Benken; Radioelements (U, Th, K) and noble gases (4He, 3He/4He, 40Ar, 40Ar/36Ar); NIB 00-33; 2001.
- [43] Nagra; Projekt Opalinuston; Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers; Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle; NTB 02-02; Dezember 2002. (*KSA 23/144*); auch zitiert als {NAB, ...}
- [44] Nagra; Projekt Opalinuston; Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse; NTB 02-03; Dezember 2002. (*KSA 23/145*); auch zitiert als {NGS, ...}
- [45] Nagra; Project Opalinus Clay; Safety Report; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis); NTB 02-05; December 2002. (*KSA 23/146*); auch zitiert als {NSB, ...}
- [46] Nagra; Project Opalinus Clay; Models, Codes and Data for Safety Assessment; NTB 02-06; December 2002.
- [47] Nagra; Project Opalinus Clay; FEP Management for Safety Assessment; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis); NTB 02-23; December 2002.
- [48] Nagra; Projekt Opalinuston; Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle; Zusammenfassender Überblick; 2., ergänzte Auflage; Januar 2003. (*KSA 23/142*)

-
- [49] Nagra; Projekt Opalinuston; Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers; Ergänzungen zum NTB 02-02; Electrowatt Infra AG, Zürich; NIB 04-06; Mai 2004.
- [50] Nagra; Effects of Post-disposal Gas Generation in a Repository for Spent Fuel, High-level Waste and Long-lived Intermediate Level Waste Sited in Opalinus Clay; NTB 04-06; July 2004.
- [51] Nagra; Ergänzende Beiträge zur Gasfreisetzung aus den BE/HAA Lagerstollen eines Tiefenlagers im Opalinuston; Nagra AN 04-329; 18. Januar 2005. (KSA 23/153.02)
- [52] Nagra; Präzisierungen der Nagra zur Frage der Rückholbarkeit (Stand 21. Dezember 2004); Nagra AN 04-346; 21. Dezember 2004. (KSA 23/158.2)
- [53] Nagra; Projekt Opalinuston; Konzept der Untersuchungen im Test- und Pilotlager sowie der übertägigen Anlagenüberwachung; NIB 04-28; März 2005. (KSA 23/165)
- [54] Nagra; Geschäftsbericht 2004. (KSA 23/172)
- [55] NEA; Confidence in the long-term safety of deep geological repositories; Its development and communication; OECD, Paris, 1999.
- [56] NEA-IRT; 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 2004; NEA No 5569 [Übersetzung aus dem Englischen]. (KSA 23/151)
- [57] Paleoseis; Reconstructing the paleoseismological record in northern Switzerland; Expertenbericht des Instituts für Geophysik der ETH Zürich; 2002.
- [58] Rosborg B., Eden D., Karnland O., Pan J., Werme L.; Real-time monitoring of copper corrosion at the Äspö HRL; Proc. Eurocorr '04; 2004.
- [59] RSK; Gase im Endlager; RSK-Stellungnahme; www.rskonline.de; 27.01.2005. (KSA 21/174)
- [60] Saario T., Betova I., Heinonen J., Kinnunen P., Lilja C.; Effect of the degree of compaction of bentonite on the general corrosion rate of copper; Proc. Eurocorr '04 ; 2004.
- [61] Schweizerischer Bundesrat; Beschluss Nukleare Entsorgung: Projekt Gewähr, Materielle Beurteilung; 3. Juni 1988. (KSA 23/79)
- [62] Seghezzi H.D.; Integriertes Qualitätsmanagement, das Sankt Galler Modell; Hanser Verlag, 2003.
- [63] Sellami S., Deichmann N., Fäh D., Giradini D., Wiemer S; Hazard maps for Switzerland; <http://histserver.ethz.ch/hazard/>; 2004.
- [64] Shoesmith D.W.; Assessing the corrosion performance of high-level nuclear waste containers; in: Corrosion Control for Enhanced Reliability and Safety, NACE-International (2003).
- [65] Smart N.R., Blackwood D.J., Werme L.; The anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in N.R. artificial groundwaters; Technical Report TR-01-22; SKB, 2001.

