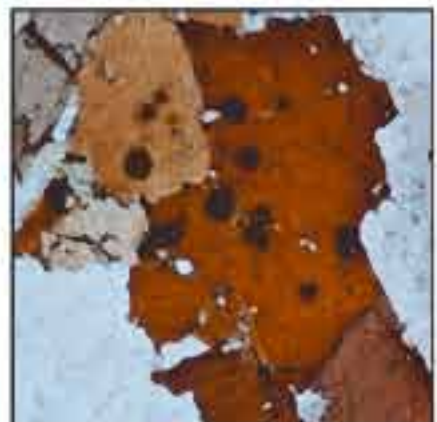
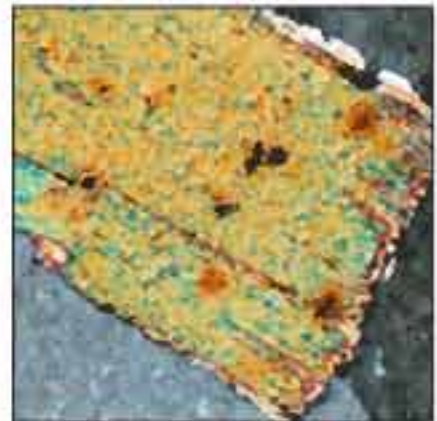


Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA





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 23/73

Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA

Würenlingen, Juli 2004

Titelbild:
Mikrogefüge einer Granit-Gesteinsprobe, Bohrung Böttstein (Tiefe: 650 m).
Aufnahme mit Polarisationsmikroskop NIKON OPTIPHOT
Foto: HSK

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
1.1	Veranlassung	4
1.2	Ziel der Überprüfung und Vorgehen.....	5
1.3	Beurteilungsgrundlagen.....	5
1.4	Gliederung der Stellungnahme	6
2.	Sicherheitsanalyse Kristallin-I	7
2.1	Übersicht	7
2.2	Beurteilung der allgemeinen Aspekte	11
3.	Beurteilung der geologischen Grundlagen	16
3.1	Einleitung	16
3.2	Der geologische Aufbau der Nordschweiz	16
3.3	Entwicklung und Petrogenese des Grundgebirges	19
3.4	Struktureller Aufbau und Störungsmodelle.....	20
3.5	Langzeitentwicklung	23
3.6	Endogene Szenarien	25
3.7	Exogene Szenarien	27
3.8	Zur Frage der Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges	28
3.9	Schlussfolgerungen	30
4.	Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse	32
4.1	Einleitung	32
4.2	Wasserfliesssysteme im kristallinen Grundgebirge	32
4.3	Mineralogie der Wasserfliesssysteme.....	38
4.4	Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsverteilung.....	40
4.5	Grundwasserfliessmodelle.....	44
4.6	Hydrogeologischer Datensatz.....	50
5.	Beurteilung des Abfallinventars	53
5.1	Festlegung des Inventars	53
5.2	Berechnung von Zerfall und Wärmeleistung	54
5.3	Auswahl der Nuklide für die Berechnung der Freisetzung.....	54
5.4	Stabile Nuklide	56
5.5	Selen-Inventar	57

6.	Beurteilung der geochemischen Daten	58
6.1	Einleitung	58
6.2	Wasserzusammensetzung	59
6.3	Löslichkeiten.....	60
6.4	Sorptionsdaten	61
7.	Barrierenwirkung des Endlagersystems.....	66
7.1	Einleitung	66
7.2	Der verglaste Abfall	67
7.3	Der Endlagerbehälter	68
7.4	Die Bentonitbarriere.....	70
7.5	Die geologische Barriere	74
7.6	Die Biosphäre	75
7.7	Das Barrierensystem als Ganzes	76
8.	Szenarienanalyse	79
8.1	Einleitung	79
8.2	Methodik der Szenarienanalyse.....	80
8.3	Technischer Inhalt der Szenarienanalyse	83
8.4	Dokumentation der Szenarienanalyse	85
8.5	Zusammenfassende Beurteilung	85
9.	Radiologische Auswirkungen.....	86
9.1	Einleitung	86
9.2	Freisetzung aus dem Nahfeld	86
9.3	Ausbreitung in der Geosphäre.....	91
9.4	Dosisberechnung.....	94
10.	Zusammenfassung und Folgerungen	98
10.1	Zusammenfassende Beurteilung	98
10.2	Folgerungen	103
11.	Referenzen.....	105
11.1	Nagra-Dokumente	105
11.2	HSK-Dokumente.....	106
11.3	Übrige Literaturstellen	107

1. Einleitung

1.1 Veranlassung

Mit ihrem Sicherheitsbericht Kristallin-I (NTB 93-22) und der umfangreichen erdwissenschaftlichen Referenz-Dokumentation (Geosynthese NTB 93-01), welche 1995 veröffentlicht wurden, hat die Nagra eine gegenüber dem „Projekt Gewähr 1985“ aufdatierte Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase eines geologischen Tiefenlagers für hochaktive Abfälle (HAA) im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz und eine abschliessende Auswertung der Kristallin-Untersuchungen der ersten Phase präsentiert. Mit dieser Berichterstattung verfolgte die Nagra folgende Ziele:

- Neubewertung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz als Wirtgestein für ein HAA-Lager aufgrund der abschliessenden Auswertung der erdwissenschaftlichen Untersuchungen und Dokumentation des erreichten Kenntnisstands.
- Verbessertes Verständnis für das Verhalten der technischen und geologischen Barrieren.
- Evaluation wichtiger geologischer Eigenschaften sowie Bestimmung von akzeptablen Wertebereichen für entsprechende Parameter.
- Prüfung der umfassenden Methoden, Modellsätze und Rechenprogramme auf ihre Anwendbarkeit für die Sicherheitsanalyse.
- Vorschlag für das weitere Vorgehen bei der Standortsuche für die Wirtgesteinsoption Kristallin (Explorationskonzept).

Aufgrund der Interpretation der erfassten geologischen Situation kam die Nagra zum Schluss, dass das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz eine geeignete Umgebung für die sichere Tiefenlagerung der HAA bieten kann. Eine genaue Charakterisierung des Wirtgesteins und der darin enthaltenen wasserführenden Systeme sei aber erforderlich. Die Nagra beschreibt im Explorationskonzept, wie bei einer allfälligen Weiterführung der Untersuchungen im kristallinen Grundgebirge zielgerichtet vorgegangen werden könnte. Ferner werden die Chancen eingeschätzt, ein geeignetes Gebiet im kristallinen Grundgebirge zu finden.

Die Nagra hat nach 1995 weitere Arbeiten zum kristallinen Grundgebirge durchgeführt (Seismik im aargauischen Mettauertal, diverse Studien). Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden veröffentlicht und der HSK zur Verfügung gestellt. Ein Teil dieser Resultate ist auch in die vorliegende Beurteilung eingeflossen.

Die o.g. Berichterstattung der Nagra stand nicht im Zusammenhang mit einem Gesuch; sie ist Bestandteil der vom EVED (heute UVEK) mit Schreiben vom 29. Dezember 1988 geregelten Berichterstattung über die laufenden Arbeiten der Nagra (Ziffern 2.2.3 und 2.2.5). Sie ermöglicht eine umfassende Bewertung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle und einen Vergleich mit der Option Sedimente, für welche der Opalinuston im Zürcher Weinland untersucht wird. Sie stellt somit eine wichtige Grundlage für den Entscheid über das weitere Vorgehen bei der langfristigen Entsorgung der hochaktiven und der langlebigen mittelaktiven Abfälle dar.

1.2 Ziel der Überprüfung und Vorgehen

Aufgabe der HSK war es, die Sicherheitsanalyse Kristallin-I und die ihr zu Grunde liegenden Dokumente der Nagra, insbesondere die Ergebnisse der erdwissenschaftlichen Auswertung der Kristallin-Untersuchungen, einer eingehenden Überprüfung zu unterziehen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung sind in der vorliegenden Stellungnahme dokumentiert und erläutert.

Absicht der HSK war es dabei, die wesentlichen Sicherheitselemente aufgrund ihrer eigenen Interpretation der geologischen Daten und ihrer Bewertung der technischen Barrieren nachzuvollziehen. Dazu hat die HSK gewisse der von der Nagra nach 1995 veröffentlichten Berichte zum Kristallin sowie Erkenntnisse aus Kristallinprogrammen im Ausland in die Überprüfung mit einbezogen. Aus dieser Überprüfung resultieren Hinweise auf eingehender zu untersuchende Fragen für den Fall, dass das Projekt der geologischen Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz weitergeführt wird. Zudem lässt sich die Beurteilung der technischen Barrieren weitgehend auch auf das Projekt der geologischen Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle im Opalinuston übertragen.

Die vorliegende Stellungnahme ist ein technisches Dokument, das sich in erster Linie an die Nagra richtet. In diesem Sinne wurde sie in einer technischen Sprache verfasst, die für die Information der breiten Öffentlichkeit nicht geeignet ist. Die Stellungnahme ist jedoch öffentlich und für jedermann erhältlich.

Die Überprüfung gestaltete sich als ein sehr langer Prozess, der mehrfach unterbrochen wurde. Die Unterbrüche waren durch den Einsatz der begrenzten personellen Ressourcen der HSK für andere prioritäre Aufgaben (insbesondere im Zusammenhang mit dem Wellenberg-Projekt) bedingt. Die vertieften Beurteilungen einzelner wichtiger Aspekte der Sicherheitsanalyse Kristallin-I sowie von erdwissenschaftlichen Grundlagen sind in HSK-internen Berichten dokumentiert. Spezielle Themen wurden zudem im Auftrag der HSK durch externe Experten beurteilt. Die vertieften Beurteilungen liegen z.T. mehr als 6 Jahre zurück. In den ersten Beurteilungen sind deshalb neuere Erkenntnisse in Wissenschaft und Technik noch nicht berücksichtigt. Wo dies relevant ist, wird in der vorliegenden Stellungnahme auf die Auswirkungen solcher neuer Erkenntnisse hingewiesen.

1.3 Beurteilungsgrundlagen

Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I bezieht sich auf die Langzeitsicherheit nach dem Verschluss des Lagers. Die entsprechenden Sicherheitsanforderungen sind in der Richtlinie HSK-R-21 festgehalten. In dieser Richtlinie sind das übergeordnete Ziel der Endlagerung, die dabei zu beachtenden Prinzipien sowie drei konkrete Schutzziele formuliert. Ferner enthält sie eine Reihe von Hinweisen und Erläuterungen zum Nachweis der Langzeitsicherheit. Die Bestimmungen der Richtlinie HSK-R-21 sind die Grundlagen, die zur Beurteilung der Sicherheitsanalyse und der Langzeitsicherheit herangezogen werden. Bei der Beurteilung der geowissenschaftlichen Interpretationen und Datensätze für die Sicherheitsanalyse stützt sich die HSK auf Fachberichte beauftragter externer Experten und auf eigenes Fachwissen ab. Bei der Beurteilung der einzelnen Elemente des vorgelegten Tiefenlagersystems zieht die HSK zudem den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik heran.

Die Konzeption der dauernden Entsorgung der radioaktiven Abfälle hat sich in der Schweiz seit der Veröffentlichung der Sicherheitsanalyse Kristallin-I weiterentwickelt. Im Auftrag des UVEK hat die Expertengruppe „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“ (EKRA) die

verschiedenen Alternativen verglichen und eine Endlagerung mit vorgeschalteter Überwachungsphase und Rückholbarkeit vorgeschlagen. Diese Konzeption der dauernden Entsorgung wird im neuen Kernenergiegesetz (KEG) als geologische Tiefenlagerung gefordert. Mit diesen gesetzlichen Anforderungen wird der Weg zur Endlagerung neu gestaltet; die in der Richtlinie HSK-R-21 formulierten Sicherheitsanforderungen werden dabei aber nicht tangiert. Die Bestimmungen der Richtlinie entsprechen auch heute noch den Anforderungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit, die im internationalen Vergleich an ein Endlager für hochaktive Abfälle gestellt werden.

1.4 Gliederung der Stellungnahme

Im Kapitel 2 wird eine Übersicht über die Sicherheitsanalyse Kristallin-I der Nagra gegeben; auch das Vorgehen der Nagra bei dieser Sicherheitsanalyse wird beurteilt. In den Kapiteln 3 (Geologie) und 4 (Hydrogeologie) werden die erdwissenschaftlichen Grundlagen beschrieben und beurteilt. Es folgen Beschreibung und Beurteilung der wichtigen Elemente der Sicherheitsanalyse: Abfallinventar (Kap. 5), geochemische Daten (Kap. 6), Barrierenwirkung des Tiefenlagersystems (Kap. 7) und Szenarienanalyse (Kap. 8). Die von der Nagra berechneten Radionuklid-Freisetzungen und radiologischen Auswirkungen werden in Kap. 9 mit entsprechenden Resultaten der HSK verglichen und beurteilt. Im abschliessenden Kap. 10 werden die Beurteilungen zusammengefasst und die zielorientierten Folgerungen gezogen.

2. Sicherheitsanalyse Kristallin-I

2.1 Übersicht

Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I untersucht bei einem Endlager für verglaste hochaktive Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nord-Schweiz das Einschluss- und Rückhaltevermögen für die dort eingelagerten Radionuklide. Sie befasst sich ausschliesslich mit der Langzeitsicherheit des Endlagers. Die Sicherheit während der Betriebsphase wird hier nicht untersucht. Die mögliche Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager wird durch den Vergleich mit Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21 bewertet.

System- und Sicherheitskonzepte

Der Sicherheitsanalyse liegen ein System- und ein Sicherheitskonzept zugrunde. Demnach werden die radioaktiven Abfälle in Stollen in ca. 1000 m Tiefe im Kristallin in einem Gesteinsbereich eingelagert, der von geringer Wasserführung und ohne Rohstoffe ist. Der Einschluss und die starke Verzögerung der Freisetzung der Radionuklide werden durch eine Reihe von gestaffelt wirkenden Barrieren, siehe Figur 2.1, sichergestellt:

- Die Radionuklide sind in einer Glasmatrix gebunden, die in einer Stahlflasche (Kokille) eingeschlossen ist.
- Die Kokille ist in einem zugeschweissten, dickwandigen Endlagerbehälter aus Stahlguss verpackt.
- Der Endlagerbehälter ist in der Stollenachse eingelagert und ist von hoch verdichtetem Bentonit umgeben.
- Das Stollensystem liegt mehrere Hundert Meter innerhalb eines von geringer Wasserführung gekennzeichneten Wirtgesteinsblocks (Kristallin). Die Zugänge sind durch Versiegelungen abgedichtet.

Der Wirtgesteinsblock mit dem Stollensystem für die Einlagerung ist mit Grundwasser gesättigt.

Nach Versagen des Endlagerbehälters kann eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Lager und eine anschliessende Ausbreitung in der Geosphäre mit dem Grundwasser stattfinden. Dabei kann aufgrund des radioaktiven Zerfalls nur ein kleiner Anteil von langlebigen Nukliden die Glasmatrix und die Bentonitbarriere wirklich verlassen und davon wiederum nur ein Teil die Geosphäre durchqueren und die Erdoberfläche erreichen. Auf dem Weg zur Erdoberfläche wird das Grundwasser mit dem Wasser in oberflächennahen Aquiferen vermischt, wodurch die Radionuklidkonzentration herabgesetzt wird. Es ist das Ziel des Sicherheitsnachweises aufzuzeigen, dass die geringen Konzentrationen dieser restlichen Radionuklide für Mensch und Umwelt ungefährlich sind.

System der Sicherheitsbarrieren für hochaktive Abfälle

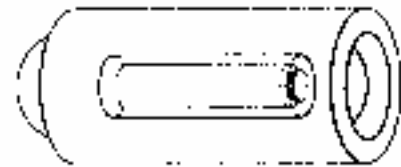
Glasmatrix in Stahlkokille

- ◆ Niedrige Glaskorrosionsrate
- ◆ Hoher Widerstand gegen radiologische Einflüsse
- ◆ Homogene Radionuklidverteilung
- ◆ Korrosionsprodukte nehmen die Radionuklide auf



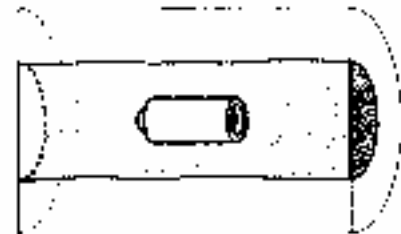
Stahlbehälter

- ◆ Absoluter Abfalleinschluss für > 1000 Jahre
- ◆ Korrosionsprodukte sorgen für günstigen Chemismus
- ◆ Korrosionsprodukte nehmen die Radionuklide auf



Bentonitverfüllung

- ◆ Lange Dauer bis zur Wiedersättigung
- ◆ Niedrige Wasserfließraten (Diffusion)
- ◆ Verzögerung des Nuklidtransports (Sorption)
- ◆ Sorgt für günstigen Chemismus
- ◆ Niedrige Nuklidlöslichkeiten in Porenwasser
- ◆ Hält Kohlenstoff zurück
- ◆ Plastizität (Selbstheilung nach physikalischer Störung)



Geologische Barrieren

Lagerzone:

- ◆ Begrenztes Wasserangebot
- ◆ Günstige Hydrochemie
- ◆ Mechanische Stabilität

Geosphäre:

- ◆ Verzögerung der mit Wasser transportierter Radionuklide (Sorption, Matrixdiffusion)
- ◆ Reduktion der Radionuklidkonzentration (Verdünnung, radioaktiver Zerfall)
- ◆ Schutz der technischen Barrieren (zum Beispiel vor Gletschererosion)



Figur 2.1: Das Barrierensystem (aus NTB 93-09)

Datenbasis

Die Sicherheitsanalyse stützt sich auf eine bereitgestellte Datenbasis. Diese Daten beschreiben die Erkenntnisse und Annahmen über

- das radiologische Inventar der Abfälle: Im Kristallin-I sind es verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen,
- die Eigenschaften der ins Endlager eingebrachten Materialien,
- den Aufbau und die Materialeigenschaften der geologischen Umgebung,
- die Langzeitentwicklung der Geosphäre und des Klimas,
- die Zusammensetzung und Bewegung des Grundwassers,
- die physikalischen und chemischen Vorgänge, welche den Transport der Radionuklide mit dem Grundwasser beeinflussen,
- die Expositionspfade für die auf der Erdoberfläche lebende Bevölkerung,
- zusätzliche Aspekte, welche bei der Bewertung der unvermeidlichen Ungewissheiten eine Rolle spielen, z.B. Erkenntnisse aus der Beobachtung ähnlicher natürlicher Vorgänge (Naturanaloga).

Umgang mit Ungewissheiten

Eine Langzeitsicherheitsanalyse befasst sich notwendigerweise mit Daten und Vorgängen, die unterschiedlich gut bekannt sind. Der Grund für die Ungewissheiten liegt in erster Linie bei den sehr langen Zeiträumen, über die Vorhersagen gemacht werden müssen. Im Fall des kristallinen Untergrunds von Bedeutung ist zudem die beschränkte Möglichkeit, von der Oberfläche her die Struktur der geologischen Umgebung abzuklären. Für den Sicherheitsnachweis ist deshalb der Umgang mit Ungewissheiten von grosser Bedeutung. Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I begegnet Ungewissheiten auf verschiedenen Ebenen:

- Ungewissheiten der Datenbasis werden einerseits durch die sorgfältige Evaluation und Rückverfolgung der Daten bis zu ihren Quellen möglichst klein gehalten, andererseits wird der Einfluss der Ungewissheiten auf die Endlagersicherheit durch die Untersuchung mehrerer möglicher Fälle erforscht (Parametervariationen). Für den Sicherheitsnachweis werden relativ ungünstige (konservative) Parameterwerte ausgewählt.
- Ungewissheiten der zukünftigen Entwicklung des Endlagers und seines Umfelds wird durch die Szenarienanalyse begegnet, wo versucht wird, die glaubhaft erscheinenden Zukunftsvarianten bezüglich ihrer Folgen für die Menschen durch eine beschränkte Anzahl ausgewählter Szenarien abdeckend zu beschreiben.
- Ungewissheiten bezüglich der Abläufe wird durch die Verwendung alternativer Rechenmodelle oder durch eine kontrollierte konservative Vereinfachung der Modelle begegnet.

Szenarienanalyse

Die Szenarienanalyse bedient sich Listen von Erscheinungen, Ereignissen und Vorgängen (features, events and processes, FEPs), die für das Endlagersystem von Bedeutung sein können. Die Szenarien werden unter Einbezug dieser FEPs gebildet und ihr Ablauf und die Glaubhaftigkeit ihres Eintreffens untersucht. Falls bedeutsam, werden die damit verbun-

denen Freisetzungen von Radionukliden mit Rechenmodellen untersucht. Wo aus Gründen der Ungewissheit der Einfluss einzelner FEPs nicht oder nur vergleichsweise ungenau berechnet werden kann, werden diese für spätere Abklärungen vorgemerkt. Die Nagra unterscheidet dabei potentiell ungünstige FEPs ("offene Fragen"), wie beispielsweise das Auftreten von advektivem Durchbruch von Gas durch den Bentonit oder den Einfluss variabler Wasserdichte auf den Wasserfluss in der Geosphäre, und potentiell günstige FEPs ("Reserve-FEPs"), wie beispielsweise die Mitfällung von chemisch ähnlichen Radionukliden im Nahfeld oder die Verringerung der Durchlässigkeit des aufgelockerten Bereichs an der Stollenwand durch den Quelldruck des Bentonits. Die günstige Wirkung der Reserve-FEPs wird in der quantitativen Sicherheitsanalyse nicht weiter berücksichtigt.

Die Szenarienanalyse ist um einen zentralen Basisfall aufgebaut, das Referenzszenarium mit der Verwendung der Referenzmodelle und des Referenzdatensatzes. Dieser Basisfall ist eine mit konservativen Annahmen durchgeführte vereinfachte Extrapolation des heutigen Zustands, ohne besondere Ereignisse und ohne zeitliche Veränderungen der geologischen Umgebung des Endlagers einschliesslich der Erdoberfläche. Die weiteren Szenarien werden vom Basisfall ausgehend durch Parametervariationen unter Beibehaltung der Rechenmodelle, oder durch alternative Modellierungen bis hin zu "alternativen Szenarien" (abweichende Annahmen zum Klima oder zum Freisetzungsweg durch das Wirtgestein, beispielsweise eine Freisetzung entlang der Stollenwand) gebildet. Als extreme Variante wird auch der Fall betrachtet, bei dem die Radionuklide nach dem Austritt aus den Nahfeldbarrieren ohne weitere Verzögerung direkt in einen oberflächennahen Grundwasserstrom eintreten ("Robustes Szenarium").

Für einen Teil dieser Szenarien wird die durch die Freisetzung und den Transport der Radionuklide zur Erdoberfläche verursachte Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung (Personendosen) berechnet und mit dem Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21 verglichen. Andere Szenarien werden herangezogen, um das Verhalten einzelner Barrieren oder die Veränderung der modellmässig erfassten Vorgänge in der Biosphäre (Erdoberfläche und oberflächennahe Grundwasserleiter, Nahrungsmittelkette des Menschen) unter extremen Annahmen aufzuzeigen. Als massgebend für die Berechnung von Personendosen wird immer eine sich aus lokalen landwirtschaftlichen Erzeugnissen ernährende, im Übrigen den heutigen Verhältnissen entsprechende menschliche Lebensform und -weise angenommen.

Sicherheitsbericht

Der Sicherheitsbericht ist entsprechend eingeteilt in

- Einleitung: Hintergrund und Erläuterung des Vorgehens,
- Beschreibung des Endlagersystems und Diskussion der Datengrundlagen, insbesondere betreffend die Eigenschaften der ins Endlager eingebrachten Materialien und die Ergebnisse der Untersuchungen des Wirtgesteins,
- Beschreibung der Szenarienanalyse und der ausgewählten Szenarien,
- Beschreibung der Freisetzungsberechnungen für einzelne Teilsysteme von Barrieren (Nahfeld, Geosphäre, Biosphäre) und Schlussfolgerungen bezüglich der Empfindlichkeit der Ergebnisse auf Ungewissheiten der Parameterwerte (Sensitivitätsbetrachtungen),

- Freisetzungsberechnung für das Gesamtsystem einschliesslich der Berechnung der Personendosis für diejenigen Szenarien, die für den Sicherheitsnachweis ausgewählt wurden,
- Zusammenfassende Begründung des Sicherheitsnachweises.

Der Sicherheitsbericht stützt sich auf eine Reihe weiterer Berichte, welche die konzeptionellen Modelle, die Rechencodes und die verwendeten Daten detaillierter beschreiben und begründen.

Ergebnisse der Sicherheitsanalyse

Die wesentlichen Ergebnisse der Sicherheitsanalyse sind:

- Die berechneten Personendosen sind durchwegs unterhalb des Grenzwertes nach HSK-R-21.
- Die Nahfeldbarrieren tragen wesentlich zur Rückhaltung der Radionuklide bei. Die heute bestehenden Ungewissheiten über die detaillierten Eigenschaften des Wirtgesteins erlauben nicht, die vermutete Rückhaltewirkung der Geosphäre für die Radionuklide im Sicherheitsnachweis voll auszuschöpfen.
- Die verwendeten Methoden und Rechenverfahren sind angemessen, wenn auch Verbesserungsmöglichkeiten gesehen werden.

2.2 Beurteilung der allgemeinen Aspekte

Vorgehen bei der Sicherheitsanalyse

Die Anforderungen an eine Sicherheitsanalyse müssen sich am Ziel und Zweck der Analyse orientieren. Die vorliegende Sicherheitsanalyse ist nicht als Sicherheitsnachweis für ein gegebenes Endlagerprojekt gedacht, sondern dient vorwiegend der Beurteilung des Kristallins als möglichem Wirtgestein. Einerseits werden die voraussichtlichen Anforderungen an das Wirtgestein erkundet, andererseits wird die Bedeutung der nach heutiger Kenntnis erwarteten Eigenschaften des Kristallins für die Sicherheit eines Endlagers aufgezeigt. Das hat zu einer erkennbaren Schwerpunktssetzung geführt, wo die Szenarien mit nur geringer Abweichung vom Referenzfall bevorzugt betrachtet, hingegen andere, vor allem nicht-geologische Vorgänge eher summarisch behandelt werden. Ein Beispiel solcher weniger stark gewichteten Prozesse ist das unbeabsichtigte menschliche Eindringen ins Endlager. In der auf die geologischen Aspekte ausgerichteten Zielsetzung ist auch der Grund für die Festlegung auf ein relativ einfaches Inventar aus verglasten hochaktiven Abfällen zu sehen, sowie die manchmal unkritische Übernahme von Daten oder Ergebnissen über die Nahfeldmaterialien aus der Sicherheitsanalyse des Projektes Gewähr 1985 (z.B. zulässige Bentonitdichte, siehe Abschnitt 7.4). Ziel und Hintergrund der Sicherheitsanalyse werden aber am Anfang des Sicherheitsberichtes klar dargelegt.

Eine besondere Herausforderung bei der Analyse der Langzeitsicherheit für Endlager besteht darin, dass das Materialverhalten während enormer Zeitspannen vorausgesagt werden muss. Unter diesen Umständen ist ein hoher Grad an Ungewissheit unvermeidlich, sowohl bezüglich zukünftig eintretender Ereignisse wie auch bezüglich der zeitlichen Entwicklung, die zudem von einem nicht genau bekannten Anfangszustand ausgeht. Diese Ungewissheit

muss im Nachweis der Sicherheit des Endlagers berücksichtigt werden und es muss gezeigt werden, dass trotz der bestehenden Ungewissheit die Langzeitsicherheit des Endlagers aufgrund nachgewiesener Tatsachen gegeben ist. Eine wesentliche Entscheidung am Anfang der Sicherheitsanalyse ist deshalb, wie den verschiedenen Ungewissheiten begegnet werden soll. Es sind verschiedene Vorgehensweisen möglich. Ungewissheiten, die Parameterwerte betreffen, sind oft einer statistischen Behandlung zugänglich. Dies erlaubt es, über die Freisetzung und deren Folgen statistische Aussagen zu machen ("probabilistische Analyse"). Ein anderer Ansatz besteht darin, die Variationsbreite aufgrund der Ungewissheit abzustecken und eine oder mehr Varianten für die weitere Betrachtung auszuwählen, welche in Bezug auf die Sicherheit pessimistische Fälle sind ("konservative deterministische Analyse"). Beide Vorgehensweisen sind in Endlagerprojekten anderer Länder bekannt, jede hat ihre Vorteile und Nachteile und sie können auch sich ergänzend eingesetzt werden. Die Nagra wählte den zweiten Ansatz (deterministische Analyse) für die Sicherheitsanalyse Kristallin-I. Das erscheint im gegebenen Rahmen angemessen. Bei einer ausführlicheren Sicherheitsanalyse, die auch die kumulierten Risiken aus der grossen Vielfalt der weniger wahrscheinlicheren Szenarien oder Parametersätze erfassen möchte, sollten die möglichen Vorteile einer Ergänzung durch probabilistische Methoden geprüft werden.

Das Vorgehen der Nagra bei der deterministischen Sicherheitsanalyse ist methodisch eng an den diesbezüglichen internationalen Stand der Technik angelehnt. Eine Besonderheit sind die bereits erwähnten "offenen Fragen" und "Reserve-FEPs". Das sind Phänomene, die die Sicherheit beeinflussen können, heute aber noch wenig bekannt sind und deshalb in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt werden.

Die Schrittfolge der Sicherheitsanalyse, so wie sie im Sicherheitsbericht erscheint (Zielsetzung, System- und Materialbeschreibung, Szenarien, Freisetzungsberechnung, Sicherheitsbeurteilung) ist folgerichtig. Es wird im Sicherheitsbericht richtigerweise darauf hingewiesen, dass die Erarbeitung des Sicherheitsnachweises nicht in diesem Sinne linear abläuft, sondern dass es auch immer wieder einen Rückfluss von Information zu früheren Schritten gibt, der entsprechende Ergänzungen auslösen kann. Dies ist der Fall sowohl innerhalb von Teilbereichen wie z.B. der Szenarienanalyse, als auch in grösseren Schritten, wie zwischen Standortuntersuchung (Datenbeschaffung) und Sicherheitsanalyse (Gebrauch der Daten). Die konsequente Überprüfung von Daten und deren sicherheitstechnischen Bedeutung ist ein Qualitätsmerkmal der sicherheitsanalytischen Arbeit der Nagra.

Rückführbarkeit von Daten und Entscheiden

Die Richtigkeit von Materialdaten kann kaum beurteilt werden, wenn ihre Herkunft und Herleitung nicht bekannt ist. Diese Rückführung stellt grosse Ansprüche an die Dokumentation der Sicherheitsanalyse. Der Sicherheitsbericht Kristallin-I verweist auf eine grosse Anzahl von technischen Berichten, welche die Datengrundlagen aufarbeiten. Oft ist es nötig, weiteren Literaturhinweisen dieser Berichte zu folgen, um Klarheit über die Daten zu erlangen. So ist nicht a priori ersichtlich, welchen Umfang die Dokumentation des Sicherheitsnachweises hat. Im Fall von Kristallin-I wurden einige wichtige Hintergrundberichte zudem viel später als der Sicherheitsbericht selber publiziert. Während es vermutlich schwierig ist, die zum Sicherheitsnachweis zugehörigen Dokumente abschliessend zu bezeichnen, so sollten zukünftig bei einem Sicherheitsbericht, der zur Begutachtung eingereicht wird, wenigstens alle direkt zitierten Berichte bereits publiziert oder in endgültiger Form beigelegt sein.

Eine Tendenz zur Strukturierung der Dokumentation in Ebenen verschiedener technischer Detaillierung ist erkennbar, wobei der Sicherheitsbericht wohl die oberste Ebene bildet, gefolgt z. B. von den Berichten zur geologischen Synthese und zur Szenarienanalyse. Eine solche Strukturierung ist zu begrüßen. Für zukünftige Sicherheitsberichte ist auch auf die Möglichkeiten der modernen elektronischen Lesehilfen hinzuweisen (verbundene Hyper-textdokumente).

Die Darstellung des detaillierten Vorgehens und der zahlreichen Einzelentscheidungen ist eine Schwierigkeit bei der Dokumentation jeder Sicherheitsanalyse für Endlager. Bei der vorliegenden Sicherheitsanalyse ist die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen im Bereich der Szenarienanalyse aus diesem Grund teilweise eingeschränkt. Das betrifft insbesondere die Einzelentscheidungen bei der Festlegung der zu betrachtenden Szenarien sowie bei ihrer Gestaltung und Bewertung. Gleiches gilt für die Vereinfachungen, die bei der konzeptuellen Modellbildung und bei der Spezifikation der Rechenmodelle gemacht werden. Das Kapitel des Sicherheitsberichts zur Szenarienanalyse enthält aber Hinweise auf das Vorgehen und viel Information über einzelne betrachtete FEPs. Der zugehörige Bericht über die Szenarienanalyse (NTB 93-13) ergänzt diese Information. Auf der internationalen Ebene sind in verschiedenen Ländern Anstrengungen zu beobachten, um dieses Dokumentationsproblem durch den Einsatz elektronischer Datenbankprogramme sowie elektronischer Hilfsmittel zur strukturierten Darstellung umfangreicher Daten zu lösen. Bei der Besprechung der Szenarienanalyse sollte auch die Frage deutlicher in den Vordergrund treten, warum es mit den unsicheren Informationen, die uns vorliegen, möglich ist, ausreichend abgesicherte Vorhersagen über diejenigen Aspekte der sehr fernen Zukunft zu machen, die für die Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind. Die Szenarienanalyse wird in einem späteren Kapitel dieser Stellungnahme detaillierter beurteilt.

Als notwendiger Teil des Qualitätsnachweises der Sicherheitsanalyse ist zu zeigen, wie sichergestellt wurde, dass die Rechenmodelle korrekt und für die gestellte Aufgabe anwendbar sind. Die Nagra hat das im Sicherheitsbericht für die darin verwendeten Rechenmodelle ausreichend getan, beispielsweise mit dem Hinweis auf die Teilnahme an internationalen Vergleichsübungen auf der Basis realer Felddaten. Die für die Sicherheitsanalyse benötigten Daten stammen ihrerseits oft aus der Anwendung von Rechenmodellen, die zur Interpretation von erhobenen Felddaten (z. B. Messwerten in einer Bohrung) oder zum Bestimmen von Materialzuständen (z. B. Temperaturverlauf, Festigkeit, chemisches Milieu) verwendet wurden. Es ist schwieriger zu beurteilen und wurde von der HSK auch nur punktuell weiter verfolgt, ob diese bei der Datenaufbereitung vor der Sicherheitsanalyse verwendeten Rechenmodelle korrekt angewendet wurden.

Unterstützende Argumente

Naturalanaloga

Das Materialverhalten und die Transportvorgänge, die sich über die langen Zeiträume des Sicherheitsnachweises von über einer Million Jahre manifestieren, sind einem kontrollierten Experimentieren nicht zugänglich. In der Natur beobachtbar sind aber späte Stadien ähnlicher Vorgänge, die in der Vergangenheit abliefen und als anschauliche Beispiele dienen können. Der Sicherheitsbericht zu Kristallin-I führt einige solche Naturalanaloga an, so die Uranmine Poços de Caldas (Migration von Actiniden) und alte metallische Fundstücke (Korrosionsraten) und weist auf spezielle weiterführende Literaturstellen hin (z. B. NTB 93-03). Während die Naturalanaloga als Beispiele für langzeitige Entwicklung sehr wertvoll sind und nicht in Widerspruch stehen dürfen zum konzeptuellen Verständnis der zu Grunde liegenden Vorgänge, ist es schwierig, die Rechenmodelle und Konzepte anhand solcher Beobachtungen wirklich zu verifizieren. Dazu ist meist zu wenig über die Begleitumstände dieser vergangenen Entwicklungen nachweisbar.

Extremszenarium

Die Transportwege und die Verzögerung der Radionuklide auf dem Transport durch die Geosphäre sind mit einigen Ungewissheiten verbunden. Das hat seine Ursache in der Komplexität der Verhältnisse im Kristallin, verbunden mit der geringen Auflösung der bisher anwendbaren Untersuchungsmethoden für die Struktur des Kristallins. Um die Auswirkung des maximalen Verlustes des Rückhaltevermögens der Geosphäre darzustellen, definiert die Nagra das „Robuste Szenarium“. Hier wird rechnerisch angenommen, dass die Radionuklide nach dem Austritt aus den Nahfeldbarrieren ohne weitere Verzögerung direkt in die oberflächennahen Aquifere übertreten. Die Verzögerung durch den Geosphärentransport wird also völlig vernachlässigt. Die so errechneten Strahlendosen liegen, je nach weiteren Annahmen über die Nahfeldbarrieren, noch unter oder im Bereich des Schutzziels der HSK-R-21. Daraus ist insbesondere ersichtlich, dass die Nahfeldbarrieren wirksam genug sind, um eine unerwartet geringe Rückhalteleistung der Geosphäre auffangen zu können. Damit ist ein wichtiger Aspekt eines Mehrfachbarrierenprinzips gezeigt. Dass auch die Schwächen einzelner anderer Barrieren durch das gesamte Barrierensystem aufgefangen werden können, ist allgemeiner aus den Ergebnissen der verschiedenen Parametervariationen zum Referenzfall ersichtlich. Die Diskussion der Rechenergebnisse unter diesem Mehrfachbarrierenaspekt ist im Sicherheitsbericht unvollständig. Die HSK empfiehlt, diesem Aspekt bei späteren Sicherheitsanalysen mehr Gewicht zu geben.

Andere Indikatoren als die Personendosis

Für den Sicherheitsnachweis ist nach HSK-R-21 insbesondere die maximale Personendosis aufgrund von Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager zu bestimmen. Die entsprechenden Berechnungen sind im Sicherheitsbericht enthalten. Der Sicherheitsbericht enthält auch die für einen Sicherheitsnachweis notwendige Darlegung, dass die verwendeten Daten und Methoden in Bezug auf das Ziel korrekt gewählt sind. Neben diesen Bestandteilen des eigentlichen Sicherheitsnachweises enthält der Sicherheitsbericht aber auch weitere Informationen, die als indirekte Indikatoren für die Sicherheit des Lagers zu verstehen sind. So wird allgemein das Verständnis der Vorgänge in den Barrieren dargelegt. Dies geschieht einerseits durch breite Parametervariationen in der Berechnung der Rückhaltewirkung einzelner Barrieren. Andererseits wird die Wirksamkeit der Barrieren durch den Vergleich der gesamten Radionuklidmengen gezeigt, die verschiedene Schnittstellen des Barrieren-

systems überqueren oder zu gegebener Zeit in einzelnen Barrieren vorhanden sind. Solche Zusatzinformationen, die das Verständnis des Endlagersystems zeigen und vermitteln, haben indirekt für das Vertrauen in die Gründlichkeit der sicherheitsanalytischen Abklärungen Bedeutung und werden deshalb hier als Qualitätsmerkmal positiv vermerkt. In diesem Sinne ist auch der von der Nagra im NTB 93-23 gezogene Vergleich zwischen dem Vorgehen und den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse Kristallin-I und denjenigen anderer in- und ausländischer Endlagerstudien zu bewerten.

Führen des Sicherheitsnachweises

Das abschliessende Kapitel des Sicherheitsberichtes enthält sowohl eine Zusammenfassung der vorangegangenen Analyse als auch die abschliessende Beurteilung der Endlagersicherheit. Die klare und ausführliche Zusammenfassung ist positiv zu vermerken. So werden die konzeptuellen Grundlagen der Beweisführung nochmals klar dargestellt, sowie auch die numerischen Ergebnisse und die verschiedenen unterstützenden Argumente. Die Ergebnisse werden in Bezug auf die im ersten Kapitel erklärten Ziele der Sicherheitsanalyse Kristallin-I interpretiert. Es wird auf die weitere Arbeit hingewiesen, die im Hinblick auf ein konkretes Endlagerprojekt notwendig wäre. Der Bericht schliesst mit einer positiven Beurteilung der Eignung des Kristallins für ein Endlager hochaktiver Abfälle. Im vorliegenden Bericht wird diese Beurteilung der Nagra durch die HSK geprüft.

3. Beurteilung der geologischen Grundlagen

3.1 Einleitung

Die Geosphäre liefert einen grundlegenden Beitrag zur Sicherheit eines zukünftigen Endlagers. Sie schützt einerseits die technischen Barrieren vor äusseren Einflüssen und sorgt bei einer allfälligen Ausbreitung der Radionuklide aus dem Endlager für deren Rückhaltung und Verzögerung. Durch ihre langfristige Stabilität soll sie den Schutz des Lagers über die erforderlichen langen Zeitspannen gewährleisten. Damit die Barrierenwirkung der Geosphäre quantifiziert werden kann, muss der geologische Aufbau des Untersuchungsgebietes entsprechend detailliert bekannt sein. Da das kristalline Grundgebirge in der Nordschweiz nicht an der Erdoberfläche ansteht, können diese Daten vorerst nur mit Bohrungen und mit geophysikalischen Methoden gewonnen werden. In späteren Erkundungsphasen könnte das kristalline Grundgebirge mit einem Sondierstollen direkt vor Ort erkundet werden.

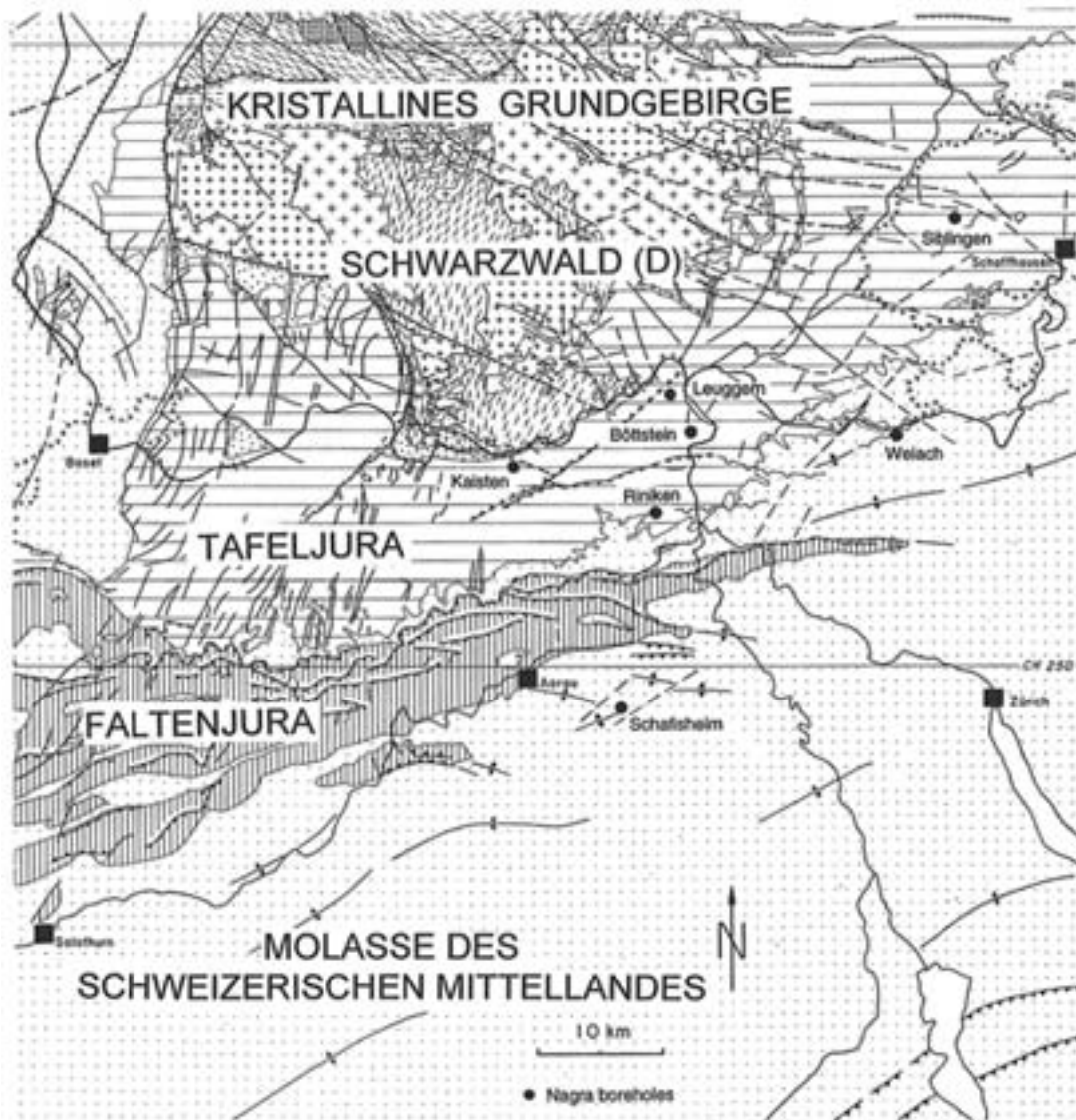
Die Kristallin-Synthese der Nagra (NTB 93-01) wurde 1995 veröffentlicht und bildet die Basis des Sicherheitsnachweises. Seitdem wurden weitere Arbeiten im kristallinen Grundgebirge durchgeführt. Insbesondere konnten im Untersuchungsgebiet West (Mettauer-Tal) geophysikalische Untersuchungen ausgeführt werden, die wesentliche Beiträge zur Beantwortung der Fragen betreffend der Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges lieferten. Diese Resultate werden nachfolgend einbezogen, wenn die Möglichkeiten der Endlagerung im kristallinen Grundgebirge in der Nordschweiz beurteilt werden.

Im Synthesebericht NTB 93-01 hat die Nagra das geologische Datenmaterial zum kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz dargestellt und daraus projektbezogene Schlussfolgerungen abgeleitet. Nachfolgend werden diese Grundlagen zusammengefasst und von der HSK kommentiert.

