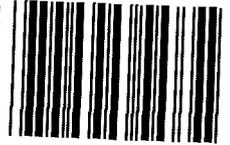




435



# G U T A C H T E N

zum

Projekt Gewähr 1985

der Nationalen Genossenschaft für die  
Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra)

September 1986

## Inhaltsverzeichnis

---

	<u>Seite</u>
ERSTER TEIL : ALLGEMEINES	
1. Einleitung	5
1.1 Anlass	5
1.2 Quellen	6
1.3 Vorgehen der HSK	8
1.4 Aufbau des Gutachtens	11
2. Beurteilungsgrundlagen	13
2.1 Definition von Gewähr	13
2.2 Schutzziele	14
2.3 Natur eines Sicherheitsnachweises	17
3. Weitere Beurteilungsaspekte	21
3.1 Bedeutung des Projekts Gewähr	21
3.2 Beseitigung radioaktiver Abfälle in Perspektive	22
3.2.1 Toxizität	23
3.2.2 Beseitigungsmöglichkeiten	24
ZWEITER TEIL : C-LAGER	
4. Grundzüge des Projekts	26
4.1 Ueberblick	26
4.2 Untersuchungsprogramm	28
4.3 Standortaspekte	30
4.4 Hauptfragen zu Gewähr	31

	<u>Seite</u>
5. Technische Beurteilung	33
5.1 Einführung	33
5.2 Radioaktive Abfälle	34
5.3 Bautechnik	39
5.4 Geologie	41
5.4.1 Störungszonen und Schollengrösse	42
5.4.2 Granitkörper	44
5.4.3 Permokarbon-Trog	45
5.4.4 Temperaturfeld	46
5.4.5 Geologischer Datensatz des Endlagerbereichs	47
5.4.6 Langzeitszenarien	48
5.5 Hydrogeologie	49
5.5.1 Grossräumige hydrogeologische Modelle	49
5.5.2 Hydrogeologische Verhältnisse des Endlagerbereichs	51
5.6 Systematik der Sicherheitsbeurteilung	55
5.7 Endlagerbehälter	57
5.8 Bentonitverfüllung	60
5.9 Löslichkeitslimiten	64
5.10 Migrationsbarriere	67
5.10.1 Matrixdiffusion	67
5.10.2 Sorption	69
5.11 Verdünnung	71
5.12 Biosphärentransport	72
5.13 Sicherheitsanalyse	73
5.13.1 Vorgehen	73
5.13.2 Freisetzung aus dem Endlager	74
5.13.3 Ausbreitung im Wirtgestein	76
5.13.4 Strahlendosen	77
5.14 Störfälle	80
5.15 Standortsuche im Kristallin der Nordschweiz	82
5.16 Empfehlungen für das weitere Vorgehen	86
6. Gesamtbeurteilung C-Lager	90
6.1 Grundlagebeschaffung	90
6.2 Sicherheitsnachweis	91
6.3 Standortfrage	94
6.4 Gewähr	96

DRITTER TEIL : B-LAGER

7. Technische Beurteilung	98
7.1 Ueberblick	98
7.2 Technische Barrieren	100
7.2.1 Bautechnische Aspekte	100
7.2.2 Aufbau	100
7.2.3 Kenngrößen	102
7.2.4 Barrierenwirkung	102
7.3 Geologie und Hydrogeologie	103
7.3.1 Geologie	104
7.3.2 Hydrogeologie	105
7.4 Sicherheitsanalyse	106
7.4.1 Hydrogeologische Modelle	106
7.4.2 Freisetzung aus dem Endlager	107
7.4.3 Ausbreitung durch die Geosphäre	108
7.4.4 Dosisberechnung	109
7.4.5 Erosion des Endlagers	110
7.4.6 Störfälle	112
7.5 Empfehlungen für das weitere Vorgehen	113
8. Gesamtbeurteilung B-Lager	115
LITERATURVERZEICHNIS	119

ERSTER TEIL : ALLGEMEINES

---

1. Einleitung

1.1 Anlass

Der Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978 (SR 732.01) legt in Artikel 3 fest, dass die Rahmenbewilligung für Kernreaktoren nur erteilt wird, wenn die dauernde, sichere Entsorgung und Endlagerung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle gewährleistet ist; im Uebergangsrecht spricht Artikel 12 als Bedingung für die Inbetriebnahmebewilligung von einem Projekt, das dafür Gewähr bietet. Diese Bestimmung wurde auch auf die bestehenden Kernkraftwerke ausgedehnt. In verschiedenen Verfügungen knüpfte das Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (1978; Beznau, Mühleberg, Gösgen) und der Bundesrat (1979; Leibstadt) den Betrieb der Kernkraftwerke an die Bedingung, dass bis 31. Dezember 1985 ein Projekt vorliege, welches für die sichere Entsorgung und Endlagerung der aus den Kernkraftwerken stammenden radioaktiven Abfälle Gewähr bietet. Die Betreiber der Kernkraftwerke beauftragten daraufhin die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) mit der Ausarbeitung des verlangten Projekts.

Am 23. Januar 1985 überreichte die Nagra ihr "Projekt Gewähr 1985" den Behörden; die Einreichung wurde gleichentags mit Briefen der Kraftwerksbetreiber an das Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement bestätigt. Neben anderen Fachstellen des Bundes hat auch die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) die Aufgabe, das Projekt Gewähr - wie es allgemein bezeichnet wird - zu begutachten und dabei speziell die Fragen der Endlagersicherheit zu beurteilen. Das vorliegende Gutachten ist das Ergebnis dieser Beurteilung.

Da die Nagra im Rahmen ihres allgemeinen Auftrags ihre Tätigkeit ohnehin auf die Planung, Grundlagenbeschaffung und Projektierung von Endlagern aus-

gerichtet hatte, ging es für sie darum, ihre Arbeiten im Hinblick auf das Projekt mittelfristig zu intensivieren und zu beschleunigen, ohne dabei die langfristige Vorbereitung von Endlagern als ihre Hauptaufgabe aus den Augen verlieren zu müssen. So stützt sich heute das Projekt Gewähr auf eine grosse Zahl von Studien zu spezifischen Themen der Endlagerung und insbesondere auch auf eine Reihe von erdwissenschaftlichen Felduntersuchungen und Sondierbohrungen.

Das Projekt Gewähr ist eine Studie, mit der die sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle als machbar nachgewiesen werden soll; es ist jedoch nicht ein Gesuch für tatsächlich auszuführende Endlager. Soll später einmal ein Endlager errichtet werden, so sind dafür eine Reihe von Bewilligungen, angefangen mit der Rahmenbewilligung, nötig, die heute noch gar nicht zur Diskussion stehen. Das Projekt Gewähr soll kein Präjudiz für spätere Endlagerbewilligungen schaffen, weder was das Lagerkonzept noch was das Wirtgestein und die Standortregion betrifft. Ebenso wenig schafft auch das Gutachten der HSK ein Präjudiz für spätere Gutachten zu Gesuchen, noch ist es eine vorweggenommene Beurteilung von Endlagerstandorten.

## 1.2 Quellen

Die HSK stützt sich bei ihrer Bearbeitung und Begutachtung des Projekts Gewähr auf eine Reihe von Berichten und auf Zusatzinformationen verschiedener Art.

Die Dokumentation des Projekts Gewähr, die am 23. Januar 1985 eingereicht wurde, liegt als achtbändiger Projektbericht NGB 85-01.....08 vor. Die Bände sind im Literaturverzeichnis einzeln aufgezählt. Der erste Band enthält das Konzept und die Zusammenfassung des Projekts, der zweite Band ist den radioaktiven Abfällen und ihren Eigenschaften gewidmet. Je drei Bände befassen sich mit den Endlagern für hochaktive Abfälle (C-Lager) und für schwach- und mittelaktive Abfälle (B-Lager): Bautechnik und Betrieb

(03/06), System der Sicherheitsbarrieren (04/07), Sicherheitsbericht (05/08).

Als wichtiges Quellenmaterial zu Gewähr veröffentlichte die Nagra ferner ca. 150 technische Berichte, in denen Spezialprobleme behandelt oder Untersuchungsergebnisse dargestellt sind. Im Literaturverzeichnis sind nur die hier zitierten Berichte, unter der Bezeichnung NTB (Nagra Technischer Bericht), aufgeführt; eine vollständige Liste findet sich in allen Projektbänden NGB 85. Einige der technischen Berichte erschienen erst nach Einreichung des Projekts Gewähr, doch standen der HSK mit wenigen Ausnahmen die für die Begutachtung wesentlichen Berichte seit Januar 1985 zumindest im Vorabdruck zur Verfügung.

Auf Wunsch der HSK verfasste die Nagra einen Nachbericht zu Gewähr [1], der sich zur Ausdehnung kristalliner Wirtgesteine in der Nordschweiz und zu hydrogeologischen und sicherheitstechnischen Fragen äussert. Er wurde der HSK am 19. Dezember 1985 als vorläufiger Vorabdruck zugestellt.

Die Sondierbohrungen der Nagra in der Nordschweiz sind eine wichtige Informationsquelle. Sie sind von Aufsichtskommissionen begleitet, in denen die HSK jeweils mit zwei Mitarbeitern vertreten ist. Das gab ihr Gelegenheit, die Bohrungen intensiv zu verfolgen, und ermöglichte ihr, sich ein eigenes Bild über die Sondiererergebnisse und die Auswertungen zu machen. In den Vierteljahresberichten, welche die Nagra zuhanden der Aufsichtskommissionen erarbeitete, findet sich ein reichhaltiges Material an Rohdaten. Bis wenige Monate vor der Einreichung des Projekts Gewähr sind die Auswertungen der Sondierbohrungen noch in das Projekt eingeflossen; seither sind weitere Ergebnisse angefallen, welche die HSK in der Begutachtung ebenfalls berücksichtigt. Bis Sommer 1984 waren fünf Sondierbohrungen abgeschlossen. Die sechste und bisher letzte Bohrung, Leuggern, erreichte die Endtiefe im Februar 1985 und konnte daher von der Nagra nicht mehr für das Projekt Gewähr verwertet werden; sie verdient aber eine gewisse Aufmerksamkeit, weil sie der Bohrung Böttstein, die für das Projekt als Referenzbohrung dient, geographisch am nächsten liegt. Da somit Informationen verwendet wurden, die erst nach Einreichung des Projekts vorlagen, geht die Beurteilung der

HSK ein Stück weit über das in den Gewährsberichten dokumentierte Projekt hinaus und berücksichtigt auch neuere Ergebnisse; solche finden sich teilweise auch in den seither veröffentlichten technischen Berichten der Nagra.

In periodischen Sitzungen mit der Nagra liess sich die HSK ferner über Einzelheiten des Projekts Gewähr orientieren. Mehrere Sitzungen fanden im Jahre 1984 als Vorbereitung auf das kommende Projekt statt; nach dessen Einreichung dienten die Sitzungen dazu, Präzisierungen und Ergänzungen anzubringen und allfällig entstehende Missverständnisse zu beseitigen.

### 1.3 Vorgehen der HSK

Das Projekt Gewähr umfasst die Endlagerung aller Sorten von Abfällen, die in der Schweiz zu beseitigen sind. Entsprechend der Gewichtung in der Definition von "Gewähr" (Kapitel 2.1) konzentriert jedoch die HSK ihre Begutachtung auf die hochaktiven Abfälle und somit auf das C-Lager. Auf die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente, die auch im Projekt Gewähr nur kurz gestreift wird (Anhang in NGB 85-05), geht die HSK in diesem Gutachten nicht ein, da für die schweizerischen Brennelemente heute die Wiederaufarbeitung vorgesehen ist. Im Vordergrund des Interesses steht die langfristige Sicherheit eines Endlagers nach dem Verschluss, die am stärksten mit der Gewährsfrage der Machbarkeit verknüpft ist. Die HSK nimmt an, dass die radiologische Sicherheit während des Betriebs eines Endlagers, also in der Phase der Einlagerung, weitgehend nach den in der Kerntechnik üblichen und bewährten Grundsätzen gewährleistet werden kann, weshalb sie nicht näher auf die Betriebsphase eingeht. Das Gutachten der HSK behandelt somit als Hauptaufgabe die Nachverschlussphase des C-Lagers (zweiter Teil), und als Nebenaufgabe die Nachverschlussphase des B-Lagers (dritter Teil). Das Gutachten ist primär eine Stellungnahme zum vorgelegten Projekt der Nagra, geht aber dort darüber hinaus, wo wichtige Aspekte der Gewährsfrage im Projekt selbst wenig zum Ausdruck kommen.

Seit längerer Zeit bereitete sich die HSK auf die Beurteilung von Sicherheitsanalysen für Endlager vor, indem sie verschiedene Modellstudien durchführte, mit denen sie sich die Beurteilungsgrundlagen beschaffen und die Methodik der Sicherheitsanalyse aneignen konnte. Sie bediente sich dabei der Mithilfe von Sachverständigen aus den folgenden zwei Firmen:

- Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich
- Colombi Schmutz Dorthe AG, Beratende Ingenieure und Geologen, Bern

Die wichtigsten Modellstudien, die aus dieser Zusammenarbeit entstanden, sind im Literaturverzeichnis aufgeführt [HSK-E7, -E8, -E9]. Die Bearbeiter dieser Modellstudien nahmen auch an der Begutachtung des Projekts Gewähr teil.

Von den verschiedenen Elementen oder Barrieren, die die Sicherheit eines Endlagers gewährleisten sollen, und von den mannigfachen Ereignissen oder Mechanismen, die diese Sicherheit beeinträchtigen könnten, sind nicht alle gleich wichtig. Es ging der HSK also zunächst darum, die wichtigsten Elemente zu identifizieren und Schwerpunkte zu bilden. Anschliessend wurden die Schwerpunkte vertieft bearbeitet. Ein solches Vorgehen drängte sich auch auf, weil die HSK in der kurzen Zeit mit ihren vergleichsweise bescheidenen personellen Mitteln die Arbeiten der Nagra nicht in vollem Umfang nachvollziehen konnte. In diesem Sinne ist die Beurteilung nicht lückenlos, aber die HSK ist überzeugt, dass sie mit diesem Vorgehen die wesentlichen Aspekte erfasst und in die Begutachtung mit einbezogen hat, und dass die weniger ausführlich bearbeiteten Teile auch bei vertiefter Betrachtung die Schlussfolgerungen nicht wesentlich zu beeinflussen vermöchten.

Zur Begutachtung des Projekts Gewähr zog die HSK mehrere externe Stellen bei. Neben den beiden erwähnten Firmen benötigte sie die Mithilfe von Experten, die Spezialprobleme zu bearbeiten hatten; sie sind in der folgenden Liste zusammen mit den Auftragsthemen aufgezählt:

- Prof. M.O. Speidel, ETH Zürich (Endlagerbehälter)
- Prof. H.P. Laubscher, Universität Basel (Tektonik der Nordschweiz)
- Prof. C. Schindler, ETH Zürich (Geologie des B-Lagers)
- U.K. Atomic Energy Authority, Harwell, England (hydrodynamisches Rechenmodell)
- Prof. J. Toth, Hydrogeological Consulting Ltd, Edmonton, Canada (Hydrogeologie)
- Prof. W.S. Fyfe, University of Western Ontario, London, Canada (Geochemie)
- Dr. B. Fritz, Centre National de la Recherche Scientifique, Strasbourg, France (Bentonit) (gemeinsamer Experte der HSK und der Untergruppe Geologie der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung)

Ferner standen der HSK auch zwei Expertisen zur Verfügung, welche die Untergruppe Geologie von Mitgliedern hatte ausarbeiten lassen:

- Dr. A. Parriaux, EPF Lausanne (Hydrogeologie)
- Prof. L. Rybach, ETH Zürich (Geothermie)

Alle Expertenberichte sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

Aus den Beiträgen dieser Experten und aus eigener Beurteilung der wichtigen Sicherheitselemente konnte sich die HSK ein Gesamtbild darüber machen, wie sich das Endlagersystem als Ganzes verhält. Die globale Sicherheitsanalyse überprüfte sie mit eigenen Mitteln.

Bei der Beurteilung des Projekts Gewähr steht zunächst die Frage im Vordergrund, ob das Projekt die geforderte Gewähr für eine sichere Endlagerung zu erbringen vermag. Daneben bietet das Projekt aber auch eine sehr gute Gelegenheit zu einer Bestandesaufnahme und Lagebestimmung in der schweizerischen Endlagerplanung, die letztlich auf reale Endlager ausgerichtet sein muss. Es gestattet damit allen beteiligten Stellen, zu beurteilen, wo man steht, und die weiteren Schritte zu diskutieren. Aus diesem Grunde äussert sich die HSK auch zum weiteren Vorgehen und versucht aus ihrer Sicht, die wichtigsten Lücken, die durch fortgesetzte und zusätzliche Untersuchungen noch abzudecken sind, zu erfassen und Prioritäten vorzuschlagen.

#### 1.4 Aufbau des Gutachtens

Die Berichterstattung über die Begutachtung der HSK erfolgt in zwei getrennten Teilen:

- Gutachten

Das vorliegende Gutachten fasst die technische Beurteilung der einzelnen Sicherheitselemente zusammen, ohne Darstellung von vielen technischen Details, und bildet daraus eine Gesamtbeurteilung.

- Technischer Bericht

Der Technische Bericht zum Gutachten stellt die sachbezogenen Grundlagen des Gutachtens zusammen. Er enthält eine vertiefte Besprechung und Beurteilung der wichtigen Fachprobleme zu den einzelnen Sicherheitselementen und geht auch auf Einzelheiten ein. Hingegen ist es nicht Zweck des Technischen Berichts, eine abschliessende Gesamtbewertung des Projekts Gewähr zu geben.

Das Gutachten ist wie folgt gegliedert. Der erste Teil enthält die allgemeinen Bemerkungen. Nach der Einleitung (1. Kapitel) schildert die HSK im 2. Kapitel die Grundlagen, auf die sie die Beurteilung des Projekts Gewähr abstützte. Dazu gehören die Definition des Begriffs "Gewähr" und die Schutzziele, die für die Beurteilung der Endlagersicherheit den Massstab abgeben. Ferner äussert sich die HSK auch dazu, was von einem Sicherheitsnachweis für Endlager erwartet werden kann und welche Besonderheiten ihm eigen sind. Im 3. Kapitel geht die HSK auf einige Gesichtspunkte aus dem Umfeld des Projekts Gewähr ein, die nach ihrer Ansicht bei der Gesamtbeurteilung des Projekts ebenfalls zu beachten sind. Neben einigen Erläuterungen zur Bedeutung des Projekts Gewähr werden dort auch die radioaktiven Abfälle hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit in der Perspektive unserer Zivilisation betrachtet, weil nur so eine die Verhältnismässigkeit wahrende Beurteilung möglich ist; ebenso wird kurz auf andere Endlagermöglichkeiten eingegangen.

Der zweite Teil befasst sich mit dem Projekt für ein Endlager vom Typ C (hochaktive Abfälle). Im 4. Kapitel stellt die HSK die Grundzüge des

Projekts zusammen, wobei sie auch kurz auf die diesbezüglichen Untersuchungsprogramme der Nagra eingeht. Die Frage, ob mit dem vorgelegten Projekt die verlangte Gewähr geboten sei, wird unterteilt in die zwei Hauptfragen des Sicherheitsnachweises und der Standortsuche. Das 5. Kapitel bildet den umfangreichsten Teil des Gutachtens. Es umfasst die technische Beurteilung sowohl der wichtigsten Komponenten des Endlagersystems als auch der Sicherheitsanalyse des Gesamtsystems. Es handelt sich immer um Zusammenfassungen der entsprechenden Kapitel aus dem Technischen Bericht. Am Schluss des Kapitels (5.16) gibt die HSK ihre Empfehlungen für das weitere Vorgehen und erwähnt die wichtigsten offenen Punkte, deren sich nach ihrer Ansicht die zukünftige Forschung und Entwicklung mit Priorität annehmen sollte. Im 6. Kapitel nimmt die HSK eine Gesamtbewertung des Projekts für ein C-Lager vor. Zuerst beurteilt sie die Beschaffung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen des Projekts durch die Nagra, anschliessend legt sie ihre Gesamtbeurteilung dar.

Der dritte Teil enthält die Begutachtung des Projekts für ein Endlager vom Typ B (schwach- und mittelaktive Abfälle). Das 7. Kapitel umfasst die technische Beurteilung, und das 8. Kapitel gibt die Gesamtbeurteilung. Entsprechend dem geringeren Gewicht des B-Lagers für die Gewährsfrage ist der dritte Teil kürzer gehalten.

## 2. Beurteilungsgrundlagen

### 2.1 Definition von "Gewähr"

Der Bundesbeschluss zum Atomgesetz äussert sich nicht näher dazu, was unter den Begriffen "gewährleisten" und "Gewähr" zu verstehen sei. Die Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (AGNEB) schlug deshalb im Jahre 1982 eine Definition vor [2]. Nach der AGNEB-Definition soll das Projekt Gewähr "die grundlegenden Zweifel an der Durchführbarkeit der Abfallbeseitigung ausräumen" und "anhand eines Modellbeispiels dem Bundesrat mögliche Lösungswege zeigen, die aufgrund des gültigen Standes von Wissenschaft und Technik mit grosser Wahrscheinlichkeit gangbar sind"; ein ausführungsfähiges Projekt ist nicht verlangt. Die Definition enthält weiter eine Reihe von Forderungen, die an das Projekt zu stellen sind. Daneben erscheinen aber auch Sätze, die solche Forderungen wieder relativieren, indem sie die Termsituation und den Unterschied zwischen dem Projekt Gewähr und einem ausführungsfähigen Projekt berücksichtigen; die HSK geht in Kapitel 3.1 näher auf den Platz ein, den das Projekt Gewähr im zeitlichen Ablauf der Endlagerplanung einnimmt.

Die HSK hält sich an die Definition der AGNEB. Dabei scheinen ihr vor allem folgende Gesichtspunkte massgebend:

- Das Schwergewicht liegt auf den hochaktiven Abfällen (C-Lager) und der langfristigen Sicherheit nach dem Verschluss des Lagers.
- Die Realisierung müsste mit den heutigen Mitteln der Technik möglich sein.
- Das Projekt soll zeigen, dass die Sicherheit im Sinne der Schutzziele (Kapitel 2.2) mit grosser Wahrscheinlichkeit erreichbar ist.
- Die Eigenschaften des Modellstandorts müssen realistisch und durch die Sondierergebnisse erhärtet sein.
- Man darf nicht erwarten, dass das Projekt sämtliche Fragen klären kann. Einzelne Ungewissheiten werden möglicherweise erst für ein Ausführungs-

projekt mittels Jahre dauernder Untersuchungen beseitigt werden können; sie dürfen aber die grundsätzliche Machbarkeit nicht in Frage stellen.

Die Definition von "Gewähr" beruht auf dem damaligen (1982) Stand der Kenntnisse und Erwartungen. So ging man insbesondere von der Erwartung aus, die kommenden Sondierbohrungen in der Nordschweiz, die im Herbst 1982 begannen, würden geologische Verhältnisse zeigen, die über ein grösseres Gebiet vergleichbar wären und somit ein einigermaßen einheitliches Bild ergäben. Diese Erwartung erfüllte sich aber nicht, und die regionale Geologie hat sich als komplexer erwiesen als angenommen. Die der Definition zugrunde liegende Idee eines Modellstandorts für das C-Lager, dessen realistische Eigenschaften sich durch Interpolation aus einer Mehrzahl von Bohrungen gewinnen liessen, hat sich damit nicht verwirklicht.

## 2.2 Schutzziele

Im Jahre 1980 legten die Sicherheitsbehörden in der Richtlinie R-21 [3] die Schutzziele fest, an denen die Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu messen ist. Die Schutzziele orientierten sich an den Absichten, die mit der Endlagerung verfolgt werden und die darin bestehen, dass der Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten ist, und dass nach erfolgter Beseitigung keine Aufgaben mehr auf zukünftige Generationen überwältzt werden sollen. Dementsprechend lauten die Schutzziele:

1. Radionuklide, die als Folge von realistischereise anzunehmenden Vorgängen und Ereignissen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen, sollen zu keiner Zeit zu Individualdosen führen, die 10 mrem pro Jahr überschreiten.