- [66] Smart N.R., Fennell P.A.H., Rance A.P., Werme L.O.; Galvanic corrosion of copper-cast iron couples in relation to the swedish radioactive waste canister concept; Proc. Eurocorr '04; 2004.
- [67] Universität Zürich; Haeberli W.; Gruppe für Glaziologie und Geomorphodynamik, Geographisches Institut; Eishaus + 10⁶a, Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre; HSK 35/93; HSK, Juli 2004. (KSA 23/155)
- [68] UVEK; Implementation of the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; First National Report of Switzerland ...; HSK, April 2003. (KSA 21/158)
- [69] Yim M.S., Linga Murta K.; Materials issues in nuclear-waste management; JOM 52 (2000) 26.

Liste von wiederholt benützten Abkürzungen

AtG	Atomgesetz (SR 732.0) [8]
BB/AtG	Bundesbeschluss zum Atomgesetz (SR 732.01) [9]
BE	abgebrannte Brennelemente
BFE	Bundesamt für Energie
EN 2002	Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (von der Nagra eingereicht Ende 2002)
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle
FEP	Features, Events and Processes (Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge)
HAA	hochaktive Abfälle
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
HSK-R-...	Richtlinie (Nr. ...) der HSK
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation (der UNO; in Wien)
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IRT	International Review Team (zusammengestellt von der NEA der OECD)
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group (des Generaldirektors der IAEO)
ISO	International Organization for Standardisation
KEG	Kernenergiegesetz (SR 732.1) [10]
KEV	Kernenergieverordnung (SR 732.11) [11]
KKW	Kernkraftwerk
KNE	Kommission Nukleare Entsorgung (Subkommission der Eidg. Geologischen Fachkommission)
KSA	Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
LMA	langlebige mittelaktive Abfälle
MOX	Uran/Plutonium-Mischoxid
mSv	Milli-Sievert (Masseinheit für schädigende Wirkung ionisierender Strahlung)
NAB	Nagra-Bericht zum Anlagen- und Betriebskonzept NTB 02-02 [43] (als Referenzangabe in geschwungener Klammer, ggf. ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurnummer usw.)

NEA	Nuclear Energy Agency (der OECD; in Paris)
NGS	Nagra Geosynthesebericht NTB 02-03 [44] (als Referenzangabe in geschwungener Klammer, ggf. ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurnummer usw.)
NIB ...-...	Nagra Interner Bericht (Nr. ...-...; nicht publizierte Dokumente)
NSB	Nagra Sicherheitsbericht NTB 02-05 [45] (als Referenzangabe in geschwungener Klammer, ggf. ergänzt mit Gliederungsnummer, Seitenzahl, Figurnummer usw.)
NTB ...-...	Nagra Technischer Bericht (Nr. ...-...; publizierte Schriftenreihe)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
QS/QM	Qualitätssicherung/Qualitätsmanagement
RPG	Raumplanungsgesetz (SR 700) [6]
RPV	Raumplanungsverordnung (SR 700.1) [7]
SM	Schwermetall
SMA	schwach- und mittelaktive Abfälle
SR	Systematische Sammlung des Bundesrechts (Erlass Nr.)
StSG	Strahlenschutzgesetz (SR 814.50) [13]
StSV	Strahlenschutzverordnung (SR 814.501) [14]
T/L	Transport und Lager
UVEK	Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
WA	Wiederaufarbeitung
ZWILAG	Zwischenlager Würenlingen AG
ZZL	Zentrales Zwischenlager (ZWILAG)

