



Bundesamt für Energiewirtschaft (Schweiz)
Office fédéral de l'énergie (Suisse)
Ufficio federale dell'energia (Svizzera)
Federal Office of Energy (Switzerland)

4334A

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate

HSK 30/9

KSA 30/11

GUTACHTEN

**zum Gesuch um Rahmenbewilligung
für ein SMA-Endlager am Wellenberg**

Mai 1996

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	3
1.1	Veranlassung	3
1.2	Technische Dokumentation	3
1.3	Bedeutung der Rahmenbewilligung für ein Endlager	4
1.4	Beurteilungsgrundlagen	5
1.5	Aufbau des Gutachtens	5
2.	GRUNDZÜGE DES PROJEKTES	6
2.1	Standort	6
2.2	Einzulagernde Abfälle	6
2.3	Beschreibung der Anlagen	7
3.	BEDARF	10
3.1	Stellenwert des Projektes im Entsorgungskonzept	10
3.2	Lagerkapazität	11
3.3	Zulässige Abfallsorten	12
4.	STANDORT	13
4.1	Wahl des Standortes	13
4.2	Geographische Charakteristiken	13
4.3	Erschliessung für Schwertransporte	14
5.	GEOLOGIE	16
5.1	Stellenwert der Geosphäre	16
5.2	Regionaler geologischer Bau des Untersuchungsgebietes	17
5.3	Lokale geologische Verhältnisse	18
5.4	Tektonische Verhältnisse des engeren Untersuchungsgebietes	19
5.5	Konzept der auslegungsbestimmenden Störungen	21
5.6	Struktureller Aufbau des Wirtgesteins	23
5.7	Neotektonische Resultate	24
5.8	Erosionsszenarien	25
5.9	Zusammenfassung und Ausblick	26

6.	HYDROGEOLOGIE	28
6.1	Hydraulische Durchlässigkeiten	28
6.2	Charakterisierung der wasserführenden Zonen	30
6.3	Chemische Beschaffenheit der Grundwässer	31
6.4	Hydraulische Potentiale und Gradienten	31
6.5	Gasführung und Zweiphasenflussverhältnisse	32
6.6	Hydromodellierung	33
6.7	Wasserfluss durch das Endlager	33
6.8	Anforderungen an die Stollenversiegelung	34
7.	ORGANISATION UND PERSONAL	36
7.1	Projekt- und Betriebsorganisation	36
7.2	Notfallorganisation	36
7.3	Qualitätssicherung und Dokumentation	37
8.	BAU- UND BETRIEBSSICHERHEIT	38
8.1	Baukonzept	38
8.2	Schutz des Personals	39
8.3	Schutz der Umgebung	39
8.4	Überwachung	40
8.5	Verschluss des Endlagers	41
9.	LANGZEITSICHERHEIT	43
9.1	Schutzziele für die Nachverschlussphase	43
9.2	Sicherheitskonzept und Nachweismethode	44
9.3	Abfallinventar	46
9.4	Szenarienanalyse	48
9.5	Verhalten der technischen Barrieren	51
9.6	Verhalten der Geosphäre	57
9.7	Potentielle Strahlenexpositionen	61
9.8	Konsequenzen bei alternativen Szenarien	63
10.	ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG	68
	VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	72
	REFERENZEN	73

1. EINLEITUNG

1.1 Veranlassung

Die Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg (GNW) reichte gemäss Art. 1 des Bundesbeschlusses zum Atomgesetz am 29. Juni 1994 das Gesuch [1] um Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Endlager SMA "Wellenberg" in Wolfenschiessen NW ein. Im projektierten Endlager sollen schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA), d.h. die aus dem Betrieb und dem späteren Abbruch der schweizerischen Kernkraftwerke entstehenden radioaktiven Abfälle, die schwachaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente sowie die radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) dauernd und sicher entsorgt werden.

Die von der GNW nachgesuchte Rahmenbewilligung des Bundesrates unterliegt der Genehmigung durch die Bundesversammlung. Sie wird nur erteilt, falls an der Anlage im Inland Bedarf besteht. Die Rahmenbewilligung ist ferner zu verweigern oder von der Erfüllung geeigneter Bedingungen oder Auflagen abhängig zu machen, wenn dies zum Schutz von Menschen, fremden Sachen oder wichtigen Rechtsgütern einschliesslich der Erfordernisse des Umweltschutzes, des Natur- und Heimatschutzes sowie der Raumplanung notwendig ist. Der Bundesrat holt für seinen Entscheid Gutachten bei den zuständigen Fachstellen des Bundes ein.

Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) wurde mit der Begutachtung des Projektes aus der Sicht der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes beauftragt. Im vorliegenden Gutachten nimmt sie Stellung zum Bedarf und zur Frage, ob der Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Auch die Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) wird aus der Sicht der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes zum Gesuch der GNW und zum Gutachten der HSK Stellung nehmen. Die Erfordernisse des Umweltschutzes, des Natur- und Heimatschutzes sowie der Raumplanung werden vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft bzw. vom Bundesamt für Raumplanung beurteilt.

1.2 Technische Dokumentation

Dem Gesuch wurden folgende drei Dokumente beigelegt, die integrierte Bestandteile des Gesuchs bilden:

- Technischer Bericht [2]
- Bericht zur Langzeitsicherheit [3]
- Bericht zur Umweltverträglichkeit 1. Stufe [4]

Für ihre Begutachtung bezieht sich die HSK auf den Technischen Bericht und auf den Bericht zur Langzeitsicherheit sowie auf weitere technische Berichte der Nationalen Genossenschaft für die Lage-

nung radioaktiver Abfälle (Nagra), die vom Gesuchsteller als Grundlagen erwähnt werden. Im Verlauf der Begutachtung wurden ferner vom Gesuchsteller etliche Präzisierungen auf Fragen der HSK abgegeben, welche die technische Dokumentation des Projektes ergänzen.

Das negative Ergebnis der Urnenabstimmung in Sachen Wellenberg im Kanton Nidwalden im Juni 1995 bewirkt eine Verzögerung des Verfahrensablaufs. Die GNW wurde deshalb aufgefordert, die Resultate aus den ergänzenden Standortuntersuchungen, welche 1994 und 1995 durchgeführt wurden, in ihrer Beurteilung des Standortes zu berücksichtigen. Diese Resultate sind in einem Zusatzbericht [5] dokumentiert, der eine ergänzende Gesuchsgrundlage darstellt.

1.3 Bedeutung der Rahmenbewilligung für ein Endlager

Die von der GNW nachgesuchte Rahmenbewilligung ist eine Voraussetzung für die spätere Erteilung der atomrechtlichen Bau- und Betriebsbewilligungen durch den Bundesrat. Sie legt den Standort und das Projekt in seinen Grundzügen fest. Bei einem Endlager für radioaktive Abfälle werden insbesondere die Lagerkapazität, die Abfallkategorien sowie die ungefähre Gestaltung der unter- und oberirdischen Bauten festgelegt.

Ein Endlager dient zur sicheren und dauernden Beseitigung von radioaktiven Abfällen. Dabei soll die dauernde Sicherheit durch passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet werden und nicht auf unbefristeter Überwachung und Instandhaltung des Endlagersystems beruhen. Es wird zwischen der Betriebsphase bis zum Verschluss des Endlagers und der Nachverschlussphase unterschieden.

Die geologischen und hydrogeologischen Standorteigenschaften sind insbesondere für die dauernde Sicherheit nach dem Verschluss des Endlagers (Langzeitsicherheit) massgebend. Da mit der Rahmenbewilligung der Standort festgelegt wird, kommt diesen Standorteigenschaften eine wesentliche Bedeutung zu. Die effektiven unterirdischen Gegebenheiten können jedoch erst bei der Erstellung der Untertagebauwerke erfasst werden. Auch erst dann werden sich Aussagen zur Langzeitsicherheit auf nachgewiesene Verhältnisse abstützen können.

Angesichts dieser Situation wird für die Rahmenbewilligung noch nicht der abschliessende Nachweis für die Sicherheit verlangt; ein solcher Nachweis ist späteren Bewilligungsschritten vorbehalten. Voraussetzung für die Erteilung der Rahmenbewilligung ist jedoch, dass ein Kenntnisstand bezüglich der Standorteigenschaften erreicht ist, der zu einer glaubhaften vorläufigen positiven Beurteilung der Sicherheit führt. Es muss ferner Zuversicht bestehen, dass die noch verbleibenden Ungewissheiten durch weitergehende Untersuchungen im positiven Sinne abgeklärt werden können.

1.4 Beurteilungsgrundlagen

Bei ihrer Beurteilung des vorgelegten Endlagerprojektes stützt sich die HSK grundsätzlich auf die Atom- und Strahlenschutzgesetzgebung. Insbesondere dienen dabei als Grundlagen:

- Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie vom 23.12.1959
- Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 06.10.1978
- Strahlenschutzgesetz vom 22.03.1991
- Strahlenschutzverordnung vom 22.06.1994

Es werden ferner eigene Richtlinien herangezogen, die den Projektanten von Kernanlagen aufzeigen, nach welchen Kriterien die HSK Gesuche beurteilt. Für das vorgelegte Endlagerprojekt gilt besonders die Richtlinie HSK-R-21 [6] "Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle", welche sich auf die Nachverschlussphase bezieht. Die konkreten Beurteilungskriterien werden in den Kapiteln 8 und 9 aufgeführt.

1.5 Aufbau des Gutachtens

Im folgenden Kapitel 2 werden zunächst die Grundzüge des vorgelegten Endlagerprojektes kurz dargestellt.

Die Frage des Bedarfs wird im Kapitel 3 behandelt. Dabei werden der Stellenwert des vorgelegten Projektes im schweizerischen Entsorgungskonzept, die beantragte Lagerkapazität und die vorgesehenen Abfallkategorien beurteilt.

Die Wahl des Standortes für das Endlager wurde von der HSK bereits früher beurteilt. Im Kapitel 4 wird diese frühere Beurteilung zusammengefasst sowie die geographischen Charakteristiken und die Erschliessung des Standortes beleuchtet. Die eingehende Beurteilung der gegenwärtigen geologischen bzw. hydrogeologischen Kenntnisse über den Standort ist Gegenstand der Kapitel 5 bzw. 6.

Im Kapitel 7 wird kurz auf organisatorische Aspekte eingegangen. Die im Kapitel 8 dokumentierte Beurteilung von Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers stellt bei diesem Bewilligungsschritt keinen Schwerpunkt der Begutachtung dar. Die HSK hat die vorläufige Analyse der Langzeitsicherheit unabhängig vom Gesuchsteller nachvollzogen. Die entsprechenden Untersuchungen sind im Kapitel 9 dokumentiert.

Im abschliessenden Kapitel 10 werden die Beurteilungen zusammengefasst, die Folgerungen gezogen und Auflagen für eine allfällige Bewilligung vorgeschlagen.

2. GRUNDZÜGE DES PROJEKTES

2.1 Standort

Das Endlager soll in der Gemeinde Wolfenschiessen, Kanton Nidwalden, im Mergelvorkommen des südlich an den Wellenberg anschliessenden Eggeligrates unterirdisch gebaut werden. Der Eingang zu den unterirdischen Anlagen befindet sich auf der Seite des Engelberger Tals, 2,5 km südlich der Ortschaft Wolfenschiessen. Die Entfernung zum Vierwaldstättersee beträgt rund 10 km.

2.2 Einzulagernde Abfälle

Für die Planung und die Beurteilung der Sicherheit des Endlagers legt der Gesuchsteller die folgenden Abfallkategorien als Inventar zugrunde:

- Abfälle aus je 40 Jahren Betrieb der heutigen schweizerischen Kernkraftwerke (KKW)
- Abfälle aus der späteren Stilllegung der heutigen Kernkraftwerke
- Abfälle aus der späteren Stilllegung des Protonenbeschleunigers des Paul Scherrer Instituts (PSI)
- Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) bei einer 70jährigen Sammelperiode
- Schwachaktive technologische Abfälle, welche bei der Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffes anfallen.

Das Gesamtinventar dieser Abfälle an langlebigen Nukliden (Halbwertszeit grösser als 100 Jahre) ist gering.

Nicht für das SMA-Endlager Wellenberg vorgesehen sind die übrigen Wiederaufarbeitungsabfälle, insbesondere die verglasten hochaktiven Abfälle. Auch abgebrannte Brennelemente, falls diese bei Verzicht auf die Wiederaufarbeitung als Abfall zu beseitigen sind, sind nicht für das SMA-Endlager Wellenberg vorgesehen.

Eine kurze Beschreibung der zugrunde gelegten Abfallkategorien ist in der Tabelle 2-1 gegeben. Eine eingehende Beschreibung ist im MIRA-Bericht [7] (Modellhaftes Inventar der radioaktiven Abfälle) enthalten, der die gegenwärtig verfügbaren Kenntnisse über die radioaktiven Abfälle festhält. Der Gesuchsteller hat dem geschätzten Abfallvolumen von 100'000 m³ eine Reserve von 50'000 m³ zugeschlagen. Die in Tabelle 2-1 angegebenen ungefähren Aktivitäten beziehen sich jeweils auf das Ende der Produktionsperiode der entsprechenden Abfallkategorie und beinhalten diese Reserve nicht.

Abfallkategorie	Rohabfälle	Matrixmaterial	Volumen [m ³]	Aktivität [TBq]
KKW-Betrieb	Harze, Schlämme, Konzentrate, Filter, feste Gegenstände, Asche, austauschbare Reaktorkomponenten	Zement Bitumen Kunststoff	11'000	16'000
KKW-Stillegung	Reaktordruckbehälter-Teile und -Einbauten, biologischer Schild, Rohrleitungen, Dekontaminationsrückstände	Zement	42'000	310'000
PSI-Beschleuniger	Protonenstrahleinrichtungen, inkl. Strahlfänger, Abschirmungen	Zement	14'000	14'000
Wiederaufarbeitung	Komponenten, Laborabfälle	verpresst, in Zementmantel	24'000	18
MIF	Feste Gegenstände, Asche, Strahlenquellen	Zement	9'000	9'100

Tabelle 2-1: Für die Auslegung des SMA-Endlagers Wellenberg betrachtete radioaktive Abfälle (ohne die Reserve von 50% Volumen)

2.3 Beschreibung der Anlagen

Die beschriebenen Abfälle sollen in unterirdischen Kavernen endgelagert werden. Zu diesem Zweck sind oberirdische Anlagen und Untertagebauten vorgesehen.

Oberirdische Anlagen

Zu den oberirdischen Anlagen gehören das Betriebsgebäude und die Zufahrten zu den zwei auf Höhe des Talbodens (530 m ü. M.) nebeneinander stehenden Eingangsportalen, sowie auf der Bettelrüti, auf ca. 850 m Höhe ü. M., das Abluft- sowie gegebenenfalls das Zuluftbauwerk.

Das Betriebsgebäude enthält Büroräume, Besucherempfangsräume und Einrichtungen für die Zutrittskontrolle zur Gesamtanlage. Hier finden keine Handhabungen von radioaktiven Abfällen statt.

Das Abluftbauwerk auf der Bettelrüti ist ein 8 m hoher Betonzylinder, durch den die Abluft aus den unterirdischen Anlagen ins Freie geleitet wird. Das Zuluftbauwerk ist als weiterer 8 m hoher Betonbau konzipiert, wo Zuluft zu den unterirdischen Anlagen gefasst wird. Als Alternative dazu wird vorgesehen, die Zuluft zu den Anlagen durch die Eingangsportale zu führen.

Untertagebauten

Der unterirdische Teil der Anlage ist horizontal zugänglich und besteht aus der Empfangsanlage, den Lagerkavernen und den verbindenden Stollen (vgl. Figur 2-1). Die Anordnung der unterirdischen Anlagen ist noch nicht definitiv festgelegt; sie wird sich auf die Erkenntnisse der weiteren Untersuchungen abstützen.

Die Empfangsanlage ist in einem Kavernensystem ca. 400 m im Berginneren im Kalkgestein noch ausserhalb des eigentlichen Wirtgesteinskörpers eingerichtet. Die Verbindung zum nördlichen Eingangsportal bildet ein mit Eisenbahngleise und Fahrbahn ausgestatteter Stollen. Auf diesem Wege werden die Abfälle in die Empfangsanlage gebracht. Für den Personenverkehr und den Materialtransport besteht ein kurz nach dem Portal abgezweigter separater Stollen. Das südliche Portal dient dem direkten Zutritt zu einem Pilotstollen, der parallel zum Verbindungsstollen, der dem normalen Betrieb dient, verläuft.

Die Empfangsanlage dient dem Umschlag der Abfälle auf eine nur anlagenintern verkehrende Stollenbahn, sowie der Vorbereitung der Abfälle für die Einlagerung in die Kavernen. Die Vorbereitung kann z.B. darin bestehen, die Abfallgebinde in einen Endlagercontainer zu stellen und anschliessend die Hohlräume mit Verfüllmörtel aufzufüllen. In der Empfangsanlage erfolgt der Übergang in eine strahlenschutzmassig kontrollierte Zone, welche die Vorbereitungsräume, die Verbindungs- und Anschlussstollen und die Lagerkavernen umfasst. Mit der Aussenwelt verkehrende Fahrzeuge werden nicht in die kontrollierte Zone hineingefahren. In der Empfangsanlage sind Systeme wie Abwasserreinigung, Mörtelmischanlage, Lüftungseinrichtung, elektrische Stromverteilungen und die zentrale Steuerung und Überwachung der Gesamtanlage (Kommandoraum) untergebracht. Die Verbindungsschächte zu den Zu- und Abluftbauwerken auf der Bettelrütli münden hier in die Anlage hinein.

Die Endlagerkavernen im Mergelgestein werden durch einige hundert Meter lange Verbindungs- und Anschlussstollen erreicht. Die Abfälle und das Verfüllmaterial der Kavernen werden darin auf Schienenfahrzeugen mit einer Akkumulator-Lokomotive transportiert. Die Kavernen haben einen ovalen Ausbruchquerschnitt von ca. 220 m², und eine Länge, die variabel, aber voraussichtlich etwa 300 m ist. Der Verbindungsstollen wird an einem Ende der Kaverne im oberen Teil der Kavernenwand angeschlossen. Die Kaverne enthält an diesem Ende einen ca. 30 m langen Arbeitsraum, wo die Abfallgebinde von der Stollenbahn auf den Kavernenkran übernommen werden.

3. BEDARF

3.1 Stellenwert des Projektes im Entsorgungskonzept

Gemäss Bundesbeschluss zum Atomgesetz sind die Verursacher von radioaktiven Abfällen für deren sichere Beseitigung verantwortlich. Das Strahlenschutzgesetz verlangt ferner, dass die in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle grundsätzlich im Inland beseitigt werden. Die dauernde und sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle soll durch Endlagerung erfolgen. Zur Wahrnehmung dieser Aufgabe wurde die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) gegründet.

Die Nagra hat ein Entsorgungskonzept erarbeitet [8], das für die Beseitigung der radioaktiven Abfälle zwei Endlager vorsieht:

- ein Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)
- ein Endlager für hochaktive (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA).

Gemäss dem Entsorgungskonzept fallen unter die SMA die Abfälle aus dem Betrieb und dem späteren Abbruch der Kernkraftwerke, die schwachaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF). Es handelt sich dabei um recht grosse Volumina. Ein Teil dieser Abfälle liegt in endlagerfähiger Form bereits vor. Besonders Stilllegungsabfälle sollen endlagerfähig in grossen Containern angeliefert werden. Für die SMA ist deshalb von der Nagra ein horizontal zugängliches Endlager vorgesehen.

HAA und LMA entstehen bei der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente. Bei Verzicht auf die Wiederaufarbeitung sind die abgebrannten Brennelemente als HAA zu beseitigen. Das Volumen dieser Abfälle ist bedeutend kleiner als jenes der SMA; HAA und LMA sind aber sehr toxisch und müssen deshalb in einem besonderen Endlager beseitigt werden. Zur Zeit liegen noch keine solche Abfälle in der Schweiz vor. Die HAA müssen zudem während einiger Jahrzehnte zur Abkühlung zwischengelagert werden, bevor sie in ein Endlager gebracht werden.

Die Aufteilung der zu beseitigenden radioaktiven Abfälle auf unterschiedliche Endlager ist der schweizerischen Situation angepasst und entspricht auch der Gepflogenheit in anderen Ländern. Das zur Rahmenbewilligung vorgelegte Projekt entspricht dem im Entsorgungskonzept der Nagra vorgesehenen SMA-Endlager. Der Bedarf für ein solches Endlager ergibt sich daraus, dass diese Abfälle vorhanden sind oder noch entstehen werden, und gemäss Strahlenschutzgesetz im Inland beseitigt werden müssen. Mehrere Länder verfügen bereits über oberflächennahe oder geologische Endlager, in welche vergleichbare Abfälle beseitigt werden können.

3.2 Lagerkapazität

Der Grossteil der für das geplante Endlager vorgesehenen Abfälle liegt heute noch nicht vor. Die Nagra hat zuhanden des Gesuchstellers die zu erwartenden Abfälle deshalb modellhaft charakterisiert und bezüglich Mengen und Eigenschaften im MIRA-Bericht [7] beschrieben. Das ermittelte Mengengerüst der SMA beruht auf folgenden Annahmen:

- Betrieb der bestehenden schweizerischen Kernkraftwerke während jeweils 40 Jahren
- Beginn des Abbruchs zwei Jahre nach Abstellung des Kernkraftwerks
- Wiederaufarbeitung aller abgebrannten Brennelemente
- Sammlung der MIF-Abfälle während 70 Jahren
- Abbruch des Protonen-Beschleunigers am Paul Scherrer Institut (PSI)

Aufgrund dieser Voraussetzungen errechnet die Nagra ein SMA-Volumen von rund 100'000 m³. Davon entfallen rund 56'000 m³ auf Stilllegungsabfälle (Kernkraftwerke und Beschleuniger). Das Volumen der Stilllegungsabfälle ergibt sich aus Annahmen betreffend der noch nicht festgelegten Verfahren zur Konditionierung solcher Abfälle. Für die Projektierung des Endlagers hat der Gesuchsteller zusätzliche 50'000 m³ Abfallvolumen eingeplant. Damit werden Reserven für die noch bestehenden Ungewissheiten geschaffen. Die totale beantragte Lagerkapazität beträgt somit 150'000 m³.

Das von der Nagra ermittelte modellhafte Abfallinventar ergibt eine konservative Schätzung des Volumens. Ein verzögerter Abbruch von stillgelegten Kernkraftwerken führt dank des radioaktiven Zerfalls zu geringeren Abfallmengen. Ferner decken die bestehenden Wiederaufarbeitungsverträge nur ca. 1/3 des erwarteten abgebrannten Brennstoffes ab; es besteht zur Zeit keine Absicht, auch den restlichen Brennstoff wiederaufarbeiten zu lassen.

Das Volumen der Abfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke könnte infolge von Leistungserhöhungen und eines allfälligen längeren Betriebes ansteigen. Mögliche Gründe für eine Erhöhung des geschätzten Volumens der MIF-Abfälle sind die Übernahme von CERN-Abfällen und neue abfallproduzierende Isotopenanwendungen.

Die HSK hat die vom Gesuchsteller angegebenen Abfallvolumen stichprobenweise geprüft und korrekt befunden. Ihrer Ansicht nach sollten die erwähnten, im geschätzten SMA-Volumen von 100'000 m³ enthaltenen Konservativitäten ausreichen, um die möglichen Abweichungen, die das Volumen der späteren tatsächlichen Abfälle von den heutigen Annahmen aufweisen können, weitgehend abzudecken. Das vom Gesuchsteller eingeplante grössere Volumen von 150'000 m³ enthält zusätzliche Reserven für heute nicht vorhersehbare Abfallaufkommen. Die HSK hat dagegen nichts einzuwenden. Allerdings sollen Endlagerkavernen nur nach Bedarf erstellt werden.

3.3 Zulässige Abfallsorten

Für die Planung des SMA-Endlagers hat der Gesuchsteller alle Betriebs-, Stilllegungs- und MIF-Abfälle sowie die schwachaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle gemäss MIRA [7] berücksichtigt. Diese groben Abfallkategorien umfassen sehr viele unterschiedliche Abfallsorten. Das gemeinsame Merkmal all dieser Abfälle ist, dass ihr Gesamtinventar an langlebigen Radionukliden gering ist. Der Gesuchsteller erwartet von den nuklearen Sicherheitsbehörden des Bundes, dass sie die für die Einlagerung in das SMA-Endlager Wellenberg sicherheitsmässig zulässigen Abfallsorten zu gegebener Zeit festlegen.

Zum Zeitpunkt des Rahmenbewilligungsverfahrens bestehen bezüglich den sicherheitsrelevanten Verhältnissen im Endlagerbereich plausible und wissenschaftlich gut abgestützte Annahmen. Die effektiven Verhältnisse werden erst anlässlich der den Bau der Stollen und Kavernen begleitenden weiteren Erkundung des Endlagerbereichs erfasst. Sie werden dannzumal in eine verfeinerte Sicherheitsanalyse einfließen, aufgrund welcher die Bedingungen für die Zulassung von Abfallsorten zur Einlagerung endgültig festgelegt werden. Dies wird im Rahmen des Verfahrens zur Erteilung der Betriebsbewilligung erfolgen.

Die Abfallgebinde werden in der Regel bei der Konditionierung gemäss einer Typenspezifikation hergestellt. Jedes hergestellte Abfallgebinde ist von einer individuellen Zusatzdokumentation begleitet. Es ist vorgesehen, die Zulassung zur Einlagerung für jeden einzelnen Abfallgebindetyp zu prüfen und gegebenenfalls mittels einer Einlagerungsfreigabe zu bestätigen. Durch ein integrales Qualitätssicherungs-System soll gewährleistet werden, dass keine unzulässigen Abfälle in das Endlager eingelagert werden.

4. STANDORT

4.1 Wahl des Standortes

Nach Abschluss einer rund zehnjährigen Evaluation hat die Nagra im Sommer 1993 den Standort Wellenberg für das SMA-Endlager vorgeschlagen. Anhand einer vergleichenden Beurteilung [9] kam sie zum Schluss, dass der Standort Wellenberg gegenüber den drei übrigen untersuchten Standorten eindeutige Vorteile bietet.