Wenn sich die Auswirkungen mehrerer Endlager überlagern, gilt die Dosislimite für die Summe aller Beiträge.

2. Ein Endlager ist so auszulegen, dass es jederzeit innert einiger Jahre verschlossen werden kann.

Nach Verschluss eines Endlagers muss es möglich sein, auf Sicherheits- und Ueberwachungsmassnahmen zu verzichten.

Die Zahl von 10 mrem/a entspricht einer sehr geringen Dosis. Sie ist zu vergleichen mit der jährlichen Strahlenbelastung von etwa 300 mrem/a, welcher die Bevölkerung der Schweiz durch das natürliche Vorkommen radioaktiver Stoffe im Mittel ausgesetzt ist. Die Dosislimite ist auch kleiner als die Schwankungen der natürlichen Dosis, die sich aus Unterschieden in den Lebensumständen (Wohnort, Baumaterialien, etc.) ergeben.

Die Sicherheit, wie sie das Schutzziel 1 fordert, ist vom Endlagersystem als Ganzem zu erbringen. Es wurde bewusst darauf verzichtet, für die einzelnen Systemkomponenten (Abfälle, Behälter, Kavernen einschliesslich Füllmaterialien, Wirtgestein und umliegende geologische Schichten) getrennte Forderungen aufzustellen. Dieses Systemkonzept, in der englischsprachigen Literatur als "overall-systems-approach" bezeichnet, erlaubt eine grosse Flexibilität bezüglich des Beitrags der einzelnen Komponenten zur Gesamtsicherheit. In der Sicherheitsanalyse können so Stärken und Schwächen der verschiedenen Sicherheitselemente gegeneinander abgewogen werden, weil am Schluss nur die vom Gesamtsystem gebotene Sicherheit zählt. Davon machte sowohl die Nagra bei der Erarbeitung als auch die HSK bei der Beurteilung des Projekts Gewähr Gebrauch.

Der erste Satz des Schutzziels 2 bezieht sich auf die Bau- und Betriebsphase, weshalb hier nicht mehr weiter darauf eingegangen wird. Der zweite Satz enthält eine Bedingung, die bei der Anwendung von Schutzziel 1 zu beachten ist: Die Sicherheit muss sich aus den passiven Sicherheitselementen des Endlagersystems ergeben, die nach dem Verschluss ohne Zutun des Menschen funktionieren. Spätere Generationen dürfen nicht gezwungen sein, sich aktiv gegen die radiologischen Folgen eines verschlossenen Endlagers schützen zu müssen.

Da die Schutzziele - unter ihnen insbesondere das erste mit seiner numerischen Festlegung einer Dosislimite - den wichtigsten Prüfstein für die Beur-

teilung des Projekts Gewähr bilden, erachtet es die HSK als notwendig, näher darauf einzugehen, welchen Status die Schutzziele haben und welche Rolle sie bei der Begutachtung spielen. Die Richtlinie entstand zu einer Zeit, als praktisch noch keine internationalen Vergleichsmassstäbe existierten und noch kaum konkrete Lagerprojekte vorhanden waren. Die Begutachtung des Projekts Gewähr wird auch zeigen müssen, wo die Richtlinie Lücken aufweist und in welcher Richtung sie allenfalls erweitert oder modifiziert werden muss. Auf eine wünschbare Ergänzung sei bereits hier hingewiesen.

Die Richtlinie R-21 hat nur eine einzige Dosislimite, und diese ist unabhängig davon, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein die Dosis verursachendes Ereignis eintreten könnte. Nur wenn ein unwahrscheinliches Ereignis als nicht "realistischerweise anzunehmen" klassifiziert wird, ist es nicht der Dosislimite unterworfen. In diesem Sinne kennt die Richtlinie nur die Wahrscheinlichkeiten "Eins" und "Verschwindend klein". Sie zwingt damit den Anwender zu einer rein deterministischen Betrachtungsweise und erlaubt es ihm kaum, Eintretenswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Daran hält sich auch die Nagra bei ihrem Projekt Gewähr. Nun gibt es aber Störfallszenarien, beispielsweise das Anbohren der Endlagerumgebung in unterschiedlichen Entfernungen [HSK-E8], die kaum anders als probabilistisch behandelt werden können; mit der bisherigen Richtlinie würden sie überbewertet. Die HSK wird deshalb den Einfluss solcher Szenarien auf die Endlagersicherheit erst sinnvoll beurteilen können, wenn einmal die Richtlinie R-21 um ein probabilistisches Element erweitert worden ist; eine solche Erweiterung würde auch neuesten internationalen Empfehlungen entsprechen [4].

Schliesslich muss noch auf das Problem des Zeithorizonts, bis zu dem die Sicherheitsanalyse durchzuführen ist, hingewiesen werden. Das Schutzziel 1 behandelt alle Zeiten gleichmässig ("zu keiner Zeit") und kennt keine Zeitgrenze, jenseits der die möglichen radiologischen Folgen eines Endlagers nicht mehr limitiert sind. Da aber die langfristige Entwicklung der Menschheit höchst ungewiss ist, sind die auf eine ferne Zukunft berechneten Dosen eher abstrakte Grössen. Zu Vergleichszwecken und als Massstab für die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre sind sie jedoch nützlich. Für die Begutachtung geht die HSK davon aus, dass solche Dosen berechnet werden

sollen und dass man dabei in erster Näherung für die ferne Menschheit die gleichen Lebens- und Ernährungsgewohnheiten wie heute annehmen darf.

### 2.3 Natur eines Sicherheitsnachweises

Im Zentrum der Beurteilung des Projekts Gewähr steht der Sicherheitsnachweis, der zeigen soll, dass die vorgelegten Endlagerprojekte die Schutzziele zu erreichen vermögen. Die HSK will deshalb an dieser Stelle die wesentlichen Eigenheiten eines Sicherheitsnachweises etwas näher erläutern, weil dies für das Verständnis der Sicherheitsbeurteilung wichtig ist.

Der Sicherheitsnachweis fragt nach den radiologischen Auswirkungen eines im allgemeinen recht komplexen Endlagersystems über grosse Zeitspannen. Das damit gestellte Problem ist durch zwei Aspekte gekennzeichnet, die in mehr oder weniger grossem Ausmass vielen wissenschaftlichen Problemen eigen sind.

- Der Sicherheitsnachweis ist modellartig:

Wie bei der Analyse anderer komplexer Systeme zerlegt man auch das Endlagersystem in seine Komponenten und stellt für jede Komponente ein mehr oder weniger vereinfachtes naturwissenschaftlich-mathematisches Modell auf, das mit einem geeigneten Rechenprogramm berechenbar ist. Die Modelle werden anschliessend zum Gesamtmodell des Systems zusammengebaut. Dabei muss man zwischen möglichst grosser Realitätsnähe einerseits und Einfachheit und Berechenbarkeit andererseits einen Kompromiss machen. Dass allerdings ein Modell nicht im Widerspruch zu Naturbeobachtungen und Experimenten stehen darf, ist eine selbstverständliche Minimalforderung.

- Der Sicherheitsnachweis ist prognostisch:

Die möglichen radiologischen Folgen eines Endlagers treten in der Zukunft auf und müssen mit einer Sicherheitsanalyse vorausberechnet werden. Damit sind dieselben Schwierigkeiten zu überwinden wie bei jeder anderen

Prognose, und diese sind umso grösser, je komplexer das System und je ferner die vorauszusagende Zukunft. Eine experimentelle Bestätigung der Prognosen ist für das Gesamtsystem nicht zum voraus möglich.

Beide der erwähnten Aspekte führen zu Ungewissheiten in den Aussagen der Sicherheitsanalyse, denen begegnet werden muss. Zwei Wege stehen dabei zur Verfügung. Erstens muss man sich bemühen, die Ungewissheiten abzubauen, indem man seine Kenntnisse durch weitere Untersuchungen verbessert. Zweitens kann man die bestehenden Ungewissheiten zu beziffern versuchen und das Endlager so konservativ auslegen, dass die gewünschte Sicherheit auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten erreicht wird.

Beim Abbau der Ungewissheiten geht es darum, die Prozesse und Mechanismen, die das Verhalten des Endlagersystems und seiner Komponenten bestimmen, besser zu verstehen und die wesentlichen Parameter genauer einzugrenzen. Die notwendigen Untersuchungen reichen von der Entwicklung theoretischer Modelle über Laborversuche bis zu Feldexperimenten; erst wenn sie alle in befriedigender Weise übereinstimmen, weiss man, dass man einen Prozess genügend verstanden hat. Um sicher zu sein, dass die Endlagermodelle die Realität genügend genau wiedergeben, muss man sie validieren, das heisst Modell und Realität einander gegenüberstellen. Eine besondere Rolle für die Validierung der Modelle können sogenannte Naturanaloge spielen; darunter versteht man Situationen, in denen die Natur endlagerähnliche Bedingungen geschaffen hat, beispielsweise Erzlager. An ihnen lässt sich prüfen, ob die verwendeten Modelle, wenn nicht des gesamten Endlagersystems so doch einzelner Komponenten, realistisch sind. Die HSK hält solche Validierungen der Modelle durch Naturanaloge für sehr wichtig. Sie erwartet, dass diesbezügliche Informationen im Rahmen der weiteren Vorbereitungen für Ausführungsprojekte, insbesondere des C-Lagers, vorgelegt werden.

Die wichtigste Methode, mit der die Nagra im Projekt Gewähr die bestehenden Ungewissheiten angeht, ist die der konservativen (pessimistischen) Annahmen. Eine Annahme ist konservativ, wenn sie im Endresultat zu ungünstigeren Auswirkungen, das heisst hier zu höheren Dosen, führt als die entsprechende Annahme, die man realistischerweise machen zu dürfen glaubt; eine konserva-

tive Annahme liegt also "auf der sicheren Seite". Allerdings ist der Begriff der Konservativität nicht immer einfach, denn es ist gelegentlich unklar, welche Richtung im Blick auf das Endergebnis die konservative ist, da ein gegebener Parameter unter Umständen verschiedene Prozesse gegenläufig beeinflussen kann; zudem ist häufig die Streubreite der realistischere anzunehmenden Parameterwerte nicht bekannt, was die Festlegung konservativer Annahmen erschwert. Die Frage, ob ein Parameter genügend konservativ gewählt wurde, taucht deshalb auch in der Beurteilung der HSK wiederholt auf. Noch schwieriger als Ungewissheiten in den Parameterwerten sind solche in den Modellvorstellungen zu handhaben, die dann auftreten, wenn man sich des verwendeten Modells nicht sicher ist. Versucht man, Ungewissheiten dieser Art durch konservative Modellannahmen abzudecken, kann daraus ein unrealistischer Ueberkonservatismus entstehen. Die Methode der konservativen Annahmen stösst hier an eine Grenze. Man kann mit ihr nicht alle Ungewissheiten abdecken; gute Kenntnisse und ein fundiertes Verständnis für die Vorgänge sind nicht zu ersetzen.

Was ebenfalls zur Kompensation von Ungewissheiten beitragen kann, sind Redundanzen im Aufbau des Endlagersystems. Ein Sicherheitselement bezeichnet man als redundant, wenn es für die Sicherheit zwar einen Beitrag leistet oder leisten kann, aber nicht zwingend notwendig ist. Redundanzen oder in ihren Funktionen überlappende Barrieren sind in einem Endlagerprojekt auf jeden Fall erwünscht; es wäre nicht gut, wenn die Sicherheit nur gerade knapp erreicht würde unter der Voraussetzung, dass alle Sicherheitsbarrieren genau so funktionieren wie erwartet. Mit der Redundanz hängt der Begriff der Sicherheitsmarge zusammen; darunter versteht man den Abstand der berechneten Konsequenzen von der festgesetzten Limite. Ein Projekt, das sich durch Redundanzen und hohe Sicherheitsmargen auszeichnet, erträgt mehr Ungewissheiten.

Abschliessend sei darauf hingewiesen, dass dem Sicherheitsnachweis von seiner Natur her ein gewisser Pessimismus anhaftet. Man zerlegt ein Endlagersystem in seine Komponenten und sucht bewusst nach Prozessen und Mechanismen, die das Funktionieren dieser Komponenten im ungünstigen Sinne beeinflussen und damit für die Sicherheit eine Gefahr darstellen könnten. Es

kann aber auch Prozesse geben, welche die Sicherheit vergrössern. Beachtet man diese weniger, entsteht ein gewisses Ungleichgewicht, das zum erwähnten Pessimismus führt.

### 3. Weitere Beurteilungsaspekte

#### 3.1 Bedeutung des Projekts Gewähr

Das Projekt Gewähr muss im Rahmen der übrigen Tätigkeiten gesehen werden, die zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle führen sollen. Da die hochaktiven Abfälle wegen ihrer Wärmeproduktion 30 - 40 Jahre lang in Zwischenlagern abkühlen müssen, bevor sie in Endlager der heute vorgesehenen Art eingebracht werden können, ist frühestens ab dem Jahre 2020 mit der Inbetriebnahme eines Endlagers vom Typ C zu rechnen. Der endgültige Verschluss des Lagers wird nicht vor der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts stattfinden. Im zeitlichen Ablauf der Endlagerung befinden wir uns heute somit erst am Anfang. Vor dem Hintergrund dieser Zeitskala ist das Projekt Gewähr deshalb auch ein Zwischenbericht, der den heutigen frühen Stand der Kenntnisse und der Endlagerplanung festhält.

Von heute über die verschiedenen Bewilligungsschritte bis hin zur Inbetriebnahme eines Endlagers werden noch sehr viele Untersuchungen durchzuführen sein, die unsere Kenntnisse über die Einflussgrößen und das Verhalten eines Endlagersystems vermehren. Entsprechend wird auch der Sicherheitsnachweis von Zeit zu Zeit aufdatiert werden müssen, und seine Aussagekraft wird mit zunehmenden Kenntnissen ebenfalls zunehmen. In dieser Kette der Sicherheitsberichte ist das Projekt Gewähr das erste Glied; es nimmt einen wichtigen Platz ein, aber es ist ein Platz zu einem recht frühen Zeitpunkt. Es wäre unrealistisch, jetzt vom Sicherheitsnachweis dieselbe Tiefe zu erwarten, wie sie später für den Bau und die Inbetriebnahme nötig ist. Die HSK leitet deshalb aus der Lage des Projekts Gewähr im Gesamtrahmen der zeitlichen Entwicklung ab, dass bei der Forderung nach einem gewährbietenden Projekt keineswegs an die Ausführlichkeit eines ausführungsfähigen Projekts gedacht sein konnte. Beim Projekt Gewähr dürfen, sofern die grundsätzliche Machbarkeit nicht in Frage gestellt ist, Punkte offen bleiben, die es im Hinblick auf ein Ausführungsprojekt noch abzuklären gilt.

Andererseits geht die HSK davon aus, dass die politischen Instanzen, welche das Projekt Gewähr forderten, und auch die Abfallproduzenten, die für die

Errichtung von Endlagern zuständig sind, möglichst rasch wissen wollten, ob der eingeschlagene Weg zur Endlagerung der radioaktiven Abfälle mit grosser Wahrscheinlichkeit gangbar ist. Davon hängt ab, ob grundsätzlich andere Lösungen zu suchen sind.

Auch abgesehen vom politischen Aspekt der Gewährsfrage ist das Projekt Gewähr wichtig und wertvoll, weil es gestattet, die Bilanz des bisher Erreichten zu ziehen und daraus die Konsequenzen für das weitere Vorgehen abzuleiten. Im Vergleich zum doch eher abstrakten und theoretischen Konzept von 1978 [5] darf man den Wert eines konkreten, wenn auch nicht ausführungsfähigen Projekts nicht unterschätzen. Es zwingt den Bearbeiter und Begutachter, seine allgemeinen Aussagen und theoretischen Vorstellungen in eine konkrete Situation zu stellen und neu zu überdenken. Das Projekt Gewähr ist nach den schwedischen Arbeiten - den sogenannten KBS-Projekten [6] - weltweit erst das zweite Endlagerprojekt dieser Ausführlichkeit. In diesem Sinne betrachtet die HSK das Projekt Gewähr als wertvollen Beitrag zur Endlagerplanung in der Schweiz.

### 3.2 Beseitigung radioaktiver Abfälle in Perspektive

Es kann zu einseitiger Betrachtungsweise und wirklichkeitsfremden Folgerungen verleiten, wenn man ein Problem losgelöst von anderen nur für sich allein untersucht. Um die Verhältnismässigkeit zu wahren, muss man sich deshalb bemühen, bei der Begutachtung des Projekts Gewähr das Problem der radioaktiven Abfälle und ihrer Beseitigung in der Perspektive unserer heutigen zivilisatorischen und natürlichen Verhältnisse zu sehen.

### 3.2.1 Toxizität

Die hochaktiven Abfälle aus der Kernenergienutzung werden oft als Stoffe betrachtet, deren Gefährlichkeit jedes menschliche Mass und Vorstellungsvermögen übersteige. Dem ist keineswegs so; die Gefährlichkeit lässt sich in Zahlen fassen, und diese Zahlen zeigen, dass die hochaktiven Abfälle kein einzigartiges Problem unserer Zeit sind.

Tief in geologischen Formationen beseitigte Abfälle können nicht mehr in fester Form ungehindert in die menschliche Umwelt gelangen, sondern nur gelöst im Wasser und fein verteilt. Demnach ist es weniger die Bestrahlung von aussen, welche die Gefährdung ausmacht, als vielmehr die interne Dosis nach der Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper. Ein geeignetes Mass für dieses Gefährdungspotential ist die Toxizität; darunter versteht man diejenige Dosis, die aus der Einnahme einer gegebenen Menge des radioaktiven Materials entstände (genauere Definition in Kapitel 5.2). Mit dem Begriff der Toxizität wird es möglich, das Gefährdungspotential radioaktiver Abfälle quantitativ zu erfassen und mit dem anderer Stoffe zu vergleichen.

Zur Illustration des Toxizitätsbegriffs möge folgendes Beispiel dienen. Tausend Jahre nach der Einlagerung - bis dann sollen die Abfälle nach dem Konzept der Nagra in den Endlagerbehältern eingeschlossen bleiben - hat ein Gramm verglasten hochaktiver Abfall eine Toxizität von etwa 1400 rem; das ist die über 50 Jahre akkumulierte Dosis einer Person, welche ein Gramm Abfallglas in löslicher Form schluckt. Das hiesse, dass diese Person für den Rest ihres Lebens infolge der einmaligen Aktivitätsaufnahme eine jährliche Dosis von etwa 30 rem erhielte. Die radiologische Abschätzung der gesundheitlichen Auswirkungen ergibt, dass diese Dosis nicht tödlich wirkt, dass sie hingegen eine nicht zu vernachlässigende zusätzliche Wahrscheinlichkeit von 10-20 % für eine spätere Erkrankung an Krebs nach sich zieht.

Der Begriff der Toxizität gibt auch die Möglichkeit, radioaktive Abfälle mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen zu vergleichen. Derartige Vergleiche (Kapitel 5.2 und Abb. 5.1) zeigen, dass die Toxizität der hochaktiven Abfälle langfristig auf Werte absinkt, die in der Natur häufig auftreten.

Das Fazit solcher Ueberlegungen ist: Die hochaktiven Abfälle sind gefährlich und müssen mit aller Umsicht und Sorgfalt beseitigt werden; ein isoliertes und singuläres Problem unserer Zivilisation sind sie hingegen nicht.

### 3.2.2 Beseitigungsmöglichkeiten

Die Schweiz steht mit ihren radioaktiven Abfällen nicht allein da. Jedes Land, das die Kernenergie nutzt, hat auch ein mehr oder weniger entwickeltes Programm für die Beseitigung der Abfälle. Endlager für hochaktive Abfälle sind noch nirgends realisiert, doch haben einige Länder weit fortgeschrittene Projekte. Am ehesten mit dem Projekt Gewähr vergleichbar sind die schwedischen Arbeiten, die unter der Bezeichnung KBS-Projekte bekannt sind, darunter vor allem das letzte und ausführlichste, KBS-3 [6], das die Endlagerung abgebrannter Brennelemente behandelt. Zwischen KBS-3 und dem Projekt Gewähr sind bei allen Unterschieden viele Gemeinsamkeiten festzustellen: Beide sehen Kristallin als Wirtgestein vor, beide legen grosses Gewicht auf das Material Bentonit, mit dem die Lagerstollen verfüllt werden sollen, und die Sicherheitsanalysen sind bei beiden ähnlich aufgebaut. Auch KBS-3 entstand als Antwort auf eine gewähnsähnliche Forderung: Als Voraussetzung zur Inbetriebnahme zweier schwedischer Kernkraftwerke musste gezeigt werden, dass die Abfälle sicher zu beseitigen seien. Die schwedischen Behörden akzeptierten 1984 KBS-3 als Sicherheitsnachweis. Zwischen der Nagra und den Projektanten der KBS-Projekte fand eine enge Zusammenarbeit statt, und auch die HSK profitierte von den Erfahrungen der schwedischen Sicherheitsbehörde bei der Begutachtung.

Zur Zeit sucht jede Nation mit einem Kernenergieprogramm ihre eigenen Endlager. Das ist von der Sache her nicht nötig, und es lassen sich sogar Gründe anführen, warum eine gemeinsame multinationale Endlagerung, auch von der Sicherheit her, Vorteile bieten könnte. Ein besonders interessantes internationales Forschungsprojekt mit dem Namen "Subseabed Disposal Programme" läuft unter dem Patronat der OECD Kernenergie-Agentur; die

Schweiz ist daran beteiligt [7]. Auch dieses Projekt zielt auf die Endlagerung in geologischen Formationen, jedoch nicht auf den Kontinenten, sondern unter dem Meeresboden. Die seit einigen Jahren laufenden Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen, brachten aber vielversprechende Ergebnisse. Angesichts der möglichen sicherheitstechnischen Vorteile des Subseabed Projekts scheint es der HSK angezeigt, dass die Schweiz weiterhin daran teilnimmt und die Ergebnisse aufmerksam verfolgt.

Hochaktive Abfälle werden vor der Endlagerung in ein Zwischenlager verbracht, wo sie abkühlen können. Da die sichere Zwischenlagerung heute technisch gelöst ist, wäre auch eine längerfristige Zwischenlagerung der Abfälle denkbar. Das hätte sogar einen Vorteil, weil die Endlagerung der hochaktiven Abfälle umso einfacher wird, je mehr diese abgekühlt sind. Technisch gesehen besteht somit kein Grund, die Endlagerung hochaktiver Abfälle zu überstürzen; vielmehr empfiehlt es sich, die Endlagerplanung in aller Ruhe voranzutreiben und dabei auch die zukünftigen Entwicklungen zu verfolgen, bevor man irreversible Schritte einleitet.

## ZWEITER TEIL : C-LAGER

---

### 4. Grundzüge des Projekts

#### 4.1 Ueberblick

Das Endlager Typ C enthält die verglasten, hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs; sie sind in den Gewährsberichten mit WA-1 bezeichnet. Daneben soll das C-Lager auch die Abfallsorte WA-4 (Hülsen und Endstücke von Brennelementen) aufnehmen; wegen ihrer wesentlich geringeren Toxizität sind diese Abfälle jedoch im Sicherheitsbericht nicht berücksichtigt. Die hochaktiven Abfälle sind gekennzeichnet durch hohe Anfangsaktivität, Wärmeentwicklung und hohen Gehalt an langlebigen  $\alpha$ -Strahlern. Die im Projekt Gewähr verwendeten Abfallmengen beruhen auf einem Kernenergieprogramm von 6 GW installierter elektrischer Leistung während 40 Jahren, insgesamt also auf 240 GWe·a; an hochaktiven Abfällen entstehen daraus 5895 Gebinde mit je 404 kg verglastem Abfall.

Das Konzept sieht ein bergmännisch errichtetes Lager mit zwei vertikalen Zugangsschächten und mindestens 20 horizontalen Einlagerungsstollen vor. Die Abfallgebände werden in Endlagerbehälter verpackt und horizontal in den Stollen eingelagert; die Abfälle der Sorte WA-4 befinden sich in Betonsilos. Abb. 4.1 zeigt eine mögliche Ansicht des C-Lagers.