3.2 Der geologische Aufbau der Nordschweiz

Die Nagra legt in Beilage 3-1 des Syntheseberichtes NTB 93-01 den regionalen Rahmen der Kristallin-Synthese fest (vgl. Fig. 3.1 und 3.2). Die folgenden tektonischen Einheiten wurden einbezogen:

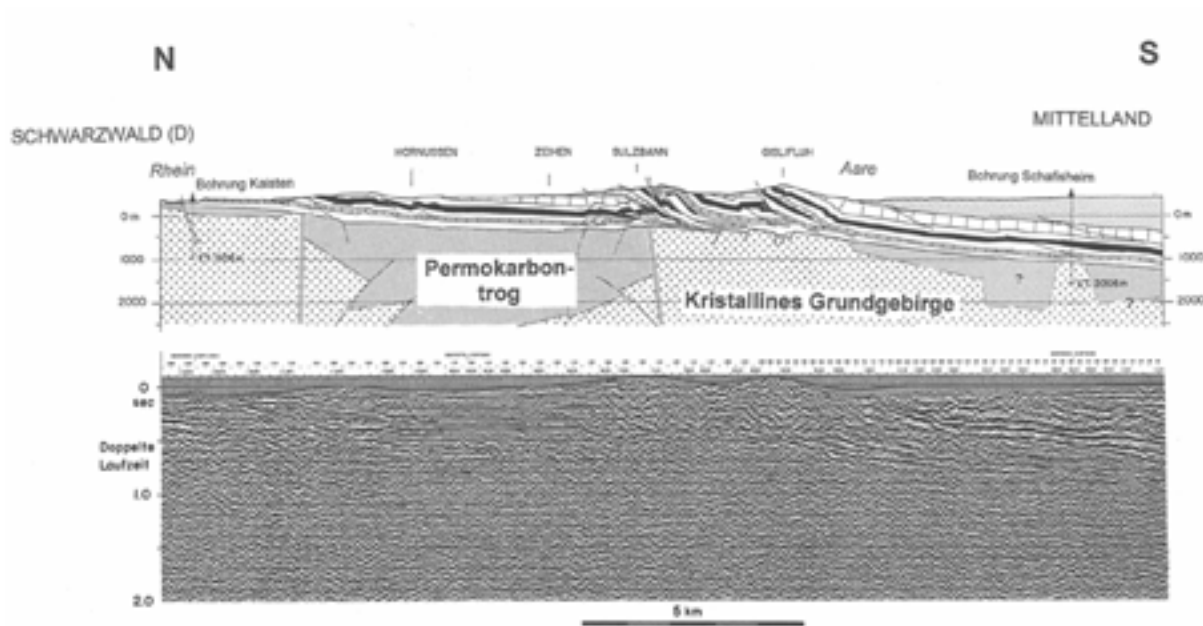
- Das kristalline Grundgebirge nördlich des Nordschweizer Permokarbondrogens (Nordschweiz und südlicher Schwarzwald); die Nagra unterscheidet das Gebiet West um den Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten und das Gebiet Ost mit der Bohrung Siblingen.
- Die Zone des Nordschweizers Permokarbondrogens mit den Bohrungen Riniken und Weiach.
- Das kristalline Grundgebirge südlich des Permokarbondrogens mit der Bohrung Schafisheim.
- Das tertiäre Riftsystem des Oberrheingrabens.
- Die autochthone Sedimentbedeckung des Tafeljuras
- Die abgescherte Sedimentdecke des Faltenjuras und der vorgelagerten Vorfaltenzone, sowie des Molassebeckens.



Figur 3.1: Geologisch-tektonische Übersichtskarte (NTB 93-01)

Aus Sicht der HSK wurde der Stand der Kenntnisse in der Synthese umfassend zusammengetragen. Der geographische Rahmen wurde entsprechend der Fragestellung gewählt und umfasst die geologisch wichtigsten strukturellen Elemente des Gebietes.

Aus dem Gesteinsinventar kann die geologische Geschichte über einige hundert Millionen Jahre rekonstruiert werden. Dabei zeigt sich, dass signifikante tektonische Ereignisse vor allem zu Beginn und am Ende dieser Zeitspanne stattfanden. Im Zuge der variszischen Gebirgsbildung entstand im Karbon und Perm der Grundgebirgsrahmen. Die Gesteine wurden im Zuge dieser Orogenese metamorph überprägt und in Gneise umgewandelt. In diesen alten Gneisrahmen drangen während der variszischen Orogenese Granitplutone ein. Es handelt sich bei diesen synorogen gebildeten Plutonen um heterogene, stark deformierte Gebilde, die mit den grossen Scherzonen des variszischen Gebirges assoziiert sind. Mit der Einsenkung des WSW – ENE verlaufenden Nordschweizer Permokarbondtrog zur Zeit des Oberkarbons/Perms, wurde die paläozoische Entwicklung abgeschlossen.



Figur 3.2: Profilschnitt durch die Nordschweiz, geologische Interpretation der Seismiklinie 82-NF-10 Kaisten – Schafisheim (DIEBOLD 1986)

Im Zeitraum des Mesozoikums sind nur wenig gebirgsbildende Vorgänge zu verzeichnen. Zu Beginn der Periode in der Trias sind noch Anzeichen einer extensiven Tektonik erkennbar, die mit der damaligen plattentektonischen Situation zusammenhängen. Weiter ist zu beachten, dass die Ablagerung des in der Nordschweiz über dem Grundgebirge liegenden, bis 1000m mächtigen Sedimentstapels, eine erhebliche Absenkung des Gebietes erfordert. Diese Absenkung war zweifellos auch mit tektonischen Ereignissen verbunden. Im Zeitalter des Tertiärs wurden die alten Strukturen als Folge der alpinen Gebirgsbildung wiederbelebt und erheblich modifiziert. Über alten Bruchzonen entstanden im Deckgebirge Flexuren und Abschiebungen. Gleichzeitig kam es im Westen zur Einsenkung des Rheintalgrabens. Durch Fernschub von den nach Nordwesten vorstossenden Alpen wurde in geologisch jüngster Zeit das Juragebirge aufgefaltet.

Die tektonischen Bewegungen der tertiären Reaktivierung dauern in abgeschwächter Form bis in die Gegenwart an. Messungen des Spannungsfeldes in der Nordschweiz zeigen, dass der Fernschub bis heute wirksam sein könnte. Regionale Abklärungen ergeben, dass das Gebiet des Schwarzwaldes weiterhin in Hebung begriffen ist, während sich das Molassebecken absenkt (Fixpunkt im Gneis von Laufenburg). Das Untersuchungsgebiet liegt zwischen diesen Extremen, es muss hier mit einer schwachen Hebung gerechnet werden.

3.3 Entwicklung und Petrogenese des Grundgebirges

Die räumliche Anordnung der tektonischen Strukturen im Fels wird von der geologischen Entwicklung des Gesteins im Verlaufe der Zeit geprägt, deshalb ist die Kenntnis der Erdgeschichte des Gebietes auch für das Verständnis der wasserführenden Strukturen grundlegend. Die HSK hat darum diese Daten besonders eingehend geprüft. Die geologische Entwicklung des Grundgebirges in der nördlichen Schweiz schliesst mehrere Gebirgsbildungs- und Aufheizungsphasen ein, während denen magmatische Gesteine entstanden und existierende durch die Einwirkung von Druck und Wärme (Metamorphose) sowie durch mechanische Deformation überprägt wurden (NTB 93-12).

Im einem grösseren geologischen Rahmen gehört das Gebiet zu einer von der Iberischen Halbinsel bis nach Osteuropa verlaufenden Struktur, die als variszisches Gebirge bezeichnet wird. Das Gebirge wurde im Zeitalter des Devons und Karbons durch die Kollision der Urkontinente Laurasia und Gondwana geschaffen. Es kann in vier parallele Zonen gegliedert werden. Das Gebiet des Südschwarzwaldes und der Nordschweiz gehört dabei zum hochmetamorphen Kernbereich des Gebirges, der als moldanubische Zone oder Moldanubikum bezeichnet wird.

Die wichtigsten Stationen der prä-mesozoischen Entwicklung des Grundgebirges sind:

<u>Alter in Mio. Jahren</u>	<u>Geologische und petrographische Ereignisse</u>
900 - 700	Ablagerung klastischer Sedimente (Ausgangsmaterial der späteren Paragneise)
520	Intrusion von Graniten (Ausgangsmaterial der späteren Orthogneise)
490 - 340	Mehrere Metamorphosen, das Gestein erlebt maximale Temperaturen vom über 600°C und Drucke von 12-15 kbar. Deformation und teilweise Aufschmelzung des Gesteins
360 - 340	Intrusion der alten Granite, die heute noch als deformierte Granitkörper vorhanden sind
340 - 330	Retrograde Metamorphose der Gneise; Abkühlung unter 300°C; Zerschering der Badenweiler-Lenzkirch-Zone; starke Hebung des Zentralschwarzwälder Gneis-Komplexes; in der letzten Phase der variszischen Gebirgsbildung mit Deckenüberschiebungen ("Südschwarzwälder-Hauptaufschiebung" vor 342 – 328 Mio. Jahren)
330 – 310	Intrusion der jungen, nicht deformierten Granite; Bildung der Porphyr- und Lamprophyr-Gänge
320 - 300	Ältere Phase kataklastischer Deformation (Oberkarbon) mit höher temperierter hydrothermalen Umwandlung
320 - 290	Vulkanismus, Bildung der rhyolithischen und ignimbritischen Serien, Grundgebirge wird herausgehoben und erodiert
280 - 260	Jüngere Phase der kataklastischen Deformation (Unterperm) mit tiefer temperierter hydrothermalen Umwandlung; Bildung von Mineralgängen und Mineraladern

Als Produkt dieser Entwicklung entstand in der Nordschweiz ein Grundgebirgskörper, der analog wie das Kristallin des Südschwarzwaldes aus Gneisen mit zahlreichen eingestreuten Granitplutonen verschiedenen Alters besteht. Ganggesteine, vor allem Granitporphyre, Lamprophyre und Aplite, durchschlagen den Gesteinskörper. Sie sind wichtige Elemente für die Wasserführung, denn sie haben sich bei den tektonischen Vorgängen teilweise spröde verhalten und sind dabei intensiv zerklüftet worden.

Ein spät gebildetes Netz kataklastischer Störungszonen ("Kakirite") durchschlug die älteren Strukturen. Es entstand im Wesentlichen in einem untiefen Bildungsmilieu mit Sprödeformation und wurde in der Folge intensiv hydrothermal überprägt. Die Umwandlungsprodukte dieser hydrothermalen Vorgänge in Form von Tonmineralien haben dabei teilweise eine hydrogeologische Versiegelung der Störungen bewirkt. Hydrothermal gebildete Mineralgänge, von denen einige bis ins sedimentäre Deckgebirge reichen, sind bis in die Zeit des Mesozoikums gebildet worden.

Die Nagra hat in ihren Berichten die geologische Entwicklung des Grundgebirges ausserordentlich detailliert dargestellt. Sie hat damit gute Grundlagen für die hydrogeologische Charakterisierung des Grundgebirges und für die Ermittlung der Langzeitszenarien geschaffen.

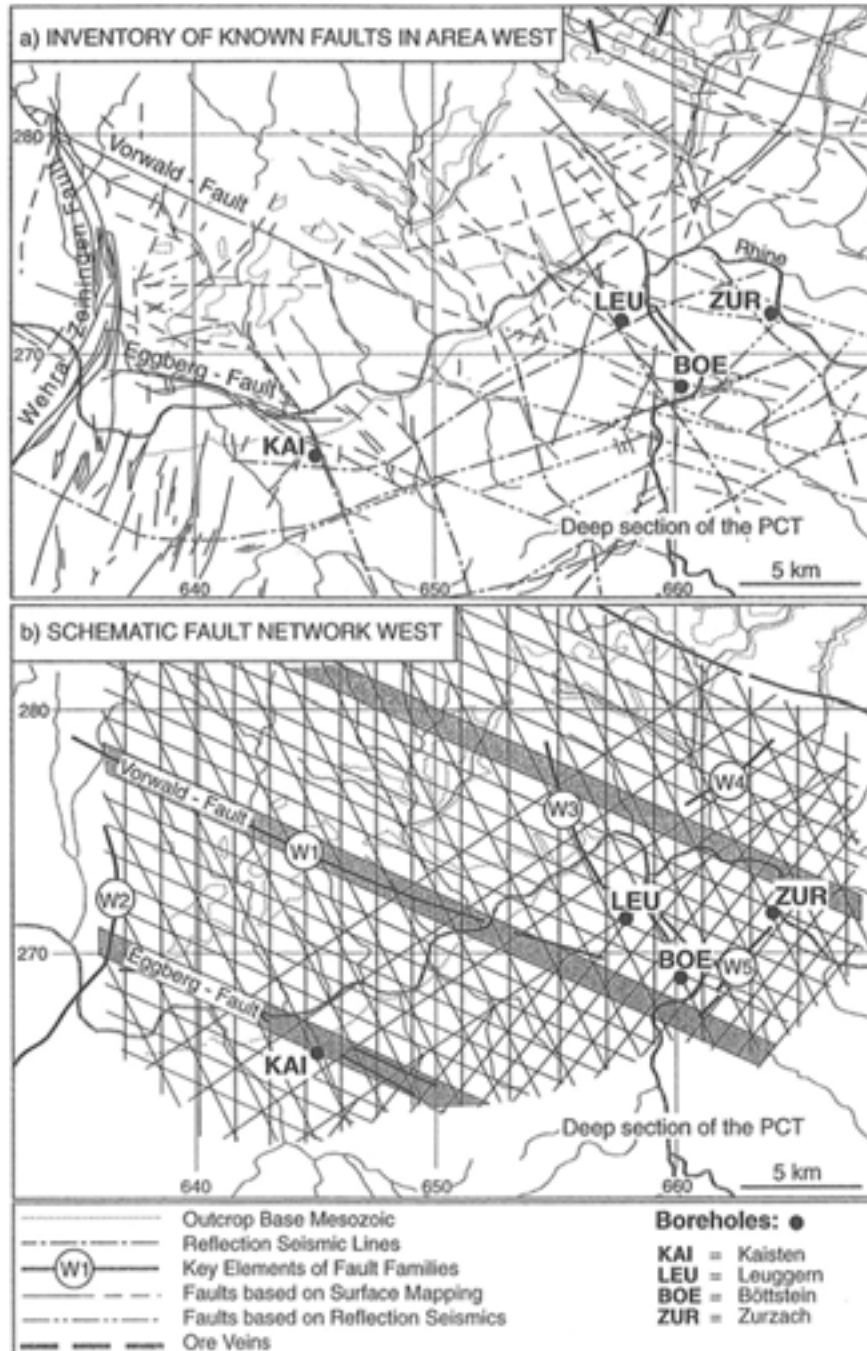
3.4 Struktureller Aufbau und Störungsmodelle

Die Untersuchungen der Nagra im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz ergaben aufgrund der Lage unter der Sedimentbedeckung nur sehr lückenhafte Datensätze bezüglich des Aufbaus und des Durchtrennungsgrades des kristallinen Grundgebirges, sie sind deshalb zur Darstellung des gegenwärtigen Zustandes des Gebirges ungenügend. Mit Hilfe von schematischen Störungsmodellen versuchte die Nagra, diesem Mangel zu begegnen und so eine regionale strukturgeologische Grundlage für die Hydromodellierung zu schaffen. Die Nagra hat deshalb die bekannten Störungen in Gruppen eingeteilt und aus diesem Inventar anschliessend ein Störungsnetz mit regelmässigen Abständen zwischen den Störungen generiert. Die Abstände beruhen dabei weitgehend auf den Beobachtungen im angrenzenden Südschwarzwald.

Das Strukturinventar wurde in folgende vier Gruppen unterteilt:

- a) Grosse Störungszonen regionaler Bedeutung (1. und 2. Ordnung)
- b) Kleinere Störungen höherer Ordnung mit lokaler Bedeutung
- c) Offene Klüfte
- d) Ganggesteine (Dikes) und Mineraladern

Bei der regionalen Modellierung wurden nur die Gruppen a) und d) eingeschlossen, die beiden anderen Gruppen wurden bei der Modellierung der Eigenschaften der Gesteinsmatrix berücksichtigt. Aus dem Inventar der bekannten Störungen wurden schematische Verteilungsnetze abgeleitet. Dabei konnten nur einige grössere Störungen regionaler Bedeutung an ihrem wirklichen, geographischen Ort eingebaut werden, im Übrigen ist das Netz schematisch und gibt die vermutete Störungsdichte wieder.



Figur 3.3: Vergleich der beobachteten tektonischen Strukturen mit dem schematischen Störungsnetz im Gebiet West (Nagra NTB 93-01, Figur 5-7)

Die Störungsrichtungen im Gebiet West wurden in fünf vorherrschende Streichrichtungen unterteilt (Figur 3.3):

- Störungsfamilie W1: streicht 110°-290° (ESE-WNW, variszisch)
- Störungsfamilie W2: streicht 0°-180° (ca. N-S, rheinisch)
- Störungsfamilie W3: streicht 150°-330° (SSE-NNW, eggisch)
- Störungsfamilie W4: streicht 60°-240° (ENE-WSW, parallel zu Faltenjura und Permokarbondrog)
- Störungsfamilie W5: streicht 40°-220° (NE-SW, parallel zum Wutachtal)

Im Gebiet Ost war die Festlegung von Störungsrichtungen schwierig, da nur wenige Aufschlüsse im kristallinen Grundgebirge vorhanden sind. Die Trends mussten aus Strukturen in den sedimentären Deckschichten abgeleitet werden, da die Seismik im kristallinen Grundgebirge keine brauchbaren Angaben lieferte. Schliesslich wurden folgende Richtungen gewählt:

- Störungsfamilie E1: streicht 95°-275° bis 105°-285° (ca. ESE-WNW, variszisch)
- Störungsfamilie E2: streicht 10°-190° (ca. N-S, rheinisch)
- Störungsfamilie E3: streicht 140°-320° (ca. SE-NW)
- Störungsfamilie E4: streicht 65°-245° (ca. ENE-WSW)
- Störungsfamilie E5: streicht 40°-220° (ca. NE-SW)

Die Figuren 5-7 und 5-8 im NTB 93-01 geben einen schematischen Überblick über die modellierten Störungsmuster in beiden Gebiete (Fig 3.3). Die HSK hat die beiden Störungsmodelle mit den strukturgeologischen Datensätzen verglichen. Im Gebiet West erfolgt die Projektion des Störungsmusters aus dem unmittelbar nördlich anschliessenden Hotzenwald und dem Südschwarzwald. Wegen der Nähe dieser Gebiete kann hier mit einer recht weitgehenden Übereinstimmung der regionalen Struktur Trends gerechnet werden. Unbekannt ist allerdings der Einfluss des Permokarbondrogens im Südteil des Untersuchungsgebietes. In der Umgebung des nördlichen Trograndes muss mit einer erheblichen tektonischen Zerrüttung des kristallinen Grundgebirges gerechnet werden, was das zur Verfügung stehende Gebiet stark einschränkt. Auch die Häufigkeit und Lage allfälliger Granitstöcke ist nicht prognostizierbar.

Im Gebiet Ost erfolgt die Projektion aus verhältnismässig weit entfernten Gebieten des Schwarzwaldes. Das Störungsnetz ist hier kaum durch lokale Beobachtungen gestützt, die eine Kontrolle der Störungsabstände und der Einstufung in die Störungsfamilie erlauben. Ein weiterer Punkt muss im Zusammenhang mit den Störungsnetzen erwähnt werden: Im NTB 93-01 wird mehrfach darauf hingewiesen, dass sich das Blockmuster im kristallinen Grundgebirge aufgrund der tertiären Wiederbelebung der ererbten, alten Strukturen durch das sedimentäre Deckgebirge durchpausen müsse. Dies trifft aber im östlichen Gebiet, nebst der regional ausgeprägten Randen-Verwerfung nur für ganz vereinzelte variszisch streichende Störungen zu. Das restliche Strukturinventar ist im Deckgebirge nicht erkennbar. Das Störungsmodell im östlichen Gebiet ist aus der Sicht der HSK ungenügend belegt.

Nur postvariszisch aktive Brüche konnten sich durch das jüngere Deckgebirge hindurchpausen. Man muss deshalb konservativerweise mit weiteren, an der Oberfläche nicht er-

kennbaren Bruchzonen rechnen. Diese nicht wiederbelebten Bruchzonen sind in der Regel hydraulisch weniger bedeutsam, sie stellen aber für die bautechnische Ausgestaltung eine Herausforderung dar.

3.5 Langzeitentwicklung

Wie bereits einleitend erwähnt, hängt die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für langlebige radioaktive Abfälle wesentlich von der Schutzwirkung der geologischen Barrieren ab. Dazu muss einerseits deren heutiger Zustand beschrieben, andererseits auch die zukünftige Entwicklung abgeschätzt werden. Dabei geht es nicht darum, die Zukunft vorauszusagen, dies ist unmöglich, sondern es geht darum, das Spektrum der möglichen Veränderungen der Geosphäre aufzuzeigen. Gesucht werden nicht die subjektiv wahrscheinlichsten Modelle der zukünftigen Entwicklung, sondern diejenigen Szenarien, welche im Endlagergebiet Veränderungen bewirken, die die Ausbreitung der Radionuklide aus dem Endlager wesentlich beeinflussen.

Veränderungen der Erdkruste werden einerseits von Kräften des Erdinnerns, den endogenen Kräften verursacht, andererseits wirken äussere, exogene Kräfte, die die Erdoberfläche umformen.

Die **endogenen Veränderungen** der Erdkruste werden durch grossräumige, subkrustale, geodynamische Prozesse (z.B. Deformationen der Erdkruste durch tektonische Prozesse, Veränderungen der regionalen Temperaturverteilung, etc.) verursacht. Die Kenntnis dieser Vorgänge ist deshalb für die Einschätzung zukünftiger Entwicklungen grundlegend. Die Nagra hat im Bericht NIB 92-44 ein geodynamisches Konzept für die Region erarbeitet und die Zusammenhänge bei der Entwicklung der oberen Kruste in einem regionalen Rahmen untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass der Schwarzwald, der Rheintalgraben, der Tafel- und Kettenjura sowie Teile des Molassebeckens in die Überlegungen zur Langzeitentwicklung einbezogen werden müssen. Ererbte (präexistente) grosse Schwächezonen der Erdkruste spielen dabei eine wichtige Rolle, da sie bei den geologisch jungen tektonischen Ereignissen im Tertiär oft als Schienen für das tektonische Geschehen gewirkt haben.

Die **exogenen Veränderungen** der Erdoberfläche werden von Vorgängen in der Atmosphäre und der Hydrosphäre, aber auch der Biosphäre, bestimmt. Dazu gehören die Stoffumlagerungen durch Verwitterung, Erosion und Sedimentation, aber auch die Dynamik der Oberflächen- und Grundwässer. Extraterrestrische Einflüsse (z.B. Meteoriten) und anthropogene Einflüsse (Treibhauseffekt) vervollständigen das Spektrum.

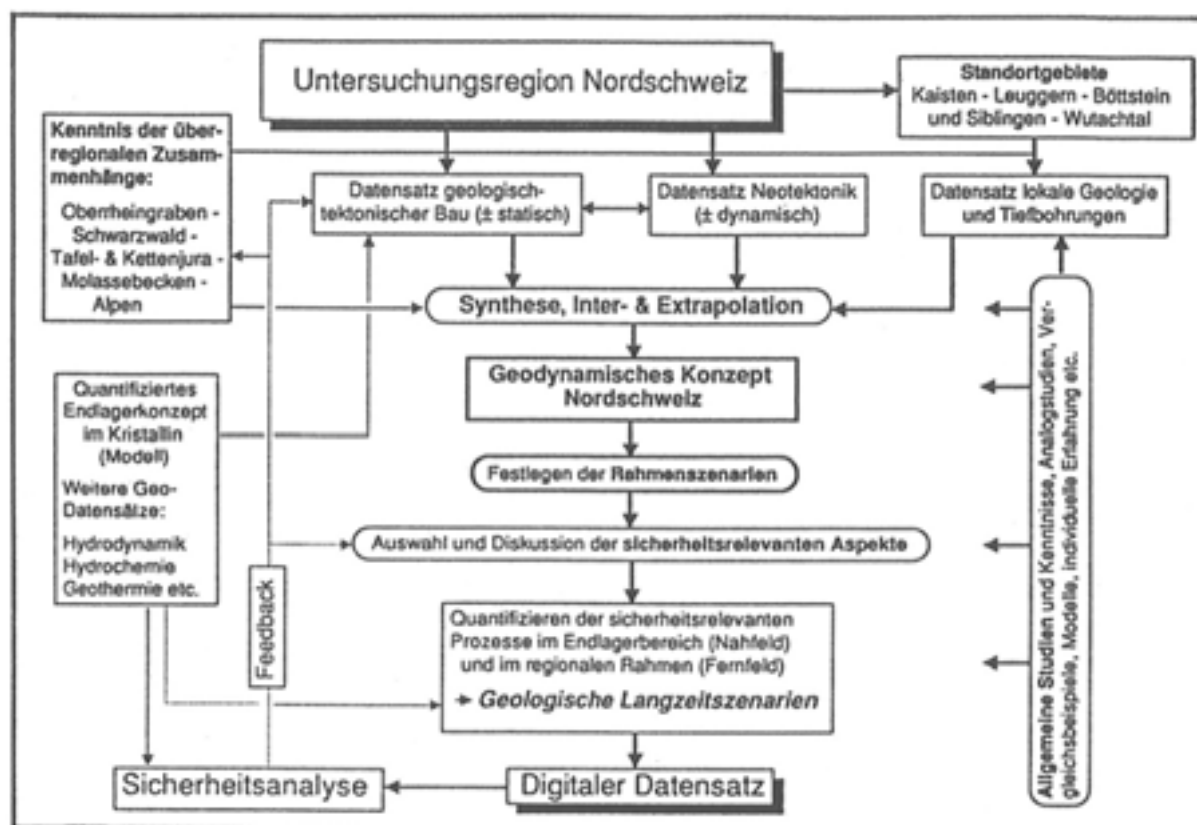
Die endogenen und die exogene Prozesse sind miteinander verkoppelt: Zum einen können tektonische Vorgänge die Erosion fördern, zum andern kann die Erosion tektonische Vorgänge auslösen.

Der **Zeitraum**, über den die Langzeitsicherheit des Endlagers beurteilt werden soll, ergibt sich aus den Halbwertszeiten der massgeblichen Radionuklide. Die Grössenordnung liegt bei mehreren 100'000 Jahren. Die Nagra hat deshalb die Szenarien auf einen Zeithorizont von einer Million Jahren ausgelegt. Grobe Trends der geologischen Entwicklung wurden auch für grössere Zeiträume abgeschätzt.

Die Entwicklung von Rahmenszenarien und Langzeitprognosen beruht auf extrem heterogenen Datensätzen mit einer enormen Spannweite der räumlichen und zeitlichen Dimensionen (vgl. NIB 92-44). Zudem sind die Kenntnisse in den einzelnen Teilgebieten unter-

schiedlich entwickelt, systematische Analysen sind deshalb nur für Teilaspekte möglich. Die Szenarien zur künftigen Entwicklung der Nordschweiz sind somit meist nicht das Resultat zwingender Folgerungen innerhalb eines systematischen, deduktiven Vorgehens, sondern bilden eine Synthese aus den Vorschlägen und Diskussionen der involvierten Wissenschaftler. Sie enthalten darum teilweise auch subjektive Meinungen, die nicht ohne weiteres nachvollziehbar sind. Eine eingehende Beschreibung resp. Dokumentation des gewählten Vorgehens ist deshalb von grundlegender Bedeutung.

Das Vorgehen der Nagra ist in NIB 92-44, (vgl. Fig. 3.4) dargestellt. Ausgehend von einer Zusammenstellung der vorhandenen Datengrundlagen zur Geologie und Neotektonik der Nordschweiz wurde ein geodynamisches Konzept entwickelt. Dieses bildet die Grundlage zur Festlegung von Rahmenszenarien, die die Auswahl sicherheitsrelevanter Aspekte erlauben. Durch Quantifizieren der sicherheitsrelevanten Prozesse entstehen daraus die eigentlichen Langzeitszenarien. Das gewählte Vorgehen ist aus der Sicht der HSK nachvollziehbar und plausibel (HSK 23/52).



Figur 3.4: Vorgehen bei der Erarbeitung des Datensatzes "Geologische Langzeitszenarien" (Nagra NIB 92-44, p.8)

3.6 Endogene Szenarien

Zur Beurteilung der endogenen Entwicklung hat die Nagra zwei Rahmenszenarien ermittelt, die die extremen Grundthesen der geologischen Entwicklung abdecken:

- Rahmenszenarium A geht von der Grundthese aus, dass die alpine Orogenese weitgehend abgeschlossen ist und dass deshalb in der Nordschweiz mit keiner weiteren Krustenverkürzung zu rechnen ist.
- Rahmenszenarium B geht davon aus, dass die alpine Orogenese andauert und im nördlichen Alpenvorland weiterhin eine aktive Krustenverkürzung stattfindet.

Entwicklungen aus dem Rahmenszenarium A

Mit der abklingenden alpinen Orogenese wird das senkrecht zum alpinen Streichen stehende Spannungsfeld allmählich abgebaut. Dies führt zu Hebung in den zentralen Alpen, man rechnet mit weniger als 1.5km Hebung in den nächsten 1 Mio. Jahren. Das Gebiet des Schwarzwaldes wurde in den vergangenen 12 Mio. Jahren um etwa 3km gehoben. Die Aufdomung des Schwarzwaldes wird andauern, sie wird auf einen Manteldiapir im Untergrund zurückgeführt. In einer Million Jahren muss mit einer weiteren Hebung von einigen hundert Metern gerechnet werden (Zentrum Feldberg), die möglicherweise zu einer Verstärkung des Reliefs führen wird. Im Tafeljura und im Mittelland wird die Hebung nur abgeschwächt wirksam, sie wird hier auf weniger als 100m geschätzt. Man muss mit differentiellen Bewegungen einzelner Krustenblöcke rechnen. Die Auswirkungen auf das Endlagergebiet sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Auswirkungen des Rahmenszenarium A im Endlagergebiet (NIB 92-44)

In 1 Mio. Jahren:	Maximale regionale Hebung im Gebiet Kaisten-Leuggern ca. 200m, in Siblingen ca. 300-400m; Vertikalbewegungen an grossen Störungszonen bis 100m; Differentialbewegungen innerhalb der Kristallinschollen entlang diffus verteilter präexistenter Störungen höherer Ordnung mit Versätzen im Meter- bis Dekameterbereich, mit Dominanz der variszischen Systeme und deren Begleitstörungen.
In 10 Mio. Jahren:	Eine max. Gesamthebung von einigen 100m im Gebiet Kaisten-Leuggern und von bis 1km im Gebiet Siblingen können als Extremwerte angenommen werden. Die Zerrungstektonik am existierenden Störungsmuster setzt sich fort, dürfte aber immer unbedeutender werden und langsam abklingen. Nach 10 Mio. Jahren beschränken sich die Differentialbewegungen im Kristallin im Wesentlichen auf die sogenannte remanente Mobilität. Die Nordschweiz und ihre Umgebung besitzen dann den Charakter einer tektonisch inaktiven kontinentalen Kruste.

Aus der Sicht der HSK sind diese Hebungen im Sinne einer konservativen Betrachtungsweise plausibel. Bei längerfristigen Betrachtungen jenseits einer Million Jahre müsste allerdings auch ein Abkühlungstrend berücksichtigt und damit auch ein allmählicher Übergang zu Absenkungen ins Auge gefasst werden (d.h. abnehmende Hebungsraten).

Folgende Phänomene unterstützen das Rahmenszenarium A:

- Erdbeben des Überschiebungstyps fehlen; es herrschen Lateralverschiebungen und Abschiebungen vor, was auf Blocktektonik hinweist.
- Die Magnituden der Erdbeben sind gering (< 5); in aktiven Gebirgsgürteln beobachtet man höhere Magnituden.

Entwicklungen aus Rahmenszenarium B

Die beobachteten Hebungen wären in diesem Szenarium eine Folge der anhaltenden Krustenverdickung und der Überschiebungen im Vorland der Alpen. Die Gebirgsfront stösst weiter nach Norden vor, der Fernschub dauert an. Die Hauptüberschiebung liegt in den Trias-Evaporiten, deshalb werden keine Erdbeben vom Überschiebungstypus beobachtet. Die Abscherfront würde allmählich in den Bereich der heutigen Vorfaltenzone vorstossen. Die Hebungen in den Alpen verbleiben bei diesem Szenarium bei etwa 1.5km in 1 Mio. Jahren. Im Alpenvorland ist mit Hebungen von 100-200m zu rechnen. Auch beim Rahmenszenarium B hält die Aufwölbung des Schwarzwaldes an, das Relief wird dadurch steiler und die Zerblockung des Grundgebirgssockels geht weiter. Die Auswirkungen auf das Endlagergebiet sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Ein Hinweis könnte darauf hindeuten, dass das Rahmenszenarium B zutrifft:

- Die Spannungsfelder im kristallinen Grundgebirge und im sedimentären Deckgebirge sind entkoppelt, was für ein Andauern des Fernschubes spricht.

Tabelle 3.2: Auswirkungen des Rahmenszenariums B im Endlagergebiet (NIB 92-44)

In 1 Mio.Jahren:	Auswirkungen vergleichbar Szenarium A, allerdings ohne ausgeprägtes Potential zur Bildung von Weiteungsstrukturen (kompressives Regime). Bewegungen an den mio-pliozänen Flexuren. Hebung und kompressive Deformation des Permokarbondrogenes und der kristallinen Grundgebirgsschollen. Penetrative Überprägung ganzer Segmente des Grundgebirges und des Permokarbondrogenes.
In 10 Mio.Jahren:	Inversion, Hebung und kompressive Deformation v.a. des Nordrandes des Nordschweizer Permokarbondrogenes und der Kristallinsegmente nördlich des Troges. Teilweise Bildung neuer Scherbahnen und Störungen höherer Ordnung innerhalb der einzelnen Schollen. Hebung eines potentiellen Endlagers aus 1000m Tiefe in den oberflächennahen Bereich.

Beurteilung der HSK

Aus der Sicht der HSK hat die Nagra mit der Ermittlung dieser „Zukunftsszenarien“ einen neuen Ansatz gewählt und neue Methoden angewendet. Die resultierenden Rahmenszenarien geben einen guten Überblick über die potentielle, zukünftige Entwicklung der Untersuchungsgebiete, sie bilden damit eine solide Grundlage für die Ausscheidung der sicherheitsrelevanten Szenarien.

Bei der Wertung der Langzeitszenarien muss im Auge behalten werden, dass es sich um "worst-case" Betrachtungen handelt. Die tatsächliche Entwicklung wird mit grosser Wahrscheinlichkeit wesentlich moderater verlaufen. Als Beispiel möge der Tafeljura gelten, indem gemäss den geodynamischen Konzepten eine Hebung von bis zu 200m erwartet wird. Geodätische Messungen in den vergangenen Jahrzehnten haben jedoch für dieses Gebiet Absenkungen mit Bezug auf einen Referenzpunkt im kristallinen Grundgebirge von Laufenburg ergeben. Das Gebiet West liegt unmittelbar nördlich des Permokarbondrogenes. Es bildet eine Scharnierzone zwischen dem Mittelland und dem Hebungsgebiet des Schwarzwaldes. Voraussagen der zukünftigen Entwicklung sind deshalb hier wesentlich heikler als in der Hebungszone.

3.7 Exogene Szenarien

Die Klimabedingungen an der Erdoberfläche sind für die Verwitterung und Erosion einerseits, Umlagerung und Sedimentation andererseits verantwortlich. Sie beeinflussen die regionale Grundwasserzirkulation und bewirken langfristige Änderungen der hydrodynamischen und hydrochemischen Bedingungen auch in der tieferen Geosphäre. Die zukünftige Klimaentwicklung bestimmt somit die exogenen Szenarien. Die Entwicklung von Klimamodellen wird zurzeit stark vorangetrieben und zeigt wesentliche Fortschritte. Allerdings können vorerst noch keine belastbaren Aussagen im Sinne einer umfassenden Analyse des zukünftigen Klimas gemacht werden. Immerhin führen die vorliegenden Erkenntnisse zum Schluss, dass die wahrscheinlichste Klimaentwicklung eine Fortsetzung des pleistozänen Wechsels von Warm und Kaltzeiten ist.

Seit der Abfassung der Langzeitszenarienstudie Kristallin (NIB 92-44) haben sich wesentliche neue Erkenntnisse zum Ablauf der quartären Kaltzeiten ergeben. Die von Milankovitch im Jahre 1930 postulierte Zyklizität der Kaltzeiten aufgrund langfristiger Variationen der Erdbahnparameter hat sich als realistisches Modell erwiesen, das Projektionen in die Zukunft erlaubt. Die Zyklen entsprechen Zeitspannen von 41ka und 100ka. Dabei wurde festgestellt, dass zu Beginn des Quartärs der kürzere Zyklus dominierte, seit etwa 700ka Jahren jedoch der 100ka-Zyklus. Es gibt zahlreiche Interpretationen warum es zu diesem Wechsel kam, doch hat sich noch keine einheitliche Meinung durchgesetzt. Im Szenarienbericht der Nagra wird angenommen, dass in etwa 20ka Jahren mit dem Beginn einer neuen Kaltzeit zu rechnen ist. Das entsprechende Kältemaximum wäre dabei in etwa 80ka Jahren zu erwarten. Neuere Arbeiten, die zur Zeit der Kristallinstudie noch nicht vorlagen, erwarten den Beginn der nächsten Eiszeit erst in etwa 50ka Jahren (LOUTRE & BERGER, 2000). Der anthropogene Treibhauseffekt durch den Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre kann den Beginn der Kaltzeit unwesentlich verzögern, sie aber nicht verhindern.

Zur Beurteilung der exogenen Entwicklung hat die Nagra entsprechende Erosionsszenarien erarbeitet. Diese gehen wiederum von unterschiedlichen Annahmen aus:

- Das Erosionsszenarium 1 rechnet mit einem Andauern des Wechsels zwischen Warm- und Kaltzeiten.
- Das Erosionsszenarium 2 geht davon aus, dass die Kaltzeiten zu Ende sind. Dieses Szenarium schliesst auch die Folgen eines allfälligen Treibhauseffektes ein. Es werden drei Klimatypen berücksichtigt: Humides, saisonal humides und arides Klima.

Das Erosionsszenarium 1 hat ein grosses Verwitterungs- und Erosionspotential. Durch glaziale Erosion und durch post-glaziale Schmelzwassererosion können die Täler um mehrere 100m übertieft werden. Die fluviatile Erosion (Schmelzwasserflüsse) kann mit den Hebungen Schritt halten. Die grossflächige Denudation wird auf knapp 100m pro Mio. Jahre geschätzt.

Die im vorangehenden Abschnitt erwähnte Dominanz des 100ka-Zyklus hat für das Erosionsszenarium 1 Konsequenz. Der Trend zu längeren Kaltzeiten könnte zu umfangreicheren Vereisungen des Alpenvorlandes führen. Einzelne Gletschervorstösse würden das Ausmass der grossen Eiszeit ("Riss-Eiszeit") erreichen. Bei derartigen Vorstössen wäre mit kräftiger Tiefenerosion in den Vorstosstätern zu rechnen. Sie hätten das Erosionspotential, um die Felsunterlage der Täler weiter abzusenken. Wie allerdings das Beispiel der letzten Eiszeit zeigt, treten auch im 100ka-Zyklus schwächere Vereisungen auf, die nur ausnahmsweise eine weitere Tiefenerosion der Felsoberfläche bewirken.

Beim Erosionsszenarium 2 ist bei den humiden Klimata mit mittleren bis hohen Denudationsraten zu rechnen (< 50m pro Mio. Jahre bei humidem Klima, <100m pro Mio. Jahre bei saisonal-humidem Klima). Die fluviatile Erosion kann beim saisonal-humiden Klima durch Hebung kompensiert werden, beim humiden Klima lediglich im Gebirge. Bei aridem Klima ist mit kräftiger Denudation zu rechnen, sie genügt aber nicht zum Ausgleich der Hebungen. Die fluviatile Erosion beschränkt sich hier auf die Flusstäler.

Es ist keine Kernaufgabe der HSK, die grosse Flut an Publikationen zur Klimageschichte und zu Klimaprognosen näher zu verfolgen. Da durch die Langzeitszenarien die extremsten Klimaänderungen abgedeckt werden, kann trotzdem eine Aussage zum möglichen Einfluss der Klimaänderungen auf die Langzeitentwicklung gemacht werden. Um die Arbeiten der Nagra zum Klimaeinfluss zu bewerten, hat die HSK die Entwicklung der Quartärgeologie in der nördlichen Schweiz aufgearbeitet. Aus diesem Blickwinkel sind die Arbeiten der Nagra aktuell und berücksichtigen die neuesten Erkenntnisse der Quartärgeologie.

3.8 Zur Frage der Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges

Bereits in ihrem Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 hat sich die HSK ausführlich zur Frage der Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges geäussert. Sie kam damals zum Schluss, dass sich das Kristallin der Nordschweiz in seiner lithologischen Zusammensetzung, im tektonischen Aufbau sowie in der Wasserführung als äusserst heterogenes Gestein erwiesen habe. Dieses Urteil beruhte auf den Ergebnissen eines umfangreichen Sondierprogrammes, das neben seismischen Aufnahmen auch 7 Tiefbohrungen umfasste. Ob im Untersuchungsgebiet eine geeignete, genügend grosse Kristallinscholle zur Aufnahme eines Endlagers vorhanden sei und gegebenenfalls auch gefunden werden kann, konnte die HSK mit den damals vorliegenden Befunden nicht beurteilen.

Seitdem hat die Nagra weitere geophysikalische Aufnahmen und geologische Kompilationen ausgeführt. Im Untersuchungsgebiet Nord-Aargau (Mettauertal und Umgebung) konnte 1996 mit Hilfe von drei reflexionsseismischen Linien ein Gebiet detaillierter abgeklärt werden. Die Seismiklinien wurden für die lokalen Bedingungen (z.B. untiefe Lage der Grundgebirgsoberfläche) optimiert, um möglichst aussagekräftige Resultate zu erhalten. Die Resultate wurden im Bericht Nagra NIB 97-42 dokumentiert.

Die Kampagne brachte leider keine wesentliche Verbesserung der Datenqualität und damit auch der Interpretierbarkeit des Kristallins. Eine grossflächige Kartierung von Reflektoren im kristallinen Grundgebirge war nicht möglich. Insbesondere gelang es nicht, die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges zuverlässig zu ermitteln. Auf allen Linien (alte und neue Aufnahmen) gab es Hinweise auf Störungzonen, doch war die Korrelation der Störungen zwischen den einzelnen Linien schwierig oder gar unmöglich. Es konnten lediglich die einzelnen Äste der Hauptstörungen, die teilweise aus Beobachtungen an der Oberfläche bekannt waren, verbunden werden. Eine Verbesserung der Kenntnisse gelang in den Sedimentserien des Rotliegenden (Perm).

Die Problematik der Erkundung des kristallinen Grundgebirges hat sich damit nicht entschärft. Nach wie vor sind die grundlegenden Phänomene nicht genügend bekannt:

- Die Verteilung der Granitplutone im Gneisrahmen des kristallinen Grundgebirges ist ohne Bohrungen kaum detektierbar.
- Die Ausrichtung des Störungsnetzes und der Gangzüge kann nur durch Projektion aus umliegenden Gebieten mit Aufschlüssen abgeschätzt werden.

Die Überlagerung dieser lithologischen und strukturellen Elemente ergibt das Gesamtbild der relevanten Strukturen. Durch hydrothermale Vorgänge, die sich nach der Bildung dieser Strukturen ereigneten, wurde deren Beschaffenheit wesentlich verändert. Es wurde einerseits Material gelöst und neue Hohlräume geschaffen, andererseits aber wurde das gelöste Material transportiert und wieder abgeschieden. Dabei wurden andernorts Hohlräume (z.B. Klüfte) nach und nach verschlossen. Die Kenntnis des lithologisch strukturellen Musters allein genügt demnach nicht zur Prognose der Wasserführung des Grundgebirges (siehe Kapitel 4). Es gibt darum keine einfache Korrelation zwischen Wasserführung und Störungsmuster im Grundgebirge.

Die Ausführungen der Nagra im Kapitel 5.2.4 des NTB 93-01 illustrieren gut das Dilemma der Exploration des kristallinen Grundgebirges. Es wird hier sinngemäss folgender Schluss gezogen (p 5-13): „Es ist möglich, dass Störungzonen, sogar grosse, im Grundgebirge vorliegen, die bis anhin nicht entdeckt worden sind. Es ist darum nicht erstaunlich, dass die Strukturen in den Bohrungen oder im Stollen nur selten mit Aufschlüssen an der Erdoberfläche korreliert werden können“. Da nach wie vor neuere Untersuchungsmethoden, die zusätzliche Information bringen könnten, nicht in Sicht sind, kann sich die HSK dieser Einschätzung auch heute anschliessen.

Eine allfällige zukünftige Exploration müsste die folgende Frage abklären: Gibt es ein konzeptuelles Modell, das die für die Wasserführung relevanten Strukturen erklären kann (vgl Kapitel 4.4). Das Modell müsste demnach auch andere als tektonische Merkmale enthalten und insbesondere die lithologische Gliederung des Grundgebirges mitberücksichtigen (Verteilung der verschiedenen Ganggesteine, Vertonung und Lösung von Strukturen etc.). Erst

auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wäre eine Diskussion der verfügbaren Blockgrössen sinnvoll.

3.9 Schlussfolgerungen

Die beiden verbliebenen Kristallin-Gebiete in der Nordschweiz können mit den vorliegenden Kenntnissen, auch nach den zusätzlichen Erkundungen im Gebiet West, nach wie vor nicht genügend belastbar charakterisiert werden. Die kumulative Tektonik seit dem Paläozoikum hat zu einer kleinräumigen Zergliederung des kristallinen Grundgebirges geführt. Ein Bohrpunkt könnte darum nicht auf der Basis einer regionalen Kartierung des Störungsmusters gezielt angesetzt werden, er müsste vielmehr versuchsweise, mit dem Risiko eines frühen Scheiterns, gewählt werden. Das im NTB 93-01 skizzierte Explorationskonzept nimmt diese Nachteile in Kauf. Mit den sternförmig niedergebrachten Bohrungen kann die Ausdehnung eines mit einer Vorbohrung ermittelten Kristallinblocks genauer abgeklärt werden, das weitere Umfeld bleibt aber dabei weitgehend unbekannt. Auch wenn der Kristallinblock im Bereich der Bohrungen geeignet erscheint, so sind die Störungszonen, die den Block begrenzen, nur lückenhaft oder gar nicht bekannt. Würde ein genügend grosser Block gefunden, wären weitere Bohrungen erforderlich, um dieses Umfeld abzuklären und zu charakterisieren.

Im Absatz 11.4 des NTB 93-01 werden die Chancen für das Auffinden eines für die Endlagerung geeigneten Blocks statistisch betrachtet. Es wird die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass Kristallin-Blöcke mit niedriger Permeabilität und einer bestimmten horizontalen Querschnittsfläche im Grundgebirge auftreten. Für einen Block mit 0.1km^2 Querschnittsfläche (Kantenlänge 300-400m) beträgt diese Wahrscheinlichkeit beim vorliegenden Störungsmuster in einem Prospektgebiet von $1\text{km} \times 1\text{km}$ 100%. Für einen Block mit 0.5km^2 Querschnittsfläche entsprechend noch 47%. Diese Werte scheinen hoch, doch sie lenken von der eigentlichen Kernfrage ab: Kann man mit Kristallinblöcken von 0.1km^2 oder 0.5km^2 nutzbarer Fläche ein vernünftiges Endlagerkonzept erstellen?

Im NTB 93-09 wird als minimale Einlagerungsfläche ein Bedarf von 1km^2 ausgewiesen (gilt für reduziertes Abfallinventar; seinerzeit bei Projekt Gewähr waren 1.4km^2 nötig). Auf drei Ebenen (resp. auf drei Blöcke) verteilt rechnet die Nagra mit gut 0.3km^2 Flächenbedarf pro Block, d.h. mit Kompartimenten von 500-600m Ausdehnung (NTB 93-09, p. 37). Weiter müsste man bei der Erstellung eines Endlagers im Bereich eines Blockmusters in der Lage sein, die geeigneten Blöcke, die im ersteren Fall rund 1000m, im zweiten rund 550m Kantenlänge aufweisen, zu kartieren und zu beurteilen, ob sie sinnvoll zu einem Endlager kombiniert werden könnten. Ein entsprechendes Projekt würde an der Unmöglichkeit scheitern, das Grundgebirge von der Oberfläche her zu erkunden.