In ihrer Stellungnahme zur Standortwahl [10] kam die HSK zu ähnlichen Schlüssen. Es wurde insbesondere festgestellt, dass das Mergelvorkommen am Wellenberg sehr ausgedehnt ist und somit Reserven für die Platzierung des Endlagers bietet. Die hydrogeologische Situation wurde als geeignet eingestuft und die gegenüber den anderen Standorten besseren Möglichkeiten für die Exploration wurden hervorgehoben. Auch für den Betrieb des Endlagers wurden Vorteile gegenüber den anderen Standorten erkannt.

Die HSK erachtete es deshalb als zweckmässig, dass der Standort Wellenberg im Hinblick auf die Realisierung eines SMA-Endlagers vertieft erkundet wird. Ihrer Ansicht nach lagen nach der Auswertung der damaligen Sondierungen ausreichende Kenntnisse über den Wellenberg vor, um ein Rahmenbewilligungsverfahren einzuleiten.

4.2 Geographische Charakteristiken

Die Lagerkavernen des Endlagers sollen im Mergelgestein der Drusberg-Decke südlich des Wellenbergs eingerichtet werden. Der Kamm des Mergelvorkommens, der Eggeligrat, verläuft SSO-NNW auf ca. 1200 m Höhe und wird westlich vom Engelberger Tal, östlich vom Tal des Secklisbaches flankiert. Südlich und nördlich stösst das Mergelvorkommen an Kalkformationen an, im Norden den Wellenberg, im Süden die Walenstöcke. Die Empfangsanlage des Endlagers soll im Kieselkalk des Wellenbergs errichtet werden.

Das Engelberger Tal hat die typische Form eines glazialen Trogtals mit flachem Boden und steilen Hängen. Im Bereich der vorgesehenen Eingangsportale liegt der Talboden auf etwa 530 m Höhe und ist ca. 500 m breit. Die mittlere Steigung des Tals beträgt hier 1,2 %. Der Talboden wird landwirtschaftlich genutzt. Die Abhänge des Engelberger Tals sind weitgehend bewaldet. Gegenüber den Eingangsportalen ist im Westhang oberhalb 900 m eine flachere alpwirtschaftlich genutzte Terrasse bis auf 1200 m Höhe. Das Gebiet Bettelrüti, auf 800 m Höhe im Osthang, wo die Lüftungsbauwerke zu stehen kommen sollen, sowie auch das Tal des Secklisbaches, jenseits des Eggeligrates, werden landwirtschaftlich genutzt.

Im Engelberger Tal fliesst die Engelberger Aa. Ihre Wasserführung oberhalb Grafenort ist zeitweise gering (Restwasserstrecke), weiter unten wird sie von Bächen und Grundwasseraufstössen gespeist. Beim Dörfli erhält die Aa einen Zufluss aus dem Tal des Secklisbaches. Der Hauptgrundwasserleiter im Tal besteht aus kiesig-sandigen fluviatilen Schottern. Die Qualität des Grundwassers wird als gut bezeichnet; es wird etwa 3 km talabwärts von der vorgesehenen Portalzone für Trinkwassergewinnung genutzt. Das Trinkwasser wird aber hauptsächlich aus Quellen in den Hanglagen bezogen. Oberhalb Dörfli wurde ein provisorisches Grundwasserschutzareal ausgedehnt.

Die am nächsten gelegenen Ortschaften sind talabwärts Wolfenschiessen und talaufwärts Grafenort (OW), je in rund 2,5 km Entfernung. Der nächstgelegene Siedlungskern ist das zu Wolfenschiessen zugehörige Dörfli, rund 800 m nördlich der vorgesehenen Eingangsportale. Die Einwohnerzahl von Wolfenschiessen ist in den letzten Jahrzehnten langsam gewachsen und beträgt rund 1700 Personen. In rund 4 km Entfernung talabwärts befindet sich weiter Dallenwil mit rund 1600 Einwohnern.

Über die lokalen meteorologischen Verhältnisse liegen bisher wenig Informationen vor. Weiter talaufwärts, in Engelberg, befindet sich eine Station der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, welche erste Anhaltspunkte gibt. Dort sind die Winde in der Talrichtung dominierend, mit Windstärken um 1,4 m/s. Der Niederschlag beträgt im Jahr rund 1500 mm, mit einer Intensität meist kleiner als 5 mm/h. Seit November 1994 ist eine meteorologische Messeinrichtung des Gesuchstellers auf der Bettelrüti im Betrieb.

Die Hochwasserkoten in der vorgesehenen Portalzone des Endlagers wurden im Rahmen eines durch den Kanton Nidwalden veranlassten Projektes für den Hochwasserschutz der Engelberger Aa berechnet. Bei einem Dammbruch (Staubecken Obermatt) wurde eine Kote für das Extremhochwasser von 531,75 m.ü.M. ermittelt. Bei diesem extremen Hochwasser kann Wasser durch die Portale (Kote Nord 530,70 m.ü.M., Süd 531,70 m.ü.M.) in die Stollen einfließen, jedoch nicht den unterirdischen Empfangsbereich (Kote 532,00 m.ü.M.) erreichen. Die sicherheitsrelevanten Anlagen sind somit durch Überflutung nicht gefährdet.

4.3 Erschliessung für Schwertransporte

Im Engelberger Tal verläuft eine Kantonsstrasse und die Schmalspur-Eisenbahnlinie Luzern-Stans-Engelberg. Die Endlageranlagen werden an die Eisenbahnlinie mittels eines rund 200 m langen, die Kantonsstrasse und Bahntrasse unterquerenden Zufahrtseleises angeschlossen. Die Eisenbahnwagen können vom Anschlussgleis bei der Bahnlinie ohne Umladen in die unterirdische Empfangsanlage gefahren werden. Die Portale und das Betriebsgebäude sind ferner über eine rund 100 m lange Zufahrtsstrasse mit der Kantonsstrasse verbunden, so dass auch Strassentransporte abgewickelt werden können.

Es ist vorgesehen, die Transporte der radioaktiven Abfälle hauptsächlich auf der Schiene abzuwickeln. Dazu ist unterwegs ein Spurwechsel zur Spurweite der Luzern-Stans-Engelberg-Bahn notwendig.

Dieser Spurwechsel soll ohne Umladen der Transportbehälter und auf einfache Art (z.B. Schemelung) erfolgen können.

Andere Materialtransporte werden sowohl auf der Schiene wie auf der Strasse stattfinden. Während der Bauphase wird insbesondere das Ausbruchmaterial auf der Strasse in die Deponie Ennerberg, nordwestlich Stans gebracht.

5. GEOLOGIE

Das Rahmenbewilligungsgesuch stützt sich auf Daten, die vor dem Frühjahr 1993 erhoben wurden [13]. Seitdem sind die Untersuchungen weitergeführt und insbesondere zusätzliche Sondierbohrungen abgeteuft worden. Die HSK hat die neuen Resultate, wie sie im Zusatzbericht [5] präsentiert sind, zur Kenntnis genommen und bei der Beurteilung des Gesuches berücksichtigt.

5.1 Stellenwert der Geosphäre

Die Sicherheitsprinzipien für Endlager [6] verlangen für die Nachverschlussphase ein Sicherheitskonzept, dessen Wirkung auf hintereinander gestaffelten, voneinander unabhängigen Sicherheitsbarrieren beruht. Im Rahmen dieser Sicherheitsphilosophie kommt der Geosphäre bezüglich der Langzeitbeurteilung eine besondere Bedeutung zu. Die aktuellen Entwicklungstrends der Geosphäre können in die Zukunft projiziert werden, da das geologische Geschehen in der Regel gleichmässig und träge abläuft. Die Geosphäre stellt deshalb eine Barriere dar, deren Wirksamkeit für die bei Endlagern erforderlichen langen Zeiträume nachgewiesen werden kann.

Das im Rahmenbewilligungsgesuch vorgestellte Konzept zur Langzeitsicherheit (vgl. Kap. 9) beruht schwergewichtig auf der Ausgestaltung des Nahfeldes. Kurzlebige Nuklide sollen bereits im Nahfeld zerfallen, langlebige sollen nur in unbedenklichen Mengen das Nahfeld verlassen. Die Geosphäre dient in diesem Konzept vor allem der Aufrechterhaltung eines für das Nahfeld günstigen hydrogeologischen Milieus und dem Schutz gegen äussere Einwirkungen. Sie stellt eine zusätzliche Sicherheitsbarriere durch Verlangsamung der Migration der Radionuklide dar. Folgende Eigenschaften der Geosphäre sind im Rahmen dieses Konzeptes von Bedeutung:

- Wasserdurchfluss durch die endlagernahe Zone
- Transport- und Rückhalteeigenschaften des intakten Wirtgesteins
- Neotektonik
- Langzeitentwicklung (Klima, Erosion).

Der Gesuchsteller hat diese Eigenschaften mit Untersuchungsprogrammen abgeklärt und einen entsprechenden Geodatenatz [13] ermittelt. In der Sicherheitsanalyse wurde die Rückhaltung der Radionuklide im Nahfeld und in einer 100 m mächtigen Wirtgesteinszone, die keine grossen wasserführenden Störungen enthalten soll, berücksichtigt. Eine Rückhaltung der Radionuklide auf dem weiteren geosphärischen Ausbreitungsweg wurde nicht in Anspruch genommen.

Die Sicherheitsanalyse soll sich auf eine Standortcharakterisierung abstützen, die entsprechend dem jeweiligen Stand der Datenbeschaffung alle zugänglichen Daten berücksichtigt. Zukünftige Geodatenätze sollten deshalb die Geosphären-Barriere mit Hilfe eines statistisch abgestützten, struktur-

geologischen Datensatzes charakterisieren und ihre sicherheitsmässige Bedeutung quantifizieren. Dazu sind eine zusätzliche Bearbeitung des vorliegenden Kernmaterials aus den Bohrungen und möglicherweise auch ergänzende Feldarbeiten erforderlich [14]. Entsprechende Arbeiten sind im Gang

5.2 Regionaler geologischer Bau des Untersuchungsgebietes

Der regionale geologische Aufbau des Gebietes bestimmt die Randbedingungen für die Charakterisierung des engeren Standortareals. Das Untersuchungsgebiet Wellenberg liegt in einem geologisch komplexen Gebiet der Alpen. Für die Beurteilung der geologischen Situation, der Mächtigkeit und tektonischen Zergliederung des Wirtgesteinskörpers sowie der hydrogeologischen Verhältnisse, ist deshalb eine fundierte Interpretation der grossräumigen Tektonik grundlegend.

Im Gesuch und in den begleitenden Berichten wird der regionale geologische Aufbau umfassend dargestellt und die tektonische Entwicklungsgeschichte zusammengefasst. Die ermittelten geologischen Schnitte stimmen mit den Feldbefunden überein; sie entsprechen dem Stand der Kenntnisse zum Zeitpunkt der Festlegung des Geodatensatzes im Jahr 1993. Sie zeigen, dass der grossräumige geologische Aufbau des Gebietes bereits gut bekannt ist. Die weiteren Untersuchungen, insbesondere die Bohrungen SB4a/v und SB4a/s, brachten zusätzliche Erkenntnisse, die das regionale geologische Bild in einigen Punkten modifizieren, die aber die grundsätzlichen Annahmen über den regionalen geologischen Bau bestätigen. Die Auswertung der nahe beieinander liegenden Bohrungen SB4, SB4a/v und SB4a/s verspricht weitere Erkenntnisse über die räumliche Anordnung der beobachteten Strukturen.

Im Einzelnen sind folgende Punkte der regionalen geologischen Resultate besonders hervorzuheben:

- Das Untersuchungsgebiet stellt eine Übergangszone dar, die vom komplexen Deckensystem der Drusberg- und Axen-Decke im Osten zum einheitlicher gebauten System der Wildhorn-Decke im Westen überleitet. Das Engelbergertal wurde als tektonisch bedeutsame Nahtstelle erkannt, die sich bereits im Mesozoikum durch unterschiedliche Entwicklung der Sedimentation beidseits dieser Linie abzeichnete. Diese spezielle tektonische Situation bedingt rasch wechselnde geologische Verhältnisse, sie erschwert damit Projektionen der geologischen Strukturen im Untersuchungsgebiet.
- Der Verlauf der Überschiebungsfläche zwischen Axen- und Drusbergdecke konnte durch die Bohrungen ermittelt und im Bereich der Endlagerkote lokal festgelegt werden. Es wird nun von einer Unterteilung des Wirtgesteinskörpers in einzelne, durch grosse Überschiebungszonen getrennte Deckenelemente (Schuppen), ausgegangen [15]. Der Beitrag der Seismik zur Charakterisierung dieser Grenzflächen ist vorerst klein, da es aufgrund der geringen seismischen Kontraste bislang nicht sicher gelang, den Verlauf der Überschiebungen grossflächig zu lokalisieren.
- Ob Fremdgesteinsschollen längs der Überschiebungsbahnen ins Wirtgestein eingeschleppt wurden, bleibt auch mit dem erweiterten Datensatz eine offene Frage. Die beiden Äste der Bohrung

SB4a haben wie bereits die früheren Bohrungen, keine Fremdgesteinsschollen im Wirtgestein aufgeschlossen. Die seismischen Aufnahmen, die räumlich ausgedehnte Informationen liefern müssten, sind in dieser Hinsicht nicht sehr aussagekräftig. In der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes treten einige grössere Vorkommen von Fremdgesteinen auf (z.B. Maisander, Wyss Stein). Breiter abgestützte Kenntnisse über die Situation im Endlagerareal wird erst die Erkundung mit dem Sondierstollen und den untertägigen Bohrungen bringen.

- Wie weit die nach Norden vorstossenden Faltenstirnen der Axen-Decke (Tertiär-Formationen) in die Drusberg-Decke hinein reichen und wie stark sie nach Norden abtauchen kann mit den Daten der beiden Bohrungen SB4a nun etwas präziser gefasst werden. Es ist aufgrund der neuen Resultate wahrscheinlich, dass der südliche Teil des Endlagergebietes in den Bereich der tertiären Formationen der Axen-Decke zu liegen kommt. Die Deckenüberschiebung durchquert somit das Endlagergebiet. Entscheidend für die räumliche Anordnung der Wirtgesteinsinformationen auf der Endlagerebene wird sein, wie die Faltenachsen der beiden Decken gegen Osten verlaufen und wie sie miteinander interferieren.
- Die bisherigen Bohrungen wurden nicht auf die Erkundung der regionalen Störungen gerichtet; sie haben nur geringe Kenntnisse betreffend den Baustil und die Wasserführung dieser Störungen gebracht. Das wirkt sich auf die hydrogeologische Modellierung insofern erschwerend aus, als die Charakterisierung dieser Störungen aufgrund geschätzter Werte, ohne eigentliche Testresultate erfolgen muss. Der geplante Sondierstollen könnte in dieser Hinsicht eine Verbesserung des Datensatzes bringen.

5.3 Lokale geologische Verhältnisse

Ein gewichtiges Argument für die Wahl des Wellenbergs als Endlagerstandort war das grosse Vorkommen an Wirtgestein. Es handelt sich dabei um Mergel der unteren Kreide der Drusberg-Decke (Palfris-Formation und Vitznau-Mergel) sowie um geeignete Formationen des angrenzenden Tertiärs der Axen-Decke (Globigerinenmergel und Schimberg-Schiefer). Die aufgrund der Daten vermutete beträchtliche Ausdehnung an geeignetem Wirtgestein bringt bei der Anordnung der Endlagerbauten eine gewisse Flexibilität; man kann sicherheitsmässig problematischen Zonen ausweichen. Die Wirtgesteinsgrenzen wurden vom Gesuchsteller durch Projektion von Oberflächendaten (geologische Kartierung, regionale Strukturanalyse) ergänzt durch Angaben aus den Bohrungen, fixiert. Die mögliche Variation der Lage dieser Grenzflächen wurde abgeschätzt.

Die Methodik des Vorgehens ist für die HSK nachvollziehbar, sie ist der Problemstellung angepasst. Die lithostratigraphische Einstufung der Gesteinsserien, welche für die tektonische Analyse grundlegend ist, erfolgte entsprechend dem heutigen Stand der Wissenschaft. Die Untersuchungen haben das vermutete grosse Vorkommen an geringdurchlässigen Mergeln und Schiefern der Unterkreide und des Tertiärs bestätigt. Das ermittelte Areal mit Wirtgestein auf der geplanten Endlagerkote erscheint aufgrund der Daten gross.

Die Anhäufung des Wirtgesteins geht auf interne Überschiebungen in der Drusberg-Decke zurück; die dabei gebildeten Schuppen wurden im Verlaufe der tektonischen Entwicklung steil gestellt. Die tektonisch bedingte Anhäufung des Mergels hat Konsequenzen für die Homogenität des Wirtgesteinskörpers, denn längs der Überschiebungszonen könnten Fremdgesteinsschollen mitgeschleppt und in den Mergel eingeschuppt worden sein. Die bisherigen Untersuchungen haben allerdings, wie bereits erwähnt, keine Hinweise auf derartige Fremdgesteinsschollen im engeren Untersuchungsgebiet gebracht.

Die Abklärungen haben gezeigt, dass die enggepressten Stirnfalten der Axen-Decke mit tertiären Formationen weit in die Kreidemergel hinein reichen. Ein grösserer Teil des südlichen Bereiches des potentiellen Lagerareals (Kote 540 m) könnte aus diesen Formationen bestehen. Diese tertiären Formationen könnten sich als Wirtgestein eignen; sie müssen deshalb entsprechend dem Vorgehen bei den Kreidemergeln charakterisiert werden. Die dazu notwendigen Arbeiten wurden grösstenteils bereits ausgeführt, sie sind aber noch nicht vollständig dokumentiert. Die vorliegenden Daten bestätigen die Aussage des Gesuchstellers, dass sich die erwähnten tertiären Formationen als Wirtgestein für ein Endlager eignen.

5.4 Tektonische Verhältnisse des engeren Untersuchungsgebietes

Die tektonischen Verhältnisse im engeren Endlagergebiet werden weitgehend die Anordnung des Endlagers bestimmen. Die Kenntnis des Störungsmusters ist eine wichtige Voraussetzung für die Planung von Stollen und Kavernen. Grundlage der tektonischen Analysen sind heute die geologisch-strukturellen Geländeaufnahmen, die Interpretation der Seismik und die Ergebnisse der Bohrungen. Aus diesen Daten muss ein Bild des Störungsmusters abgeleitet werden, das später mit den untertägigen Sondierungen verfeinert wird.

Im Gesuch wird vom Konzept ausgegangen, dass für die Wasserführung im Wirtgestein vor allem Strukturen der spröden Verformung von Bedeutung sind. Es wurde deshalb ein Modell der steilstehenden Störungen entwickelt, das diese in vier Grössenordnungen unterteilt (Tabelle 5-1). Diese Zuweisung beinhaltet eine gewisse Subjektivität, denn es muss bei Störungen, die nahe beieinander auftreten, entschieden werden, ob sie einzeln klassiert, oder zur nächst höheren Grössenordnung zusammengefasst werden. Weiter ist die Variabilität im Erscheinungsbild der Störungen zu beachten. Die neuen Aufnahmen der tektonischen Strukturen im Profil Haldibach zeigen, dass die Mächtigkeit von Störungen starken Schwankungen unterliegt und teilweise auch von lithologischen Wechseln begleitet wird.

Grössenordnung	Mächtigkeit in m	Abstand in m	Länge in m
Regionale Störungen	10 - 100	1500 - 3500	1000 - 8000
Grosse Störungen	2 - 30	300 - 1500	300 - 3000
Mittlere Störungen	0,5 - 3	100 - 500	50 - 500
Kleine Störungen	0,1 - 0,5	10 - 50	5 - 100

Tabelle 5-1: Modellhafte Dimensionen der steilstehenden Störungen

Der Gesuchsteller hat die regionalen und die grossen Störungen aufgrund der tektonischen Aufnahmen und der Bohrdaten zusammengestellt und zu einem generischen Bild mit vier Störungsfamilien vereinfacht. Die Streichrichtungen dieser Störungen wurden mit Hilfe der geologischen Kartierung im anstehenden Nebengestein festgelegt. Im Bereich des Wirtgesteins sind die Aufschlussverhältnisse zu schlecht, respektive die Deckschichten der Rutschmasse zu mächtig, so dass hier keine entsprechenden Daten gewonnen werden konnten. Die in den Bohrungen erfassten grossen Störungen wurden nicht bestimmten, an der Erdoberfläche beobachteten Störungen zugeordnet. Die mittleren und kleinen Störungen wurden aufgrund der Bohrdaten erfasst; ihr Inventar bildete eine wichtige Grundlage für die Definition und Charakterisierung von Wasserfliesssystemen.

Das geschilderte Störungsmodell beschreibt die Verhältnisse in verschiedenen Grössenbereichen getrennt, ohne diese zu einem umfassenden Modell zu vereinigen. Das Störungsmodell beschränkt sich zudem auf die Strukturen der spröden Deformation. Die Strukturen der duktilen Verformung wurden im Modell nicht berücksichtigt, da ihnen für die Wasserführung keine entscheidende Bedeutung zugemessen wurde. Die primär duktil verformten Überschiebungsbahnen innerhalb der Drusberg-Decke wurden deshalb für das Gesuch nicht weiter abgeklärt. Dies gilt auch für die flach verlaufenden Überschiebungen, welche die Stirnfalten der Axen-Decke begrenzen und die meist von mehr oder weniger mächtigen Mélange-Zonen begleitet werden.

Bei ihrer Überprüfung der Wasserzuflussstellen in den Bohrungen stellt die HSK fest, dass ein Teil der Zuflüsse im Bereich duktil verformter Überschiebungszonen liegt. Die Wasserführung in diesen Zonen geht vermutlich auf spröde Deformationen im Zusammenhang mit jungen tektonischen Bewegungen zurück, die die älteren duktilen Strukturen überprägt haben. Es ist deshalb angezeigt, die Wasserführung in diesen duktil verformten Bereichen zusätzlich genauer abzuklären. Falls die Wasserführung gebietsweise an diese Überschiebungen gebunden ist, würden solche, unmittelbar über oder unter dem Endlager verlaufenden Zonen den Charakter auslegungsbestimmender Störungen erhalten.

5.5 Konzept der auslegungsbestimmenden Störungen

Das generelle Konzept des Endlagers geht von einem System auslegungsbestimmender Störungen oder Inhomogenitäten aus. Die Lagerkavernen sollen in Wirtgesteinsblöcken von mehreren hundert Metern Kantenlänge angelegt werden, die von auslegungsbestimmenden Störungen begrenzt werden. Als auslegungsbestimmende Störungen definiert der Gesuchsteller grössere, spröde deformierte Störungen, die das Wirtgestein über weite Strecken durchschlagen und die gegenüber dem umgebenden Wirtgestein eine stark erhöhte hydraulische Transmissivität aufweisen.

Die HSK kann die im Zusatzbericht [5] präzierte Definition der auslegungsbestimmenden Störungen nachvollziehen, sie möchte aber auf eine Schwäche dieser Definition hinweisen. Aufgrund der umfangreichen Feldbefunde zeigt sich, dass der Wasserfluss in Störungen und Klüften nicht gleichmässig verteilt ist; man beobachtet vielmehr eine Konzentration der Fliesspfade auf eng begrenzte Kanäle („Channels“, vgl. Abs. 6.2). Eine grosse Störung, die in der Bohrung keine Wasserführung aufweist, könnte demnach in einiger Entfernung von der Bohrung durchaus wasserführend sein. Die Identifikation der auslegungsbestimmenden Störungen ist demnach mit den Bohrungen nicht eindeutig durchführbar, denn die Reichweite der hydraulischen Tests ist beschränkt. Der Sondierstollen wird diesbezüglich mehr Information liefern.

Für die Sicherheitsanalyse wurden verschiedene Varianten mit einer unterschiedlichen Zahl von auslegungsbestimmenden Störungen im Endlagerbereich betrachtet (Tabelle 5-2). Es wurde nicht versucht, die an der Erdoberfläche kartierten Störungen auf die Endlagerebene zu projizieren, sondern man verwendete ein generisches Netz der auslegungsbestimmender Störungen, deren Abstände aufgrund des Feldbefundes definiert wurden. Gemäss Gesuchsteller sind in den Bohrungen keine auslegungsbestimmenden Störungen angefahren worden. Die HSK hält etwas nuancierter fest, dass keine der beobachteten grossen Störungen eine stark erhöhte hydraulische Transmissivität aufgewiesen hat.

Optimistische Variante	Keine auslegungsbestimmenden Störungen im potentiellen Lagerareal
Pessimistische Variante	Auslegungsbestimmende Störungen im Abstand von je 500 m voneinander
Realistische Variante	Wenige, modellhaft eingezeichnete Störungen

Tabelle 5-2: Annahmen des Gesuchstellers bezüglich der auslegungsbestimmenden Störungen im Wirtgestein

Die HSK hat den generischen Ansatz zur Modellierung der Störungen für die Sicherheitsanalyse mit den Beobachtungsbefunden verglichen. Dabei fiel auf, dass die grossen Störungen unregelmässig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind. Im Umgebungsgestein beobachtet man Gebiete mit weitständigem Störungsmuster, das heisst Abständen von mehreren hundert Metern zwischen den grossen Störungen. Es gibt aber auch Gebiete, in denen die grossen Störungen dichter liegen, als im generischen Störungsmodell angenommen wurde. Man beobachtet in diesen Gebieten ein NNW-SSE streichendes Störungsmuster mit Abständen, die gebietsweise nur 100-200 m betragen. Aufgrund des regionalen Verlaufs dieser Störungen muss man annehmen, dass sie zumeist den grossen Störungen zuzuordnen sind. Auch die Seismik-Linien geben Hinweise, dass mit einigen steil stehenden Störungen im Endlagergebiet gerechnet werden muss. Diese Hinweise werden scheinbar durch die Verhältnisse in der Schrägbohrung SB4a/s in Frage gestellt, da in der Bohrung lediglich zwei grosse Störungen angetroffen wurden. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass gemäss den Bohrresultaten das häufigste Störungsmuster im Wirtgestein mit der Richtung der Schrägbohrung streicht und somit hier nicht erfasst werden konnte. In allen Bohrungen insgesamt wurden rund 40 grosse Störungen beschrieben. Es ist deshalb anzunehmen, dass einige grosse Störungen das Endlagergebiet durchschlagen. Ob dabei auch auslegungsbestimmende Störungen sind, wird sich erst aufgrund der untertägigen Erkundung beurteilen lassen.