Die wichtigsten Kenndaten des C-Lagers sind:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| - Wirtgestein                     | : Granit im Grundgebirge der Nordschweiz          |
| - Lagertiefe                      | : ca. 1200 m unter Terrain                        |
| - Ausbruchsvolumen                | : ca. 1 Mio m <sup>3</sup>                        |
| - Lagerfläche im Grundriss        | : 1-2 km <sup>2</sup>                             |
| - Gesamtlänge der Lagerstollen    | : mindestens 30 km                                |
| - Volumen der hochaktiven Abfälle | : ca. 1100 m <sup>3</sup> (ohne Endlagerbehälter) |
| - Endlagerbehälter                | : Stahlguss, 250 mm Wandstärke                    |
| - Verfüllmaterial                 | : Bentonit  |

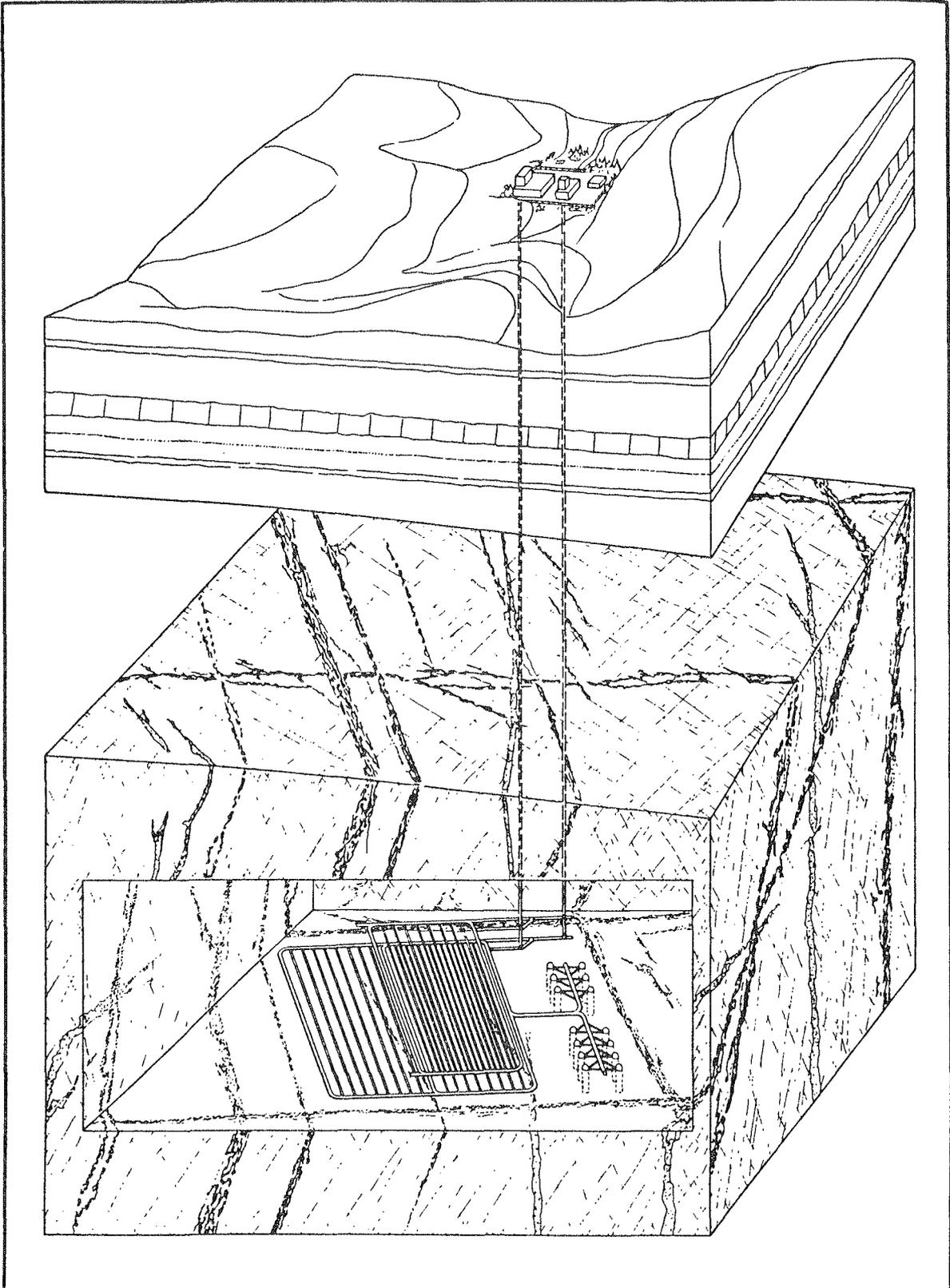


Abb. 4.1: Perspektivansicht des C-Lagers. Beispiel der Anordnung des Endlagerbereichs in zwei Ebenen in einem von Störungszonen durchtrennten Granitblock [aus NGB 85-04]

## 4.2 Untersuchungsprogramm

Die Nagra führte ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durch, um sich die nötigen Grundlagen zur Ausarbeitung eines Projekts für ein C-Lager zu beschaffen. Die wichtigsten Untersuchungen und einige Ergebnisse sind hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit kurz erwähnt. Sie sind in den technischen Berichten der Nagra ausführlich dokumentiert.

- Abfallkompilation: Die Nagra erfasste die Gesamtheit der radioaktiven Abfälle, die in der Schweiz anfallen, und stellte die für die Endlagerung wesentlichen Eigenschaften zusammen.
- Abfallverfestigung: Verschiedene Verfestigungsformen für radioaktive Abfälle wurden untersucht. Zu erwähnen sind insbesondere die gemeinsam mit anderen Ländern an mehreren Forschungsinstituten durchgeführten Untersuchungen über Korrosion und Auslaugung von hochaktiven Abfallgläsern.
- Endlagerbehälter: Für die hochaktiven Abfälle erarbeitete die Nagra ein eigenes Projekt eines Endlagerbehälters. Das Projekt ist dadurch gekennzeichnet, dass der Behälter neben seiner Einschlussfunktion auch noch eine sicherheitsmässig wichtige Rolle für die Chemie des Endlagers übernimmt.
- Bentonit: Die Eigenschaften von Bentonit, der als Verfüllmaterial der Endlagerstollen vorgesehen ist, sind heute in zahlreichen Experimenten untersucht.
- Geologie: Der aufwendigste Teil der Arbeiten galt der geologischen Erkundung des kristallinen Sockels der Nordschweiz. Von 1982 bis heute wurden sechs Tiefbohrungen auf Tiefen zwischen 1300 und 2500 m abgeteuft, die von einem intensiven Untersuchungsprogramm begleitet waren. Dabei wurden mitunter auch neue Messmethoden erprobt, die sich erst in Entwicklung befinden. Die folgende Zusammenstellung gibt einen Ueberblick über die Tiefbohrungen:

<u>Bohrung</u>	<u>Endteufe (m)</u>	<u>Kristallinoberfläche (m)</u>
Böttstein (AG)	1501 (Juni 1983)	315
Weiach (ZH)	2482 (November 1983)	2020
Riniken (AG)	1801 (Januar 1984)	-
Schafisheim (AG)	2007 (Juni 1984)	1490
Kaisten (AG)	1306 (Juni 1984)	297
Leuggern (AG)	1689 (Februar 1985)	223

Weitere Untersuchungsmethoden wie Vibroseismik, Refraktionsseismik, neotektonische Studien etc. ergänzten die Tiefbohrungen. Insgesamt ist heute der geologische Untergrund der Nordschweiz weit besser bekannt als 1978, und teilweise wurden auch frühere Vorstellungen durch neue Erkenntnisse überholt. Zu erwähnen ist insbesondere die Entdeckung des nordschweizerischen Permokarbon-Trogs, die für die schweizerische Geologie von erstrangiger Bedeutung ist.

- Hydrogeologie: Die hydrogeologischen Verhältnisse der Nordschweiz wurden weiträumig untersucht, auch ausserhalb der Tiefbohrungen. Zur Interpretation der Messergebnisse bestehen erste hydrogeologische Modelle, die dazu dienen sollen, den Fluss der Tiefenwässer zu erfassen.
- Modelle: Die Nagra erarbeitete eine Vielzahl von naturwissenschaftlich-mathematischen Modellen für die Beschreibung der massgeblichen Mechanismen, die das Verhalten eines Endlagersystems bestimmen. Für einige dieser Modelle musste sie die für die Anwendung benötigten Rechenprogramme selbst entwickeln. Die wichtigsten Modelle betreffen - neben den erwähnten hydrogeologischen Modellen - den Wärmetransport, die Nahfeldchemie, die Freisetzung aus dem Endlager, den Nuklidtransport im Wirtgestein (die entsprechenden Rechenprogramme wurden in einer internationalen Vergleichsstudie verifiziert) und den Transport in der Biosphäre.

- Felslabors: Neben ihrer Beteiligung am internationalen Untersuchungsprojekt im schwedischen Bergwerk Stripa errichtete die Nagra auf der Grimsel ein eigenes Felslabor. Die Experimente in den Felslabors dienen dazu, die Eigenschaften des Kristallins besser kennen zu lernen und neue Untersuchungsmethoden zu entwickeln.

#### 4.3 Standortaspekte

Das Projekt des C-Lagers ist, was das Wirtgestein betrifft, nahezu vollständig auf die Ergebnisse der Bohrung Böttstein abgestellt. Aus diesen leitete die Nagra einen sogenannten Modelldatensatz ab, der dann, mit seinen Variationen, die geologische Grundlage für die Sicherheitsanalyse bildete. Die HSK bezeichnet im folgenden einen Standort mit den Eigenschaften der Bohrung Böttstein als Referenzstandort, und spricht demgemäss auch von Referenzbohrung und Referenzeigenschaften. Der Begriff der Referenzeigenschaften ist nicht synonym mit dem des Modelldatensatzes, der bereits eine weitergehende Interpretation der Ergebnisse enthält, und die HSK bearbeitet auch die Frage, wie weit der Modelldatensatz aus den Referenzeigenschaften folgt. Um Missverständnissen vorzubeugen, die aus der Verwendung des Begriffs "Standort" entstehen könnten, hält die HSK fest, dass die Wahl eines Referenzstandortes für das Projekt Gewähr kein Präjudiz für den Standort eines allfälligen späteren Endlagers schaffen soll.

Die Verwendung einer einzigen Referenzbohrung bringt es mit sich, dass ihre Eigenschaften strikte genommen nur für den Referenzstandort repräsentativ sein können. Es wäre auch ein anderes Vorgehen denkbar gewesen, indem man aus mehreren Bohrungen durch Interpolation einen Modellstandort hätte ableiten können, dessen Eigenschaften durch die Bohrergebnisse als realistisch erhärtet worden wären; ein solcher Modellstandort wäre dann für ein grösseres Gebiet einigermaßen repräsentativ gewesen. Diese Idee lag auch der AGNEB-Definition von "Gewähr" zugrunde (Abschnitt 2.1). Doch war sie nicht zu verwirklichen, weil die einzelnen Bohrungen weitgestreute Resultate mit wenig Gemeinsamkeiten brachten. Das hat zur Folge, dass sich jetzt

alle standortgebundenen Eigenschaften nur auf den Referenzstandort beziehen; so ist beispielsweise unter Wirtgestein nicht irgendein Granit zu verstehen, sondern einzig und allein der Granit mit den Eigenschaften, wie sie in der Bohrung Böttstein beobachtet worden sind.

#### 4.4 Hauptfragen zu Gewähr

Weil die Sicherheitsanalyse im Projekt Gewähr nur auf den Referenzstandort bezogen ist und ihre Ergebnisse daher nur für diesen gültig sind, weil andererseits ein Endlager ein grösseres Gebiet beansprucht als durch eine einzige Bohrung erschlossen werden kann, lag es für die HSK nahe, die Frage, ob mit dem vorgelegten Projekt die verlangte Gewähr geboten sei ("Gewährsfrage"), in zwei Fragen zu unterteilen:

1. Ist die Sicherheit eines Endlagers am Referenzstandort gewährleistet? ("Sicherheitsnachweis")

Die Sicherheitsanalyse wird auf die Eigenschaften der Referenzbohrung so abgestützt, als ob das gesamte Gebiet des Endlagersystems diese Eigenschaften hätte. Zu dieser Frage gehört auch die Ueberprüfung des Modelldatensatzes.

2. Gibt es genügend ausgedehnte Gesteinskörper mit den Referenzeigenschaften, und wenn ja, kann man sie finden? ("Standortfrage")

Die Referenzeigenschaften sind per definitionem am Referenzstandort realisiert. Es fragt sich dann, ob und wie man ein genügend grosses Gebiet finden kann, das mindestens gleichwertige Eigenschaften aufweist.

Für das Verständnis des HSK-Gutachtens ist es notwendig, diese beiden Fragen auseinanderzuhalten. In der Sicherheitsanalyse muss man eine Anzahl wichtiger geologischer Parameter festlegen, beispielsweise die Wasserdurch-

lässigkeit des Wirtgesteins. Diese Parameter müssen so gewählt werden, dass sie möglichst gut durch die Beobachtungsergebnisse aus der Referenzbohrung gestützt sind. Nun ist es durchaus möglich, dass die Ergebnisse anderer Bohrungen eine andere Wahl nahelegen könnten, zum Beispiel eine höhere Wasserdurchlässigkeit. Der diesbezügliche Einwand, die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Parameterwerte seien unrealistisch, ist aber für die Beantwortung der Frage 1 ohne Belang, sofern nur die Werte für die Referenzbohrung zutreffen. Der Einwand kann hingegen einen grossen Einfluss auf die Beantwortung der Frage 2 haben.

Die Gewährsberichte der Nagra befassen sich überwiegend mit der ersten Frage und gehen kaum auf die Standortfrage ein; hingegen enthält der Nachbericht [1] dazu einige Ueberlegungen. Nach Ansicht der HSK lässt sich die Standortfrage nicht von der Gewährsfrage trennen. Wenn die AGNEB-Definition [2] verlangt, dass die angenommenen Eigenschaften eines Modellstandorts realistisch sein müssen, dann bezieht sich das auf die Eigenschaften eines Standorts in seiner ganzen benötigten Ausdehnung und nicht nur auf die Eigenschaften einer Referenzbohrung. Die beiden Hauptfragen sind somit "hintereinander geschaltet": Erst wenn beide positiv beantwortet sind, ergibt sich eine positive Antwort auf die Gewährsfrage. Die HSK musste deshalb die Standortfrage in ihre Beurteilung des Projekts Gewähr miteinbeziehen, auch wenn die Grundlagen zu ihrer Beantwortung heute noch teilweise fehlen; sie stützte sich dabei auch auf die Ergebnisse der Expertise Laubacher über die Tektonik der Nordschweiz.

Die Aufteilung der Gewährsfrage in die beiden Hauptfragen ergibt sich nach Ansicht der HSK zwangsläufig daraus, dass die bis heute bekannt gewordenen geologischen Verhältnisse im kristallinen Sockel der Nordschweiz von Ort zu Ort stark schwanken und kein einheitliches Bild ergeben. Die beiden Fragen sind im übrigen nicht voneinander unabhängig. Wenn aus der ersten Frage eine grosse Sicherheitsmarge resultiert, erleichtert dies die Antwort auf die zweite Frage; ist umgekehrt die Sicherheitsmarge klein, wird die Standortsuche schwieriger, weil dann die Eigenschaften des Gebiets mindestens so gut sein müssen wie die des Referenzstandorts.

## 5. Technische Beurteilung

### 5.1 Einführung

Das vorliegende Kapitel enthält die Beurteilung der technischen Aspekte des Projekts für das C-Lager, die später als Grundlage für die Gesamtbeurteilung dient. Hier sind die wichtigsten Aussagen aus den entsprechenden Kapiteln des Technischen Berichts zum Gutachten zusammengefasst; die Einzelheiten und näheren Begründungen finden sich dort. Die radioaktiven Abfälle des B- und des C-Lagers werden gesamthaft in Kapitel 5.2 besprochen.

Ein Endlagersystem kann man gedanklich in drei charakteristische Hauptelemente zerlegen: Das Lagergut, die technische Anlage und das geologisch-hydrogeologische Umfeld, in das hinein das Endlager gebaut ist. Ihnen gelten die nächsten vier Kapitel (5.2 - 5.5). Kapitel 5.6 beschreibt als Einleitung zu den nachfolgenden Teilen kurz das allgemeine Vorgehen bei der Sicherheitsbeurteilung. Die HSK zählt dort ferner die fünf Sicherheitselemente auf, die nach ihrer Ansicht neben Geologie und Hydrogeologie am meisten zur Sicherheit des C-Lagers beitragen und deshalb in den nächsten fünf Kapiteln (5.7 - 5.11) einzeln beurteilt werden. Nach kurzer Diskussion der Annahmen über die Biosphäre (5.12) geht die HSK in den zwei anschliessenden Kapiteln näher auf die eigentliche Sicherheitsanalyse ein. In Kapitel 5.13 behandelt sie das Basisszenario, das der ungestörten Entwicklung des Endlagersystems entspricht, diskutiert die Modelle und Rechenannahmen und beurteilt die radiologischen Auswirkungen des Endlagers; zur Analyse der Störfälle äussert sie sich in Kapitel 5.14. In Kapitel 5.15 sind einige geologische Eigenheiten des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz zusammengefasst, von denen die HSK annimmt, dass sie einen bedeutenden Einfluss auf die Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort haben können. Schliesslich gibt die HSK in Kap. 5.16 ihre Empfehlungen für das weitere Vorgehen im Hinblick auf ein Ausführungsprojekt für ein C-Lager.

In der technischen Beurteilung des Projekts Gewähr orientiert sich die HSK am heute gültigen Stand von Wissenschaft und Technik, der ja auch der Nagra als Grundlage für die Erarbeitung des Projekts diente. Das ist aber nicht

immer einfach, weil auf einem Gebiet wie der Endlagerung radioaktiver Abfälle, das noch jung und in rascher Entwicklung ist, gesichertes Wissen, erprobte Techniken und bewährte Materialien mitunter noch nicht verfügbar sind. In solchen Fällen versucht die HSK zu beurteilen, ob die notwendige Extrapolation des gesicherten Wissens plausibel ist und ob den noch vorhandenen Ungewissheiten gebührend Rechnung getragen wurde. Oft wird allerdings nichts anderes übrig bleiben, als eine Kenntnislücke als offenen Punkt festzuhalten, der Gegenstand zukünftiger Abklärungen sein muss.

## 5.2 Radioaktive Abfälle

Menge und Art der radioaktiven Abfälle sind Grundgrößen jeder Sicherheitsbeurteilung. Um das Abfallinventar für das Projekt Gewähr festzulegen, ging die Nagra von einer Kernenergieproduktion von 240 GWe·a aus, entsprechend einer Gesamtleistung von 6 GWe mit 40-jähriger Betriebsdauer der Kernkraftwerke; hinzu kommen die ausserhalb der Kernenergie während 70 Jahren produzierten Abfälle, die allerdings nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtmenge ausmachen. Die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Kernbrennstoffe sind den Kernenergieabfällen zugerechnet. Die Entstehung der Abfälle im Kernreaktor folgt physikalischen Gesetzen, sodass das Gesamtinventar an Radionukliden bei gegebener Energieproduktion gut bekannt ist; die Aufteilung der Nuklide auf die einzelnen Abfallsorten kann jedoch in beschränktem Ausmass schwanken.

In umfassender Arbeit sammelte die Nagra alle relevanten Angaben über die radioaktiven Abfälle und stellte sie in einem Abfallhandbuch [NTB 84-47] zusammen. Sie unterscheidet je nach Herkunft 4 Abfallkategorien: Betriebsabfälle aus den Kernkraftwerken (BA), Stilllegungsabfälle (SA), Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA), Abfälle aus der Anwendung von Radioisotopen in Medizin, Industrie und Forschung (MIF); jede der Kategorien ist weiter nach Abfallsorten unterteilt. Die Abfallsorte WA-1 umfasst die hochaktiven

Abfälle, alle übrigen Abfälle sind schwach- und mittelaktiv, wobei insbesondere die Sorten WA-2/4/6 namhafte Anteile an langlebigen  $\alpha$ -Strahlern enthalten. Alle Abfälle sind in der Regel zum Zeitpunkt der Endlagerung in fester Form oder verfestigt. Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die vier Abfallkategorien und über die häufig zitierten sechs Sorten der Wiederaufarbeitungsabfälle (HA = hochaktiv, S/MA = schwach- und mittelaktiv,  $\alpha$  = bedeutende Gehalte an langlebigen  $\alpha$ -Strahlern):

BA	Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken	S/MA
SA	Stilllegungsabfälle	S/MA
WA	<u>Wiederaufarbeitungsabfälle</u>	
WA-1	verglaste, hochaktive Abfälle	HA, $\alpha$
WA-2	Fällschlämme und Konzentrate	S/MA, $\alpha$
WA-3	Ionenaustauscherharze	S/MA
WA-4	Hülsen und Endstücke von Brennelementen	S/MA, $\alpha$
WA-5	technologische Abfälle	S/MA
WA-6	stark $\alpha$ -haltige technologische Abfälle	S/MA, $\alpha$
MIF	Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung	S/MA

Während die Nuklidinventare der ersten drei Abfallkategorien, welche die Abfälle aus der Kernenergieproduktion und dem Brennstoffzyklus umfassen, aufgrund von Betriebserfahrungen in Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen im allgemeinen befriedigend abgeschätzt werden können, kennt man sie für die MIF-Abfälle weniger gut, weil sich die künftige Anwendung von Isotopen kaum prognostizieren lässt. Sie haben aber gegenüber den Kernenergieabfällen eine untergeordnete Bedeutung, so dass auch grössere Schwankungen unerheblich sind. Nach Ansicht der HSK sind die Abfallinventare, welche die Nagra dem Projekt Gewähr zugrunde legte, genügend umfassend und entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Für die hochaktiven Abfälle, die mit etwa 99 % nahezu die gesamte Aktivität aus der Energieproduktion enthalten, sind Menge und Nuklidzusammensetzung sehr gut bekannt. Bei den schwach- und mittelaktiven Abfällen, die im Kraftwerkbetrieb und bei der

Wiederaufarbeitung meist nur als Verunreinigungen anfallen, könnten Menge und Zusammensetzung je nach Betriebsablauf stärker schwanken. Wenn ein Nuklid aus diesen Abfällen die radiologischen Auswirkungen des Endlagers massgeblich mitbestimmt, wie beispielsweise Iod-129 in den WA-2/6-Abfällen des B-Lagers, könnten grössere Schwankungen die Ergebnisse der Sicherheitsbeurteilung in Frage stellen. Für solche Nuklide wird es deshalb besonders wichtig sein, durch strenge Qualitätssicherung der Abfallbehandlungsprozesse zu erreichen, dass die spezifizierten oberen Grenzen, für die das B-Lager ausgelegt ist, eingehalten werden. Abgesehen von solch seltenen Ausnahmen haben die Ungewissheiten im Abfallinventar für die Aussagen über die Sicherheit der Endlager keine erhebliche Bedeutung; für den Machbarkeitsnachweis sind die Datenerhebungen der Nagra genügend fein.