Im NTB 93-01 wird auf p. 11-12 festgehalten, dass der Wert der statistischen Analysen stark davon abhängt, ob es gelingt, das Netzwerk der Störungen genügend zuverlässig zu bestimmen. Eine erfolgreiche Exploration im kristallinen Grundgebirge ist deshalb völlig von den diesbezüglichen technischen Möglichkeiten abhängig. Auch damit wird klar zum Ausdruck gebracht, dass der Erfolg der Exploration im Kristallin davon abhängt, ob es gelingt, das für die Wasserführung relevante Trennflächengefüge zu ermitteln und zu charakterisieren.

Die Chancen, dass erfolgreich eine geeignete geologische Situation für ein Endlager für HAA-Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz gefunden werden kann, haben

sich seit Projekt Gewähr 1985 kaum verändert. Die Einschätzung der Situation, wie sie im technischen Bericht der HSK zum Projekt Gewähr 1985 (HSK 23/29) gegeben wurde, gilt deshalb unverändert auch heute:

"Ob im Untersuchungsgebiet eine geeignete, genügend grosse Kristallinscholle zur Aufnahme des Endlagers vorhanden ist und gegebenenfalls auch gefunden werden kann, lässt sich mit den heute vorliegenden Befunden noch nicht beurteilen. Selbst wenn die gesuchte Kristallinscholle existiert, dürfte die Standortsuche schwierig, zeitraubend und aufwendig sein. Die schwer prognostizierbare heterogene Struktur des Grundgebirges wird eine grosse Zahl von Sondierbohrungen erforderlich machen, die unerwünschte, für den Standort abträgliche Perforationen des Wirtgesteins mit sich ziehen".

4. Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse

4.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 beschriebenen geologischen Grundlagen spielen für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers vor allem die hydrogeologischen Verhältnisse eine wichtige Rolle, da diese für die Freisetzung der Radionuklide aus dem Lager und für die anschliessende Ausbreitung in der Geosphäre massgebend sind. Der Transport mit dem Tiefengrundwasser ist der wichtigste Mechanismus, der die Nuklide in die Biosphäre bringen kann. Der Erfassung und Charakterisierung der Fliesswege und der hydraulisch-hydrochemischen Verhältnisse kommt deshalb ein besonderer Stellenwert zu. Eine solche Charakterisierung erfordert Sondierbohrungen, Feld- und Laboruntersuchungen sowie Modelle, mit welchen die einzelnen Daten zueinander in Zusammenhang gebracht werden können. Im vorliegenden Kapitel werden die von der Nagra dargelegten Wasserfliesssysteme, ihre mineralogische Beschaffenheit, die Durchlässigkeitsverteilung, die Grundwasserfliessmodelle sowie der für die Sicherheitsanalyse abgeleitete hydrogeologische Datensatz besprochen und beurteilt.

4.2 Wasserfliesssysteme im kristallinen Grundgebirge

Ergebnisse der Nagra

Die Nagra hat in den Kristallinbohrungen der Nordschweiz die wasserführenden Bereiche mit umfangreichen hydraulischen Packertests und verschiedenen Fluid-Logging Messmethoden untersucht und die Bohrkerne der entsprechenden Bohrlochabschnitte geologisch-petrographisch charakterisiert. Aufgrund mineralogischer und petrogenetischer Kriterien hat sie die tektonische und hydrothermale Entwicklungsgeschichte des kristallinen Grundgebirges analysiert und verschiedene Phasen der Klüftung und Kataklyse und der damit verbundenen Umwandlungen ausgeschieden (spätmagmatisch-heisshydrothermale Umwandlungsphase, hydrothermale-niedrigtemperierte Vertonungsphase und Reaktivierungsphase mit Drusenbildung als jüngstes Ereignis). Aus der gemeinsamen Charakteristik dieser Aspekte wurde für jede Bohrung ein Satz von Wasserfliesssystemen zusammengestellt. Für das kristalline Grundgebirge definierte die Nagra aufgrund einer phänomenologischen Korrelation der Befunde aller Bohrungen drei massgebliche Fliesssysteme und deren Auftretenshäufigkeit (NTB 93-01):

- 1) Kataklastische Zonen (42%)
- 2) Geklüftete Zonen mit offenen Klüften (33%)
- 3) Geklüftete Aplit- und Pegmatitgänge und aplitische Gneise (22%)

Für die Sicherheitsanalyse leitete die Nagra modellhafte Konzepte für die Fliesssysteme ab (NTB 93-12, 93-22). Diese gehen von einer stark vereinfachten Geometrie der Kleinstrukturen aus und legen die geometrische, mineralogische und physikalische Beschaffenheit der Fliesssysteme fest. Diese vereinfachten Modelle bildeten die Grundlagen für die Durchführung der geosphärischen Ausbreitungsrechnungen. Die Nagra räumte dabei ein, dass noch Unsicherheiten und Lücken im Verständnis der Heterogenität des kristallinen Grundgebirges beständen, die nur durch weitere Erkundungsphasen geklärt werden können.

Die wichtigsten Merkmale und Eigenschaften der drei wasserführenden Systeme können wie folgt zusammengefasst werden: Für die *kataklastischen Zonen* wurde eine typische Mächtigkeit von 50-100 cm definiert. Diese Zonen bestehen aus einem Netzwerk von einzelnen Bruchflächen, die meist mit kataklastischem Material oder hydrothermalen Mineralausscheidungen gefüllt sind (Quarz, Muskowit, Illit oder Illit/Smektit-Wechselagerungen, Kaolinit und Calcit). Diese enthalten lokal drusenartige Lösungshohlräume (mm bis cm-Grösse), die zu einer erhöhten Wasserwegsamkeit führen können. Das unmittelbare Nebengestein zeigt eine hydrothermale Überprägung mit erhöhter Porosität. Die Mächtigkeit dieser Umwandlungszone variiert von einigen mm bis zu wenigen dm.

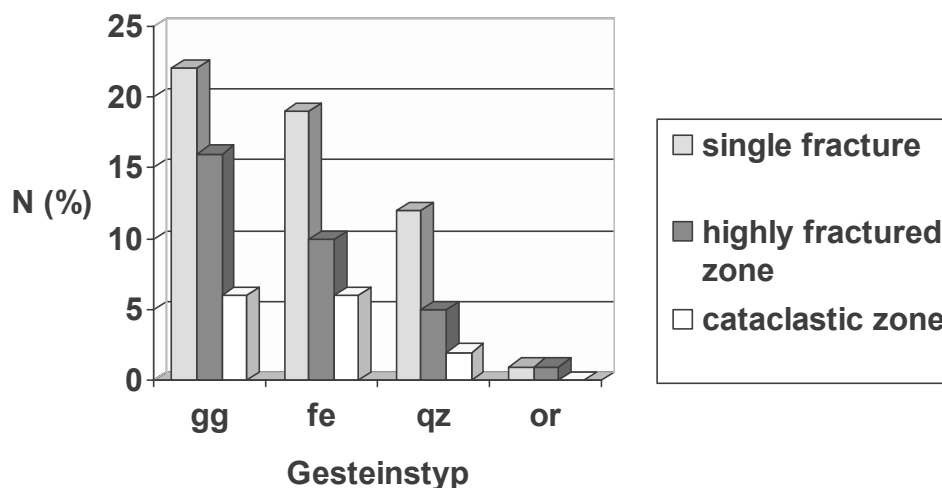
Die *geklüfteten Zonen mit offenen Klüften* bestehen aus Einzelklüften oder aus parallelen oder sich kreuzenden Scharen von Klüften mit stark unterschiedlichen Aperturen. Der Fallazimut dieser Klüfte wird als variabel angenommen, ihr Einfallen als vorwiegend steil. Als Kluffüllung dominieren Quarz, Calcit und Schichtsilikate (Muskowit, Illit, Illit/Smektit-Wechselagerungen und Kaolinit). Die Annahmen über das angrenzende Nebengestein sind dieselben wie beim Fliesssystem der kataklastischen Zonen.

Als drittes Fliesssystem wurden *geklüftete Aplit- und Pegmatitgänge* ausgeschieden. Diese Gesteine zeichnen sich durch eine spezielle chemische und mineralogische Zusammensetzung aus (Quarz, Kalifeldspat und Albit als Hauptgemengteile). Als Konsequenz davon zeigen diese Gesteine bei mechanischer Beanspruchung ein ausgesprochen sprödes Verhalten. Aufgrund ihrer mineralogischen Zusammensetzung sind diese Gesteine praktisch ohne hydrothermale Umwandlungserscheinungen (keine Vertonung), so dass offene Klüfte und Spalten nicht gefüllt bzw. nicht verheilt wurden. Die Ganggesteine sind deshalb häufig gut durchlässig. Die Mächtigkeit der Ganggesteine liegt im dm- bis m-Bereich, ihre Ausdehnung im 100 m bis km-Bereich (abgeschätzt aus analogen Befunden des Südschwarzwaldes). Im Gegensatz zu den Aplit- und Pegmatitgängen, deren Einfallen meist steil ist und deren räumliche Verteilung stark variieren kann, liegen die *aplitischen Gneislagen* häufig flach und konkordant innerhalb der Gneisserien. Aufgrund ihrer ähnlichen Beschaffenheit sind die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften vergleichbar mit den aplitischen Ganggesteinen.

Beurteilung der HSK

Für die Überprüfung der Charakterisierung der Fliesssysteme im kristallinen Grundgebirge stützt sich die HSK auf die technischen und internen Berichte der Nagra sowie auf die Rohdaten der Bohrungen (Messprotokolle, Logs, Bohrkernbefunde, etc.) ab. Beim Nachvollzug der Charakterisierung und Klassifikation der Zuflusspunkte zeigte sich, dass diese in einigen Fällen schwierig oder widersprüchlich blieben (HSK 23/46). Unklarheiten ergaben sich insbesondere in der strukturgeologischen Terminologie und Beschreibung der Bohrkernbeurteilungen, die von den jeweiligen Bearbeitern der Bohrungen zum Teil unterschiedlich und uneinheitlich vorgenommen wurden. Ein Hauptgrund lag darin, dass die Nagra das Schwergewicht der Untersuchungen an den Bohrkernen in einer ersten Phase vor allem auf petrographische, geochemische und petrogenetische Analysen legte und sich die strukturgeologische Detailbearbeitung und Terminologie erst im Verlauf der späteren Synthesearbeiten entwickelt und etabliert haben. Hinzu kommt, dass sich im Verlaufe der Explorations- und Synthesearbeiten, die sich über 14 Jahren erstreckt haben, die Erkundungstechniken wie auch die Untersuchungs- und Auswertungsmethoden wesentlich verbessert und auch verfeinert haben. Dies führte zu Unterschieden in den Datensätzen der verschiedenen Bohrungen.

Um diese Unklarheiten auszuräumen, hat die HSK in der Folge ihrem Experten für Strukturgeologie, Prof. Milnes, den Auftrag erteilt, für die drei Schlüsselbohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten die Zuflussbereiche anhand der Bohrkernbefunde (Bohrkerne und Kernphotos) und der Bohrlochmessungen (verschiedene Logs und hydraulische Tests, Kernbeschreibungen, etc.) zu überprüfen und strukturgeologisch zu charakterisieren. Die Arbeit wurde bewusst auf diese Bohrungen konzentriert, da sich die Nagra bei der Ausarbeitung des hydrogeologischen Modelles Gebiet West auf diese drei Bohrungen abstützt.



Figur 4.1 Auswertung der HSK: Histogrammdarstellung der Häufigkeit N der drei Wasserfließsysteme "single fracture", "highly fractured zone" und "cataclastic zone", die in den verschiedenen Gesteinslithologien des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz beobachtet wurden. Daten der Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten, (HSK 23/46). Verwendete Abkürzungen und Terminologien nach MILNES (1996): gg = granitic/gneissic rocks, fe = felsic (incl. mafic) zones, qz = quartzose zones, or = ore veins and mineral veins.

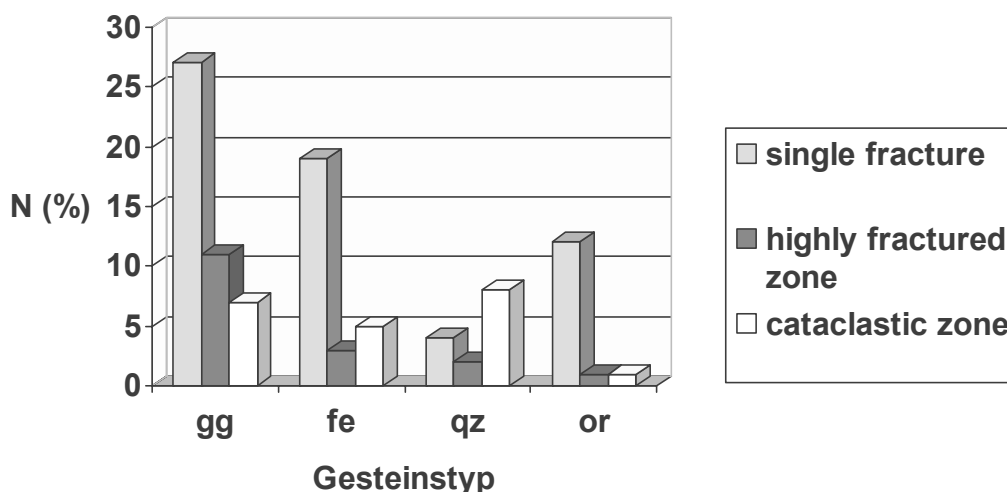
Die Ergebnisse von Milnes sind in einem HSK-Expertenbericht dokumentiert (MILNES 1996). Gegenüber dem Vorgehen der Nagra wurde ein etwas anderer, erweiterter methodischer Ansatz zur Charakterisierung der Fließsysteme gewählt, indem für jeden Zuflusspunkt einerseits der strukturelle Aspekt des Bohrkerns (Durchtrennungsgrad, Trennflächengefüge) und andererseits auch der lithologische Befund (Gesteinstyp, stoffliche Beschaffenheit) analysiert und klassiert wurden (Figur 4.1). Für die strukturelle Beschreibung der Zuflussbereiche leitete MILNES (1996) aufgrund der Bohrkernbefunde die drei Klassen "single fracture", "highly fractured zone" und "cataclastic zone" ab, die sich bezüglich der Anzahl Klüfte pro Laufmeter Bohrkern sowie aufgrund ihres strukturellen Erscheinungsbildes definieren liessen.

Die Auswertung zeigt, dass nach dem strukturellen Aspekt (Durchtrennungsgrad) Einzelklüfte (sf) mit 54% die häufigsten Zuflusspunkte darstellen. An zweiter Stelle folgen die stark geklüfteten Zonen (hfz) mit 32%. Auf kataklastische Zonen bzw. Störungen (cz) entfallen 14%. Betrachtet man die Verteilung unter dem lithologischen Aspekt (Felstyp), so fallen 44% der Zuflusspunkte in die Granit/Gneis-Zonen (gg), 35% in die felsischen Zonen (fe), 19% in quarzreiche Bereiche (qz) und 2% auf Mineral- und Erzgänge (or). Vom rheologischen Ver-

halten her grenzen sich die felsischen und quarzreichen Zonen sowie die Mineralerzgänge deutlich als „Härtlinge“ vom übrigen Kristallin ab. Interessant ist, dass 56% der Zuflusspunkte auf diese Härtlinge fallen. Obschon der volumetrische Anteil dieser Gesteine am gesamten kristallinen Grundgebirge höchstens 6-10% beträgt, repräsentieren die Härtlinge das wichtigste Wasserfließsystem. Der Grund dafür dürfte darin liegen, dass sich diese Gesteine wegen des hohen Quarzanteiles bei mechanischer Beanspruchung besonders spröde verhalten und deshalb bei tektonischer Beanspruchung stark zur Klüftbildung neigen.

Verknüpft man den strukturellen Aspekt der Zuflusspunkte mit deren lithologischen Beschaffenheit, so resultieren daraus 12 mögliche Kombinationen oder Fließsysteme. Dabei treten die Kombinationen (sf-gg), (sf-fe) und (sf-qz) am häufigsten auf, was die grosse Bedeutung der Einzelklüfte für die Wasserwegsamkeit deutlich macht. An zweiter Stelle folgen die stark geklüfteten Zonen (hfz-gg), (hfz-fe) und (hfz-qz). Ferner ist ersichtlich, dass die kataklastischen Zonen (cz-gg), (cz-fe) und (cz-qz) für die Wasserwegsamkeit nur eine untergeordnete Rolle spielen. Insgesamt ergibt sich dabei ein komplexes Bild von 5 relativ häufigeren ($\geq 10\%$) und 7 weniger häufigen (0-6%) wasserführenden Fließsystemen, die sich aus den Kombinationen von Durchtrennungsgrad und Lithologie herleiten lassen.

In einem weiteren Schritt hat die HSK die hydraulische Wirksamkeit der Fließsysteme analysiert. Aufgrund der detaillierten hydraulischen Packertests und der Ergebnisse der Fluid-Logging-Messungen war es möglich, für jeden Zuflussbereich eine Abschätzung der Transmissivität vorzunehmen. Neben der Auftretenshäufigkeit der Fließsysteme ist es nun möglich, auch deren hydraulische Wirksamkeit darzustellen (Figur 4.2).



Figur 4.2 Auswertung der HSK: Histogrammdarstellung der hydraulischen Wirksamkeit der strukturell und lithologisch charakterisierten Fließsysteme im Kristallin der Nordschweiz. Datensatz der Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten, (HSK 23/46). Die hydraulische Wirksamkeit der verschiedenen Fließsysteme wird anhand des Anteils (N) an der Gesamttransmissivität (100%) der durchbohrten Kristallinstrecke dargestellt. Verwendete Abkürzungen und Terminologien nach MILNES (1996): gg=granitic/gneissic rocks, fe=felsic (incl. mafic) zones, qz=quartzose zones, or=ore veins and mineral veins.

Die Graphik zeigt, dass die Transmissivität nicht gleichmässig auf die verschiedenen Fließsysteme verteilt ist. Am durchlässigsten erwiesen sich Einzelklüfte (sf), die insgesamt 62% der Gesamttransmissivität ausmachen. Nur 21% der Gesamttransmissivität fällt auf kataklastische Zonen (cz). Die Darstellung macht die relativ grosse hydraulische Wirksamkeit der Erz- und Mineralgänge (or) deutlich, die bezüglich Auftretenshäufigkeit sehr selten sind (2%), aber bezüglich Transmissivität doch 14% ausmachen. Dies zeigt, dass für das Verständnis der Wasserfliessverhältnisse im kristallinen Grundgebirge beide Betrachtungsansätze notwendig sind. Auftretenshäufigkeit und Verteilung der Fließsysteme sind wichtig für die geometrisch-räumliche Beschreibung der Fließsysteme im Grundgebirge. Die Transmissivitäten sind hingegen ein besseres Mass zur Ermittlung, wie die Wasserfliessmengen auf die verschiedenen Fließsysteme verteilt sind. Nach der Auswertung der HSK muss geklüfteten Bereichen in sog. "Härtlingen" besondere Beachtung geschenkt werden, da sie wegen ihrem Sprödverhalten offensichtlich bevorzugte Wasserwegsamkeiten im kristallinen Grundgebirge ermöglichen.

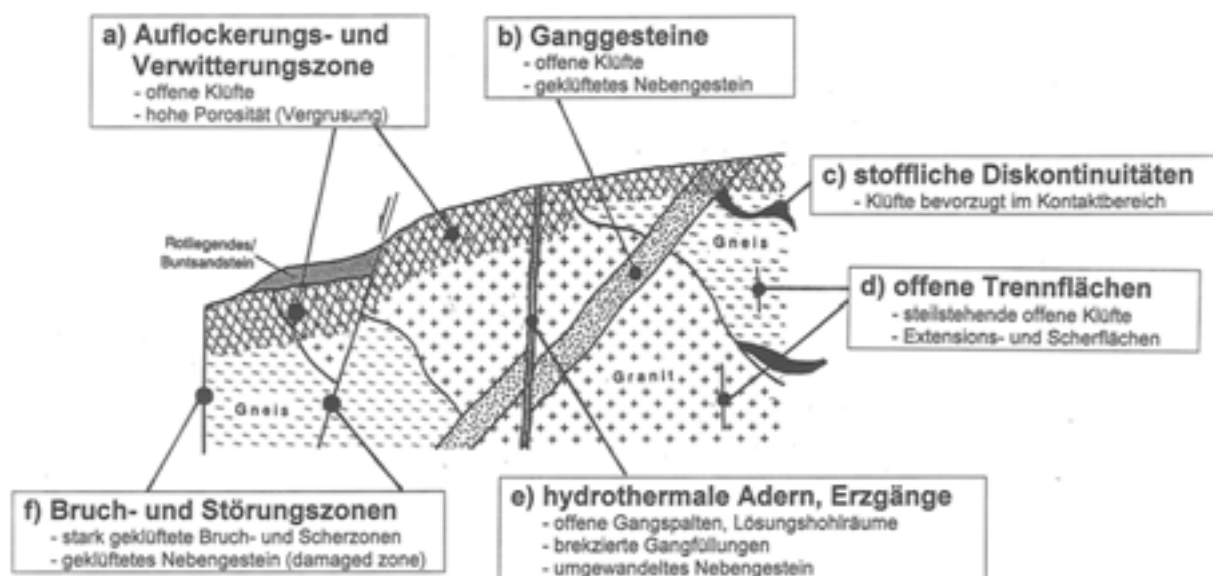
Die Bedeutung von kataklastischen Zonen für die Wasserfliesswege wurde gemäss unserer Auswertung von der Nagra überbewertet. Diese Schlussfolgerung ergibt sich auch aus einem Vergleich der Inventarlisten der Zuflusspunkte mit dem strukturgeologischen Log der jeweiligen Bohrung (Böttstein, Leuggern, Kaisten), die bei den insgesamt 190 auskartierten Störungszonen nur für 14 eine erkennbare Wasserführung nachwies. Die geringen Durchlässigkeiten der Störungszonen sind eine Folge der starken hydrothermalen Überprägung, die zu einer Vertonung und Abdichtung dieser Gesteinsbereiche führte.

Befunde aus dem Südschwarzwald

Mit nur drei Bohrungen im Gebiet West (Kaisten-Leuggern-Böttstein) und einer Bohrung im Gebiet Ost (Sibilingen) ist die Datenmenge angesichts der Grösse des Untersuchungsgebietes und der Variation und Heterogenität des kristallinen Grundgebirges nicht ausreichend, um einen repräsentativen Datensatz sicherzustellen. Es ist deshalb nötig, ergänzend zu den punktuellen Daten auch regionale Erkenntnisse aus dem angrenzenden Südschwarzwald mitzubedenken. Die entsprechenden Literaturdaten (zusammengestellt in HSK 23/46) zeigen, dass die Wasserfliesswege im kristallinen Grundgebirge grundsätzlich an folgende strukturelle und stoffliche Diskontinuitäten gebunden sind (Figur 4.3):

- a) an die Auflockerungs- und Verwitterungszone der Grundgebirgsoberfläche (wenige Meter);
- b) an spröd deformierte Ganggesteine (Aplite, Pegmatite, Gangporphyre etc.) und derer Kontaktbereiche zum Nebengestein;
- c) an stoffliche Diskontinuitäten (leukokrate Gneisbänder, Quarzit- oder Kalksilikatlagen, Amphibolitlinsen etc.), die sich rheologisch vom Nebengestein unterscheiden;
- d) an offene, meist steilstehende Trennflächen (Klüfte, Extensions- und Scherflächen, die teils durch drusige Lösungshohlräume ausgeweitet sind);
- e) an Bereiche alter hydrothermalen Zirkulationssysteme (Quarzadern, Mineral- und Erzgänge und deren hydrothermal umgewandelter poröser Begleitzone);
- f) an Bruch- und Störungszonen (Verband von Bewegungsflächen, kataklastische Zonen und deren „damage zone“).

Für die Ganggesteine (Aplite, Pegmatite, Gangporphyre) liegen aus dem Schwarzwald neue Erkenntnisse zur Entwicklungsgeschichte der Klufnetzwerke (DANECK 1994) vor. Der Gangkontakt zum Nebengestein stellt eine latente Schwächezone dar, welche bei der späteren tektonischen Beanspruchung bzw. Überprägung reaktiviert wurde. Infolge hoher Abkühlungsspannungen kam es im Innern der Gänge bereits früh zur Ausbildung einer ersten systematischen Klüftung, wobei in Apliten und Lamprophyren das Klufmuster generell engständiger ausgebildet ist als in Gangporphyren. Diese primäre Klüftung der Ganggesteine wurde von jüngeren, tektonischen und entlastungsbedingten Klüften überlagert, deren Ausbildung sich mehr oder weniger deutlich von der primären Klüftung unterscheidet. Für die Wasserwegsamkeit erweist sich sowohl die Gang-interne Klüftung wie auch der unmittelbare Gangkontakt zum Nebengestein als massgebend.

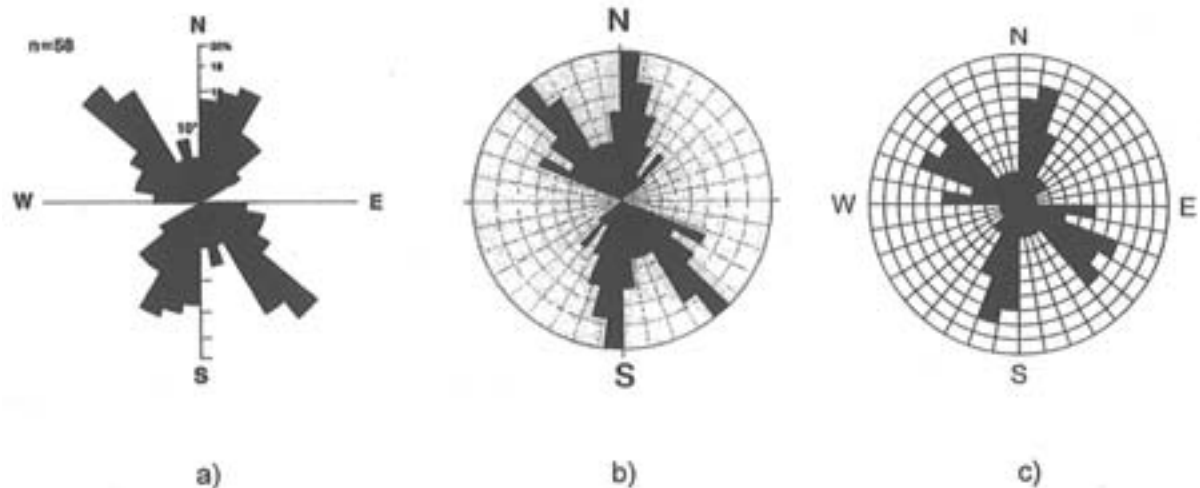


Figur 4.3: Schematische Übersicht über die wichtigsten Typen von Fließwegen im kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwaldes (HSK 23/46).

Über die räumliche Orientierung der vorwiegend steilstehenden wasserführenden Strukturen konnten in den Nagra-Sondierbohrungen aus messtechnischen Gründen meist nur grobe Trends ermittelt werden. Aus dem angrenzenden kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwaldes liegt heute hingegen eine statistische Auswertung der Streichrichtungen der in Untertagebauwerken (Kraftwerkanlagen) kartierbaren wasserführenden Strukturen vor (BIEHLER 1995), die zum Vergleich herangezogen werden können. Die Analyse ergab für die vorwiegend steilstehenden Fließwege zwei deutliche Hauptrichtungen (NW-SE und ca. N-S), welche bekannten Bruchsystemen des Schwarzwaldes entsprechen (herzynische bzw. rheinische Richtung). Vergleicht man diese Hauptrichtungen mit den Streichrichtungen der Herdflächen rezenter Erdbeben der Nord- und Nordwestschweiz (Blattverschiebungen und Abschiebungen, Herdtiefen von 3 bis 25 km, NTB 00-05 und STANGE und STREHLAU 2002), so stellt man eine überraschend gute Übereinstimmung fest (Figur 4.4).

Diese Verknüpfung bevorzugter Wasserwegsamkeit mit rezenten Bewegungsvorgängen beziehungsweise Spannungsumlagerungen im tiefen Untergrund des kristallinen Grundge-

birges kann dahingehend interpretiert werden, dass tektonische Vorgänge offensichtlich zu einer Reaktivierung alter Strukturen auch in relativ oberflächennahen Bereichen des untersuchten Gebietes geführt haben. Nach BIEHLER (1995) zeigen die wasserführenden Klüfte im Schwarzwald in der Tat vielfach Anzeichen von Horizontalbewegungen. Er interpretiert die erhöhte Durchlässigkeit dieser Klüfte damit, dass geringste Verschiebungen der meist unebenen Klufflächen zu einer bleibenden Öffnung geführt haben.



Figur 4.4 Streichrichtungen wichtiger Bruchflächensysteme im kristallinen Grundgebirge
 a) Orientierung der in Untertagebauten des Südschwarzwaldes auskartierten Fließwege (BIEHLER 1995)
 b) Streichrichtungen von Herdflächen rezenter Ober- und Unterkrustenbeben in der Nordschweiz (STANGE und STREHLAU 2002)
 c) Streichrichtungen der möglichen Bruchflächen im kristallinen Grundgebirge der Nordwestschweiz, die sich aus den Herdflächenlösungen ergeben (NTB 00-05)

Folgerungen

Vergleicht man die geschilderten Befunde aus dem Schwarzwald mit den Ergebnissen der Nagra-Sondierungen der Nordschweiz, so stellt man fest, dass ein breites Spektrum von Wasserfliesssystemen vorliegt. Alle aufgeführten Systeme wurden von der Nagra erwähnt, bei der Klassierung und Konzeptualisierung der Modelle aber anders gewichtet. Wie die Auswertung von MILNES (1996) zeigt, wurde den kataklastischen Zonen bezüglich der Wasserwegsamkeit ein zu grosser Stellenwert beigemessen, während die hydraulische Wirksamkeit von Einzelklüften unterschätzt wurde. Neuere Daten und Auswertungen über wasserführende Klufsysteme im Südschwarzwald zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Wasserwegsamkeit und Erdbebenereignissen als wahrscheinlich angenommen werden muss.

4.3 Mineralogie der Wasserfliesssysteme

Im Hinblick auf die Rückhaltung der Radionuklide im Gestein spielt die mineralogische Zusammensetzung der wasserführenden Strukturen und deren Oberflächenbeschaffenheit eine

wichtige Rolle. Wie vorgängig aufgezeigt wurde, erfolgt die Wasserströmung im kristallinen Grundgebirge fast ausschliesslich entlang begrenzter, diskreter Bereiche, den sogenannten Wasserfliesssystemen. Es ist deshalb wichtig, speziell für diese Bereiche die mineralogische Zusammensetzung und die Oberflächenbeschaffenheit zu quantifizieren.

Bei der Konzeptualisierung der drei ausgeschiedenen Wasserfliesssysteme (NTB 93-01, NTB 93-12) hat die Nagra zu jedem Fliesssystem quantitative Datensätze zur mineralogischen Zusammensetzung der Kluffbeläge bzw. Klufffüllungen zusammengestellt. Dabei ist die Unterscheidung zwischen der mineralogischen Beschaffenheit der eigentlichen wasserführenden Trennflächen (fracture coating, fracture infill) und den unmittelbar angrenzenden Gesteinsbereichen (altered or unaltered wallrock) von Bedeutung, da die Mineralogie in diesen Zonen wegen vielfältigen Wasser-Gesteins-Wechselwirkungsvorgängen verschieden sein kann. Nach der Auswertung der Nagra dominieren in den beiden Fliesssystemen "kataklastische Zonen" und "geklüftete Zonen" als Hauptminerale Quarz (bis 42%), Calcit (30%) und die Schichtsilikate Muskowit und Illit (17-28%), während untergeordnet Kaolinit und Illit/Smektit noch vertreten sein können. Demgegenüber unterscheidet sich das Fliesssystem der geklüfteten Ganggesteine (Aplite, Pegmatite) durch das Vorherrschen von Quarz (56%) und Calcit (30%) und den deutlich geringeren Anteil an Schichtsilikaten (Muskowit <6%). Die Beschaffenheit der angrenzenden Gesteinsbereiche zeigt eine grosse Variabilität, die im Wesentlichen vom Zersetzungsgrad der Feldspäte (Serizitisierung) und der Biotite (Chloritisierung) bestimmt wird.

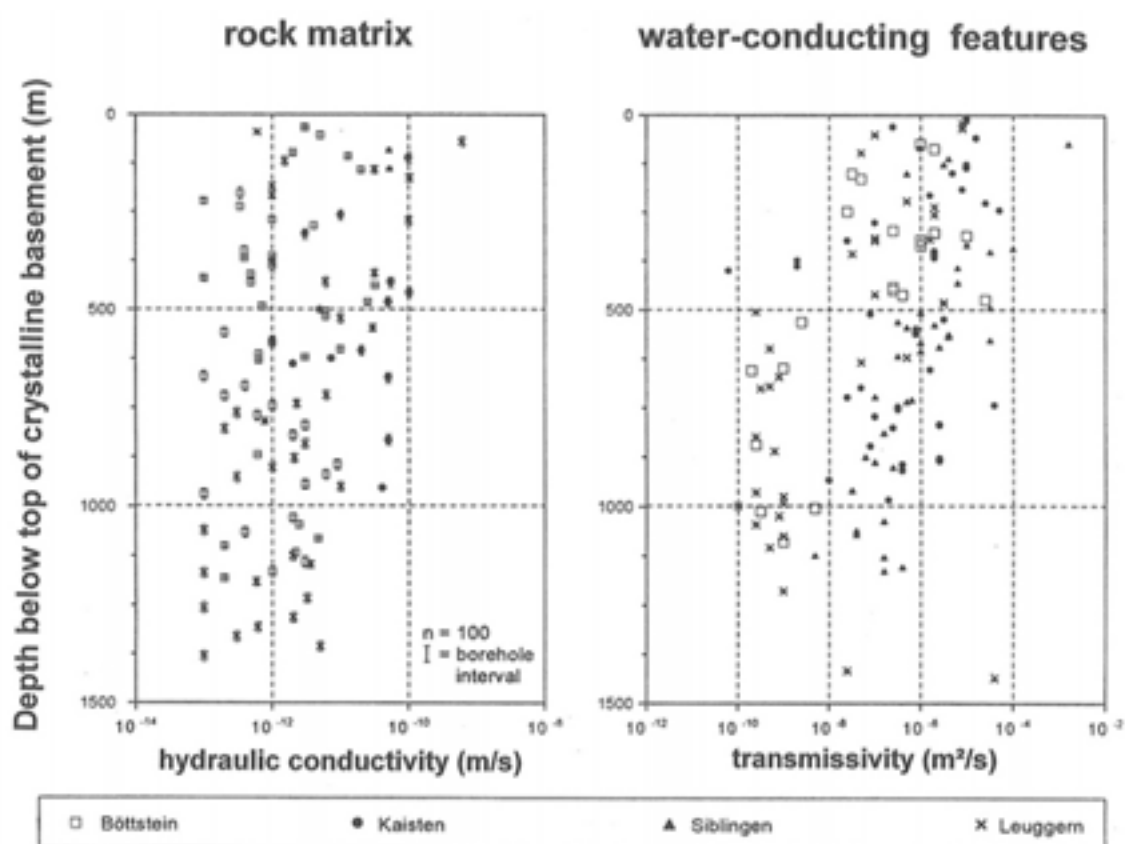
Nach Ansicht der HSK erlaubt der vorgelegte Datensatz eine gute erste Abschätzung der mineralogischen Beschaffenheit der Fliesssysteme. Für die von MILNES (1996) überprüften rund 100 Zuflusspunkte der drei Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten liegt eine genaue Quantifizierung der mineralogischen Zusammensetzung bei 41 Zuflusspunkten vor (NTB 93-12). Eine vollständige qualitative mineralogische Beschreibung der Bohrkernbefunde findet man zudem in den geologischen Untersuchungsberichten der einzelnen Bohrungen (Bohrprofile mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen). Bei der Durchsicht der Bohrbefunde fällt auf, dass wasserführende Klüfte neben den Hauptmineralen Calcit und Quarz oft auch Baryt und Fluorit führen. Es ist unklar, wieso diese beiden Mineralphasen im Datensatz für die Sicherheitsanalyse nicht aufgeführt wurden. Aufgrund der einheitlichen chemischen Zusammensetzung der Tiefenwässer, die mit Quarz (Calcedon), Calcit, Baryt und Fluorit im Gleichgewicht stehen, ist anzunehmen, dass Baryt und Fluorit ebenfalls verbreitet vorkommen.

Neben der Mineralogie spielt die Oberflächenbeschaffenheit der Kluffbeläge eine wichtige Rolle zum Verständnis der Retentionsprozesse und Sorptionsvorgänge. Einige Informationen dazu sind in den Untersuchungsberichten dokumentiert, sie weisen auf verschiedene Lösungs- und Ausscheidungsprozesse hin. Die HSK regt an, dass mittels elektronenmikroskopischer Analysen (u.a. REM/EDX, XRF-EDS, SIMS) die Beschaffenheit der Oberflächen an weiteren Proben untersucht wird, um genauere Rückschlüsse über die Prozessvorgänge gewinnen zu können. Wegen dem punktuellen Charakter der Bohrungen sollten vermehrt auch grossräumigere untertägige Aufschlüsse (Stollen, Tunnels und Kavernen) im angrenzenden Südschwarzwald in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

4.4 Transmissivitäts- und Durchlässigkeitsverteilung

Ergebnisse der Nagra

Für die Abschätzung der tiefenbezogenen Durchlässigkeitsverteilung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz stützte sich die Nagra auf die Ergebnisse der hydraulischen Tests der Bohrungen Böttstein, Kaisten, Leuggern und Siblingen. Fluid-Logging Messungen zeigten, dass die Wasserführung im Kristallin durchwegs an diskrete Strukturen (water conducting features=wcf) gebunden ist. Das umgebende Gestein (rock matrix) erwies sich, wie die Ergebnisse der hydraulischen Tests zeigten, dagegen als sehr geringdurchlässig. Die gemessenen Transmissivitäten wurden deshalb diskreten Zuflusspunkten zugeordnet (NTB 92-04) und für die Gesteinsmatrix wurde eine niedrige Hintergrunddurchlässigkeit abgeschätzt (Figur 4.5).



Figur 4.5: Variation der hydraulischen Leitfähigkeiten bzw. Transmissivitäten in Abhängigkeit zur Tiefenlage im kristallinen Grundgebirge für die Gesteinsmatrix und die wasserführenden Strukturen (Bohrungen Böttstein, Leuggern, Kaisten und Siblingen, NTB 92-04).

Die Transmissivitäten der wasserführenden Strukturen variieren über einen grossen Bereich von gegen acht Grössenordnungen. Für die Interpretation der Transmissivitätsverteilung traf die Nagra folgende konzeptionelle Annahmen:

- Die gemessenen Transmissivitätswerte entsprechen den wahren Transmissivitäten der auskartierten Wasserfliesssysteme (wcf).

- Die Anzahl Zuflusspunkte ist für das zu charakterisierende Gesteinsvolumen und den entsprechenden Tiefenbereich vollständig erfasst und repräsentativ.
- Die Transmissivitätswerte sind von Testparametern wie Intervalllänge, Testtyp, Testdauer, Testreichweite ("radius of influence") bzw. Transmissivitätsbereich und Orientierung der wcf unabhängig und damit gleichwertig.
- Im tieferen Kristallin treten erhöhte Durchlässigkeiten ausschliesslich im Zusammenhang mit grossen Störungszonen (MWCF = Major Water Conducting Faults) auf.

Unter Berücksichtigung dieser Grundannahmen teilte die Nagra das Kristallin konzeptuell in zwei hydrogeologisch verschiedene Stockwerke, einen oberen, höherdurchlässigen Bereich (HPD = High Permeability Domain, $K = 2.8 \cdot 10^{-7}$ m/s) und einen tieferen, geringdurchlässigen Bereich (LPD = Low Permeability Domain, $K = 4.2 \cdot 10^{-11}$ m/s) ein. Beide schichtartig übereinanderliegende Stockwerke werden von grossen subvertikalen, wasserführenden Störungszonen durchschlagen (MWCF = Major Water Conducting Faults, $K = 3.2 \cdot 10^{-7}$ m/s). Die Grenze zwischen HPD und LPD wurde je nach Bohrung in unterschiedlicher Tiefe angenommen (360 – 660 m unter Kristallinoberfläche), konzeptionell legte die Nagra die Schichtgrenze aufgrund einer groben Trendabschätzung (fitted trend line) bei 500 m fest.

Für die Betrachtung der regionalen Grundwasserfliessverhältnisse konzentrierte sich die Nagra auf das Gebiet nördlich des Permokarbondrogens und teilte das kristalline Grundgebirge in ein Gebiet "Kristallin West" (Böttstein-Leuggern-Kaisten) und ein Gebiet "Kristallin Ost" (Siblingen) ein. Diese Unterteilung wurde nötig, da in der Bohrung Siblingen durchwegs erhöhte Durchlässigkeiten und in der Tiefe kein eigentlich geringdurchlässiges Kristallin beobachtet wurde und das Gebiet somit als Spezialfall behandelt werden musste. Eine weitere Ausnahme stellten die Ergebnisse der Bohrung Weiach dar, die für das obere Kristallin geringe Transmissivitäten ergaben. Die Nagra hat diese Daten bei der Entwicklung ihrer hydrogeologischen Konzepte nicht weiter berücksichtigt.

Beurteilung der HSK

Mit hydraulischen Tests und Fluid-Logging Messungen konnte die Nagra überzeugend nachweisen, dass die Wasserführung im kristallinen Grundgebirge grundsätzlich an diskrete Strukturen (wcf) gebunden ist. Die Verknüpfung der gemessenen Transmissivitäten mit diesen Strukturen und die Abgrenzung einer niedrigen Hintergrunddurchlässigkeit für die umgebende Gesteinsmatrix bewertet die HSK als adäquaten Konzeptansatz für das Verständnis der Wasserwegsamkeiten im Kristallin.

Die Untersuchungen ergaben in den einzelnen Sondierbohrungen stark unterschiedliche Transmissivitätswerte bzw. -verteilungen. Die Transmissivitäten lassen mit zunehmender Tiefe einen schwachen und je nach Bohrung uneinheitlichen Trend zu geringeren Werten erkennen (Figur 4.5). In der Figur fällt jedoch auch auf, dass die in Leuggern beobachtete Hauptzuflusszone in 1400 – 1470 m Tiefe (Zone mit 6 Testintervallen mit Transmissivitätswerten von 10^{-5} m²/s) nur mit einem Punkt wiedergegeben und nicht als Zone ausgeschieden wird. Das Fehlen dieser Messungen und die geringere Anzahl Messpunkte in diesem Tiefenbereich macht eine statistische Trendaussage schwierig. Ein zusätzliches Problem besteht auch darin, dass in den Bohrungen wahrscheinlich nicht alle wasserführenden Strukturen als solche auch erkannt und vollständig charakterisiert wurden. Der Grund liegt darin, dass einerseits mit vertikalen Bohrungen steilstehende Kluftsysteme nur schwer erfasst werden und dass andererseits die Kluftwasserzirkulation oft nicht die Gesamtfläche der Struktur betrifft,

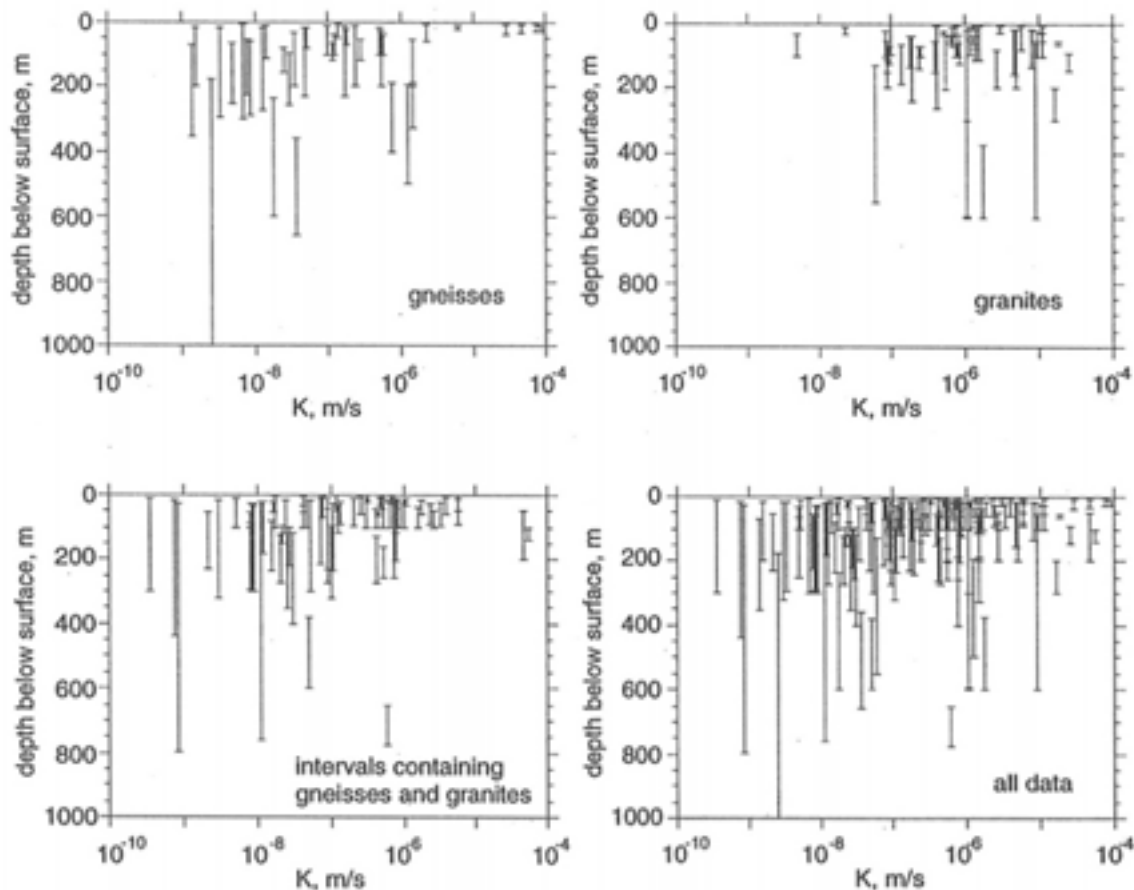
sondern nur in räumlich begrenzten Bereichen, sogenannten "Channels", stattfindet. Mit punktuellen Bohrungen können solche Channels kaum erfasst werden, was zu einer Fehleinschätzung der effektiven Durchlässigkeiten und der tatsächlichen Wasserflüsse im Gestein führen kann.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Bewertung der hydraulischen Testergebnisse beachtet werden muss, ist die Feststellung, dass die Permeabilität in geklüfteten Gesteinen offenbar eine Skalenabhängigkeit aufweist. Das heisst, dass je nach Bezugs- bzw. Probengrösse die Durchlässigkeitsbestimmung unterschiedliche Resultate liefert. Dieser Effekt bewirkt beispielsweise, dass Labormessungen an kleinen Bohrkernproben (cm-Bereich) Durchlässigkeiten ergeben, die oft um zwei bis drei Grössenordnungen unter den Werten entsprechender Bohrlochmessungen (Meterbereich) liegen. Im regionalen Massstab (Kilometerbereich) können die Gesteine je nach Verhältnissen um ein bis zwei Grössenordnungen durchlässiger sein, als aufgrund der Bohrlochversuche zu erwarten ist. Der Grund dieser Skalenabhängigkeit liegt in der Heterogenität und Variabilität des Gesteins und der Art und Weise, wie das Trennflächengefüge (Frequenz und Korrelationslänge der Klüfte) und der Grad der Vernetzung der Klüfte ausgebildet sind. Bei sehr kleinen Proben (Laborskala) besteht die Tendenz, dass Klüfte gar nicht erfasst werden und nur die Durchlässigkeit der sog. Gesteinsmatrix bestimmt wird. Bei Proben im Meterbereich (Bohrungen) ist oft unklar, ob die Vernetzung der hydraulisch wirksamen Klüfte mit der Testanordnung korrekt erfasst wurde. Für die Bohrlochdaten der Nagra bedeutet dies, dass die Herleitung statistischer Mittelwerte aus K-Verteilungsprofilen problematisch ist, da unterschiedliche Gesteinsvolumina miteinander verglichen werden.