Anhang: Dosen für "What-if"-Fälle

Rechenfall	Konzeptualisation	Parametervariationen	BE [mSv/a]	QBE [-]	HAA [mSv/a]	QHAA [-]	LMA [mSv/a]	QLMA [-]	GES [mSv/a]	QGES [-]
Referenzfall										
Fall 1	erhöhter Wasserfluss Opalinuston	100-fach erhöht 1 Störung, Transmissivität 10^{-10} m ² /s 27 BE/HAA-Behälter und ganzes LMA-Lager betroffen	4.8E-05 1.9E-03 1.3E-04		1.3E-07 2.2E-06 1.3E-07		4.3E-06 1.5E-04 1.4E-04		5.3E-05 2.0E-03 2.7E-04	
Fall 2	Transport entlang Störungen im Opalinuston	Transmissivität 10^{-10} m ² /s; 108 BE/HAA-Behälter betroffen 1 Störung, Transmissivität 10^{-9} m ² /s 27 BE/HAA-Behälter und ganzes LMA-Lager betroffen	5.3E-04 6.5E-04	11.0 13.5	1.3E-07 4.0E-06	1.0 30.8	4.3E-06 1.1E-02	1.0 2558.1	6.7E-04 1.1E-02	12.6 207.5
Fall 3	Erhöhte Brennstoffauflösungsrate	2 Störungen, Transmissivität 10^{-9} m ² /s; 108 BE/HAA-Behälter betroffen	2.7E-03	56.3	1.6E-05	123.1	4.3E-06	1.0	1.1E-02	207.5
Fall 4	Redoxfront in BE- und LMA-Lager	10-fach erhöht	1.9E-04	4.0	1.3E-07	1.0	4.3E-06	1.0	1.9E-04	3.7
Fall 5	Gasinduzierte Freisetzung von gelösten Radionukliden aus LMA- Lager über Zufahrtsrampe	100-fach erhöht	5.0E-04	10.4	1.3E-07	1.0	4.3E-06	1.0	5.1E-04	9.6
Fall 6	C-14 gasförmig, Freisetzung über Wirtgestein, Verzögerung in Rahmengesteinen	50 % Porenwasser ausgetrieben Wasserfluss 0.05 m ² /s 100 % Porenwasser ausgetrieben Wasserfluss 0.3 m ³ /s	1.9E-04 4.8E-05 4.8E-05	4.0 1.0 1.0	1.3E-07 1.3E-07 1.3E-07	1.0 1.0 1.0	4.3E-06 1.1E-05 3.4E-04	1.0 2.6 79.1	1.9E-04 5.3E-05 3.4E-04	3.7 1.0 6.4
Fall 7	vorzeitiges Behälterversagen; erhöhte Brennstoff- und Hüllrohrauflösung; ungünstige Chemie Nahfeld und Geosphäre	Gaspermeabilität Wirtgestein 10^{-23} m ² Gaspermeabilität Wirtgestein 10^{-22} m ² Gaspermeabilität Wirtgestein 0 m ²	4.9E-05 4.7E-05 4.9E-05	1.0 1.0 1.0	1.3E-07 1.3E-07 1.3E-07	1.0 1.0 1.0	9.7E-06 9.0E-06 9.7E-06	2.3 2.1 2.3	5.8E-05 5.5E-05 5.8E-05	1.1 1.0 1.1
Fall 8	reine Diffusion im Opalinuston	Wasserfluss Opalinuston wie im Referenzfall	4.3E-04	9.0	1.1E-05	84.6	8.7E-06	2.0	4.5E-04	8.5
Fall 9	erhöhte Hüllrohrkorrosionsrate	10-fach erhöhter Wasserfluss Opalinuston	1.5E-03	31.3	4.4E-05	338.5	3.5E-05	8.1	1.6E-03	29.8
Fall 10	keine Sorption des Iods	100-fach erhöhter Wasserfluss Opalinuston	1.0E-02	208.3	9.6E-05	738.5	2.6E-04	60.5	1.1E-02	207.5
Fall 11	Transportdistanz Opalinuston 30 m		1.8E-05	0.4	4.8E-08	0.4	1.1E-06	0.3	1.9E-05	0.4
			4.8E-05	1.0	1.3E-07	1.0	4.3E-06	1.0	5.3E-05	1.0
			1.1E-04	2.3	2.5E-07	1.9	9.7E-06	2.3	1.2E-04	2.3
			8.1E-05	1.7	2.1E-07	1.6	7.3E-06	1.7	8.8E-05	1.7

Rechenfall Nummerierung übereinstimmend mit jener in Abschnitt 3.3.4

BE [mSv/a] Dosis auf Lager für abgebrannte Brennelemente

HAA [mSv/a] Dosis auf Lager für verglaste hochaktive Abfälle

LMA [mSv/a] Dosis aus dem Lager für langlebige mittelaktive Abfälle

LMA [mSv/a] Gesamtdosis allen Lagern

QBE Quotient von Dosis aus BE-Lager für Rechenfall zu Dosis aus BE-Lager für Referenzfall

QHAA Quotient von Dosis aus HAA-Lager für Rechenfall zu Dosis aus HAA-Lager für Referenzfall

QLMA Quotient von Dosis aus LMA-Lager für Rechenfall zu Dosis aus LMA-Lager für Referenzfall

QGES Quotient von Gesamtdosis für Rechenfall zu Gesamtdosis für Referenzfall

Eidgenössische Kommission für
die Sicherheit von Kernanlagen
Sekretariat
CH-5232 Villigen PSI

Telefon: +41 (0)56 310 3953 / 3811
Telefax: +41 (0)56 310 4953
www.ksa.admin.ch