Neben den hochaktiven Abfällen teilte die Nagra dem Endlager des Typs C auch die Abfallsorte WA-4 (Hülsen und Endstücke abgebrannter Brennelemente) zu; alle anderen Abfälle sind dem Endlager des Typs B zugewiesen. Ein früher einmal diskutiertes Endlager vom Typ A [5] für den Grossteil der Stilllegungsabfälle ist im Projekt Gewähr nicht vorgesehen. Für die HSK stellt die vorgeschlagene Endlagerzuteilung eine vertretbare Variante unter anderen möglichen Varianten dar. Bei einem solchen Zweilagerkonzept ist zu entscheiden, welche der WA-Abfälle mit den langlebigen, höhertoxischen  $\alpha$ -Strahlern des besseren Schutzes im C-Lager bedürfen und welche im B-Lager beseitigt werden können. Die Nagra entschied sich im Projekt Gewähr dafür, von den schwach- und mittelaktiven Abfällen nur die Abfallsorte WA-4 im C-Lager zu beseitigen, was nicht ganz einsichtig ist, denn bei allen drei mittelaktiven WA-Sorten (WA-2/4/6) sind die Gesamtaktivitäten und die Aktivitätskonzentrationen der  $\alpha$ -Strahler von derselben Grössenordnung. Im Einklang mit der Nagra ist die HSK jedoch der Ansicht, dass die für das Projekt Gewähr gültige Zuteilung bloss eine vorläufige Arbeitsannahme ist, welche die zukünftige Endlagerzuteilung nicht präjudizieren soll. Die endgültige Zuteilung lässt sich erst bestimmen, wenn der Schutzgrad eines konkreten Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle definitiv beurteilt werden kann; dann wird sich auch die Frage entscheiden lassen, wohin die erwähnten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gehören.

Um das Gefährdungspotential der radioaktiven Abfälle zu kennzeichnen, benutzt man den Begriff der Toxizität. Darunter versteht man die Summe der mit den Dosisfaktoren multiplizierten Aktivitäten der einzelnen Nuklide. Die Toxizität einer gegebenen Menge radioaktiver Abfälle entspricht der hypothetischen Dosis, die entstünde, wenn die gesamte Menge von Menschen eingenommen würde; die Toxizität ist eine extensive Grösse: Die doppelte Menge einer gegebenen radioaktiven Substanz hat die doppelte Toxizität. Die Toxizitätsberechnungen der Nagra, die mit den Nachprüfungen der HSK übereinstimmen, gestatten einige wichtige Folgerungen (Abb. 5.1).

Die Toxizität des B-Lagers, welche im übrigen weitgehend von den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung bestimmt wird, ist etwa hundertmal geringer als die des C-Lagers. Im C-Lager dominieren die hochaktiven Abfälle (WA-1) gegenüber den WA-4-Abfällen wiederum im Verhältnis von etwa 100:1. Diese Verhältnisse begründen das grössere Gewicht des C-Lagers für die Beurteilung des Projekts Gewähr und erklären auch, warum die Nagra - für das Projekt Gewähr - die Abfälle der Sorte WA-4 nicht in die Sicherheitsanalyse des C-Lagers einbezog. Der langfristige zeitliche Verlauf der Toxizität ist in beiden Lagern etwa der gleiche: Zuerst nimmt sie relativ rasch ab; nach einigen 10'000 Jahren ist die weitere Abnahme durch den langsamen Zerfall des dominierenden Nuklids bestimmt (Neptunium-237 mit einer Halbwertszeit von 2,14 Millionen Jahren).

Zum Vergleich lässt sich berechnen, dass nach einigen Millionen Jahren das Gesamtinventar des C-Lagers etwa dieselbe Toxizität hat, wie die natürlichen radioaktiven Stoffe, die sich in der 500 m mächtigen Schicht des Wirtgesteins über der Endlagergrundfläche befinden (Abb. 5.1). Nach etwa 100 Millionen Jahren hat das Abfallinventar des C-Lagers dieselbe Toxizität wie das Gesteinsvolumen, das beim Lagerbau ausgebrochen wurde.

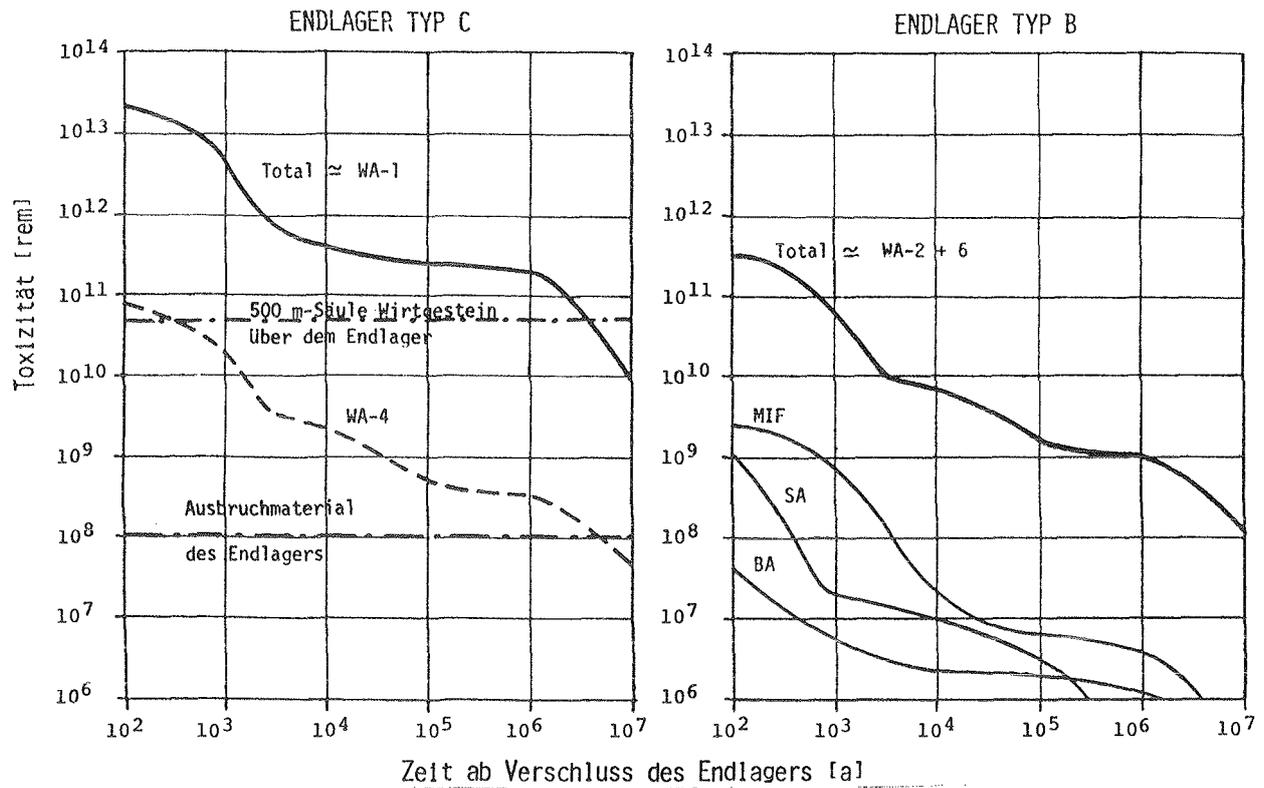


Abb. 5.1: Toxizitätsinventare [nach NGB 85-02]

Wie jeder Vergleich hinkt indessen auch der Vergleich der Toxizitäten. Massgebend für die Auswirkungen radioaktiver Stoffe sind nicht allein die Toxizitäten, sondern viel mehr die Freisetzungsraten, die angeben, welcher Bruchteil der Toxizität in die Biosphäre gelangt. Letztlich sind nur die berechneten Strahlendosen das gültige Mass für eine radiologische Gefährdung. Aus diesen Gründen ist auch die relative Gewichtung der verschiedenen Abfallsorten eines Endlagers mittels ihrer Toxizität nur als vorläufig zu betrachten, und die HSK erwartet, dass in künftigen Sicherheitsstudien die Auswirkungen sämtlicher Abfallsorten berechnet werden.

### 5.3 Bautechnik

Das Endlager vom Typ C besteht im wesentlichen aus drei Bereichen: der oberirdischen Empfangsanlage, den beiden Zugangsschächten und dem eigentlichen Endlagerbereich in 1200 m Tiefe mit Lagerstollen und -silos und Verbindungsstollen (Abb. 4.1). Die genaue Gestaltung des Endlagerbereichs lässt sich heute noch nicht festlegen, da sie den geologischen Verhältnissen angepasst werden muss. Vor der Auslegung will die Nagra deshalb zuerst einen Schacht abteufen und einen Sondierstollen vortreiben, der den Endlagerbereich umfährt. Sie behält sich auch vor, den Endlagerbereich stockwerkartig zu gliedern, um damit allfälligen Störzonen auszuweichen. Die HSK begrüsst diese Flexibilität, da sie mehr Freiheit in der Wahl eines Endlagerstandorts geben kann.

Nach Ansicht der HSK ist der Bau eines Endlagers vom vorgesehenen Typ unter den felsmechanischen Gegebenheiten des Referenzstandorts realisierbar. Für das Abteufen der Schächte kann man auf die Erfahrungen des Bergbaus zurückgreifen; in den vergangenen 20 Jahren sind weltweit viele Schächte auf rund 1000 m und einige tiefer abgeteuft worden. Die technischen Probleme der Ausführung werden bei einem konkreten Projekt noch genauer abzuklären sein; besondere Aufmerksamkeit verdient dabei die Frage des Wassers, das während des Baus in den Schacht eindringen kann. Die Nagra sieht vor, die Endlagerstollen soweit als möglich mit einer Vollschnittmaschine zu fräsen. Die HSK betrachtet das Fräsen als grundsätzlich gute Lösung, weil dabei die Auflockerungszone um die Stollen kleiner ist als beim konventionellen Sprengvortrieb, was sich auf die Wasserdichtheit der verfüllten Stollen und damit auch auf die Sicherheit der Endlagerung günstig auswirkt. Voraussetzung für den Fräsvortrieb sind allerdings gute felsmechanische Eigenschaften über einen grossen Bereich des Lagergebiets. Sollten diese nicht vorhanden sein, müssten die Auswirkungen anderer Ausbruchverfahren in der Sicherheitsanalyse und bei der Planung eines Ausführungsprojekts berücksichtigt werden.

Um die Sicherheitsanalyse nicht zu komplizieren, sah die Nagra im Baukonzept einen möglichst sparsamen Einsatz von Beton vor. Nach Auffassung der HSK ist ein solches Vorgehen bei den angenommenen guten felsmechanischen

Eigenschaften des Wirtgesteins (sogenannter "kompakter Granit") zunächst vertretbar. Sie weist jedoch darauf hin, dass auch Gesteinspartien mit schlechteren Eigenschaften angetroffen werden könnten, was bei weitgehendem Verzicht auf die bautechnisch angezeigte Verwendung von Beton die Auslegung des Lagers und letztlich auch die Wahl des Standorts stark einschränken würde. Sie empfiehlt deshalb, den Beton in die Sicherheitsrechnung einzubeziehen, wozu die Nagra bereits neuere Arbeiten begonnen hat; dabei sind auch die Betonmengen der Lagersilos für die mittelaktiven Abfälle zu berücksichtigen. Falls sich zeigt, dass der Beton keinen nachteiligen Einfluss auf die Sicherheit hat, fällt die oben erwähnte Einschränkung dahin.

Vor dem endgültigen Verschluss des Lagers müssen alle unterirdischen Hohlräume verfüllt und versiegelt werden, damit keine gut wassergängigen Verbindungen zwischen Endlager und Biosphäre zurückbleiben. Besonders strenge Anforderungen sind dabei an die Versiegelung der Schächte zu stellen, weil diese die kürzest mögliche Verbindung zur Biosphäre bilden. Die Nagra sieht vor, als Füllmaterial hauptsächlich ein Bentonit-Sand-Gemisch zu verwenden; in Schlüsselzonen an ausgesuchten Stellen will sie als zusätzliche hydraulische Barriere den Schacht scheibenförmig ausweiten und mit Blöcken aus hochverdichtetem Bentonit ausfüllen. Die HSK hält dieses Konzept für tauglich. Allerdings bestehen heute noch wenig Erfahrungen mit solchen Versiegelungen, da im üblichen Bergbau nie die gleichen strengen Anforderungen galten; insbesondere weiss man noch wenig über die Langzeitbeständigkeit der Versiegelungen. Weitere Anstrengungen werden deshalb nötig sein. Da jedoch der Verschluss des Endlagers kaum vor der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts erfolgen wird, ist nach Ansicht der HSK genügend Zeit vorhanden, die nötigen Grundlagen zu beschaffen und geeignete Methoden für eine sichere Verfüllung und Versiegelung zu entwickeln und zu erproben.

Abschliessend hält die HSK fest, dass sie - bei den gegebenen felsmechanischen Eigenschaften des Referenzstandorts - keine prinzipiellen Gründe sieht, die einer bautechnischen Realisierung des Endlagers entgegenstünden.

#### 5.4 Geologie

Die Geosphäre hat für die Sicherheit eines Endlagers eine grosse Bedeutung. Nicht nur schützt sie das Lager gegen Einwirkungen von der Oberfläche her und trägt als natürliche Barriere durch Rückhaltung und Verdünnung der Radionuklide direkt zur Sicherheit bei, sondern sie bildet auch das Umfeld der technischen Barrieren und diktiert die Bedingungen, unter denen sich diese bewähren müssen. Während der Projektant eines Endlagers die technischen Barrieren den Bedingungen anpassen kann, muss er die geologischen Eigenschaften eines einmal gewählten Standorts so akzeptieren, wie sie sind. Zuerst aber muss er diese Eigenschaften kennen. Selbst wenn die Geosphäre keine direkte Sicherheitsfunktion hätte, gibt es einen guten Grund, weshalb man die geologische Situation eines Endlagergebietes gründlich verstehen muss. Mit der Endlagerung überantwortet man gewissermassen der Geosphäre potentiell gefährliche Stoffe zur langfristigen Verwahrung; man tut das nur, wenn man durch genügendes Wissen überzeugt ist, dass man keine unbekanntes, möglicherweise ungünstigen Fakten übersehen hat. Einem ungenügend bekannten "Treuhand" überträgt man keine "Verantwortung". Alle diese Überlegungen zeigen, welche Bedeutung der guten Kenntnis der Geosphäre zukommt.

Als geologischer Träger des C-Lagers ist im Projekt Gewähr das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz vorgesehen, ein Gebiet, das erstmals durch das erdwissenschaftliche Untersuchungsprogramm der Nagra einschliesslich Sondierbohrungen gezielt untersucht worden ist. Allerdings stützt sich das Projekt Gewähr weitgehend nur auf die Bohrung Böttstein ab. Die Auswertung des umfangreichen Datenmaterials ist im Gang, doch steht die wichtige regionale geologische Synthese einstweilen noch aus, die durch Interpretation der Daten ein plausibles Bild des geologischen Aufbaus herstellen soll. Die HSK geht im folgenden auf die wichtigsten geologischen Fragen des C-Projekts ein und äussert sich zur regionalen Geologie (Störungszonen und Schollengrösse, Granitkörper, Permokarbondrog, Temperaturfeld), zum geologischen Datensatz für den Endlagerbereich und zu den Langzeitszenarien; die Ergebnisse einer Expertise über die Tektonik der Nordschweiz (H.P. Laubacher) sind mit berücksichtigt. Die Äusserungen beschränken sich auf die

Standortregion der bisherigen sechs Sondierbohrungen und lassen das ebenfalls in Betracht gezogene Gebiet des Kantons Schaffhausen ausser acht, weil dort der kristalline Untergrund noch kaum erforscht ist.

#### 5.4.1 Störungszonen und Schollengrösse

Der kristalline Sockel der Nordschweiz ist von einem Netz mehr oder weniger ausgeprägter Störungszonen durchzogen, an denen tektonische Bewegungen stattgefunden haben und teilweise noch stattfinden. In den Gewährsberichten unterschied die Nagra verschiedene Typen von Störungszonen, die sie im Nachbericht [1] genauer umschrieb. Den grossen Störungen 1. Ordnung will sie bei der Festlegung des Standorts ausweichen, indem sie eine genügend grosse von solchen Störungen begrenzte Grundgebirgsscholle auswählt. Die Störungen 2. Ordnung zerlegen die Scholle in Teilschollen; die Nagra nennt sie auch "Layout-bestimmende" Störungszonen, weil sie ihnen durch die geometrische Auslegung des Endlagers ausweichen will. Die kleinen Störungen 3. Ordnung dürfen die Lagerstollen durchsetzen, wobei dann an den Kreuzungsstellen keine Abfallbehälter eingelagert werden. Die Machbarkeit des C-Lagers im Kristallin hängt zunächst davon ab, ob eine genügend grosse Grundgebirgsscholle zwischen Störungen 1. Ordnung gefunden werden kann; ferner müssen die Teilschollen zwischen Störungen 2. Ordnung genügend gross sein, um zumindest Teile des Lagers aufnehmen zu können; schliesslich sollen die Störungen 3. Ordnung so weit auseinander liegen, dass in den dazwischen liegenden Stollenabschnitten noch hinreichend Lagerraum bleibt.

Störungszonen zu erkennen und zu charakterisieren ist schwierig, weil der Kristallinsockel unter Sedimentschichten mit Mächtigkeiten bis zu mehreren hundert Metern liegt und die Störungszonen nur dort geologisch kartierbar sind, wo sie sich durch die Sedimente bis an die Oberfläche durchgepaust haben. Grundsätzlich können hier geophysikalische Untersuchungen mit künstlich ausgelösten seismischen Wellen weiterhelfen, doch sind die Ergebnisse wegen der Sedimentüberdeckung und der geringen seismischen Kontraste des Kristallins schwierig auszuwerten und lassen oft mehrere Interpretationen

zu. Die Nagra führte im Untersuchungsgebiet ausgedehnte seismische Untersuchungen durch; die HSK erwartet von der noch ausstehenden Auswertung einen wesentlichen Beitrag zur kommenden regionalen Synthese der Geologie. Diese Synthese wird auch den geologischen Werdegang des Gebiets berücksichtigen müssen, denn ein tieferes Verständnis der tektonischen Struktur ist nur aufgrund ihrer Geschichte möglich.

Nach Ansicht der HSK und ihres Experten ergibt sich aus dem vorliegenden Material heute etwa folgendes Bild über Störungszonen und Schollengrößen, wobei die Aussagen als vorläufig zu gelten haben und in Zukunft noch näher abzuklären sind.

- Der kristalline Untergrund hat eine bewegte Vergangenheit hinter sich. Das Netz der Störungszonen ist dichter und die Schollen sind kleiner als zu Beginn der Arbeiten angenommen; so gibt es Hinweise aus der Seismik, dass möglicherweise zwischen den Sondierbohrungen Böttstein und Leuggern eine Serie von Bruchflächen im Abstand von 300-500 m voneinander liegt. Ob dies ein Lager dort verunmöglicht, lässt sich aufgrund heutiger Kenntnisse nicht sagen; die Einordnung der Störungszonen und ihre Bedeutung für die Lagereignung sind noch zu untersuchen.
- Wenn eine Störungszone lange Zeit inaktiv war, heisst das noch nicht, dass sie nicht wieder als Bewegungsfläche reaktiviert werden kann, wenn die Bedingungen des regionalen Spannungsfeldes dafür günstig sind. Bewegung an einer Störungszone ist indessen nicht von vornherein ein Ausschlussgrund für ein Endlager; was von der Sicherheit her zulässig ist, muss die gezielte Untersuchung der konkreten Störungszone zeigen.
- Der Zusammenhang zwischen Störungszonen und Wasserführung im Kristallin ist komplex und vielfältig. Häufig sind die Bewegungszonen undurchlässig, und der Wassertransport erfolgt stattdessen entlang von Klüften oder Gängen im Innern der Schollen. Aus der tektonischen Struktur allein kann man nicht ohne weiteres auf die hydrogeologischen Verhältnisse schliessen. Entscheidend für die Wasserführung einer Störungszone kann sein, ob sie hydrothermal überprägt ist, das heisst ob heisse Wässer im Laufe der geo-

logischen Geschichte die mineralogische Zusammensetzung der Störungszone verändert, alte Wasserfliesswege geschlossen und allenfalls neue geschaffen haben. Solche hydrothermal verursachten Erscheinungen, die regional unterschiedlich stark auftreten, sind ein wichtiger Untersuchungsgegenstand bei der Standortsuche im kristallinen Grundgebirge.

Die Nagra geht davon aus, dass aus Gründen der tektonischen Stabilität das Endlager von der nächstgelegenen grossen Störungszone einen Abstand von mindestens 1500-2000 m einhalten soll. Unterstellt man die heute bekannten grossen Störungen, so verbleiben in der untersuchten Region nördlich des Permokarbon-Trogs nur noch zwei kleine Gebiete, welche dieser Abstandsbedingung genügen. Ob allenfalls kleinere Abstände vertretbar wären, müsste noch untersucht werden.

Die Nagra nimmt im Nachbericht [1] aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen an, dass in der Untersuchungsregion eine geeignete, genügend grosse Scholle vorhanden ist. Ob diese Annahme tatsächlich zutrifft, lässt sich jedoch heute noch nicht beurteilen. Aber auch wenn es eine solche Scholle gibt, wird es nicht einfach sein, sie zu finden und zu erkunden. Weil die Strukturen des Grundgebirges mit geophysikalischen Fernuntersuchungen nur sehr schwierig zu erfassen sind, wird man stark auf die Naherkundung durch Bohrungen angewiesen sein, was wiederum die Gefahr birgt, das Wirtgestein durch zu viele Perforationen in seinem Schutzwert zu beeinträchtigen.

#### 5.4.2 Granitkörper

Granit ist im Projekt Gewähr das Wirtgestein für das C-Lager. Im Untersuchungsgebiet tritt Granit in Form von Granitkörpern auf, die in die ebenfalls kristallinen Gneise eingedrungen sind; ein solcher Granitkörper wurde beispielsweise in Böttstein angebohrt. Heute ist noch wenig bekannt über die Grösse und Verbreitung der Granitkörper. Im Nachbericht [1] äussert sich die Nagra zu dieser Frage und argumentiert mit statistischen Ueberlegungen und Analogieschlüssen aus anderen Kristallingebieten, dass auch im

Untersuchungsgebiet genügend grosse Granitkörper erwartet werden dürfen. Die Argumente sind nicht unbedingt überzeugend, weil die Statistik zu stark von der Auswahl des ausgewerteten Gebiets abhängt und zudem wenig aussagt über die Verhältnisse in der Endlagertiefe. Ob allenfalls auch Gneise für eine Endlagerung geeignet wären, müsste durch eine standort- und gesteinspezifische Sicherheitsanalyse gezeigt werden.

#### 5.4.3 Permokarbon-Trog

Im Verlauf der Sondierbohrungen und seismischen Untersuchungen stellte sich heraus, dass unter weiten Teilen des Juras ein tiefer Trog liegt, der mit permischen und karbonischen Sedimenten gefüllt ist. Dieser sogenannte nordschweizerische Permokarbon-Trog bildet mit seiner Ausdehnung ein dominantes geologisches Element der Standortregion, und sein Werdegang ist tektonisch mit den Strukturen des kristallinen Grundgebirges eng verknüpft. Jede künftige regionale Synthese muss den Permokarbon-Trog einbeziehen. Erste, noch vorläufige Auswertungen des HSK-Experten ergaben, dass der Trog ausserordentlich kompliziert aufgebaut ist. Starke Kompressions- und Längsverschiebungskräfte deformierten die Trogfüllung; an den Rändern können steil aufgeschobene Kristallinkörper in den Trog hineinragen. An seiner tiefsten Stelle könnte der Trog bis 7000 m reichen.

Es gibt verschiedene Gründe, warum der nordschweizerische Permokarbon-Trog für ein Endlagervorhaben im kristallinen Grundgebirge eine grosse Bedeutung hat. Zunächst schränkt er das Standortgebiet erheblich ein. Wenn er mehrere Kilometer tief ist, beeinflusst er ferner massgeblich die Strömungsverhältnisse des tiefen Grundwassers, indem er entweder bei geringer Durchlässigkeit die allgemeine Süd-Nord-Strömung, wie sie das hydrogeologische Modell der Gewährsberichte ergibt, hindert, oder bei grosser Durchlässigkeit eine Ablenkung der Strömung nach Osten oder Westen verursacht. Schliesslich ist auch zu bedenken, dass die extreme Deformationstektonik nicht auf den Trog beschränkt war, sondern sich in den angrenzenden Kristallinsockel fortsetzte, wo sie zur Zerblockung des Grundgebirges geführt

hat. Nach Ansicht der HSK sind diese Fragen näher zu untersuchen, bevor man ein Ausführungsprojekt im kristallinen Sockel der Nordschweiz in Betracht zieht.