Auch mit den ergänzenden Resultaten des Zusatzberichtes [5] bleiben die Ungewissheiten bei der Festlegung des tektonischen Störungsmusters bestehen. Eine problemorientierte Auswertung der Seismik, im Hinblick auf das Muster der grossen und regionalen Störungen, könnte nach Ansicht der Experten der HSK [14] zusätzliche Informationen erbringen. Markant verbesserte Informationen sind jedoch erst von den geplanten, untertägigen Sondierungen (Stollen, Horizontalbohrungen) zu erwarten.

Da keine entsprechende Zone mit den Bohrungen durchfahren wurde, konnten die hydraulischen Kennwerte der auslegungsbestimmenden Störungen nicht mit hydraulischen Tests belegt werden. Die Wasserführung dieser Zonen ist im Sicherheitskonzept des Gesuchstellers nicht von ausschlaggebender Bedeutung, die diesbezüglichen Annahmen sind somit vertretbar. Zukünftige Sicherheitsanalysen sollten aber die Eigenschaften des gesamten Geosphärenpfades berücksichtigen. Es wird deshalb nötig sein, die hydraulischen Parameter dieser Zonen zu untersuchen. Vorliegende Befunde zeigen, dass die Wasserführung in der Nähe der Störungen generell zunimmt, entsprechende Daten sind damit auch für die Ermittlung der Abstände der Kavernen von grossen Störungen grundlegend.

Die Schrägbohrung SB4a/s hat den Kenntnisstand insofern verbessert, als die hydraulischen Kennwerte der Bohrung mit denen der Vertikalbohrungen verglichen werden konnten. Aufgrund anderweitiger Erfahrungen mit Schrägbohrungen hätte man dabei eine Zunahme der Zuflussstellen erwarten können. Es wurde jedoch keine solche Zunahme festgestellt, da die Schrägbohrung, wie bereits erwähnt, die zahlenmässig bedeutendste Störungsfamilie nicht erfasst hat.

5.6 Struktureller Aufbau des Wirtgesteins

Das Wirtgestein umfasst Mergel und Schiefer der unteren Kreide und des Tertiärs. Der Gesteinskörper ist heterogen aufgebaut und durch eine ausgeprägte lithologisch-strukturelle Anisotropie gekennzeichnet. Für die postulierten, intakten Wirtgesteinsblöcke wird angenommen, dass sie von einem System mittlerer und kleiner Störungen durchzogen werden. Die Wasserführung wird grösstenteils auf diese Störungen zurückgeführt und ein Wasserfliesssystem mit drei Typen von wasserführenden Strukturen abgeleitet (Tabelle 5-3).

Typ	Wasserführendes Strukturelement	Verteilung (nach [13])
Typ 1	Kataklastische Störungszonen	57 %
Typ 2	Dünne, diskrete Scherzonen	8 %
Typ 3	Geklüftete Kalkbänke	35 %

Tabelle 5-3: Typen wasserführender Strukturen gemäss Gesuch

Die Konzeptualisierung der wasserführenden Systeme beruht auf umfangreichen geologisch-mineralogischen Laboranalysen, die mit den Ergebnissen des Fluid-Logging kombiniert wurden. Die Beschreibung der Eigenschaften der Systeme erfolgte allerdings zu einem frühen Zeitpunkt und beruht deshalb auf einer unvollständigen Datenbasis.

Grundsätzlich können drei Typen struktureller Merkmale für die Wasserführung verantwortlich sein:

- sedimentäre Strukturen (Tonmineralgehalt)
- spröde, kataklastische Deformationen, oft in reaktivierten duktilen Scherzonen
- duktile Scherzonen im Zusammenhang mit neoalpinen Überschiebungen.

Das Modell der wasserführenden Systeme des Gesuchstellers geht von den in den Bohrungen beobachteten Zuflussstellen aus und weist sie vorwiegend spröden Strukturen zu. Grundsätzlich müssen alle für die Wasserführung entscheidenden strukturellen Merkmalen, auch duktile, untersucht werden. Eine zukünftige Konzeptualisierung des Grundwasserflusses im Wirtgestein wird sich auf repräsentative Daten der durchlässigen Strukturen abstützen müssen.

Anhand der vorliegenden Dokumentation können die drei im Gesuch berücksichtigten wasserführenden Strukturen folgendermassen eingeschätzt werden:

- Viele der beobachteten Zuflüsse liegen im Bereich kataklastischer Störungszonen. Die Zonen bestehen aus einer oder mehreren kataklastischen Scherzonen mit einer Lage aus feinem Störungsletten und dem stark zerklüfteten kataklastischen Nebengestein. Das Fliessmodell geht von der Annahme aus, dass der Wasserfluss in den Scherzonen erfolgt. Erfahrungen aus anderen Berei-

chen der hydrogeologischen Praxis zeigen, dass Störungsletten häufig auch als abdichtende Elemente wirken. Die fein zerklüftete Umgebung der eigentlichen Störung bestimmt in diesen Fällen die Wasserführung der kataklastischen Störungszonen. Die HSK kann heute nicht beurteilen, ob das vom Gesuchsteller verwendete Modell eine gute Repräsentation der Realität ist. Der entsprechende Datensatz ist im Hinblick auf eine bessere Modellierung für spätere Bewilligungsschritte zu verfeinern.

- Die dünnen, diskreten Scherzonen sind im Datensatz zahlenmässig nicht sehr bedeutsam. Da es sich aber meist um steilstehende Strukturen handelt, ist anzunehmen, dass sie im vorliegenden Datensatz, der in den vertikalen Bohrungen erhoben wurde, untervertreten sind. Bessere Grundlagen kann die vollständige Auswertung der Schrägbohrung SB4a/s bringen; die entsprechenden Arbeiten sind im Gang.
- Das System der geklüfteten Kalkbänke (Kalkbankabfolgen) geht vom Konzept aus, dass die boudinierten Kalkbänke zerrissen sind und die Zwickel zwischen ihnen mit Mergel gefüllt sind („chocolate-tablet-boudinage-Modell“). Die Kalkbankabfolgen werden modellmässig von einer auslegungsbestimmenden Störung zur nächsten modelliert. Bei den beobachteten Verformungsbedingungen am Wellenberg erscheint das vorliegende Modell eher unwahrscheinlich. Gemäss den Angaben des Experten der HSK [14] ist eine Anordnung der Kalkboudins parallel zu den Faltenachsen wahrscheinlicher. Dabei resultieren langgestreckte Körper, die in Richtung der Faltenachsen ziehen. Dies würde bedeuten, dass die potentiellen Fliesswege unter Umständen weiträumiger als angenommen in den Kalkbänken verlaufen.

Die vorliegenden Unterlagen zeigen nicht, ob und wie die in den Bohrkernen beobachteten Kleinstrukturen mit den Grossstrukturen zusammenhängen. Ein zukünftiges strukturgeologisches Modell sollte die Verknüpfung der einzelnen Grössenordnungen darstellen. Dazu ist die strukturgeologische Bearbeitung des Kernmaterials im Wirtgesteinsintervall wesentlich zu verfeinern. Typ, Orientierung und räumliche Anordnung der hydraulisch wirksamen Strukturen sollen detailliert erfasst und statistisch ausgewertet werden. Es ist auch abzuklären, wie weit die lithologischen und strukturellen Heterogenitäten zu einer Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeiten führen.

5.7 Neotektonische Resultate

Die Untersuchungen am Wellenberg ergaben keine Hinweise auf rezente (gegenwärtig ablaufende) Bewegungen an Störungen. Das vorherrschende Spannungsfeld wurde in den Bohrungen bestimmt; es ist anisotrop und zeigt eine dominierende, horizontale Komponente NW-SE (120°-140°). Dies weist auf ein Andauern des alpinen Schubes von Südosten hin; die alpine Orogenese dauert demnach an und wird weitere Hebungen des Gebietes verursachen. Die Hebungstendenz wird auch durch die geodätische Messungen bestätigt (1,5 mm/Jahr in Bezug auf den Fixpunkt Aarburg). Den Erosionsszenarien kommt aus diesem Grunde bei der Langzeitbetrachtung eine besondere Bedeutung zu.

Die gegenwärtige Erdbeben­tätigkeit im Untersuchungsgebiet ist gegenüber dem schweizerischen Mittel erhöht. Die beobachteten Hypozentren liegen ungewöhnlich seicht, meist nur wenige Kilometer tief. Aufgrund der tektonischen Verhältnisse im Alpenraum sind über längere Zeiträume auch grössere Erdbeben denkbar.

Die Behandlung der Auswirkungen der Erdbeben erfolgte im Gesuch eher summarisch. Es wird darauf hingewiesen, dass direkte Erdbebenschäden an Untertagebauwerken meist gering und damit kaum problematisch seien. Zudem wird die Existenz einer ausgedehnten Unterdruckzone als Hinweis gedeutet, dass die Beben­tätigkeit in der Vergangenheit nicht zu einer Öffnung von Wasserfliesswegen geführt hat.

Was die Schäden in Untertagebauten betrifft teilt die HSK die Meinung des Gesuchstellers. Was die Unterdruckzone betrifft, ist zu bedenken, dass Natur und Ursache dieses Phänomens vorerst nicht eindeutig erklärt sind. Es ist deshalb nicht ausreichend, die Argumentation betreffend Auswirkungen von Erdbeben lediglich an diesen Befund zu knüpfen. Der Gesuchsteller sollte dem Aspekt Veränderung der Fliesswege weiterhin Beachtung schenken und abschätzen, wie weit das hydraulische Verhalten des Wirtgesteinskörpers durch Bebenwellen beeinflusst werden kann. Es ist auch von Interesse, ob Erdbeben während der Betriebsphase die Auflockerungszonen der Kavernen beeinflussen könnten.

5.8 Erosionsszenarien

Bei der Abschätzung der Langzeitsicherheit am Standort Wellenberg spielen wie bereits erwähnt Erosionsvorgänge eine wichtige Rolle. Die andauernde alpine Orogenese wird im betrachteten Zeitraum die Erhaltung oder Verstärkung des Reliefs bewirken. Für die Sicherheitsanalyse hat der Gesuchsteller angenommen, dass das Endlager frühestens nach 100'000 Jahren freigelegt wird. Die Entwicklung des Erosionsgeschehens hängt wesentlich vom zukünftigen Klima ab, es wurden deshalb bei den Langzeitszenarien auch die Konsequenzen extremer Klimasituationen untersucht.

Für die Prognose des Erosionsgeschehens ist die Niveaudifferenz zwischen Lagerhöhe und Talboden sowie die Überdeckungsmächtigkeit des Endlagers entscheidend. Die Analyse des Erosionsgeschehens bei verschiedenen klimatischen Bedingungen führte bei den extremsten Szenarien zu einer Reduktion der Mächtigkeit der Überlagerung auf 100 m nach 100'000 Jahren. Die meisten betrachteten Szenarien lassen allerdings zum gleichen Zeitpunkt Restüberdeckungen von mehr als 300 m erwarten. Die abnehmende Überdeckung hat zur Konsequenz, dass das Wirtgestein der Endlagerumgebung zunehmend durchlässiger wird.

Die den Erosionsstudien zugrunde liegenden Parameter sind schwierig zu bestimmen; der Gesuchsteller hat deshalb häufig sehr konservative Annahmen treffen müssen. Die vorliegenden Resultate sind vor diesem Hintergrund als äusserst konservative Werte zu betrachten.

5.9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmenbewilligungsgesuch und in den begleitenden Berichten sind umfangreiche Datensätze dargestellt, die das Ergebnis eines mehrjährigen, aufwendigen Untersuchungsprogrammes sind. Die Resultate geben heute einen guten Einblick in den geologischen und tektonischen Aufbau des Standortgebietes. Einige Fragen, die nachfolgend rekapituliert werden, sind noch offen geblieben; sie können nur durch weitere Untersuchungen, insbesondere durch untertägige Sondierungen (Sondierstollen), abgeklärt werden. Für die Beurteilung des Rahmenbewilligungsgesuches sind diese offenen Punkte nicht von entscheidender Bedeutung, sie geben aber Hinweise für weitere Arbeiten im Hinblick auf spätere Bewilligungsschritte. Insbesondere hat der Gesuchsteller im Hinblick auf das Gesuch um die nukleare Baubewilligung die Sondierungen untertage mit einem Stollen bis ins Endlagergebiet zu ergänzen (Auflage).

- Im vorliegenden Gesuch für ein SMA-Endlager beruht das Sicherheitskonzept schwergewichtig auf der Ausgestaltung des Nahfeldes und der technischen Barrieren (vgl. Abs. 9.2). Die Rückhaltung in der Geosphäre wird nur beschränkt in Anspruch genommen. Das ist angesichts der noch offenen Fragen (Einfluss der pH-Fahne, Kolloide, usw.), die der Gesuchsteller weiter untersucht, verständlich. Die HSK weist darauf hin, dass in Übereinstimmung mit den Prinzipien der Richtlinie HSK-R-21 [6] die Langzeitsicherheit durch die gestaffelte Wirkung der Nahfeldbarrieren und des Geosphärenpfades als Multibarrierensystem zu gewährleisten ist. Diesem Prinzip ist für zukünftige Bewilligungsschritte vermehrt Rechnung zu tragen.
- Die Untersuchungen haben das vermutete grosse Wirtgesteinsvorkommen bestätigt. Zusätzlich zum Mergel der unteren Kreide umfasst das Wirtgestein auch Formationen des Tertiärs, die sich voraussichtlich auch eignen. Die entsprechende Dokumentation ist noch zu vervollständigen. Die Sondierungen ergaben keine Hinweise auf Fremdgesteinsschollen im Wirtgestein; ein abschliessendes Urteil zu diesem Punkt wird aber erst mit Resultaten aus der untertägigen Erkundung möglich sein.
- Die tektonischen Verhältnisse im Endlagergebiet bestimmen weitgehend die Anordnung der Endlagerbauten. Der Gesuchsteller geht von einem Modell auslegungsbestimmender Störungen aus, d.h. von grossen Störungen mit deutlich erhöhter Transmissivität, denen beim Bau des Endlagers ausgewichen werden muss. In gewissen Gebieten könnte der Abstand zwischen den Störungen kleiner sein, als er im generischen Störungsmodell angenommen wurde. Weiter sollte im Modell der Effekt des „Channeling“ bei der Einstufung der Störungen berücksichtigt werden. Die duktilen Überschiebungszonen wurden für das Gesuch nicht detailliert abgeklärt. Da diese Strukturen unter Umständen auslegungsbestimmend sein könnten, sollen sie ebenfalls entsprechend charakterisiert werden.
- Die strukturgeologische Charakterisierung der Wirtgesteinsblöcke ist für den gegenwärtigen Stand des Projektes genügend. Die Konzeptualisierung der wasserführenden Systeme in den Wirtgesteinsblöcken beruht allerdings noch auf einer unvollständigen Datenbasis. Die Zuflussstellen

werden ausschliesslich auf spröde Strukturen zurückgeführt; grundsätzlich müssten aber alle für die Wasserführung entscheidenden strukturellen Merkmale in die Untersuchungen einbezogen werden. Die zukünftige Konzeptualisierung sollte sich deshalb auf eine breiter erhobene, statistisch abgestützte Datenbasis der potentiell durchlässigen Strukturen abstützen.

- Die Untersuchungen gaben keine Hinweise, dass im Wirtgestein gegenwärtig Bewegungen an Störungen ablaufen. Langfristig besteht aber in der Innerschweiz ein Potential für stärkere Erdbeben. Die Auswirkungen solcher Erdbeben auf die technische Stabilität der Untertagebauten ist aufgrund der Erfahrungen nicht kritisch. Hingegen sollte abgeschätzt werden, ob Erdbeben zu wesentlichen hydraulischen Veränderungen führen könnten.
- Die Bearbeitung der Langzeitszenarien hat zu gut dokumentierten Modellen der zukünftigen Entwicklung des Gebietes geführt. Die Szenarien können im Detail noch verbessert werden, der generelle Rahmen ist mit ihnen aber abgesteckt. Mit den Erosionsszenarien wird die zukünftige Entwicklung des Endlagergebietes umfassend beschrieben und analysiert.

Aus geologischer Sicht bestehen gute Aussichten, dass die erwähnten offenen Fragen mit dem zukünftigen untertägigen Untersuchungsprogramm geklärt werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass am Standort Wellenberg ein aus geologischer Sicht für die Endlagerung der schwach- und mittel-aktiven Abfälle geeigneter Gesteinskörper vorliegt, ist gross.

6. HYDROGEOLOGIE

Die hydrogeologischen Verhältnisse spielen für die Endlagersicherheit eine wichtige Rolle, da sie für die Freisetzung der Radionuklide aus dem Endlager und für die anschliessende Ausbreitung in der Geosphäre massgebend sind. Für die Charakterisierung des Endlagersystems ist deshalb die Erfassung der hydrogeologischen Verhältnisse eine unabdingbare Voraussetzung.

Mit den bisherigen Sondierbohrungen wurden die hydrogeologischen Verhältnisse des Wirtgesteins und seiner Umgrenzung erkundet. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wurden die Ergebnisse der bisherigen Sondierarbeiten in einem zusammenfassenden Bericht (Geodatenatz [13]) dokumentiert. Die Zusammenfassung der Resultate der weiteren Sondierungen der Jahre 1994-1995 liegen in einem Zusatzbericht vor [5]. Daten aus der eigentlichen Endlagerzone werden erst mit dem Bau eines Sondierstollens erhoben werden können.

6.1 Hydraulische Durchlässigkeiten

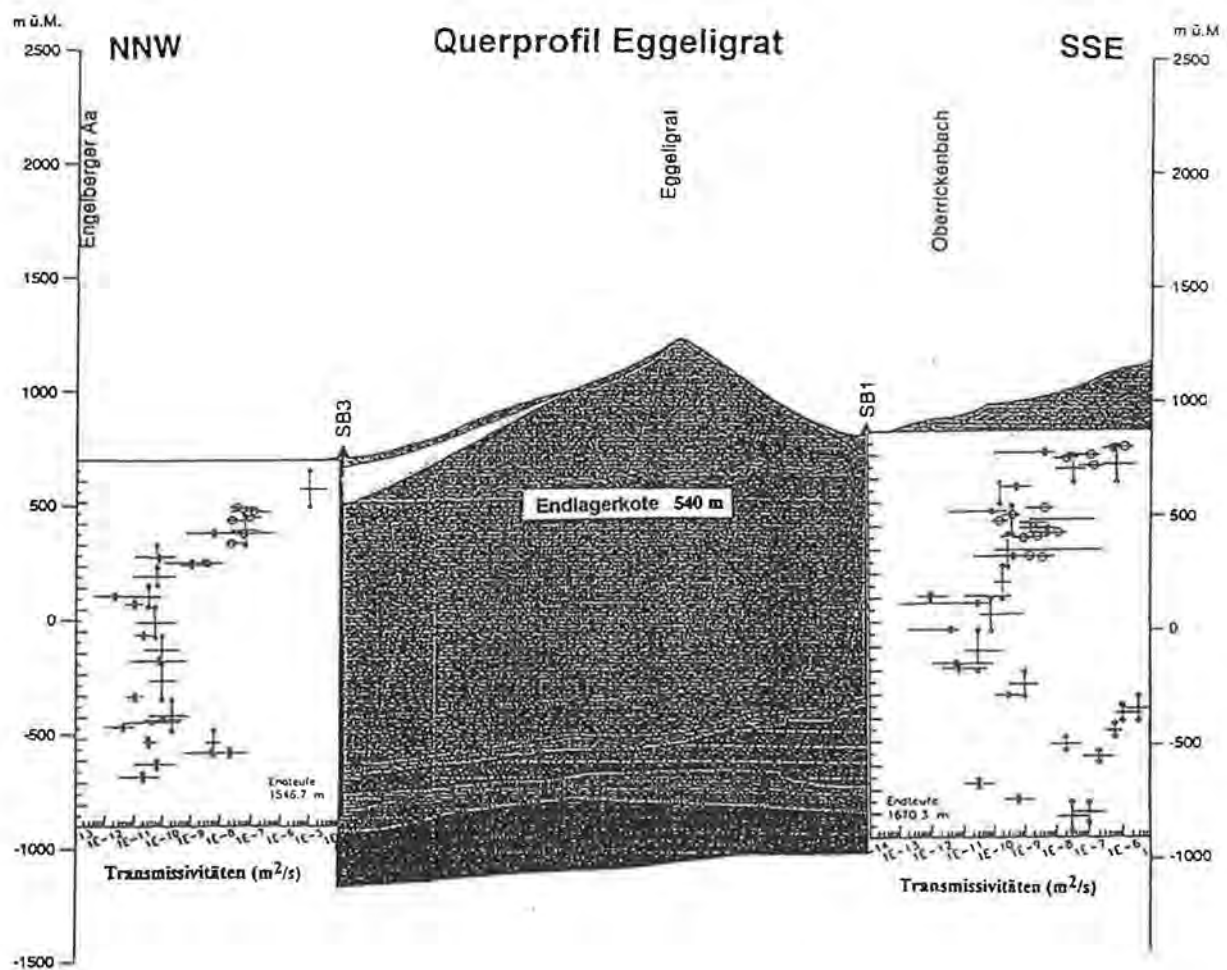
Der Datensatz zu den hydraulischen Durchlässigkeiten der verschiedenen Gesteinsformationen am Standort Wellenberg stützt sich auf insgesamt 165 hydraulische Tests (Einfach- oder Doppelpacker-tests) und auf 4800 m auswertbarer Fluid-Logs in den bisher abgeteufte Sondierbohrungen ab. Die Testergebnisse zeigen, dass der Valanginienmergel ab einer Tiefe von 300-500 m über grosse Bohrlochstrecken hinweg geringe bis sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten (k-Werte von 10^{-10} bis 10^{-12} m/s) aufweist. Im untiefen Bereich des Wirtgesteins liegen die k-Werte deutlich höher (grosse Variationsbreite der k-Werte von 10^{-6} bis 10^{-10} m/s).

Aufgrund der gemessenen Durchlässigkeiten und der hydrochemischen Befunde wurden modellhaft verschiedene hydrogeologische Einheiten definiert. Für den Endlagerbereich relevant sind:

- hydrogeologische Einheit B
(oberflächennaher Mergel mit einer mittleren Durchlässigkeit von $3 \cdot 10^{-9}$ m/s)
- hydrogeologische Einheit C
(mittlerer Abschnitt von Mergel mit einer mittleren Durchlässigkeit von $3 \cdot 10^{-11}$ m/s)
- hydrogeologische Einheit D
(tiefliegender Mergel mit einer mittleren Durchlässigkeit von 10^{-12} m/s).
- hydrogeologische Einheit E
(Schimberg-Schiefer und Globigerinenmergel der Axen-Decke, mittlerer k-Wert von $3 \cdot 10^{-12}$ m/s)

In ihrer Beurteilung kommt die HSK zum Schluss, dass wegen der schwierigen Interpolation zwischen den weit auseinanderliegenden Bohrungen die Zoneneinteilung der Nagra schwach belegt ist und durch weitere Sondierungen (Sondierstollen) bestätigt werden muss. Um den Endlagerbereich nicht frühzeitig zu verletzen, wurden alle bisherigen Sondierbohrungen ausserhalb des eigentlichen

Endlagerbereiches abgeteuft. Genaue Aussagen über die laterale und vertikale Abgrenzung der verschiedenen Durchlässigkeitsbereiche können deshalb heute noch nicht gemacht werden (Figur 6-1). Ein Vergleich der Ergebnisse aus den nahe beieinander liegenden Bohrungen SB4, SB4a/vertikal und SB4a/schräg zeigt, dass die Durchlässigkeitsverteilung im Wirtgestein kleinräumig und komplex sein kann.



Figur 6-1: Querprofil durch den Eggeligrat, mit Angabe der ermittelten Transmissivitäten in den beiden Sondierbohrungen SB1 und SB3. Mit diesen Bohrungen wurde der tiefliegende Bereich des Wirtgesteins und dessen Basis erkundet. Rückschlüsse über die Durchlässigkeitsverhältnisse in der potentiellen Endlagerzone auf der Kote von 540 m sind daraus schwierig abzuleiten.

Im Datensatz für die Sicherheitsanalyse rechnet der Gesuchsteller im Referenzfall für den Endlagerbereich mit einem durchschnittlichen k -Wert von 10^{-11} m/s. Dieser Wert ist in den tieferliegenden Schichten bei genügender Überdeckung plausibel. Im Falle von Fremdgesteinseinschlüssen (Kalkschollen) und im Bereich von Störungen sind aber höhere hydraulischen Durchlässigkeiten möglich.

Die bisherigen Untersuchungen deuten darauf hin, dass im Wellenberg ein genügend grosses Volumen von gering durchlässigem Wirtgestein existiert. Der Nachweis kann erst mit dem Bau eines Sondierstollens erbracht werden. Nach Urteil der HSK sind die Aussichten, dass ein entsprechendes Gesteinsvolumen gefunden werden kann, gut. Aufgrund der Ergebnisse der Bohrungen SB4a/vertikal und SB4a/schräg ist hingegen die Wahrscheinlichkeit, dass ein genügend grosses Volumen mit den im Referenzfall zugrunde gelegten Durchlässigkeiten von 10^{-11} m/s auf der zur Zeit vorgesehenen Endlagerkote von 540 m.ü.M. existiert, kleiner einzuschätzen. Sollten auf der geplanten Endlagerkote höhere Durchlässigkeiten vorgefunden werden, so müsste die Sicherheitsanalyse zeigen, wie weit diese höheren Werte noch zulässig sind. Allenfalls müsste das Endlager oder Teile davon tiefer angelegt werden.