Bei der Zuordnung der hydraulisch gemessenen Transmissivitäten zu strukturgeologisch-lithologisch abgrenzbaren, diskreten Wasserfliesssystemen (wcf) ergaben sich zwischen der Interpretation der Nagra und derjenigen der HSK Unterschiede (vgl. Abschnitt 4.2). Sie sind im Wesentlichen auf unterschiedliche methodische Ansätze bei der Gruppierung und strukturgeologischen Klassierung der Zuflusspunkte zurückzuführen. Nach der Auswertung der HSK sind Störungzonen bezüglich der Wasserwegsamkeit im untersuchten Kristallin nur von untergeordneter Bedeutung, 62% der Gesamttransmissivität wurde in Einzelklüften und bevorzugt in sog. "Härtlingen" beobachtet. Für die Herleitung einer tiefenabhängigen Durchlässigkeitsverteilung müssten somit auch Häufigkeit, Verteilung, Raumlage und Orientierung dieser "Härtlinge" mitberücksichtigt werden.

Befunde aus dem Schwarzwald

Die Bohrungen Böttstein, Kaisten, Leuggern und Siblingen haben wichtige Angaben über die Transmissivitätsverteilung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz geliefert. Da punktuelle Bohrungen aber nur ein begrenztes Gesteinsvolumen erfassen und wegen der Heterogenität des Kristallins die Befunde lateral nicht extrapoliert werden können, müssen für die Beurteilung der grossräumigen Durchlässigkeitsverhältnisse auch Literaturdaten aus dem angrenzenden Schwarzwald miteinbezogen werden. Heute liegen verschiedene neuere Untersuchungen und Kompilationen von Datensätzen vor, die der Nagra bei der Erarbeitung der Geosynthese zum Teil noch nicht zur Verfügung standen (u.a. HIMMELSBACH 1993, BIEHLER 1995, STOBER 1993, 1995 und 1996). Die Daten wurden in der im Mai 1998 nachgelieferten Arbeit von MAZUREK hingegen aufgenommen und diskutiert (NTB 93-12).



Figur 4.6: Variation der hydraulischen Leitfähigkeiten im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes in Abhängigkeit zur Bohrtiefe (Datensatz STOBER in NTB 93-12)

Für die granitischen und metamorphen Gesteinsserien des Schwarzwaldes wurden von STOBER insgesamt 153 Durchlässigkeitswerte ermittelt (Figur 4.6). Die Messungen erfolgten zum Teil im Hinblick auf die Erkundung möglicher Mineral- und Thermalwasservorkommen, sie wurden deshalb auch gezielt auf vermutete durchlässige Zonen angesetzt. Die Messwerte variieren über einen grossen Bereich (K-Werte von 10^{-4} bis 10^{-10} m/s), wobei der Mittelwert für granitische Gesteine bei 9×10^{-7} m/s und derjenige für Gneise bei 5×10^{-8} m/s liegt. Dieser Gegensatz wird auf Unterschiede in der Textur und im rheologischen Verhalten dieser beiden Gesteinstypen zurückgeführt. Granite verhalten sich bei tektonischer Beanspruchung offensichtlich spröder und neigen vermehrt zur Bildung neuer offener Trennflächen. Gneisse haben wegen ihrer ausgeprägten Schieferung und ihrem erhöhten Gehalt an Schichtsilikaten ein deutlich duktileres Deformationsverhalten. Die Daten zeigen insgesamt, dass für den untersuchten Tiefenbereich keine deutliche Abhängigkeit der hydraulischen Leitfähigkeit zur Bohrtiefe festzustellen ist. Eine schichtartige Gliederung, wie sie die Nagra postuliert, ist nicht erkennbar.

Die von BIEHLER (1995) aus der Analyse der Sickerwasserzuflüsse in den verschiedenen Kraftwerkstollen des Südschwarzwaldes (Gesteinsüberdeckung 60 bis 500 m) abgeleiteten Durchlässigkeiten ergaben Werte im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} m/s, was mit dem Datensatz von STOBER 1995 gut übereinstimmt. Noch höhere Durchlässigkeiten wurden in Erz- und Mineralgängen bis in grosse Tiefen beobachtet (HIMMELSBACH 1993, Erzgang "Hermann")

mit K-Werten in der Grössenordnung von 10^{-5} m/s), die offensichtlich auf extreme Aperturen der Klüfte und Spalten sowie auf Lösungshohlräume zurückzuführen sind.

Folgerungen

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass sich der hydrogeologische Modellansatz der Nagra über die schichtartige Verteilung der Durchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig begründen lässt. Die Aufteilung des Kristallins in einen oberen, höher durchlässigen Bereich (*HPD*) und einen unteren (> 500 m), geringdurchlässigen Bereich (*LPD*) ist nach Ansicht der Nagra die einfachste von mehreren möglichen Interpretationen. Das vorgeschlagene Konzept hat aber den schwerwiegenden Nachteil, dass die Verhältnisse in den meisten Nagra-Bohrungen (Kaisten, Leuggern, Weiach, Siblingen) damit nicht erklärt werden können und als Spezialfälle gedeutet werden müssen. Problematisch erscheint weiter die Abgrenzung grosser und mächtiger wasserführender Störungszonen (MWCF), die in den Sondierbohrungen in dieser Art nicht beobachtet wurden.

Nach Auffassung der HSK ist die Datenbasis zu klein, um das Schichtenmodell als wahrscheinlichste Lösung vertreten zu können. Die unterschiedlichen Transmissivitäten in den Bohrungen sind Ausdruck einer komplexen Durchlässigkeitsverteilung im kristallinen Grundgebirge, die nicht durch ein vergleichsweise einfaches, schichtartiges Modell adäquat beschrieben werden können. Möglicherweise ist der Konzeptansatz der geringdurchlässigen Kristallinblöcke, die von hochdurchlässigen Störungszonen begrenzt werden, eine zu grobe Vereinfachung. Aufgrund der bisher vorliegenden Befunde muss man davon ausgehen, dass die tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse wesentlich komplexer sind und dass stark wasserführende Systeme wie die "Härtlinge" (Ganggesteine, quarzreiche Zonen, Erzgänge und Mineraladern, etc.) auch innerhalb grosser Kristallinblöcke vorkommen.

4.5 Grundwasserfliessmodelle

Ergebnisse der Nagra

Die Modellierungen hatten zum Ziel, das Verständnis über die Grundwasser-Fliessverhältnisse im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz zu verbessern und die Rechenergebnisse mit beobachteten hydraulischen und hydrochemischen Befunden der Bohrungen zu vergleichen. Die Nagra hat dazu eine Modellhierarchie mit drei verschiedenen Betrachtungsmassstäben (regional, lokal, Endlagerblock) gewählt (NTB 92-04). Das flächenmässig grösste der drei Modelle, das regionale Fliessmodell, hatte die Zielsetzung, den Grundwasserfluss im nordschweizerischen Kristallin gesamthaft und konzeptionell zu beschreiben. Des Weiteren sollte das regionale Modell die Randbedingungen für das lokale Modell bereitstellen. Das lokale Modell hatte zum Ziel, die für die Sicherheitsanalyse erforderlichen hydrogeologischen Rahmenbedingungen wie Fluss- und Gradientenverteilung, Fliesswege und Transportzeiten herzuleiten. Im kleinsten Betrachtungsmassstab wurden mittels eines Kluftnetzwerk-Modelles der im Bereich eines Endlagerstollens effektiv anfallende Grundwasservolumenstrom und dessen Verteilung auf die einzelnen transmissiven Elemente ermittelt.

Das *regionale Modell* umfasst ein ca. 1300 km² grosses Gebiet zwischen dem Nordrand des Permokarbon-Trogs und dem Schwarzwald. Die Mächtigkeit des Berechnungsausschnitts beträgt 3500 m. Aus rechentechnischen Gründen wurde das Modellgebiet nach Norden begrenzt, es erfasst somit das Einzugsgebiet der Vorfluter Rhein und Wutach im Bereich des

Schwarzwalds nur teilweise (Figur 4.7). Eine vollständige Implementierung der entsprechenden Teile des Schwarzwalds hätte das Modellgebiet signifikant vergrößert und die Fläche mit exponiertem Kristallin etwa verdoppelt. Im Skalenbereich des regionalen Modells wurde das kristalline Grundgebirge durch Annäherung als äquivalent-poröses Medium (EPM) betrachtet, wobei fünf Einheiten unterschieden wurden: das obere Kristallin (UC), das untere Kristallin (LC), eine 0.5 km breite Störzone entlang dem Permokarbon-Trog (DZ), die randliche sedimentäre Bedeckung des Permokarbon-Trogs (PCTs) und der Buntsandstein (BST). Störungen werden (im Basisfall) implizit über die effektive hydraulische Durchlässigkeit des äquivalent-porösen Mediums mitberücksichtigt. Die hydraulischen Durchlässigkeiten der einzelnen Einheiten wurden geschätzt (PCTs, DZ) oder aufgrund von Ergebnissen der Sondierbohrungen abgeleitet (BST, UC, LC).

Konzeptionell wird das Modellgebiet im Süden vom Permokarbon-Trog, im Osten und Westen von Störungen und im Norden von einer willkürlich gewählten Linie im Schwarzwald begrenzt. Darauf aufbauend wurden die Randbedingungen für den Basisfall von der Nagra wie folgt festgelegt:

- Festpotentiale entlang der Nordgrenze und auf dem unbedeckten Teil des Schwarzwald-Kristallins (nördlich des Rheins); zusätzlich Festpotentiale im überdeckten Teil des Kristallins entlang der Wuttach.
- Ein vorgegebener vertikaler Fluss (von unten) im Bereich der Störzone entlang dem Permokarbon-Trog (DZ); konzeptionell entspricht dieser Fluss der geothermischen Anomalie (mit aufsteigenden Tiefenwässern) in der Gegend.
- Festpotentiale im Buntsandstein und im oberen Kristallin entlang dem östlichen und westlichen Modellrand.

Die Randbedingungen für den Basisfall repräsentieren den einfachsten möglichen Fall. Alternative bzw. zusätzliche Randbedingungen wurden im Rahmen einer umfangreichen Sensitivitätsstudie schrittweise implementiert bzw. deren Auswirkungen untersucht.



Figur 4.7: Einzugsgebiet des regionalen Modells (schematische Skizze, EMCH und BERGER 1998)

Die Fließverhältnisse im *lokalen Modell* ("Kristallin West" = Böttstein-Leuggern-Kaisten) wurden mit Hilfe eines sogenannten hybriden oder Doppelporositätsmodells untersucht. Konzeptuell ermöglicht dieses Verfahren eine Modellierung von wasserführenden Störungszonen und dazwischenliegenden Matrixblöcken, wobei letztere wieder als EPM charakterisiert werden. Das Modellgebiet umfasste ein ca. 50 km² grosses Gebiet, das sich vom Vorfluter im Norden (Rhein) bis zum Permokarbondrog im Süden erstreckt. Als Grundlage für die Auslegung des numerischen Netzes wurde ein generisches strukturgeologisches Modell, abgeleitet aus Beobachtungen aus dem Südschwarzwald, erstellt. Um den Unsicherheiten Rechnung zu tragen wurden mehrere geometrische Modellvarianten untersucht. Hauptziel der durchgeführten Simulationen war die Analyse der Verteilung des Wasserflusses zwischen Störungen und Matrixblöcken, die Untersuchung der Verteilung der hydraulischen Gradienten in Funktion der Störungsdichte und die Ermittlung von Fließrichtungen und Entwässerungspfaden.

Im nächst kleineren Betrachtungsmassstab wurden die Grundwasserfließverhältnisse innerhalb eines typischen *Wirtgesteinblockes* untersucht. In diesem Skalenbereich geht man davon aus, dass sich der Grundwasserfluss ausschliesslich auf einzelne Klüfte konzentriert, die als planare transmissive Elemente idealisiert werden. Da deren Lage sowie hydraulische und geometrische Eigenschaften nicht explizit bestimmbar waren, mussten diese Strukturen durch ein statistisches Kluftnetzwerk approximiert werden. Die durchgeführten Simulationen hatten zum Ziel, quantitative Aussagen über Fließmenge und Grundwasserverteilung im Bereich einer Endlagerkaverne zu machen und daraus die für die Sicherheitsanalyse und insbesondere die Transportmodellierung relevanten Parametersätze abzuleiten.

Beurteilung der HSK

Für die Beurteilung der Grundwasserfließverhältnisse hat die HSK externe Experten beigezogen. Die Ergebnisse sind in den entsprechenden HSK-Expertenberichten dokumentiert (BASLER & HOFMANN 1992, MILNES 1997 und EMCH & BERGER 1998).

Regionales Modell

Das regionale Grundwassermodell simuliert das stationäre Grundwasserfließfeld bei konstanter Grundwasserdichte und konstanter Temperatur. Die implementierte Durchlässigkeitsverteilung des Kristallins geht von einem groben konzeptionellen Ansatz aus und ist demzufolge mit ihren zwei Durchlässigkeitsbereichen (Upper crystalline = UC und Lower crystalline = LC) sehr schematisch.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass das Grundwasserfließfeld primär von folgenden Randbedingungen dominiert wird: die hohen Festpotentiale im Bereich des Schwarzwaldes bewirken einen generellen Fluss von Norden nach Süden. Der Rhein und seine Nebenflüsse, sofern nicht unter mesozoischer Überdeckung, wirken aufgrund ihrer Höhenlage als (regionale) Vorfluter; daraus resultiert auch der in den Bohrungen beobachtete lokale Aufwärtsgradient. Der undurchlässige Permokarbon-Trog erzwingt im Ostteil des Modells die Umlenkung der Grundwasserströmung nach Westen und Nordwesten. Die übrigen Randbedingungen bewirken eher lokal unterschiedliche Strömungs- bzw. Druckverhältnisse.

Ein Vergleich der im regionalen Modell berechneten Druckspiegelhöhen mit den in den Bohrungen gemessenen Werten zeigt, dass das Modell die absoluten Messwerte im Bereich der Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten unterschätzt; die simulierten Gradienten sind für

Böttstein und Kaisten zu niedrig, in Leuggern dagegen etwas zu hoch. Die Nagra interpretiert diese Diskrepanzen als lokale Phänomene, die durch kleinräumige Heterogenitäten bedingt sein können. Angesichts der begrenzten Auflösung des regionalen Modells, die durch die Diskretisierung vorgegeben ist, sollte man Abweichungen von lokalen Messwerten sicher nicht überbewerten. Andererseits könnte die Tatsache, dass die berechneten Druckspiegelhöhen in allen drei Bohrungen zu niedrig sind, auf einen systematischen Fehler hinweisen.

Möglicherweise wird die erwähnte Diskrepanz durch die Festlegung des Berechnungsausschnitts verursacht: sowohl die Modelluntergrenze als auch die Nordgrenze des Modells entsprechen nicht den natürlichen hydrogeologischen Grenzen (Figur 4.7). Somit wird der Gesamtfluss im Kristallin nur teilweise erfasst. Diese These wird durch die Tatsache unterstützt, dass der Grundwasserfluss durch die nördliche Modellgrenze nur etwa 8% vom gesamten Grundwasserhaushalt im Modell ausmacht. Ein vollständiger Einbezug des gesamten Einzugsgebiets im Schwarzwald würde die Fläche des exponierten Kristallins etwa verdoppeln und den Gesamtfluss im System erhöhen.

Im Bereich von Böttstein, Leuggern und Zurzach haben die Bohrbefunde eine ausgeprägte Wärmeanomalie mit Wärmeflussmaxima von 170 mW/m^2 (gegenüber Basiswerten von $50\text{-}80 \text{ mW/m}^2$ im Mittelland) ergeben. Aus der Gesamtbeurteilung der Daten und aufgrund der geologisch-tektonischen Verhältnisse kommt als Erklärung dieser geothermischen Verhältnisse einzig das vertikale Aufströmen von Tiefenwasser in Frage (BASLER & HOFMANN 1992). Das Ausmass und die Stärke der Anomalie deuten auf einen Zusammenhang mit dem Nordrand des Permokarbondrogens und der damit verbundenen starken tektonischen Zerrüttung des kristallinen Grundgebirges bis in grosse Tiefen hin. Hinweise auf aufsteigende Wässer ergeben sich auch aus den Messungen der Formationsdrücke in den Sondierbohrungen Böttstein und Leuggern.

Im hydrogeologischen Modell der Nagra wurden geothermische Effekte nicht berücksichtigt. In einer separaten Studie hat die Nagra daher den möglichen Einfluss geothermisch induzierter Grundwasserbewegungen untersucht. Sie kommt dabei zum Schluss, dass bei höheren hydraulischen Leitfähigkeiten ($K = 10^{-8} \text{ m/s}$) und einer veränderten Diskretisierung der Durchlässigkeitsverteilungen im kristallinen Grundgebirge der Grundwasserfluss durch Konvektion beeinflusst werden kann. Bei künftigen Grundwasserflussmodellen sollte deshalb der Einfluss der Temperatur mitberücksichtigt werden.

Insgesamt gesehen scheint das Fließfeld bezüglich der generellen Fließrichtungen plausibel zu sein. Das regionale Modell illustriert anschaulich das aufgrund der vorhandenen Daten anzunehmende grossräumige Grundwasserfließfeld. Da eine Kalibrierung angesichts der Datenlage nicht machbar war, ist eine quantitative Verwendung der Ergebnisse nur begrenzt möglich.

Lokales Modell

Mit dem lokalen Modell wurde versucht, die Fließverhältnisse im Untersuchungsgebiet West darzustellen. Wie beim regionalen Modell wird die Gleichung für stationären Grundwasserfluss mit konstanter Dichte gelöst. Bei der Modellkonzeptualisierung wurde ein sogenannter hybrider Ansatz gewählt, bei dem äquivalent-poröse, dreidimensionale Gesteinsvolumina und zwei-/dreidimensionale Störungszonen gleichzeitig verwendet wurden. Die Auswahl des Berechnungsausschnittes und die Implementierung der Randbedingungen führten dazu, dass die Ergebnisse sehr stark von Randbedingungen, die nur teilweise durch Daten abgesichert

sind, abhängig sind. Aufgrund dieser Unsicherheiten wurden die Zielsetzungen eher allgemein gehalten und ein schematisches Modell angestrebt, dessen hydrogeologische Eigenschaften für das Untersuchungsgebiet möglichst repräsentativ sein sollten.

Die hydrogeologische Interpretation und das daraus resultierende Konzept für das lokale Modell im Untersuchungsgebiet West beruht auf der Annahme, dass ein Netz von regionalen Störungen eine erhöhte Durchlässigkeit aufweist und das übrige Kristallin grundsätzlich in einen oberen, höher durchlässigen Bereich (*HPD*) und einen unteren, geringdurchlässigen Bereich (*LPD*) aufgeteilt werden kann. Für die Nagra ist dies die einfachste von mehreren möglichen Interpretationen. Wie bereits in Abschnitt 4.4 erwähnt, erachtet die HSK die Datenbasis als zu klein, um diesen Konzeptansatz der Durchlässigkeitsverteilung als wahrscheinlichste Lösung vertreten zu können. Vom Blickwinkel eines vorsichtigen, konservativen Vorgehens liegt die grundsätzliche Frage darin, ob geringdurchlässige Blöcke solcher Dimensionen (km-Bereich) überhaupt existieren. Die wenigen Sondierbohrungen liefern dazu keine belastbaren Daten. Problematisch erscheint insbesondere die schichtartige Abgrenzung der *HPD*/*LPD* Bereiche. Wie die hydraulischen Testergebnisse der Sondierbohrungen zeigten, ergibt sich im kristallinen Grundgebirge über den gesamten bisher erkundeten Tiefenbereich ein weit komplexeres Bild der Durchlässigkeitsverteilung, welches sich aus der Kombination von Trennflächengefüge und Lithologie herleiten lässt.

Als alternativer Modellansatz ist durchaus möglich, dass *LPD*-Bereiche in Form unregelmässig geformter Blöcke oder Prismen im *HPD*-Bereich eingebettet sind und die *HPD*/*LPD*-Grenzen vorwiegend schief bis vertikal liegen. Die HSK wertet deshalb die Ergebnisse des lokalen Modells als einen ersten Schritt zur Darstellung möglicher, genereller Grundwasser-Verhältnisse und die durchgeführten Parametervariationen als wertvolle Sensitivitätsbetrachtungen. Es gilt aber festzuhalten, dass weder mit dem direkten noch mit dem inversen Modellierungsansatz ¹ die in den Bohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten gemessenen Potentialverteilungen befriedigend reproduziert werden konnten. Die HSK regt deshalb an, dass auch alternative Durchlässigkeitsverteilungen untersucht werden.

Blockmodell

Das Blockmodell ist ein schematisches Kluftnetzwerk-Modell, das die Verhältnisse in einem geringdurchlässigen Block (*LPD*) im Grössenmassstab einer Endlagerkaverne nachbildet. Für die numerische Implementierung wurden stochastisch erzeugte Kluftverteilungen verwendet. Die Rechenergebnisse umfassen einerseits Abschätzungen über Anzahl, Verteilung und Spurenlängen transmissiver Klüfte und andererseits die Quantifizierung effektiver Blockdurchlässigkeiten und Flüsse in Trennflächensystemen. Für die dynamische Abschätzung der Zuflüsse zu einem Endlagerstollen wurden Klüfte mit verschiedenen Grössenverteilungen generiert und die entsprechenden Fliessmengen berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die effektive hydraulische Durchlässigkeit und damit die Flüsse von der Anzahl und lateralen Ausdehnung der Klüfte abhängig ist. Da der grösste Teil der Eingabedaten wie Häufigkeit, räumliche Verteilung und Ausdehnung der Trennflächen nur ungenügend durch Messdaten abgestützt sind, ist die Repräsentativität des generierten Kluftnetzwerkes für das Kristallingebiet West nicht gesichert. Auch sind die verwendeten

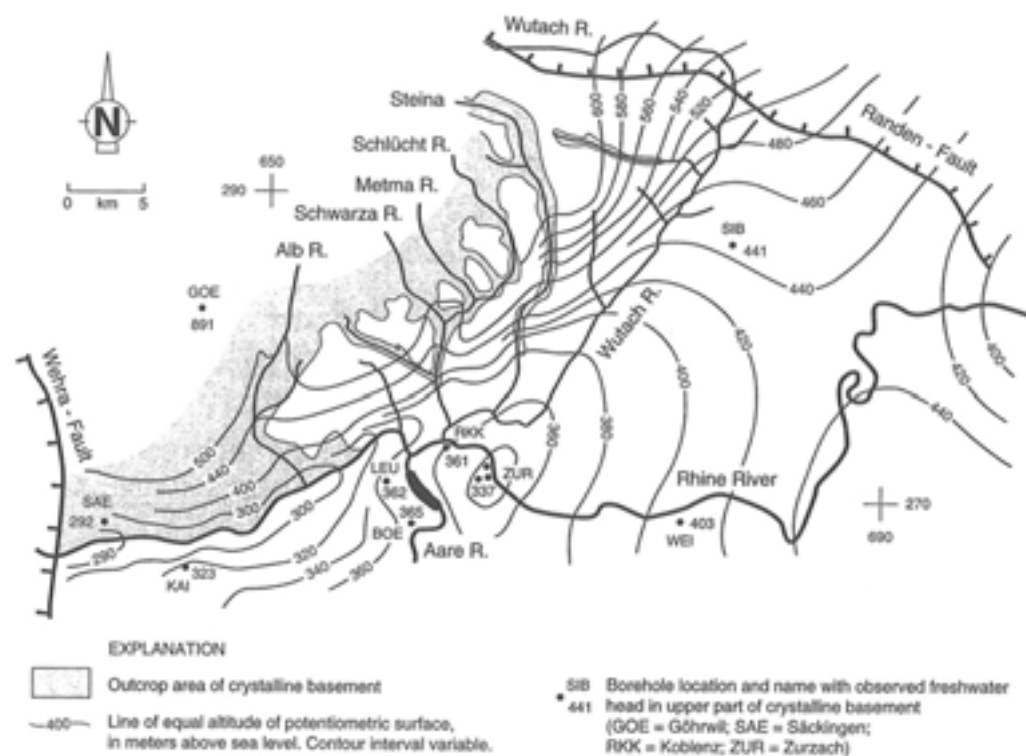
¹ Beim inversen Ansatz ist der Systemzustand an diskreten Punkten in Form von Messdaten bekannt und das Modell sucht die Modellparameter sowie die Anfangs- und Randbedingungen, welche den vorliegenden, an diskreten Punkten gemessenen Systemzustand erklären.

Gradientenverteilungen aus dem lokalen Modell noch zu wenig durch Daten gestützt. Die Existenz eines LPD-Blockes dieser Grösse ist fraglich. Die Ergebnisse haben daher eher qualitativen Charakter und können für Sensitivitätsbetrachtungen benützt werden.

Thermalquelle Zurzach

Seit mehreren Jahrzehnten wird aus dem kristallinen Grundgebirge bei Zurzach gespanntes Thermalwasser aus verschiedenen Produktionsbohrungen gewonnen und von der Thermalbad AG und der Mineralwasserfabrik Zurzach genutzt. Die geförderte Menge liegt nach Angaben des Kantons Aargau heute bei rund 1 m³/min. Im Synthesebericht (NTB 93-01) wurde die im kristallinen Grundgebirge ermittelte Potentialverteilung in einer Karte dargestellt (siehe Figur 4.8). Dabei zeichnet sich im Felsgrundwasserleiter des Grundgebirges bei Zurzach ein durch die Wasserförderung verursachter markanter Absenktrichter ab, dessen Einfluss bis ins Gebiet von Leuggern und Böttstein reicht. Da die in Leuggern und Böttstein angetroffenen Tiefenwässer des kristallinen Grundgebirges vom Wärmeinhalt wie auch in hydrochemischer Hinsicht (Haupt-, Spurenelemente und Isotopenzusammensetzung) identisch zum Thermalwasser von Zurzach sind, muss das Gebiet Zurzach-Leuggern-Böttstein als eine einheitliche Thermalwasserprovinz betrachtet werden.

Die Evaluation eines möglichen Endlagerstandortes derart nahe einer genutzten Thermalwasserzone bzw. einer Zone aufsteigender Tiefenwässer (Rhein als Vorfluter bzw. discharge area) erachtet die HSK als sehr problematisch. Die hohen Austrittstemperaturen der erwähnten Thermalwässer (bis 42°C in Zurzach) deuten darauf hin, dass das Wasser aus grösserer Tiefe vermutlich entlang des stark zergliederten Kristallins im Bereich des Nordrandes des Permokarbondrogens relativ schnell zur Biosphäre hochströmt. In dieser Situation kann die von der Geosphäre geforderte Barrierenwirkung nur vermindert eintreten.



Figur 4.8: Karte der Potentialverteilung im kristallinen Grundgebirge mit Absenktrichter von Zurzach (NTB 93-01)

Wasser-Gestein-Wechselwirkungsprozesse

Das lokale Modell der Nagra hatte primär zum Ziel, das Verständnis der grossräumigen Grundwasserströmung zu vertiefen, Fliessmengen für den Endlagerbereich zu quantifizieren und Sensitivitätsbetrachtungen durchzuführen. Geochemische Wechselwirkungsprozesse des Tiefenwassers mit dem Gestein und allfällige langfristige Veränderungen der Beschaffenheit des Gesteins über die zu betrachtenden grossen Zeitskalen wurden im Modell nicht berücksichtigt. Heute liegen neue Entwicklungen und eine neue Generation von Rechenmodellen vor, die eine simultane Modellierung gekoppelter reaktiver Stofftransportprozesse ermöglichen. Da in den Fliesssystemen des kristallinen Grundgebirges klare Hinweise auf Wasser-Gesteins-Wechselwirkungsvorgänge (Lösungs- und Ausfällungsprozesse) vorliegen und das Gebiet West im Bereich einer Exfiltrationszone von Thermalwasser liegt, erachtet es die HSK als notwendig, dass in Zukunft die Verwendung solcher reaktiver Stofftransportmodelle geprüft wird.

4.6 Hydrogeologischer Datensatz

Das in der Kristallin-I Studie vorgestellte Endlagerkonzept ist dem in Projekt Gewähr 1985 beschriebenen Konzept ähnlich, stützt sich aber auf einen neueren Stand der Daten bezüglich der Beschaffenheit der Geosphäre (Geosynthese NTB 93-01). Für die Sicherheitsanalyse hat die Nagra einen entsprechenden hydrogeologischen Datensatz zusammengestellt (NTB 92-04 und NTB 93-22).

Zur Überprüfung der Nagra-Modellrechnungen zum Nuklidtransport (Nahfeld, Geosphäre, Biosphäre) und der radiologischen Auswirkungen hat die HSK eigene, unabhängige Rechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 9). Für die Ausbreitungsrechnungen in der Geosphäre verwendet die HSK dabei einen Transportcode, der im wesentlichen folgende Prozesse nachbildet:

- eindimensionaler, advektiver Transport von Nukliden in einem wasserführenden System (*water conducting feature*) mit longitudinaler Dispersion;
- Diffusion der Nuklide in die Matrix des angrenzenden Nebengesteins;
- Sorption auf dem Transportweg einschliesslich der Matrix des Nebengesteins;
- Zerfall und Bildung von Tochternukliden.

Angesichts der nur beschränkt vorhandenen Daten ist die Verwendung eines relativ einfachen Transportmodells gerechtfertigt. Allerdings erfordert ein derartiges Modell ebenfalls eine starke Vereinfachung auf der Ebene des zugrundeliegenden konzeptionellen Modells. Dabei müssen die Eingabeparameter speziell im Hinblick auf das Modell hergeleitet werden. Zur numerischen Simulation der oben genannten Prozesse werden primär folgende neun Eingabeparameter benötigt:

- Darcy-Geschwindigkeit,
- Fliessporosität,
- longitudinale Dispersion,
- Transportlänge bzw. Länge des Fliesspfades,

- diffusionszugängliche spezifische Oberfläche,
- Matrixporosität,
- Sorptionskonstante,
- Diffusionskonstante,
- effektive Eindringtiefe der Nukliddiffusion in die Gesteinsmatrix.

Von den oben genannten Parametern müssen die ersten fünf aus den Ergebnissen der hydrogeologischen Felduntersuchungen hergeleitet werden; die letzten vier werden normalerweise durch Messungen im Labor bestimmt, auch wenn, zumindest theoretisch, die Matrixporosität und die Sorptionskonstante mit entsprechenden Tracertests im Feld indirekt bestimmt werden könnten. Eine korrekte Bestimmung der longitudinalen Dispersion ist im Feld aufwendig und schwierig. Es wird deshalb auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Dieser Ansatz wurde auch von der Nagra gewählt und entspricht dem üblichen Vorgehen.

Für eine unabhängige Herleitung der hydrogeologischen Parameter stützt sich die HSK und EMCH & BERGER (1998) als beigezogener Experte auf die Befunde der Sondierbohrungen Böttstein, Leuggern und Kaisten, wobei folgende Grundsätze berücksichtigt wurden:

- Wegen der ungenügenden Datenbasis können statistische Verteilungen nur mit grossen Ungewissheiten abgeleitet werden. Die Modellrechnungen wurden deshalb mit Einzelwerten (Mittelwerten) und wenigen diskreten Parametersätzen durchgeführt.
- Die mögliche Bandbreite, die sich aus der Variabilität und den Unsicherheiten der Parameter ergibt, muss deshalb auf andere Weise zum Ausdruck gebracht werden. Im vorliegenden Fall wurden dem sogenannten Referenzfall der Nagra („*Reference Case*“) verschiedene plausible Alternativen gegenübergestellt, die sich ebenfalls aus den Bohrdaten herleiten lassen.
- Jeder abgeleitete Datensatz muss in sich konsistent sein.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte hat die HSK für die Überprüfung der Sicherheitsanalyse folgenden hydrogeologischen Datensatz bzw. folgende fünf Varianten hergeleitet (für den detaillierten Nachvollzug sei auf den entsprechenden ausführlichen Bericht der HSK-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (EMCH & BERGER 1998) verwiesen):

1. **Referenzfall der Nagra:** Dieser entspricht weitgehend dem "*Reference Case*" der Nagra; das konzeptuelle Modell einer *Lower Permeability Domain* (LPD) für den Wirtgesteinsblock im tieferen Kristallin wird übernommen.
2. **Variante LPD oder LPD_p:** Diese Variante beruht auf den gleichen konzeptuellen Annahmen wie im "*Reference Case*" mit LPD; bei der Herleitung der Parameterwerte werden jedoch weitgehend konservative Werte (90%-Wert²) verwendet.
3. **Variante LC:** Die konzeptionelle Trennung des tieferen Kristallins LC (*Lower Crystalline*) in eine LPD (*Lower Permeability Domain*) und MWCF (*Major Water Conducting Faults*) wird nicht übernommen; stattdessen werden alle Daten aus dem LC als regio-

² Dieser Wert bedeutet, dass der tatsächliche Wert mit 90%iger Aussagesicherheit kleiner oder gleich dem 90%-Wert ist.

nale bzw. lokale Variation einer Grundgesamtheit aufgefasst. Daraus resultieren wesentlich höhere Wasserflüsse.

4. **Optimistische Variante LC:** Diese Variante beruht auf den gleichen konzeptuellen Annahmen wie Variante 3, bei der Herleitung der Parameterwerte werden jedoch konsequent optimistische Werte (10%-Wert³) verwendet.
5. **Alternative Variante X:** Bei dieser Variante wird das gesamte Kristallin mit Ausnahme der obersten 100 m (Verwitterungszone) als eine Grundgesamtheit bzw. als eine einzige hydrogeologische Domäne aufgefasst. Aus dieser Variante resultieren die höchsten Wasserflüsse.

Vergleicht man die abgeleiteten HSK-Varianten mit dem Referenzfall der Nagra, so ergeben sich im Wesentlichen die folgenden zwei markanten Unterschiede:

- Aufgrund der Analyse der Bohrkernbefunde (MILNES 1996, EMCH & BERGER 1998) werden für die verschiedenen Typen von wasserführenden Strukturen höhere Kluftdichten abgeleitet. Daraus ergeben sich für die abgeschätzte, diffusionszugängliche spezifische Oberfläche deutlich höhere Werte.
- Die unterschiedliche Interpretation der Transmissivitätsverteilung führt bei den konzeptuellen Modellvarianten LC und X zu wesentlich höheren, effektiven hydraulischen Blockdurchlässigkeiten. Dadurch erhöht sich entsprechend der Darcyfluss im Endlager um mehrere Größenordnungen.

Für die Varianten 1, 2 und 3 hat die HSK eigene Ausbreitungsrechnungen bzw. Konsequenzanalysen durchgeführt, die in Abschnitt 9.3 als Rechenvarianten Nr. 2 (Basisfall), 8 (Variante LPD) und 9 (Variante LC) dargelegt und besprochen werden.

³ Dieser Wert bedeutet, dass der tatsächliche Wert mit nur 10%iger Aussagesicherheit kleiner oder gleich dem 10%-Wert ist.

5. Beurteilung des Abfallinventars

5.1 Festlegung des Inventars

Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I geht von einem Inventar aus, das dem Anfall an verglastem hochaktivem Abfall (HAA) aus 40 Jahre Betrieb der schweizerischen Kernkraftwerke (120 GW_e-Jahre) mit Wiederaufarbeitung aller abgebrannten Brennelemente entspricht. Die Nuklidzusammensetzung folgt dem modellhaften Inventar MIRA (NTB 93-21) für HAA der COGEMA, das auf eigenen Berechnungen der Nagra zur Ergänzung der COGEMA-Spezifikation beruht. Als Grundlage wird ein Druckwasserreaktor-Brennstoff mit einem Abbrand von 33'000 MW_ed/tU angenommen, der drei Jahre nach der Entnahme aus dem Reaktor wiederaufgearbeitet wird. Die Nagra bringt gewisse Korrekturen an, um damit auch Siedewasserreaktor-Brennstoff abzudecken. In der Sicherheitsanalyse wird von einer Zwischenlagerung des HAA während 40 Jahren vor der Endlagerung ausgegangen.

Das für Kristallin-I festgelegte Inventar entspricht nicht dem heute effektiv erwarteten Inventar an hochaktiven Abfällen aus den schweizerischen Kernkraftwerken. Einerseits bestehen leichte Unterschiede in der Zusammensetzung der HAA von BNFL und COGEMA, andererseits ist davon auszugehen, dass der grössere Teil des gebrauchten Brennstoffs ohne Wiederaufarbeitung endgelagert werden wird. Dies wird insbesondere zu einem weit höheren Inventar an Uran und Plutonium im Endlager führen. Zudem sind die heutigen Abbrände durchwegs höher als für Kristallin-I vorausgesetzt.

Die Nagra diskutiert die Relevanz des Inventars im obigen Sinn im Sicherheitsbericht nicht, stellt aber fest, dass die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse mit dem gewählten Inventar ein „benchmark“ bei der Betrachtung möglicher Inventarvarianten sein sollen.

Nach Ansicht der HSK können gewisse Ziele der Sicherheitsanalyse Kristallin-I ohne weiteres mit dem von der Nagra verwendeten, approximativen Inventar angegangen werden. Das gilt beispielsweise für das Erproben neuer Verfahren innerhalb der Sicherheitsanalyse. Es gilt auch, wenn es darum geht, die relativen Sicherheitsbeiträge der technischen und der geologischen Barrieren zu verstehen oder die mögliche Rückhaltewirkung des Wirtgesteins zu untersuchen. Das Inventar ist insbesondere (bis auf einen Faktor 2) mit dem im Projekt Gewähr 1985 verwendeten HAA-Inventar vergleichbar. Bei anderen von der Nagra genannten Zielsetzungen ist es hingegen nicht evident, wie sie ohne genaueren Bezug auf das tatsächlich zu erwartende Inventar sinnvoll erreicht werden können. Dazu gehören:

- Die Neubewertung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz als mögliches Wirtgestein für ein Endlager hochaktiver Abfälle.
- Die Bestimmung des zu erwartenden Sicherheitsniveaus eines solchen Endlagers aufgrund gemässigt konservativer und robuster Argumente.
- Die Bestimmung der erwünschten Bandbreite der für das Wirtgestein wesentlichen Parameterwerte als Hinweise für weitere Felduntersuchungen.

5.2 Berechnung von Zerfall und Wärmeleistung

Der Sicherheitsbericht enthält Angaben zur Gesamtaktivität des Endlagerinventars 4 und 40 Jahre nach der Entnahme der Brennelemente aus dem Reaktor. Die erste Zahl entspricht der Frist, innert welcher die Wiederaufarbeitung stattfindet, die zweite dem Zeitpunkt, zu welchem die Abfälle in das Endlager gebracht werden. Die Wärmeleistung wird für einige ausgewählte Zeitpunkte angegeben. Für die Berechnung der Nuklidfreisetzung werden die nuklidspezifischen Aktivitäten für die Zeitpunkte 1040 (Referenzfall, Behälterversagen 1000 Jahre nach Einlagerung) und 140 Jahre (frühzeitiges Behälterversagen 100 Jahre nach Einlagerung) nach Entnahme der Brennelemente benötigt.

Die HSK hat die Zerfalls- und Wärmeleistungsangaben mit eigenen Berechnungen geprüft (HSK 23/49). Sie hat bei den berechneten Aktivitäten kleinere Abweichungen (bis 8%) festgestellt. Diese Abweichungen sind zwar für die Ergebnisse dieser Sicherheitsanalyse ohne wesentliche Bedeutung, sollten aber nicht auftreten. Nachträgliche Abklärungen der Nagra bestätigten die Korrekturen der HSK.

5.3 Auswahl der Nuklide für die Berechnung der Freisetzung

Von den 98 Nukliden, die im Aktivitätsinventar des Endlagers aufgeführt sind, sind viele wegen geringer Aktivität oder kurzer Halbwertszeit für die Langzeitsicherheit des Endlagers ohne Bedeutung. Die Nagra wählt im Sicherheitsbericht für die Berechnung der Nuklidmigration durch Nahfeld und Geosphäre die für die mögliche Strahlenexposition massgebenden Nuklide aus. Weggelassen werden Einzelnuclide, deren Dosisbeitrag bei einer vereinfachten Abschätzung der Trinkwasserdosis kleiner als 0,0001 mSv beträgt, d.h. kleiner ist als ein Tausendstel des Grenzwertes aus Schutzziel 1 der Richtlinie HSK-R-21. Die Zerfallsketten der Actiniden werden beibehalten, in den Berechnungen allerdings nur vereinfacht berücksichtigt (kurzlebige Tochternuklide werden zum Mutternuklid geschlagen und Verzweigungen werden eliminiert). Ausserdem werden zwei früher im Sicherheitsbericht zum Projekt Gewähr betrachtete, im Kristallin-I aber nicht massgebliche Nuklide beibehalten (Ni-59 und Pd-107). Insgesamt verbleiben 25 Nuklide für die weitere Berechnung.

Die vereinfachte Berechnung zur Auswahl der Nuklide geht von den Aktivitäten 1000 Jahre nach Einlagerung der Abfälle aus, entsprechend dem Beginn der Freisetzung im Referenzfall (nach angenommenem Versagen der Endlagerbehälter). In der Berechnung wird das Auflösungsverhalten des HAA-Glaskörpers im Grundwasser sowie der gesamte Wasserfluss der zur Verdünnung wirksamen oberflächennahen Aquifere gemäss Referenzfall verwendet.

Beurteilung der Nuklidauswahl

Die HSK beurteilt die Auswahl der Nuklide für die weitere Berechnung aus den für die vereinfachte Freisetzungsberechnung angenommenen Daten als korrekt. Folgende Hinweise sind aber angebracht:

Die für den Referenzfall festgelegte Freisetzungsrate der Nuklide aus dem Glaskörper ist von seiner Auflösungsrate und der Oberflächenvergrößerung durch thermisch verursachte Zerstückelung abhängig. In ihrer Beurteilung im Abschnitt 7.2 empfiehlt die HSK konservativere Annahmen über die Oberflächenvergrößerung und die Korrosionsrate des Glases als sie die Nagra trifft. Mit ihren Annahmen erhält die HSK bei sonst gleichem Selektionsverfahren (und mit der Verdünnung auf dem Freisetzungsweg, die die Nagra annimmt) als zusätzliches Nuklid Nb-94 (HSK 23/50). Als weiteres Nuklid wäre auch Sm-151 nahe am Kriterium. Eine

konservativere Annahme der HSK über die Wasserführung der Rheinschotter im Exfiltrationsgebiet, siehe HSK-Datensatz in EMCH & BERGER (1998), könnte weiter zur Selektion von Ho-166m führen.

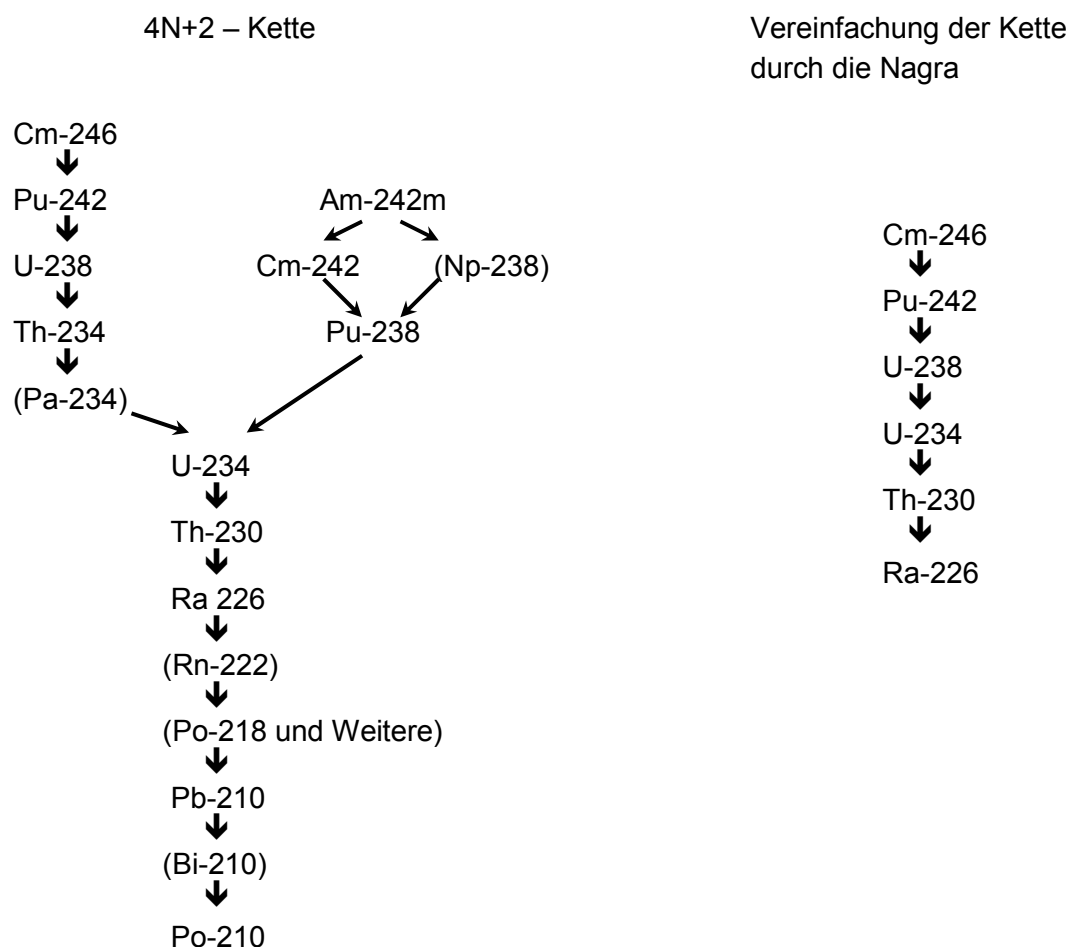
Bei Szenarien mit frühzeitigem Versagen der Endlagerbehälter oder einer pessimistischen Annahme zur Auflösungsrate der Glasmatrix werden weitere Nuklide wichtig. Im Sicherheitsbericht wird der Fall eines Behälterversagens 100 Jahre nach der Einlagerung betrachtet und die dann in der Toxizität dominanten Nuklide Sr-90 und Cs-137 zusätzlich berücksichtigt. Eine genauere Analyse würde zur Selektion einiger weiterer Einzelnuclide führen (Ni-63, Ag-108m, Sn-121m, Eu-152, Eu-154). Ebenfalls im Sicherheitsbericht wird der Fall der 100-fach schnelleren Glasauflösung betrachtet. In diesem Fall wäre auch bei angenommenem Beginn der Freisetzung erst 1000 Jahre nach Einlagerung die Berücksichtigung weiterer Nuklide angezeigt (C-14, Ni-63, Mo-93, I-129, Sm-147).