#### 5.4.4 Temperaturfeld

Die ungestörte Felstemperatur in der Endlagertiefe darf aus praktischen Gründen des Baus und Betriebs des Endlagers einen Höchstwert von 55-60°C nicht überschreiten. Ferner ist auch wichtig, dass die Bentonitverfüllung der Lagerstollen durch die Wärmeproduktion der radioaktiven Abfälle nicht zu stark erwärmt wird. Andererseits soll aber nach den Projektannahmen der Nagra das Endlager von etwa 1000 m Kristallingestein überdeckt sein. Da die Erdwärme mit zunehmender Tiefe entsprechend dem örtlichen geothermischen Gradienten steigt und die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges allgemein gegen Süden zu absinkt, schränkt die Kombination der Temperaturbedingung mit der Ueberdeckungsbedingung das Gebiet ein, in welchem ein Endlagerstandort noch zu finden ist. Die Temperaturkarten der Nagra basieren auf der vereinfachenden Annahme, dass die geothermischen Gradienten tiefenunabhängig sind. Das Institut für Geophysik der ETH-Zürich stellte aus den verfügbaren Daten neue Karten zusammen [Expertenbericht Eugster-Rybach für die Untergruppe Geologie der AGNEB], die einen tiefenabhängigen Gradienten berücksichtigen. Diese Temperaturkarten zeigen zusammen mit einer Karte der Kristallinoberfläche, dass das mögliche Standortgebiet auf einen schmalen Streifen zwischen Permokarbon-Trog und Rhein und auf Gebiete des Kantons Schaffhausen beschränkt ist.

Das untere Aaretal, mit den Sondierbohrungen Böttstein, Leuggern und Riniken, weist eine bekannte geothermische Anomalie auf: Die geothermischen Gradienten sind höher und der Wärmefluss aus dem Erdinnern ist rund doppelt so gross wie im schweizerischen Mittel. Die Ursache der Anomalie ist noch nicht eindeutig geklärt. Unter den theoretisch denkbaren Möglichkeiten ist die plausibelste Erklärung die, dass erwärmtes Tiefenwasser in grösserem Ausmass aufsteigt. Das könnte einen schwerwiegenden Einfluss auf die Beur-

teilung der Sicherheit eines Endlagers im Gebiet der Anomalie haben, weil man sich ohne genaueres Verständnis der Anomalie fragen müsste, ob nicht in der Nähe des Lagers eine unentdeckte starke und aufwärtsgerichtete Wasserströmung vorhanden sei. Nach Ansicht der HSK wird es deshalb für den Fall eines Ausführungsprojekts in der untersuchten Region nötig sein, die Ursachen der geothermischen Anomalie abzuklären.

#### 5.4.5 Geologischer Datensatz des Endlagerbereichs

Die Nagra musste für die Sicherheitsanalyse eine Reihe von Annahmen über die wichtigen geologischen Kenngrössen treffen, wofür sie die Sondierbohrung Böttstein als Referenzbohrung benutzte. Die Daten dieser Bohrung sind im Untersuchungsbericht NTB 85-01 ausführlich und übersichtlich zusammengestellt. Der Weg von den Rohdaten der Referenzbohrung zum Modelldatensatz für das Projekt Gewähr führt über eine Interpretation der Rohdaten und enthält deshalb ein Element des Ermessens. Die HSK stimmt für die meisten Kenngrössen des Modelldatensatzes der Interpretation der Nagra zu; die einzige wichtige Ausnahme betrifft den hydrogeologischen Datensatz, auf den sie im nächsten Kapitel eingeht.

Viele der geologischen Eigenschaften wie Klüftung und Häufigkeit von Störungszonen sind grossräumige Erscheinungen und lassen sich mit einer einzelnen Bohrung nicht erfassen. Die Nagra nahm in der Sicherheitsanalyse an, dass der Modelldatensatz, der sich auf die Referenzbohrung bezieht, auch für den gesamten Endlagerbereich gültig sei. Das zukünftige Untersuchungsprogramm wird zeigen müssen, über welche Entfernungen die Referenzeigenschaften tatsächlich repräsentativ sind.

#### 5.4.6 Langzeitszenarien

Die Annahmen der Nagra über die langfristige geologische Entwicklung des Endlagergebiets stützen sich auf umfassende Literaturstudien über regionale Bewegungsabläufe und auf eine Anzahl eigener erdwissenschaftlicher Untersuchungen, die Hinweise auf junge Krustenbewegungen im Untersuchungsgebiet brachten. Die Langzeitszenarien für die Sicherheitsanalyse sind im Bericht NTB 84-26 zusammengestellt und dokumentiert. Die Nagra diskutiert darin die zukünftige Entwicklung über 1 Million Jahre und betrachtet zwei gegensätzliche Szenarien: Entweder ist die alpine Gebirgsbildung abgeschlossen und die Alpen heben sich bloss als Folge isostatischer Ausgleichsbewegungen, oder die Gebirgsbildung dauert an, was eine Hebung sowohl der Alpen als auch des nördlichen Vorlandes und des Juras zur Folge hätte. Die beiden Szenarien geben den Rahmen, in dem die langfristig möglichen geologischen Störungen des Endlagersystems, wie Erosion, Flussverschiebung, Bewegungen an Störungszonen und ähnliches, beschrieben und untersucht werden. Für beide Szenarien bleiben die Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers beschränkt.

Die HSK kann den Ausführungen der Nagra über die Langzeitentwicklung in vielen Bereichen zustimmen, wenn auch für beide Szenarien heute noch überzeugende Belege fehlen. Sie regt jedoch an, auch die Entwicklung in Schwarzwald und Vogesen und das System des Rheintalgrabens in die Überlegungen einzubeziehen, da hier Vorgänge ablaufen, die von der alpinen Gebirgsbildung unabhängig sind. So lassen neuere Untersuchungen im Südschwarzwald vermuten, dass die Hebungstendenz der jüngeren Erdgeschichte abklingt und in eine Senkungstendenz übergeht. Ein derartiger Wechsel der geologischen Rahmenbedingungen kann nicht ohne Auswirkungen auf die betrachtete Endlagerregion bleiben.

## 5.5 Hydrogeologie

Der Transport mit zirkulierendem Grundwasser ist sicherheitsmässig der weit-  
aus wichtigste Mechanismus, durch den Radionuklide aus einem verschlossenen  
Endlager in die Biosphäre gelangen können. Die Sicherheit des Endlagers  
hängt demnach entscheidend davon ab, wo die Entwässerungspfade durchführen,  
wie stark sie die Nuklide zurückhalten und welches Verdünnungspotential sie  
anbieten. Dem Projektanten eines Endlagers ist es deshalb ein zentrales An-  
liegen, die hydrogeologischen Verhältnisse der engeren und weiteren Stand-  
ortregion zu erfassen. So galt denn auch bei den Sondierbohrungen der Nagra  
der aufwendigste und zeitraubendste Teil des Untersuchungsprogramms den hy-  
drogeologischen Messungen; die langfristigen Beobachtungen laufen noch  
heute weiter und liefern Angaben über den Wasserdruck in verschiedenen  
Bohrtiefen. Parallel zu den Sondierbohrungen erarbeitete die Nagra gross-  
räumige hydrogeologische Modelle, welche die Strömung der Tiefenwässer be-  
schreiben. Die ersten Ergebnisse dieser Arbeiten sind in den Berichten zum  
Projekt Gewähr dargestellt; die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlos-  
sen, und weitere Ergebnisse sind zu erwarten. Die HSK beurteilt im folgen-  
den die hydrogeologischen Modelle und den Datensatz, der für die Sicher-  
heitsanalyse verwendet wurde. Für die Bearbeitung der Hydrogeologie standen  
ihr zwei Experten (Harwell, J. Toth) zur Verfügung; deren Berichte sind in  
der Beurteilung berücksichtigt.

### 5.5.1 Grossräumige hydrogeologische Modelle

Die grossräumige Hydrogeologie wird mit zwei ineinander verschachtelten Mo-  
dellen beschrieben. Das regionale Modell umfasst ein weites Gebiet von den  
Alpen bis zum Schwarzwald und hat zum Hauptzweck, die Randbedingungen für  
das lokale Modell festzulegen, das mit einer Fläche von etwa 1'000 km<sup>2</sup> das  
Untersuchungsgebiet der Nordschweiz überdeckt; beide Modelle reichen bis in  
eine Tiefe von 8'000 m. Die hydrodynamischen Grundgleichungen der Modelle  
gelten streng genommen nur für poröse Medien, nicht aber für geklüftete Ge-  
steine wie das Kristallin, in denen die Wasserzirkulation über Klüfte und

Spalten stattfindet. Da indessen die Hydrodynamik noch nicht in der Lage ist, Kluftströmungen befriedigend zu beschreiben, behilft man sich heute weltweit damit, das geklüftete Gestein in erster Näherung als poröses Medium zu modellieren. Dieses Vorgehen ist für grossräumige Modelle vertretbar, in denen die betrachteten Gesteinselemente so gross sind, dass ihre Klüftung einer mittleren Porosität äquivalent ist. Aussagen über das tatsächliche Strömungsverhalten in der einzelnen Kluft lassen sich so allerdings nicht gewinnen, was auch nicht der Zweck der beiden Modelle der Nagra war. Die einzigen Ergebnisse der Modelle, welche die Nagra direkt für die Sicherheitsanalyse verwendete, sind die allgemeine Strömungsrichtung und der mittlere hydraulische Druckgradient im Standortgebiet. Wenn demnach die beiden Modelle auf den ersten Blick eine weniger direkte Beziehung zur Sicherheitsbeurteilung haben, so sind doch die Anstrengungen der Nagra zu begrüßen, weil die Kenntnis auch der weiträumigen Hydrogeologie notwendig ist für das Verständnis des geologischen Umfelds eines Endlagers.

Die hydrodynamischen Gleichungen der Modelle wurden mit der Methode der finiten Elemente in drei Dimensionen gelöst, wozu ein Rechenprogramm mit der Bezeichnung FEM 301 diente. Im Auftrag der HSK überprüfte eine Experten-Gruppe (Harwell) die physikalischen und mathematischen Grundlagen der Modelle und kam zum Schluss, dass die Modelle zweckmässig ausgelegt und korrekt durchgerechnet sind. Für die weitere Entwicklung der Modelle wird angeregt, die Temperatur als zusätzliche Variable einzubauen, weil man so nicht nur die Wechselwirkung zwischen Wasserströmung und Wärmeanomalien untersuchen, sondern auch die vielen thermischen Daten des Modellgebiets zur Ueberprüfung der Ergebnisse nutzen kann. Ferner empfiehlt sich auch der Einsatz von einfacheren, zweidimensionalen Modellen; sie sind zwar weniger realistisch, gestatten es aber, eine grössere Zahl von speziellen Untersuchungen mit geringerem Rechenaufwand durchzuführen und damit den Einfluss einzelner Parameter zu studieren.

Die hydrogeologischen Modelle müssen naturgemäss die Eigenschaften des modellierten Gebiets stark vereinfacht darstellen, nur schon weil diese in der Regel bloss in groben Zügen bekannt sind. Die wichtigste Ungewissheit betrifft die Permeabilitäten (Durchlässigkeiten), die den einzelnen geolo-

gischen Elementen zuzuordnen sind, weil hier die Datenbasis noch sehr schmal ist und für den tieferen Untergrund überhaupt fehlt. Nach den Modellannahmen der Nagra ist das kristalline Grundgebirge schichtartig unterteilt in ein "oberes Kristallin", das relativ gut durchlässig ist und einen Wasserleiter darstellt, und ein wesentlich geringer durchlässiges "mittleres Kristallin" und "unteres Kristallin". Diese Vorstellung ist indessen noch zu stark vereinfachend. Zwar ist es richtig, dass die Permeabilitäten in den oberen 500 m Granit der Bohrung Böttstein wesentlich grösser sind als tiefer unten. Die grossen Durchlässigkeiten sind jedoch an steilstehende Strukturen gebunden, deren unregelmässige Verteilung eine Tiefenabhängigkeit vorspiegeln könnte und die im übrigen mit Vertikalbohrungen nur beschränkt zu erfassen sind. Zudem zeigen die anderen Bohrungen keine solche Tiefenabhängigkeit der Permeabilitäten. Es wird deshalb notwendig sein, zukünftig mit unterschiedlichen Arbeitshypothesen ein breiteres Spektrum von Modellvariationen durchzurechnen.

Die hydrogeologischen Modelle der Nagra lieferten erste Aussagen über mögliche Strömungsrichtungen und Flussverteilungen im tieferen Untergrund und leisteten einen nützlichen Beitrag zur Hydrogeologie der Nordschweiz. Sie zeigten, dass das Untersuchungsgebiet eine Exfiltrationszone ist, in der die Tiefenwässer generell nach oben strömen. Das ist allerdings für die Endlagerung grundsätzlich ungünstig, wie die Nagra selbst einräumt, weil damit vergleichsweise rasche Wasserwege zur Biosphäre denkbar sind, deren Existenz der Projektant eines Endlagers mit aufwendigen Sondierungen ausschliessen muss. Die Modellierung der Hydrogeologie steht noch am Anfang; die Modelle sind entwicklungsfähig, und die HSK ist sich mit der Nagra einig, dass die Arbeiten weitergehen müssen.

#### 5.5.2 Hydrogeologische Verhältnisse des Endlagerbereichs

Die verschiedenen Variationen der Sicherheitsanalyse (Kapitel 5.13) zeigen, dass die radiologischen Auswirkungen des Endlagers um viele Zehnerpotenzen schwanken können, je nachdem welche Annahmen über die Entwässerungspfade

getroffen werden. Daraus wird deutlich, dass der hydrogeologische Datensatz und insbesondere die Wasserfliesswege im Endlager und seiner Umgebung die allergrösste Bedeutung für die Sicherheitsbeurteilung haben. Die HSK widmete ihnen deshalb spezielle Aufmerksamkeit und versuchte, sich aus den Bohrdaten ein eigenes Bild über die möglichen Wasserfliesswege im kristallinen Grundgebirge zu machen.

Die Nagra untersuchte die einzelnen Wasserzutrittsstellen der Referenzbohrung Böttstein und ermittelte daraus verschiedene Typen von Wasserfliesssystemen. Nach ihrer Interpretation sind die wichtigsten Wasserfliesswege an steilstehende Kakiritzonen gebunden; das sind Zonen, in denen das Gestein durch tektonische Bewegungen spröd deformiert und zerrieben wurde. Nach dem Kakiritfliessmodell der Nagra fliesst das Wasser in offenen Quarzadern, die sich in solchen Kakiritzonen durch spätere hydrothermale Umwandlungen gebildet haben; eine Wasserzutrittsstelle dieser Art befindet sich bei 789 m Tiefe in der Bohrung Böttstein. Die Kakirite spielen in der Sicherheitsanalyse der Nagra eine bedeutende Rolle, weil sie gemäss den Modellannahmen die vom Wasser transportierten Radionuklide wirksam zurückhalten können (Kap. 5.10). Für flachere Fliesspfade modellierte die Nagra auch den Nuklidtransport in Ganggesteinen (v.a. NTB 85-40, [1]), doch erhielt das Kakiritfliessmodell in den Projektberichten das eindeutig höhere, wenn nicht sogar ausschliessliche Gewicht.

Nach Ansicht der HSK sprechen die Befunde der Referenzbohrung nicht für das Kakiritfliessmodell. Die beobachteten Quarzadern sind nicht an Kakiritzonen gebunden; in der Bohrung Böttstein tritt die Mehrzahl ausserhalb solcher Zonen auf. Dass ein Kakirit eine Quarzader enthält, ist dort eine seltene Ausnahme, und Kakirite ohne Quarzadern sind nur sehr gering durchlässig, weil die hydrothermale Bildung von Tonmineralien, die sogenannte Verntonung, die Risse verfüllt hat. Die Kernbeobachtungen und die Auswertung der geophysikalischen Bohrlochmessungen ergaben im übrigen, dass Kakirite unterhalb etwa 1050 m, das heisst im Bereich der Endlagertiefe, nicht mehr auftreten [NTB 85-01]. Stellt man den artesischen Wasserausfluss der einzelnen Zutrittsstellen zusammen, so zeigt sich, dass nur etwa 20 % der Gesamtschüttung an offene Quarzadern gebunden ist, wovon das meiste in der erwähn-

ten Zone bei 789 m Tiefe; demgegenüber fliesst etwa dreiviertel des Wassers in geklüfteten Ganggesteinen, das heisst in Gesteinen, die nach der Platznahme des Granits in Risse und Spalten eingedrungen sind. Solche Gesteine sind spröder als Granite, weshalb Klüfte in ihnen häufiger auftreten. Sie haben auch eine andere mineralogische Zusammensetzung als Kakirite und neigen weniger zur Vertonung; geklüftete Ganggesteine sind daher meist durchlässiger als Kakirite. Aus diesen Gründen misst die HSK den Fließwegen in Kakiriten weniger Bedeutung zu; man muss eher mit einer Entwässerung des Endlagerbereichs über geklüftete Ganggesteine rechnen.

Wasserfliesswege sind definitionsgemäss ausgedehnte, zusammenhängende Strukturen, denn kleine isolierte Hohlräume können keinen Entwässerungspfad bilden. Es ist daher nicht möglich, sich aus einer einzelnen Bohrung ein Bild über den dreidimensionalen Verlauf der Wasserfliesswege zu machen. Alle diesbezüglichen Annahmen bleiben mehr oder weniger unsicher, solange keine regionale Synthese aller hydrogeologischen Daten und Modellvorstellungen vorliegt. Die Frage der Wasserfliesswege ist für die HSK somit noch offen; wegen ihres grossen Einflusses auf die Sicherheitsaussagen ist sie mit Nachdruck weiterzuverfolgen. Die HSK berücksichtigt bei ihrer Sicherheitsanalyse (5.13) in erster Linie das Ganggesteinmodell.

Die Nagra rechnet in der Sicherheitsanalyse mit einem Wasserfluss durch die Fläche des Endlagers von maximal  $4,2 \text{ m}^3$  pro Jahr; diese Zahl stützt sich auf den hydraulischen Gradienten des lokalen Modells und auf die mittlere Durchlässigkeit in jenem Tiefenbereich der Referenzbohrung, der für das Endlager gewählt wurde. Das Wasser strömt nach oben und gelangt nach 500 m in durchlässigere Bereiche des Kristallins, wo es sich mit grösseren Wassermengen mischt; auf diese Verdünnung geht die HSK in Kap. 5.11 ein. Der Zahlenwert des Wasserflusses ist für den gewählten Bohrlochabschnitt eine vertretbare Annahme, weil der hydraulische Gradient in den verschiedenen Variationen des lokalen hydrogeologischen Modells nicht stark schwankt, und weil die Durchlässigkeiten des Wirtgesteins durch Messungen im Bohrloch belegt sind. Die Messung geringer Durchlässigkeiten ist allerdings schwierig, und Ungewissheiten von einer Grössenordnung nach beiden Seiten sind keine Ausnahme. Es ist auch zu bedenken, dass die eine Referenzbohrung nur lokale

Werte ergibt und über Permeabilitäten ausserhalb der Bohrung kaum etwas aussagt. Im erweiterten Bereich des gesamten Endlagers sind deshalb grössere Wasserflüsse durchaus möglich. Die Gesamtheit der bisherigen Sondierbohrungen hat gezeigt, dass im Kristallin grössere Bereiche mit der angenommenen geringen Durchlässigkeit nur beschränkt auftreten. Dies könnte entweder eine einschneidende Bedingung bei der Standortsuche geben, oder aber dazu zwingen, die Sicherheitsanalyse mit höherem Wasserfluss durchzuführen.

Die hydrogeologischen Verhältnisse eines Endlagerbereichs und seiner weiteren Umgebung zu erfassen, ist ein ausserordentlich komplexes Unterfangen. Die Arbeiten sind vielgestaltig und aufwendig: Die hydraulischen Daten sind über ein weites Gebiet zu erheben und auszuwerten, die hydrogeologischen Modelle sind mit den Daten zu überprüfen und neuen Erkenntnissen anzupassen, die greifbaren Hinweise über die chemische Zusammensetzung und die Isotopenverhältnisse der verschiedenen Wassertypen sind zu verwerten, die geothermische Anomalie des unteren Aaretals und die bekannten Austrittszonen von Thermalwässern sind zu erklären. Von einem Verständnis der hydrogeologischen Situation kann man erst sprechen, wenn sich die vielen Einzelergebnisse zu einem plausiblen Gesamtbild fügen. Die Aufgabe ist multidisziplinär und braucht viel Zeit, aber von allen Arbeiten, welche die Grundlagen für die Sicherheitsbeurteilung eines Endlagers erbringen, ist sie eine der wichtigsten - und auch eine der anspruchsvollsten. Die bisherigen Untersuchungen der Nagra bilden eine breite Basis, auf der sich weiterarbeiten lässt. Von hoher Priorität ist eine umfassende hydrogeologische Synthese der Region, die dann durch weitere Datenerhebungen gezielt erhärtet und verfeinert werden kann.

## 5.6 Systematik der Sicherheitsbeurteilung

Die radioaktiven Abfälle, die Lagerbauten und die geologische und hydrogeologische Umgebung, die alle in den vorangegangenen Kapiteln beurteilt worden sind, definieren das Endlagersystem in seinen Hauptbestandteilen. Bei der Sicherheitsbeurteilung geht es darum, das zeitliche Verhalten des Systems unter der Einwirkung aller realistischerweise anzunehmenden Vorgänge und Ereignisse zu untersuchen, die Prozesse zu ermitteln, welche Radionuklide aus den Abfällen in die Biosphäre zurückführen können, und daraus die Konsequenzen in Form möglicher Strahlendosen zu berechnen. Üblicherweise definiert man zuerst ein Basisszenario, das die mutmassliche ungestörte Entwicklung des Systems beschreibt, und berechnet in diesem Rahmen den sogenannten Basisfall. Anschliessend betrachtet man andere, weniger wahrscheinliche Szenarien, die als Störfälle ein mehr oder weniger stark abweichendes Systemverhalten bewirken. Dabei wird mit Vorteil der Basisfall durch Variation seiner bestimmenden Merkmale so breit festgelegt, dass er bereits eine Reihe von Störfällen abdeckt. Da der Basisfall mit seinen Variationen die Grundlage bildet, auf der man erst die Störfälle behandeln kann, nimmt er in der Regel, so auch im Projekt Gewähr, den Hauptteil der Sicherheitsanalyse ein. Die nächsten sieben Kapitel sind deshalb dem Basis-szenario gewidmet, und erst Kapitel 5.14 geht auf die Störfälle ein.

Der wichtigste, wenn nicht der einzige Mechanismus, der Radionuklide aus einem Endlager in die Biosphäre zurückführen kann, ist der Transport durch fliessendes Tiefenwasser. Dementsprechend ist auch das Basisszenario definiert. Die komplizierte Abfolge verschiedener Vorgänge kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden. Tiefenwasser aus der Lagerumgebung findet nach dem Versagen der Behälter Zutritt zu den verglasten Abfällen, korrodiert allmählich die Glasmatrix, löst die Radionuklide und transportiert sie langsam aus dem verfüllten Endlager durch das Wirtgestein und weitere geologische Schichten bis in die Wasservorkommen des menschlichen Lebensraums. Das Endlagersystem ist darauf ausgelegt, diesen Ablauf durch eine Anzahl von Sicherheitsbarrieren oder Sicherheitselementen zu verhindern und zu verzögern oder ganz allgemein im für die Sicherheit positiven Sinne zu beeinflussen. Die HSK konzentrierte ihre Beurteilung auf fünf Sicher-

heitselemente, die nach ihrer Ansicht in grösserem Ausmass als andere (wie etwa die Glasmatrix) zur Sicherheit des vorgelegten C-Lager-Projekts beitragen. Sie sind im folgenden aufgezählt und kurz charakterisiert; in Klammern steht das Kapitel, in dem sie ausführlicher besprochen werden.