6.2 Charakterisierung der wasserführenden Zonen

Die Herleitung und Typifizierung der wichtigsten wasserführenden Zonen wurde mit Hilfe der Fluid-Logs und einer punktuellen Beschreibung und Analyse der entsprechenden Bohrkernabschnitte durchgeführt. Für das Wirtgestein wurden drei verschiedene Systeme definiert (kataklastische Störungszonen, diskrete Scherzonen und geklüftete Kalkbänke, vgl. Tab. 5-3), die als Datenbasis für die Sicherheitsanalyse dienen. Die im Geodatenbericht [13] zusammengefassten Ausführungen zu den wasserführenden Zonen sind als ein Zwischenergebnis zu betrachten, eine vollständige Dokumentation liegt noch nicht vor. Die für die Sicherheitsanalyse durchgeführte Konzeptualisierung der wasserführenden Systeme ist deshalb als eine generische und provisorische Annäherung zu betrachten.

Noch ungeklärt ist die Frage der effektiv wirksamen Fliesspfadgeometrie. Der Wasserfluss in planaren Strukturen kann in diesen ungleichmässig verteilt und auf bestimmte Kanäle beschränkt sein, die dann nur einen Bruchteil der Gesamtfläche betreffen. Eine solche kanalisierende Fliesspfadgeometrie wird als „Channeling“ bezeichnet. Über das Ausmass dieser kanalisierten Fliessgeometrie kann aufgrund der Eindimensionalität der Bohrungen keine Aussage gemacht werden. Belastbare Daten werden dazu erst beim Bau eines Sondierstollens erhoben werden können. Aufgrund dieser Kenntnislücken ist es heute schwierig zu beurteilen, ob die für die Sicherheitsanalyse getroffenen Annahmen für die Modellierung der Wasserfliesswege vollständig und auch konservativ sind.

Nach Ansicht der HSK kann der verwendete Datensatz als generisches Modell bewertet werden, der im Rahmen einer ersten Sicherheitsanalyse für die Geosphären-Ausbreitungsrechnungen im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsverfahren vertretbar ist.

6.3 Chemische Beschaffenheit der Grundwässer

Die in den Sondierbohrungen erfassten Grundwässer lassen sich aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Isotopensignaturen in verschiedene Wassertypen einteilen:

- oberflächennahe Ca-HCO₃-Wässer, geringe Mineralisation von ≤ 1 g/l
(junges Grundwasser aus den Lockergesteinen und der Rutschmasse, in Verbindung mit der Oberfläche)
- oberflächennahe Na-HCO₃-Wässer, Mineralisation 0,8 - 1,4 g/l
(untiefer, durchlässiger Bereich der Mergel)
- Na-Cl-Wässer, hohe Mineralisation von bis 30 g/l
(stagnierende Wässer aus grösserer Tiefe aus dem Bereich der sehr geringdurchlässigen Mergel)
- Na-HCO₃-Wässer, Mineralisation von 1,2 - 1,4 g/l
(Grundwässer aus tiefen Aquifergesteinen unterhalb der Basis der Mergel).

Die vorläufigen hydrochemischen Befunde deuten auf unterschiedliche und zum Teil auch voneinander getrennte Grundwasserkörper hin, die sich durch verschiedene Verweilzeiten und durch unterschiedliche Wasser/Gesteins-Austauschprozesse auszeichnen.

Die Deuterium und O-18 Signaturen zeigen unterschiedliche Entwicklungstendenzen auf. Bei den hoch salinen Na-Cl-Wässern dürfte es sich um fossile Formationswässer oder Restlösungen der alpinen Gesteinsumwandlung handeln. Die anderen, gering mineralisierten Wässer liegen alle auf der globalen Niederschlagsgerade; dies widerspiegelt ihre meteorische Herkunft. Sie zeichnen sich durch eine geringere Wasser/Gesteins-Interaktion und deutlich kürzere Verweilzeiten aus.

Die HSK stellt somit fest, dass ab einer gewissen Tiefe im geringdurchlässigen Wirtgestein mit hoch mineralisierten Na-Cl-Wässern und im Bereich von höher durchlässigen Störungszonen mit Na-HCO₃-Wässern zu rechnen ist. Noch offen bleibt die Frage, inwieweit die beobachtete Tiefenzonierung der Grundwässer durch regionale oder grosse Störungen unterbrochen wird (vgl. Tabelle 5-1). Belastbare Daten dazu werden erst nach dem Bau des Sondierstollens vorliegen.

6.4 Hydraulische Potentiale und Gradienten

Die hydraulischen Messungen in den Sondierbohrungen ergeben für das Wirtgestein im untiefen Bereich (200-500 m) hydrostatische bis artesische Druckverhältnisse. Im Gegensatz dazu beobachtet man in den tiefer liegenden geringdurchlässigen Schichten anomal niedrige Druckspiegelhöhen, die bis zu 600 m unter den hydrostatischen Drucken liegen (Unterdruckphänomen). Eine abschliessende Interpretation zur Entstehung der hydraulischen Unterdrucke steht noch aus. Grundsätzlich werden jedoch Entlastungseffekte infolge Rückzuges der eiszeitlichen Gletscher oder tektonische Prozesse (Hebung mit Erosion) als plausible Erklärung für die Unterdrucke angenommen. Unter diesen Umständen muss man davon ausgehen, dass die Potentialverteilung im Wellenberg und damit auch das

Gradientenfeld instationär sind. Die HSK erachtet es als notwendig, dass für spätere Bewilligungsschritte ein Modell entwickelt wird, das die beobachtete Potentialverteilung hinreichend genau reproduzieren kann. Entsprechende Arbeiten wurden vom Gesuchsteller bereits aufgenommen.

Die im Geodatensatz verwendeten hydraulischen Gradienten wurden vom hydrogeologischen Pilotmodell (vgl. Abs. 6.6) abgeleitet. Die Überprüfung durch die HSK ergibt im wesentlichen gleiche Werte (0,19 - 0,5). Der Maximalwert von 0,5 entspricht der Differenz zwischen den Walenstöcken und dem Talboden der Engelberger Aa.

Hohe artesische Druckspiegelhöhen wurden tief unter dem Endlagerbereich in der stark durchlässigen Weissberg-Schuppe beobachtet. Berechnungen des Experten der HSK [17] zeigen, dass diese die Potentialverteilung im Endlagerbereich nicht beeinflusst, falls die effektiven hydraulischen Durchlässigkeiten der Valanginienmergel stets sehr gering bleiben ($k = 10^{-12}$ m/s). In diesem Fall bleiben die hohen Druckspiegelhöhen in der Weissberg-Schuppe auf die Schuppe und ihre unmittelbare Umgebung langfristig beschränkt. Die Überprüfung zeigt ferner, dass signifikante Erhöhungen der Gradienten und der Wasserflüsse im Endlagerbereich bei einer Konfiguration mit steilstehenden Störungen möglich sind.

6.5 Gasführung und Zweiphasenflussverhältnisse

Die Sondierbohrungen und Oberflächenmessungen der Nagra haben zusammen mit den Ergebnissen aus früheren Untersuchungen (Bau des Seelisbergtunnels, Nagra-Sondierungen am Oberbauenstock, Studien des Tiefengaskonsortiums) gezeigt, dass im Bereich der helvetischen Decken und deren tertiärer Unterlage eindeutige Indikationen für Erdgas vorhanden sind. Das Erdgas besteht vorwiegend aus Methan, mit Anteilen höherer Kohlenwasserstoffe. Die wichtigsten Befunde können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ein beachtlicher Zustrom von Erdgas (Methan) wurde in der Sondierbohrung SB1 in der tertiären Unterlage unterhalb der Drusbergdecke beobachtet (Altdorfer-Sandstein, Nordhelvetischer Flysch). Das Gasvorkommen wurde in der Folge während 6 Tagen getestet; dabei wurden rund 20'000 m³ Methan gefördert.
- In den Kreidemergeln sind die Kohlenwasserstoffe hauptsächlich als Fluideinschlüsse in Kalzitkristallen enthalten. Kalzitgefüllte Klüfte und Adernetzwerke sind weit verbreitet und machen im Gestein mit 1-10 % einen beträchtlichen Teil des Gesamtvolumens aus.
- Bedeutende Gaskonzentrationen wurden in den Wasserproben aus den Sondierbohrungen festgestellt. Unter den vorherrschenden Bedingungen der Entnahmetiefen ist dieses Gas meist vollständig im Grundwasser gelöst und wird erst bei der Druckentlastung freigesetzt.

Die Frage, ob im Mergel auch unter ungestörten Bedingungen eine freie Gasphase vorhanden ist, kann heute noch nicht abschliessend beantwortet werden. Die bisherigen Untersuchungen haben dazu keine eindeutigen Ergebnisse erbracht. Die Problematik der Gasführung bzw. die Frage, ob ein Ein-

Phasen-System oder ein Zwei-Phasen-System vorliegt, ist wichtig für das qualitative und quantitative Verständnis der hydrogeologischen Prozesse. Das Verständnis der Gasproblematik ist auch eine Voraussetzung für eine korrekte Modellierung der Nuklidausbreitung in der Geosphäre. Entsprechende Untersuchungen sind im Rahmen der untertägigen Erkundungen (Sondierstollen) vorgesehen.

6.6 Hydromodellierung

Das vom Gesuchsteller verwendete 3D-Pilotmodell ist ein erster Ansatz zur quantitativen Abschätzung der Fliessverhältnisse im Wellenberg-Gebiet. Es geht von vereinfachten Modellvorstellungen aus, was die geologisch-hydrogeologischen und die geometrischen Verhältnisse betrifft. Das Pilotmodell nimmt deshalb nicht in Anspruch, ein Standortmodell zu sein. Das 3D-Pilotmodell ist ein stationäres Modell und kann somit das transiente Verhalten des Potentialfeldes nicht nachbilden. Das Pilotmodell ist nur für die höher durchlässigen Zonen und Formationen repräsentativ, die sich bereits heute in einem hydraulisch stationären Zustand befinden.

Die Berechnungen mit dem 3D-Pilotmodell zeigen, dass aufgrund der allgemeinen hydrogeologischen und topographischen Randbedingungen im Wirtgestein langfristig eine generelle Fliessrichtung von Südost nach Nordwest angenommen werden kann. Diesem einfachen Strömungsbild werden lokale oberflächennahe Zirkulationssysteme, die primär durch die Topographie bestimmt werden, überlagert. Daraus resultieren mögliche Exfiltrationen von Wässern aus dem Endlagerbereich in die Rutschmasse Altzellen und in die Hanglagen des Secklisbachtals. Eine Exfiltration ins Tal der Engelberger Aa ist jedoch am wahrscheinlichsten.

Die Simulationen mit dem Pilotmodell zeigen, dass die Vertikalkomponente der Grundwasserströmung tiefenabhängig ist. Im Basisfall der Hydromodellierung sind die Gradienten oberhalb des Endlagerbereiches nach unten gerichtet; unterhalb des Endlagerbereiches zeigen die Gradienten leicht nach oben. Im potentiellen Endlagerbereich auf Kote 540 m.ü.M. ergibt der Basisfall im wesentlichen eine horizontale Durchströmung.

Das 3D-Pilotmodell ist nach Ansicht der HSK ein nützliches Werkzeug, um erste grobe Abschätzungen über mögliche Strömungsfelder, Fließmengen und Fließrichtungen machen zu können. Ein eigentliches hydrogeologisches Standortmodell, das allen Feldbefunden und Bohrerergebnissen Rechnung trägt, ist für die späteren Bewilligungsschritte notwendig. Entsprechende Arbeiten wurden vom Gesuchsteller bereits Ende 1994 in Angriff genommen.

6.7 Wasserfluss durch das Endlager

Während der Betriebsphase wirken die Endlagerbauwerke (Stollen und Kavernen) als grossräumige Drainage und es wird sich ein zum Endlager hin konvergierendes Fließfeld einstellen. Nach Verschluss und Versiegelung des Endlagers hört die Drainage weitgehend auf. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass eine wirksame Versiegelung erfolgreich durchgeführt werden kann. Auch nach der

Versiegelung verbleiben signifikante Veränderungen im Wirtgestein, die das Fließfeld langfristig beeinflussen werden. So sind zum einen die verfüllten Endlagerbauwerke um mehrere Größenordnungen besser durchlässig als das ungestörte Wirtgestein. Zum anderen wird sich um den Stollen und die Endlagerkavernen herum eine Auflockerungszone bilden, die ebenfalls um Größenordnungen durchlässiger ist als das ungestörte Wirtgestein.

Numerische Simulationen des Experten der HSK zur Längsdurchströmung einer Endlagerkaverne [17] zeigen, dass nach Verschluss infolge Fokussierung der Fließlinien der Durchfluss durch eine einzelne verfüllte Kaverne einen Wert von $3 \text{ m}^3/\text{a}$ erreicht. Berücksichtigt man den Einfluss der Auflockerungszone, so erhöht sich die Durchflussmenge je nach Ausdehnung der Zone um maximal einen Faktor 2. Für das gesamte Endlager (sieben Kavernen mit Auflockerungszone) ergeben die Simulationen einen totalen Fluss von $21 \text{ m}^3/\text{a}$, was mit den Angaben des Gesuchstellers konsistent ist.

Trägt man der Möglichkeit Rechnung, dass innerhalb des Wirtgesteinblockes höherdurchlässige mittlere und kleinere Störungen auftreten, so sind auch grössere k -Werte im Bereich von 10^{-9} m/s nicht auszuschliessen. Entsprechend würden sich dann auch die Wasserflüsse erhöhen. Bei der Durchführung der Sicherheitsanalyse wurden deshalb auch Szenarien mit grösseren Wasserdurchflüssen berücksichtigt.

6.8 Anforderungen an die Stollenversiegelung

Mit der Erstellung der untertägigen Bauwerke ist eine Auflockerung des umgebenden Gesteins verbunden. Diese Auflockerung verursacht im Gestein zum einen eine Änderung der felsmechanischen Kennwerte und zum anderen eine Änderung des Poren- und Klufttraumes und damit der Durchlässigkeit. Solche Veränderungen können sich bis zu einer den Stollenradius mehrfach übersteigenden Distanz in den Fels hinein auswirken, wobei die grössten Veränderungen in der unmittelbaren Umgebung des Hohlraumes auftreten. Eine wichtige Frage für das Verständnis der langfristig zu erwartenden Durchströmungsverhältnisse im versiegelten Endlager sind deshalb die Effekte der Auflockerungszone um Stollen und Kavernen und die damit verbundene Erhöhung der Durchlässigkeiten.

Die theoretischen Grundlagen zur Auflockerungszone basieren auf der Untersuchung der Umlagerung von Spannungen um den geschaffenen Hohlraum herum und den dabei auftretenden Brucherscheinungen im Gebirge. Diese Bruchzustände werden dabei mit Hilfe plastischer Materialgesetze nach dem Mohrschen Bruchkriterium berechnet. Die so ermittelten Bereiche mit einer Festigkeitsüberschreitung werden plastische Zonen genannt. In einer ersten Näherung wird die plastische Zone der Auflockerungszone gleich gesetzt.

Erste Berechnungsergebnisse des HSK-Experten für Stollen und Endlagerkaverne [17] zeigen, dass aufgrund der Trennflächensysteme und des stark anisotropen Spannungsfeldes bei den Endlagerbauwerken mit der Bildung einer grösseren Auflockerungszone zu rechnen ist. Das vollständige Bild der Spannungsumlagerung ergibt sich aus der Überlagerung der plastifizierten Bereiche mit den Scherver-

schiebungen auf den Trennflächen. Letztere können dabei eine erheblich grössere Reichweite aufweisen (mehrere Stollen- bzw. Kavernenradien).

Abschätzungen zur Änderung der Durchlässigkeiten ergeben, dass in der Auflockerungszone eine Durchlässigkeitserhöhung um mehrere Grössenordnungen durchaus möglich erscheint. Damit besteht die Gefahr, dass bei ungenügender Versiegelung des Stollens dieser als präferenzzieller Freisetzungspfad zur Biosphäre wirkt.

Ausgehend vom schematischen Layout der Endlagerbauwerke wurde vom Experten der HSK anhand eines einfachen numerischen Modells die Anforderungen an die Versiegelung der Stollen quantifiziert. Die vorläufigen Resultate ergeben, dass die kritische Durchlässigkeit für die Verfüllung der Stollen in der Grössenordnung von 10^{-7} m/s liegt. Bei dieser Durchlässigkeit beginnt das Wasser aus den Endlagerkavernen in das Stollensystem zu fliessen. Bei noch höherer Durchlässigkeit nimmt der Fluss durch den Verbindungsstollen rasch zu. Der Stollen drainiert dann das Endlager und ermöglicht einen Kurzschluss zur Biosphäre.

Die HSK erachtet es als unerlässlich, dass im Hinblick auf die späteren Bewilligungsschritte das Ausmass der Auflockerungserscheinungen für die in der Endlagerzone zu erwartenden Bedingungen genauer untersucht wird. Darauf basierend sind die Anforderungen an die Ausbruchtechnik und an die Versiegelung von Stollen und Kavernen abzuleiten und konkrete Realisierungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Es muss verhindert werden, dass der Verbindungsstollen zu einer unzulässigen Freisetzung in die Biosphäre führt.

7. ORGANISATION UND PERSONAL

7.1 Projekt- und Betriebsorganisation

Das Endlager Wellenberg soll von einer Organisation gebaut und betrieben werden, welche den langfristigen Aspekten der Sicherheit gebührend Rechnung trägt. Die entsprechenden Ziele und die Anforderungen, die zu ihrer Erreichung dienen, sind vom Projektanten und später vom Betreiber zu formulieren und in der Geschäftstätigkeit anzuwenden (Verträge mit beteiligten Gesellschaften, öffentlichen Körperschaften und Lieferanten, Personalpolitik, Qualitätssicherung, Dokumentation). Die Organisationsstruktur soll Transparenz gewährleisten und sowohl intern wie auch nach aussen einfache Abläufe erlauben.

Das Personal soll über die für die Gewährleistung der Sicherheit notwendige Sorgfalt und Fachkenntnisse verfügen. Deshalb ist der Personalselektion die entsprechende Aufmerksamkeit zu widmen. Durch geeignete Personalpolitik ist anzustreben, dass die in der Projekt- und Bauphase gewonnenen Anlagenkenntnisse für die Betriebsphase erhalten bleiben. Die Tätigkeiten, Verantwortlichkeiten und Kompetenzen der Mitarbeiter sollen in Pflichtenheften und Organigrammen festgehalten werden. Der Stand ihrer Fachkenntnisse soll mittels eines berufsbegleitenden Ausbildungsprogramms erhalten und ausgebaut werden.

Bereits für das Verfahren zur Baubewilligung soll ein Strahlenschutzsachverständiger gemäss Artikel 16 des Strahlenschutzgesetzes ernannt werden. Dieser Person sollen die erforderlichen Kompetenzen gegeben sowie die personellen und materiellen Mittel zur Verfügung gestellt werden. Die Anforderungen an die Ausbildung eines Strahlenschutzsachverständigen im Aufsichtsbereich der HSK gehen aus Artikel 18 der Strahlenschutzverordnung und aus der Richtlinie HSK-R-37 [11] hervor.

7.2 Notfallorganisation

Das Endlager Wellenberg ist eine Kernanlage, womit formell das Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement im Rahmen der Bau- und Betriebsbewilligungen gemäss Notfallschutzverordnung vom 28.11.1983 die Massnahmen bei Störfällen regeln muss. Da im Endlager Wellenberg bereits konditionierte Abfälle angeliefert werden und die Umladung der angelieferten Abfälle sowie die eigentliche Einlagerung unterirdisch vor sich gehen, sind bei Störfällen keine Strahlendosen möglich, welche zu akuten Strahlenwirkungen bei der Bevölkerung führen können. Es ist deshalb keine Planung von Notfallschutzmassnahmen in der Umgebung des Endlagers erforderlich.

Die Notfallorganisation des Betreibers muss jedoch sicherstellen, dass bei den möglichen Störfällen im Betrieb (z.B. Gebindeabsturz oder Brand im Stollen):

- rasch Massnahmen zur Kontrolle des Störfalles ergriffen werden

- die radiologischen Auswirkungen des Störfalles auf die Umgebung zuverlässig bestimmt werden
- die Aufsichtsbehörde (HSK) und im Falle von Ereignissen mit möglichen radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung auch die Nationale Alarmzentrale sofort benachrichtigt werden
- bei Bedarf der Standortkanton Nidwalden und der benachbarte Kanton Obwalden rasch orientiert werden.

Um dies sicherzustellen benötigt der Betreiber des Endlagers Wellenberg:

- Eine Notfallorganisation, die mittels Bereitschaftsdienst die rasche Beurteilung des Störfalles und die Einleitung von Gegenmassnahmen jederzeit ermöglicht.
- Ein Notfallreglement sowie Notfallvorschriften, welche das Vorgehen bei Störfällen regeln. Das Notfallreglement muss gemäss Notfallschutzverordnung durch das Bundesamt für Energiewirtschaft genehmigt werden.
- Kriterien, welche die Meldewege nach aussen festlegen.

Die der Notfallorganisation dienenden baulichen Einrichtungen werden im Hinblick auf die Baubewilligung beurteilt. Die Beurteilung der Einsatzbereitschaft der Notfallorganisation erfolgt im Rahmen der Begutachtung im Hinblick auf die Betriebsbewilligung.

7.3 Qualitätssicherung und Dokumentation

Die Qualitätssicherung hat bei einem Endlager einen besonders hohen Stellenwert, muss sie doch insbesondere gewährleisten, dass in der Zeit nach dem Verschluss des Endlagers die technischen und natürlichen Barrieren so funktionieren, wie es in der Beurteilung der Endlagersicherheit nach bestem Wissen angenommen wurde. Es ist darauf zu achten, dass das Qualitätssicherungssystem international anerkannten Normen, z.B. ISO 9000, entspricht. Es ist ein transparentes, einfach auditierbares System anzuwenden, welches alle Tätigkeitsbereiche des Endlagers abdeckt und eine klare Kommunikation zu allen Lieferanten und Behörden ermöglicht.

Die sorgfältige und umfassende Dokumentation aller Tätigkeiten und Spezifikationen, welche das Endlager betreffen, ist der langen Zeiträume wegen besonders wichtig. Dies betrifft auch die Qualitätssicherungs-Teilprogramme und die zugehörigen Weisungen und Spezifikationen. Alle notwendigen Dokumente (inkl. darin zitierte Dokumente) müssen für den betroffenen Anwender unmittelbar verfügbar sein. Die ausgeführten Arbeiten, besonders in Bereich der Lagerung, müssen so dokumentiert werden, dass sie aufgrund der Dokumentation nachvollzogen werden können.

Im Hinblick auf den Verschluss des Endlagers wird ausserdem eine besondere Dokumentation zu erstellen sein, die für eine langfristige Archivierung geeignet ist und Auskunft über das Endlager und seinen Inhalt gibt.

verfüllten Stollen mit ihrer Auflockerungszone zu einer unzulässigen Freisetzung in die Biosphäre führen (vgl. Abs. 6.8).

- Wie im Seelisbergtunnel erwartet man auch im Wellenberg Methangasvorkommen. Der Gesuchsteller soll frühzeitig mit der SUVA die Sicherheitsvorkehrungen wie auch mögliche Anpassungen der Stollen (Grösse, Lage, Anzahl) festlegen, damit mögliche Einflüsse auf die Sicherheit in einem frühen Stadium abgeklärt werden können.

8.2 Schutz des Personals

Das Strahlenschutzkonzept und die vorgesehenen Massnahmen für die radiologische Sicherheit des Personals werden vom Gesuchsteller in den Grundzügen beschrieben. Die Auslegung der Bereiche, die den kontrollierten Zonen zugeordnet werden, sollen gemäss den Empfehlungen der Richtlinie HSK-R-07 [12] vorgenommen werden. Die Handhabung von strahlenden Gebinden soll weitgehendst mit fernbedienbaren Einrichtungen und geschützt von abgeschirmten Plätzen aus erfolgen. Als Zielwert für die Dosis von beruflich strahlenexponierten Personen gibt der Gesuchsteller einen Wert von 5 mSv pro Jahr an, der bedeutend kleiner als der Grenzwert von 20 mSv pro Jahr nach Strahlenschutzverordnung ist. Die Lüftungsanlagen sollen so ausgelegt und dimensioniert werden, dass die Dosen für das Betriebspersonal durch Inhalation von radioaktiven Stoffen aus den Abfallgebinden und von Radon vernachlässigbar sind. Zudem soll das Entweichen von flüchtigen Radionukliden aus den Abfallgebinden durch verschiedene Massnahmen begrenzt oder verhindert werden. Zu diesen Massnahmen gehören besondere Anforderungen an die Dichtheit der Verpackungen, die Einbettung der Abfallgebinde in verfüllten Endlagercontainer und die fortschreitende Verfüllung der Lagerkavernen.

Die auf konzeptueller Ebene dargelegten Massnahmen des Gesuchstellers sind nach Meinung der HSK geeignet, die beim Einlagerungsbetrieb für das Personal anfallenden Dosen tief zu halten. Es besteht Zuversicht, dass der Zielwert für jeden Mitarbeiter und eine tiefe Kollektivdosis für das gesamte Personal erreicht werden können. Im Verfahren für die nukleare Baubewilligung wird durch den Gesuchsteller zu zeigen sein, ob die von ihm konkret vorgesehenen Massnahmen das Ziel, alle Dosen so tief wie mit vernünftigen Mitteln erreichbar zu halten, erfüllen können. Das Verfahren dafür ist im Art. 6 der Strahlenschutzverordnung (Optimierung) beschrieben.