Der Nagra wird empfohlen, bei späteren Sicherheitsanalysen die Nuklidselektion für jedes einzelne betrachtete Szenarium zu überprüfen um die Nuklid Auswahl bei Bedarf zu vervollständigen.

Vereinfachungen der Zerfallsketten

Die Vereinfachungen der Zerfallsketten, die im Sicherheitsbericht gemacht werden, sind von zweierlei Art. Mehrere relativ kurzlebige Nuklide werden als im radioaktiven Gleichgewicht mit dem jeweiligen Mutternuklid angenommen und ihre Migration nicht separat berechnet. Die Dosisfaktoren der nicht aufgeführten Nuklide werden der Mutter zugeschlagen. Diese Vereinfachung ist sinnvoll, da bei kurzer Halbwertszeit des Tochternuklids auch ein allfälliger Unterschied im Sorptionsverhalten von Mutter- und Tochternuklid nicht zu einer nennenswerten Änderung der Freisetzung aus Nahfeld und Geosphäre führt.

Die Zerfallsketten werden weiter durch das Weglassen von ganzen Zweigen auf eine lineare Form gebracht. Diese Veränderungen führen bei den Referenzannahmen der Sicherheitsanalyse zu keinen grossen Abweichungen von den korrekten Werten. Am heikelsten dürfte die Eliminierung des Pu-238-Zweigs aus der 4N+2-Kette sein (Figur 5.1). Beim Inventar der HAA entsteht nämlich während der ersten Jahrhunderte der grösste Teil des U-234 aus dem Zerfall vom Pu-238 und nicht aus dem in den Migrationsberechnungen beibehaltenen Zweig des U-238. Zu späteren Zeiten ist das Umgekehrte der Fall (siehe HSK 23/49). Im Referenzfall der Sicherheitsanalyse findet die Freisetzung der Nuklide aus dem Endlagerbehälter erst 1000 Jahre nach der Einlagerung statt. Bis zu diesem Zeitpunkt werden Nuklidentstehung und -zerfall ohne die genannten Vereinfachungen berechnet. Nach 1000 Jahren ist der Beitrag des Pu-238-Zweigs zum U-234 nicht mehr dominant und die Näherung der Nagra vertretbar. Vorsicht ist hingegen bei der Analyse von Szenarien mit frühzeitigem Versagen der Endlagerbehälter geboten. Wie oben erwähnt, betrachtet die Nagra als Parametervariation den Freisetzungsbeginn nach 100 Jahren. Gemäss Angaben des Sicherheitsberichts rechnet die Nagra hier durchwegs mit den vereinfachten Zerfallsketten. Das führt zu einer Unterschätzung der Aktivitäten in der 4N-Kette, worauf im Sicherheitsbericht auch hingewiesen wird. Weit stärker ist aber die Unterschätzung der Aktivitäten von U-234 und seinen Zerfallsprodukten in der 4N+2-Kette (siehe HSK 23/49), die im Sicherheitsbericht nicht diskutiert wird. Die Abweichungen bleiben bis in den Zeitraum nach 1'000'000 Jahren wesentlich. Die Vereinfachungen der 4N+3-Kette bieten hingegen keine Probleme.



Figur 5.1: Zerfallsschema der 4N+2 -Kette (in Klammern: kurzlebige Nuklide) sowie die Vereinfachung für die Ausbreitungsrechnungen im Nahfeld und in der Geosphäre.

5.4 Stabile Nuklide

In Bezug auf die radiologische Sicherheit des Endlagers ist vor allem das Inventar an radioaktiven Nukliden relevant. Bei Elementen, deren Konzentrationen auf dem Freisetzungsweg die Löslichkeitslimite erreichen, müssen auch die stabilen Isotope berücksichtigt werden. Gemäss Sicherheitsbericht wird die Konzentration beim Übergang zwischen Endlagerbehälter und Bentonitpackung bei mehreren Elementen durch das Erreichen der Löslichkeitslimite bestimmt. Von den nach der Auswahl der Nuklide für die Ausbreitungsrechnung verbleibenden Elementen haben aber nur sechs (Cs, Ni, Se, Pd, Sn, Zr) auch stabile Isotope. Für Cäsium und Nickel wird von der (hohen) Löslichkeitslimite nicht Gebrauch gemacht. Für drei der übrigen vier Elemente enthält der Sicherheitsbericht Angaben zum Inventar der stabilen Nuklide. Für Zr wird keine Angabe gemacht. Im Sicherheitsbericht wird die Herkunft dieser Daten nicht klar referenziert. Auf Nachfrage hat die Nagra klargestellt, dass die Inventare der stabilen Nuklide bei der Überprüfung und Ergänzung des Inventars der HAA-Glaskokillen durch eigene Berechnungen bestimmt wurden. Diese Ergebnisse sind im internen Bericht NIB 97-44 der Nagra dokumentiert.

Im Sicherheitsbericht wird der Einfluss der stabilen Nuklide auf die Freisetzung aus dem Nahfeld als Parametervariation untersucht. Bei Pd und Se wird die Freisetzung der entsprechenden Radioisotope im Referenzfall dank den stabilen Nukliden um eine bis zwei Grös-

senordnungen reduziert. Im Referenzfall dominiert Se während der ersten Zehntausende von Jahren die Dosis. Die Berücksichtigung der stabilen Nuklide ist deshalb sinnvoll.

5.5 Selen-Inventar

Die international anerkannte Halbwertszeit von Se-79 hat inzwischen eine Korrektur um eine bis zwei Grössenordnungen (je nach Referenz, siehe z. B. PFENNIG et al. (1998)) nach oben erfahren. Die Änderung dürfte einen wesentlichen Einfluss auf das Aktivitätsinventar dieses Nuklids im Brennelement und anschliessend in der HAA-Glaskokille haben. Wie oben erklärt, ist Se-79 bei der frühen Freisetzung im Referenzfall relevant. Der Nagra wird deshalb empfohlen, ihre Inventarberechnung mit den neuen Daten aufzudatieren.

6. Beurteilung der geochemischen Daten

6.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel werden die Retardierungsvorgänge, die auf chemischen Vorgängen in der Geosphäre und in den technischen Barrieren beruhen, quantitativ beschrieben und beurteilt. Durch die Auflösung des radioaktiven Abfallglases nach Wasserzutritt werden Radionuklide aus der Abfallmatrix freigesetzt. Falls dabei die Löslichkeitslimite überschritten wird, werden die Radionuklide durch die Bildung schwerlöslicher Festphasen teilweise wieder immobilisiert. Die in Lösung verbleibenden Radionuklide diffundieren durch das Nahfeld und werden dabei zum Teil entsprechend den Nahfeld-Sorptionskoeffizienten im Bentonit adsorbiert. Nach dem Übertritt ins kristalline Wirtgestein kommen die Radionuklide auf ihrem Migrationspfad mit den Mineraloberflächen der Wasserfließsysteme in Kontakt und werden dort ebenfalls adsorbiert, entsprechend den Fernfeld-Sorptionskoeffizienten. Diese drei geochemischen Retardierungsprozesse werden von der Nagra als reversible Vorgänge betrachtet.

Die Nagra rechnet mit einer konstanten Auflösungsrate des Abfallglases und nimmt an, die Radionuklide seien homogen im Glas verteilt. Dadurch ergibt sich im Modell eine kongruente Freisetzung der Radionuklide gemäss Abfallinventar. Im Grenzbereich zwischen Abfallglas und Bentonit bilden sich Sekundärphasen, zum Beispiel aus Korrosionsprodukten des Stahlbehälters und der Glasmatrix, auf denen gewisse Radionuklide zusätzlich sorbieren werden. Die Nagra hat diese Prozesse nicht berücksichtigt, was eine konservative Vereinfachung darstellt. Im Weiteren nimmt die Nagra an, die geochemischen Bedingungen seien im gesamten Nahfeldbereich homogen. In Bezug auf die analytische Zusammensetzung des Porenwassers und des Bentonits erachtet die HSK diese Annahme als vernünftig. Die Frage der Redoxbedingungen ist jedoch komplexer. Ein "Nahfeld-Eh"⁴ ist schwer vorauszusagen, weil die redox-aktiven Spezies nicht klar identifiziert sind und es somit zumindest fraglich ist, ob ein angenommener "Nahfeld-Eh" für das ganze Nahfeld Gültigkeit hat. Bei Radionukliden, deren chemisches Verhalten unter Nahfeldbedingungen redox-sensitiv ist, ist diese Ungewissheit in den Sicherheitsmargen zu berücksichtigen.

Eine weitere Ungewissheit stellt die Temperatur dar. Die Umgebungstemperatur des Wirtgesteins wird mit 55°C angenommen und kann in der Nähe der Abfallbinde wegen der Wärmeproduktion des radioaktiven Abfalls über grössere Zeiträume höher sein und zwar je nach Abstand der horizontalen Stollen (NIB 93-72). Löslichkeitslimiten, die aus tabellierten Gleichgewichtskonstanten abgeleitet werden, beziehen sich auf 25°C, und ihre Temperaturabhängigkeit ist in vielen Fällen nicht bekannt. Auch Sorptionsdaten werden meistens bei Raumtemperatur gemessen. Den hergeleiteten Löslichkeitslimiten und Sorptionsdaten wird keine oder eine vernachlässigbare Temperaturabhängigkeit zugeschrieben. Bei der Herleitung der Löslichkeitslimiten (NTB 94-08) wird diese Problematik zwar erwähnt und als Quelle einer beträchtlichen Unsicherheit identifiziert, quantitativ bleibt der Temperatureinfluss in der Folge aber unberücksichtigt. Im Bericht zu den Sorptionsdaten (NTB 93-06) wird das Temperaturproblem dagegen überhaupt nicht angesprochen.

⁴ Der Eh-Wert ist das Redoxpotential eines Systems relativ zur Standard-Wasserstoffelektrode. Er wird durch ein dominierendes Redoxpaar bestimmt. In einem komplexen System kann die Präsenz mehrerer Redoxpaare zu inhomogenen Redoxbedingungen führen.

Für alle geochemischen Daten hat die Nagra einen *realistischen* und einen *konservativen* Wert vorgeschlagen. Im Sicherheitsbericht (NTB 93-22) werden die realistischen Daten als "realistisch-konservativ" bezeichnet, um zum Ausdruck zu bringen, dass es sich nicht um *best estimates*, sondern um robuste Werte handelt, die im konservativen Bereich der realistischen zu erwartenden Wertebereiche liegen. Bei der Wahl der konservativen Sorptionsdaten wurde oft der realistische Wert um einen Faktor 10 reduziert, in der Annahme, dadurch würden die verbleibenden Unwägbarkeiten ausreichend abgedeckt. Kommentare der HSK zu dieser Praxis sind weiter unten aufgeführt. Dabei ist jedoch zu erwähnen, dass die Erarbeitung der von der Nagra benutzten Datensätze (Löslichkeiten: NTB 94-08 bzw. Sorption: NTB 93-06) schon recht weit zurückliegt, und dass seither viele neue Untersuchungen durchgeführt wurden, die zu neuen Resultaten geführt haben. Auch die Beurteilung der in Kristallin-I verwendeten Daten durch die HSK liegt schon mehrere Jahre zurück und berücksichtigt deshalb die neueren Untersuchungen nicht. Eine neue Beurteilung wird zurzeit im Rahmen der behördlichen Begutachtung des Entsorgungsnachweises durchgeführt.

6.2 Wasserzusammensetzung

Die Wasserzusammensetzung ist für das chemische Verhalten der Radioelemente von grosser Bedeutung. Sie bestimmt die chemische Form, in der die Radioelemente vorliegen und hat damit einen direkten Einfluss auf deren Löslichkeit und Sorptionsverhalten. Als Hauptparameter der Wasserzusammensetzung wird meist der pH-Wert angegeben, sowie die Ionenstärke als Mass für den Mineralgehalt. Das Redoxpotential (Eh-Wert) wird ebenfalls oft mit der Wasserzusammensetzung erwähnt, obwohl es im geologischen Milieu im Allgemeinen durch Festphasen und weniger durch Wasserinhaltsstoffe bestimmt wird. Der Eh-Wert ist von entscheidender Bedeutung für die Mobilität redoxsensitiver Elemente wie Tc, U, Np, Pu.

Die Nagra unterscheidet zwischen einem Grundwasser "Kristallin West" und einem Grundwasser "Kristallin Ost". Die Zusammensetzung des Referenzwassers "Kristallin West" entspricht einer Synthese der Wasseranalysen aus den Bohrungen Zurzach, Leuggern, Böttstein und Kaisten, während die Zusammensetzung des Referenzwassers "Kristallin Ost" auf Wasserproben aus der Bohrung Siblingen beruht. Die Wasserzusammensetzungen sind experimentell gut abgestützt (NTB 93-01, NTB 93-07). Die beiden Referenzwässer sind einander recht ähnlich (pH \approx 7.7, Ionenstärke 0.01-0.02 mol·dm⁻³), unterscheiden sich aber im Redoxpotential. Im Referenzwasser "Kristallin West" entspricht das tiefste gemessene Redoxpotential aller Wasserproben (-0.18 V) etwa dem Gleichgewicht zwischen Goethit und Eisen(II) in Lösung und wurde deshalb selektioniert. Für das Referenzwasser "Kristallin Ost" wurde das einzige gemessene Potential (-0.03 V) als Referenzwert verwendet. Basierend auf verschiedenen möglichen Redox-Gleichgewichten von Eisen und Uran gibt die Nagra für das Redoxpotential in beiden Wässern eine theoretische Bandbreite von -0.24 V bis -0.03 V an (NTB 93-01). Die HSK erachtet diese Eckwerte als nachvollziehbar und realistisch. Sie zeigen, dass die auf Einzelmessungen beruhenden, für die beiden Referenzwässer definierten Redoxpotentiale von -0.18 V (West) bzw. -0.03 V (Ost) mit Vorsicht verwendet werden müssen.

Die Zusammensetzung des Nahfeldwassers hat die Nagra mit Hilfe eines Modells (NTB 93-45) hergeleitet, das auf Ionenaustauschgleichgewichten und Sättigung mit mehreren Mineralphasen beruht. Es ist bisher nicht gelungen, die Zusammensetzung des Porenwassers in hochverdichtetem Bentonit analytisch zu bestimmen. Zudem bestehen Zweifel, ob aus hochverdichtetem Bentonit ausgepresstes Wasser für das Porenwasser in den Zwischenschich-

ten des Tons repräsentativ ist (HORSEMAN et al. 1996, Kap. 3.7.2). Somit kann die für die Abschätzung der Löslichkeiten und Nahfeld-Sorption wichtige chemische Zusammensetzung des Porenwassers im Bentonit nur mit Hilfe von Modellen abgeschätzt werden. Seit der Publikation des Sicherheitsberichts (NTB 93-22) sind in Bezug auf die Kenntnis der chemischen Vorgänge im Bentonit einige Fortschritte gemacht worden. So wird heute zum Beispiel eher ein tieferer pH-Wert und eine höhere Ionenstärke als im Nagra-Referenzwasser für das Nahfeld erwartet. Auch das Redoxpotential bleibt nach wie vor ein Unsicherheitsfaktor. Die Nagra begründet ihren gewählten Eh-Wert für das Nahfeld von -0.40 V, der auf einem Gleichgewicht zwischen Magnetit und Haematit bei $\text{pH} = 9.0$ beruht, mit der Präsenz von Eisenkorrosionsprodukten und reduzierenden Mineralphasen wie Pyrit im Nahfeld (NTB 94-08). Falls allerdings der zwar thermodynamisch weniger stabile, aber in der Natur häufig anzutreffende Goethit statt Haematit für das Redoxpotential bestimmend ist, müssen Eh-Werte bis zu $+0.1$ V erwartet werden (NTB 93-45). Die HSK ist der Auffassung, dass diese Bandbreite ein beträchtliches Unsicherheitspotential für die Löslichkeit und für die Nahfeldsorption der redox-sensitiven Elemente beinhaltet.

6.3 Löslichkeiten

Im Grenzbereich zwischen Abfallmatrix und Bentonit kann es zu einer Aufkonzentrierung von Radionukliden in der wässrigen Phase kommen, wenn durch die Auflösung der Glasmatrix mehr Radionuklide in Lösung gelangen als durch das Nahfeld wegdiffundieren können. Diese Anreicherung kann bei einigen Elementen Übersättigungen zur Folge haben, die zur Ausfällung von Festphasen führen. Bei der Festlegung sogenannter Löslichkeitslimiten geht es um die Frage, auf welche Weise die Radionuklide durch Festkörperbildung immobilisiert werden. Dafür sind Kenntnisse über die chemische Zusammensetzung und Stabilität der möglichen reinen Phasen und Mischphasen erforderlich. Es ist auch zu berücksichtigen, dass viele natürlich vorkommende und gut charakterisierte Mineralphasen sich nicht durch Ausfällung bilden können, auch wenn die Lösung aufgrund der thermodynamischen Daten theoretisch "übersättigt" ist.

Die von der Nagra verwendeten maximalen Löslichkeiten (NTB 94-08) basieren zum grossen Teil auf Abschätzungen mittels thermodynamischer Daten, teilweise unter Miteinbezug chemischer Ähnlichkeiten unter den verschiedenen Elementen. Nur selten waren Löslichkeitsmessungen unter relevanten Bedingungen verfügbar. Zudem erwartet die Nagra bei einigen Radionukliden, dass sie aufgrund ihres geringen Inventars kaum reine Festphasen bilden werden, sondern in Festphasen chemisch ähnlicher Elemente, die in wesentlich grösserer Menge vorhanden sind, eingebaut werden. Dieses Verhalten wird in der Geochemie häufig beobachtet und ist typisch für Spurenelemente. Es führt zu tieferen maximalen Konzentrationen, als mit der Bildung reiner Festphasen vorausgesagt würde. Der Abschätzung liegt die Annahme zugrunde, dass die maximalen Lösungskonzentrationen der Spurenelemente und der chemisch dominierenden Elemente im gleichen Verhältnis stehen wie ihre Inventare. Die Inventare wurden ab dem Zeitpunkt 1000 Jahre nach der Einlagerung berücksichtigt, und aus dem ungünstigsten Verhältnis wurden die maximalen Löslichkeiten der Spurenelemente abgeleitet. Das verwendete Modell setzt voraus, dass der Einbau der Spurenelemente in die Festphase ausreichend schnell abläuft. Die HSK erachtet dieses Vorgehen als vertretbar, da die Bildung von Mischphasen chemisch ähnlicher Elemente auch in der Natur beobachtet wird. Es ist aber notwendig, die gemachten Annahmen, insbesondere die postulierte Beziehung der Konzentrationsverhältnisse, für die betroffenen Radionuklide experimentell zu

bestätigen. Wegen der fehlenden experimentellen Bestätigung setzt die HSK den konservativen Wert für Radium relativ hoch an (HSK-AN-2954).

Die maximalen Löslichkeiten für das Nahfeld sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die oben beschriebene inventarbedingte Reduktion der maximalen Konzentration durch Mischphasenbildung, die auch als "Verdünnungseffekt" bezeichnet wird, wurde von der Nagra bei Curium, Radium und Samarium angewandt und bei Plutonium und Protactinium zur Bestätigung der selektionierten Werte beigezogen. Direkte experimentelle Löslichkeitsmessungen liegen den Werten von Thorium, Uran und Plutonium zugrunde. Für Nickel wurde von der Nagra keine Löslichkeitslimite eingesetzt.

Die Beurteilung der HSK ist in HSK-AN-2954 ausführlich beschrieben. Die von der Nagra festgelegten realistischen Werte sind nachvollziehbar und decken Unsicherheiten zum Teil ab. Abweichende Beurteilungen der HSK sind in Tabelle 6.1 mit Fussnoten kommentiert. Die Löslichkeit von Neptunium wurde in den Freisetzungsberechnungen der HSK derjenigen von Uran angeglichen, liegt aber realistischlicherweise wohl tiefer, siehe Fussnote 1 in Tabelle 6.1.

Die konservativen Werte sollten die Ungewissheiten weitgehend abdecken. Da Ungewissheiten naturgemäss schwierig zu quantifizieren sind, empfiehlt die HSK, die konservativen Werte grosszügig anzusetzen. Tabelle 6.1 zeigt, dass die konservativen Werte der HSK in vielen Fällen höher angesetzt sind als die der Nagra oder ganz fehlen (Bezeichnung „hoch“). Die häufigsten Gründe der Abweichungen sind fehlende experimentelle Bestätigung und Ungewissheiten in den Redoxbedingungen.

6.4 Sorptionsdaten

Sorptionsdaten (auch Sorptionskonstanten, Sorptionskoeffizienten, Verteilungskoeffizienten, K_d - und R_d -Werte genannt) beschreiben das Ausmass der Haftung gelöster chemischer Elemente auf Gesteinsoberflächen. Sie werden wie Gleichgewichtskonstanten verwendet und quantifizieren in summarischer, stark vereinfachender Weise die zwischen Radionukliden und Gesteinsoberflächen auftretenden chemischen und physikalischen Wechselwirkungen. Die K_d -Werte lassen sich nur dann wissenschaftlich nachvollziehen, wenn die Art dieser Wechselwirkungen bekannt ist, was somit für die Beurteilung der Zuverlässigkeit der K_d -Werte essentiell ist. Auch für Quervergleiche und Analogien zwischen verschiedenen Elementen sind diese Erkenntnisse wichtig. Aus diesem Grunde werden Sorptionsdaten bevorzugt durch statische Batch-Versuche gewonnen, weil so der Einfluss von Parametern wie pH, Wasserzusammensetzung und Nuklidkonzentration systematisch untersucht werden kann und sich Rückschlüsse auf die Art der Oberflächenreaktionen gewinnen lassen. Da die Situation im Batch-Versuch nicht derjenigen im intakten geologischen Milieu entspricht, muss die Übertragbarkeit der Labordaten auf *in situ*-Bedingungen überprüft werden. Insbesondere bei Bentonit ist im Porenwasser des verdichteten Materials wegen der negativen Oberflächenladung ein anderer Chemismus zu erwarten als in den grossen Wasservolumina, die bei Batch-Versuchen verwendet werden. Daher sollte speziell bei Bentonit darauf geachtet werden, dass K_d -Werte für das Nahfeld mit den Ergebnissen aus Diffusionsmessungen in verdichtetem Bentonit vereinbar sind.

Sorptionsdaten im Nahfeld

Fast die Hälfte der von der Nagra verwendeten Sorptionskoeffizienten im Nahfeld beruhen auf Quervergleichen mit chemisch ähnlichen Elementen, weil experimentelle Grundlagen unter relevanten Bedingungen fehlten (NTB 93-06). Die Beurteilung der HSK ist in HSK 23/45 ausführlich beschrieben.

Obwohl es bei einigen Quervergleichen der Nagra an chemischer Plausibilität mangelt, kann die HSK die meisten "realistischen" K_d -Werte akzeptieren, da sie vorsichtig gewählt sind, siehe Tabelle 6.2. Bei den "konservativen" K_d -Werten der Nagra mangelt es in einigen Fällen an der gebührenden Berücksichtigung der diversen Ungewissheiten (siehe z.B. im Fall von Tc). Die HSK verzichtet auf die Festlegung von "konservativen" Werten dort, wo die realistischen K_d -Werte experimentell gut untermauert oder bereits ausreichend konservativ gewählt sind. In Fällen mit grösseren Ungewissheiten schlägt die HSK Parametervariationen zur Abklärung ihrer Einflüsse auf die radiologisch wichtigen Ergebnisse vor.

Sorptionsdaten in der Geosphäre

Bei der Herleitung der K_d -Werte für die Geosphäre hat die Nagra die Mineralogie der Fliesswege bei der Mehrzahl der Elemente quantitativ berücksichtigt. Dabei wurden K_d -Werte für die Sorption auf den einzelnen Mineralen selektioniert und entsprechend dem Festphasenanteil der Minerale zu einem K_d -Wert kombiniert (NTB 93-06). Für jede identifizierte Fliessweg-Mineralogie ergibt sich so ein spezifischer K_d -Wert. Diese Methode erlaubt es, den Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung eines Fliessweges auf den K_d -Wert übersichtlich darzustellen. In den Ausbreitungsrechnungen wurden die Werte für die Kluffüllung und das veränderte Nebengestein verwendet. Sie sind in Tabelle 6.3 zusammengestellt. Für Cäsium hat die Nagra einen konzentrationsabhängigen K_d -Wert mittels einer Freundlichkonstante definiert. Im Fall von Technetium und Uran wurde zwischen zwei Grundwassertypen unterschieden, die mit "Kristallin West" und "Kristallin Ost" bezeichnet wurden. Die beiden Wässer unterscheiden sich nicht stark voneinander, dem Grundwasser Ost wurde aber ein deutlich weniger negatives Redoxpotential zugeordnet als dem Grundwasser West, siehe Abschnitt 6.2 weiter oben.

Die HSK ist auch hier der Ansicht, die „realistischen“ K_d -Werte seien überwiegend vorsichtig gewählt, hingegen sollten die konservativen K_d -Werte grundsätzlich tiefer angesetzt werden (HSK-AN-2993). Bei Technetium ist die HSK der Ansicht, dass die mögliche Oxidation von Tc(IV) zum schlecht sorbierenden Tc(VII) im Grundwasser Ost mit einem konservativen Wert von Null abgedeckt werden müsste. Weitere Kommentare sind in den Fussnoten zu Tabelle 6.3 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld-Porenwasser (Hauptcharakteristika: Temperatur 50°C, pH = 9.0, Eh = -400 mV, Ionenstärke 0.08 mol·dm⁻³). Die Bezeichnung "hoch" bedeutet, dass in den Ausbreitungsrechnungen keine Löslichkeitslimitierung verwendet wird.

Element	Löslichkeiten "realistisch"		Löslichkeiten "konservativ"	
	NTB 93-22/ NTB 94-08 [mol·dm ⁻³]	HSK-AN-2954 [mol·dm ⁻³]	NTB 93-22/ NTB 94-08 [mol·dm ⁻³]	HSK-AN-2954 [mol·dm ⁻³]
Ni	hoch	hoch	hoch	hoch
Se	10 ⁻⁸	8×10 ⁻⁷ ⁽¹⁾	6×10 ⁻⁷	hoch
Zr	5×10 ⁻⁹	5×10 ⁻⁹	5×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁷
Nb	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	hoch
Tc	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	hoch	hoch
Pd	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Sn	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	hoch
Sb	6×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁵	hoch
Sm	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴ ⁽²⁾	10 ⁻⁵	10 ⁻³
Pb	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Bi	4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁶	hoch
Ra	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁵
Th	5×10 ⁻⁹	5×10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
Pa	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	hoch
U	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	7×10 ⁻⁵	7×10 ⁻⁵
Np	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷ ⁽³⁾	10 ⁻⁸	7×10 ⁻⁵
Pu	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
Am	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
Cm	6×10 ⁻⁸	10 ⁻⁷ ⁽⁴⁾	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴

⁽¹⁾ Der erhöhte Wert basiert auf der Bildung von Eisen-Selen-Verbindungen. Ein tieferer Wert wäre aufgrund des heutigen Kenntnisstands zwar denkbar, mit den verfügbaren Daten aber nicht überzeugend zu rechtfertigen.

⁽²⁾ Dieser Wert wurde für die HSK-Freisetzungsrechnungen verwendet. In der Zwischenzeit hat sich die HSK überzeugt, dass der Wert von 10⁻⁵ mol·dm⁻³ gerechtfertigt ist, da Samarium im Abfall nur rund 10% der Lanthaniden ausmacht und somit ein "Verdünnungseffekt" anzunehmen ist.

⁽³⁾ Dieser in Analogie zu Uran gewählte Wert wurde für die HSK-Freisetzungsrechnungen verwendet. Inzwischen ist die HSK zum Schluss gekommen, dass die Np-Löslichkeit nach heutigem Kenntnisstand deutlich tiefer angenommen werden muss. Im Moment sollte sie aber nicht tiefer als die Nachweisgrenze von 5×10⁻⁹ mol·dm⁻³ in den Experimenten von RAI und RYAN (1985) gesetzt werden.

⁽⁴⁾ Dieser Wert basiert auf der Am-Löslichkeit und ist durch Berücksichtigung des ungünstigsten Inventarverhältnisses leicht höher als der Wert der Nagra.

Tabelle 6.2: K_d -Werte im Nahfeld (Na-Bentonit MX-80: Porenwasser wie in der Legende von Tabelle 6.1). Die HSK schlägt keine konservativen K_d -Werte vor, sondern sogenannte Parametervariationen in Fällen, wo grosse Unsicherheiten vorhanden sind.

Element	K_d -Werte "realistisch"		K_d -Werte "konservativ"	
	NTB 93-06/ NTB 93-22 [m ³ ·kg ⁻¹]	HSK 23/45 [m ³ ·kg ⁻¹]	NTB 93-06/ NTB 93-22 [m ³ ·kg ⁻¹]	HSK 23/45 [m ³ ·kg ⁻¹] ("Parametervariation")
Ni	1	1	0.1	-
Se	0.005	0.005	0.001	0
Zr	1	1	0.1	-
Tc	0.1	0.1	0.05	0
Pd	1	1	0.1	-
Sn	1	1	0.1	0.01
Cs	0.01	0.01	0.001	-
Ra	0.01	0.01	0.001	0.001
Th	5	5	0.5	-
Pa	1	1	0.1	0.001
U	5	1 ⁽¹⁾	0.5	0.1
Np	5	1 ⁽²⁾	0.5	0.01 ⁽²⁾
Pu	5	5	0.5	0.03
Am	5	5	0.5	-
Cm	5	5	0.5	-

⁽¹⁾ Bei einem Eh von -0.4 V liegen gemäss Speziationsrechnungen etwa 30% des Urans in der Oxidationsstufe U(VI) vor, so dass die Analogie zu Thorium nicht mehr standhält. Es muss erwartet werden, dass U(VI) weniger stark sorbiert als U(IV). Bereits eine geringe Erhöhung des Redoxpotentials führt zu einer Dominanz von U(VI), was im realistischen Wert berücksichtigt werden sollte.

⁽²⁾ Dieser Wert wurde für die HSK-Rechnungen verwendet. Falls Np vollständig als Np(IV) vorliegt, was bei einem Eh von -0.4 V der Fall ist, ist jedoch anzunehmen, dass ein realistischer K_d -Wert von 5 m³·kg⁻¹ gerechtfertigt ist. Ungewissheiten im Redoxpotential werden mit dem konservativen Wert abgedeckt.

Tabelle 6.3: K_d -Werte in den Fließwegen der Geosphäre.

Element	K_d -Werte "realistisch"		K_d -Werte "konservativ"		K_d Quarz ⁽⁵⁾
	NTB 93-06/ NTB 93-22	HSK-AN-2993	NTB 93-06/ NTB 93-22	HSK-AN-2993	HSK 23/53
	[m ³ ·kg ⁻¹]	[m ³ ·kg ⁻¹]	[m ³ ·kg ⁻¹]	[m ³ ·kg ⁻¹]	[m ³ ·kg ⁻¹]
Ni	0.5	0.5	0.05	0.01	0.07
Se	0.01	0.01	0.001	0	0.005
Zr	1	1	0.1	0.01	1
Tc (West) ⁽¹⁾	0.5	0.1	0.05	0	0
Tc (Ost) ⁽¹⁾	0.05	0.005	0	0	0
Pd	0.5	0.5	0.05	0.01	0.07
Sn	0.5	0.1 ⁽²⁾	0.05	0 ⁽²⁾	0.001
Cs	0.1 ⁽³⁾	0.1	0.01	0.001 ⁽³⁾	0.04
Ra	0.5	0.5	0.1	0.01	0.003
Th	1	1	0.1	0.01	1
Pa	1	1	0.1	0.001	0.02
U (West) ⁽¹⁾	1	1	0.1	0.01	0.02
U (Ost) ⁽¹⁾	1	1	0.05	0.01	0.02
Np	1	1	0.05	0.01	0.02
Pu	5	5	0.5	0.01	0.5
Am	5	2 ⁽⁴⁾	0.5	0.01	1
Cm	5	2 ⁽⁴⁾	0.5	0.01	1

⁽¹⁾ Die Nagra hat zwei Grundwässer definiert: Grundwasser „West“ (pH = 7.66, $E_h = -0.18$ V, $I = 0.02$ mol·dm⁻³) und Grundwasser „Ost“ (pH = 7.68, $E_h = -0.03$ V, $I = 0.01$ mol·dm⁻³).

⁽²⁾ Neuere experimentelle Daten von AMAYA et al. (1997) zeigen, dass die Hydrolyse von Sn(IV) Ähnlichkeiten mit derjenigen von Tc(IV) zeigt. Somit ist ein $K_d = 0.1$ m³·kg⁻¹ als realistischer Wert vertretbar. Unsicherheiten werden mit dem konservativen HSK-Wert abgedeckt.

⁽³⁾ Für Cäsium hat die Nagra eine Freundlichkonstante von 2 mol^{0.3}·kg⁻¹·dm^{0.7} mit einem Exponenten von 0.7 definiert, was für die durchschnittliche Konzentration von stabilem Cäsium in den kristallinen Grundwässern von $3.5 \cdot 10^{-7}$ mol·dm⁻³ einen K_d -Wert von 0.1 bis 0.2 m³·kg⁻¹ ergibt. Höhere Konzentrationen führen zu tieferen K_d -Werten. Unsicherheiten im Exponenten werden mit dem konservativen HSK-Wert abgedeckt.

⁽⁴⁾ Die für die verschiedenen Fließwege hergeleiteten K_d -Werte liegen zwischen 2 und 5 m³·kg⁻¹. Bei Verwendung eines einzigen Wertes für alle Fließwege ist daher der tiefere Wert zu verwenden.

⁽⁵⁾ Die K_d -Werte für Quarz wurden in HSK 23/53 kompiliert und stammen aus NTB 93-06 (Ni, Se, Tc, Cs, Ra, Th, U, Np, Pu, Am, Cm) und von Analogiebetrachtungen (Th für Zr, Ni für Pd, Np für Pa). Für Sn wurde aus Mangel an Informationen ein konservativer Wert gewählt.

7. Barrierenwirkung des Endlagersystems

7.1 Einleitung

Das Ziel der Endlagerung ist, die radioaktiven Abfallstoffe so lange vom menschlichen Lebensraum fernzuhalten, bis von ihnen keine besondere Gefahr mehr ausgeht. Wegen der teilweise sehr langen Halbwertszeiten einzelner Nuklide kann sich die notwendige Isolationsdauer von Hunderttausenden bis zu Millionen von Jahren erstrecken. Für so lange Zeiträume ist ein absoluter Einschluss schwierig zu erreichen und kaum schlüssig im Voraus nachzuweisen. Der Grund liegt in den natürlichen Entwicklungs- und Zersetzungsprozessen, denen die verwendeten Materialien unterworfen sind, einschliesslich der Veränderungsprozesse der geologischen Barriere. Andererseits nimmt der Isolationsbedarf durch den Zerfall der Radionuklide mit der Zeit ab.

Angestrebt wird deshalb nicht der jederzeit vollständige Einschluss, sondern eine ausreichende Rückhaltung der Radionuklide in einem Barriersystem, das Dauerhaftigkeit und Robustheit gegenüber Veränderungsprozessen aufweist. Die ausreichende Rückhaltung wird an den radiologischen Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21 gemessen. Die Robustheit wird einerseits durch die Materialwahl und Dimensionierung der Barrieren, und andererseits durch die Verwendung eines Systems von mehreren gestaffelten, teils natürlichen und teils technischen Barrieren sichergestellt. Das Barriersystem weist in dem Sinne eine Redundanz auf, dass eine aus bekannten oder unbekanntem Ursachen eintretende Schwäche einer Barriere durch die anderen Barrieren aufgefangen wird.

Die Abfolge der Barrieren, die im betrachteten Endlagersystem vorliegen, wurde bereits im Kapitel 2 genannt:

- Glaskörper mit eingebundenen Abfallnukliden,
- Stahlflasche (Kokille),
- Endlagerbehälter,
- Bentonitpackung,
- kristallines Gestein in der Umgebung der Lagerstollen (Wirtgestein),
- geologische Schichten, die auf dem Weg zur Biosphäre durchquert werden,
- Böden an der Erdoberfläche (Teil der Biosphäre).

Die ersten vier Barrieren werden als Nahfeldbarrieren bezeichnet, die folgenden zwei als Geosphärenbarriere. Eine wesentliche Wirkung der Geosphärenbarriere ist der mechanische Schutz des Lagers und die Begrenzung des Wasserflusses zu und von den Lagerstollen. Zusätzlich verzögert und vermindert sie die Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre durch lange Transportwege mit verschiedenen chemischen und physikalischen Rückhalte-mechanismen. In der vorliegenden Sicherheitsanalyse wird die Stahlflasche nicht als Barriere berücksichtigt, und die von den Lagerstollen weiter entfernten geologischen Schichten werden nur zur Berechnung des Wasserflusses herangezogen. In Oberflächengewässern und oberflächennahen Aquiferen findet eine starke Verdünnung der radioaktiven Stoffe statt. Dieser Vorgang in der Biosphäre ist nicht als Barrierenwirkung zu sehen; er trägt aber durch die Herabsetzung der Konzentration der Radionuklide stark zur Sicherheit bei.

Im Folgenden wird zunächst auf die einzelnen Barrieren eingegangen und ihre Wirkung und Bedeutung in der Sicherheitsanalyse beurteilt. Dabei wird auch kurz auf die Vorgänge in der Biosphäre eingegangen. Anschliessend wird die Gesamtheit des Barrierensystems betrachtet, die Beiträge der einzelnen Barrieren verglichen und die Vorgänge an den Schnittstellen besprochen.

7.2 Der verglaste Abfall

Die Abfallnuklide sind in einem für diesen Zweck geeigneten Borosilikatglas eingebunden. Die Art der Bindung ist je nach Nuklid unterschiedlich; teils sind die Abfallnuklide Bestandteile der Glastruktur, teils liegen sie auf Zwischenplätzen oder bilden eigene, meist fein verteilte Phasen im Glaskörper. Das Borosilikatglas wird in wässriger Umgebung langsam zersetzt. Obschon die Auflösungsrate (Korrosionsrate) äusserst klein ist, ist sie bei den langen Zeiträumen der Endlagerung dennoch wichtig. Unter den Endlagerbedingungen wird sie stark durch die Konzentration des herausgelösten SiO_2 im anstehenden Wasser beeinflusst. Erreicht diese einen Sättigungswert, ist die Auflösung gehemmt und läuft nur mit einer sehr kleinen asymptotischen Rate (Langzeitrate) weiter. Die meisten der im Glas eingebauten oder eingelagerten Nuklide werden anteilmässig mit der Auflösung des Glases freigesetzt (siehe die detailliertere Beschreibung und Beurteilung in HSK 23/50).

Für die Glasauflösung und Freisetzung der Nuklide spielt ausser der Korrosionsrate des Glases, die auf eine Flächeneinheit bezogen wird, auch die Grösse der zugänglichen Oberfläche und seine zeitliche Entwicklung eine Rolle. Das HAA-Glas wird nach dem Vergiessen relativ schnell abgekühlt, um das Aussondern spezieller Phasen zu minimieren. Durch die thermischen Spannungen erhält der Glaskörper dabei Risse, die zu einer starken Vergrösserung der Oberfläche führen.

Die Langzeitkorrosionsrate ist aus Laborexperimenten mit simulierten Abfallgläsern bekannt. Solche Experimente sind unter anderem in den USA, Schweden und der Schweiz durchgeführt worden. Die in der Sicherheitsanalyse verwendete Langzeitrate von $3.8 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ liegt im Bereich dessen, was experimentell für das von COGEMA verwendete Borosilikatglas gefunden wurde, ohne aber als konservativ gewählter Wert gelten zu können. Für das Borosilikatglas, das von BNFL vorgesehen ist, sind um mindestens einen Faktor 5 höhere Raten zu erwarten (siehe HSK 23/50).

Die Übertragung der Korrosionsraten vom Labor auf reale Bedingungen ist schwierig, da auch ein deutlicher Einfluss von weiteren Wasserinhaltsstoffen festgestellt wird; so erhöht sich beispielsweise die Rate, wenn Eisenkorrosionsprodukte in Kontakt mit dem Wasser sind (Endlagerbehälter). Eine derartige Empfindlichkeit ist nicht überraschend, da sich die Langzeitrate erst bei SiO_2 -Sättigung einstellt und die Auflösungsrate deshalb empfindlich auf Mechanismen reagiert, die SiO_2 aus der Lösung entfernen. Im Endlager kann, sobald das Wasser Zutritt zum Glas hat, das Silizium aus dem Endlagerbehälter und in die Bentonitpackung hinein diffundieren. Der mögliche Einfluss dieser Migration auf die Korrosionsrate muss nach Ansicht der HSK noch geklärt werden.

Die Temperaturabhängigkeit der Korrosionsrate ist nicht gut bekannt. Die experimentellen Werte gelten aber bei höheren (Referenzfall) oder vergleichbaren Temperaturen, als gemäss der Sicherheitsanalyse nach dem Versagen der Endlagerbehälter herrschen. Sie dürften deshalb bezüglich der Temperaturabhängigkeit realistisch bis konservativ sein.

Auf Grund der oben geschilderten Ungewissheiten über die effektive Langzeitrage wird in HSK 23/50 eine Langzeitkorrosionsrate empfohlen, die mit $7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ um eine Grössenordnung höher ist, als in der Sicherheitsanalyse Kristallin-I angenommen wurde. Allgemein bedarf die Frage der Auflösungsrate unter realistischen Bedingungen im Endlagernahfeld einer weiteren Klärung.

Die im Sicherheitsbericht angenommene Oberflächenvergrößerung um einen Faktor 12.5 liegt im Bereich dessen, was für die beiden Abfallgläser von COGEMA und BNFL erwartet wird. Bezüglich des Abfallglases der COGEMA ist der Wert konservativ gewählt, während für das BNFL-Glas maximal 20 erwartet wird (siehe HSK 23/50). Verglichen mit der Auflösungsrate ist die heutige Ungewissheit bezüglich der Oberflächenvergrößerung von geringerer Bedeutung.

Bei der Untersuchung der Rückhaltewirkung des Nahfeldbarrierensystems wurde im Sicherheitsbericht als Parametervariation zum Referenzfall eine 100-fach schnellere Auflösungsrate des Glases angenommen. Die Konzentration zahlreicher Nuklide im Wasser auf der Innenseite der Bentonitpackung ist löslichkeitslimitiert. Die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld hängt wesentlich von diesen Löslichkeitslimiten ab. Sie variiert hingegen nicht stark mit der Auflösungsrate der Glasmatrix.

Eines der Ziele der Sicherheitsanalyse Kristallin-I ist, die Wertebereiche der Parameter der Geosphäre zu erkennen, die eingehalten werden müssen, um eine genügende Schutz- und Rückhaltewirkung der Geosphäre zu gewährleisten. Für diesen Zweck wäre ein Bezug zu den real zu erwartenden Abfällen nötig. Die Sicherheitsanalyse bezieht sich bezüglich Inventar allein auf die verglasten Abfälle der COGEMA. Der zu erwartende verglaste Abfall enthält aber einen Anteil an Abfallgebinden von BNFL, bei denen eine höhere Auflösungsrate zu erwarten ist. Bei den Schlussfolgerungen über die benötigte Rückhalteleistung der Geosphäre wäre konservativerweise von diesem Abfalltyp auszugehen. Wie oben erwähnt, ist aber wegen der nachfolgenden Barrieren der Einfluss auf die Freisetzung aus dem Nahfeld klein.

7.3 Der Endlagerbehälter

Als zweite Barriere wirkt die Stahlflasche (Kokille), in der sich der verglaste Abfall befindet. In der Sicherheitsanalyse Kristallin-I wird davon ausgegangen, dass die Integrität dieses Behälters nicht gewährleistet werden kann. Vereinfachend wird deshalb angenommen, dass die Stahlflasche nicht vorhanden ist. Die Annahme ist offensichtlich konservativ. Der Sicherheitsbericht enthält keine konkreten Angaben über die tatsächlich erwartete Wirkung der Kokille.

Als nächste für den Sicherheitsnachweis beanspruchte Barriere liegt deshalb der dickwandige Endlagerbehälter vor. Es handelt sich um einen Stahlgussbehälter mit Wandstärken von 15 cm (Endbereiche) bis 25 cm (Zylinderfläche). Der Deckel wird mit einem konischen Schraubengang angesetzt und mit dem Behälterkörper dicht verschweisst. Der Endlagerbehälter ist der Korrosion im Wasser innerhalb der Bentonitpackung sowie dem Druck von Bentonit (Quelldruck) und Wasser ausgesetzt. Die Auslegung des Behälters bezüglich mechanischer Festigkeit und Korrosionsresistenz soll seine Integrität während mindestens 1000 Jahren unter den Endlagerbedingungen gewährleisten.

Die Festigkeitsanalyse für den Behälter geht von einer wegen Korrosion um 5 cm verdünnten Behälterwand aus. Die Festigkeitsanalyse wurde von der HSK bereits im Rahmen der Überprüfung des Projekts Gewähr 1985 geprüft und mit der Bemerkung akzeptiert, dass der Fe-

stigeitsnachweis der Deckelanschlussregion noch geführt werden sollte (HSK 23/28). Diese Beurteilung ist weiterhin gültig.

Die folgende zusammenfassende Beurteilung stützt sich auf die ausführlichere Bewertung in HSK 23/50.

Die Korrosion des Stahlgusses kann auf verschiedene Art erfolgen. Der Sicherheitsbericht unterscheidet

- flächenhafte Korrosion,
- lokale Korrosion (Lochfrass), und
- Spannungsrisskorrosion.

Der Sicherheitsbericht geht von einer über 1000 Jahre ungestörten Lagerzeit gemittelten Korrosionsrate von maximal 30 $\mu\text{m/a}$ aus. Diese Korrosionsrate wird als abdeckend für flächenhafte und lokale Korrosion angenommen. Darin sind verschiedene Mechanismen berücksichtigt, nämlich die Oxidation durch den im Wasser gelösten Sauerstoff während einer kurzen Anfangszeit, die nachfolgende anaerobe Oxidation durch das Wasser und die Sulfidbildung unter bakterieller Mitwirkung. Der Einfluss der Radiolyse des Wassers oder seiner Inhaltsstoffe auf die Korrosion wird als gering beurteilt.