- Endlagerbehälter (5.7): Er soll während 1000 Jahren die Abfälle vollständig vom Tiefenwasser isolieren. Nach dieser Zeit ist der Grossteil der Spaltprodukte zerfallen, und die Wärmeleistung ist auf einen unbedeutenden Wert abgesunken.
- Bentonitverfüllung (5.8): Neben anderen Aufgaben sorgt die Bentonitverfüllung der Lagerstollen dafür, dass die Radionuklide nur durch Diffusion, nicht aber durch konvektiven Wassertransport aus dem Endlager freigesetzt werden. Während dieses langsameren Vorgangs zerfallen jene Transurane, die Halbwertszeiten bis zu einigen 10'000 Jahren haben. Langfristig soll der Bentonit auch die allenfalls gebildeten Kolloide zurückhalten.
- Löslichkeitslimiten (5.9): Viele Nuklide sind im Tiefenwasser nur beschränkt löslich; für diese kann daher die Konzentration im Wasser nach Durchströmung des Lagers geringer sein als von der Korrosionsrate des Abfallglases her zu erwarten wäre. Diese Löslichkeitsbegrenzung ist beispielsweise wirksam für das wichtige Element Neptunium.
- Migrationsbarriere (5.10): Verschiedene Rückhalte-mechanismen verzögern die Wanderung der Radionuklide durch das Wirtgestein. Die Wirksamkeit dieser Barriere hängt ausserordentlich stark von den Annahmen über die Fliesswege ab. Im Basisfall der Nagra ist sie für die sehr langlebigen Nuklide die wirkungsvollste aller Barrieren.
- Verdünnung (5.11): Nach dem Austritt aus dem Wirtgestein vermischt sich das kontaminierte Wasser mit Wasser aus den weiteren geologischen Schichten und der Biosphäre, wodurch die Nuklidkonzentration erheblich herabgesetzt wird.

Nach einem kurzen Kapitel über die Vorgänge in der Biosphäre (5.12) wird schliesslich in Kapitel 5.13 die eigentliche Sicherheitsanalyse diskutiert. Dabei wird das, was man über das Verhalten der einzelnen Barrieren kennt, zu einem Gesamtbild zusammengesetzt, und die Globalanalyse des gesamten Endlagersystems muss dann zeigen, ob die geforderte Sicherheit erreicht ist, wobei für die anschliessend zu behandelnden Störfälle noch eine ausreichende Sicherheitsmarge vorhanden sein sollte.

### 5.7 Endlagerbehälter

Die Nagra sieht im Projekt Gewähr vor, die verglasten hochaktiven Abfälle vor der Einlagerung in einen dickwandigen Endlagerbehälter zu verpacken, der während einer anfänglichen Phase der Endlagerung den vollständigen Einschluss der Abfälle sicherstellen soll. Die hochaktiven Abfälle entwickeln in dieser Zeit eine nicht zu vernachlässigende Zerfallswärme, die beispielsweise 100 Jahre nach der Entladung aus dem Reaktor noch eine Leistung von über 100 W pro Glasblock erbringt. Während dieser thermischen Phase, die einige hundert Jahre dauert, soll der Endlagerbehälter verhindern, dass Tiefenwasser zu den Abfällen dringt. Nach dieser Zeit sind die meisten Spaltprodukte weitgehend zerfallen, und die Gesamtaktivität ist auf etwa einen Hundertstel ihres Anfangswerts gesunken. Der Endlagerbehälter stellt somit eine zu Beginn der Endlagerung sehr wirksame Sicherheitsbarriere dar. Im weiteren schützt er beim Einlagern vermöge seiner Abschirmfunktion das Betriebspersonal vor zu starker Strahlung.

Die Nagra wählte als Referenzbehälter für das Projekt Gewähr einen massiven, freitragenden Behälter aus Stahlguss GS 40. Die Wandstärke beträgt 250 mm; diese Zahl setzt sich zusammen aus 200 mm für die mechanische Festigkeit und 50 mm Korrosionszuschlag. Der Deckel wird aufgeschraubt und mit dem Grundkörper verschweisst; der Deckelbereich ist so gestaltet, dass die Schweissnaht, die nur eine Dichtungsfunktion hat, von der tragenden Schale

entfernt zu liegen kommt. Für die Auslegung setzte sich die Nagra das Ziel, dass der Endlagerbehälter für lange Zeit, mindestens aber für 1000 Jahre, standfest und dicht sein soll. Entsprechend rechnete sie in der Sicherheitsanalyse mit einer minimalen Zeit von 1000 Jahren, während der die Abfälle vollständig isoliert sind. Die HSK hat zu beurteilen, wieweit diese minimale Isolationszeit in der Sicherheitsanalyse beansprucht werden darf; für die Beurteilung bediente sie sich der Mithilfe eines Experten für Korrosionsfragen (M.O. Speidel).

Es gibt wohl kein Behältermaterial, das allen Anforderungen zugleich gerecht wird. Ein Stahlbehälter, wie ihn die Nagra wählte, ist grundsätzlich nicht korrosionsbeständig und erlaubt damit keine gleich langen Einschlusszeiten wie beispielsweise der Kupferbehälter des schwedischen Endlagerprojekts KBS-3 [6]. Umgekehrt hat Stahl für einen freitragenden Behälter Vorteile, weil seine mechanische Festigkeit wesentlich besser ist als die von Kupfer. Das Behälterkonzept der Nagra strebt nicht extrem lange Einschlusszeiten an, sondern einen Behälter, der einen genügend langen Einschluss verbürgt, im übrigen aber möglichst einfach konstruiert und mit bewährten Methoden heutiger Technik herstellbar ist. Das Korrosionsverhalten des Behältermaterials hat auch einen positiven Effekt, weil Eisen als Verbraucher von oxydierenden Stoffen für ein chemisch reduzierendes Milieu sorgt, was sich für die Sicherheit der Endlagerung insgesamt günstig auswirkt. In diesem Sinne hält die HSK die Wahl von Stahlguss als Behältermaterial für vertretbar, ohne damit abschliessend die Vor- und Nachteile einzelner Materialien gegeneinander abwägen zu wollen.

Der Endlagerbehälter ist so ausgelegt, dass er auch unter der maximalen mechanischen Belastung stabil bleibt, die sich aus dem hydrostatischen Druck der Wassersäule über dem Endlager und dem Quelldruck des Bentonits ergibt. Mit den in der heutigen Technik üblichen Rechenmethoden wies die Nagra nach, dass der Behälter unter den gemachten Voraussetzungen während mindestens 1000 Jahren bei den erhöhten Temperaturen der thermischen Phase die erforderliche Beulsteifigkeit hat und auch gegen Kriechbruch standhält. Die verwendeten Nachweismethoden erscheinen zweckmässig.

Der wichtigste Vorgang, der die Dichtigkeit des Endlagerbehälters gefährden könnte, ist die Korrosion des Behältermaterials. Die Nagra kommt aufgrund experimenteller und theoretischer Untersuchungen zum Schluss, dass die Gefahr des Leckwerdens für die ersten 1000 Jahre mit einem Korrosionszuschlag von 50 mm genügend abgedeckt ist. Die HSK teilt diese Aussage für die meisten in Frage kommenden Korrosionsmechanismen. Für die allgemeine, abtragende Korrosion, die sich aus Wasser-, Sauerstoff- und Sulfidkorrosion zusammensetzt, beträgt der Korrosionsabtrag unter Endlagerbedingungen in 1000 Jahren nur rund die Hälfte des Zuschlags. Auch lokale Korrosion und Lochfrass dürften nicht in erheblichem Ausmass auftreten, was allerdings noch durch Langzeitversuche zu bestätigen sein wird. Die HSK teilt auch die Auffassung, dass die ionisierende Strahlung der Abfälle nur einen unmassgeblichen Einfluss auf die Integrität des Behälters hat.

Eine Korrosionsart, welche die HSK hingegen anders beurteilt als die Nagra, ist die Spannungsrisskorrosion. Darunter versteht man die Bildung und das Wachstum von Rissen unter der gleichzeitigen Einwirkung einer korrosiven Umgebung und einer Zugspannung. Die Nagra begegnete diesem Problem durch die Wahl eines Behältermaterials, das sie als unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion einstuft. Ferner nimmt sie vor allem auf der Basis von schwedischen Versuchen an, dass sich durch die allseitige Wassersättigung des Bentonits ein isostatischer Aussendruck aufbaut, der bei der gewählten Behälterform keine wesentlichen Zugspannungskomponenten erzeugt. Nach Ansicht der HSK ist diese Argumentation heute noch nicht genügend gesichert. Neuere Forschungen haben ergeben, dass auch ein Stahl vom vorgeschlagenen Typ in heissem Wasser, wie es im Endlager erwartet wird, gegen Spannungsrisskorrosion anfällig sein kann. Damit wächst die Bedeutung allfälliger Eigenspannungen aus der Fabrikation, insbesondere aber aus dem Schweissen der Deckelnaht. Ferner können auch Zugspannungen entstehen, falls sich der Bentonit nicht allseitig und gleichmässig mit Wasser sättigt; die sonst konservative Annahme einer von Beginn an vollständigen Sättigung des Bentonits ist für die Abschätzung der Zugspannungen und damit der Spannungsrisskorrosion für einmal nicht konservativ. Die HSK hält deshalb weitere Untersuchungen zum Nachweis genügender Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion für erforderlich. Sie erwartet, dass es bei verbesserter

Kenntnis des Werkstoffverhaltens und der chemischen und physikalischen Endlagerbedingungen möglich sein wird, eine tausendjährige Integrität und Dichtigkeit des Endlagerbehälters nachzuweisen.

Nachdem der Sicherheitsbericht für das Endlager mit einer absoluten Dichtigkeit des Behälters während 1000 Jahren rechnet, andererseits aber die Beständigkeit gegen Spannungsrissskorrosion noch nicht genügend nachgewiesen ist, besteht für die HSK hier eine Lücke. Es ist durchaus möglich, dass auch ein Endlager mit einer Anzahl undichter Behälter noch genügend sicher ist; das kann aber erst eine Rechnung zeigen, die eine frühzeitige Freisetzung von Radionukliden während der thermischen Phase berücksichtigt. Die HSK empfiehlt deshalb, in einer zusätzlichen Untersuchung den Fall eines frühzeitigen Behälterversagens durchzurechnen; dabei ist von der Annahme auszugehen, dass eine variierte Anzahl Behälter von Anfang an undicht ist. Die HSK erwartet auch, dass zu gegebener Zeit unter Berücksichtigung dieser Rechenergebnisse und verbesserter Kenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe eine vergleichende Bewertung verschiedener Behältermaterialien gemacht wird.

## 5.8 Bentonitverfüllung

Der Raum zwischen den eingelagerten Abfallbehältern und der Wand der Einlagerungsstollen wird nach dem Konzept der Nagra mit Blöcken aus hochverdichtetem Bentonit ausgefüllt. Bentonit ist ein natürliches Umwandlungsprodukt vulkanischer Gesteine und enthält einen hohen Anteil quellfähiger Tonminerale; es wird heute für verschiedene technische Anwendungen eingesetzt. Die Bentonitverfüllung, die nach der Glasmatrix und dem Behälter die dritte technische Sicherheitsbarriere ist, hat eine Reihe von Funktionen zu erfüllen. Wegen ihrer sehr geringen Durchlässigkeit soll sie dafür sorgen, dass das Tiefenwasser eher durch die Auflockerungszone um den Stollen als entlang der Abfallbehälter fließt. Damit kann der Transport von Radionu-

kliden nur durch vergleichsweise langsame Diffusion erfolgen und wird zudem wegen des guten Sorptionsvermögens des Bentonits noch weiter verzögert. Ferner soll das feinporige Verfüllmaterial als Filter wirken, der mit Nukliden beladene Kolloide zurückhält. Schliesslich soll die Verfüllung auch die Behälter vor mechanischer Beanspruchung durch allfällige Gebirgsverformungen schützen und dank ihrer Tragfähigkeit verhindern, dass die Behälter auf den Stollenboden sinken. Der Bentonit muss diese Funktionen langfristig erfüllen können. Die HSK stützt ihre Beurteilung der Bentonitbarriere unter anderem auch auf die Arbeit zweier Experten (W.S. Fyfe, B. Fritz).

Die Nagra wählte für ihr Projekt als Referenzmaterial einen Bentonit aus den USA, der unter der Bezeichnung "Volclay MX-80" bekannt ist. Die HSK hält es für sinnvoll, das Konzept der Verfüllung auf ein natürlich vorkommendes Referenzmaterial abzustützen, dessen Eigenschaften durch eine grosse Zahl von Laboruntersuchungen heute recht gut, wenn auch nicht umfassend bekannt sind. Es ist vorgesehen, den Bentonit in vorgeformten Blöcken einzubringen und so die gewünschte Dichte der Verfüllung zu erreichen. Die Dichte der vorgefabrizierten Blöcke wird durch zwei gegenläufige Bedingungen eingeschränkt: Einerseits ist für die Tragfestigkeit eine hohe Dichte erwünscht, andererseits darf sie aber nicht so hoch sein, dass der spätere Quelldruck das umliegende Gestein aufzubrechen vermag. Der von der Nagra ermittelte zulässige Dichtebereich ist schmal; er wird hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung bei der Herstellung der Blöcke stellen, zumal bei der grossen Menge des benötigten Bentonits mit Inhomogenitäten des Rohmaterials zu rechnen ist, welche die Einhaltung enger Toleranzen erschweren könnten.

Die Bentonitverfüllung leitet die Wärme, die von den Abfällen entwickelt wird, in das umliegende Gestein ab. Die Auslegung der Verfüllung und die Wahl des Abstands zwischen den einzelnen Behältern richtet sich unter anderem nach Temperaturbedingungen, welche die Maximaltemperaturen im verglasten Abfall und im Bentonit begrenzen. So sollte sich beispielsweise der grössere Teil des Bentonits nicht über 100°C erwärmen, weil er sonst seine Quellfähigkeit teilweise verlieren kann. Neben der Wärmeleistung des Abfalls ist auch die Erdwärme massgebend, die in der vorgesehenen Endlager-

tiefe bereits eine ungestörte Temperatur von 50-60°C bewirkt. Berechnungen der Wärmeausbreitung durch die Nagra ergaben in Uebereinstimmung mit Rechnungen der HSK, dass, nach der Kühlung der Abfälle in einem Zwischenlager für einige Jahrzehnte, die Temperaturbedingungen im Endlager eingehalten werden können. Der nahe dem Behälter liegende Teil des Bentonits erwärmt sich zwar während einiger Jahrzehnte auf über 100°C, doch ist die gesamte Bentonitmenge so reichlich bemessen, dass eine äussere Schale von thermisch kaum beanspruchtem Bentonit mit einer Dicke von mindestens 90 cm übrig bleibt.

Nach dem Verschluss eines Einlagerungsstollens beginnt Wasser aus dem Wirtsgestein in die Bentonitverfüllung einzudringen und sie zu sättigen. Dieser Vorgang hängt von vielen Faktoren ab und ist sehr komplex. Aufgrund des heutigen, beschränkten Wissensstandes war es der Nagra nicht möglich, ihn in allen Einzelheiten durchzurechnen; sie nahm deshalb vereinfachend an, dass der Bentonit nach wenigen Jahren gleichmässig gesättigt sei. Diese Annahme ist nach der Meinung der HSK für die meisten Zwecke konservativ. Weil aber bei ungleichmässiger Sättigung Zugspannungen im Behälter entstehen könnten (Kap. 5.7), empfiehlt die HSK, den Vorgang der Bentonitsättigung im Hinblick auf ausführungsfähige Projekte weiter zu untersuchen; ein Anfang dazu wurde mit Experimenten im schwedischen Felslabor Stripa bereits gemacht, und erste theoretische Studien liegen ebenfalls vor.

Ein weiterer Vorgang, der während und nach der Sättigungsphase ablaufen kann, ist der Gasausstoss. Um den Behälter wird sich ein Gasdruck aufbauen, der vor allem aus der Bildung von Wasserstoff bei der Eisenkorrosion entsteht und der nur durch die Verfüllung hindurch entweichen kann. Gestützt auf vorläufige Ergebnisse von Laborarbeiten nahm die Nagra an, dass sich der Gasdruck durch das Ausblasen grösserer Poren abbaut. Nach Ansicht der HSK könnte dabei aber der Fall eintreten, dass das entweichende Gas radioaktiv kontaminiertes Porenwasser verdrängt und dadurch mehr Aktivität freigesetzt wird als durch die reine Diffusion im Porenwasser. Der Gasausstoss könnte auch bevorzugte Fliesswege in Form durchgehender Kanäle öffnen. Dieser Frage ist deshalb in Zukunft mehr Aufmerksamkeit zu widmen.

Gesättigter Bentonit kann sich langfristig wie eine extrem zähe Flüssigkeit verhalten. Es stellt sich deshalb die Frage, ob der Endlagerbehälter im Laufe der Zeit absinken könnte, wodurch die Sicherheitsbarriere des Bentonits an Wirksamkeit verlöre. Aufgrund von schwedischen Untersuchungen kommt die Nagra zum Schluss, dass der Behälter selbst in einer Million Jahre nur unbedeutend absinkt. Für die HSK ist ein solcher Schluss aber noch nicht endgültig möglich, weil die Untersuchungen nicht genügend Aufschluss über das langfristige Verhalten geben. Das Fließverhalten von Bentonit wurde durch ein Kriechgesetz beschrieben, das nur ein primäres, mit der Zeit abnehmendes Kriechen annahm, wie es in vergleichsweise kurzzeitigen Versuchen von einigen Monaten Dauer erfasst werden kann. Ein sekundäres, zeitunabhängiges Kriechen kann mit solchen Versuchen nicht abgeklärt werden. Solange man aber die Deformationsrate eines allfälligen sekundären Kriechens nicht kennt, muss man mit der Möglichkeit rechnen, dass die Behälter langfristig absinken. Es empfiehlt sich deshalb, diese Frage im Hinblick auf ein ausführungsfähiges Projekt weiter zu untersuchen. Welche Auswirkungen ein Absinken der Behälter auf die Sicherheit des Endlagers hätte, ist durch eine Sicherheitsanalyse abzuklären, die davon ausgeht, dass die Behälter nach einer gewissen, zu variierenden Zeit abgesunken sind.

Die aus dem verglasten Abfall freigesetzten Radionuklide diffundieren durch die Bentonitverfüllung und gelangen so ins langsam fließende Wasser der Auflockerungszone um die Stollenwände. Die Diffusion wird für viele Nuklide durch Rückhalte-mechanismen wie Sorption an den Tonteilchen des Bentonits verzögert. Ob die Diffusion tatsächlich im freien Porenwasser stattfindet, ist heute noch nicht restlos klar, da möglicherweise das meiste Wasser im Bentonit zwischen den schichtförmig ausgebildeten Tonmineralien gebunden ist. Für einzelne Elemente wie Caesium und Strontium ist postuliert worden, dass sie entlang solcher Schichten schneller diffundieren als durch das Modell der Porendiffusion vorausgesagt. Nach Ansicht der HSK ist deshalb anzustreben, anstelle von Sorptionskonstanten direkt die allein massgeblichen sogenannten apparenten Diffusivitäten in gesättigtem Bentonit unter endlagerähnlichen Bedingungen zu messen.

Die Nagra weist darauf hin, dass die quellfähigen Bestandteile des Bentonits unter Endlagerbedingungen instabil sind und sich allmählich in weniger

quellfähige Mineralien umwandeln. Sie untersuchte besonders die als Illitisierung bezeichnete Umwandlung, deren Umwandlungsrate in erster Linie vom Kaliumangebot im Tiefenwasser bestimmt ist. Eine Rechnung zeigte, dass die Umwandlung wegen des geringen Kaliumangebots nur sehr langsam vor sich geht und dass der Bentonit die für seine Sicherheitsfunktionen wichtigen Eigenschaften über eine Million Jahre behält. Die HSK kann dieser Aussage zustimmen, sofern sie sich auf einen homogenen und gleichmässig umgewandelten Bentonit bezieht. Bei einem inhomogenen Rohmaterial oder bei lokal ungleichmässiger Kaliumzufuhr könnten aber Inhomogenitäten entstehen, welche für die Funktionstüchtigkeit der Verfüllung kritischer sind als der gemittelte Umwandlungsgrad. Ferner ist zu beachten, dass neben der Illitisierung auch andere Mineralumwandlungen und Mineralreaktionen möglich sind. Um die chemische Stabilität des Bentonits abzuschätzen, muss man auch die Wechselwirkungen zwischen Bentonit, Tiefenwasser, Abfallglas und Korrosionsprodukten untersuchen. Wenn chemische Reaktionen im Bentonit zu lokalen Verschlechterungen der Verfüllung führen, könnten sich bevorzugte Fließwege ergeben, die in der Sicherheitsanalyse zu berücksichtigen sind.

Die Bentonitverfüllung ist eine potentiell sehr wirksame Sicherheitsbarriere mit vielfältigen Funktionen. Die bisher durchgeführten, umfangreichen Untersuchungen der Nagra lassen aber noch verschiedene Fragen offen; sie müssen deshalb weitergehen und im Sinne der oben erörterten Gesichtspunkte ausgeweitet werden.

### 5.9 Löslichkeitslimiten

Die Radionuklide, die bei der allmählichen Korrosion des Abfallglases freigesetzt werden, lösen sich im Porenwasser der Bentonitverfüllung, diffundieren durch den Bentonit und gelangen schliesslich in die Wässer der Geosphäre. Einige Nuklide sind allerdings so schlecht wasserlöslich, dass nur ein Teil der freigesetzten Menge ins Wasser übertritt und der Rest in

sekundären Festphasen in der Umgebung des Endlagerbehälters zurückbleibt. Die begrenzte Löslichkeit solcher Nuklide spielt für die Sicherheitsanalyse eine bedeutende Rolle, weil sie in vielen Fällen die tatsächliche Freisetzungsrates gegenüber der Glasauflösungsrates um einige Grössenordnungen herabsetzen kann. Besonders wichtig sind im Ausbreitungsszenario der Nagra die Löslichkeitslimiten für die Elemente Neptunium, Uran, Zinn, Palladium, Technetium und Selen, die massgebliche Beiträge zur Dosis liefern können. Die Nagra verwendete in der Sicherheitsanalyse drei Datensätze für die Löslichkeitslimiten: Einen Satz von Nahfeldlimiten, der die Sicherheitsaussagen wenig beeinflusst und deshalb hier nicht mehr weiter erwähnt wird, und je einen Satz von realistischen und konservativen Limiten für das Fernfeld (den vom Lager nicht beeinflussten Teil der Geosphäre). Die Nuklidkonzentration beim Eintritt ins Fernfeld ist damit entweder durch die Rate der Glasauflösung oder durch die Löslichkeitslimite gegeben, je nachdem welcher der beiden Werte zur geringeren Konzentration führt. Nach Ansicht der HSK ist es richtig und sinnvoll, die beschränkte Löslichkeit vieler Radionuklide in die Sicherheitsrechnungen einzubeziehen. Nicht berücksichtigt hat die Nagra, dass im Wasser bereits natürlich vorkommende Elemente gelöst sein können; dieses Vorgehen ist konservativ, weil die Tiefenwässer beispielsweise natürliches Uran schon in einer Konzentration enthalten können, die nahe bei der Löslichkeitslimite liegt, und sie deshalb nur noch beschränkt Uran aus den Abfällen zu lösen vermögen.

Die Löslichkeit hängt wesentlich von den chemischen Eigenschaften des Lösungsmediums ab, weshalb die Nagra zunächst die geochemischen Randbedingungen definieren musste. Als Referenzwasser wählte sie das Formationswasser der Referenzbohrung aus der Tiefe von 1326 m und leitete seine Eigenschaften aus experimentellen Befunden unter Bezug geochemischer Rechenmodelle ab. Unter den anderen Wässern aus den Bohrungen in der Nordschweiz ist das Referenzwasser mit seinem hohen Salzgehalt zwar eher eine Ausnahme; es enthält jedoch mehr potentielle Komplexbildner, kann dadurch mehr Nuklide lösen und ist somit aus dieser Sicht konservativ. Die HSK würde es begrüßen, wenn künftige Sicherheitsanalysen auch auf einen für die Region typischen Wasserchemismus abgestützt würden. Für das Nahfeld des Endlagers sollte man in Zukunft vorsichtigerweise auch den Einfluss des Bentonits und der vorge-

sehenen Betonmengen aus dem Lagerbau abdecken. Ueberhaupt dürfte es angesichts der Streubreite der einzelnen Tiefenwässer des kristallinen Untergrunds angezeigt sein, die geochemischen Randbedingungen breiter zu variieren, um den Wertebereich möglicher Löslichkeitslimiten besser abschätzen zu können. Vermehrte Aufmerksamkeit verdienen auch jene Eigenschaften des Referenzwassers, welche die Korrosion des Endlagerbehälters zu beeinflussen vermögen.