8.3 Schutz der Umgebung

Beim Betrieb eines Endlagers kann die Umgebung durch Direktstrahlung aus Abfallgebinden und infolge der Freisetzung wasser- oder luftgetragener radioaktiver Stoffe radiologisch belastet werden. In Anwendung des quellenbezogenen Dosisrichtwertes darf die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung im Normalbetrieb höchstens einen Bruchteil des in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwertes von 1mSv pro Jahr betragen. Der Richtwert wurde auf 0,1 mSv pro Jahr für die meistbetroffene Person der Bevölkerung festgelegt. In der Strahlenschutzverordnung sind ferner die Anforderungen betreffend die Auslegung der Anlage zum Schutz der Bevölkerung bei Störfällen festgelegt.

8. BAU- UND BETRIEBSSICHERHEIT

8.1 Baukonzept

Die Ausgestaltung der unterirdischen Bauten wird im heutigen Projektstadium nicht im Detail festgeschrieben. Der Gesuchsteller kann insbesondere die genaue Plazierung der Endlagerkavernen erst nach der detaillierten Erkundung des Untergrundes bestimmen. Dieser Vorbehalt ist auf Stufe der Rahmenbewilligung zulässig; eine eingehende Beurteilung der bauseitigen Rahmenbedingungen für die Sicherheit und den Strahlenschutz wird erst anlässlich des Baugesuches geschehen. Eine Anordnung der Untertagebauten entsprechend Figur 2-1 scheint möglich. Die Endlagerkavernen werden nicht alle sofort erstellt. Für den Aushub jeder einzelnen Lagerkaverne wird eine Freigabe der HSK erforderlich sein. Bauarbeiten und Einlagerungsbetrieb werden in zeitlich getrennten Phasen erfolgen.

Gemäss gegenwärtiger Planung bestehen die Untertagebauten aus einer Empfangsanlage mit Umschlags-, Betriebs- und Hilfsanlagenkavernen und einer Reihe von Endlagerkavernen (vgl. Fig. 2-1). Diese Anlagenteile sind durch zwei Stollen erschlossen. Lediglich die Lage der zwei Stollenportale ist zur Zeit definitiv festgelegt. Ein Stollen soll vorgängig als Sondierstollen vorgetrieben werden, um die geologischen, hydrogeologischen und felsmechanischen Verhältnisse im Endlagerbereich erkunden zu können. Die Resultate dieser Erkundungen dienen dem Festlegen der Bauverfahren für die Untertagebauten, der Anordnung der Endlagerkavernen und der Überprüfung der Parameter für die Sicherheitsanalyse. Der andere Stollen dient dem Betrieb. Als weiteres wichtiges Bauwerk zwischen Endlager und Aussenwelt ist das Lüftungsbauwerk auf dem Gebiet von Bettelrüti. Gegenwärtig sind dort ein separates Zu- und Abluftbauwerk vorgesehen. Der Gesuchsteller behält sich als Alternative vor, das Zuluftbauwerk im Portalbereich zu integrieren.

Die Aussenanlagen stellen keine besonderen Anforderungen an den Baugrund; sie bedürfen auch keiner besonderen Erdbebenauslegung. Auf der Bettelrüti, wo die Zuluft- und Abluftbauwerke zu liegen kommen sollen, besteht eine gewisse Steinschlag- und Lawinengefahr. Eine entsprechende Auslegung dieser Bauwerke bietet keine ausserordentlichen Schwierigkeiten. Gegen eine allfällige Integration des Zuluftbauwerkes im Portalbereich hat die HSK nichts einzuwenden.

Für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der Untertagebauten hat man im Seelisbergtunnel eine Referenzanlage, die ebenfalls im Valanginienmergel liegt und eine vergleichbare Felsüberlagerung hat. Aus der Ähnlichkeit beider Bauwerke und deren Umgebung kann die bautechnische Machbarkeit der Endlagerkavernen positiv beurteilt werden. Für die Auslegung der unterirdischen Bauten sind die Veränderungen der Erdbebenbeanspruchungen mit der Tiefe bzw. Überdeckung zu berücksichtigen. Die HSK weist auf folgende zwei Problemkreise hin, welche die Endlagersicherheit beeinflussen können:

- Die Vortriebsverfahren für die Untertagebauten sind so zu wählen, dass die Auflockerung um Stollen und Kavernen minimiert wird: Die Erhöhung der Durchlässigkeit um die Untertagebauten soll möglichst klein gehalten werden. Es muss nämlich verhindert werden, dass insbesondere die

Bei der vorgesehenen unterirdischen Bauweise der Empfangsanlage stellt die Direktstrahlung keine Gefährdung für die Umgebung dar. Zur Einhaltung des quellenbezogenen Dosisrichtwertes von 0,1 mSv/a im Normalbetrieb werden im Rahmen des Verfahrens zur Betriebsbewilligung Limiten für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser festgelegt. Die Einhaltung der Abgabelimiten ist mittels Messeinrichtungen zur Abgabenüberwachung nachzuweisen.

Der Gesuchsteller legt dar, dass anhand der Anlagenauslegung und des Betriebskonzeptes die behördlichen Schutzziele für den Normalbetrieb erreicht werden können. Er hat sich ferner Überlegungen zu den möglichen Störfällen gemacht und daraus radiologisch signifikante Auslegungstörfälle eruiert. Als Störfall mit kleiner Eintrittshäufigkeit (zwischen 10^{-2} und 10^{-4} pro Jahr) betrachtet er den Absturz eines Abfallgebindes vom Transportwagen oder Kran mit anschliessender Beschädigung. Als Beispiel für einen Störfall mit sehr kleiner Eintrittshäufigkeit (zwischen 10^{-4} und 10^{-6} pro Jahr) nennt der Gesuchsteller den Brand einer ganzen Wagenladung von Gebinden mit bituminierten Abfällen. In allen Fällen sind die vom Gesuchsteller geschätzten Strahlendosen kleiner als die entsprechenden Limiten.

Der Betrieb des geplanten Endlagers kann mit jenem eines Zwischenlagers verglichen werden. Gestützt auf entsprechende Erfahrungen erachtet die HSK die Folgerungen des Gesuchstellers zum Schutz der Umgebung als vernünftig. Es besteht Zuversicht, dass die Dosislimiten eingehalten werden können. Der detaillierte Nachweis ist nach der eingehenden Projektierung der unterirdischen Arbeitsräume und Lüftungsanlagen sowie der Festlegung der Betriebsvorschriften im Rahmen der späteren Verfahren zu den Bau- und Betriebsbewilligungen zu erbringen.

Die Antransporte der radioaktiven Abfälle unterliegen den einschlägigen Bestimmungen über die Beförderung gefährlicher Güter. Die Einhaltung dieser Vorschriften stellt sicher, dass durch die Transporte auch bei Störfällen keine unzulässigen Auswirkungen auf die Umgebung entstehen. Die Entladung der Fahrzeuge, die in der unterirdischen Empfangsanlage vorgenommen wird, ist ein Bestandteil des Endlagerbetriebs.

8.4 Überwachung

Der Schutz von Mensch und Umwelt muss gemäss Strahlenschutzverordnung anhand einer Überwachung der Umweltradioaktivität in der Umgebung des Endlagers nachgewiesen werden. Es soll die Radioaktivität in ausgewählten Grund-, Quellen- und Fließwässern, sowie anderen Umweltproben gemessen werden. Das Überwachungsprogramm soll auf Anordnung der HSK und des Bundesamtes für Gesundheitswesen festgelegt und unter Aufsicht dieser Behörden durchgeführt werden. Zu Beweissicherungszwecken soll der natürliche Referenzzustand im Einflussgebiet des Endlagers vor jeglicher Störung erhoben werden. Dementsprechend soll das radiologische Überwachungsprogramm mindestens zwei Jahre vor Baubeginn in Gang gesetzt werden.

Während des Betriebs des Endlagers soll die Stabilität der aufgefahrenen unterirdischen Anlagenteile anhand eines felsmechanischen Überwachungsprogrammes überwacht werden. Ferner soll das Verhalten der nach erfolgter Einlagerung von Abfallgebinden verfüllten Lagerteile während des weiteren

Betriebs des Endlagers verfolgt werden. Diese weitere Überwachung dient der Kontrolle des erwarteten Funktionierens der Nahfeldbarrieren. Daraus sollen im Hinblick auf den Verschluss des Endlagers Rückschlüsse bezüglich der Langzeitsicherheit gezogen werden.

Eine Überwachung der Umgebung des Endlagers wird voraussichtlich auch nach dem Verschluss stattfinden. Die Langzeitsicherheit darf aber nicht von langfristigen Überwachungsmassnahmen abhängen. Ferner dürfen allfällige Überwachungsmassnahmen die passiven Sicherheitsbarrieren einschliesslich der Versiegelung der Zugangsstollen zu den Endlagerkavernen nicht beeinträchtigen.

8.5 Verschluss des Endlagers

Gemäss Richtlinie HSK-R-21 muss ein Endlager so verschlossen werden können, dass nach dessen Verschluss keine weitergehenden Massnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit erforderlich sind. Der Verschluss wird den Zugang von Personen zu den Endlagerkavernen verhindern. Er soll im wesentlichen die durch den Bau der Endlageranlagen, vor allem hinsichtlich der Wasserströmung im Wirtgestein, bewirkten Änderungen soweit möglich rückgängig machen. Insbesondere muss der Verbindungsstollen so verfüllt und versiegelt werden, dass dadurch keine unzulässige Freisetzung entstehen kann. Der Verschluss des Endlagers bedarf einer Bewilligung des Bundesrates.

Der Gesuchsteller hat das Endlager so geplant, dass es fachgerecht verschlossen werden kann. Sobald eine Lagerkaverne mit Abfällen gefüllt ist, werden gemäss Konzept die verbleibenden Hohlräume verfüllt und der Zugang zur Kaverne versiegelt. Nach Abschluss aller Einlagerungen sollen auch die noch offenen Zugangs- und Verbindungsstollen verfüllt und versiegelt werden. Das heutige Versiegelungskonzept besteht aus kurzen Schlüsselzonen, die als hydraulische Barrieren ausgebildet sind, und aus dazwischen liegenden verfüllten Zwischenzonen. Ein detaillierteres Konzept wird zu gegebener Zeit unterbreitet.

Der Verschluss des Endlagers ist ein komplexes Problem, das zum Teil widersprüchlichen Anforderungen genügen muss. Die HSK ist der Ansicht, dass mit der vom Gesuchsteller dargelegten Kombination von Schlüssel- und Zwischenzonen eine den Anforderungen genügenden Versiegelung der Stollen möglich ist. Im Verlauf der weiteren Bewilligungsverfahren soll das Konzept schrittweise konkretisiert werden. Dabei sollen folgende Hinweise berücksichtigt werden:

- Um langfristig eine Ausweitung der Auflockerungszone um die Stollen zu vermeiden, muss die Verfüllung auch langfristig den Gebirgsdruck aufnehmen können.
- Beim vorgesehenen Einsatz von quellfähigen Materialien ist darauf zu achten, dass keine zu hohen Quelldrucke entstehen, die zu einem Aufbrechen des Gesteins führen würden.
- Der versiegelte Verbindungsstollen muss eine genügend kleine effektive Durchlässigkeit aufweisen, dass er das Endlager nicht unzulässig drainiert. Die Versiegelung muss auch die Auflockerungszone um den Stollen berücksichtigen.

- Für den Fall, dass ein Wasserfluss vom Endlager durch den Verbindungstollen zur Biosphäre nicht ausgeschlossen werden kann, muss eine ausreichende Barrierenwirkung der Verfüllung gegen den Transport von Radionukliden nachgewiesen werden.

9. LANGZEITSICHERHEIT

9.1 Schutzziele für die Nachverschlussphase

Mittels des Endlagers sollen radioaktive Abfälle derart beseitigt werden, dass der Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung aus diesen Abfällen dauernd gewährleistet ist. Ein absoluter Einschluss der zu beseitigenden Abfälle über unbegrenzte Zeiten ist nicht möglich. Die im Laufe der Zeit stattfindende Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre darf aber nur geringfügig und in sehr niedriger Konzentration erfolgen. Die daraus entstehende zusätzliche Strahlenexposition darf eine tief angesetzte Limite nicht übersteigen. Angesichts der Langfristigkeit der potentiellen radiologischen Konsequenzen aus einem Endlager soll diese Limite auch klein im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition und deren räumlichen Schwankungen sein.

Die in der Richtlinie HSK-R-21 [6] festgelegten Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle basieren auf den oben erläuterten Grundlagen. Es sind drei Schutzziele formuliert. Das Schutzziel 1 bezieht sich auf die mutmassliche Entwicklung des Endlagersystems unter Einwirkung realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse. Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager darf unter solchen Bedingungen zu keiner Zeit zu Individualdosen führen, die 0,1 mSv pro Jahr überschreiten. In Ergänzung dazu bezieht sich das Schutzziel 2 auf Vorgänge und Ereignisse, deren Eintreten eine geringe Wahrscheinlichkeit hat. Das unter solchen Bedingungen zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson darf zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen. Schliesslich verlangt das Schutzziel 3, dass nach dem Verschluss des Endlagers keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein dürfen. Damit wird verlangt, dass keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen künftigen Generationen auferlegt werden.

Für jeden Bewilligungsschritt muss der Projektant anhand einer Sicherheitsanalyse darlegen, dass die oben beschriebenen Schutzziele für die Langzeitsicherheit erreicht werden. Dieser Nachweis beruht auf einer Modellierung zum Voraussagen des Endlagerverhaltens. Die zum Zeitpunkt des Rahmenbewilligungsgesuches verfügbaren Daten und Kenntnisse über das Endlagersystem beruhen weitgehend noch auf Extrapolationen und wohlbegründeten Annahmen. In diesem Sinne erlauben sie noch keinen abschliessenden Sicherheitsnachweis. Es muss Zuversicht bestehen, dass die noch vorhandenen Ungewissheiten die positiven Ergebnisse nicht grundsätzlich in Frage stellen.

9.2 Sicherheitskonzept und Nachweismethode

Die wichtigsten Elemente des Konzeptes für die Langzeitsicherheit des Endlagers Wellenberg können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Endlager wird in einer nur langsam veränderlichen geologischen Umgebung erstellt. Die Mächtigkeit der Überdeckung schützt das Endlager während langer Zeit vor Oberflächeneinflüssen (Erosion, Auswirkungen von Klimaänderungen, etc.).
- Das Endlager wird in einem sehr gering durchlässigen Gestein erstellt, welches sich durch eine sehr geringe Wasserführung auszeichnet.
- Die grosse Menge an Zementstein in den technischen Barrieren (Verfestigungsmatrix, Container, Verfüllung, Kavernenauskleidung) bewirkt, dass eine bekannte Wasserchemie im Endlager aufrechterhalten bleibt. Diese gewährleistet für die meisten Nuklide gute und langfristig stabile Sorptionsverhältnisse.
- Durch die gute Sorptionskapazität des Verfüllmaterials wird die Konzentration der Radionuklide im Wasser des Endlagers niedrig gehalten. Zusammen mit der nur geringen Durchströmung der Endlagerkavernen kann nur eine geringe Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager in das Wirtgestein stattfinden.
- Der Transport durch das Wirtgestein wird auch durch verschiedene Rückhaltemechanismen (Sorption, Matrixdiffusion) verzögert.
- Das kontaminierte Wasser aus dem Wirtgestein wird in der viel grösseren Grundwasserführung der oberflächennahen Bodenschichten stark verdünnt, bevor es in die Reichweite von Pflanzen, Tieren und Menschen kommt.

In ihrer Wirkung sind diese Elemente voneinander unabhängig. Falls sich das Endlagersystem so verhält, wie der Gesuchsteller es erwartet, sind diese Elemente zum Teil auch redundant. Nach Ansicht der HSK ist das vorgesehene Konzept dazu geeignet, die erforderliche Langzeitsicherheit zu erbringen.

Der Gesuchsteller hat verschiedene Barrieren gegen die Nuklidfreisetzung in der Sicherheitsanalyse bewusst nicht berücksichtigt. Er erwähnt als Beispiele die Verzögerung durch Sorption auf Eisenkorrosionsprodukten in den Kavernen, die Mitfällung (Kopräzipitation), die verzögerte Freisetzung aus den Abfallgebinden selber, den Zerfall während der Wiederaufsättigung nach dem Endlagerverschluss, bevor sich eine Wasserströmung durch das Endlager einstellen kann, sowie die Rückhaltung auf dem über die berücksichtigten 100 m hinausgehenden Teil des Transportwegs in der Geosphäre. Er weist auch auf den Einfluss der unter dem Endlagerniveau vorhandenen Unterdruckzone hin. Die Existenz dieser Unterdruckzone und die beobachtete chemische Zusammensetzung der Formationswässer deutet er als Hinweise auf sehr viel längere Verweilzeiten des Wassers, als in der vorläufigen Hydromodellierung (vgl. Abs. 6.6) errechnet werden.

Die HSK stimmt dem Vorgehen des Gesuchstellers zu, schwer erfassbare Erscheinungen in der Sicherheitsanalyse nicht zu berücksichtigen, sofern diese Erscheinungen eine Verbesserung der Sicherheit bringen. Dies trifft für die oben aufgeführten unberücksichtigten Barrieren zu. Die Nicht-Berücksichtigung der Unterdruckzone und der Beobachtungen, welche auf gegenüber den Modell-ergebnissen viel längere Verweilzeiten des Grundwassers hinweisen, werfen jedoch die Frage nach dem ausreichenden Verständnis des hydrogeologischen Systems auf. Im Kapitel 6 wurde darauf hingewiesen, dass ein verfeinertes Standortmodell, das den Feldbefunden und Bohrergebnissen Rechnung trägt, im Hinblick auf die späteren Bewilligungsschritte noch erarbeitet werden muss.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit beruht auf einer Modellierung des Endlagersystems zur Voraussage seines zeitlichen Verhaltens. Dazu ist ein gutes Verständnis des gesamten Systems, von den Endlagerkavernen bis hin zur Biosphäre, erforderlich. Der Gesuchsteller hat sich das für eine glaubhafte Modellierung notwendige Systemverständnis aus den Ergebnissen der bisher durchgeführten Untersuchungen erworben. Etliche Ungewissheiten sind noch vorhanden. Soweit die Ungewissheiten konzeptueller oder modelltechnischer Art sind, begegnet ihnen der Gesuchsteller durch möglichst umfassende Analyse von denkbaren Varianten oder durch modellmässige Vereinfachungen, welche offensichtlich die Freisetzung überschätzen. Soweit die Ungewissheiten die für die Modellierung benötigten Daten betreffen, untersucht der Gesuchsteller den Einfluss auf die Freisetzung durch Variation der Parameterwerte innerhalb der unsicheren Wertebereiche.

Das generelle Vorgehen des Gesuchstellers bei der Sicherheitsanalyse ist im Einklang mit den Bestimmungen der Richtlinie HSK-R-21 und mit der diesbezüglichen internationalen Gepflogenheit. Als Vergleich können die entsprechenden Analysen z.B. für das schwedische Endlager in Forsmark oder das finnische Endlager in Olkiluoto zitiert werden. Für die umfassende Behandlung von Ungewissheiten werden im Ausland zum Teil auch probabilistische Methoden eingesetzt. Eine vollständigere Untersuchung der Kombinationen von ungewissen Parameterwerten sollte in den späteren Sicherheitsanalysen zu den Bau- und Betriebsbewilligungsgesuchen erfolgen, wenn durch die fortgesetzten Standort- und Nukliduntersuchungen die Bandbreiten der Ungewissheiten schmaler geworden sind.

Die Rechenmodelle, welche in der Sicherheitsanalyse verwendet werden, sind in verschiedener Weise erprobt. Durch Vergleich mit anderen Rechenmodellen oder exakt bekannten Abläufen wurde das korrekte Funktionieren der Modelle verifiziert. Ihre Anwendbarkeit auf reale Aufgabenstellungen konnte insbesondere im Falle des geosphärischen Nuklidtransportmodells durch Teilnahme an internationalen Übungen erfolgreich geprobt werden. Nach Ansicht der HSK ist es jedoch wichtig, eine Bestätigung der standortspezifischen Tauglichkeit der Modellierung zu erhalten. Den entsprechenden Untersuchungen in einem Teststollen oder Felslabor im Wirtgestein kommt deshalb eine für den Sicherheitsnachweis wichtige Rolle zu.

Bei ihrer Überprüfung der Berechnungen verwendete die HSK von den Rechenmodellen des Gesuchstellers unabhängige Modelle.

Ein wichtiger Bestandteil eines jeden Sicherheitsnachweises ist schliesslich die Nachvollziehbarkeit der Argumentation. Dafür ist eine Transparenz in dem Sinne notwendig, dass die Begründung aller wichtigen Modell-Entscheide und die Herkunft aller benützten Parameter klar und systematisch dokumentiert ist. In einigen Fällen hat es sich als schwierig herausgestellt, eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Entscheide (z.B. bezüglich Sorptionsdaten in der Geosphäre) zu erreichen.

9.3 Abfallinventar

Der Gesuchsteller entnimmt die Eigenschaften und Mengen der für die Einlagerung im Endlager Wellenberg vorgesehenen radioaktiven Abfälle der Datenbank MIRA [7] der Nagra. Die Datenbank enthält detaillierte Angaben zu den Abfallgebinden. Diese Angaben sind i.a. Schätzungen aufgrund der heute verfügbaren Informationen, da ein Grossteil der Abfälle noch nicht entstanden ist. Das Gesamtvolumen der Abfälle ist 100'000 m³, wobei für die Planung zusätzlich eine Reserve von 50'000 m³ Volumen vorgesehen wird.

Im MIRA werden für 80 Abfallsorten die Aktivitäten von 171 Radionukliden aufgeführt, wie sie zur Zeit der Entstehung der Gebinde bestehen. Von diesen 80 Abfallsorten sind 73 für die Endlagerung in Wellenberg vorgesehen. Es handelt sich um

- 18 Betriebsabfall- und 16 Reaktorabfallsorten aus dem Betrieb der Kernkraftwerke,
- 16 Stilllegungsabfallsorten aus dem Abbruch der Kernkraftwerke,
- 2 Sorten von schwachaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung,
- 8 Abfallsorten aus dem Bereich Medizin, Industrie und Forschung (MIF) und
- 13 Abfallsorten aus dem Abbruch des PSI-Beschleunigers.

Für die Sicherheitsanalyse wurde die Anzahl der Nuklide durch Weglassen von wegen ihrer Kurzlebigkeit oder geringen Toxizität als unbedeutend eingestuft Nuklide auf 53 reduziert. Die Aktivitäten werden durch Berücksichtigung des Zerfalls und der Entstehung von Tochternukliden auf das angenommene Jahr des Endlagerverschlusses 2053 umgerechnet. Gemäss Gesuchsunterlagen beträgt die totale Aktivität dann ca. 160'000 TBq, wobei rund 1 % der Aktivität Nukliden mit einer Halbwertszeit grösser als 100 Jahre zugeschrieben wird. Der Hauptbeitrag zur Aktivität stammt von aktiviertem Nickel als Bestandteil von Stahl aus dem Abbruch der Kernkraftwerke.

Die HSK hat die Reduktion der Anzahl der zu betrachtenden Radionuklide überprüft und als zulässig befunden. Bei den weiteren Sicherheitsanalysen sollte allerdings Ar-42 mitberücksichtigt werden. Die Auswahl der betrachteten Radionuklide beruht auf einer vereinfachten Freisetzungsrechnung und ist dadurch von den Annahmen über die hydrodynamischen und geochemischen Verhältnisse abhängig. Sie muss deshalb bei diesbezüglichen neuen Erkenntnissen überprüft werden. Die vom Gesuchsteller angegebenen Aktivitäten der Radionuklide wurden stichprobenweise überprüft und in Ordnung befunden. Die totale Aktivität entspricht dem angenommenen Volumen der Abfälle. Der Einbezug der Volumen-Reserve von 50'000 m³ könnte eine Erhöhung der Aktivität um ca. 30 % bewirken.

Der Gesuchsteller teilt die Abfallsorten in die vier Gruppen SMA-1 bis 4 ein, die sich durch den Gehalt der Gebinde an komplexbildenden Stoffen unterscheiden. Dies wird im Hinblick auf die chemische Rückhaltung der Radionuklide im Endlager und in der Geosphäre getan, welche durch die Komplexbildung nachteilig beeinflusst wird. Die Abfallgruppen sollen voneinander getrennt gelagert werden. Der Gesuchsteller legt Kriterien fest, anhand welcher über die Gruppenzugehörigkeit der Abfalltypen entschieden wird. Insbesondere müssen die Konzentrationen gewisser organischer Stoffe im Zementporenwasser vorgegebene Werte unterschreiten. Zur Bestimmung der Porenwassermenge wird nicht nur das im Gebinde selber vorhandene Matrix- und Verfüllmaterial berücksichtigt, sondern auch anteilmässig ein zugehöriger Teil der Kavernen- und Containerverfüllung, sowie der Lagercontainerwand.

Die HSK begrüsst die getrennte Lagerung von Abfällen, welche sonst durch ihre Bestandteile die Rückhaltung der Radionuklide anderer Abfälle reduzieren könnten. Sie hat die Einteilung der Abfallgebäude in die vier Gruppen SMA-1 bis 4 überprüft und ist nicht überall auf Übereinstimmung mit dem Gesuchsteller gestossen. Insbesondere erachtet es die HSK nicht als zulässig, das grosse Zementsteinvolumen in der Kavernenkalotte bei der Beurteilung der Komplexierung als über den gesamten Kavernenquerschnitt verteilt zu betrachten. Bei der Einteilung der HSK ergeben sich gegenüber jener des Gesuchstellers Verschiebungen einzelner Abfallsorten in jeweils die nächst ungünstigere Gruppe:

- verfestigte Filterkerzen von KKB (BA-KKB-3) in SMA-2,
- tritium-haltige MIF-Abfälle (MIF-2) in SMA-3,
- alpha-haltige Forschungsabfälle (MIF-5A) in SMA-4.

Die Überprüfung der Sicherheitsanalyse zeigt andererseits, dass eine Flexibilität bezüglich der Einteilung der Abfallgebäude zu den Gruppen besteht, und insbesondere die Gruppen SMA-1 bis 3 teilweise oder ganz zusammenfasst werden könnten. Auch durch die Verschiebung des Abfalltyps MIF-5A in die Gruppe SMA-4 werden die in der Sicherheitsanalyse errechneten maximalen Dosen nur unwesentlich erhöht.