Die Reaktion mit gelöstem Sauerstoff ist zeitlich beschränkt: Sie findet statt, bis der mit den Abfallgebinden und der Bentonitpackung eingebrachte Sauerstoff aufgebraucht ist. Die in der Sicherheitsanalyse durchgeführte Abschätzung der verfügbaren Menge an Sauerstoff ist konservativ.

Unklarheiten bestehen aber bezüglich des Ausmasses der lokalen Korrosion. Die im Sicherheitsbericht benützte Korrosionsrate stützt sich auf die Annahme eines Zuschlags von einem Faktor 2 für die Lochfrasstiefe gegenüber der flächenhaften Korrosion. Aus verschiedenen Untersuchungen geht hervor, dass Lochfrass vor allem dann auftritt, wenn eine passivierende Schicht entsteht, die gegenüber einzelnen Wasserinhaltsstoffen nicht stabil ist (HSK 23/50). Eine passivierende Schicht ist unter oxidierenden Bedingungen und bei hohen pH-Werten zu erwarten. Die untere Grenze der pH-Werte, bei denen Passivierung auftritt, ist temperaturabhängig und liegt bei erhöhten Temperaturen tiefer. Während Messungen an Gusseisen in Kontakt mit Bentonit bei 80°C auf keine Passivierung schliessen lassen, ist bei den während der sauerstoffreichen Anfangsphase herrschenden Temperaturen bis 160°C die Grenze der Passivierung durchaus im Bereich des durch den Bentonit geprägten pH-Wertes von ca. 8 bis 9. Eine vorsichtige Abschätzung müsste deshalb von ausgeprägtem Lochfrass während dieser Phase ausgehen. Abschätzungen in HSK 23/50 zeigen, dass die Art und das Ausmass des Lochfrasses die Einschätzung der Behälterlebensdauer stark beeinflussen kann. Deshalb empfiehlt die HSK hierzu weitere Abklärungen.

Für die Abschätzung der Korrosion in anaerober Umgebung wird im Sicherheitsbericht ein Anteil der Oxidierung durch Wasser und ein Anteil der Sulfidbildung berücksichtigt. Die verwendete Rate für die Korrosion durch Wasser ist als konservativ einzustufen.

Das Ausmass der Sulfidkorrosion von 9 mm in 1000 Jahren wurde im Sicherheitsbericht auf eine konservative Bestimmung des Pyritgehalts des Bentonits abgestützt und unter Verwendung einer Löslichkeitslimite für das Sulfat-Ion im Bentonitwasser berechnet. Dabei wurde angenommen, dass Sulfat erst an der Behälteroberfläche zu Sulfid reduziert wird. Die Annahmen werden von der HSK als konservativ eingeschätzt, mit Ausnahme der Löslichkeits-

limite. Die für 1000 Jahre berechnete, durch die Diffusionsrate der Sulfat-Ionen bestimmte totale Korrosionsmenge hängt stark vom angenommenen Wert der Löslichkeitslimite ab. Die erwähnte Berechnung verwendete hierfür die Löslichkeitslimite des Sulfats im Böttsteinwasser, die aber entscheidend vom Ca-Gehalt dieses Wassers abhängig ist. Im (Na-)Bentonit, der hier vorliegt, wird der Ca-Gehalt im Porenwasser stark erniedrigt sein, da der Ton eine starke Tendenz hat, Ca in Austausch für Na aufzunehmen. Das erlaubt eine höhere Konzentration des Sulfat-Ions im Porenwasser, sodass die angenommene Löslichkeitslimite des Sulfats im Bentonitporenwasser sehr wahrscheinlich zu tief ist. Der Diffusionsstrom und damit die für 1000 Jahre berechnete maximale Korrosionstiefe des Behältermaterials werden folglich unterschätzt. Gemäss den Überlegungen in HSK 23/50 könnte die Korrektur bei einer gleichmässigen Korrosion der ganzen Behälteroberfläche maximal einen Faktor 4 betragen, bei ungleichmässigem Angriff aber entsprechend mehr. Auch hier wird deshalb eine detailliertere Untersuchung empfohlen.

Das gewählte Behältermaterial gilt als gegenüber Spannungsrisskorrosion unempfindlich. Es ist aber zu bedenken, dass das Korrosionsverhalten von den chemischen Umgebungsbedingungen abhängig ist. Die zu Grunde gelegten Experimente zur Beobachtung von Risswachstumsgeschwindigkeiten an Materialproben in verschiedenen Grundwässern (ohne Bentonit) haben lediglich gezeigt, dass entweder eine Risswachstumsgeschwindigkeit kleiner als 100 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ (Detektionsgrenze) vorlag, oder aber lange Inkubationszeiten vorhanden waren. Mehrjährige Inkubationszeiten sind in anderen Experimenten festgestellt worden. Nach Ansicht der HSK ist die Frage nach der Bedeutung allfälliger Spannungsrisse für die Behälterintegrität deshalb noch nicht restlos geklärt.

Auch bei Berücksichtigung der oben erwähnten Ungewissheiten ist die Ausbildung eines Lochs durch die Behälterwand durch Korrosion alleine innerhalb von 1000 Jahren als unwahrscheinlich anzusehen. Bezüglich mechanischer Beschädigung ist hingegen zu beachten, dass der Nachweis der hinreichenden Auslegung des Endlagerbehälters unter der Voraussetzung einer maximalen korrosiven Abminderung der Wandstärke von 5 cm geführt wurde. Die Sicherheitsanalyse geht von der Einhaltung dieses Kriteriums während mindestens 1000 Jahren aus. Die im Nachweis für die mechanische Festigkeit vorausgesetzte Wandstärke könnte aber im Lichte der genannten Ungewissheiten früher unterschritten werden. In diesem Fall müsste ein frühzeitiger mechanischer Riss unterstellt werden. Im Sicherheitsbericht wird als Parametervariation die Verkürzung der Lebensdauer der Endlagerbehälter auf 100 Jahre betrachtet. Der Einfluss dieser Annahme auf die berechnete Freisetzung durch die Bentonitbarriere stellt sich als vernachlässigbar heraus. Die Berechnung ist allerdings mit zusätzlichen Ungewissheiten aufgrund der Temperaturverteilung und der Teilsättigung des Bentonits sowie in Bezug auf die Auswahl der betrachteten Nuklide (Kapitel 5.3) behaftet.

7.4 Die Bentonitbarriere

Der Endlagerbehälter ist von einer 1.4 m dicken Bentonitschicht umgeben, die einerseits den Behälter vor mechanischer und chemischer Beanspruchung schützt und andererseits nach Versagen des Behälters die weitgehende Rückhaltung der Radionuklide bewirkt. Die Anordnung des Endlagerbehälters und der Bentonitpackung ist coaxial, im Endlagerstollen liegend. Die 2 m langen Endlagerbehälter werden alle 5 m entlang der Stollenachse positioniert. Der Zwischenraum ist mit Bentonit vollständig verfüllt.

Bentonit wird deshalb eingesetzt, weil er als quellfähiges Tonmaterial eine enge Porenstruktur aufweist (Kolloidfilter) und eine sehr geringe Durchlässigkeit für Wasser und dessen Inhaltsstoffe hat. Die Plastizität dieses Materials gewährt dem Behälter einen gewissen Schutz vor mechanischer Beanspruchung bei Bewegungen im Gestein. Die Eigenschaft des Quellens bei Wasseraufnahme hilft, zusammen mit der Plastizität, die anfänglich beim Anbringen des (fast trockenen) Materials verbleibenden Hohlräume zu eliminieren. Da der Behälter direkt auf dem Bentonit liegt, darf die Plastizität des Bentonits andererseits nicht zu gross sein, damit der rund 9 t schwere Behälter nicht absinkt. Die Bentonitpackung geniesst den Schutz des umliegenden härteren und von geringer Wasserführung gekennzeichneten Gesteins.

Die Beurteilung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des im Sicherheitsbericht beschriebenen Bentonits stützt sich auf die ausführlichere Bewertung in HSK 23/68. Die Hauptergebnisse sind die Folgenden:

Zulässiger Dichtebereich

Die für die Tragfähigkeit massgeblichen rheologischen Eigenschaften des Bentonits sind von seiner Dichte, vom Wassergehalt sowie von der Temperatur abhängig. Bei genügendem Wasserangebot und beschränktem Volumen entwickelt der Bentonit einen Quelldruck, der primär von der Dichte abhängig ist. Für das Endlager berechnet sich der Quelldruck somit aus dem im Stollen verfügbaren Volumen und der eingebrachten Menge von Bentonit. Die nach dem Quellen vorliegende Dichte muss in einem zulässigen Wertebereich liegen: sie darf nicht so gross sein, dass der resultierende Quelldruck zusammen mit dem Wasserdruck den Bergdruck des Wirtgesteins erreicht. Sie muss aber gross genug sein, dass die Festigkeit des Bentonits ausreicht, um den Endlagerbehälter langfristig in zentraler Position zu halten. Im Sicherheitsbericht wird zur Erfüllung dieser Anforderungen ein Dichtebereich von 1650 bis 1750 kg/m³ (Trockendichte) festgelegt.

Die Zusammensetzung und Eigenschaften natürlich vorkommender Bentonite sind nicht einheitlich. Die enge Bandbreite der erwünschten Trockendichte von 6% des Wertes stellt deshalb hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung sowohl bei der Herstellung wie auch bei der Platzierung der Bentonitblöcke im Endlager.

Die obere Grenze des zulässigen Quelldrucks hängt von der Tiefenlage des Endlagers ab. Der in der Sicherheitsanalyse verwendete Wert wurde im Rahmen von Projekt Gewähr 1985 für eine Tiefenlage von 1200 m bestimmt. Die Tiefenlage der Endlagerstollen ist in der Dokumentation zu Kristallin-I nicht verbindlich festgelegt, wird aber mit ca. 1000 m angegeben. Die Anpassung der oberen Grenze der Trockendichte des Bentonits an diese geringere Tiefe würde die zulässige Bandbreite der Dichte verkleinern und damit die Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit noch erhöhen.

Die Bentonitpackung wird durch das Gewicht des Endlagerbehälters elastisch deformiert, und es findet langfristig ein Kriechen statt. Beides trägt zum Absinken des Behälters aus der zentralen Position bei. Während das Ausmass des Absinkens in dem für die Sicherheit massgeblichen Zeitraum nicht als bedeutend zu erwarten ist, bestehen für die HSK noch offene Fragen bezüglich des Einflusses der anfänglich erhöhten Temperatur und einer nur teilweisen Sättigung des Bentonits auf das Kriechverhalten. Auch ist die Bedeutung der elastischen Verformung für das Migrationsverhalten von Wasser und Wasserinhaltsstoffen im Bentonit nicht geklärt.

Angesichts der engen Bandbreite der zulässigen Dichte des Bentonits wird der Nagra empfohlen, die zahlreichen seit Gewähr 1985 gemachten Untersuchungen des rheologischen Verhaltens des Bentonits auszuwerten, um insbesondere die untere Dichtegrenze zu überprüfen. Es wird schliesslich der Nachweis zu führen sein, dass eine Bandbreite der Dichte so gewählt werden kann, dass unter den im Endlagerstollen herrschenden Bedingungen die erstrebten mechanischen Eigenschaften sicher vorhanden sein werden und in der Herstellung der Blöcke diese Bandbreite nachweisbar eingehalten werden kann. Hierzu könnten die Erfahrungen aus dem internationalen Projekt FEBEX im Feldlabor Grimsel einen Beitrag leisten.

Dauer der Aufsättigung

Im Sicherheitsbericht wird die Zeitdauer bis zur Aufsättigung des Bentonits mit Wasser auf 100 bis 1000 Jahre geschätzt. Wegen der vielen bei dieser Schätzung vorhandenen Ungewissheiten, die in HSK 23/68 besprochen werden, ist eine weitere Untersuchung empfehlenswert, bei der der Einfluss des Temperaturgradienten und des Quellens des Bentonits berücksichtigt wird. Seit der dem Sicherheitsbericht zugrundeliegenden Berechnung im Jahre 1986 sind bei den Berechnungsmethoden für gekoppelte thermo-hydro-mechanische Prozesse Fortschritte erzielt worden.

Temperaturverteilung

Die Temperatur im Bentonit ist am Anfang der Lagerung erhöht. Je nach Anordnung der Lagerstollen können während einiger Jahrzehnte die Temperaturen im inneren Teil der Bentonitpackung 100°C deutlich übersteigen. Die Berechnungen der Nagra zum Wärmetransport sind als konservativ zu bewerten, auch wenn die Mechanismen des Wärmetransports in den Bereichen mit der höchsten Temperatur sowie der Einfluss der Inhomogenität, die durch die Belastung der Bentonitpackung durch das Behältergewicht entsteht, nicht geklärt sind (HSK 23/68).

Langzeitbeständigkeit

Die Bentonitpackung ist eine potentiell für sehr lange Zeit wirksame Barriere (Transportdauer für Actiniden in der Grössenordnung von hunderttausend Jahren). Hier stellt sich deshalb die Frage nach der Dauerhaftigkeit der massgeblichen Barriereigenschaften. Obwohl natürlicher Bentonit an seinen ursprünglichen Lagerstätten nur äusserst langsamen und voraussehbaren Veränderungen unterworfen ist, ist zu bedenken, dass der Bentonit für den Einsatz im Endlager industriell verarbeitet worden ist und hier nicht in der angestammten geologischen Umgebung liegt. Viele der im Endlager vermuteten Entwicklungsprozesse des Bentonits werden gegenwärtig auch in anderen Ländern untersucht. Relativ rasch ablaufende Veränderungen sind nur im innersten Teil der Packung bei den anfänglich hohen Temperaturen und Temperaturgradienten zu erwarten. Langfristig sind aber Umwandlungsprozesse möglich, die durch die im Grundwasser vorhandenen Stoffe ausgelöst werden (Bildung von Illit, Beidellit oder Saponit, sowie Umwandlung des Na-Bentonits in Ca-Bentonit). Auch wenn der Einfluss solcher Veränderungen auf die Freisetzung voraussichtlich beschränkt ist, wäre, insbesondere wegen den erwähnten Vorgänge im innersten Bereich der Bentonitpackung, in einer wegen der Ungewissheiten konservativ geführten Berechnung von einer angemessen reduzierten Bentonitmächtigkeit auszugehen. Bei der Untersuchung der Barriereigen-

schaften der Bentonitpackung wird im Sicherheitsbericht als Parametervariation eine auf 20 cm reduzierte Mächtigkeit betrachtet. Erwartungsgemäss sind hier die Durchgangszeiten der Nuklide wesentlich kürzer. Die Einhaltung der Dosislimite im Referenzfall ist dadurch aber nicht in Frage gestellt.

Gasdurchbruch

Einen besonderen Problembereich bildet die Frage nach der Durchlässigkeit des Bentonits für Gase. Die Nagra beteiligt sich seit vielen Jahren an einem internationalen Projekt (GAMBIT Club), die sich mit dieser Frage beschäftigt. Durch die anaerobe Korrosion des Endlagerbehälters wird an der Behälteroberfläche Wasserstoff freigesetzt. Abschätzungen der Produktionsrate anhand der im Mittel über die ersten 1000 Jahre erwarteten Korrosionsrate des Eisens haben gezeigt, dass der Wasserstoff nicht genügend rasch durch Diffusion durch den Bentonit weggeführt werden kann (siehe HSK 23/68). Durch die Wasserstoffproduktion baut sich somit ein Druck auf. Thermodynamische Überlegungen zeigen, dass der Druck den Bergdruck und den hydrostatischen Druck übersteigen kann, ohne dass die Korrosion zum Erliegen kommt. Ein advektiver Durchbruch von Gas durch den Bentonit ist die Folge. Ein solcher Durchbruch wird bei Überdrücken (relativ zum Wasserdruck) beobachtet, die kleiner aber von gleicher Grössenordnung sind wie der Quelldruck. Es besteht Unklarheit, inwieweit eine Selbstheilung der beim Durchbruch gebildeten Kanäle nach Abfallen des Gasdruckes stattfindet (HSK 23/68). Beobachtet wird aber ein Schliessen der Kanäle bei nachlassendem Druck. Da die Korrosion und damit auch die Gasbildung auch nach dem Versagen der Behälterdichtheit weiter geht, empfiehlt die HSK, den Verheilungsprozess der Kanäle näher zu untersuchen, um sicher zu sein, dass an ihrer Stelle nicht präferentielle Fliesswege verbleiben.

Migration im Bentonit

Die Bentonitpackung ist für Wasser sehr gering durchlässig. Die im Porenwasser gelösten Stoffe werden deshalb kaum advektiv, sondern vor allem durch Diffusion fortbewegt. Die Porengrössen sind nicht einheitlich, aber meist kleiner als 1 μm . Deshalb ist auch die Fortbewegung von Kolloiden im Bentonit stark eingeschränkt (Kolloidfilter). Charakteristisch für den Bentonit und andere Tonmaterialien ist, dass ihre innere Struktur durch das unregelmässige Aneinanderfügen von kolloidgrossen Teilchen mit elektrisch geladenen Oberflächen entsteht. Der Porenraum besteht aus engen Hohlräumen und Kanälen, die wesentlich unter Einfluss dieser Oberflächenladungen stehen. Das hat verschiedene Konsequenzen. Erstens besitzen die Wassermoleküle selber eine elektrische Dipolladung und werden von den elektrischen Feldern beeinflusst. Sie sind in der Mobilität gehemmt. Durch die Einlagerung von Wasser in die kristallographischen Zwischenschichten der einzelnen Tonpartikel entsteht das Quellen des Tons. Zweitens sind die Wasserinhaltsstoffe meist auch elektrisch geladen. Ihre Bewegung ist deshalb nicht mehr als gewöhnliche, thermisch induzierte Diffusion (brownische Bewegung) anzusehen. Drittens stehen den verschiedenen Ionen unterschiedliche Hohlräume und Kanäle offen, und der Unterschied zwischen der Fortbewegung negativ und positiv geladener Ionen kann wesentlich sein. Die Tonoberflächen sind negativ geladen. Wegen der (mehr oder weniger lockeren) Bindung positiver Ionen an die Oberflächen wird die Fortbewegung manchmal formal aufgeteilt in einen Beitrag, der gewöhnlicher Diffusion entspricht, und einen Beitrag aus Oberflächendiffusion. Die Intensität dieser auf die Ober-

flächenladungen zurückgehenden Effekte hängt von der Porengrösse ab. Sie ist vor allem bei hochverdichtetem Bentonit ausgeprägt.

Die Diffusion im Bentonit wird in der Sicherheitsanalyse Kristallin-I modellmässig wie die Diffusion in einem starren, neutralen porösen Material behandelt. So werden für alle Nuklide der gleiche Porenraum und die gleiche Porendiffusionskonstante angenommen. Hingegen wird die Sorption nuklidspezifisch derart angesetzt, dass die Sorptionskonstanten die experimentell beobachteten Unterschiede in der Migration der einzelnen Radionuklide wiedergeben. Streng genommen geht eine solche Modellierung an der oben geschilderten Wirklichkeit vorbei. Um zu konservativen Abschätzungen zu gelangen, kann das Verfahren aber durchaus nützlich sein, wenn die konsistente Verwendung von experimentell bestimmten Parametern gewährleistet ist. Die Übertragung von gemessenen Parametern von den Bedingungen des Experiments auf andere Verhältnisse kann aber problematisch sein. Deshalb würde die HSK eine mikroskopisch detailliertere Betrachtung der Migration im Ton begrüssen.

7.5 Die geologische Barriere

Die geologische Barriere hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Sie soll

- die Nahfeldbarrieren vor äusserer Einwirkung schützen und den Wasserfluss im Nahfeld beschränken,
- die Migration der aus den Nahfeldbarrieren austretenden Radionuklide durch chemische und physikalische Retardierungsprozesse verzögern.

Im Hinblick auf die langen in den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigenden Zeiträume kommt der Geosphäre als Barriere eine besondere Bedeutung zu. Die Geosphäre hat eine lange Entwicklungsgeschichte, die mit den heutigen Techniken gut untersucht und aufgeschlüsselt werden kann (siehe Kap. 3). Daraus ergeben sich Rückschlüsse zur Langzeitbeständigkeit der verschiedenen Gesteinsformationen und die Möglichkeit, Aussagen zur zukünftigen weiteren Entwicklung der Geosphäre abzuleiten. Vorhersagen der Auswirkungen der grossräumigen Tektonik sind allerdings stark mit Ungewissheiten behaftet (siehe Kapitel 3). Die Wirksamkeit der Geosphäre als Migrationsbarriere beruht auf ihrer Mächtigkeit und darauf, dass in den tiefen, gering durchlässigen Gesteinsformationen die Stoffkreisläufe langsam sind. Wie in Kapitel 3 und 4 ausgeführt, sind aber die Möglichkeiten zur Abklärung der für die Nuklidmigration in der Geosphäre entscheidend wichtigen Wasserfließsysteme im Kristallin sehr eingeschränkt.

Bei der erwarteten zeitlichen Entwicklung des Endlagers zerfallen die meisten Radionuklide bereits innerhalb der Nahfeldbarrieren. Die restlichen Radionuklide treten ins Tiefengrundwasser der angrenzenden Geosphäre über. Die Wasserflussraten in der Geosphäre beeinflussen im Nahfeldbereich die Freisetzung aus der Bentonitbarriere und die anschliessende Verweilzeit der Nuklide innerhalb der Geosphärenbarriere. In Oberflächennähe treten die noch vorhandenen Radionuklide in das oberflächennahe Grundwasser (der Biosphäre zugerechnet) über, von wo der Weg in die Nahrungsmittelkette führt.

Der Wasserfluss ist von der in der Tiefe langfristig stabilen, geringen Durchlässigkeit des Gesteins abhängig, sowie von den mittelfristigen klimatisch bedingten Schwankungen des Wasserangebots an der Oberfläche. Die Durchlässigkeit des Kristallins kommt durch die Klüftung zustande, die über einen weiten Skalenbereich, von mikroskopisch feinen Rissen bis zu grossen Störungszonen von Hunderten von Metern Mächtigkeit, vorhanden ist. Inner-

halb der einzelnen Klüfte ist die Wasserdurchlässigkeit variabel und von Art und Menge des in der Kluft abgelagerten Materials abhängig. Verglichen mit der Grösse der Endlagerräume gibt es insbesondere solche Klüftung, die sehr viel feiner ist und deshalb zusammenfassend als mittlere Durchlässigkeit des Materials beschrieben werden kann, und solche, die gleich gross oder grösser als die Endlagerräume ausgebildet ist und deshalb einzeln als Störungszone auskartiert und bei der Berechnung des Wasserflusses berücksichtigt werden sollte. Wie erwähnt, erlauben die beschränkten Beobachtungsmöglichkeiten allerdings nur eine unvollständige Abklärung dieser grösseren Strukturen. Auf die Problematik der Wasserfliesswege wird im Kapitel 4 eingegangen. Dort wird auch auf die mineralogische Beschaffenheit der Fliesswege eingegangen, denn sie bestimmt insbesondere die Retardierungseigenschaften für die Radionuklide.

Aus der Tatsache, dass die Durchlässigkeit im Kristallin mit der Klüftung verknüpft ist, ist es naheliegend, dass die langsamen Entwicklungsprozesse der Geosphäre den Wasserfluss in der Tiefe beeinflussen. Neben den Änderungen der Zerklüftung und der Durchlässigkeit einzelner Klüfte durch die tektonische Bewegung führt auch eine Hebung des Gesteinsbereichs, der das Endlager enthält, verbunden mit der Erosion der Überlagerung, zu geänderten Druckverhältnissen mit entsprechender Änderung des Wasserflusses. Die Bedeutung dieser langsamen Prozesse wird allerdings dadurch relativiert, dass im selben Zeitraum (Millionen von Jahren) der Grossteil der Radionuklide durch den Zerfall verschwindet und das Gefährdungspotential des Lagers sich den natürlichen Materialien annähert.

Für die Berechnung der Nuklidmigration durch die Geosphäre werden in der Sicherheitsanalyse die Wasserfliesswege auf einige typische, in der Geometrie stark vereinfachte Muster reduziert, für die die Nuklidmigration berechnet wird. Die Ergebnisse zeigen starke Abhängigkeit von der angenommenen Geometrie. Für die weitere Bewertung wird dasjenige Muster genommen, das am wenigsten Rückhaltevermögen zeigt. Diese detaillierte Berechnung wird für die Migration bis zu ca. 100 m Entfernung von den Lagerstollen durchgeführt. Wegen des verschlungenen Verlaufs des Fliessweges, wird dabei die effektive Fliessweglänge als 200 m angenommen. Die Retardierung auf dem weiteren Weg im Kristallin sowie in den geologischen Formationen, die dem Kristallin überlagert sind, wird nicht berücksichtigt. Diese Vereinfachung ist bezüglich der Freisetzung in die Biosphäre konservativ. Als Parametervariation betrachtet die Nagra auch eine auf 100 m abgekürzte effektive Fliessweglänge. Die dadurch bewirkte Zunahme der Freisetzung ist nuklidabhängig und erreicht maximal einen Faktor 8.

7.6 Die Biosphäre

Der oberflächennahe Teil der Geosphäre mit den üblicherweise genutzten Grundwasservorkommen sowie die Erdoberfläche mit Flora und Fauna werden der Biosphäre zugerechnet. Die Sicherheitsanalyse befasst sich mit den Vorgängen in der Biosphäre, um die mögliche Strahlenexposition von Personen durch die aus dem Endlager freigesetzten Radionuklide abschätzen zu können. Die Strahlendosis wird mit dem Schutzziel der Richtlinie HSK-R-21 verglichen.

Der Zustand der Erdoberfläche und die gesellschaftlichen Merkmale sind verhältnismässig raschen und praktisch unvorhersehbaren Veränderungen unterworfen. Langfristig verändern sich auch die Lebensformen selber. So ist eine echte Vorhersage von Strahlendosen nicht möglich und das Mass der Gefährdung durch Strahlung (Dosis/Risiko-Beziehung) langfristig

auch nicht bekannt. Die Schutzwirkung des Endlagers kann aber daran gemessen werden, wie die Auswirkungen der zukünftigen Freisetzung auf Menschen wären, die mit aus heutiger Sicht realistischen biologischen und gesellschaftlichen Merkmalen zur Zeit der Freisetzung leben würden. So können auch die Risiken der Endlagerung mit den heutigen täglichen Risiken aus anderen Bereichen verglichen werden. Diese Vorgehensweise wird in der Richtlinie HSK-R-21 vorgegeben.

In der Sicherheitsanalyse wird der Nuklidtransport in der Biosphäre durch ein Modell erfasst, das die Konzentrationen der Radionuklide im Wasser und Boden berechnet. Die Dosis für Personen wird anschliessend durch verschiedene Aufnahmemechanismen über die Nahrungsmittelkette (z.B. Gras-Kuh-Milch-Pfad) bestimmt. Die Ungewissheit über künftige Klimabedingungen wird durch Parametervariationen mit Änderung des Wassereintrages und der künstlichen Bewässerung der Agrarflächen berücksichtigt. Die Art und Menge der Bewässerung beeinflusst die Dosisaufnahme durch Nahrungsmittel relativ stark.

Das Biosphärenmodell und die darin verwendeten Parameterwerte wurden von der HSK nur grob geprüft. Das Vorgehen bei der Modellierung entspricht der heute auch in anderen Ländern üblichen Praxis.

7.7 Das Barrierensystem als Ganzes

Das Barrierensystem bewirkt als Ganzes eine effiziente Rückhaltung der Radionuklide, die aus dem Endlager stammen. Die einzelnen Barrieren sind in ihrer Art und Beschaffenheit verschieden und so bemessen, dass eine vorhergesehene oder unvorhergesehene Schwächung einer Barriere durch die Rückhaltewirkung der anderen Barrieren aufgefangen wird.

Die Barrieren wirken zeitlich gestaffelt: Solange die Endlagerbehälter dicht sind, das heisst für mindestens 1000 Jahre, ist die Rückhaltewirkung des Glaskörpers ungeschmälert gewährleistet und andere Barrieren werden nicht beansprucht. Erst nach Versagen der Endlagerbehälter kommt das Abfallglas in Kontakt mit Wasser, und die langsame Freisetzung durch Auflösung des Glases beginnt. Diese dauert im Referenzfall 150'000 Jahre. Mit dem Beginn der Glasauflösung kommt auch die Rückhaltewirkung der Bentonitbarriere zum Tragen. Je nach Nuklid ist die Zeit bis zum diffusiven Durchbruch durch die Bentonitbarriere unterschiedlich, von wenigen 1000 Jahren bis über 100'000 Jahre. Für viele Nuklide wird der Diffusionsfluss durch das Erreichen der Löslichkeitslimite an der Innenseite der Bentonitpackung stark eingeschränkt. Der Grossteil der Radionuklide zerfällt bereits im Abfallglas oder in der Bentonitpackung. Erst nach einem Durchbruch der Nuklide durch die Bentonitbarriere kommt die Rückhaltewirkung der Geosphärenbarriere ins Spiel. Hier betragen die Durchbruchzeiten je nach Nuklid nochmals 10'000 bis mehrere 100'000 Jahre. In der Biosphäre bewirken schliesslich die oberflächennahen Aquifere eine starke Verdünnung der Nuklidkonzentrationen.

Im Sicherheitsbericht wird die Schutzwirkung des Barrierensystems dadurch illustriert, dass der Ort des Zerfalls einzelner Nuklide angegeben wird. Typischerweise zerfallen über 99% der zur Illustration betrachteten Actiniden (Halbwertszeit kleiner als 3 Millionen Jahre) bereits in den Nahfeldbarrieren, während der restliche Anteil hauptsächlich in der Geosphärenbarriere zerfällt. Weniger als 0.01% erreichen die Biosphäre. Besonders schlecht zurückgehalten wird lediglich Cs-135, das zu 5.5% in den Nahfeldbarrieren und zu 7% in der Geosphärenbarriere zerfällt. Die Zahlen zeigen das allgemein gute Rückhaltevermögen der Nahfeldbarrieren. Gleiches zeigen auch die Ergebnisse des sogenannten Robusten Szenari-

ums, eines Rechenbeispiels der Sicherheitsanalyse, bei dem die Rückhaltung in der Geosphäre nicht berücksichtigt wird und die Schutzziele trotzdem erreicht werden. Die oben genannten Zahlen sind aber nicht geeignet, um das Rückhaltevermögen der Geosphärenbarriere zu zeigen.

Eine detailliertere Analyse und einen Vergleich der einzelnen Barrieren betrachtet die HSK aus den nachstehenden Gründen als notwendig:

Die Richtlinie HSK-R-21 verlangt ein System verschiedenartiger, gestaffelt angeordneter passiver Barrieren, die zusammen den notwendigen Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide bewirken. Es wird nicht eine volle Redundanz der Barrieren verlangt. Vielmehr interpretiert die HSK dieses Mehrbarrierenprinzip so, dass auch bei einer nicht vorausgesehenen Schwächung einer Barriere die übrigen Barrieren die für die Einhaltung der Schutzziele erforderliche Wirkung erbringen. Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I baut auf einem solchen Barrierensystem auf. Die Wirkung des Mehrbarrierensystems bei geschwächten Einzelbarrieren ist bei den folgenden rechnerisch untersuchten Fällen ersichtlich:

- Frühzeitiges Versagen der Endlagerbehälter (Lebensdauer 100 statt 1000 Jahre),
- Rasche Auflösung der Glasmatrix (Auflösung in 1500 statt 150'000 Jahren),
- Erhöhte Löslichkeit innerhalb der Bentonitpackung (je nach Nuklid unterschiedlich),
- Stark beschädigte Bentonitpackung (effektive Mächtigkeit 0.2 statt 1.4 m),
- Reduzierte Sorption in der Bentonitpackung (unterschiedlich, meist Faktor 10),
- Reduzierter Schutz des Nahfeldes gegen Grundwasserfluss (Wasserflussrate um den Faktor 100 erhöht),
- Keine Rückhaltewirkung der Geosphäre („Robustes Szenarium“),
- Reduzierte Verdünnung in der Biosphäre (Klimaszenarien).

In all diesen Fällen konnte die Einhaltung der Schutzziele gemäss HSK-R-21 gezeigt werden. Somit ist die Anforderung an ein Mehrbarrierensystem erfüllt. In welcher Weise die geschwächte Barriere kompensiert wurde, ist nicht überall klar ersichtlich. Zum besseren Verständnis dieser teilweisen Redundanz wäre eine vergleichende Betrachtung des Rückhaltevermögens der einzelnen Barrieren notwendig.

Die Radionuklidenausbreitung durch das Barrierensystem wird in der Sicherheitsanalyse sequenziell modelliert, indem beim Übergang von einer Barriere zu einer anderen in vereinfachender Weise eine Randbedingung für die Berechnung beider Barrieren definiert wird. Deshalb ist es nötig, in einem separaten Schritt die Phänomene dieser Übergangsbereiche zu untersuchen:

- Glas/Behälter/Bentonit: Es ist noch unklar, wie die Transportraten der verschiedenen Wasserinhaltsstoffe durch den Bentonit die Langzeitrate der Glasauflösung beeinflussen. Die Transportraten der Stoffe von der Glasoberfläche weg sind ebenfalls von den physikalischen oder chemischen Reaktionen der Nuklide mit dem Behälter und seinen Korrosionsprodukten sowie mit den Bestandteilen des Bentonits abhängig. Die radiologischen Folgen einer erhöhten Auflösungsrate der Glasmatrix wurden als Parametervariation im Sicherheitsbericht untersucht.
- Bentonit/Kristallin: Die Modellierung geht von einem gleichmässigen Wasseraustausch an der Aussenfläche der Bentonitpackung aus. Die Wasseraustauschrate steuert die diffu-

sive Freisetzung durch den Bentonit indirekt durch das Mitbeeinflussen der Konzentration an der Aussenfläche. Um die Unsicherheiten bezüglich der Verteilung des Wasserflusses an der Oberfläche einzugrenzen, wird als Parametervariation auch die Freisetzung bei einem sofortigen und vollständigen Wegtransport der Nuklide von der Bentonitoberfläche berechnet ("Randbedingung Null", siehe Kapitel 9). Je nach Nuklid kann sich die Freisetzung dadurch um das Hundertfache erhöhen. Ein weiteres Phänomen in diesem Übergangsbereich ist der Abriss von Kolloidteilchen von der Bentonitoberfläche. Die Kolloidteilchen können als Transportmittel für darauf sorbierte Radionuklide dienen. Im Sicherheitsbericht wurde, gestützt auf eine Abschätzung der Bindungskräfte im aufgelockerten Bentonit und die Wasserflussgeschwindigkeiten an der Bentonitoberfläche, die Bildungsrate von Kolloidteilchen als unbedeutend eingestuft. Diese Folgerung ist von den Annahmen über die auftretenden lokalen Fließgeschwindigkeiten abhängig und sollte nach Ansicht der HSK bei besserer Kenntnis dieser Geschwindigkeiten überprüft werden. Der Nuklidtransport in Anwesenheit von Kolloiden wurde im Sicherheitsbericht auch untersucht. Hier ist eine weitere Untersuchung und experimentelle Validierung der Ergebnisse empfehlenswert und auch vorgesehen: solche Experimente sind bereits im Felslabor Grimsel im Gang.

- Geosphäre/Biosphäre: Es wird in der Sicherheitsanalyse modellmässig angenommen, dass die durch die Geosphäre freigesetzten Radionuklide sich gleichmässig in einen oberflächennahen Aquifer mischen, aus dem dann durch die Wasserentnahme für Trinkwasser oder zur Bewässerung sowie durch den Aufstieg im Boden die Nahrungsmittelkette erreicht wird. Da die Annahme der Gleichmässigkeit der Mischung die errechnete maximale Dosis beeinflusst, ist nach Ansicht der HSK hier eine weitere Begründung nötig.

In der Szenarienanalyse werden Szenarien zur weiteren Konsequenzenanalyse ausgewählt, die als abdeckend für die Varianten der zukünftigen Entwicklung gelten sollen. Dabei kommen nicht alle der bei der Untersuchung einzelner Barrieren gemachten Parametervariationen zum Zuge. Das ist nach Ansicht der HSK vertretbar, denn bei der Auswahl der Szenarien muss auch die Mutmasslichkeit des Eintretens der beschriebenen Zustände mitbewertet werden. Empfehlenswert wäre allerdings eine Bewertung der unwahrscheinlichen Parameterwertekombinationen unter dem Gesichtspunkt des Schutzziels 2 der Richtlinie HSK-R-21 (Bewertung des restlichen Risikos). Die Szenarienanalyse wird im folgenden Kapitel beurteilt.

8. Szenarienanalyse

8.1 Einleitung

Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems über lange Zeiten hinweg sind mit vielen Ungewissheiten verbunden. Einerseits erfordern die langen Zeiten eine sehr gute Kenntnis aller Prozesse und Parameter, um Ergebnisse mit der wünschbaren Genauigkeit zu erzielen. Andererseits können externe Ereignisse auf das Endlagersystem einwirken, deren Zeitpunkt und Intensität nicht im Voraus bestimmt werden können.

Diesen Ungewissheiten der zukünftigen Entwicklung wird in der Sicherheitsanalyse Kristallin-I dadurch begegnet, dass statt einer genauen Prognose viele Varianten (Szenarien) der zukünftigen Entwicklung untersucht werden und schliesslich gezeigt wird, dass bei allen realistisch anzunehmenden Varianten die Schutzziele eingehalten würden. Das ist im Einklang mit der Richtlinie HSK-R-21, die vom Gesuchsteller fordert, dass er darlegt, "welche Vorgänge und Ereignisse auf das Endlagersystem im Laufe der Zeit einwirken können, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen" ableitet. Die radiologischen Auswirkungen bei den umhüllenden Entwicklungen (umhüllenden Szenarien) werden mit den Schutzzielen verglichen. "Umhüllend" ist so zu verstehen, dass, wenn die Schutzziele bei den umhüllenden Szenarien eingehalten werden, man ohne detaillierte Berechnung darauf schliessen kann, dass die Schutzziele auch für eine Gesamtheit weiterer („umhüllter“) Szenarien erfüllt sind.

Die Szenarienanalyse besteht im Erkennen der möglichen Abläufe, Beurteilen ihrer Mutmasslichkeit (Wahrscheinlichkeit) und Festlegen angemessener umhüllender Szenarien für die detaillierte Analyse der Endlagersicherheit. Eine bei Szenarienanalysen häufig angewendete Methode zur Erfassung der wichtigsten Szenarien ist, zuerst ein realistisch zu erwartendes Szenarium festzulegen und dann abweichende (weniger wahrscheinliche) Szenarien durch die Annahme zusätzlicher Gegebenheiten oder Ereignisse zu bilden. Jede solche zusätzliche Annahme definiert eine Familie von ähnlichen Szenarien, aus der ein in den Auswirkungen dominierendes Szenarium als Umhüllende gewählt wird. Idealerweise müssen nur wenige abweichende Merkmale gleichzeitig betrachtet werden, weil die Wahrscheinlichkeit der entsprechenden Zukunftsvarianten sonst so klein ist, dass ihr Beitrag zum gesamten Risiko unbedeutend wäre.

Obschon die Szenarien somit grundsätzlich mutmassliche oder zumindest mögliche Entwicklungen darstellen sollten (vgl. Definitionen in SKI 1990, NEA 1992), kann es für die systematische Untersuchung auch nützlich sein, bei den umhüllenden Szenarien gewisse "unnatürliche" Vereinfachungen zuzulassen (siehe z.B. NEA 2001). Dafür gibt es in der vorliegenden Szenarienanalyse Beispiele (u. A. das Referenzszenarium mit unveränderlicher Geosphäre). Der Klarheit halber sollte beim Ableiten und Darlegen von Schlussfolgerungen der Sicherheitsanalyse auf solche bewusste "Realitätsdefizite" hingewiesen werden.

Der Sicherheitsbericht NTB 93-22 enthält eine ausführliche zusammenfassende Beschreibung des Vorgehens bei der Szenarienanalyse und der dabei verwendeten Systematik. Der Hintergrundbericht NTB 93-13 ist detaillierter und enthält zusätzliche Informationen über die Erkenntnisgrundlagen, aus denen die Annahmen über die zukünftigen Vorgänge und Ereignisse abgeleitet wurden.

Die nachfolgende Beurteilung bezieht sich auf die Methodik, den technischen Inhalt und die Dokumentation der Szenarienanalyse. Die Beurteilung stützt sich auf die erwähnten Unter-

lagen der Nagra, Berichte von externen Experten der HSK (BASLER & HOFMANN 1996, BASLER & HOFMANN 2001) und auf den Vergleich mit dem internationalen Stand der Technik der Szenarienanalyse, der unter anderem aus technischen Dokumenten verschiedener Endlagerorganisationen (z.B. SKI 1995, SKB 1995, NIREX 1998) und aus zusammenfassenden Darstellungen in Publikationen der NEA (z.B. NEA 1992, NEA 2001) bekannt ist.

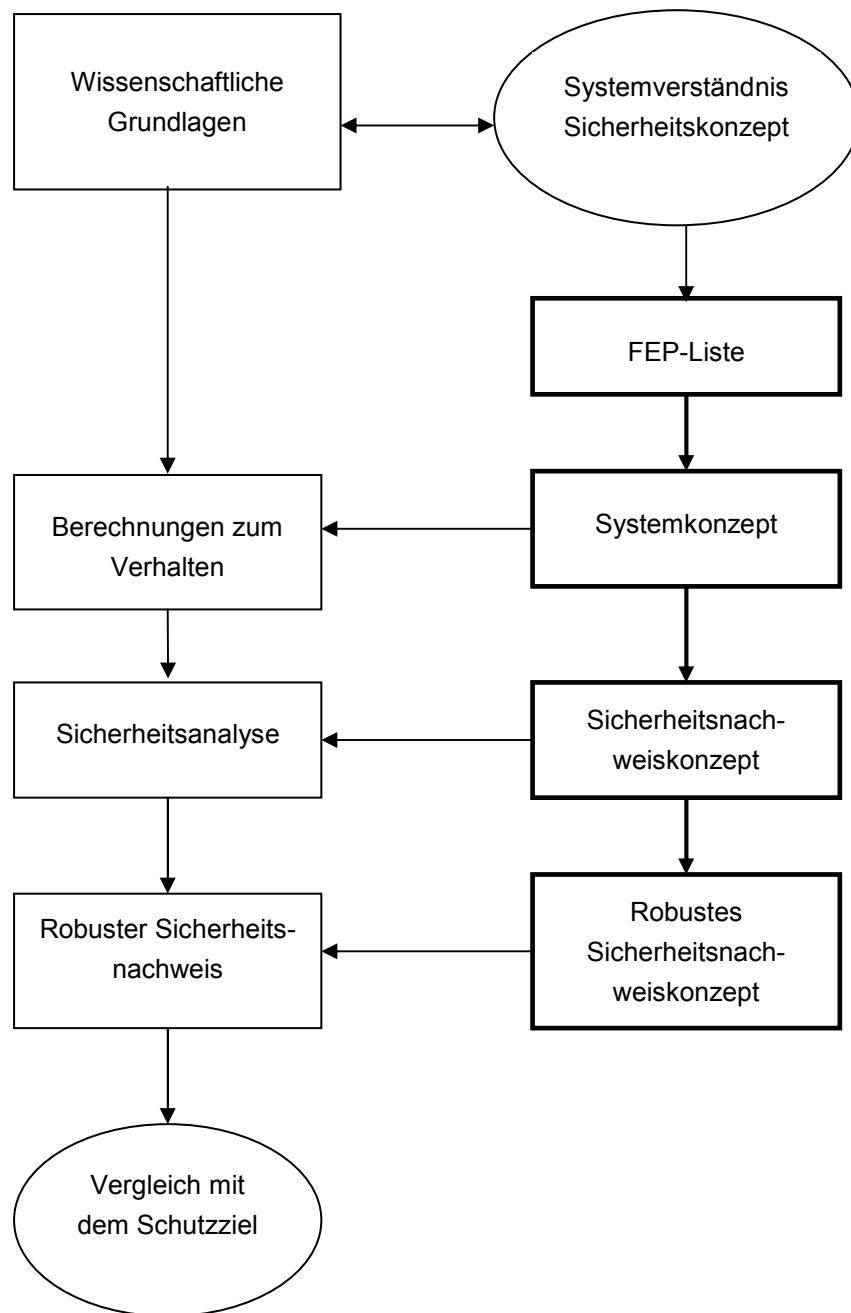
8.2 Methodik der Szenarienanalyse

Die Methodik der Szenarienanalyse im Kristallin-I folgt in den Grundzügen einem international üblichen systematischen Vorgehen (siehe Figur 8.1). Ausgehend von einer Übersicht über alle realistischerweise zu erwartenden Erscheinungen, Ereignisse und Vorgänge (features, events and processes, FEP), die im Zusammenhang mit einem Endlager von Bedeutung sein können, werden diejenigen identifiziert, die im vorliegenden Fall (Endlager im kristallinen Grundgebirge der Nord-Schweiz) relevant sind. Die Beschreibung des Einflusses der FEPs im oder auf das Endlagersystem, einschliesslich der gegenseitigen Beeinflussung der FEPs, wird *Systemkonzept* genannt. Die Zusammenhänge werden mit Hilfe von sogenannten Einflussdiagrammen visualisiert (NTB 93-13, Anhang). Die Szenarien werden durch unterschiedliche Annahmen über das Vorhandensein dieser FEPs gebildet. Die weiteren Schritte werden in NTB 93-22 generisch beschrieben: Das Ableiten eines *Sicherheitsnachweiskonzeptes* (modellmässige Beschreibung der weiter zu berücksichtigenden FEPs und Bestimmung der umhüllenden Szenarien) und das Ableiten eines *Robusten Sicherheitsnachweiskonzeptes* (Beschränkung auf diejenigen günstig wirkenden FEPs, über die genügend abgesicherte Kenntnisse vorliegen, und Berücksichtigung aller ungünstig wirkenden FEPs). In der Sicherheitsanalyse Kristallin-I wird dieser letzte Schritt nicht vollständig realisiert. Das wird mit der Zielsetzung dieser Sicherheitsanalyse begründet, die zwar den Nachweis der Sicherheit des Endlagers bezweckt, aber den Schwerpunkt bei der Bewertung der geosphärischen Barriere setzt (NTB 93-22).

Das methodische Vorgehen bei der Szenarienanalyse ist in NTB 93-22 in den Hauptzügen klar und nachvollziehbar dargelegt. Als gut ist die Absicherung des FEP-Satzes durch einen Vergleich mit FEP-Datenbanken anderer (internationaler) Endlagerprogramme zu bezeichnen. Ebenfalls sehr nützlich erscheint der HSK die klare Identifizierung von FEPs, die in den quantitativ untersuchten Szenarien nicht berücksichtigt werden, aber eine realistisch mögliche und bezüglich Ergebnis der Sicherheitsanalyse günstige Ergänzung darstellen würden (Reserve-FEPs).