Die Löslichkeitslimiten, welche die Nagra in die verschiedenen Sicherheitsrechnungen einsetzte, sind schwierig zu beurteilen. Die Grössenordnungen entsprechen zwar dem aktuellen Stand der Wissenschaft; experimentelle Bestimmungen unter Endlagerbedingungen gibt es aber nur wenige, und die Aussagen von chemischen Rechenmodellen sind mit teilweise grossen Ungewissheiten oder Kenntnislücken in den thermodynamischen Eingangsdaten behaftet. Die HSK kommt aus einem Vergleich mit weltweit vorhandenen Daten zum vorsichtigen Schluss, dass der realistische Datensatz der Nagra, insbesondere für die sicherheitsrelevanten Aktiniden und Technetium, plausibel ist. Der konservative Datensatz erscheint ebenfalls akzeptabel mit Ausnahme des Wertes für Neptunium, der möglicherweise nicht so konservativ ist, dass er die Ungewissheiten in den Randbedingungen abdecken könnte. Insgesamt sind im heutigen Zeitpunkt nur wenige der Aussagen über Löslichkeitslimiten gut fundiert; für die als sicherheitsrelevant erkannten Radionuklide drängt sich deshalb eine experimentelle Konsolidierung möglichst unter endlagerähnlichen Bedingungen auf.

Für die Berechnung der Nuklidfreisetzung berücksichtigte die Nagra nur echte, kolloidfreie Lösungen. Falls sich in der näheren Umgebung des Endlagerbehälters Kolloide bilden, dürften sie in der Bentonitverfüllung, die als Filter wirkt, zurückbleiben. Es ist aber auch möglich, dass sich Kolloide erst ausserhalb des Bentonits bilden, falls dort wegen chemischer Gradienten, beispielsweise des pH-Werts, die Löslichkeiten abrupt abnehmen. Die Konzentration der im Wasser enthaltenen, mobilen Radionuklide könnte unter solchen Umständen über den Löslichkeitslimiten liegen, und ihr weiterer Transport könnte schneller ablaufen. Mangels genügender Kenntnisse über Bildung, Stabilität und Transportverhalten von Kolloiden musste die Nagra

diese Frage vorerst ausklammern und als vorläufige Lücke in der Sicherheitsanalyse anerkennen. Auch für die HSK ist dies eine Frage, der in Zukunft vermehrt Aufmerksamkeit zu schenken sein wird. In denselben Zusammenhang gehört die ebenfalls von der Nagra aufgeworfene Frage, ob und wie mikrobielle Aktivitäten, die möglicherweise auch in grösserer Tiefe stattfinden, die Bildung von Kolloiden und allgemein den Nuklidtransport beeinflussen.

### 5.10 Migrationsbarriere

Unter der Bezeichnung Migrationsbarriere fasst man alle Mechanismen zusammen, welche die Migration der Radionuklide durch die Geosphäre derart beeinflussen, dass die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Nuklide kleiner wird als die Fliessgeschwindigkeit des Wassers, das die Nuklide mit sich trägt. Die langen Migrationszeiten, die durch eine solche Verzögerung entstehen, wirken sich günstig aus, weil die Nuklidaktivität wegen des radioaktiven Zerfalls abnimmt; Nuklide, deren Halbwertszeiten kürzer sind als die Migrationszeiten, können so auf unbedeutende Werte zerfallen, bevor sie in die Biosphäre gelangen. Im Projekt Gewähr besteht die Migrationsbarriere aus zwei Mechanismen: Matrixdiffusion und Sorption; nach den Modellannahmen der Nagra ist sie für langlebige Nuklide die wirksamste aller Sicherheitsbarrieren.

#### 5.10.1 Matrixdiffusion

Wenn die Gesteinsmatrix, die einen wasserführenden Hohlraum umgibt, porös ist und die Poren mit dem Hohlraum verbunden sind, können gelöste Stoffe aus dem fliessenden Wasser des Hohlraums in das stagnierende Wasser der Poren hinein diffundieren. Dieser Vorgang, den man als Matrixdiffusion bezeichnet, ist im Zusammenhang mit Endlagerprojekten erst seit wenigen Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen und wurde erstmals im schwe-

dischen Endlagerprojekt KBS-3 [6] für die Sicherheitsanalyse in grösserem Umfang beansprucht. Wenn die Matrixdiffusion funktioniert, ist sie für geklüftete Wirtgesteine potentiell eine der wichtigsten Sicherheitsbarrieren. Im Kakiritfliessmodell nimmt die Nagra an, dass das Wasser in röhrenartigen mit Quarz belegten Hohlräumen fliesst, die sich in 1 m dicken Kakiritzonen befinden, und dass die Radionuklide bis zu 50 cm tief in den porösen Kakirit hinein diffundieren. Die Matrixdiffusion ist auf die Kakiritzone beschränkt; Diffusion in den intakten Granit wird nicht beansprucht. Im Ganggesteinmodell nimmt die Nagra an, dass die Radionuklide lediglich 1 mm in das anliegende, umgewandelte Gestein hinein diffundieren.

Zur Matrixdiffusion im Kakirit verbleiben für die HSK noch einige offene Fragen. Der Quarzbelag der Fliessadern unterbindet die Diffusion dort, wo er dicht ist; ob dies das Ausmass der Matrixdiffusion insgesamt vermindert, hängt davon ab, ob die Poren hinter dem Quarzbelag unter sich vernetzt sind oder nicht. Die wenigen Hinweise aus dem Wasserchemismus der Quarzadern, welche nach Ansicht der Nagra die Matrixdiffusion belegen, sind nicht schlüssig. Ferner ist die Vermaschung der Poren im Kakirit noch zu wenig bekannt, als dass man bereits schliessen könnte, dass sich die Eindringtiefe der Matrixdiffusion über die ganze Mächtigkeit der Kakiritzone erstreckt. Im übrigen liegt die Dicke der Kakiritzonen der Referenzbohrung mehrheitlich im Dezimeterbereich, und 1 m mächtige Zonen sind eher die Ausnahme.

Die Matrixdiffusion ist ein interessanter, physikalisch einleuchtender Mechanismus, und es lohnt sich, sie für die in Frage kommenden Wasserfliesswege weiter zu untersuchen. Feldexperimente und Untersuchungen von Naturanalogia müssen zeigen, ob Matrixdiffusion auftritt, wie weit sie verbreitet ist und wo die Voraussetzungen dafür gegeben sind. Vorderhand ist sie noch zu wenig belegt, und Sicherheitsaussagen, für die sie verwendet wurden, bleiben einstweilen ungewiss.

### 5.10.2 Sorption

Wenn im Wasser gelöste Radionuklide mit den Wänden der Klüfte oder Poren in Berührung kommen, werden sie dort durch verschiedene Prozesse wie physikalische Adsorption, Ionenaustausch etc. festgehalten. Die Sorptions- oder Verteilungskoeffizienten beziffern das Verhältnis der Nuklidmenge, die am Gestein sorbiert ist, zur Menge, die im Wasser gelöst ist; sie hängen vom Nuklid, vom Gestein und von mehreren anderen Parametern ab. Je nach Nuklid und Gestein wird deshalb die Sorption die Nuklide mehr oder weniger wirksam zurückhalten und ihre mittlere Wanderungsgeschwindigkeit verzögern; man spricht deshalb auch von Retention. Weil die Sorption von der spezifischen Oberfläche abhängt, mit der die Nuklide in Berührung kommen, ist sie in porösen Gesteinen im allgemeinen wirksamer als in geklüfteten, doch kann sie auch in diesen eine sehr starke Retention verursachen, wenn sie mit der Matrixdiffusion in einen Porenraum kombiniert ist.

Das Sorptionsvermögen hängt vom spezifischen Gestein und seinen Mineralbestandteilen ab; ferner kann es auch von der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers, das mit dem Gestein in Wechselwirkung steht, beeinflusst sein. Oft spielt auch ein untergeordneter Mineralbestandteil eine bedeutende Rolle für die Sorption einzelner Nuklide. Im Falle von Klüftströmungen ist die Zusammensetzung der Klüftbeläge von ausschlaggebender Bedeutung. Diese spezifischen Abhängigkeiten sind mit ein Grund für die enorme Streuung der publizierten Sorptionswerte. Für standortbezogene Sicherheitsanalysen sind deshalb wenn immer möglich Sorptionswerte zu verwenden, die am tatsächlich vorliegenden Gestein bestimmt worden sind.

Die Sorption wird vielfach in den Sicherheitsanalysen von Endlagern als Migrationsbarriere berücksichtigt. Man anerkennt indessen auch, dass das verwendete Sorptionsmodell von zwei Schwierigkeiten gekennzeichnet ist. Zunächst ist es eine starke - vielleicht zu starke - Vereinfachung der Wirklichkeit, wenn man die verschiedenen Sorptionsprozesse, die im einzelnen noch nicht verstanden sind, mit einer einzigen Grösse, dem Sorptionskoeffizienten, beschreibt. Wie weit ein solch einfaches Modell die natürlichen Sorptionsvorgänge wiederzugeben vermag, ist noch wenig untersucht. Die

zweite Schwierigkeit bezieht sich auf die experimentelle Bestimmung der Koeffizienten. Sie werden im Labor gemessen mit meistens fein zermahlenem Gestein, viel Flüssigkeit und relativ hohen Konzentrationen. In der Natur hat man stattdessen ein geklüftetes Gestein mit Kluftbelägen und komplexer Porenstruktur, wenig Flüssigkeit und im allgemeinen niedrige Konzentrationen. Die grosse Zahl gemessener Sorptionskoeffizienten ist nur beschränkt verwertbar, solange ungewiss bleibt, ob und wie sich die Randbedingungen des Laborexperiments in die Wirklichkeit übertragen lassen.

In den Sicherheitsanalysen zum Projekt Gewähr verwendete die Nagra einen sogenannten realistischen und einen konservativen Satz von Sorptionskoeffizienten für geklüftete granitische Gesteine; die Werte wählte sie aus der umfangreichen Literatur publizierter Daten [NTB 84-40]. Sie rechnete mit einem einfachen Sorptionsmodell, weil jeder Versuch einer komplexeren Modellierung die Ungewissheiten nur vergrössert hätte. Dieses Vorgehen ist vertretbar, weil heute weltweit nichts Besseres existiert. In Zukunft wird es aber unabdingbar sein, den ganzen Fragenkomplex der Sorption weiter zu untersuchen und die wesentlichen Einflussgrössen am spezifischen Gestein zu bestimmen und direkt im Feldexperiment zu überprüfen. Das Bedürfnis, von den laborbehafteten Vorstellungen der Sorption loszukommen, ist heute erfreulicherweise vielerorts vorhanden. In diesem Sinne unterstützt die HSK die Pläne der Nagra, mit eigenen Migrationsexperimenten ein besseres Verständnis der Sorption zu erlangen.

Bisher wurden noch keine Sorptionskoeffizienten an Ganggesteinen aus den Sondierbohrungen der Nordschweiz gemessen. Da Ganggesteine im Gegensatz zu Granit aufgrund ihrer unterschiedlichen mineralogischen Zusammensetzung wenig bis gar nicht vertont sind, ist in ihnen tendenziell eine schlechtere Sorption zu erwarten. Angesichts der Ungewissheiten, mit der die Beschreibung der Sorption noch behaftet ist, hält es die HSK für vorsichtiger, in ihrem Ganggesteinmodell einstweilen den Datensatz mit der geringeren Sorption zu verwenden.

### 5.11 Verdünnung

Mit der Endlagerung will man zunächst einmal die radioaktiven Abfälle an einem Ort einschliessen, der weit weg vom menschlichen Lebensbereich liegt. Der Einschluss ist aber naturgemäss nie absolut, und früher oder später durchbrechen die noch verbleibenden Radionuklide die Isolationsbarrieren, breiten sich in den umliegenden geologischen Formationen aus und können schliesslich in die Biosphäre gelangen. Beim Uebertritt in Bereiche mit grösserer Wasserführung werden sie verdünnt. Die Verdünnung verändert zwar die Freisetzungsrates der Radionuklide nicht, aber sie vermindert ihre Konzentration in der Biosphäre und damit direkt auch die potentiellen Strahlendosen. Die Verdünnung ist damit ein wichtiges Sicherheitselement, und sie wird umso wichtiger, je geringer die Wirksamkeit der Migrationsbarriere eingestuft wird.

Nach den Projektannahmen der Nagra findet auf dem Migrationsweg der Radionuklide zweimal eine Verdünnung statt: Beim Uebertritt aus dem Wirtgestein in das obere Kristallin und beim Eintritt in die oberflächennahen Grundwasservorkommen. Aus dem Verhältnis der Wasserdurchlässigkeiten, die in den beiden Kristallinabschnitten der Referenzbohrung gemessen wurden, ergibt sich für den ersten Uebertritt ein Verdünnungsfaktor von etwa  $2 \cdot 10^4$ . Da man jedoch die Wasserfliesswege noch nicht genügend kennt, lässt sich dieser Verdünnungsfaktor vorerst nicht beurteilen. Das spielt indessen für die weitere Beurteilung keine grosse Rolle, weil am Ende nur die gesamte Verdünnungswassermenge im Vergleich zum angenommenen Wasserstrom durch das Endlager von  $4.2 \text{ m}^3/\text{a}$  von Bedeutung ist.

Zur Erfassung der biosphärischen Verdünnung unterscheidet die Nagra drei Fälle. Im Basisfall fliesst das Wasser aus dem Kristallin mehr oder weniger direkt in die Schottergrundwässer, für welche die Nagra mit der Verdünnungswassermenge der Rheintalschotter von etwa  $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  rechnet. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass sich das Tiefenwasser völlig mit dem gesamten Grundwasserstrom durchmischt, was der HSK wegen der diskreten Wasserfliesswege des Kristallins und der Ausdehnung des Grundwasserstroms eher unwahrscheinlich scheint. Sie rechnet deshalb nur mit einer wirksamen Ver-

dünnungswassermenge von  $10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ . Die als Variante untersuchte direkte Entwässerung in den Rhein führt zu einer um mehrere Zehnerpotenzen grösseren Verdünnung. Die geringste Verdünnung ergibt sich für den Fall, dass der kontaminierte Wasserstrom zu einer tiefen Wasserfassung im oberen Kristallin oder in den Sedimenten fliesst; sie ist dann gegeben durch die Ergiebigkeit des Brunnens und ist etwa zwanzigmal kleiner als im Basisfall. Die HSK hält eine solche Wasserfassung für durchaus möglich, weshalb sie neben dem Grundwasserszenario auch dieses Brunnenszenario als weiteren Basisfall für die Sicherheitsanalyse betrachtet. Für ihre eigenen Berechnungen nimmt sie eine Brunnenergiebigkeit von 400 l/min an; bezogen auf den jährlichen Wasserstrom durch das Endlager von  $4.2 \text{ m}^3$  ergibt sich daraus ein totaler Verdünnungsfaktor von  $5 \cdot 10^4$ , während die Nagra mit  $7 \cdot 10^4$  rechnet. Man könnte hier einwenden, dass auch Brunnen mit geringerer Ergiebigkeit denkbar wären; das ist richtig, doch wäre es dann nicht mehr realistisch anzunehmen, das gesamte durch das Endlager fliessende Wasser gelange in den einen Brunnen.

Im Kristallin als geklüftetem Gestein können diskrete Wasserwege auftreten, die man heute noch schlecht kennt, und die das Schichtmodell der Nagra nicht zu erfassen vermag. Im Hinblick auf ein späteres Ausführungsprojekt hält die HSK deshalb fest, dass der Verdünnungsfaktor selbstverständlich neu bestimmt werden muss, sobald einmal die tatsächlichen Wasserwege aus dem Endlager in die Biosphäre besser bekannt sind.

### 5.12 Biosphärentransport

Wenn die Radionuklide einmal in die Biosphäre eingetreten sind, können sie über die verschiedensten Wege zum Menschen gelangen. Der einfachste Weg führt über das Trinken von kontaminiertem Wasser, und es zeigt sich, dass dies in der Regel auch der Weg ist, der die höchsten Dosen verursacht. Daneben gibt es weitere Belastungspfade über komplizierte Nahrungsketten. In umfangreichen Rechnungen verfolgte die Nagra den Transport der Radionu-

klide durch die einzelnen Nahrungsketten und berechnete daraus die zu erwartenden Individualdosen. Nach Ansicht der HSK wurde die Modellierung des Biosphärentransports sorgfältig und in genügender Tiefe durchgeführt. Die verwendeten Eingangsdaten von den Transferfaktoren über die Konsumraten bis zu den Dosisfaktoren entsprechen dem Stand der Wissenschaft; sie beziehen sich im wesentlichen auf die heutigen biosphärischen Verhältnisse. Die noch verbleibende Ungewissheit in der Datenbasis ist nicht derart, dass sie die Schlussresultate in ausschlaggebender Weise zu beeinflussen vermöchte.

### 5.13 Sicherheitsanalyse

#### 5.13.1 Vorgehen

Um die Sicherheitsanalyse übersichtlich zu strukturieren, unterteilte die Nagra den Weg der Radionuklide von den gelagerten Abfällen zum Menschen in drei Abschnitte: Die Freisetzung aus dem Endlager, die Ausbreitung im Wirtgestein und den Transport in der Biosphäre. Für jeden Abschnitt erarbeitete sie ein Modell und das dazugehörige Rechenprogramm. Verschiedene Nebenmodelle dienten dazu, die Randbedingungen und Eingangsdaten der Hauptmodelle zu bestimmen. Eine derartige gedankliche Aufgliederung der Vorgänge mit vorsichtiger Behandlung der Nahtstellen entspricht der heutigen Praxis bei Sicherheitsanalysen für Endlager und macht das komplexe Gesamtsystem überhaupt erst überschaubar.

Im Rahmen der mutmasslichen ungestörten Entwicklung des Endlagersystems definierte die Nagra einen Basisfall, für den sie die Parameter vorsichtig realistisch festlegte. Als Ergänzung berechnete sie eine Reihe von Varianten, welche den Basisfall in die konservative Richtung erweitern. Sie bestehen in der Regel darin, dass ungünstigere Parameterwerte verwendet werden; gelegentlich sind auch die Modelle selbst geändert worden. Ein solches Vorgehen eignet sich gut dazu, die Sicherheit eines Endlagerprojekts auch dann zu beurteilen, wenn in den Eingangsdaten noch Ungewissheiten bestehen.

Im Rahmen der gleichen Aufgliederung der Vorgänge verwendete die HSK für die Freisetzung aus dem Endlager und die Ausbreitung im Wirtgestein eigene Rechenprogramme, um damit die von der Nagra präsentierten Ergebnisse rechnerisch unabhängig überprüfen zu können. Ferner machte sie auch Parametervariationen, die teilweise über die Varianten der Nagra hinausgehen, weil sie so den Einfluss der wichtigsten Annahmen besser beurteilen konnte. Im Falle der geosphärischen Ausbreitung verwendete sie zudem ein anderes Basismodell als die Nagra in den Projektberichten. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den folgenden Abschnitten berücksichtigt.

#### 5.13.2 Freisetzung aus dem Endlager

Die Freisetzung beginnt nach dem Versagen des Behälters mit der allmählichen Auflösung des Abfallglases, wofür die Nagra eine totale Auflösungszeit von etwa 150'000 Jahren errechnete. Dieses Ergebnis ist plausibel und umso eher annehmbar, als mit der angenommenen Auflösungsrate die Glasmatrix verglichen mit anderen Barrieren nicht von höchster Bedeutung ist.

In einem Nebenmodell berechnete die Nagra die Diffusion der Radionuklide durch die Bentonitverfüllung und ermittelte jene kurz- bis mittellebigen Nuklide, welche bereits in der Verfüllung zerfallen. Das gestattete ihr, die weiteren Rechnungen zu vereinfachen, weil sie einen Teil der Nuklide nicht mehr berücksichtigen musste. Zusätzlich klammerte sie einige weitere Nuklide mit Argumenten aus, die zeigen, dass ihre Beiträge zur Dosis neben denen anderer vernachlässigbar sind. So verbleiben schliesslich nur noch die drei Zerfallsketten von Np-237, U-238, U-235, die fünf Spaltprodukte Se-79, Tc-99, Pd-107, Sn-126, Cs-135 und das Aktivierungsprodukt Ni-59, welches allerdings für die Dosis irrelevant ist. Die HSK stimmt mit der Nagra überein, dass damit alle Nuklide erfasst sind, die massgeblich zur Dosis beitragen können. Selbst wenn die Verfüllung die erwähnten kurz- bis mittellebigen Nuklide nur ungenügend zurückhielte, zerfielen diese auf dem anschliessenden Weg durch die Geosphäre.

Die Freisetzungsrates der noch verbleibenden Nuklide bestimmte die Nagra nach einem stark vereinfachten Modell, indem sie annahm, dass sich je nach Löslichkeit der einzelnen Nuklide entweder die gesamte bei der Glasauflösung frei werdende Menge im Wasserstrom durch das Endlager auflöst oder dass sich die Konzentration auf den Maximalwert einstellt, den die Löslichkeitslimite zulässt. Neben den realistischen Löslichkeitslimiten verwendete sie als Variation auch einen konservativen Datensatz, dagegen wurde der Wasserstrom durch das Endlager von  $4.2 \text{ m}^3$  pro Jahr als festgehaltene Grösse des standortbezogenen Modelldatensatzes betrachtet. Zwar könnte der Wasserstrom auch höher sein, weil die geringen Durchlässigkeiten der Referenzbohrung schwierig zu messen und zudem nicht für den ganzen Endlagerbereich repräsentativ sind; andererseits ist aber vereinfachend und konservativ angenommen, dass sich der gesamte Wasserstrom mit Nukliden beladen kann, während in Wirklichkeit nur ein Teil des Wassers durch das Nahfeld der Endlagerstollen fliesst. Der angenommene Wert ist deshalb für eine erste Abschätzung vertretbar, stellt aber ein strenges Kriterium für die Standort-suche dar. Die HSK rechnet deshalb in einer Variante auch mit einem grösseren Wasserstrom.

Die Verzögerung der Freisetzung während der Diffusion durch die Bentonitverfüllung wurde für die Sicherheitsrechnung nicht beansprucht. Die Nachrechnungen der HSK bestätigten, dass das vereinfachte Modell zusammen mit der Auswahl der wesentlichen Nuklide eine vernünftige Abschätzung der Freisetzungsrates liefert, die eher auf der konservativen Seite liegt. Vorausgesetzt ist dabei allerdings, dass der Endlagerbehälter tausend Jahre dicht bleibt und dass die Bentonitbarriere wirklich die angenommene langfristige Stabilität hat; ferner bleibt, wie bereits in 5.9 erwähnt, die Frage vorerst offen, ob sich allenfalls ausserhalb des Bentonits Kolloide bilden könnten, die dann nicht mehr den Löslichkeitslimiten unterworfen wären und somit die Freisetzungsrates erhöhten.

### 5.13.3 Ausbreitung im Wirtgestein

Die Schutzwirkung der Migrationsbarriere hängt stark von den Fließwegen im Wirtgestein ab, für die aufgrund der noch lückenhaften hydrogeologischen Kenntnisse mehrere Modelle denkbar sind. Die Nagra beschränkte sich im Gewährsbericht im wesentlichen auf das Kakiritfließmodell (5.5.2). Darin sorgt die Matrixdiffusion zusammen mit der Sorption für eine ausgeprägte Rückhaltung der Nuklide und verleiht dem Wirtgestein eine enorme Barrierenwirkung; für viele der wichtigen Nuklide, so beispielsweise für Np-237, stellt sie sogar die mächtigste aller Sicherheitsbarrieren überhaupt dar. Ob ein Teil des Transportwegs in anderen, weniger sicherheitswirksamen Fließsystemen liegt, ist nach Ansicht der Nagra unerheblich, solange die Nuklide in jeder Entwässerungsvariante mindestens 500 m im Kakiritsystem zurücklegen müssen. In mehreren Variationen untersuchte die Nagra den Einfluss der wichtigen Ausbreitungsparameter wie Diffusionskoeffizient, Eindringtiefe und Sorptionskonstanten; dabei ergaben sich teilweise wesentlich höhere Nuklidflüsse aus dem Wirtgestein, die aber immer noch sehr niedrig sind.