In der Datenbank MIRA werden die verglasten Abfallsorten aus der geplanten Plasma-Verbrennungsanlage der ZWILAG in Würenlingen noch nicht berücksichtigt. Sie kommen deshalb in der Sicherheitsanalyse auch nicht vor. Die Rohabfälle, die später dem Plasmaofen zugeführt werden sollen, wurden in der Sicherheitsanalyse in einer anderen Form, insbesondere als zementierte Asche, berücksichtigt. Durch die Änderung der Art der Verfestigung der Verbrennungsrückstände von Zementieren auf Verglasen werden eher Vorteile als Nachteile für die Endlagerung erwartet. Die totale Aktivität nimmt nicht zu.

In MIRA sind einige Abfallsorten erwähnt, deren Eignung für die Lagerung im Endlager Wellenberg noch zu prüfen wäre. Das betrifft insbesondere Neutronenquellen aus dem Bereich der Kernkraftwerke und ausgediente Targets der SINQ-Anlage des PSI.

9.4 Szenarienanalyse

Die verschiedenen Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung des Endlagers werden in der Szenarienanalyse untersucht. Szenarien sind angenommene Kombinationen von Gegebenheiten, Ereignissen und Vorgängen, welche das Endlagersystem in seiner Entwicklung beeinflussen. Durch die Auswahl und die Untersuchung der einzelnen Szenarien soll ein Überblick über die möglichen Entwicklungen des Endlagers erarbeitet werden, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die wirkliche Entwicklung einschliesst. Anschliessend werden die radiologischen Konsequenzen bei den ausgewählten Szenarien ermittelt.

Der Gesuchsteller beschreibt die möglichen Entwicklungen des Endlagersystems Wellenberg mit einem Referenzszenarium, alternativen Szenarien und einem sogenannten robusten Ansatz. Das Referenzszenarium berücksichtigt die als mutmasslich angenommenen Freisetzungsvorgänge; es ist aufgeteilt in einen Referenz-Modellansatz und alternative Modellansätze. Ungewissheiten bezüglich der Vorgänge und der Eigenschaften der Bestandteile des Endlagersystems (technische Barrieren, Geosphäre, Biosphäre) werden durch die Wahl ungünstiger Parameterwerte sowie durch Parametervariationen berücksichtigt.

Referenzszenarium

Im Referenzszenarium werden die Radionuklide im Tiefenwasser, das durch das Endlager fliesst, gelöst und durch die geologischen Schichten bis in das oberflächennahe Grundwasser transportiert. Von hier aus werden die verschiedenen Pfade betrachtet, worauf die Radionuklide über Nahrungsmittel zu einer Strahlenexposition von Menschen führen können. Verschiedene Effekte, wie Gasfreisetzung oder die Bindung von Radionukliden auf Kolloidpartikeln, die später diskutiert werden (vgl. Abs. 9.5 und 9.6), können die Transportvorgänge beeinflussen. Im Referenz-Modellansatz wird speziell der von solchen Effekten unberührte, einfache Transportvorgang betrachtet.

Referenz-Modellansatz

Der Referenz-Modellansatz besteht aus einer Modellkette, welche den Transport der in Lösung vorhandenen Radionuklide durch das im Wirtgestein fliessende Tiefenwasser bis in den Grundwasser-aquifer des Engelberger Tals beschreibt, und einem Biosphärenmodell für das entsprechende Gebiet. Dabei werden vom Gesuchsteller folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die Endlagerkavernen sind sofort nach Endlagerverschluss mit Wasser aufgesättigt.
- Die Radionuklide sind (mit einer Ausnahme) sofort im Porenwasser der Endlagercontainer für die Freisetzung verfügbar.
- Die Sorption der Radionuklide auf den organischen Matrixmaterialien und auf dem Zuschlagstoff des Verfüllzements der Container und der Kaverne ist gleich stark wie auf dem Zementstein selber.

- Das gesamte Radionuklidinventar einer Abfallgruppe SMA-1, 2, 3 oder 4 ist jeweils auf die Container der betreffenden Kavernen gleichmässig verteilt.
- Es tritt keine bedeutende freie Gasphase auf, weder im Endlager noch im Wirtgestein.
- Es findet keine Verzögerung des Nuklidtransports durch Kopräzipitation auf feste Phasen statt.
- Die Sorption der Radionuklide auf Kolloiden hat keine Änderung der Transportgeschwindigkeit zur Folge.
- Die Beeinflussung des Wirtgesteins durch das Zementporenwasser aus den Endlagerkavernen (hoher pH-Wert) ist ohne Einfluss auf die Transportvorgänge.
- Die freigesetzten Radionuklide werden mit dem Tiefenwasser advektiv und dispersiv durch 100 m des Wirtgesteins transportiert. Der Wasserfluss findet in kataklastischen Störungszonen statt. Nach diesen ersten 100 m des Wirtgesteins bis zum Eintritt in den oberflächennahen Aquifer ereignet sich keine Verzögerung des Nuklidtransports.
- Es tritt keine Verlängerung des Freisetzungspfades wegen der unter dem Endlagerniveau vorhandenen Unterdruckzone auf.
- Die Eigenschaften des Gesteins bleiben während der betrachteten Freisetzungszeit unverändert; insbesondere finden keine Änderungen der Wasserführung der ersten 100 m des Wirtgesteins statt.
- Die betroffene Bevölkerung am betrachteten Exfiltrationsort ist bezüglich Nahrungsmittel Selbstversorger.

Alternative Modellansätze

Die alternativen Modellansätze beschreiben entweder Vorgänge, welche zur wahrscheinlichen Entwicklung des Endlagers gehören, aber nicht im Referenz-Modellansatz berücksichtigt sind, oder plausible Alternativen zu den Annahmen des Referenz-Modellansatzes. Zur ersten Gruppe gehören der Transport auf Kolloiden im Endlager und in der Geosphäre, sowie die Vorgänge infolge Gasfreisetzung mit Druckaufbau im Endlager. Zur zweiten Gruppe gehören folgende alternative Annahmen:

- Entwässerung des Endlagers in die Rutschmasse Altsellen oder in die Hanglage im Tal des Secklisbachs,
- Nuklidtransport in der Geosphäre in Kalkbankabfolgen mit geringerer Rückhaltung,
- Erhöhung der Durchlässigkeit des Wirtgesteins infolge Erosionsvorgänge,
- reduziertes Wasserangebot in der Biosphäre infolge eines trockenen Klimas,
- alternative Annahmen bezüglich der chemischen Eigenschaften einzelner MIF-Abfallsorten.

Alternative Szenarien

Die alternativen Szenarien werden vom Gesuchsteller als nicht erwartet, aber nicht vollständig auszuschliessend, charakterisiert. Sie betreffen meist einen grundsätzlich anderen Freisetzungsvorgang als das Referenzszenarium. Es geht hier um die

- erosive Freilegung des Endlagers, mit anschliessender Freisetzung des verbleibenden Endlagerinhaltes durch die weitergehende Erosion,
- Freisetzung flüchtiger Nuklide in der Gasphase bis in die Biosphäre,
- Freisetzung über den Verbindungsstollen vom Endlager bis in die Biosphäre,
- menschlichen Tätigkeiten, welche zu direkter Freisetzung von Radionukliden führen, oder zumindest die Freisetzungsvorgänge stark beeinflussen.

Robuster Ansatz

Der robuste Ansatz bezweckt schliesslich die Abgrenzung der möglichen Folgen aus Gegebenheiten, welche im Referenzszenarium die Rückhaltung der Nuklide in der Geosphäre reduzieren könnten (Kolloidtransport, Einfluss des Zementporenwassers auf die Fliesswege, Komplexbildung, etc.). Es wird hierbei gedanklich angenommen, dass die Kontamination nach der Freisetzung aus den Endlagerkavernen unter Überbrückung des Wirtgesteins direkt in den oberflächennahen Aquifer eintritt. Der robuste Ansatz wird auch in Kombination mit der Annahme anderer Exfiltrationsgebiete (Altzellen, Secklisbach) und weiterer Vorgänge (Freisetzung infolge Gasdruck im Endlager) untersucht.

Beurteilung der HSK

Das Vorgehen des Gesuchstellers bezüglich Aufbau und Auswahl der Szenarien entspricht dem internationalen Stand in diesem Gebiet. Um eine Prüfung auf Vollständigkeit zu erreichen, hat die HSK eine unabhängige Analyse durchgeführt. Sie kam zu einer ähnlichen Auswahl von näher zu betrachtenden Szenarien. Insbesondere beschreibt ihrer Ansicht nach das Referenzszenarium des Gesuchstellers die aufgrund der heutigen Kenntnisse wichtigsten Freisetzungsvorgänge. Im Hinblick auf spätere Bewilligungsverfahren bedürfen folgende zusätzliche Szenarien einer Untersuchung:

- Vorkommen einer freien Gasphase neben dem Tiefenwasser im Wirtgestein. Dies kann aufgrund der heutigen Kenntnisse der Hydrogeologie des Wellenbergs nicht ausgeschlossen werden. Eine solche Gegebenheit würde durch das im Endlager selbst produzierte Gas noch verstärkt. Nicht nur beeinflusst das Vorhandensein einer Gasphase die hydrogeologischen Parameter, sondern auch die Rückhaltemechanismen für die Radionuklide, indem Gesteinsoberflächen und Matrixhohlräume für die im Wasser gelösten Radionuklide in reduzierter Masse zugänglich sind.

- Eine nicht erkannte, nahe einer Endlagerkaverne vorbeiziehende wasserführende Struktur. Sie kann die durch die Kaverne fließende Wassermenge beeinflussen, oder, falls kavernenabwärts gelegen, den Transportweg der Nuklide verkürzen.
- Allfällige Fehler oder Unzulänglichkeiten bei Einrichtung und Verfüllung der Kavernen sowie bei der Versiegelung der Stollen, welche die spätere Freisetzung beeinflussen können.
- Weitere Beeinflussungen des Endlagersystems durch zukünftige menschliche Tätigkeiten.

Der Gesuchsteller hat bisher keine Überlegungen zu einem quantitativen Vergleich der Wahrscheinlichkeiten (oder Mutmasslichkeiten) der einzelnen Szenarien vorgelegt. Er verzichtet auch auf einen Vergleich mit dem Risikoschutzziel (Schutzziel 2) der Richtlinie HSK-R-21. Das ist solange unproblematisch, als keine glaubhafte Kombinationen von Vorgängen und Ereignissen vorkommen, die eine Überschreitung der Dosislimite von Schutzziel 1 hervorrufen. In der vorliegenden Sicherheitsanalyse werden in einigen Rechenfällen Strahlendosen ermittelt, welche die Limite erreichen oder überschreiten. Solche Resultate ergeben sich nur bei Kombinationen von pessimistischen Annahmen im Falle von Ungewissheiten. Es wird erwartet, dass solche Fälle durch weitergehende Untersuchungen ausgeschlossen werden können. Für spätere Bewilligungsschritte müssen bei Szenarien, die zu Dosisüberschreitungen führen können, Risikobetrachtungen im Sinne des Schutzzieles 2 der Richtlinie HSK-R-21 vorgenommen werden.

9.5 Verhalten der technischen Barrieren

Technische Barrieren

Die wichtigsten technischen Barrieren, welche die Freisetzung der Radionuklide aus dem Endlager verzögern oder verhindern, sind die Folgenden:

- das Abfallmaterial selber, sowie das Material (Matrix), in dem der Abfall verfestigt ist,
- die Verpackung
- in der Regel ein Endlagercontainer oder ein Einlagerungselement aus Beton, mit porösem Verfüllzement aufgefüllt
- die poröse Zementverfüllung der Endlagerkavernen
- die Zwischenwände und die Auskleidung der Kavernen aus Beton.

Als Matrixmaterial wird meist Zement verwendet, teilweise auch Bitumen und Polystyrol. Die Verpackung besteht meistens aus einem Stahlbehälter (z.B. 200 l Fass). Die ersten zwei Barrieren werden in der Sicherheitsanalyse als Einschluss für die Nuklide nicht beansprucht; dies stellt eine pessimistische Vereinfachung dar. Es wird davon ausgegangen, dass die Nuklide gleich nach Verschluss des Endlagers im Zementporenwasser in den Endlagercontainern für die Freisetzung verfügbar sind. Eine Ausnahme bildet das Nuklid Ag-108m, das als Aktivierungsprodukt in Reaktor-

Steuerstäben vorliegt. Hier wird die Freisetzung aus dem Steuerstab nach Massgabe seiner Korrosionsrate angenommen. Die dabei angesetzte Korrosionsrate liegt nach den heutigen Informationen der HSK auf der konservativen Seite.

Die Wirkung der übrigen drei technischen Barrieren kommt vorwiegend durch ihre chemischen oder physikalischen Reaktionen (Sorption) mit den im Wasser vorhandenen Radionukliden zustande. Die Sorption auf festen Oberflächen reduziert die Konzentration der Nuklide im Wasser und damit auch die mit dem Wasser mitgeführte Nuklidmenge. Die Sorption ist stark nuklidabhängig. So ergeben sich für gewisse Radionuklide Durchbruchzeiten durch die Kavernenwand und -verfüllung von Jahrtausenden, während andere Radionuklide bereits nach wenigen Jahrzehnten die äussere Umgebung der Kaverne erreicht haben.

Wasserfluss

Der Wasserfluss durch die Kavernen wird durch die hydrogeologischen Eigenschaften des Wirtgesteins einschliesslich der durch den Kavernenbau verursachten Veränderungen bestimmt. Diesbezüglich bestehen noch Ungewissheiten (vgl. Abs. 6.7). Insbesondere ist der Wasserfluss von der Orientierung der Kavernen relativ zur generellen Wasserfliessrichtung im Wirtgestein abhängig.

Aus heutiger Sicht steht eine Anordnung der Kavernen im Vordergrund, wo die Kavernenachse ungefähr in der Strömungsrichtung des Wassers liegt (vgl. Abs. 6.6). Der Gesuchsteller hat diesen Fall zwar auch untersucht, hat aber die Sicherheitsanalyse auf einem Modell der quer angeströmten Kavernen aufgebaut. Ein Vergleich seiner Resultate zeigt, dass die Freisetzung aus der Kaverne bei Längsanströmung um einen Faktor 5-10 höher ist als bei Queranströmung. Die Überprüfung der Fliessfelder durch die HSK bestätigt den höheren Durchfluss im Falle der Längsströmung. Die Sicherheitsanalysen im Zusammenhang mit den späteren Bewilligungsverfahren müssen auf die effektiv zu erwartende Situation Bezug nehmen.

Der Gesuchsteller berechnet die Freisetzung aus einer quer angeströmten Kaverne mit einem besonderen Nahfeldmodell. Dabei wird ein vereinfachter zweidimensionaler Schnitt durch die Kaverne und eine kurze Strecke vom angrenzenden Wirtgestein betrachtet. Der Wasserfluss im Modell wird durch die gewählten Randbedingungen und die Durchlässigkeit der betrachteten Wirtgesteinsstrecke gegeben. Er liegt rund um einen Faktor drei über dem Wasserfluss im ungestörten Wirtgestein. Der gesamte Wasserfluss durch die Kaverne ist praktisch unabhängig von den angenommenen inneren Strukturen der Kaverne.

Die Wasserfliessrate bei der Queranströmung wurde durch unabhängige Modellierung der HSK überprüft. Bei geringer Auflockerung um die Kavernen herum liegt der Faktor 3 auf der konservativen (sicheren) Seite. Je nach den Eigenschaften der Auflockerungszone könnte aber die Drainagewirkung der Kaverne den Faktor 3 auch übersteigen.

Nuklidtransport

Wie bereits besprochen macht der Gesuchsteller zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung gewisse vereinfachende Annahmen. Insbesondere wird konservativerweise angenommen, dass die Radionuklide sofort im Porenwasser der Container für die weitere Freisetzung verfügbar sind.

Die HSK hat für ihre Überprüfung der Freisetzungsberechnungen ein auf denselben Annahmen beruhendes unabhängiges Modell verwendet. Die vom Gesuchsteller errechneten Freisetzungsraten der Radionuklide wurden dabei generell bestätigt.

Der Gesuchsteller hat angenommen, dass die Radionuklide einer Abfallgruppe in den verschiedenen Containern der entsprechenden Kaverne anfangs gleichmässig verteilt seien. Diese Annahme ist nicht in jedem Fall konservativ, könnten doch Gebinde mit höherem Aktivitätsinhalt nahe an der Austrittswand liegen. Die HSK hat die Konsequenzen einer ungleichmässigen Verteilung der Abfälle in der Kaverne anhand der in der Abfallgruppe SMA-4 vertretenen Abfallsorten untersucht. Je nach Platzierung, wurde für die maximale Freisetzungsrates eine Abweichung vom mittleren Wert um knapp eine Grössenordnung errechnet. Angesichts dieser Resultate könnten in der Betriebsbewilligung, falls nötig, Vorschriften über die Einlagerungsplanung erlassen werden.

Sorption

Der Gesuchsteller rechnet mit der Sorption der Radionuklide auf dem im Endlager vorhandenen Zementstein. Zur Vereinfachung nimmt er an, dass das Verfestigungsmaterial in allen Abfallgebinden Zement ist und dass der Zuschlagstoff des Verfüllmörtels in den Endlagercontainern und der Kaverne die gleiche Sorptionswirkung hat wie Zementstein. Die Sorptionswirkung beschreibt der Gesuchsteller vereinfachend durch einen einzigen nuklidabhängigen Parameter, die Sorptionskonstante K_d . Die Sorptionskonstante K_d (Gleichgewichts-Verteilungskoeffizient) ist das Verhältnis der Nuklidkonzentration auf der festen Phase (sorbiert) zu jener im Wasser bei thermodynamischem Gleichgewicht. Die vom Gesuchsteller verwendeten Werte der Sorptionskonstanten stammen im allgemeinen aus statischen Laborversuchen (Batchversuchen). Für gewisse Elemente liegen keine oder nur spärliche Sorptionsdaten vor. Die entsprechenden Sorptionskonstanten werden aufgrund chemischer Analogien geschätzt.

Die vereinfachte Beschreibung mit Sorptionskonstanten ist in der Sicherheitsanalyse noch üblich, wenn auch vielerorts, und auch beim Gesuchsteller, Bestrebungen im Gange sind, eine auf genauere Analyse der Sorptionsvorgänge basierende Beschreibung zu erarbeiten. Allgemein ist eine vorsichtige Wahl der Sorptionsparameter geboten, weil

- die Kenntnisse der Sorptionsvorgänge unvollständig sind,
- die Situation im Batchversuch nicht der Situation beim Nuklidtransport im Gestein entspricht,
- die Sorption aber für die Freisetzungsrates wichtig ist.

Die HSK hat die Auswahl der Sorptionskonstanten des Gesuchstellers für Zementstein überprüft. Im Allgemeinen ist sie mit den gewählten Werten einverstanden, wobei sie diese nicht immer als konservativ einstuft. Wesentliche Ausnahmen sieht sie bei anorganischem Kohlenstoff und bei Calcium, wo sie von einer um den Faktor 100, bzw. 25, schwächeren Sorption ausgeht. Dabei wurden die Sorptionskonstanten durch Berechnung des Isotopenaustausches mit der Zementfestphase bestimmt. Die mit den kleineren Sorptionskonstanten errechnete Freisetzung ist für die betroffenen Radionuklide stark erhöht. Dies hat jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Beurteilung der Sicherheit, da der Dosisbeitrag aus anorganischem Kohlenstoff und Calcium in allen Fällen unbedeutend bleibt.

Die Annahme, dass alles Matrixmaterial Zementstein sei, führt möglicherweise zu einer Überschätzung der Sorption im Kaverneninneren. Die Abfallgruppen SMA-1 und 4 umfassen auch Abfallsorten mit Bitumen- oder Polystyrol-Matrix, über deren Verhalten gegenüber Sorption wenig bekannt ist. Nach Beurteilung der HSK bleibt der Einfluss solcher Matrixmaterialien auf die Freisetzung in der Abfallgruppe SMA-1 aufgrund der Mengenverhältnisse klein, vorausgesetzt, dass die entsprechenden Abfallgebinde nicht in einer kleinen Kaverne separat eingelagert werden. Bei der Abfallgruppe SMA-4 ergibt sich für die Sicherheitsanalyse kein Effekt, weil hier keine Sorption berücksichtigt wird.

Die porösen Verfüllmörtel der Kavernen und der Endlagercontainer sind gegenwärtig noch in Entwicklung. Beim Kavernenverfüllmörtel handelt es sich um einen groben Monokorn-Mörtel. Der Gesuchsteller geht in der Sicherheitsanalyse davon aus, dass die Sorption auf dem Monokorn-Zuschlagsstoff gleich stark sei, wie auf dem Zementstein. Der bisher bei Herstellungs- und Handhabungsversuchen erprobte Mörtel hatte allerdings einen aus Quarzkörnern bestehenden Zuschlagsstoff, auf dem die Sorption bedeutend geringer sein dürfte. Mit einem solchen Mörtel verringert sich das Sorptionsvermögen des Kaverneninneren. Nach Schätzung der HSK dürfte sich dabei die errechnete Radionuklidfreisetzung nicht um mehr als einen Faktor zwei erhöhen.

Komplexbildung

Wenn die Radionuklide im Wasser Komplexe bilden, kann ihr Sorptionsverhalten nachteilig beeinflusst werden. Das Angebot an komplexbildenden Substanzen in den Abfallgebinden führte den Gesuchsteller zur Einteilung in die vier getrennten Abfallgruppen SMA-1 bis 4, wobei die Sorptionskonstanten in den einzelnen Gruppen durch unterschiedliche Faktoren reduziert wurden.

Nach Beurteilung der HSK bestehen noch beträchtliche Ungewissheiten in bezug auf den Einfluss der organischen Komplexbildner, insbesondere der Abbauprodukte von zelluloseartigen Materialien, auf das Sorptionsverhalten der Radionuklide. Unter anderem müssen die Ergebnisse der zur Zeit des Rahmenbewilligungsgesuches noch laufenden Untersuchungen bestätigen, dass die Ionenaustauscherharze für die Komplexbildung unbedeutend sind. Angesichts dieser Ungewissheiten, erachtet die HSK die vereinfachenden Reduktionsfaktoren der Sorptionskonstanten bei den Abfallgruppe SMA-2 bis 4 als angebracht. Sie weist aber auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen in diesem Gebiet hin.

Für die am meisten organische Stoffe enthaltende Abfallgruppe SMA-4 nimmt der Gesuchsteller keine Sorption an. Das ist weniger auf die Komplexbildung der Nuklide zurückzuführen als darauf, dass die Reaktionen der organischen Stoffe mit dem Zementstein zu einem stark geänderten chemischen Milieu führen können, wo die Sorptionsvorgänge nur schwer quantifiziert werden können.

Die HSK stimmt dem vorsichtigen Vorgehen des Gesuchstellers in bezug auf die Abfallgruppe SMA-4 zu. Bei den angenommenen chemischen Reaktionen gibt es auch strukturelle Änderungen im Verfüllmaterial (teilweise Auflösung von Zementstein und Ausfällung von Kalzit), die noch nicht detailliert untersucht wurden. Die Erkenntnisse des Gesuchstellers zu der chemischen Entwicklung der Zementverfüllung unter Endlagerbedingungen beruhen auf einem bezüglich der räumlichen Vorgänge stark vereinfachten Modell. Nach Ansicht der HSK dürfen die darauf beruhenden Folgerungen über die Dauer einzelner Entwicklungsphasen nur als erste Orientierung gelten. Hier sind weitere Untersuchungen des Gesuchstellers bereits im Gang.

Kolloide

Der Transport von Radionukliden kann durch Kolloide beeinflusst werden. Kolloide sind kleine Partikel mit Durchmesser zwischen etwa 1 nm und 0,01 mm. Sie können aus chemisch und strukturell oft schlecht definierbaren, meist auch instabilen Vernetzungsprodukten variabler Zusammensetzung bestehen. Ihre Mobilität im Porenwasser ist schwer vorauszusagen. Die Tendenz der Kolloide zur Haftung auf den unbeweglichen Oberflächen wird z.B. durch ihre Oberflächenladung stark beeinflusst. Im Endlagernahfeld können Kolloide aus verschiedenen Quellen stammen, vom Zementstein selber, von den Abfallstoffen, oder auch von Korrosionsprozessen oder anderen chemischen Vorgängen. Über die zu erwartenden Mengen liegen wenige Daten vor. Der Gesuchsteller zitiert Beobachtungen an Zementkolloiden, wobei aber nur relativ grosse Teilchen (> 100 nm) gezählt wurden.

Beobachtungen zeigen, dass die Sorption von Radionukliden auf Kolloiden stärker sein kann als auf der entsprechenden Festphase, entsprechend einer um ein bis zwei Grössenordnungen grösseren Sorptionskonstanten. Der Gesuchsteller nimmt in seinen Untersuchungen zum Kolloidtransport jeweils eine um den Faktor 100 grössere Sorptionskonstante an. Er kommt zur Ansicht, dass der Einfluss der Kolloide auf die Radionuklidfreisetzung klein sei, sofern die Sorption auf den Kolloiden nicht irreversibel sei und die totale Menge der Kolloide nicht wesentlich grösser als jene der im Grössenbereich 100-200 nm beobachteten Zementkolloide sei.

Nach Ansicht der HSK sind bezüglich der Frage des Transportes von Radionukliden auf Kolloiden die heute noch spärlichen Kenntnisse durch weitere Untersuchungen zu vervollständigen und zu untermauern.

Gasfreisetzung

Das Endlager enthält verschiedene Materialien, die im Laufe der Zeit chemisch verändert werden. Dabei können Gase in solchen Mengen produziert werden, dass sie nicht mehr im Porenwasser der Endlagerkavernen gelöst werden können. Die wichtigsten Quellen der Gasproduktion sind die Korrosion der im Endlager vorhandenen Metalle (63'000 t) sowie der Abbau von organischen Stoffen (13'000 t).