Eine weitere Klasse von FEPs wird ausgesondert und nicht in den quantitativ untersuchten Szenarien berücksichtigt: solche, die aus unterschiedlichen Gründen nicht quantitativ behandelt werden können und die Sicherheit möglicherweise beeinträchtigen. Diese FEPs werden "Offene Fragen" genannt.

Die besondere Bezeichnung und Zusammenstellung der Reserve-FEPs und der Offenen Fragen wird im Sinne der klaren Übersicht über die FEPs von der HSK sehr begrüsst. Der Bericht NEA 1999 weist auch darauf hin, dass ein nicht unwesentlicher Bestandteil eines Sicherheitsnachweises die Identifizierung von offenen Fragen ist und die Angabe, was zu ihrer Beantwortung getan werden soll. Dies wird insbesondere unter dem Aspekt der späteren Iteration der Analyse gesehen.



Figur 8.1: Schritte der Szenarienanalyse (Kasten rechts). Der Zusammenhang mit dem Sicherheitskonzept und der Konsequenzenanalyse (Kasten links) wird angegeben. Iterationen werden nicht gezeigt.

Problematisch ist allerdings die zu frühe Ausscheidung der FEPs der Kategorie "Offene Fragen", weil sie dadurch bei der Bildung der Szenarien nicht mehr berücksichtigt werden. Das Vorgehen ist dann problemlos, falls der Einfluss der „Offenen Fragen“ durch die getroffene Wahl der Szenarien konservativ abgedeckt wird (z.B. „Absinken des Endlagerbehälters“ wird durch den Fall „reduzierte Bentonitdicke“ abgedeckt). Das dürfte aber nicht bei allen „Offenen Fragen“ der Fall sein. Die Bildung der Szenarien soll sich nach den Erfordernissen richten, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergeben, und nicht nach der momentanen Verfügbarkeit von Daten und Rechenmodellen. Besser geeignet wäre allenfalls ein zweistufiges Vorgehen, bei dem erst im zweiten Schritt (Vorbereitung der detaillierten Analyse) die Anpassung der Szenarien an die vorhandenen Möglichkeiten der quantitativen Analyse erfolgen würde. Die Bedeutung der einzelnen „Offenen Fragen“ für das Systemverständnis und der allfällige Bedarf an weiteren Abklärungen wären so besser sichtbar.

Eine gewisse methodische Schwäche in der Analyse der Nagra sieht die HSK bei der Behandlung der Wechselwirkung der FEPs. Während die Übersicht über die Eigenschaften der einzelnen FEPs sehr gut ist, fehlt die Klarheit bei den Wechselwirkungen der FEPs untereinander. Die FEP-Datenbank (NTB 93-13: Anhang) enthält keine Hinweise auf die Wechselwirkungen. In den Einflussdiagrammen sind die wichtigsten Wechselwirkungen festgehalten. Da die Einflussdiagramme aber in erster Linie der Darlegung des Systemkonzeptes dienen und nicht der systematischen Darstellung der Wechselwirkungen aller FEPs, sind dort nur solche Wechselwirkungen enthalten, die im Systemkonzept eine besonders wichtige Rolle spielen. Es ist weder ersichtlich, wie die weiteren Wechselwirkungen dokumentiert werden, noch wie der Entscheid für oder gegen das Berücksichtigen einer Wechselwirkung begründet wird. Eine nachträgliche Überprüfung ist deshalb erschwert. Es sind Methoden bekannt (z.B. SKB 1995, NIREX 1998), mit denen wenigstens die paarweisen Abhängigkeiten erfasst werden. Sie stützen sich auf Matrixdarstellungen, bei denen jedem FEP-Paar ein Feld zugeordnet ist, das auf Informationen über die Wechselwirkung hinweist.

Die Definition der Szenarien ist wiederum klar und erscheint vom technischen Standpunkt aus zweckmässig. In diesem Sinn ist die getroffene Wahl eines einfachen Referenzszenariums mit statischer Geosphäre durchaus als gut zu bezeichnen. Es entsteht aber dadurch auch der Nachteil, dass es unklar wird, welche Bewertung die wahrscheinlichsten Zukunftsvarianten erhalten. Sie sind nicht mit dem Referenzszenarium identisch, sondern werden im Sinne der Umhüllung durch die Gesamtheit der quantitativ betrachteten Szenarien erfasst. Es wäre vorteilhaft, ein zusätzliches Szenarium mit grundsätzlich realistischen Vorgängen und Annahmen als Beispiel einer mutmasslichen Zukunftsentwicklung zu beschreiben und innerhalb der Umhüllung klar zu positionieren. "Realistisch" bezieht sich hier vor allem auf die berücksichtigten Vorgänge. Die quantitative Bewertung der Auswirkungen kann sich trotzdem auf konservative Parameterwerte und Entscheidungen stützen.

Einen weiteren methodischen Nachteil sieht die HSK im folgenden Sachverhalt: Implizit in der gewählten systematischen Vorgehensweise ist die Annahme enthalten, dass das Hinzufügen von (unabhängigen) FEPs sich auf ein bis zwei gleichzeitig vorhandene neue FEPs beschränken kann. Der Grund ist in der Annahme zu suchen, dass die hinzugefügten FEPs unwahrscheinliche und voneinander unabhängige Phänomene sind, die zusammengenommen rasch zu sehr niedrigen Wahrscheinlichkeiten für die entsprechenden Zukunftsvarianten führen. Diese Voraussetzung wird aber im Sicherheitsbericht nicht klar angesprochen und ist bei der getroffenen Wahl des Referenzszenariums auch nicht von vorneherein klar. Das Referenzszenarium stimmt nicht mit einer realistischen Zukunftsvariante überein. So kann es

zusätzliche FEPs geben, die hohe Wahrscheinlichkeit haben, wirklich vorhanden zu sein. Die Berücksichtigung zusätzlicher FEPs bedeutet deshalb nicht zwangsläufig eine Abnahme der Wahrscheinlichkeit. Falls der Verzicht auf die Hinzunahme weiterer FEPs zu einem Szenarium auf der sehr kleinen Wahrscheinlichkeit der so entstehenden Szenarien beruht, muss diese klar nachgewiesen werden.

Die Entwicklung des „Robusten Sicherheitsnachweiskonzepts“ wird als letzte Stufe der Szenarienanalyse zur Vorbereitung eines Sicherheitsnachweises genannt. Diese Stufe ist in der vorliegenden Szenarienanalyse nicht voll ausgebildet, sondern beschränkt sich auf die Untersuchung weniger Zukunftsvarianten, welche als gemeinsames Merkmal den Verzicht auf die Berücksichtigung der retardierenden Wirkung der Geosphäre bei der Migration der Radionuklide haben. Begründet wird das mit dem Hinweis, dass der Zweck dieser Sicherheitsanalyse vor allem der Bewertung des Beitrags des kristallinen Wirtgesteins zur Sicherheit sei.

Die Nagra hat das Risiko, das sich aus der Gesamtheit der durch die umhüllenden Szenarien nicht repräsentierten Zukunftsvarianten ergibt, nicht berechnet. Das ist im Hinblick auf die Ziele der Sicherheitsanalyse Kristallin-I vertretbar. Für einen ausführlichen Sicherheitsnachweis ist auch das kumulierte Risiko aus den nicht abgedeckten, wenig wahrscheinlichen Szenarien zu erfassen und mit dem Schutzziel 2 der HSK-R-21 zu vergleichen.

8.3 Technischer Inhalt der Szenarienanalyse

Das Vorgehen und die Argumentation der Szenarienanalyse sind, soweit in der Dokumentation beschrieben, gut nachvollziehbar.

Ein gewisser Ermessensspielraum besteht naturgemäss bei der Definition der FEPs. In einzelnen Fällen ist es fraglich, ob hierbei nicht zu stark zusammengefasst wurde. Beispiele dafür sind FEP 3.20 (Wechselwirkung und Diffusion zwischen Behältern) und FEP 1.4 (Leervolumen) (vgl. NTB 93-13, Anhang 3). FEP 3.20 enthält zwei unverwandte Effekte, nämlich einerseits die Veränderung der diffusiven Freisetzung aus einem Endlagerbehälter, wenn der Behälter und der ihn umgebende Bentonit in der Kontaminationsfahne eines anderen Behälters liegt, und andererseits den bei der modellmässigen Berechnung der Freisetzung vernachlässigten Aufbau der Konzentration der Radionuklide im mit Bentonit verfüllten Bereich zwischen den Endlagerbehältern. Im FEP 1.4 werden die Leervolumen der Stahlflasche und des Endlagerbehälters zu einem Hohlraum zusammengefasst. Die Definition des FEPs 1.4 berücksichtigt damit bereits die spätere vereinfachte Modellierung. Bei der Beschreibung des FEPs 3.20 wird auch auf die Vereinfachungen des späteren Rechenmodells Bezug genommen. Auch wenn die Modellannahmen vernünftig sind, ist es methodisch fraglich, wenn die später anstehende Modellierung mit ihren Vereinfachungen bereits die Definition der FEPs mitbestimmt.

Ein weiterer Ermessensspielraum besteht bei der Auswahl der wesentlichen Wechselwirkungen der FEPs, welche zum Systemkonzept beitragen. Da eine Dokumentation der nicht berücksichtigten Wechselwirkungen fehlt, ist die Auswahl nicht eindeutig nachvollziehbar. Ein Beispiel sei erwähnt: FEP 3.18 (Löslichkeit im Bentonitporenwasser) wird richtigerweise in Beziehung gesehen mit der Wasserzusammensetzung, einschliesslich darin gelöster Organika und ist damit Einflussgrösse für FEP 3.16 (Migration durch den Bentonit). Es ist aber nicht klar, warum der Einfluss auf die FEPs 1.12 (Glasauflösungsrate) und 2.20 (Migration von der Glasoberfläche bis zum Bentonit) unbedeutend ist. Es ist auch nicht nachvollziehbar,

warum FEP 3.18 im Einflussdiagramm als Reserve-FEP gekennzeichnet wird, obwohl er im Referenzszenarium enthalten ist (NTB 93-13, Anhang 6). Die Mitfällung von Radionukliden wird mit den FEPs 1.14 und 2.15 beschrieben, die beide als Reserve-FEPs ausgeschieden werden. Hingegen wird die Berücksichtigung der Mitfällung bei der Festlegung der Löslichkeitslimiten im Nahfeld (siehe Abschnitt 6.3) im Einflussdiagramm nicht sichtbar gemacht und nur unvollständig (nur für Curium) in der Dokumentation vom FEP 1.15 (Löslichkeitslimiten) erwähnt.

Es wurde bereits angesprochen, dass in der Sicherheitsanalyse Kristallin-I ein sogenanntes Robustes Sicherheitsnachweiskonzept nicht voll umgesetzt wird. Dieses Konzept wird durch das „Robuste Szenarium“ repräsentiert, ein nicht-realistisches Szenarium, das keine Rückhaltung der Radionuklide in der Geosphäre berücksichtigt. Das robuste Szenarium ist für realistischere Szenarien abdeckend, welche die nur mit Ungewissheiten quantifizierbaren Transportvorgänge der Nuklide in der Geosphäre berücksichtigen. Wie im Sicherheitsbericht vermerkt, entspricht das „Robuste Szenarium“ nicht durchwegs den Anforderungen eines Robusten Sicherheitsnachweiskonzepts. Insbesondere werden die FEPs, die im Nahfeld realisiert sind, nicht durchwegs nach den methodischen Vorgaben des Robusten Sicherheitsnachweiskonzepts behandelt. Als Teil einer Untersuchung zur Illustration des Mehrfachbarriersystems hat das Robuste Szenarium aber durchaus seine Bedeutung. Es sagt allerdings nur etwas über das Nahfeld aus und nicht über den notwendigen Sicherheitsbeitrag der Geosphäre, die erst dann erkennbar wäre, wenn ein wesentlich geschwächtes Nahfeld in der Bewertung vorausgesetzt würde. Nur indirekt ist die Wirksamkeit der Geosphäre aus einzelnen Parametervariationen sichtbar (siehe Abschnitt 7.7).

Bei der Biosphäre werden im Sicherheitsbericht die hydrogeologischen Auswirkungen unterschiedlicher Klimazustände sowie die unterschiedliche Erosion betrachtet. FEPs der (heutigen) Biosphäre wurden zumindest teilweise berücksichtigt (Einfluss des Menschen). Die Annahme einer kritischen Gruppe von Selbstversorgern ist sicher für viele FEPs der Biosphäre abdeckend. Ob damit alle realistischen Vorgänge und Gegebenheiten berücksichtigt sind, bleibt aber unklar. Die (natürlichen) Vorgänge während der Vergletscherung werden ausser Acht gelassen, da zu dieser Zeit keine Menschen in der Endlagerregion leben. Es erscheint der HSK fraglich, ob diese Begründung ausreicht, denn die Vorgänge während der Vergletscherung führen zu einer bestimmten Ausgangslage (auch im radiologischen Sinn) für die Zeit nach der Vergletscherung, in der die Vorgänge wiederum untersucht werden.

Die HSK beurteilt gewisse offene Fragen kritischer als die Nagra. Das betrifft den FEP 3.23 (Fehlerhaftes Einbringen der Bentonitpackung); hierzu erachtet die Nagra die notwendige Qualität der Verfüllung als klar erreichbar (NTB 93-22, Seite 175). Die Folgen einer durch unzureichende Verfüllung herabgesetzten Trockendichte der Bentonitpackung werden daher nicht näher untersucht. Dies betrifft auch den FEP 3.15 (Durchlässigkeit der Bentonitpackung für Gase). Obschon es aufgrund der FEP-Beschreibung unklar ist, ob es Gasdurchbrüche durch den Bentonit geben könnte, und wenn ja, in welchem Zustand der Bentonit sich dann befindet, wird das Problem mit einem Hinweis auf ein nicht erprobtes Konzept einer Sand-Zwischenschicht marginalisiert.

Das Vorgehen bei der Konstruktion von Szenarien ist nachvollziehbar. Ausgehend vom Referenzszenarium entstehen durch alternative Annahmen bezüglich der beteiligten FEPs unterschiedliche Zukunftsvarianten, die als "Parametervariationen" oder "alternative Modellierungen" innerhalb des Referenzszenariums oder als "alternative Szenarien" bezeichnet werden. Beispiele wurden im Abschnitt 2.1 genannt. Aus der Vielfalt dieser möglichen Sze-

narien werden einige ausgewählt, welche, gemessen am Dosisrisiko, für die realistischerweise zu erwartenden Zukunftsvarianten abdeckend sein sollen. Diese werden im Hinblick auf mögliche Personendosen weiter untersucht (siehe Abschnitt 9.4). Die Wahl der als abdeckend betrachteten Szenarien wurde von der HSK auch dadurch geprüft, dass sie eine unabhängige und nach einem anderen Ordnungsprinzip vorgehende Szenarienanalyse durch einen externen Experten erstellen liess (BASLER & HOFMANN (1996)). Die getroffene Auswahl konnte dabei bestätigt werden.

8.4 Dokumentation der Szenarienanalyse

Die Dokumentation der Szenarienanalyse in den Berichten NTB 93-22 und NTB 93-13 ist klar und ausführlich. Die Auswahl und Klassifizierung der FEPs wird in NTB 93-13 gut nachvollziehbar dargelegt. Die Beschreibung der einzelnen FEPs ist knapp, es wird aber jeweils auf weitere Dokumente verwiesen. Diese Referenzdokumente wurden im Rahmen der vorliegenden Stellungnahme nicht überprüft.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Beschreibung der Wechselwirkungen der FEPs unvollständig ist. Hier könnte, zusätzlich zu den Einflussdiagrammen, eine andere Darstellungsweise (Matrix) nützlich sein. Es wäre hier, wie auch generell, an die möglichen Vorteile von elektronischen Informationsträgern zu denken.

FEPs, die mit der (heutigen) Biosphäre einschliesslich Mensch zu tun haben, werden nur wenige beschrieben. Das steht im Einklang mit den erklärten Zielen der Sicherheitsanalyse.

Die verwendeten Begriffe sind im Allgemeinen klar beschrieben. Die Bedeutung und Abgrenzung einiger Begriffe bleibt dennoch etwas unklar. Das betrifft beispielsweise den Begriff "Szenarium". Einerseits ist damit eine realistische oder auch nicht-realistische Zukunftsvariante gemeint (NTB 93-22, Seiten 104ff). Andererseits wird der Begriff in der Systematik der Zukunftsvarianten, die in der Sicherheitsanalyse für die Berechnung der Konsequenzen ausgewählt wurden, dazu verwendet, die Varianten nach der Gesamtheit der darin betrachteten FEPs zu unterscheiden (NTB 93-22, Seiten 107ff und 165). Zukunftsvarianten, die gleiche FEPs haben, aber sich in den Annahmen über deren Eigenschaften unterscheiden, werden als alternative Modelle oder Parametervariationen innerhalb des gleichen Szenariums bezeichnet. Auch ist der Gebrauch des Begriffes "realistisch" zweideutig. Hiermit wird manchmal eine nicht unwahrscheinliche Situation oder Entwicklung charakterisiert, manchmal aber das, was physikalisch nicht gänzlich unmöglich wäre.

8.5 Zusammenfassende Beurteilung

Die Szenarienanalyse ist generell klar gegliedert und klar beschrieben. Die für die anschließende Konsequenzenanalyse ausgewählten Szenarien sind vermutlich für die effektiv zu erwartenden Zukunftsvarianten abdeckend. Solche FEPs, die vordringlich weiter untersucht werden müssen, werden entsprechend bezeichnet. Die Wechselwirkungen der FEPs untereinander sollten besser dokumentiert werden.

Die Trennung der Stufen der Szenarienanalyse sollte verbessert werden: Bei der Bildung der Einflussdiagramme und der Szenarien sollten FEPs nicht bereits deshalb weggelassen werden, weil sie aus technischen Gründen später nicht quantitativ behandelt werden können. Auch sollte die Definition einzelner FEPs nicht von der später anzuwendenden Modellier-technik abhängen.

9. Radiologische Auswirkungen

9.1 Einleitung

Für die Ausbreitungsrechnungen im Nahfeld, in der Geosphäre und in der Biosphäre hat die Nagra die deterministische Methode verwendet. Die verwendeten diskreten Parameterwerte werden von der Nagra als "realistisch-konservativ" bezeichnet, was bedeutet, dass es sich nicht um *best estimate* Werte handelt, sondern um solche, die im konservativen Bereich der realistischerweise zu erwartenden Intervalle liegen. Die Nagra hat einen sogenannten "Referenzfall" definiert, der die zu erwartenden Vorgänge mit "realistisch-konservativen" Daten beschreibt. Dazu wurden Parametervariationen innerhalb des Referenzfalls durchgeführt sowie alternative Szenarien analysiert. Zusätzlich wurde ein sogenanntes „Robustes Szenarium“ gerechnet, in dem auf die Retentionswirkung der Geosphäre ganz verzichtet wurde.

Die HSK hat den Referenzfall der Nagra mit eigenen Rechenprogrammen nachgerechnet und kann die Nagra-Resultate numerisch nachvollziehen. Mit Parametervariationen und alternativen Modellansätzen hat die HSK die Robustheit des Systems getestet, wobei die resultierenden Radionuklidflüsse mit einem stark vereinfachten, pragmatischen Biosphärenmodell in jährliche Individualdosen umgerechnet wurden.

9.2 Freisetzung aus dem Nahfeld

Der verdichtete Bentonit wurde von der Nagra als homogen-poröses Medium mit einer Porosität von 38% betrachtet. Für den diffusiven Transport im Nahfeld wurde für alle Radionuklide dieselbe effektive Diffusionskonstante verwendet. Unterschiede im Ausbreitungsverhalten der Radionuklide wurden allein über die Sorptionskoeffizienten berücksichtigt, was eine starke Vereinfachung darstellt. Es ist deshalb wichtig, dass die Sorptionsdaten und Diffusionskonstanten für jedes chemische Element sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

Für die beim ersten Wasserzutritt - nach dem Modell der Nagra nach 1000 Jahren - beginnende Auflösung des Abfallglases wurde eine konstante Auflösungsrate von $3.8 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2}$ pro Jahr verwendet. Durch diese Glaskorrosion steigen die Konzentrationen der Radionuklide entsprechend ihren Inventaranteilen an, maximal bis zu ihrer elementaren Löslichkeitslimite (siehe Tabelle 6.1). Die Nagra hat die Diffusion der Radionuklide durch den korrodierten Behälter nicht betrachtet, was eine konservative Vereinfachung darstellt. Der im Wasser ausserhalb der Glasmatrix entstehende Konzentrationsanstieg führt zur diffusiven Ausbreitung der Radionuklide durch den Bentonit. Der Austritt vom Nahfeld in die Geosphäre wird durch einen konstanten Grundwasserfluss von $2 \times 10^{-5} \text{ m}$ pro Jahr im Bereich des Endlagers bestimmt, was einem jährlichen Wasserfluss von ca. 3 m^3 durch die 0.135 km^2 grosse Endlagerfläche⁵ entspricht.

Die Nagra hat die folgenden vom Referenzfall abweichenden Fälle gerechnet:

N1 Kürzere Lebensdauer des Abfallbehälters (100 statt 1'000 Jahre).

N2 Längere Lebensdauer des Abfallbehälters (10'000 statt 1'000 Jahre).

⁵ Die Nagra verwendet zur Berechnung der Endlagerfläche (*repository area*) den Stollenquerschnitt von 3.7 m Durchmesser plus eine allseitig rund 3 m tiefe Auflockerungszone im Wirtgestein. Die Endlagerfläche ist somit die Summe der Stollenlängen bei einer Breite von 10 m.

- N3 Grössere Auflösungsrate des Abfallglases (3.8×10^{-2} statt 3.8×10^{-4} kg m⁻² a⁻¹), dadurch vollständige Auflösung der Glasmatrix in 1'500 statt 150'000 Jahren.
- N4 Konservative Löslichkeitslimiten der Elemente (siehe Tabelle 6.1).
- N5 Löslichkeitslimiten statt auf die Summe aller Isotope eines Elementes nur auf die im Abfall vorhandenen radioaktiven Isotope angewandt.
- N6 Konservative Sorptionskoeffizienten im Bentonit (siehe Tabelle 6.2).
- N7 Geringere Dicke des intakten Bentonit-Nahfeldes (0.2 m statt 1.38 m).
- N8 Grundwasserfluss durch das Endlagerareal 10-mal kleiner (0.3 statt 3 m³ a⁻¹).
- N9 Grundwasserfluss durch das Endlagerareal 10-mal grösser (30 statt 3 m³ a⁻¹).
- N10 Grundwasserfluss durch das Endlagerareal 100-mal grösser (300 statt 3 m³ a⁻¹).
- N11 „Randbedingung Null“, d.h. für die Berechnung der Nahfelddiffusion wird die Konzentration aller Radionuklide beim Austritt aus dem Bentonit gleich Null gesetzt. Dies kommt einem unbegrenzten Grundwasserfluss durch das Endlagerareal gleich.
- N12 Grundwasserfluss durch das Endlagerareal 10-mal grösser (N9), kombiniert mit konservativen Löslichkeitslimiten (N4).
- N13 Grundwasserfluss durch das Endlagerareal 10-mal grösser (N9), kombiniert mit konservativen Sorptionskoeffizienten im Bentonit (N6).
- N14 Kombination der Fälle N3 (grössere Glasauflösungsrate), N4 (konservative Löslichkeiten), N6 (konservative Sorption) und N11 („Randbedingung Null“).

Die Nagra folgert aus ihren Berechnungen, dass die Löslichkeitslimiten eine wichtige Rolle für die Limitierung der Radionuklid-Freisetzung aus dem Nahfeld spielen. Der Grundwasserfluss ist ebenfalls von grosser Bedeutung für die Diffusion der Radionuklide durch den Bentonit.

Die HSK hat mit dem Rechenprogramm TUBE, das nach der Methode der finiten Differenzen arbeitet und von der HSK entwickelt wurde, die folgenden Fälle (vgl. Tabelle 9.1) gerechnet und in HSK 23/51 dokumentiert:

1. Nagra-Referenzfall. Die HSK hat den Nagra-Referenzfall nachgerechnet und erhält dieselben Freisetzungskurven aus dem Nahfeld (siehe HSK 23/51).
2. „Basisfall“. Als „Basisfall“ wird die Rechnung mit den „realistischen“ HSK-Löslichkeitslimiten und HSK-Sorptionskoeffizienten bezeichnet. Alle anderen Parameter im „Basisfall“ sind dieselben wie im Nagra-Referenzfall. Unterschiede ergeben sich bei Se (Löslichkeit), U (Sorption) und Np (Löslichkeit und Sorption), siehe Tabellen 6.1 und 6.2.
3. „Konservative“ Sorptionsdaten und Löslichkeitslimiten (Tabellen 6.1 und 6.2). Wie in Kapitel 6 besprochen, ist die HSK der Ansicht, dass schlecht quantifizierbare Ungewissheiten mit entsprechend grosszügigen Parametervariationen abgedeckt werden sollten. Die Verwendung dieser Daten kommt daher einer Sensitivitätsanalyse gleich. Für Technetium beispielsweise haben Ungewissheiten in den Redoxbedingungen im Nahfeld zur Folge, dass dieses Element wegen der Möglichkeit der Oxidation zu Per-technetat (TcO₄⁻) im schlechtesten Fall nicht sorbiert und keine Löslichkeitslimite hat. (Siehe auch Kommentare zu den nachfolgenden Fällen 4 und 5)

4. Kombination „konservative“ Löslichkeitslimiten und „realistische“ Sorptionsdaten. Die Auswirkung von Ungewissheiten bei den maximalen Löslichkeiten auf die Nahfeldfreisetzung ist signifikant bei U, Np, Pd, Tc und Zr. Die Löslichkeitslimiten von Th, Pa, Pu und Sn werden in den HSK-Rechnungen nicht erreicht und kommen daher nicht zum Tragen. Nur knapp erreicht werden die Löslichkeitslimiten von Ra und Se, so dass die von der HSK aufgrund der Ungewissheiten gewählten sehr pessimistischen Werte kaum eine beschleunigende Wirkung auf die Nahfeldfreisetzung dieser beiden Elemente haben.
5. Kombination „realistische“ Löslichkeitslimiten und „konservative“ Sorptionsdaten. Die als Parametervariationen verwendeten tiefen K_d -Werte (für Pa, U, Np, Pu, Se, Tc, Sn und Ra) führen bei den im „Basisfall“ nicht löslichkeitslimitierten Elementen (Pa, Pu, Sn und teilweise Ra) zu einer früheren Freisetzung und zu stark erhöhten Maximalwerten. Bei den löslichkeitslimitierten Elementen (U, Np, Se, Tc) erhöhen sich die Freisetzungsmaxima nicht oder nur wenig, hingegen setzt die Freisetzung früher ein.
6. Verlust der Bentoniteigenschaften rund um die Glasmatrix durch Hitzeeinfluss, wodurch ein Drittel des Bentonits seine Retentionseigenschaften verliert. Der Effekt dieser Variation ist gering. Die Freisetzung aus dem Nahfeld tritt etwas früher ein, die Freisetzungsmaxima werden aber kaum beeinflusst. Die Nagra hat mit ihrem Fall N7 eine extremere Variante gerechnet.
7. Schnellere Glasauflösung aufgrund einer grösseren Glasauflösungsrate und einer durch Rissbildung grösseren Glasoberfläche als im Referenzfall der Nagra. Die verwendete Rate (siehe Tabelle 9.1) beruht auf Messungen an Gläsern von BNFL und Cogéma und führt zur vollständigen Auflösung der Glasmatrix in 7'000 statt 150'000 Jahren. Der Effekt dieser Variation ist für die meisten Radionuklide vernachlässigbar. Einzig bei ^{135}Cs verschiebt sich das Freisetzungsmaximum zu früheren Zeiten. Die Nagra hat mit ihrem Fall N3 eine etwas extremere Variante gerechnet.
8. „Randbedingung Null“: Rascher Wasserfluss durch den Endlagerbereich als Folge einer stark durchlässigen Auflockerungszone. Als Grenzfall wird die Konzentration aller Radionuklide beim Austritt aus dem Nahfeld gleich Null gesetzt. Diese Variation entspricht dem Fall 11 der Nagra und hat einen starken Einfluss auf die Freisetzung sämtlicher Radionuklide aus dem Nahfeld.
9. Kombination der Fälle 6 und 8. Die „Randbedingung Null“ (Fall 8) beschleunigt die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld stark. Der teilweise Verlust der Retentionseigenschaften des Bentonits (Fall 6) hat kaum einen zusätzlichen Einfluss auf die Freisetzung.
10. Kombination der Fälle 4 und 8. Die Verwendung pessimistischer Löslichkeiten zusätzlich zu Fall 8 führt bei U, Np, Pd, Tc und Zr zu einer zusätzlichen Erhöhung der Freisetzungsmaxima, da diese Elemente im Fall 8 noch löslichkeitslimitiert sind.
11. Kombination der Fälle 5 und 8. Die Verwendung pessimistischer Sorptionsdaten zusätzlich zu Fall 8 führt bei den löslichkeitslimitierten Elementen zu keiner Erhöhung der Freisetzungsmaxima. Eine solche Erhöhung ist dagegen ersichtlich bei Pa, Pu, Ra und Sn.
12. Kombination der Fälle 3 und 8. Dieser Fall ist dem Nagra-Fall N14 ähnlich. Die HSK hat zwar anders als die Nagra keine raschere Glasauflösung angenommen, denn ihr

Einfluss ist für alle Radionuklide minimal. Diese Kombination sehr pessimistischer Annahmen führt zu einer zeitlich frühen Freisetzung vieler Nuklide und zu hohen Freisetzungsmaxima.

Tabelle 9.1: Übersicht über die Nahfeld-Rechnungen der HSK. Die Rechnungen wurden sowohl für die Actinidenketten als auch für die Einzelnuclide ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn und ^{135}Cs durchgeführt. Für die Sorption und Löslichkeiten wurden die von der HSK vorgeschlagenen Daten verwendet, siehe Tabellen 6.1 und 6.2 (mit Ausnahme von Fall 1: Nagra-Daten).

Fall Nr. →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nachvollzug der Nagra-Rechnungen (<i>reference case</i>)	X											
„Basisfall“ (Sorption und Löslichkeiten „realistisch“)		X										
Sorption ¹ und Löslichkeiten „konservativ“			X									X
Sorption „realistisch“, Löslichkeiten „konservativ“				X						X		
Sorption „konservativ“ ¹ , Löslichkeiten „realistisch“					X						X	
1/3 des Bentonits degradiert ($K_d = 0$ und $D_p = 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) ²						X			X			
Glasauflösung in 7'000 Jahren (statt in 150'000 Jahren) ³							X					
„Randbedingung Null“ (alle Konz. = 0 am Nahfeldrand)								X	X	X	X	X

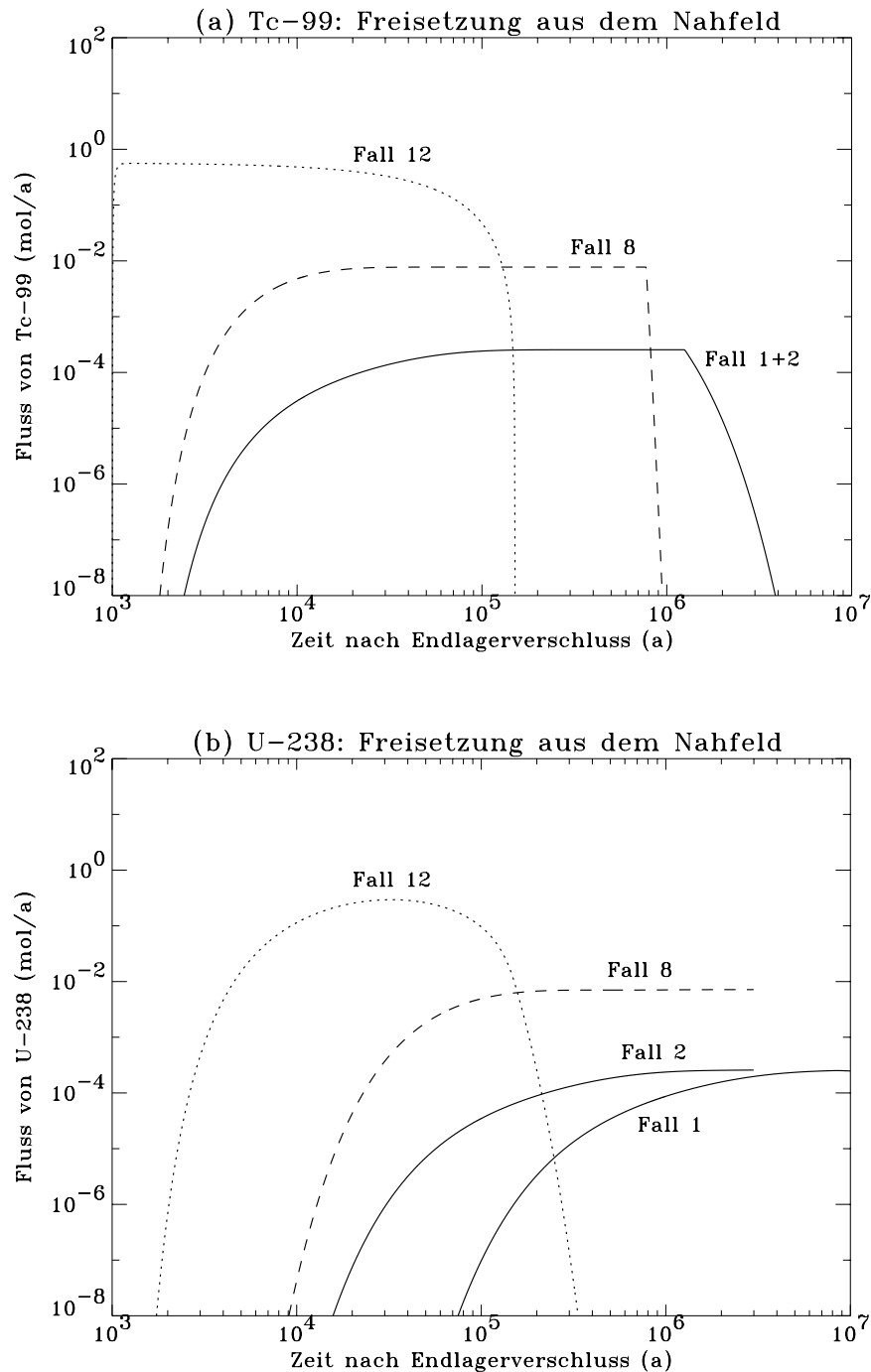
¹ Anstelle konservativer K_d -Werte verwendet die HSK die von ihr vorgeschlagenen Parametervariationen, s. Tabelle 6.2.

² Diese Parameter werden auf das innere Drittel (radial) des Bentonits angewandt, der restliche Bentonit wird als intakt modelliert. Als Vergleich: Die freie Diffusivität D_0 von H_2O in Wasser beträgt $2.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, wobei gilt: $D_p = (\delta r^{-2}) D_0$; der Term (δr^{-2}) berücksichtigt die Struktureigenschaften des Bentonits.

³ Auflösungsrate $7 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, hergeleitet aus dem Mittel der BNFL- und Cogema-Werte ($1.5 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), plus einem Faktor von 5 für den Einfluss von Magnetit. Totale Glasoberfläche wegen Rissbildung das 15-fache der äusseren Oberfläche (HSK 23/50).

Die Resultate dieser Rechnungen zeigen eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Nagra. In den Fällen 9 bis 12 wurden jene Parametervariationen kombiniert, von denen die grössten Effekte auf die Freisetzung aus dem Nahfeld erwartet wurden. Fall 12 kommt einem weitgehenden Versagen der Retentionswirkung des Nahfelds gleich. Zur Illustration sind in Figur 9.1 die zeitlichen Freisetzungskurven (HSK-Rechnungen) von ^{99}Tc und ^{238}U aus dem Nahfeld dargestellt.

Figur 9.1: Freisetzung aus dem Nahfeld: HSK-Rechnungen für ^{99}Tc (a) und ^{238}U (b). Dargestellt ist der Fluss aus dem gesamten Endlager (2693 Abfallbehälter) in Mol pro Jahr. Ausgezogene Kurven: Löslichkeiten und K_d -Werte der Nagra (Fall 1 in Tabelle 9.1) bzw. der HSK (Fall 2, bei ^{99}Tc identisch mit Fall 1); gestrichelte Kurven: „Randbedingung Null“ (Fall 8); punktierte Kurven: „Randbedingung Null“ mit konservativen Daten für Löslichkeit und Sorption (Fall 12).



9.3 Ausbreitung in der Geosphäre

Für die Modellierung der Ausbreitung der Radionuklide in der Geosphäre hat die Nagra ein Referenz-Szenarium definiert, das sich auf die Ausbreitung in der *low permeability domain* beschränkt. Diese wurde als *cataclastic/jointed zones* mit breiten, weit auseinander liegenden wasserführenden Kanälen modelliert. Dabei können die Radionuklide bis auf eine beschränkte Tiefe in die verwitterte Felsmatrix diffundieren und dort entsprechend den Sorptionskoeffizienten der Geosphäre reversibel sorbieren. Um die schlecht bekannte Variabilität der Fliessweggeometrie zu berücksichtigen, hat die Nagra aufgrund der Beobachtungen in den Probebohrungen der Nordschweiz sechs verschiedene geometrische Auslegungen der wasserführenden Zonen getestet. Für das Referenz-Szenarium wurde diejenige Geometrie gewählt, die in den Ausbreitungsrechnungen zu den höchsten Dosen führte. Zusätzlich zu den Fliessweggeometrien hat die Nagra folgende Parametervariationen und alternative Szenarien getestet:

- Längerer Fliesspfad (500 statt 200 m)
- Kürzerer Fliesspfad (100 statt 200 m)
- Konservative Sorptionskonstanten
- Konservative Diffusionskonstante in der Matrix ($D_e = 2 \times 10^{-4}$ statt $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}$ bei 5% Porosität)
- Reduzierte longitudinale Dispersionslänge (Peclet-Zahl, d.h. das Verhältnis Fliesspfad zu Dispersionslänge ist 50 statt 10)
- Erhöhte longitudinale Dispersionslänge (Peclet-Zahl 2 statt 10)
- Reduzierte diffusionszugängliche Matrixtiefe (0.95 statt 4.95 cm)
- 10-fach reduzierter Grundwasserfluss (Darcyfluss 2×10^{-6} statt $2 \times 10^{-5} \text{ m a}^{-1}$)
- 10-fach erhöhter Grundwasserfluss (Darcyfluss 2×10^{-4} statt $2 \times 10^{-5} \text{ m a}^{-1}$)
- 100-fach erhöhter Grundwasserfluss (Darcyfluss 2×10^{-3} statt $2 \times 10^{-5} \text{ m a}^{-1}$)
- „Robustes Szenarium“: Rückhaltewirkung der Geosphäre inexistent, d.h. die Radionuklidflüsse aus dem Nahfeld werden direkt als Quellterme für die Biosphärenausbreitung verwendet. Nagra-Referenzfall für das Nahfeld und Referenz-Szenarium für die Biosphäre.
- „Robustes Szenarium“ mit „Randbedingung Null“ (unbegrenzter Wasserfluss durch den Endlagerbereich)
- „Robustes Szenarium“ mit „konservativen“ Werten für die Glaskorrosionsrate, die Sorption im Nahfeld und die Löslichkeitslimiten.

Die Nagra folgert aus ihren Berechnungen, dass die Geosphäre für viele Radionuklide eine äusserst effiziente Barriere darstellt. Für die Nuklide ^{135}Cs und ^{79}Se ist die Geosphäre jedoch in der gewählten Darstellung der Fliesspfade eine ineffiziente Barriere. Diese beiden Nuklide steuern denn auch wichtige Beiträge zur Gesamtdosis bei. Den grössten Einfluss auf die Resultate der geosphärischen Ausbreitungsrechnungen der Nagra haben Änderungen im Grundwasserfluss, der sowohl die Diffusion aus dem Nahfeld als auch die Migration in der Geosphäre beeinflusst.

Die HSK hat mit dem Programm FEMTRAC, das nach der Methode der finiten Elemente arbeitet und von der HSK entwickelt wurde (HSK 21/31), die folgenden Varianten (vgl. Tabelle 9.2) gerechnet und in HSK 23/53 und HSK 23/54 dokumentiert. Wo nicht anders vermerkt, wurden für die geosphärischen Ausbreitungsrechnungen die sich im Basisfall (Fall 2) der Nahfeldberechnungen ergebenden Freisetzungsraten als Quellterm verwendet.

Tabelle 9.2: Varianten der geosphärischen Ausbreitungsrechnungen der HSK. Die Rechnungen wurden sowohl für die Actinidenketten als auch für die Einzelnuklide ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn und ^{135}Cs durchgeführt. Vom "Basisfall" abweichende Parameterwerte sind grau unterlegt.

Variante Nr. →	1	2	3	4	5	6	7	8 (LPD)	9 (LC)
Länge des Fließpfades [m]	200	200	200	200	200	200	200	200	141
Longitudinale Dispersionslänge [m]	20	20	20	20	20	20	20	20	14.1
Darcyfluss beim Endlager [m a^{-1}]	2.00e-5	2.00e-5	2.00e-5	2.00e-5	2.00e-5	2.00e-5	2.00e-5	3.68e-5	1.20e-1
Fliessporosität [-]	3.5e-7	3.5e-7	3.5e-7	3.5e-7	3.5e-7	3.5e-7	3.5e-7	2.11e-4	3.94e-3
Spezifische Oberfläche [$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$]	4.00e-3	4.00e-3	4.00e-3	4.00e-3	4.00e-3	4.00e-3	4.00e-3	0.75	1.08
Diffusionszugängliche Matrixtiefe [m]	4.95e-2	4.95e-2	4.95e-2	4.95e-2	9.5e-3	1.00e-3	4.95e-2	1.00e-3	1.00e-3
Matrixporosität [-]	0.05	0.05	0.05	0.005	0.05	0.005	0.05	0.01	0.01
effektive Diffusivität in der Matrix [$\text{m}^2 \text{a}^{-1}$]	5.00e-5	5.00e-5	5.00e-5	5.00e-6	5.00e-5	5.00e-6	5.00e-5	1.00e-5	1.00e-5
Quelle der K_d -Werte in der Geosphäre	Nagra real.	HSK real.	HSK kons.	HSK real.	HSK real.	Quarz real.	HSK real.	HSK real.	HSK real.
Quellterm aus Nahfeldrechnungsfall Nr. (vgl. Tabelle 9.1)	Fall 1	Fall 2	Fall 2	Fall 2	Fall 2	Fall 2	Fall 12	Fall 2	Fall 8

- Varianten Nr.:
- 1 Nagra-Referenzfall SA-60A
 - 2 „Basisfall“ (Nagra-Referenzfall mit „realistischen“ HSK-Sorptionsdaten, vgl. Tabelle 6.3)
 - 3 Nagra-Referenzfall mit „konservativen“ HSK-Sorptionsdaten, siehe Tabelle 6.3.
 - 4 Matrixporosität = 0.5% (statt 5%)
 - 5 Diffusionszugängliche Matrixtiefe = 0.95 cm (statt 4.95 cm), d.h. Matrixdicke = 2 cm, Fließöffnung = 0.1 cm
 - 6 Quarzbelag mit Porosität 0.5%, Matrixtiefe = 0.1 cm. K_d -Werte für Quarz (siehe Tabelle 6.3).
 - 7 Nahfeld sehr konservativ (Tabelle 9.1, Fall 12: Löslichkeiten und Sorptionsdaten „konservativ“, „Randbedingung Null“), Fernfeld „Basisfall“ (Variante 2).
 - 8 Variante LPD = *Lower Permeability Domain* (siehe Kapitel 4)
 - 9 Variante LC = *Lower Crystalline* (siehe Kapitel 4)

1. Nagra-Referenzfall. Die HSK hat den Nagra-Referenzfall mit dem entsprechenden Nahfeld-Quellterm (Fall 1 in Tabelle 9.1) nachgerechnet und erhält dieselben Resultate (siehe HSK 23/53).
2. „Basisfall“ der HSK. Rechnung mit dem Quellterm aus dem Nahfeld-Fall 2 (Tabelle 9.1) und „realistischen“ HSK-Sorptionsdaten für die Geosphäre (siehe Tabelle 6.3). Die Unterschiede zum Nagra-Referenzfall (siehe Figur 9.3) sind vor allem auf die Unterschiede in den „realistischen“ Nahfeldparametern (Löslichkeitslimiten, Sorptionsdaten) zurückzuführen.
3. „Konservative“ HSK-Sorptionsdaten für die Geosphäre (siehe Tabelle 6.3). Die Verwendung von pessimistischen Parametervariationen hat zum Teil eine sehr rasche Migration in der Geosphäre zur Folge.
4. Um den Einfluss der Matrixdiffusion auf das Migrationsverhalten in der Geosphäre zu testen, wird das Retentionsvolumen der diffusionszugänglichen Felsmatrix um einen Faktor 10 reduziert. Dabei wird die Porosität um das zehnfache reduziert, wodurch sich die effektive Diffusivität bei gleichbleibender Porendiffusivität ebenfalls um das zehnfache verkleinert. Diese Variation führt zu einem etwas rascheren Transport durch die Geosphäre. Die Dosismaxima werden dadurch aber kaum erhöht.
5. Die Eindringtiefe für die Matrixdiffusion wird etwa um den Faktor 5 reduziert. Die Nagra hat diese Parametervariation ebenfalls gerechnet. Diese Annahme hat einen stärkeren Einfluss auf die Freisetzungskurven als Variante 4 und führt auch zu leicht höheren Dosismaxima.
6. In den Bohrproben sind reichlich Quarzadern vorhanden. Es ist daher anzunehmen, dass die Fliesswege teilweise mit einem Quarzbelag überzogen sind. In dieser Variante wird als Extremfall angenommen, dass der gesamte Fliessweg mit einem 1 mm dicken Quarzbelag von 0.5% Porosität überzogen ist. Die Matrixdiffusion mit Sorption findet nur im Quarzbelag statt. Die K_d -Werte für Quarz sind tief (siehe Tabelle 6.3), und die Geosphäre hat in diesem Fall für die meisten Radionuklide nur noch wenig Retentionswirkung.
7. Sehr konservatives Nahfeld. Geosphäre wie im „Basisfall“ (Variante 2), Quellterm aus sehr konservativer Nahfeld-Rechnung (Fall 12), die ein weitgehendes Versagen der Retentionswirkung des Nahfelds simuliert.
8. In der Variante LPD (*lower permeability domain*, siehe Kapitel 4) wird das konzeptuelle Modell der Nagra für das tiefliegende Kristallin übernommen. Die Tiefe der diffusionszugänglichen Matrix wird um den Faktor 50 und die Matrixporosität um den Faktor 5 reduziert. Die diffusionszugängliche spezifische Oberfläche wird hingegen um fast das 200-fache erhöht, was die Verminderung von Matrixtiefe und Porosität mehr als kompensiert und das Retentionsvermögen der Geosphäre verbessert. Das Szenarium LPD führt folglich zu einer verlangsamten Radionuklidenausbreitung und zu teilweise tieferen Dosismaxima.
9. In der Variante LC (*lower crystalline*, siehe Kapitel 4) wird die Trennung in eine *lower permeability domain* und *major water conducting faults* nicht übernommen, sondern alle vorhandenen hydraulischen Daten werden als regionale bzw. lokale Variation einer Grundgesamtheit betrachtet. Daraus resultieren wesentlich höhere Wasserflüsse, weshalb als Quellterm die Ergebnisse des Nahfeld-Falles 8 („Randbedingung Null“) ver-

wendet wurde. Diese Variante hat einen sehr raschen Radionuklid-Transport in der Geosphäre zur Folge. Die Geosphäre hat bei dieser Variante ihre Barrierenwirkung weitgehend verloren.