Zunächst läuft die Korrosion unter Einbezug des im Wasser gelöstem Sauerstoffes ab, anschliessend setzt die anaerobe Korrosion unter Spaltung von Wasser ein. Dabei wird Wasserstoffgas produziert. Die Produktionsrate im gesamten Endlager wird langfristig (einige Jahrhunderte) auf maximal 20'000 m³ (STP)/a geschätzt (aus Eisenkorrosion). Für kurze Zeit (wenige Jahre) nach dem Verschluss wird eine bis 6 mal höhere Rate errechnet, welche von der schnellen Korrosion von Zink und Aluminium stammt. Gleichzeitig ist als Folge der Degradation von organischen Materialien mit einer möglichen Produktion von je etwa 50'000 m³ (STP)/a von Methan und CO₂ zu rechnen. Das CO₂ wird bereits in der Kaverne in Form von Kalzit ausgefällt, während mit der Freisetzung des Methans in der Gasphase gerechnet werden muss.

Nach Ansicht der HSK sind die angenommenen Korrosionsraten konservativ. Die anfänglich hohe Gasproduktionsrate aus der Korrosion von Leichtmetallen ist vermutlich überschätzt, da je nach Abfallverfestigungsart teilweise mit einer Verlangsamung der Korrosionsprozesse aus kinetischen Gründen zu rechnen ist. Die Produktionsraten von Gasen aus dem Abbau von organischen Stoffen sind weniger gut bekannt. Die Gesamtmengen entsprechen der Annahme, dass die gesamte Menge organischer Stoffe bis hinunter zu den genannten Gasen abgebaut werden. Die durch die Reaktionen des CO₂ verursachten mineralogischen Änderungen der Endlagerverfüllung, insbesondere allfällige Konsequenzen für die Porosität des Verfüllmörtels, wurden von Gesuchsteller nicht betrachtet. Ebenfalls wurde nicht untersucht, ob in der Kaverne der Abfallgruppe SMA-4 nicht auch mit der Freisetzung von CO₂ in der Gasphase zu rechnen ist.

Die Gasproduktion hat zur Folge, dass der Druck im Endlager ansteigt. Sobald der Gasdruck im Endlager den Wasserdruck übersteigt, wird Wasser aus dem Endlager solange herausgepresst, bis sich das Gas einen direkten Weg nach aussen eröffnet hat. Enthält das herausgepresste Wasser Radionuklide, so erfolgt eine erhöhte Freisetzung aus dem Endlager. Die Modellierung dieser Vorgänge erfordert die Berechnung einer nicht-stationären Zweiphasenströmung im Porenvolumen der Kaverne. Die für die Berechnung erforderlichen hydrodynamischen Materialparameter sind nicht gut bekannt. Im Sicherheitsbericht berechnet der Gesuchsteller die Folgen des gasbedingten Ausstosses von kontaminiertem Wasser unter stark vereinfachenden Annahmen über die Mengen und Raten. Die errechneten Freisetzungen sind vergleichbar und teils etwas höher als im Referenzfall.

Nach Ansicht der HSK ist ein vertieftes Studium dieser Vorgänge angezeigt. Dabei ist auf das oben erwähnte Problem der Änderung der Porosität des Verfüllmaterials einzugehen. Die strukturelle Integrität der Kavernenauskleidung könnte durch den Gasausstoss beeinträchtigt werden, was Konsequen-

zen für die Radionuklidfreisetzung aus der Kaverne mit sich ziehen würde. Es ist auch weiter zu untersuchen, zu welchen Konsequenzen die fortgesetzte Freisetzung der inaktiven Gase nach der Bildung eines direkten Gaspfades aus dem Endlager führen kann.

9.6 Verhalten der Geosphäre

Auswahl der betrachteten Nuklide

Der Gesuchsteller hat den Transport der Radionuklide durch die Geosphäre für jede der vier Abfallgruppen SMA-1 bis 4 separat berechnet. Vorab hat er für jede Gruppe eine verhältnismässig kleine Auswahl von massgeblichen Nukliden bestimmt, welche dann in der Berechnung betrachtet wurden. Die Auswahl beruht auf einer vereinfachten Toxizitätsüberlegung anhand der zuvor ermittelten Freisetzung aus den Endlagerkavernen. Die wichtigsten Radionuklide der vier Actinidenketten wurden in jedem Fall berücksichtigt.

Die HSK stimmt dem Auswahlvorgang nicht uneingeschränkt zu, weil der Toxizitätsvergleich vor der geosphärischen Ausbreitung vorgenommen wird. Die unterschiedliche Rückhaltung der Radionuklide auf dem Transportweg durch die Geosphäre, die wegen unterschiedlicher Sorption zu erwarten ist, wird dabei nicht berücksichtigt. Diese unterschiedliche Rückhaltung ändert nicht nur die Verhältnisse der Freisetzungsmaxima, sondern verschiebt auch die Zeitpunkte des Auftretens der Maxima ungleich viel. Es können schwach sorbierende Radionuklide, die in der Kavernennähe durch stärker sorbierende Nuklide dominiert werden, nach dem Transport durch die Geosphäre dominierend werden. Ein Beispiel dafür bildet in der Abfallgruppe SMA-3 das Nuklid Se-79, das vom Gesuchsteller nicht betrachtet wurde, da es bei der Freisetzung aus dem Endlager um mehrere Grössenordnungen durch Sr-90 und Cs-137 dominiert wird. Nach dem Durchgang durch die Geosphäre (Berechnung HSK, Annahmen entsprechend Basisfall des Gesuchstellers) sind die Beiträge der Nuklide Sr-90 und Cs-137 sehr klein und bleiben um Grössenordnungen unter demjenigen vom Se-79, das nun zeitweise die Freisetzung in dieser Abfallgruppe dominiert. Ähnliches trifft auch für Be-10 in der Abfallgruppe SMA-1 zu.

Das Nuklid Ar-42 wurde bereits für die Freisetzung im Nahbereich vom Gesuchsteller nicht selektioniert. Die Berechnungen der HSK zeigen, dass der Dosisbeitrag vom Nuklidpaar Ar-42/K-42 durchaus mit dem Dosisbeitrag von anderen, selektionierten Nukliden vergleichbar ist. Mit der kleineren Sorptionskonstanten der HSK für anorganisches C-14 im Nahfeld, müsste auch dieses Nuklid, der grösseren Freisetzung wegen, bei der Gruppe SMA-1 selektioniert werden.

Die vom Gesuchsteller vorgenommene Nuklidwahl führt zu einer leichten Unterschätzung der Strahldosis aus einzelnen Abfallgruppen vor allem nach kurzer und mittlerer Zeitdauer (bis etwa 10^4 Jahre). Der im Referenzfall stark dominierende Beitrag zur Gesamtdosis von C-14 aus der Gruppe SMA-2 wird jedoch nicht übertroffen. Die vorgenommene Nuklidwahl hat keinen Einfluss auf die spätere, von den Nukliden der Actinidenketten dominierte Dosis.

Sorption

Die Rückhaltung der Radionuklide auf dem Transportweg ist von ihren Sorptionseigenschaften innerhalb der Fliesselemente abhängig. Dort ist das Grundwasser in Berührung mit verschiedenen Mineralien, welche zusammen zu einer mittleren Sorptionswirkung führen. Wie für das Nahfeld wird auch in der Geosphäre die Sorptionswirkung anhand einer nuklidspezifischen Sorptionskonstanten K_d beschrieben.

Die HSK hat die vom Gesuchsteller verwendeten Sorptionskonstanten des Mergels überprüft. In den meisten Fällen stimmt sie der Vorgehensweise des Gesuchstellers bei der Herleitung der Sorptionskonstanten zu. Sie beurteilt allerdings die Sorption einzelner Radionuklide vorsichtiger als der Gesuchsteller. Das betrifft insbesondere die Elemente Ac, Am, Cm, Pa, Ra, Sn, Sr und Zr, für welche die HSK von einer geringeren Sorption ausgeht. Andererseits beurteilt die HSK den angenommene Wert der Sorptionskonstanten von C-14 (ausser für Abfallgruppe SMA-2) als zu konservativ. Die genannten Unterschiede in der Festlegung der Sorptionskonstanten haben keinen Einfluss auf die maximale Dosis im Referenzfall, da das Maximum auf das als nicht sorbierend angenommene C-14 der Abfallgruppe SMA-2 zurückzuführen ist. Eine Änderung des Resultates ist aber bei verschiedenen abweichenden Modellfällen und Szenarien zu verzeichnen, bei welchen die Actiniden der Abfallgruppe SMA-4 dosisbestimmend sind.

Komplexbildner

Wenn komplexbildende Stoffe vorhanden sind, ist im allgemeinen mit einer Reduktion der Sorption zu rechnen. Komplexbildner werden mit den Abfällen in das Endlager gebracht und mit den Radionukliden auch aus den Kavernen in das Wirtgestein freigesetzt. Der Gesuchsteller hat deshalb, ähnlich wie im Nahfeld, für die Abfallgruppen SMA-2 bis 4 eine Reduktion der Sorption in der Geosphäre angenommen. Für die Actiniden, die Übergangsmetalle, Zinn und Blei beträgt die Reduktion einen Faktor 100. Für die Abfallgruppe SMA-1, die keine bedeutende Menge an komplexbildenden Stoffen enthält, wird keine Reduktion der Sorption angenommen.

Die vom Gesuchsteller angenommene Reduktion der Sorption für die Abfallgruppen SMA-2 bis 4 wird von der HSK aufgrund der vorliegenden experimentellen Daten als konservativ beurteilt. Hingegen ist nach Ansicht der HSK die Frage nicht abschliessend beantwortet, ob signifikante Mengen an komplexbildenden organischen Stoffen im natürlichen Grundwasser des Mergels bereits vorliegen. Die weitergehende Standortcharakterisierung muss diesbezüglich weitere Auskunft geben.

Kolloide

In der Geosphäre ist ein Transport von Radionukliden durch Sorption auf Kolloidpartikeln, die im Grundwasser mitgeführt werden, möglich. Die Einzelheiten solcher Vorgänge sind noch wenig abgeklärt. Kolloide können ihrer Grösse wegen an Gesteinsoberflächen haften und aus dem Fliessweg

filtriert werden, was den Transport verzögert. Andererseits kann ihre Grösse auch ihre Diffusion in nichtdurchflossene Porenräume hinein verhindern, und so zu einem schnelleren Transport führen. Gestützt auf Beobachtungen der Kolloidkonzentration, welche in Bohrungen am Wellenberg gemacht wurden, und unter Annahme einer reversiblen Sorption auf stabilen Kolloiden sowie eines gleich schnellen Transports von Kolloiden wie von gelösten Radionukliden, hat der Gesuchsteller den möglichen Einfluss des Kolloidtransports im Referenzfall als unbedeutend eingestuft.

Nach Ansicht der HSK ist die Folgerung bei den gemachten Annahmen richtig. Allerdings betreffen die Beobachtungen von Kolloiden am Standort bisher nur zwei Bohrlöcher (SB1 und SB6). Es ist unklar, ob der angetroffene Grundwassertyp den Verhältnissen im Endlagerbereich entspricht und ob die Menge und Eigenschaften der Kolloide repräsentativ sind. Ferner muss noch nachgewiesen werden, dass die Annahme einer reduzierten Sorption für die Abfallgruppen SMA-2 bis 4 hinsichtlich des Transportes von Radionukliden mit Kolloiden konservativ ist. Weitere Abklärungen sind deshalb notwendig. Die Sorption auf den Kolloiden und die Konsequenzen der Instabilität der Kolloide sollen weiter untersucht werden.

Kalkbankabfolgen

Wenn der Freisetzungsweg durch Kalkbankabfolgen hindurch führt, weicht die Rückhaltung der Nuklide vom Referenzfall ab. Der Gesuchsteller betrachtet als alternativen Modellansatz den Fall, dass der Freisetzungsweg zu 80 % durch Abfolgen von Kalkgestein führt, für welches er kein Rückhaltungsvermögen annimmt. Modellmässig wird dabei der Transportweg durch gutes Wirtgestein von 100 m auf 20 m herabgesetzt. Der Einfluss auf die Freisetzung aus der Geosphäre ist nur für die Radionuklide von Bedeutung, deren Halbwertszeit von gleicher Grössenordnung ist, wie ihre Transportzeit. Dies trifft zu für Radionuklide wie Ni-59 (ausser SMA-1), Np-237 (in SMA-1) und C-14 (ausser SMA-2).

Die HSK erachtet das Vorgehen des Gesuchstellers bezüglich der Ermittlung des möglichen Einflusses allfälliger Kalkbankabfolgen als vorsichtig. Kürzere effektive Transportstrecken in gutem Wirtgestein sind nach Ansicht der HSK nicht anzunehmen, da ausgedehnte Kalkbänke während der Exploration Untertage kaum unerkannt blieben. Die Annahme gänzlich fehlender Sorption im Kalkgestein ist zudem pessimistisch.

pH-Fahne

Das Wasser, das aus den Kavernen heraustritt, entspricht in seiner chemischen Zusammensetzung nicht mehr dem Wirtgesteinwasser, sondern vielmehr dem Zementporenwasser des Endlagers. Neben den radioaktiven Nukliden enthält es reichlich andere chemische Bestandteile, die ihm einen hohen pH-Wert geben. Diese Inhaltsstoffe des Zementwassers reagieren chemisch mit den Mineralien auf dem Fliessweg und bewirken Änderungen, sowohl der Fliessweggeometrie wie auch der mineralogischen Zusammensetzung. Beide Effekte beeinflussen die Rückhaltung der Radionuklide.

Der Gesuchsteller nimmt an, dass die Rückhalteeigenschaften des Wirtgesteins durch die pH-Fahne nicht verschlechtert werden. Nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse ist diese Annahme nach Ansicht der HSK mit grosser Ungewissheit verbunden. Der Gesuchsteller setzt seine Untersuchungen dieser Vorgänge fort. Es ist deshalb zu erwarten, dass bei den weiteren Bewilligungsstufen eine detailliertere Beurteilung möglich sein wird.

Gasphase

Die allfällige Präsenz einer freien Gasphase im Wirtgestein hat einen Einfluss auf das Rückhaltevermögen in den Fliesselementen. Wenn auf dem Fliessweg Gas vorhanden ist, muss mit einer reduzierten Zugänglichkeit für die Nuklide zu den Gesteinsoberflächen und deshalb mit einer schwächeren Sorption gerechnet werden. Diese Problematik wurde vom Gesuchsteller bisher nicht behandelt.

Robuster Ansatz

Die verschiedenen oben genannten offenen Fragen bezüglich den Vorgängen, die das Rückhaltevermögen des Wirtgesteins beeinflussen, führten den Gesuchsteller dazu, einen sogenannten robusten Ansatz als Extremfall zu definieren. Dabei wird von jeglicher Verzögerung des Radionuklidtransports in der Geosphäre abgesehen; gedanklich erfolgt die Freisetzung aus der unmittelbaren Endlagerumgebung direkt in die Biosphäre. Die Bedeutung dieses sehr pessimistischen Ansatzes wird im Laufe der weiteren Untersuchungen in dem Masse abnehmen, wie die zurzeit noch anstehenden Fragen beantwortet werden.

Langzeitige Entwicklung

Im Laufe der Zeit verringert sich die Überdeckung nach und nach durch Erosion. Gleichzeitig muss mit einer Zunahme der Durchlässigkeit des Wirtgesteins gerechnet werden. Die Modellierung des Nuklidtransports mit zeitabhängigen hydrogeologischen Parametern ist heute noch nicht Stand der Technik. Der Gesuchsteller berechnet den Nuklidtransport mit unveränderten Parametern während 50'000 Jahre, wonach er für die folgende Zeit mit einer 100-fach erhöhten Durchlässigkeit rechnet. Von demselben Zeitpunkt an berücksichtigt er die Rückhaltung der Nuklide in der Geosphäre nicht mehr. Der genannte Zeitpunkt entspricht der frühesten Zeit, wo die Überdeckung des Endlagers aufgrund der Erosion weniger als 200 m betragen könnte.

Die Resultate dieser Berechnungen gelten lediglich als erste Orientierung. Für zuverlässigere Aussagen muss eine feinere Abstufung der zeitlichen Änderung der mittleren Durchlässigkeit berücksichtigt werden. Auch muss die Frage von Änderungen der einzelnen Fliesselemente und ihres Rückhaltungspotentials dabei angesprochen werden. Die späteren Sicherheitsanalysen sollen diesbezüglich verfeinert werden.

9.7 Potentielle Strahlenexpositionen

Modellierung der Biosphäre

Der Gesuchsteller modelliert den Nuklidtransport in der Biosphäre als Übergänge zwischen fünf Kompartimenten. Die fünf Kompartimente der Biosphäre sind die Bodenunterschicht, die Bodenoberschicht, das Sediment (Flussbett), der lokale Aquifer und das Oberflächenfließwasser. Die Eigenschaften dieser Kompartimente hängen von dem aus den Resultaten der hydrogeologischen Modellierung ermittelten Exfiltrationsgebiet ab. Innerhalb jedes Kompartimentes werden die Nuklide als sofort gleichmässig verteilt angenommen. Zwischen den Kompartimenten sind Transferraten sowohl für das Wasser wie auch für die Festphasen definiert. Sorptionsvorgänge werden berücksichtigt.

Die Modellierung der Vorgänge in der Biosphäre mit einem Kompartimentmodell ist wesentlich gröber als die Modellierung der Transportvorgänge im Endlager und in der Geosphäre. Sie entspricht aber dem heute üblichen Vorgehen. Ein offensichtlicher Nachteil ist die geringe räumliche Auflösung, die wegen der Grösse der Kompartimente besteht. Eine Verfeinerung ist jedoch nur dann angezeigt, wenn der tatsächliche Exfiltrationspunkt genau bezeichnet werden kann. Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Eigenschaften der Biosphäre stärkeren zeitlichen Veränderungen unterworfen sind, als es für die tiefere Geosphäre zu erwarten ist. Ihr zukünftiges Aussehen ist somit ungewisser. Aus diesen Gründen wird die Art der Biosphärenmodellierung von der HSK als hinreichend eingestuft.

Die HSK hat das Biosphärenmodell des Gesuchstellers nicht detailliert überprüft. Sie behält sich vor, das im Rahmen der späteren Bewilligungsverfahren zu tun. Für ihre Kontrollrechnungen hat die HSK die Modellierung der Biosphäre durch ein vereinfachtes Modell einer Trinkwasserentnahme aus dem lokalen Grundwasseraquifer ersetzt. Es ist aus den Resultaten des Gesuchstellers ersichtlich, dass damit für die meisten Radionuklide eine gute Schätzung der Dosis erhalten wird. Nur für Np-237 wird die über alle Belastungspfade akkumulierte Dosis mit dem vereinfachten Modell etwa um den Faktor vier unterschätzt. An Parametern, welche die Eigenschaften der Biosphäre beschreiben, wird mit dem vereinfachten Modell nur die Wasserführung des lokalen Aquifers verwendet.

Verdünnung

Im Referenzfall findet die Exfiltration des kontaminierten Wassers im lokalen Aquifer des Engelberger Tals statt. Der Gesuchsteller geht von einer mittleren Wasserführung dieses Aquifers von $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ aus. Er untersucht als Parametervariation den Fall, wo die Verdünnung kleiner (Trockenklima) ist als im Referenzfall. Weitere Parametervariationen betreffen die Werte der Sorptionskonstanten im Biosphärenmodell. Als alternative Modellansätze betrachtet der Gesuchsteller auch die Exfiltration in die Rutschmasse Altsellen und in die Hanglage im Tal des Secklisbaches. Die Verdünnung in den lokalen Grundwässern dieser alternativen Exfiltrationsgebiete ist wesentlich kleiner als im Engelberger Tal; die für diese Modellansätze berechneten Dosen sind deshalb höher.

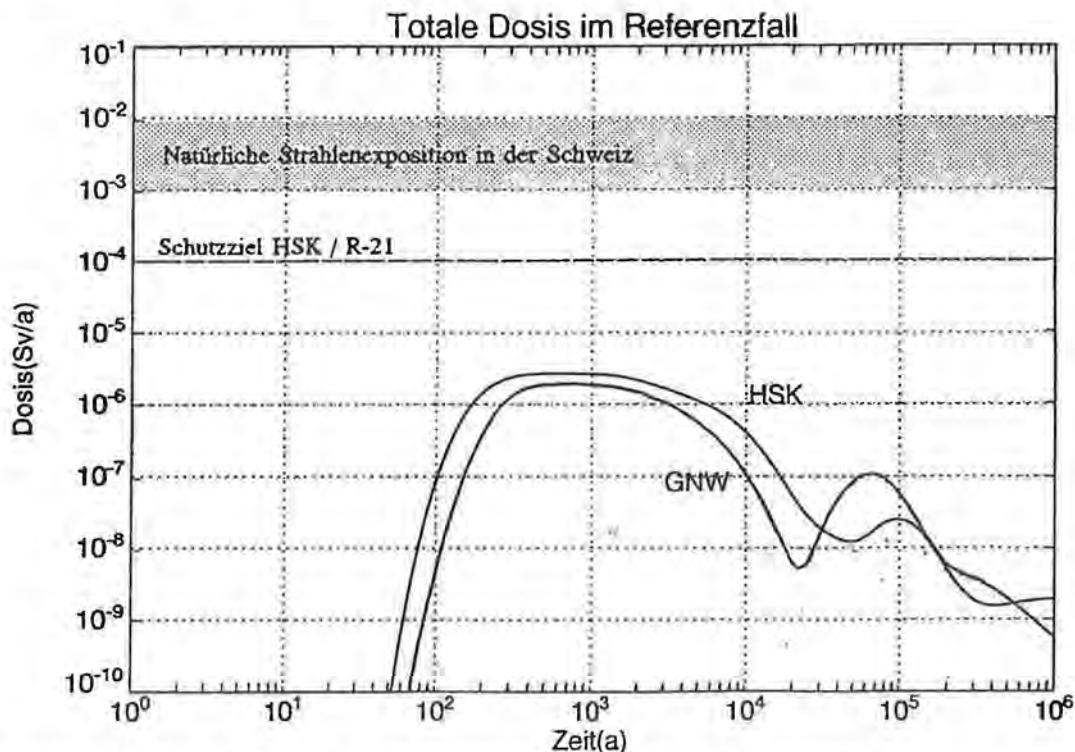
Die HSK stuft die vom Gesuchsteller angenommene Wasserführung des lokalen Aquifers des Engelberger Tals als nicht konservativ ein. In den Gesuchsunterlagen [4] wird für den betreffenden Talabschnitt je nach Pegelstand eine Wasserführung von $0,01$ bis $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ angegeben. In einer dort zitier-

ten Messreihe, welche das Jahr vom Juli 1990 bis Juli 1991 erfasste, wurde ein hoher Grundwasserpegel während insgesamt weniger als 4 Monaten gemessen. Die HSK benützt deshalb in ihren Berechnungen als Jahresmittel den vorsichtiger gewählten Wert von $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Strahlendosis im Referenzfall

Der Gesuchsteller berechnet die Strahlenbelastung des Menschen ausgehend von den Konzentrationen der Radionuklide in der Bodenoberschicht, im lokalen Aquifer und im Oberflächenfließgewässer. Radionuklide werden vom Menschen über Nahrungsmittel und Trinkwasser sowie durch Inhalation aufgenommen. Es wird auch die Direktstrahlung aus kontaminiertem Boden berücksichtigt. Für den Referenzfall errechnet der Gesuchsteller eine maximale jährliche Dosis von $0,0018 \text{ mSv}$, die weniger als 2% der in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegte Limite ausmacht. Diese maximale Dosis wird etwa 400 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreicht und stammt aus dem organisch gebundenen C-14.

Nach ihrer Überprüfung der Berechnungen des Gesuchstellers betreffend Freisetzung aus dem Endlager, Transport durch die Geosphäre und Ausbreitung in der Biosphäre, kann die HSK bestätigen, dass die Resultate des Gesuchstellers in korrekter Weise aus den gemachten Annahmen hergeleitet wurden. In diesem Sinne ist auch die Feststellung des Gesuchstellers nachvollziehbar und korrekt, dass die für den Referenzfall errechnete maximale Individualdosis deutlich unterhalb der behördlichen Limite von $0,1 \text{ mSv/a}$ liegt. Diese Aussage gilt auch, wenn gewisse Parameterwerte konservativer gewählt werden als dies der Gesuchsteller getan hat. Im allgemeinen hat der Gesuchsteller in der Modellierung und in der Parameterwahl Konservativität bewahrt, auch wenn dies nicht durchgehend der Fall ist. Figur 9-1 zeigt den Vergleich der von der HSK bzw. dem Gesuchsteller errechneten Gesamtdosen im Referenzfall.



Figur 9-1: Von HSK bzw. GNW errechnete Gesamtdosis im Referenzfall

Parametervariationen und alternative Modellansätze

Die ausgehend vom Referenzfall vom Gesuchsteller durchgeführten Parametervariationen betreffen hauptsächlich die Durchlässigkeit des Wirtgesteins und die Transmissivität der Fliesselemente. Bei allen betrachteten Variationen bleiben die errechneten Strahlendosen unterhalb der Limite von 0,1 mSv/a. Dazu ist zu bemerken, dass bei einzelnen der Parametervariationen die maximalen Dosiswerte in die Nähe der Limite rücken würden, wenn die Berechnung durchwegs unter Bewahrung der Konservativität erfolgt wäre. Es ist deshalb wichtig, dass insbesondere die geringe Wasserführung des Wirtgesteins durch die weiteren Standortuntersuchungen bestätigt wird.

Die vom Gesuchsteller errechneten Individualdosen für den Fall, dass der Nuklidtransport teilweise durch geklüftete Kalkbänke führt, liegen bei den meisten diesbezüglichen Parametervariationen unterhalb der Dosislimite. Bei durchwegs konservativen Annahmen würden aber die maximalen Dosiswerte bei einigen der angeführten Parametervariationen in die Nähe oder auch leicht über die Limite fallen.