Die HSK kann mit den gerechneten Varianten die Ergebnisse der Nagra bestätigen. Eine rasche Migration durch die Geosphäre erhält man mit den Varianten 3 („konservative“ Sorptionsdaten), 6 (Quarzadern) und 7 (Versagen der Retention im Nahfeld). Die Variante 9 (LC) ergibt die zeitlich früheste Freisetzung aus der Geosphäre und die höchste Dosis, sie erfüllt aber das Schutzziel von 0.1mSv a^{-1} trotzdem, wie aus Figur 9.3 ersichtlich ist.

9.4 Dosisberechnung

Die Nagra führte umfassende Biosphärenrechnungen mit dem Modell TAME (NTB 93-04) durch. Als Referenz-Szenarium wurde ein gemässigtetes, zwischeneiszeitliches Klima gewählt mit Exfiltration in die Lockergesteine des Rheintales. Zusätzlich hat die Nagra folgende Parametervariationen und alternative Szenarien gerechnet:

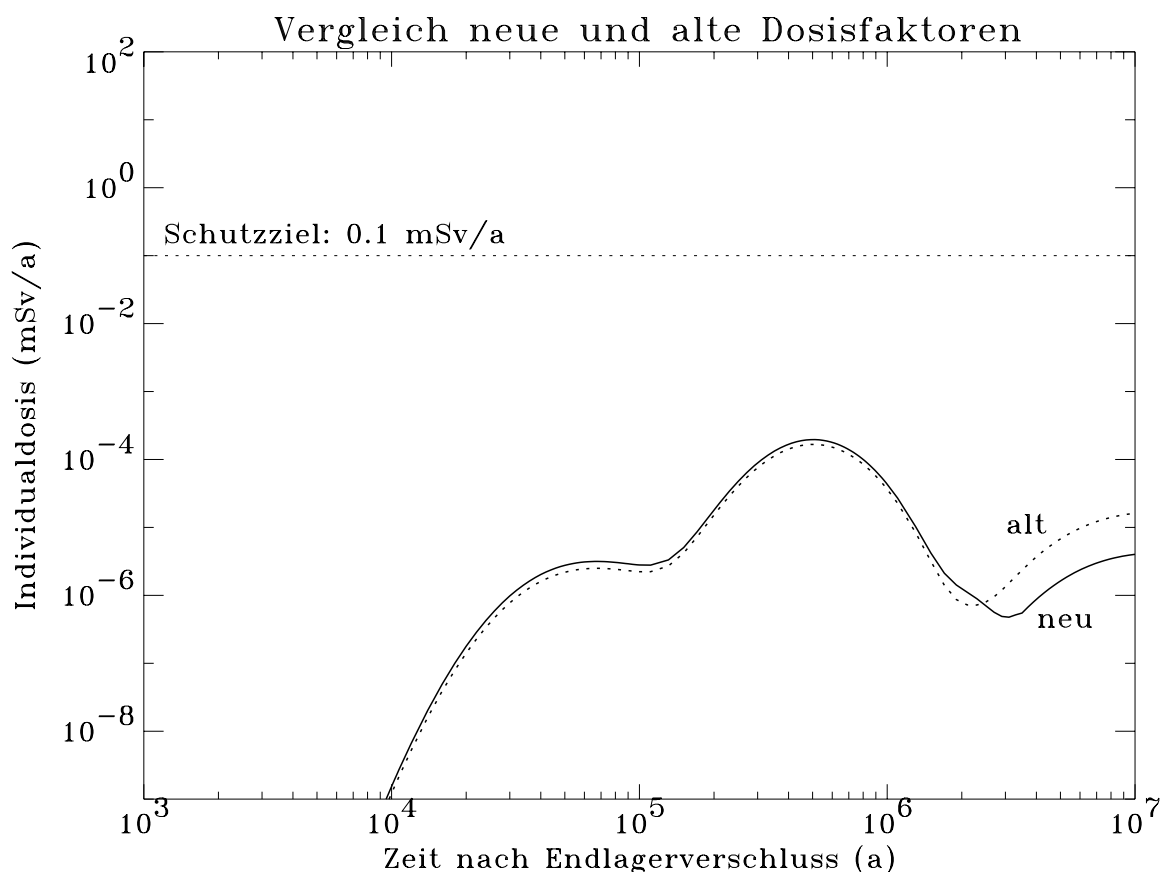
- Schwächere Sorption in der Biosphäre (Faktor 10)
- Stärkere Sorption in der Biosphäre (Faktor 10)
- Die Bewässerung erfolgt ausschliesslich mit Rheinwasser (statt nur zu 50%)
- Die Bewässerung erfolgt ausschliesslich mit Wasser aus dem lokalen Grundwasseraquifer (statt nur zu 50%)
- Reduzierte Erosionsrate (Faktor 10)
- Erhöhte Erosionsrate (Faktor 100)
- Mächtigkeit des lokalen Grundwasseraquifers 20 m (statt 2 m)
- Mächtigkeit des lokalen Grundwasseraquifers 0.2 m (statt 2 m)
- Beim Austritt aus der Geosphäre kommen sämtliche Radionuklide in den Bereich einer Grundwasserfassung und damit ins Trinkwasser
- Die Stollen- und Schachtverfüllung wird zum dominierenden Migrationspfad (Darcyfluss 8.7 ma^{-1})
- Die Auflockerungszone um den Schacht wird zum dominierenden Migrationspfad (Darcyfluss 2.9 ma^{-1})
- Trockenes Klima mit weniger Niederschlägen und vermehrter Bewässerung aus dem lokalen Grundwasseraquifer
- Feuchtes Klima mit mehr Niederschlag und keiner Bewässerung
- Periglaziales Klima mit Permafrost (Tundra)
- Kein lokaler Grundwasseraquifer vorhanden: Freisetzung in den Rhein
- Kein lokaler Grundwasseraquifer vorhanden: Freisetzung in die untere Bodenschicht (*Deep Soil*)

Die Nagra kommt zum Schluss, dass die Parametervariationen nur einen geringen Einfluss auf die totale Dosis haben. Die auf das Klima bezogenen Alternativ-Szenarien haben einen starken Effekt auf die Dosis, genauso wie das Versagen der Schachtverfüllung und die Mig-

ration in der Auflockerungszone. Die resultierenden Dosismaxima liegen aber in keinem der gerechneten Fälle mehr als etwa eine Grössenordnung über dem des Referenz-Szenariums.

Für die Ermittlung der Individualdosen hat die Nagra die 1987 von der britischen NRPB empfohlenen Dosisfaktoren verwendet (NRPB 1987). Diese Daten sind in der Zwischenzeit durch neue Erkenntnisse überholt. Die HSK hat sie noch für den direkten Vergleich mit den Nagra-Rechnungen verwendet. Figur 9.2 zeigt den Einfluss der neuen Dosisfaktoren auf die Dosiskurve im Nagra-Referenzfall. Für alle anderen Rechnungen verwendet die HSK die neuen Werte der Strahlenschutzverordnung (StSV 2001), die mit demjenigen der IAEA (1996) übereinstimmen.

Figur 9.2: Nagra-Referenzfall (Variante 1 in Tabelle 9.2) mit HSK-Biosphärenmodell. Vergleich der neuen Dosisfaktoren (StSV 2001) mit den von der Nagra verwendeten (NRPB 1987). Die dominierenden Nuklide sind ^{79}Se bis ca. 10^5 Jahre, ^{135}Cs bis kurz vor 2×10^6 Jahre, ^{99}Tc bei 2×10^6 Jahren und danach ^{231}Pa von der Kette 4N+3.



Die HSK beschränkt sich bei ihren Dosisberechnungen auf ein einfaches Modell, das die Hauptflüsse der Radionuklide im Referenz-Szenarium grössenordnungsmässig richtig erfasst. Die Rechnungen der Nagra haben gezeigt, dass der Trinkwasserpfad für viele Nuklide nicht der wichtigste Expositionspfad ist, und dass die Gesamtdosen deutlich unterschätzt werden, wenn allein der Trinkwasserpfad berücksichtigt wird. Wichtige Parameter sind auch der Fleischpfad, der Gemüsepfad und der Milchpfad, deren Bedeutung gegenüber dem Trinkwasserpfad mit zunehmender Bewässerung aus dem Aquifer zunimmt. Das

vereinfachte Biosphärenmodell (BASLER & HOFMANN 1998) besteht aus den folgenden Komponenten:

1. Verdünnung und Sorption im lokalen quartären Grundwasseraquifer.
2. Entnahme aus dem lokalen quartären Grundwasseraquifer und Eintrag durch Bewässerung in die oberste Bodenschicht (*Top Soil*)⁶.
3. Verdünnung und Sorption im *Top Soil*.
4. Ohne Bewässerung: Fluss vom lokalen quartären Grundwasseraquifer in den *Top Soil* durch kapillaren Aufstieg.

Die HSK hat ihr Biosphärenmodell auf die Variante 1 der geosphärischen Ausbreitung (Nagra-Daten für Nahfeld und Geosphäre) unter Verwendung der Dosisfaktoren aus NRPB (1987) angewandt. Die Übereinstimmung der Resultate mit denen der Nagra, die mit dem vollständigen TAME-Modell (NTB 93-04) errechnet wurden, ist gut (HSK 23/59). Die Dosiskurve für ¹³⁵Cs zeigt im vereinfachten Biosphärenmodell eine leichte Verzögerung des Anstiegs der Dosis gegenüber dem Nagra-Modell, die Maximaldosis ist aber mit beiden Modellen dieselbe. Es ist anzumerken, dass im vereinfachten Biosphärenmodell der Nuklid Aufbau über Zerfallsketten nicht berücksichtigt wird. Die dadurch zu erwartende Unterschätzung der gesamten Individualdosis fällt aber nicht ins Gewicht (HSK 23/59).

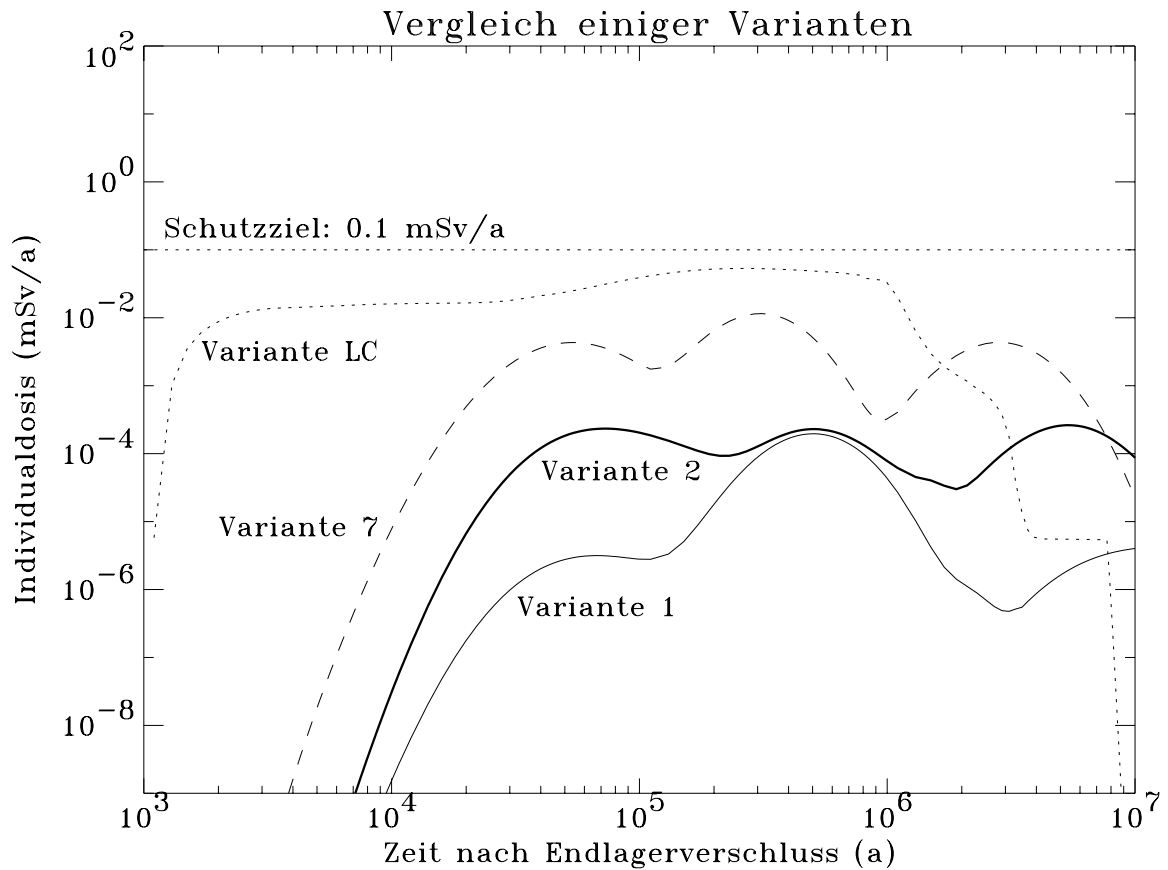
Die Dosisberechnungen wurden mit den Nuklidflüssen aus den verschiedenen Varianten der geosphärischen Ausbreitung durchgeführt (HSK 23/59). Eine Auswahl der Resultate ist in Figur 9.3 dargestellt. Bei allen HSK-Varianten werden die Dosen im früheren Zeitsegment durch ⁷⁹Se, im späteren durch ²³⁷Np dominiert (Actinidenkette 4N+1). Im Nagra-Referenzfall dominiert im späten Zeitsegment nicht ²³⁷Np, sondern das mit ²³⁵U im radiologischen Gleichgewicht stehende ²³¹Pa (Kette 4N+3). Im mittleren Abschnitt dominiert ¹³⁵Cs bei den Varianten 1 und 2, ⁹⁹Tc hingegen bei Variante 7. Die inzwischen bereinigten Daten für die maximalen Löslichkeiten von Np (vgl. Abschnitt 6.3 und Tab. 6.1) würden auch in den HSK-Rechnungen zu einer Abschwächung der Dosiskurve von ²³⁷Np führen.

Das in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegte Schutzziel, die maximal zulässige Individualdosis von 0.1 mSv a⁻¹, wird in allen gerechneten Szenarien und Varianten eingehalten. Im Referenzfall der Nagra erreicht die Dosiskurve nach 300'000 Jahren den Maximalwert von 2×10⁻⁴ mSv a⁻¹. Den höchsten Dosiswert der von der Nagra gerechneten Fälle (3×10⁻² mSv a⁻¹ nach 300'000 Jahren) wird mit dem „Robusten Szenarium“ mit „Randbedingung Null“ ermittelt. Die HSK erhält mit der Variante 9 (LC) die höchste Individualdosis. Bei diesem Szenarium erreicht die Individualdosis bereits in den ersten 2000 Jahren den Wert von 10⁻² mSv a⁻¹. Das Maximum von 5×10⁻² mSv a⁻¹ wird nach 300'000 Jahren erreicht und bleibt bis 1 Million Jahre praktisch unverändert.

Das Mehrfachbarrierenkonzept erweist sich als robust gegenüber Unsicherheiten in den verschiedensten Parametern, wie auch gegenüber alternativen Szenarien. Selbst mit sehr konservativ gewählten Ansätzen wird das Schutzziel nicht verletzt. Einige Varianten haben einen stark beschleunigenden Effekt für die Radionuklid-Ausbreitung, ohne jedoch das Dosismaximum stark zu erhöhen.

⁶ Als „Top Soil“ wird im TAME-Modell die oberste Bodenschicht bezeichnet, die den Wurzelbereich enthält.

Figur 9.3: Totale Individualdosen im Vergleich. Dargestellt sind ausgewählte Beispiele von HSK-Rechnungen. Die Dosisberechnungen erfolgten mit einem vereinfachten Biosphärenmodell und mit den neuen Dosisfaktoren der Strahlenschutzverordnung (StSV 2001). Die Kurvenbezeichnungen entsprechen den Varianten in Tabelle 9.2. Mit Ausnahme der Varianten 7 und LC wurden als Eingabedaten für die geosphärischen Ausbreitungsrechnungen die Resultate aus Fall 2 (Tabelle 9.1) der Freisetzung aus dem Nahfeld verwendet.



10. Zusammenfassung und Folgerungen

10.1 Zusammenfassende Beurteilung

Mit ihrer Überprüfung der Sicherheitsanalyse Kristallin-I hat die HSK die wesentlichen Sicherheitselemente der von der Nagra vorgelegten Studie aufgrund ihrer eigenen Interpretation der geologischen Daten und ihrer Bewertung der technischen Barrieren nachvollzogen. Daraus ergaben sich auch Hinweise der HSK auf eingehender zu untersuchende Fragen für den Fall, dass das Projekt der geologischen Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz weitergeführt wird. Die vorliegende Beurteilung der technischen Barrieren lässt sich weitgehend auch auf das Projekt eines Lagers im Opalinuston übertragen. Ferner richten sich Hinweise zu den allgemeinen Aspekten auch auf zukünftige Sicherheitsnachweise für konkrete Lagerprojekte.

Generell stellt die HSK fest, dass die Nagra eine hochwertige Sicherheitsanalyse für ein geologisches Tiefenlager im kristallinen Grundgebirge erarbeitet hat. Die vielen positiven Aspekte der Sicherheitsanalyse werden hier nicht aufgelistet; vielmehr werden die sich aus den einzelnen Überprüfungen ergebenden Hinweise auf Verbesserungen zusammengestellt. Die Zusammenstellung erfolgt in der Reihenfolge der Kapitel der vorliegenden Stellungnahme.

Allgemeine Aspekte

Mit der Sicherheitsanalyse Kristallin-I beabsichtigte die Nagra nicht den Sicherheitsnachweis für ein Lagerprojekt im Rahmen eines Bewilligungsverfahrens, sondern die Beurteilung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz als mögliches Wirtgestein zu erbringen. Dieser Zielsetzung entsprechend hat die Nagra ein vereinfachtes Abfallinventar angenommen und gewisse Vorgänge (z.B. unbeabsichtigtes menschliches Eindringen) nur summarisch behandelt. Die einem Bewilligungsgesuch für ein konkretes Projekt beizulegende Sicherheitsanalyse muss demgegenüber das real vorgesehene Abfallinventar und alle sicherheitsrelevanten Vorgänge berücksichtigen.

Einige wichtige Hintergrundberichte wurden bedeutend später als die Sicherheitsanalyse Kristallin-I veröffentlicht. Die in einem zukünftigen zur Begutachtung eingereichten Sicherheitsbericht zitierten und als Grundlagen dienenden Dokumente müssen zur Zeit der Einreichung vorliegen.

Für die Sicherheitsanalyse Kristallin-I hat die Nagra eine deterministische Analyse durchgeführt, welche die wichtigsten Szenarien abdeckt. Für einen ausführlichen Sicherheitsnachweis ist auch das kumulierte Risiko aus den nicht abgedeckten, wenig wahrscheinlichen Szenarien zu erfassen. Hierzu wäre eine Ergänzung der deterministischen Analyse mit probabilistischen Methoden heranzuziehen.

Der Forderung der Richtlinie HSK-R-21 entsprechend beruht die Langzeitsicherheit auf einem System von gestaffelten Sicherheitsbarrieren (Mehrbarrierenkonzept). In einem solchen System soll die allfällige Schwäche einer Barriere durch das Barriersystem aufgefangen werden. Die Nagra hat die Sicherheitsleistung der einzelnen Barrieren untersucht. Die Diskussion der Ergebnisse unter dem Aspekt des Auffangens allfälliger Barrierschwächen wurde aber nicht vollständig durchgezogen.

Geologische Grundlagen

Die von der Nagra ausgewerteten Ergebnisse der umfangreichen erdwissenschaftlichen Untersuchungen bestätigen, dass die Erkundung des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle schwierig ist. Die beiden verbliebenen Kristallin-Gebiete (West und Ost) können mit den vorliegenden Kenntnissen nach wie vor geologisch nicht genügend belastbar charakterisiert werden. Dies gilt auch nach den zusätzlichen Erkundungen im Gebiet West (Seismik im Mettauertal). Im Gebiet Ost (Sondierbohrung Siblingen) wurde das Störungsnetz anhand einer Projektion aus entfernten Gebieten des Schwarzwaldes ermittelt. Das vorgelegte Störungsmodell, das kaum durch lokale Beobachtungen gestützt ist, ist ungenügend belegt.

Wegen der erheblichen Heterogenität und Komplexität des Aufbaus ist die Übertragbarkeit der Resultate aus den einzelnen Bohrungen auf ein grösseres Gebiet praktisch nicht möglich. Dies wird weiter erschwert durch die für das kristalline Grundgebirge beschränkte Anwendbarkeit der Reflexionsseismik. Auch die Nagra stellt fest, dass keine einfache Korrelation zwischen der Wasserführung und dem Störungsmuster im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz hergestellt werden kann. So ist es trotz der umfangreichen Untersuchungen noch nicht möglich, geeignete Gesteinskörper mit genügender Ausdehnung überzeugend abzugrenzen.

Die Chancen, dass eine geeignete geologische Situation für ein Tiefenlager für hochaktive Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz erfolgreich gefunden werden kann, haben sich seit Projekt Gewähr 1985 nicht wesentlich verändert. Die Einschätzung der Lage, wie sie im damaligen Gutachten gegeben wurde, gilt deshalb auch noch heute. Selbst wenn die gesuchte geologische Situation existiert, wird die Standortsuche schwierig, zeitraubend und aufwändig. Die schwer prognostizierbare heterogene Struktur des Grundgebirges wird eine grosse Zahl von Sondierbohrungen erforderlich machen, die unerwünschte, für den Standort abträgliche Perforationen des Wirtgesteins mit sich ziehen.

Hydrogeologische Verhältnisse

In der Ermittlung der wirksamen wasserführenden Systeme im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz hat die Nagra die Bedeutung der kataklastischen Störungszonen (Kakirite) überbewertet. Gestützt auf einen Vergleich der Zuflusspunkte in den Sondierbohrungen mit ihren strukturgeologischen Charakteristiken sowie auf Befunde aus dem Südschwarzwald, muss angenommen werden, dass geklüftete Bereiche in sogenannten Härtlingen (felsische und quarzische Zonen, Ganggesteine, Mineralerzgänge) wegen ihres Sprödverhaltens bevorzugte Wasserwegsamkeiten bilden. Das hat einen erheblichen Einfluss auf die Rückhaltungswirkung des Wirtgesteins für aus dem Lager freigesetzte Radionuklide.

Der von der Nagra vorgelegte hydrogeologische Modellansatz über die schichtartige Verteilung der Durchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig begründen. Die Aufteilung in einen oberen höher durchlässigen und einen unteren geringdurchlässigen Bereich ist eine mögliche Interpretation der Daten. Etliche in den Sondierbohrungen beobachtete Verhältnisse lassen sich mit diesem Modell jedoch nicht erklären.

Der von der Nagra vorgelegte Konzeptansatz der geringdurchlässigen Kristallinblöcke, die von höherdurchlässigen grossen Störungszonen begrenzt werden, erscheint als zu grobe Vereinfachung. Solche grosse wasserführende Störungszonen wurden in den Sondierboh-

rungen nicht beobachtet. Aufgrund der vorliegenden Befunde muss man davon ausgehen, dass die hydrogeologischen Verhältnisse komplexer sind und dass an Härtinge gebundene stark wasserführende Systeme auch innerhalb von Kristallinblöcken vorkommen. Zur hydrogeologischen Repräsentation des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz sind demzufolge alternative konzeptuelle Modelle zu entwickeln.

Mit drei Sondierbohrungen (Böttstein, Leuggern und Kaisten) im Gebiet West und einer (Siblingen) im Gebiet Ost ist die Datengrundlage zur Charakterisierung der regionalen Transmissivitätsverteilung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz angesichts der Grösse, Variabilität und Heterogenität der Gebiete nicht ausreichend, um einen belastbaren und repräsentativen hydrogeologischen Datensatz herleiten zu können. Die Frage, ob gering durchlässige Kristallinblöcke mit genügender Ausdehnung zur Aufnahme eines Tiefenlagers überhaupt existieren, konnte mit den bisherigen Sondierungen nicht beantwortet werden. Hierzu wären umfangreiche Erkundungen sowie der Einbezug von Befunden aus dem angrenzenden Südschwarzwald erforderlich.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Kluftbeläge ist für die Rückhaltung der Radionuklide im Wirtgestein von grosser Bedeutung. Zum besseren Verständnis der Rückhaltevorgänge sind eingehendere Analysen dieser Oberflächenbeschaffenheit angezeigt. Dabei sollten vermehrt auch grossräumige untertägige Aufschlüsse im Südschwarzwald in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

Die hydraulische Leitfähigkeit in geklüfteten Gesteinen weist eine Skalenabhängigkeit auf: Je nach Bezugs- bzw. Probengrösse liefert die Durchlässigkeitsbestimmung unterschiedliche Resultate. Die bisherigen Datengrundlagen erlauben keine quantitative Bewertung dieses Aspekts. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig.

Im Bereich West liegt eine ausgeprägte Wärmeanomalie vor, welche nach den heute bekannten geologischen Verhältnissen einzig durch das Aufströmen von Tiefenwasser erklärt werden kann. Die erhöhte Temperatur wirkt sich auf die Dichte und Viskosität des Tiefenwassers aus. Bei zukünftigen Grundwasserfliessmodellen sollten diese Einflüsse mitberücksichtigt werden.

Die aus der Thermalquelle Zurzach geförderte Wassermenge verursacht im Wasserdruck des Grundgebirges einen markanten Absenktrichter, dessen Einfluss bis ins Gebiet von Leuggern und Böttstein reicht. Zur Gewährleistung der von der Geosphäre geforderten Barrierenwirkung und wegen der sich ergebenden Nutzungskonflikte sind bei der Standortwahl für ein geologisches Tiefenlager solche Gebiete zu meiden.

Abfallinventar

Das für die Sicherheitsanalyse Kristallin-I von der Nagra festgelegte Abfallinventar entspricht nicht dem effektiv zu erwartenden Inventar eines geologischen Tiefenlagers für hochaktive (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA). Mit dem vereinfachten Inventar (ausschliesslich verglaste hochaktive Abfälle, ohne abgebrannte Brennelemente und LMA) können einige von der Nagra für Kristallin-I gesetzte Ziele nicht voll erreicht werden. Das betrifft die Reevaluation des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz als mögliches Wirtgestein für ein HAA/LMA-Lager sowie die Bestimmung der zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlichen Wertebereiche wesentlicher Parameter als Leitgrössen für eine Standortsuche.

Aus den im vollständigen Aktivitätsinventar des Lagers aufgeführten Radionukliden wählt die Nagra für die Berechnung der möglichen radiologischen Auswirkungen diejenigen aus, die aufgrund einer vereinfachten Abschätzung der Trinkwasserdosis relevant sind. Es werden dabei einige Radionuklide nicht berücksichtigt, die bei Szenarien mit frühzeitiger Freisetzung einen Beitrag zur Dosis liefern könnten. Für zukünftige Sicherheitsanalysen soll die Nuklid-auswahl für jedes einzelne betrachtete Szenarium überprüft und festgelegt werden.

Die von der Nagra vorgenommene Vereinfachung der Zerfallsketten führt in der 4N+2-Kette durch die Missachtung des Pu-238-Zweigs zu einer Unterschätzung der Aktivität von U-234. In zukünftigen Sicherheitsanalysen ist dieser Mangel zu beheben.

Die international anerkannte Halbwertszeit von Se-79 hat eine wesentliche Korrektur erfahren. In zukünftigen Sicherheitsanalysen ist der neue Wert zu verwenden. Dies bezieht sich auch auf die Berechnung der Inventare der Brennelemente und verglasten HAA.

Geochemische Daten

Die Nagra nimmt an, dass die für das Nahfeld ermittelten geochemischen Bedingungen für das ganze Nahfeld (Glasmatrix, Endlagerbehälter und Bentonitpackung) gültig sind. Hinsichtlich des Redoxpotentials Eh ist diese Annahme fraglich. Ein lokaler Eh-Wert innerhalb des Nahfelds ist allerdings schwer festzulegen, weil die redox-aktiven Spezies nicht klar identifiziert sind. Hierzu empfehlen sich weitere Untersuchungen. Ansonsten ist diese Ungewissheit für Radionuklide, deren chemisches Verhalten redox-sensitiv ist, in entsprechenden Sicherheitsmargen bei der Löslichkeit und der Sorption zu berücksichtigen.

Die Umgebungstemperatur des Wirtgesteins wird mit 55°C angenommen und wird im Nahfeld wegen der Wärmeproduktion des radioaktiven Abfalls über grössere Zeiträume höher sein. Demgegenüber werden die Löslichkeitslimiten und die Sorptionsdaten für Raumtemperatur (25°C) hergeleitet. Die Temperaturabhängigkeit dieser Daten wird nicht quantitativ berücksichtigt. In zukünftigen Sicherheitsanalysen ist der Temperatureinfluss auf die geochemischen Daten zu berücksichtigen.

Barrierenwirkung des Endlagersystems

Die langfristige Auflösungsrate der Glasmatrix wird stark durch die Konzentration des aus der Matrix herausgelösten SiO₂ im anstehenden Wasser beeinflusst. Die Auflösungsrate reagiert deshalb empfindlich auf Mechanismen, die SiO₂ aus der Lösung entfernen. Im Nahfeld kann das aus der Glasmatrix herausgelöste Silizium aus dem korrodierten Endlagerbehälter in die Bentonitpackung hinein diffundieren. Der Einfluss dieses Vorgangs auf die Auflösungsrate der Glasmatrix sollte geklärt werden.

Während der Anfangsphase der Endlagerung ist aufgrund der chemischen Bedingungen mit der Entstehung einer instabilen passivierenden Schicht auf der Oberfläche des Endlagerbehälters zu rechnen. Unter solchen Bedingungen ist von einer Lochfrass-Korrosion des Endlagerbehälters auszugehen, welche die Dauer der Behälterintegrität verkürzen kann. Der Einfluss dieses Vorgangs auf die Behälterlebensdauer bedarf weiterer Abklärungen.

Das gewählte Material des Endlagerbehälters gilt als gegenüber Spannungsrisskorrosion unempfindlich. Das Verhalten des Materials im Hinblick auf Spannungsrisskorrosion hängt aber von den chemischen Umgebungsbedingungen ab. Die im Sicherheitsbericht genannten

Experimente können unterschiedlich interpretiert werden. Die Frage nach der Bedeutung allfälliger Spannungsrisse für die Behälterintegrität ist deshalb noch nicht restlos geklärt.

Die nach dem Quellen vorliegende Dichte des Bentonits muss in einem engen Wertebereich liegen: Sie darf einerseits nicht so gross sein, dass der resultierende Quelldruck zusammen mit dem Wasserdruck den Bergdruck des Wirtgesteins übersteigt. Andererseits muss sie aber gross genug sein, damit die Festigkeit des Bentonits ausreicht, um die Endlagerbehälter langfristig zu tragen. Angesichts der engen Bandbreite sollte die Nagra die seit Projekt Gewähr 1985 gemachten Untersuchungen des rheologischen Verhaltens des Bentonits auswerten und insbesondere die untere Dichtegrenze überprüfen. Es soll der Nachweis erbracht werden, dass eine Bandbreite der Dichte so festgelegt werden kann, dass die anzustrebenden mechanischen Eigenschaften des Bentonits unter den im Endlager herrschenden Bedingungen sicher vorhanden sein werden. Die zur Einhaltung dieser Bandbreite erforderliche Qualitätssicherung bei der Herstellung der Bentonitblöcke ist nachzuweisen.

Auf der Innenseite des Bentonits baut sich aufgrund der korrosionsbedingten Wasserstoffproduktion ein Gasdruck auf, der ohne Entlastung die Summe aus dem Bergdruck und dem hydrostatischen Druck übersteigen kann. Die Konsequenz eines solchen Druckaufbaus ist ein advektiver Durchbruch von Gas durch den Bentonit. Es besteht Unklarheit, inwieweit eine vollständige Selbstheilung der beim Durchbruch gebildeten Kanäle nach der Druckentlastung stattfinden wird. Die Nagra sollte deshalb den Verheilungsprozess der Kanäle näher untersuchen, um zu erkennen, ob präferentielle Fliesswege verbleiben, welche die Barrierenwirkung des Bentonits beeinträchtigen würden.

Szenarienanalyse

Die Nagra hat Erscheinungen, Ereignisse und Vorgänge (Features, Events and Processes, FEPs), die aus analysetechnischen Gründen nicht quantitativ behandelt werden können, als "offene Fragen" oder "Reserve-FEPs" ausgeschieden und bei der Bildung von Szenarien nicht weiter berücksichtigt. Bei diesem Vorgehen besteht die Gefahr, dass die Wahl der Szenarien nicht abdeckend erfolgt. Die Szenarien sind nach den Erfordernissen, die sich aus dem konzeptuellen Verständnis des Endlagersystems ergeben, zu bilden. Die begrenzten Möglichkeiten der quantitativen Konsequenzenanalyse sollten erst nach der vollständigen Szenarienbildung berücksichtigt werden.

Die HSK erkennt eine weitere methodische Schwäche in der Dokumentation der vorgelegten Szenarienanalyse bei der Behandlung der Wechselwirkungen der FEPs untereinander. In den Einflussdiagrammen sind nur solche Wechselwirkungen festgehalten, die im Endlagersystem eine besonders wichtige Rolle spielen; eine systematische Darstellung der Wechselwirkungen aller FEPs fehlt. Für eine solche Darstellung sind inzwischen Methoden (Matrixdarstellungen) bekannt, die für zukünftige Sicherheitsanalysen zur Anwendung kommen könnten.

Berechnung der radiologischen Auswirkungen

Die HSK hat die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld, die Ausbreitung in der Geosphäre und die Dosisberechnung mit ihren eigenen Rechenprogrammen nachvollzogen. Sie hat insbesondere den Referenzfall der Nagra nachgerechnet und kann die Resultate der Nagra bestätigen. Sie hat mit von der Nagra unabhängigen Parametervariationen und alternativen

Modellansätzen die Robustheit des Endlagersystems überprüft. Auch die Resultate dieser Berechnungen zeigen eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Nagra.

Die in der Richtlinie HSK-R-21 festgelegte maximal zulässige Individualdosis von 0.1 mSv pro Jahr wird in allen durchgerechneten Fällen eingehalten. Im Referenzfall der Nagra beträgt der Maximalwert der Dosis 0.0002 mSv pro Jahr; dieser Wert liegt um den Faktor 500 unter dem Schutzziel. In vielen von der Nagra berechneten Fällen erbringen die technischen Barrieren des Nahfelds allein bereits eine genügende Sicherheit.

Die von der Nagra für die Dosisberechnung verwendeten Dosisfaktoren sind in der Zwischenzeit überholt. Mit der Ausnahme der Überprüfung des Referenzfalls der Nagra, hat die HSK bei ihren Berechnungen die in der Strahlenschutzverordnung, Stand 31. Dezember 2001, angegebenen Werte verwendet.

Die höchste von der HSK berechnete Dosis beträgt 0.05 mSv pro Jahr. Dieser Wert wird bei einer von der Nagra abweichenden Konzeptualisierung des kristallinen Grundgebirges hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse erreicht. Bei diesem Modellansatz wird die konzeptionelle Trennung des tieferen Kristallins in geringdurchlässige Bereiche, durchtrennt durch grosse durchlässige Störungszonen, nicht übernommen. Alle im tieferen Kristallin ermittelten Daten werden als Variation einer Grundgesamtheit aufgefasst. Daraus entstehen wesentlich grössere Wasserflüsse im Wirtgestein, die eine höhere Freisetzung aus dem Nahfeld und eine raschere Ausbreitung in der Geosphäre mit sich ziehen und somit zu höheren Dosen führen. Auch in diesem Fall wird die maximal zulässige Individualdosis von 0.1 mSv pro Jahr nicht erreicht.

Das Endlagersystem erweist sich als robust gegenüber Ungewissheiten in den verschiedensten Parametern, sowie gegenüber alternativen Modellansätzen. Selbst mit sehr konservativ gewählten Annahmen wird das Schutzziel eingehalten. Beim oben angesprochenen alternativen Modellansatz besteht aber keine grosse Sicherheitsreserve mehr.

10.2 Folgerungen

Zum Kenntnisstand

Die Sicherheitsanalyse Kristallin-I und die erdwissenschaftliche Referenz-Dokumentation ist das Resultat einer Synthese aller Arbeiten der Nagra bezüglich Kristallin bis zum Jahr 1993. Zusammen mit den anderweitig durchgeführten Untersuchungen (namentlich von Erdölgesellschaften) bilden die Resultate des Explorationsprogramms eine umfangreiche erdwissenschaftliche Datenbasis. Die dokumentierte Auswertung und Synthese dieser Resultate hat zu einem projektbezogenen Kenntnisstand des kristallinen Grundgebirges in der Nordschweiz geführt, welcher eine Würdigung dieser Option in Hinblick auf das weitere Vorgehen im schweizerischen Programm für die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven und der langlebigen mittelaktiven Abfälle ermöglicht.

Zur möglichen Sicherheit

Aus den zusammengefassten Beurteilungen schliesst die HSK, dass das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz Eigenschaften aufweist, die eine sichere geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle ermöglichen können. Selbst mit konservativ gewählten Annahmen zum einem Wirtgesteinsbereich wird das Schutzziel eingehalten.

Zum Nachweis der Sicherheit

Es dürfte schwierig sein, einen geologischen Gesteinsbereich für das Tiefenlager mit der erforderlichen Zuverlässigkeit abzugrenzen und zu charakterisieren. Wegen der schwer prognostizierbaren heterogenen Struktur des Grundgebirges ist die für den belastbaren Nachweis der Sicherheit erforderliche Erfassung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sehr aufwändig. Trotz der umfangreichen Untersuchungen ist es mit den heutigen Kenntnissen nicht möglich, geeignete Gesteinsbereiche mit genügender Ausdehnung überzeugend abzugrenzen. Weiterführende Kenntnisse könnten mit geneigten Bohrungen gemäss Explorationskonzept der Nagra gewonnen werden. Der Erfolg solcher Erkundungen ist jedoch ungewiss und zieht unerwünschte, für die Sicherheit abträgliche Perforationen des Wirtgesteins mit sich.

Schlussfolgerung

Auch wenn das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz eine sichere geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle ermöglichen kann, wird es schwierig sein, die Sicherheit eines Lagers an einem konkreten Standort belastbar nachzuweisen.

Würenlingen, Juli 2004

HAUPTABTEILUNG FÜR DIE
SICHERHEIT DER KERNANLAGEN



Dr. U. Schmocker
Direktor



Dr. A. Zurkinden
Chef, Abteilung Sicherheit von
Transporten & Entsorgung

11. Referenzen

11.1 Nagra-Dokumente

- NTB 92-04 Hydrodynamic Synthesis and Modeling of Groundwater Flow in Crystalline Rocks of Northern Switzerland, December 1994
- NTB 93-01 Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland, Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme, May 1994
- NTB 93-03 Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Wastes, January 1994
- NTB 93-04 TAME – The Terrestrial-Aquatic Model of the Environment: Model Definition, June 1996
- NTB 93-06 Sorption Databases for Crystalline, Marl and Bentonite for Performance Assessment, July 1995
- NTB 93-07 Chemistry of Reference Waters of the Crystalline Basement of Northern Switzerland for Safety Assessment Studies, August 1993
- NTB 93-09 Kristallin-I: Gesamtsynthese der regionalen Untersuchungen zur Endlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz, Mai 1994
- NTB 93-12 Geology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland and Derivation of Geological Input Data for Safety Assessment Models, May 1998
- NTB 93-13 Scenario Development for Kristallin-I, February 1999
- NTB 93-21 Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects, June 1994
- NTB 93-22 Kristallin-I: Safety Assessment Report, July 1994
- NTB 93-23 Kristallin-I: Results in Perspective, December 1994
- NTB 93-45 Modelling Bentonite Pore Waters for the Swiss High-level Radioactive Waste Repository, November 1993

NTB 94-08	Kristallin-I: Estimates of Solubility Limits for Safety Relevant Radionuclides, April 1995
NTB 00-05	Seimizität der Nord- und Zentralschweiz, Dezember 2000
NIB 92-44	Geologische Langzeitszenarien Kristallin Nordschweiz 1992, Oktober 1992
NIB 93-72	Repository Layout Study Based on Rock Mechanics Considerations: Preliminary Calculations of Temperature Distributions Around an Emplacement Tunnel, 1994
NIB 97-42	2D-Seismik Kristallin 1996 Nord-Aargau: Geologische Interpretation, September 1997
NIB 97-44	HLW Glass Inventories for Swiss Waste Disposal Projects, March 1998

11.2 HSK-Dokumente

HSK 21/31	Lösung des geosphärischen Ausbreitungsproblems mit der Methode der finiten Elemente, 1988
HSK 23/28	Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, September 1986
HSK 23/29	Technischer Bericht zum Gutachten über das Projekt Gewähr 1985, März 1987
HSK 23/45	Kristallin-I: Beurteilung der Kd-Werte im Bentonit-Nahfeld, Januar 1997
HSK 23/46	Kristallin-I: Beurteilung der Wasserfließsysteme, Juli 1997
HSK 23/49	Kristallin-I: Inventarannahmen und Nuklidreduktion, März 1998
HSK 23/50	Kristallin-I: Korrosion von HAA-Glas und Endlagerbehälter, Februar 2000
HSK 23/51	Kristallin-I: Dokumentation der TUBE-Rechnungen, August 1998
HSK 23/52	Kristallin-I: Beurteilung der Langzeitszenarien, September 1998

HSK 23/53	Kristallin-I: Dokumentation der FEMTRAC-Rechnungen (Teil 1), Januar 1999
HSK 23/54	Kristallin-I: Dokumentation der FEMTRAC-Rechnungen (Teil 2), Januar 1999
HSK 23/59	Kristallin-I: Dokumentation der vereinfachten Biosphärenrechnungen, März 1999
HSK 23/68	Kristallin-I: Die Bentonitbarriere, Februar 2002
HSK-AN-2954	Kristallin-I: Beurteilung der maximalen Löslichkeiten der Radionuklide, Februar 1996
HSK-AN-2993	Kristallin-I: Vorläufige Beurteilung der Kd-Werte in den Fließwegen der Geosphäre, Mai 1996
HSK-R-21	Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, November 1993

11.3 Übrige Literaturstellen

AMAYA et al. (1997):	Solubility of Sn(IV) Oxide in Dilute NaClO ₄ Solution at Ambient Temperature, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 465
BASLER & HOFMANN (1992):	Geothermische Daten der Nordschweiz, HSK-Expertenbericht
BASLER & HOFMANN (1996):	Sicherheitsstudie Kristallin-I: Szenarienanalyse Kristallin-I, HSK-Expertenbericht
BASLER & HOFMANN (1998):	Sicherheitsstudie Kristallin-I: Möglichkeiten zur Vereinfachung des Biosphärenmodells, HSK-Expertenbericht
BASLER & HOFMANN (2001):	Evaluation of NTB 93-13: "Scenario Development for Kristallin-I, HSK-Expertenbericht
BIEHLER (1995):	Kluftgrundwässer im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes, Ergebnisse von Untersuchungen in Stollen, Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten C22
DANECK T. (1994):	Platznahme und mechanisches Verhalten von Ganggesteinen im Grundgebirge des Südschwarzwaldes, Mitteilungen aus dem geologischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule und der Universität Zürich, Neue Folge, Nr. 296

- DIEBOLD P. (1986): Erdwissenschaftliche Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz; Strömungsverhältnisse und Eschaffenheit der Tiefengrundwässer. Mitteilungen der Aargauischen Naturforschenden Gesellschaft, Bd. XXXI, S. 11 – 5
- EMCH & BERGER (1998): Kristallin-I: Definition des hydrogeologischen Datensatzes für die Transportrechnungen der HSK, HSK-Expertenbericht
- HIMMELSBACH (1993): Untersuchungen zum Wasser- und Stofftransportverhalten von Störungszonen im Grundgebirge (Albgranit, Südschwarzwald), Schriften angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 23
- HORSEMAN et al. (1996): Water, Gas and Solute Movement Through Argillaceous Media, OECD NEA, Clay Club Report CC-96/1
- IAEA (1996): International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA
- LOUTRE M.F. & BERGER A. (2000): Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long interglacial? Climatic Change 46/1-2, 61-90
- MILNES (1996): Water-conducting Features in the Crystalline Basement of Northern Switzerland (Böttstein, Kaisten, Leuggern) – a Brief Review, HSK-Expertenbericht
- MILNES (1997): Kristallin-I Safety Assessment – Comments on the Geological and Hydrogeological Input and the Conservativeness of the Assumptions, HSK-Expertenbericht
- NEA (1992): Systematic Approaches to Scenario Development, OECD NEA
- NEA (1999): Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories, OECD NEA
- NEA (2001): Scenario Development Methods and Practices, OECD NEA
- NIREX (1998): Overview of the FEP Analysis Approach to Model Development, Science Report S/98/009
- NRPB (1987): Committed Doses to Selected Organs and Committed Effective Doses from Intakes of Radionuclides, NRPB-GS7
- PFENNIG et al. (1998): Karlsruher Nuklidkarte, 6. Auflage 1995, korrigierter Nachdruck 1998, Forschungszentrum Karlsruhe

- RAI and RYAN (1985): Neptunium(IV) Hydrous Oxide Solubility under Reducing and Carbonate Conditions, *Inorg. Chem.*, **24**, pp. 248-251
- SKB (1995): The Use of Interaction Matrices for Identification, Structuring and Ranking of FEPs in a Repository System; Application on the Far-Field of a Deep Geological Repository for Spent Fuel, TR 95-22
- SKI (1990): Regulatory Guidance for Radioactive Waste Disposal – an Advisory Document, HSK/SKI/SSI, TR 90:15
- SKI (1995): Systems Analysis, Scenario Construction and Consequence Analysis Definition for Site-94, TR 95:26
- STANGE und STREHLAU (2002): Ober- und Unterkrustenbeben der Molasse nördlich der Alpen: Herdflächenlösungen und Spannungsfelder, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br.
- STOBER (1993): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. Habilitationsschrift der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau
- STOBER (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges, Enke, Stuttgart
- STOBER (1996): Hydrogeological investigations in crystalline rocks of the Black Forest, Germany, Terra Nova 8
- StSV (2001): Strahlenschutzverordnung vom 22. Juli 1994, Stand 31. Dezember 2001, SR 814.501