Die Behandlung der durch Gasdruck im Endlager induzierten Freisetzung ist vorläufig schematisch. Da hierbei im Extremfall auch Dosiswerte nahe bei der Limite errechnet werden, ist eine weitere Untersuchung dieser Problematik notwendig.

Die Ergebnisse des Gesuchstellers für den Fall eines beständigen Trockenklimas lassen erwarten, dass die Erhöhung der maximalen Dosis innerhalb einer Grössenordnung bleibt.

Die Annahme, dass das kontaminierte Wasser aus dem Endlager vollständig in die Rutschmasse Altzellen oder in eine Hanglage im Tal des Secklisbaches geleitet wird, führt nach Berechnungen des Gesuchstellers immer zu einer maximalen Dosis im Bereich der Limite. Der Gesuchsteller bemerkt, dass die Limite nicht überschritten wird, falls eine gewisse Sorption des organisch gebundenen C-14 angenommen werden kann. Letzteres ist aber heute noch ungewiss. Neuere, nach der Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuches durchgeführte Modellberechnungen des Gesuchstellers lassen eine Entwässerung in Hanglagen als unwahrscheinlich erscheinen [5]. Nach Ansicht der HSK sollen die Exfiltrationsgebiete durch die weitergehende Standorterkundung mit genügender Sicherheit bestimmt werden können, damit anhand geeigneter Platzierung der Endlagerkavernen im Wirtgesteinskörper eine Entwässerung in die Hanglagen bei der heutigen Topographie vermieden werden kann (Auflage). Allenfalls könnte sich eine Tieferlegung gewisser Kavernen mit problematischen Abfällen empfehlen. Um dies abzuklären, soll untersucht werden, ob eine getrennte Lagerung von Abfällen mit dosisbestimmenden Radionukliden in grösserer Tiefe deutliche Sicherheitsvorteile erbringt (Auflage). Als weitere Massnahme zur Verringerung der potentiellen Strahlenexposition kann auch eine Verstärkung der technischen Barrieren in Erwägung gezogen werden.

9.8 Konsequenzen bei alternativen Szenarien

Die HSK hat in ihrer Überprüfung der Sicherheitsanalyse des Gesuchstellers das Hauptgewicht auf das Referenzszenarium mit Freisetzung und Nuklidtransport über den Grundwasserpfad gelegt. Das

entspricht ihrer Erwartung, dass dadurch die wahrscheinlichsten Varianten der zukünftigen Freisetzungsvorgänge erfasst werden. Die alternativen Szenarien des Gesuchstellers wurden nur in ihren Grundzügen überprüft. Eine vertiefte Diskussion dieser Vorgänge ist im Rahmen der späteren Bewilligungsverfahren vorgesehen. Es folgen hier einige Bemerkungen zu den alternativen Szenarien und zum sogenannten robusten Ansatz des Gesuchstellers.

Freisetzung flüchtiger Nuklide in der Gasphase

Die Freisetzung und der Transport von flüchtigen Radionukliden in der Gasphase wird vom Gesuchsteller anhand einer einfachen Abschätzung untersucht: Es wird eine gleichmässige Freisetzung eines Teils des Inventars von C-14 (als CH₄), I-129 und H-3 (als HT) während 100 Jahren angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Gase im Bereich der Rutschmasse Altszellen an die Oberfläche kommen. Dort werden I-129 und H-3 als im Wasser gelöst betrachtet. Es wird die Dosis aus der Benützung des oberflächennahen Wassers als Trinkwasser und aus anderen Nahrungsmittelpfaden berechnet. Die errechnete Dosis liegt knapp unterhalb der Limite von 0,1 mSv/a.

Das Resultat der Untersuchung hängt empfindlich von diversen ungewissen Annahmen ab. Insbesondere wäre im Falle einer langsameren Freisetzung der Gase die Dosis entsprechend kleiner. Die Einzelheiten des Gastransports bis zur Oberfläche sind nicht bekannt. Die Annahme, dass eine Auflösung der Gase im Grundwasser erst an der Oberfläche stattfindet, ist konservativ. Es wurde andererseits angenommen, dass C-14 nicht im Wasser gelöst wird, weil das Wasser mit nichtaktivem Methan teilweise gesättigt sei. Diese Schlussfolgerung müsste näher begründet werden. Falls C-14 doch ins Wasser übertritt, wäre von dort her mit einem zusätzlichen Dosisbeitrag zu rechnen. Die mögliche Freisetzung von Ar-42, das mit seinem Tochterprodukt K-42 zu einer Strahlenexposition führen kann, wurde nicht betrachtet. Das Szenarium muss daher in den späteren Sicherheitsanalysen eingehender diskutiert werden.

Freisetzung über den Verbindungsstollen

Durch eine sorgfältige Verfüllung und Versiegelung der verschiedenen Stollen soll verhindert werden, dass eine unzulässige Entwässerung der Endlagerkavernen über das Stollensystem geschieht. Der Gesuchsteller betrachtet ein Versagen dieser Versiegelung als alternatives Szenarium. Dabei wird angenommen, dass kontaminiertes Wasser aus den Kavernen über eine Strecke von 200 m durch den Stollen fliesst, wonach das Wasser z.B. über eine grössere wasserführende Störung ins oberflächennahe Grundwasser im Engelberger Tal geleitet wird. Die Durchlässigkeiten vom Verfüllmaterial im Stollen und von der Auflockerungszone werden so angenommen, dass die Strömung gleichmässig im Stollenquerschnitt erfolgt. Auch wenn hier für alle Abfallgruppen eine durch Komplexbildung reduzierte Sorption angenommen wird, ist wegen der homogenen Strömungsverteilung die Rückhaltung im Verfüllmaterial sehr gut. Die im Basisfall dieses Szenariums errechnete Dosis gleicht ungefähr der im Referenzfall (Referenzszenarium) resultierenden Dosis. Parametervariationen bezüglich Wasser-

führung, Stollenlänge und Sorptionsverhalten ergeben höhere Strahlendosen, die aber in den betrachteten Fällen deutlich unterhalb der Dosislimite liegen.

Die Analyse dieses Szenariums könnte von den Erkenntnissen über die Auflockerungszone um den Stollen herum, welche anhand des geplanten Sondierstollens gewonnen werden sollen, beeinflusst werden. Sobald diesbezüglich weitere Erkenntnisse vorliegen, soll die Analyse aufdatiert werden. Die vorgesehene Art der Versiegelung und Resultate entsprechender Hydromodellierungen müssen in die Analyse einfließen.

Menschliche Tätigkeiten

Eine Gesellschaft, welche die technischen Mittel hat, um ein Endlager zu bauen, besitzt auch die Fähigkeit, nachträglich in ein solches Endlager einzudringen. Der Entscheid einer zukünftigen Gesellschaft, bewusst in eine Endlagerzone vorzudringen, gehört allein in die Verantwortlichkeit dieser betreffenden Gesellschaft. Durch Sicherstellen der Information über das Endlager und durch seine Auslegung sollen aber die Folgen eines unbeabsichtigten Eindringens begrenzt bleiben. Ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager wird dabei den anderen alternativen Szenarien der zukünftigen Entwicklung gleichgestellt.

Der Gesuchsteller betrachtet für das Endlager Wellenberg als wahrscheinlichstes Eindringenszenarium das Anbohren des Lagers während einer Exploration für eine unterirdische Deponie. Er nimmt an, dass dabei die Natur des Lagers erkannt wird und dass das Bohrloch so versiegelt wird, dass die Barrierenwirkung der Geosphäre durch den Vorfall nicht signifikant beeinflusst wird. Die potentiellen Auswirkungen sind dann die beim ersten Untersuchen des erbohrten Materials aufgenommenen Strahlendosen, welche eine sehr kleine Personenzahl betreffen. Der Zeitpunkt für das Eindringen wird, wegen der aufbewahrten Information über das Endlager, auf frühestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers angenommen.

Im Verlaufe der späteren Bewilligungsverfahren muss der Gesuchsteller darlegen, wie die langzeitige Archivierung von Informationen über das Endlager möglich ist. Die Analyse der verschiedenen Beeinflussungen der Endlagerbarrieren durch menschliche Tätigkeit muss auch später in mehr Detail dargelegt werden. Die Annahme, dass die Natur des Endlagers bei einem direkten Anbohren erkannt wird, ist wohl plausibel. Dass davon ausgegangen werden kann, dass das Bohrloch genügend gut versiegelt würde, müsste detaillierter, unter Bezugnahme auf übliche Versiegelungsverfahren und auf die hydrogeologische Situation begründet werden. Die Konsequenzen weiterer Szenarien des menschlichen Eindringens, wie z.B. einer Bohrung in die Endlagerumgebung ohne Entdeckung des Endlagers oder der Errichtung einer Deponie im Abflussbereich des Endlagers, sind bei einer späteren Analyse zu diskutieren.

Erosive Freilegung

Die voraussichtliche Fortsetzung der Alpenhebung gegenüber dem Unterland führt dazu, dass die Erosion weiter geht und nach einigen hunderttausend Jahren das Endlager freilegt. In der Folge können die dann noch nicht zerfallenen Radionuklide durch Verwitterungsvorgänge in die tiefer liegenden Regionen verfrachtet und verteilt werden. Der Gesuchsteller hat die Erosionsvorgänge aufgrund verschiedener Klimaszenarien untersucht. Er rechnet insbesondere mit keiner Freilegung des Endlagers früher als in 10^5 Jahren. Für die lokalen Erosionsvorgänge betrachtet er neben der als Basisfall angenommenen flächenhaften Erosion auch andere Varianten (Bacherosion und erhöhten Abtrag). Es wird die Verfrachtung der kontaminierten Feststoffe aus dem Endlager in ein in der Talsohle liegendes Akkumulationsgebiet angenommen, wo die kontaminierten Feststoffe mit nichtaktivem Erosionsmaterial aus anderen Gebieten vermischt und abgelagert werden. Es wird die Strahlenexposition eines Individuums einer hypothetisch angenommenen Wohnbevölkerung berechnet, die auf diesen Ablagerungen mit heutigen Lebensgewohnheiten und Eigenschaften lebt. Die errechnete maximale Dosis ist kleiner als, aber vergleichbar mit der Dosis, die der Gesuchsteller für den Referenzfall erhalten hat. Die Varianten mit Bacherosion führen zu höheren maximalen Strahlendosen, welche aber noch unterhalb der Dosislimite liegen.

Im Standortgebiet kann Erosion bis auf das Endlagerniveau nicht ausgeschlossen werden. Der mutmassliche Zeitpunkt der Freilegung der Lagerkavernen ist zwar später als in der Analyse des Gesuchstellers konservativerweise angenommen. Die totale Aktivität der bis dann noch nicht zerfallenen Nuklide nimmt aber nur langsam ab. Die Erosionsvorgänge interferieren mit verschiedenen anderen langfristigen Vorgängen. Der Gesuchsteller hat solche Wechselwirkungen in einem Fall betrachtet: Als alternativer Modellansatz des Referenzszenariums wurde eine erosionsbedingte erhöhte Durchlässigkeit für den Geosphärentransport angenommen. Weitere Wechselwirkungen sind möglich (z.B. mit der Freisetzung entlang des Stollens oder mit der Exfiltration in einer Hanglage) und sollten untersucht werden. Im Freilegungsszenarium wird angenommen, dass die Radionuklide noch in der Kaverne sind. Die Frage, wann und wieviel Aktivität durch Erosion verfrachtet wird, wenn die ständigen Freisetzungsvorgänge mit dem Grundwasser berücksichtigt werden, ist noch offen.

Robuster Ansatz

Der robuste Ansatz, der den hypothetischen direkten Nuklidtransport aus der Kavernennähe bis in den oberflächennahen Grundwasserstrom beschreibt, soll als Extremfall die Ungewissheiten über die Rückhaltewirkung der Geosphäre bewerten helfen. Im Basisfall des robusten Ansatzes wird die Exfiltration im Engelberger Tal betrachtet. Wenn für die Freisetzung aus den Kavernen und für die Biosphäre die Parameterwerte des Referenzfalles angenommen werden, liegt die errechnete maximale Dosis unterhalb der Limite. Mit konservativeren Annahmen zum Verdünnungspotential des oberflächennahen Aquifers würde die Dosislimite leicht überschritten. Ungünstige Parametervariationen, sowie alternative Annahmen bezüglich Exfiltrationsort oder Nahfeldfreisetzung führen ebenfalls zu leichten Überschreitungen der Dosislimite. Als Extremfall betrachtet der Gesuchsteller den Fall, wo

zusätzlich wegen starker Komplexbildung oder wegen des Transportes mit Kolloiden auch in den Kavernen keine Rückhaltung stattfindet. Für die Exfiltration im Engelberger Tal ist auch dann, bei übrigen Parameterwerten wie im Referenzfall, die Dosislimite nur knapp überschritten. Selbstverständlich können durch Kumulation von ungünstigen Annahmen im robusten Ansatz auch höhere Strahlendosen errechnet werden. Die besonders ungünstige Kombination einer erhöhten Wasserführung in Kavernennähe mit einer Exfiltration in einer Hanglage verursacht nach Berechnung des Gesuchstellers Strahlendosen, welche die Limite um ein mehrfaches überschreiten.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Bestätigung einer geringen Wasserführung des Wirtsgesteins und eine Platzierung der Endlagerkavernen, die bei der heutigen Topographie nicht zu einer Exfiltration in eine Hanglage führt, wichtige Ziele des weiteren Untersuchungsprogramms sein müssen. Es ist auch anzunehmen, dass der im robusten Ansatz postulierte gänzliche Wegfall der Retardierung in der Geosphäre im Laufe der weiteren Untersuchungen als nicht mehr benötigte konservative Annahme wegfallen kann.

10. ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG

Bedarf und Abfallsorten

In der Schweiz wird ein Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle aus Kernkraftwerken sowie aus Medizin, Industrie und Forschung benötigt. Das vorgelegte Projekt ist als einziges Lager für die bereits vorhandenen und im Laufe der nächsten Jahrzehnte entstehenden Abfälle dieser Art vorgesehen. Die beantragte maximale Lagerkapazität von 150'000 m³ beinhaltet eine ausreichende Reserve. Endlagerkavernen sollen jedoch nur nach dem effektiven Bedarf erstellt werden. Das Endlager dient ausschliesslich der Beseitigung von radioaktiven Abfällen mit einem geringen Gesamtinventar an langlebigen Radionukliden. Die genauen Bedingungen für die zur Einlagerung zugelassenen Abfallsorten werden im Rahmen des Verfahrens zur Betriebsbewilligung festgelegt.

Standort

Die HSK hat bereits früher die Wahl des Wellenberges als Standort, der im Hinblick auf die Realisierung eines SMA-Endlagers vertieft erkundet werden soll, als zweckmässig beurteilt. Die geographischen Charakteristiken des Standortes weisen vergleichsweise günstige Eigenschaften auf. Die Nähe des Standortes zur Kantonsstrasse und zur Schmalspur-Eisenbahnlinie Luzern-Stans-Engelberg erleichtert die Erschliessung für Schwertransporte. Die Antransporte der Abfälle sollen so gestaltet werden, dass auf dem Transportweg keine Umladungen von Transportbehältern erforderlich sind.

Geologie und Hydrogeologie

Der Standort Wellenberg liegt in einem geologisch komplexen Gebiet der Alpen. Das geologische und hydrogeologische Bild des Standortgebietes wurde anhand der bisher durchgeführten Sondierungen wesentlich verfeinert. Die bestehenden Kenntnisse weisen auf Standorteigenschaften hin, die eine positive Beurteilung des allfälligen Endlagers ergeben. Es bleiben aber noch etliche Fragen, die im Hinblick auf spätere Bewilligungsschritte durch weitergehende Untersuchungen geklärt werden müssen. Diese betreffen insbesondere

- die Beschaffenheit und Wasserführung der steilstehenden Störungen,
- den Einschluss von Fremdgesteinsschollen im Wirtgestein,
- die hydrogeologische Bedeutung der duktilen Überschiebungszonen,
- das Muster der auslegungsbestimmenden Störungen,
- die wasserführenden Elemente (Geometrie, Häufigkeit, etc.),
- die Ausdehnung von geringdurchlässigem Wirtgestein,
- die Tiefenzonierung der Grundwässer in der Nähe von Störungen,

- das Verständnis der beobachteten Unterdruckzone,
- die Problematik der Gasführung.

Es bestehen gute Aussichten, dass auf diese noch offenen Fragen im Laufe der weitergehenden Standortuntersuchungen günstige Antworten gefunden werden können und dass somit ein aus geologischer und hydrogeologischer Sicht geeigneter Gesteinskörper nachgewiesen wird. Falls dies auf der vorgesehenen Kote nicht gelingt, müsste eine Tieferlegung des Lagers oder von Teilen davon in Erwägung gezogen werden.

Organisation und Personal

Im vorliegenden Gutachten hält die HSK einige generelle Anforderungen an die Projekt-, Betriebs- und Notfallorganisation fest, die im Hinblick auf den nächsten Bewilligungsschritt zu erfüllen sind. Das betrifft insbesondere die Ernennung eines Strahlenschutzsachverständigen und die Einführung eines umfassenden, einer international anerkannten Norm entsprechenden Qualitätssicherungssystems.

Bau, Betrieb und Verschluss

Die genaue Disposition der Kavernenanlage soll erst nach detaillierter Erkundung des Untergrundes festgelegt werden. Die HSK erachtet die bautechnische Machbarkeit des geplanten Endlagers als nachgewiesen. Das Ausbruchsverfahren für die Untertagebauten ist so zu wählen, dass die Auflockerungszone minimiert wird.

Das Betriebskonzept ist nach Ansicht der HSK geeignet, die gesetzten Ziele betreffend den Schutz des Personals und der Umgebung zu erreichen. Ein Programm zur radiologischen Überwachung der Endlagerumgebung soll mindestens zwei Jahre vor Baubeginn in Gang gesetzt werden. Im Verfahren für die nukleare Baubewilligung soll der Gesuchsteller die räumlichen Verhältnissen und Arbeitsabläufe gemäss Strahlenschutzverordnung optimieren. In der Betriebsbewilligung werden ferner die Limiten für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser festgelegt.

Das Endlager ist so geplant, dass es nach Abschluss der Einlagerungstätigkeiten verschlossen werden kann. Ein generelles Konzept zur Verfüllung und Versiegelung der Zugangsstollen ist vorhanden. Konkretisierungen des Konzeptes sind im Hinblick auf die weiteren Bewilligungsverfahren vorzulegen.

Langzeitsicherheit

Das Konzept für die Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Endlagers beruht auf gestaffelten passiven Barrieren. Die HSK stimmt dem Vorgehen des Gesuchstellers zur Analyse der Langzeitsicherheit zu.

Die verwendeten Abfallcharakteristiken entsprechen den besten heute verfügbaren Angaben. Das Konzept der Einteilung der Abfälle in Gruppen aufgrund ihres Gehalts an Stoffen, welche die Mobilität der Nuklide erhöhen können, ist zweckmässig. Die Definition der Gruppen und die Zuteilung der einzelnen Abfallsorten zu den definierten Gruppen soll vom Gesuchsteller überprüft werden.

Das Vorgehen zur Beschreibung der möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems entspricht dem internationalen Stand des Wissens. Im Hinblick auf spätere Bewilligungsschritte bedürfen folgende Szenarien einer zusätzlichen bzw. vertieften Untersuchung:

- freie Gasphase im Wirtgestein
- unerkannte wasserführende Struktur in Kavernennähe
- mangelhafte Verfüllung und Versiegelung von Kavernen und Stollen
- menschliche Eingriffe in das Endlagersystem.

Anhand von unabhängigen Berechnungen der HSK betreffend Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager, Transport durch die Geosphäre und Ausbreitung in der Biosphäre können die vom Gesuchsteller errechneten potentiellen Strahlendosen in ihrer Grössenordnung bestätigt werden. Insbesondere wird die Feststellung des Gesuchstellers nachvollzogen, dass die für den Referenzfall errechnete maximale Individualdosis deutlich unterhalb der Limite von 0,1 mSv pro Jahr liegt. Aufgrund der noch bestehenden Ungewissheiten sind jedoch verschiedene Fälle denkbar, bei welchen die Dosislimite bei Kombinationen von pessimistischen Annahmen erreicht oder überschritten wird. Für spätere Bewilligungsschritte ist zu zeigen, dass solche Fälle entweder ausgeschlossen werden können, oder kein Risiko hervorrufen, das die Limite von einem Millionstel pro Jahr übersteigt.

Die Endlagerkavernen werden in einem Wirtgesteinsgebiet mit geringer Wasserführung errichtet. Eine Exfiltration von Tiefenwässern aus dem Endlager in eine Hanglage der Rutschmasse Altzellen oder des Secklisbachtals muss weitgehend ausgeschlossen werden können. Allenfalls müssten Abfälle, welche dosisbestimmende Radionuklide enthalten, in tieferliegenden Kavernen gelagert oder die technischen Barrieren verstärkt werden. Folgende Problemkreise sind im Hinblick auf spätere Bewilligungsschritte eingehender zu untersuchen:

- Wasserfluss durch die Endlagerkavernen in Abhängigkeit der Anstromrichtung
- Einfluss von Kolloiden im Nah- und Fernfeld
- Auswirkungen eines erhöhten Gasdruckes und eines Gasausstosses aus der Kaverne
- Sorption der einzelnen Radionuklide im Nah- und Fernfeld
- Einfluss von Komplexbildnern im Wirtgestein
- Auswirkungen des alkalischen Zementporenwassers auf die hydraulische Beschaffenheit und die Rückhaltungswirkung des Wirtgesteins
- Nuklidtransport in der Auflockerungszone um den Verbindungsstollen herum
- Zeitabhängigkeit verschiedener Parameter.

Folgerungen

Der Bedarf an einem Endlager für die Abfälle der vorgesehenen Kategorien ist vorhanden. Die heutigen Kenntnisse lassen erwarten, dass ein solches Endlager am Standort Wellenberg unter Gewährleistung des notwendigen Schutzes von Mensch und Umwelt eingerichtet werden kann. Die HSK hat somit keine Einwände gegen die Erteilung der nachgesuchten Rahmenbewilligung; sie empfiehlt, die allfällige Bewilligung mit folgenden Auflagen zu verknüpfen:

Auflagen

- 1) Der Gesuchsteller hat im Hinblick auf das Gesuch um die nukleare Baubewilligung die Sondierungen untertage mit einem Stollen bis ins Endlagergebiet zu ergänzen. Die Resultate der Explorationen vom Stollen aus sollen in diesem Gesuch berücksichtigt werden.
- 2) Die Positionierung der Endlagerkavernen ist so vorzunehmen, dass eine Entwässerung in die Hanglagen weitgehend ausgeschlossen werden kann. Die gewählte Positionierung soll im Gesuch um die nukleare Baubewilligung begründet werden.
- 3) Für die Abfälle, welche dosisbestimmende Radionuklide enthalten (z.B. C-14), ist zu untersuchen, ob eine getrennte Lagerung in grösserer Tiefe deutliche Sicherheitsvorteile erbringt. Die Ergebnisse dieser Studie sollen für das Gesuch um die nukleare Baubewilligung berücksichtigt werden.

Würenlingen, den 31. Mai 1996

HAUPTABTEILUNG
FÜR DIE SICHERHEIT DER KERNANLAGEN

Der Direktor



Dr. S. Prêtre

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

GNW	Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg
HAA	Hochaktive Abfälle
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
KKW	Kernkraftwerk
KSA	Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
MIF	Medizin, Industrie und Forschung
MIRA	Modellhaftes Inventar der radioaktiven Abfälle
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
PSI	Paul Scherrer Institut
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
ZWILAG	Zwischenlager Würenlingen AG

REFERENZEN

- [1] GNW; Gesuch um Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Endlager SMA "Wellenberg" in Wolfenschiessen, NW, Juni 1994
- [2] GNW; Technischer Bericht zum Gesuch um die Rahmenbewilligung für ein Endlager schwach- und mittelaktiver Abfälle am Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen, NW, Technischer Bericht 94-01, Juni 1994
- [3] Nagra; Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg, NTB 94-06, Juni 1994
- [4] Nagra, Emch+Berger, Kurt Neeser; Bericht zu Umwelt und Raumplanung für ein Endlager schwach- und mittelaktiver Abfälle am Wellenberg, Juni 1994
- [5] Nagra; Zwischenbericht über die Untersuchungen 1994/95 am Standort Wellenberg, NTB 96-03, Januar 1996
- [6] HSK, KSA; Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Richtlinie HSK-R-21, November 1993
- [7] Nagra; Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects, NTB 93-21, June 1994
- [8] Nagra; Nukleare Entsorgung Schweiz - Konzept und Realisierungsplan, NTB 92-02, Dezember 1992
- [9] Nagra; Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA), Vergleichende Beurteilung der Standorte Bois de la Glaive, Oberbauenstock, Piz Pian Grand und Wellenberg, NTB 93-02, September 1993
- [10] HSK; Stellungnahme zur Standortwahl für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle, HSK 23/38, Januar 1994
- [11] HSK; Anerkennung von Kursen für Strahlenschutz-Kontrolleure und Chefkontrolleure; Prüfungsordnung, Richtlinie HSK-R-37, Mai 1990
- [12] HSK, KSA; Richtlinien für den überwachten Bereich der Kernanlagen und des Paul Scherrer Institutes, Richtlinie HSK-R-07, Juni 1995

- [13] Nagra; Geologische Grundlagen und Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg, NTB 93-28, September 1993
- [14] Prof. A.G. Milnes, Dr. A.G. Koestler; Zum Aufbau eines struktureologischen Modells für das Wirtgestein am SMA-Endlagerstandort Wellenberg, Expertenbericht, März 1994
- [15] Prof. A.G. Milnes; On the Structural Characterization of the Host Rock at the Wellenberg Site, Expertenbericht, Januar 1993
- [16] KNE; Stellungnahme der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) zur Standortwahl der Nagra (NTB 93-02), Bericht zuhanden der HSK, Januar 1994
- [17] Emch & Berger; Stellungnahme der Arbeitsgruppe Hydrogeologie zum Rahmenbewilligungsgesuch der Nagra für ein Endlager am Wellenberg, August 1995