Nach Ansicht der HSK bleibt beim Vorgehen der Nagra die Ungewissheit der Wasserfließwege zu wenig berücksichtigt. Das Kakiritfließmodell hat zwar potentiell eine so gute Sicherheitswirkung, dass daneben manche Ungewissheit in anderen Barrieren verblasst. Es ist aber durch die Befunde der Referenzbohrung nur schlecht belegt und daher bloss als ein Modell unter anderen möglichen anzusehen. Aufgrund der vorgefundenen Verhältnisse sieht die HSK eher ein Ganggesteinmodell im Vordergrund. Darin nimmt sie an, dass die Entwässerung des Wirtgesteins auf einem Fließweg von 500 m entlang geklüfteter Ganggesteine (5.5.2) erfolgt, in denen die Eindringtiefe durch Matrixdiffusion auf 1 mm beschränkt ist; für die Sorption benützte sie den Datensatz der Nagra mit schwacher Sorption (5.10.2); die Fließporosität wurde wie im Kakiritfließmodell festgelegt. Die Rechnung zeigte, dass mit diesem Ganggesteinmodell die Nuklidflüsse aus dem Wirtgestein sehr viel höher werden, und dass das Rückhaltevermögen des Wirtgesteins für das hier massgebliche Gemisch langlebiger Nuklide nur einen Schutzfaktor sechs bringt, das heisst die Konzentrationsmaxima zwischen Eintritt und Austritt

um einen Faktor sechs vermindert. Das Ganggesteinmodell der HSK mag pessimistisch erscheinen, weil es mit schwacher Sorption rechnet und weil es von der Annahme ausgeht, der Nuklidtransport finde auf der ganzen Fliesslänge im Wirtgestein nur über geklüftete Ganggesteine statt. Solange jedoch keine besseren Kenntnisse über die Fliesswege vorliegen, muss es als mögliche Entwässerungsvariante zur Berechnung der Auswirkung des Endlagers beigezogen werden, damit so zumindest das Ausmass der diesbezüglichen Ungewissheit feststeht.

Im technischen Bericht NTB 85-40 berechnete die Nagra ebenfalls die Ausbreitung von Nukliden in geklüfteten Ganggesteinen, allerdings noch ohne Angabe von Dosen. Dosisangaben für Ganggesteinmodelle erscheinen hingegen im Nachbericht [1] und in der Antwort auf Fragen der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen [8]. Das eine Modell (hier als Nagra 1 bezeichnet) rechnet mit den hohen Sorptionswerten und einer kleinen Fliessgeschwindigkeit; das andere Modell (Nagra 2) benützt dieselben Annahmen wie das HSK-Modell, und die Ergebnisse stimmen im wesentlichen überein.

Kakiritfliessmodell und Ganggesteinmodell sind in ihren sicherheitsmässigen Auswirkungen gegensätzlich extrem und dürften damit das Spektrum der Möglichkeiten praktisch etwa abdecken. Die Wahl des Fliessmodells ist in der ganzen Sicherheitsanalyse des C-Lagers diejenige Ungewissheit, welche die grössten Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Das ist ein deutlicher Hinweis, dass die Erfassung der tatsächlichen Fliesswege im zukünftigen Untersuchungsprogramm höchste Priorität beanspruchen muss.

#### 5.13.4 Strahlendosen

Die im folgenden zum Vergleich beigezogenen Dosisberechnungen der HSK nehmen für den Biosphärentransport die Verdünnungsfaktoren (5.11) des Grundwasser- und des Brunnenszenarios an. Aus der Konzentration beim Austritt aus dem Wirtgestein ergibt sich dann die Nuklidkonzentration im

Trinkwasser und daraus nach Multiplikation mit dem Wasserkonsum von 800 l pro Person und Jahr die jährliche Inkorporation der Radionuklide. Gestützt auf die überprüften Biosphärenrechnungen der Nagra wird die totale Dosis, die auch die übrigen Belastungspfade berücksichtigt, vereinfacht als das Doppelte der Trinkwasserdosis abgeschätzt. Eine direkte Entwässerung in den Rhein ergäbe Dosen, die etwa zehntausendmal geringer sind als beim Grundwasserszenario.

Die Dosen, die sich aus verschiedenen Modellen ermitteln lassen, sind in der folgenden Tabelle 5.1 zusammengestellt; Abb. 5.2 zeigt ihren zeitlichen Verlauf.

Modellannahmen			maximale Dosis [mrem/a]
Kakirit- fliess- modell	Grundwasserszenario	<u>Basisfälle:</u> - Nagra (NGB 85-05) - HSK	$6 \cdot 10^{-8}$ $1 \cdot 10^{-6}$ (1)
		<u>Basisfälle:</u> - Nagra 1 (NTB 85-40 und [1]) - Nagra 2 (NTB 85-40 und [8]) - HSK - HSK	$1 \cdot 10^{-3}$ 0,2 0,4 (2) 2 (3)
Ganggesteinmodell	Brunnenszenario	<u>Konservative Varianten (HSK):</u> - konservative Löslichkeiten - zusätzlich höherer Wasserstrom (52 m <sup>3</sup> /a)	30 (4) 340 (5)

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Dosisberechnung für das C-Lager unter verschiedenen Modellannahmen.

(Die Ziffern (1) - (5) bezeichnen die Kurven von Abb. 5.2).

Die Nuklide, welche am meisten zu den Dosen beitragen, sind beim Kakiritfliessmodell Spaltprodukte wie Cs-135 und Se-79, beim Ganggesteinmodell ist es insbesondere Th-229, ein Zerfallsprodukt von Np-237.

Die Nagra errechnete für alle Varianten des Kakiritfliessmodells Dosen, die mehrere Größenordnungen unterhalb der Schutzziellimite von 10 mrem/a liegen. Die Nachrechnungen der HSK bestätigen diese Aussage, selbst dann, wenn man über die Parametervariationen der Nagra hinaus weitere Konservativitäten annimmt, wie eine Eindringtiefe der Matrixdiffusion von 5 cm (statt 50 oder 25 cm) und einen Fliessweg von 200 m (statt 500 m). Die Unterschiede der Dosiswerte für diesen Basisfall stammen in erster Linie vom kleineren Verdünnungsfaktor, den die HSK verwendet. Das Kakiritfliessmodell ergibt somit in jedem Fall unbedenkliche Dosen.

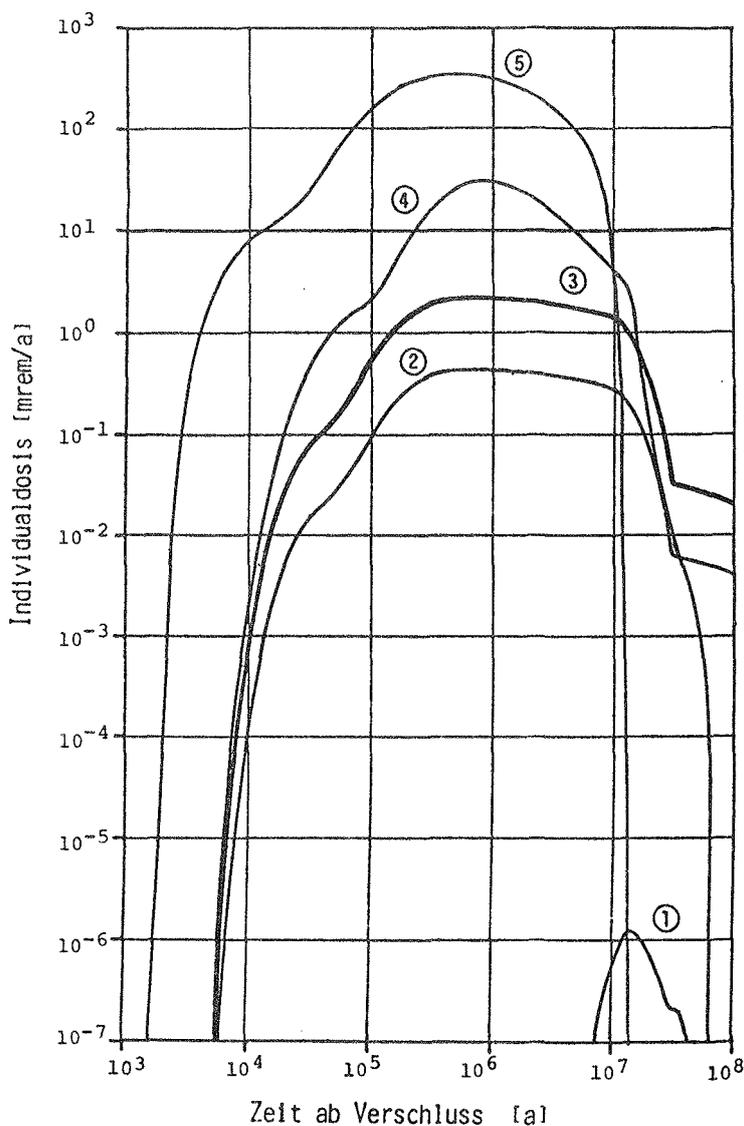


Abb. 5.2: Zeitlicher Verlauf der Dosen ① - ⑤ aus Tabelle 5.1 (Rechnung der HSK)

Im Ganggesteinmodell der HSK mit realistischer Freisetzungsrates (Kurven 2 und 3) ist die Dosislimite von 10 mrem/a ebenfalls noch eingehalten; sie würde überschritten, wenn man für die Berechnung der Freisetzung aus dem Endlager höhere Löslichkeitslimiten oder einen grösseren Wasserstrom annähme (Kurven 4 und 5). Weiter ist darauf hinzuweisen, dass sich die bisher diskutierte Sicherheitsanalyse lediglich auf die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems bezieht und noch keine Störfälle berücksichtigt. Sollen auch diese nicht zur Ueberschreitung der Dosislimite führen, müssen die hier ermittelten Dosen um einiges unterhalb der Limite liegen; im Ganggesteinmodell fehlt eine solche Sicherheitsmarge weitgehend.

Ein Blick auf Tabelle 5.1 und Abb. 5.2 zeigt deutlich, dass die errechneten Dosen enorm stark streuen. Fast das gesamte Ausmass dieser Streuung geht auf die unterschiedlichen Annahmen über die Wasserfliesswege zurück. Die mit der Streuung verbundene Unbestimmtheit der Aussagen lässt sich aber im heutigen Zeitpunkt nicht vermeiden, weil die Wasserfliesswege noch schlecht bekannt sind. Künftige Untersuchungen müssen zeigen, wo noch Konservativitäten abgebaut werden können.

#### 5.14 Störfälle

Aus einer umfangreichen Liste von Vorgängen und Ereignissen, welche das Verhalten des Endlagersystems störend beeinflussen können, bildete die Nagra drei Klassen von Störfällen und diskutierte ihre Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers. Die Abhandlung der einzelnen Störfälle ist im allgemeinen kurz gehalten, weil häufig die Konsequenzen eines Störfalls bereits durch die breite Variation des Basisfalls abgedeckt sind. Die Nagra kommt zum Schluss, dass es keine realistischerweise anzunehmenden Störfälle gibt, deren radiologische Auswirkungen den Bereich des Basisfalls und seiner Variationen übersteigen. Diesem Schluss kann sich die HSK nur beschränkt anschliessen; in vielen Fällen stimmt sie zwar den Ueberlegungen der Nagra zu, aber die Störfallanalyse hat noch Lücken, die einer vollständigen Beurteilung der Endlagersicherheit entgegenstehen.

Die erste Klasse von Störfällen umfasst die natürlichen Vorgänge und Ereignisse, die unabhängig vom Endlager ablaufen oder eintreten. Aufgrund von umfangreichen Untersuchungen der heutigen geologischen Situation versuchte die Nagra, die zukünftige geologische Entwicklung des Endlagergebiets vorherzusagen, um damit eine Grundlage für die Auswahl der Störfallszenarien zu haben. Die Ergebnisse scheinen der HSK nicht in allen Punkten schlüssig; sie regt deshalb an (siehe 5.4.6), in zukünftige Untersuchungen auch Schwarzwald und Vogesen und das System des Rheintalgrabens einzubeziehen. Ferner ist auch zu untersuchen, welchen Einfluss Vorgänge wie klimatische Veränderungen, Erosion und tektonische Bewegungen auf die möglichen Wasserfließwege vom Endlager zur Biosphäre und damit auf die Grundannahmen des Basiszenarios haben könnten. Bedingung für solche Untersuchungen ist allerdings, dass man die tatsächlichen Wasserfließwege hinreichend gut kennt, was heute noch nicht der Fall ist. Diese Untersuchungen sind deshalb später nachzuholen.

Die zweite Klasse betrifft Störfälle, die durch das Endlager selbst verursacht sind; im weiteren Sinne gehört dazu auch das Versagen oder das mangelhafte Funktionieren von Sicherheitsbarrieren. Auf einzelne derartige Störfälle, die noch vertieft zu behandeln sind, wurde bereits in früheren Kapiteln hingewiesen: Frühzeitiges Versagen des Endlagerbehälters (5.7; mangelhaftes Verhalten der Bentonitverfüllung (5.8); Bildung und Transport von Kolloiden (5.9). Es empfiehlt sich ferner, ein mögliches Versagen der Schachtversiegelung als Störfall durchzurechnen, weil sich so zuhänden zukünftiger Untersuchungen besser festlegen lässt, welche Anforderungen an die Güte der Versiegelung zu stellen sind. Schliesslich bleibt auch noch abzuklären, ob nicht durch die grosse Zahl bentonitverfüllter Stollen eine schichtförmige Schwächezone entsteht, die unter tektonischen Spannungen bevorzugt nachgeben könnte.

Die dritte Klasse enthält Störfälle, die der Mensch verursacht. Im Vordergrund stehen dabei unbeabsichtigte menschliche Eingriffe ins Endlagersystem, wie sie bei irgendwelcher Nutzung des Untergrunds auftreten können. Mit dem Brunnenszenario, das eine Wasserfassung im oberen Kristallin postuliert und das die Nagra als eine Variante des Basisfalls berechnete, sind

die meisten dieser Störfälle bereits erfasst. Das gilt jedoch nicht für tiefere Bohrungen, welche das Endlager oder das Wirtgestein in der Umgebung des Endlagers treffen. Die Nagra hält ein solches Anbohren für unrealistisch und behandelt es nicht weiter. Nach Ansicht der HSK trifft es zwar zu, dass das direkte Anbohren mit zunehmender Tiefe des Endlagers immer unwahrscheinlicher wird; angesichts der Vielfalt denkbarer Explorationsziele muss es dennoch als Störfall behandelt werden, zumal das untersuchte Gebiet mit seiner geothermische Anomalie durchaus Anreize zur Nutzung der Erdwärme bieten könnte. Die Auswirkungen dieses Störfalls hängen jedoch stark von den Wasserströmungen ab, die zwischen der Bohrung und den Abfällen herrschen; sie können deshalb erst berechnet werden, wenn einmal die Wasserfliesswege im Endlagergebiet besser bekannt sind.

Da die Störfallanalyse untersucht, wie Störungseffekte die normale zeitliche Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen, setzt sie voraus, dass der Anfangszustand des Systems hinreichend bekannt ist; der Ist-Zustand bildet die Basis, auf der erst eine fundierte Störfallanalyse möglich ist. Nach Ansicht der HSK konnten zwar von der Nagra viele Störfälle befriedigend abgehandelt werden, doch für eine vollständige Störfallanalyse ist die Basis noch zu schmal. Die noch unvollständig oder gar nicht behandelten Störfälle werden deshalb neu zu bearbeiten sein, wenn bessere Kenntnisse über das Endlagersystem und seine Wasserfliesswege vorliegen. Eine revidierte Richtlinie R-21 über die Schutzziele der Endlagerung [3] sollte es dannzumal auch ermöglichen, den Begriff der Eintretenswahrscheinlichkeit von störenden Ereignissen für die Störfallanalyse sinnvoll zu verwenden.

#### 5.15 Standortsuche im Kristallin der Nordschweiz

Jedes Wirtgestein hat seine spezifischen Vor- und Nachteile. Die wesentlichen Vorteile des Kristallins sind seine grosse Mächtigkeit, die bautechnisch eher günstige Standfestigkeit und die lokal geringe Wasserführung. Es war deshalb naheliegend, Kristallin in die engere Wahl der Wirtgesteine für

Endlager einzubeziehen. Die Untersuchungen der Nagra und die ersten Auswertungen zeigten indessen auch, dass das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz komplizierter und heterogener ist als ursprünglich angenommen. Daraus lassen sich einige Schwierigkeiten absehen, die sich der Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort entgegenstellen. Sie hängen teilweise mit den Eigenheiten des Kristallins als solchem, im speziellen aber mit den besonderen Verhältnissen in der Standortregion zusammen.

Das kristalline Grundgebirge ist heterogen in seinem Gesteinscharakter. Die Vielfalt an Gesteinen verschiedener Zusammensetzung lässt sich aus der Entstehungsgeschichte erklären. Die Granite sind als flüssige Magmen in ältere Gesteinsverbände eingedrungen und folgen keinen einfachen Ablagerungsgesetzen wie die Sedimente. Später durchschlugen Ganggesteine die älteren Gesteinsmassen, und die hydrothermale Ueberprägung veränderte nochmals deren Beschaffenheit (mineralogische Zusammensetzung, Porosität, Permeabilität etc.) Alle diese Ereignisse führten dazu, dass heute die Gesteinszusammensetzung von Ort zu Ort stark variiert und kaum je über grössere Strecken homogen ist.

Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz ist weiter auch heterogen in seinem tektonischen Aufbau. Die tektonischen Bewegungen zertrennten das Gebirge mit vielen grösseren und kleineren Störungszonen und bewirkten eine wirre Anordnung von gegeneinander verschobenen Schollen, Blöcken und Keilen. Der tiefe Permokarbon-Trog komplizierte die strukturelle Entwicklung des Gebiets weiter. Insgesamt zeigt das Grundgebirge heute einen komplexen, vielfach gestörten Aufbau.

Das kristalline Grundgebirge ist schliesslich auch heterogen in seiner Wasserführung. Es ist nicht ein homogenes poröses Medium, sondern ein geklüftetes Gestein, in dem die Wasserführung an eine Vielfalt unterschiedlicher diskreter Strukturen gebunden ist. Das braucht für die Endlagerung nicht unbedingt ein Nachteil zu sein. Es lässt sich sogar eine ideale Situation denken, in der ein relativ trockener Bereich von Zonen mit grösserer Wasserführung umgeben ist; legt man das Endlager in einem solchen Bereich an, dann breiten sich die Radionuklide nur sehr langsam und in gerin-

gen Mengen durch das Wirtgestein aus und werden wirksam verdünnt, sobald sie in die stärker wasserführenden Zonen gelangen. Das Modell der Nagra mit dem gering durchlässigen Wirtgestein des mittleren Kristallins und dem um viele Grössenordnungen durchlässigeren oberen Kristallin stützt sich auf eine ähnliche Vorstellung. Während so die hydrogeologische Eigenart eines geklüfteten Gesteins durchaus auch ihre sicherheitsmässigen Vorteile bieten könnte, bestehen die Schwierigkeiten vor allem in der hydrogeologischen Erkundung. Verschiedene Strukturen kommen als Zonen erhöhter Wasserwegsamkeit in Frage. Störungszonen können wasserführend sein, aber ebensogut können sie auch dicht sein; geklüftete Ganggesteine, Erzgänge und Mineraladern, oder auch Kluftzonen sind weitere mögliche Wasserwege. Allgemeine Aussagen darüber, wo das Wasser fliesst, lassen sich kaum machen. Die Wasserfliesswege müssen daher für den gewählten Standort spezifisch untersucht werden. Dies ist umso wichtiger, als die untersuchte Region ein Exfiltrationsgebiet ist, wo mit kurzen Entwässerungspfaden zu rechnen ist.

Die Heterogenität in der Gesteinszusammensetzung, im tektonischen Aufbau und in der Wasserführung erschweren die Standortsuche. Der Projektant muss die Standortuntersuchungen im Kristallin mit einem feineren Raster durchführen als in einer homogenen Formation, die über weite Strecken ähnliche Eigenschaften hat. Damit erhebt sich zwangsläufig die Frage der Prognostizierbarkeit; darunter versteht man die Möglichkeit, die geologischen Eigenschaften einer Formation aus einer kleinen Zahl lokaler Untersuchungen zu extrapolieren und für ein grösseres Gebiet vorherzusagen. Es liegt auf der Hand, dass die Prognostizierung umso schwieriger ist, je stärker die lokalen Schwankungen sind. Es gibt ausser der erwähnten Heterogenität noch weitere Gründe, warum die Prognostizierbarkeit des Kristallins schlechter ist als die von tektonisch nicht oder wenig gestörten Sedimenten. Aufgrund weltweiter, umfangreicher Erfahrungen aus der Suche nach Erdöl und Erdgas weiss man heute weit mehr über Sedimente und verfügt über ausgereifte und erprobte Erkundungsmethoden, die sich bewährt haben. Die wichtigsten der Methoden, die es gestatten, unter der Oberfläche liegende Formationen grossräumig zu erkunden, sind die geophysikalischen Untersuchungen, beispielsweise mit Hilfe seismischer Wellen. Diese Methoden sind grundsätzlich auch im Kristallin anwendbar, bringen dort aber weniger aussagekräftige Er-

gebnisse, weil die Unterschiede von Gesteinseigenschaften wie Dichte und Wellengeschwindigkeit, auf welche die Methoden ansprechen, im Kristallin meist geringer und kleinräumiger ausgeprägt sind als in einer Abfolge von Sedimentgesteinen. Sedimente mit ihrer vergleichsweise einfachen Ablage-  
rungsgeschichte und ihrer ursprünglich horizontalen Schichtung lassen sich insgesamt genauer und mit weniger Aufwand erkunden. Neue Methoden wie Radar und Durchschallung über grössere Distanzen werden zur Zeit entwickelt und auf ihre Eignung in Kristallingesteinen geprüft. Der Projektant eines End-  
lagers im Kristallin der Nordschweiz wird jedoch nicht darum herumkommen, den Standortbereich mit vielen Sondierbohrungen zu erkunden. Da generell aufwärts gerichtete Fließsverhältnisse vorliegen, ist es für die Sicherheit des Endlagers abträglich, wenn man gezwungen ist, die anfänglich unversehr-  
te Gesteinsformation durch eine Vielzahl künstlicher Perforationen zu ver-  
letzen.

Ob im Untersuchungsgebiet eine geeignete, genügend grosse Kristallinscholle zur Aufnahme eines Endlagers vorhanden ist und gegebenenfalls auch gefunden werden kann, lässt sich mit den heute vorliegenden Befunden noch nicht beurteilen. Das für ein Endlager in Frage kommende Gebiet ist durch den Permokarbondrog (5.4.3) und das Temperaturfeld (5.4.4) stark eingeschränkt und zudem von Störungen durchzogen. Auch wenn die gesuchte Kristallin-  
scholle existiert, dürfte die Standortsuche schwierig, zeitraubend und auf-  
wendig sein. Die HSK begrüsst deshalb die Äusserungen der Nagra in den Ge-  
währsberichten, sie wolle auch Endlagerkonzepte in anderen Wirtgesteinen als Kristallin prüfen. Bei der heute gegebenen Sachlage wäre es falsch, sich von vornherein auf Kristallin als Wirtgestein festzulegen; Flexibili-  
tät ist notwendig, und Endlagerkonzepte sind auch in Sedimentgesteinen zu verfolgen.

#### 5.16 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers für hochaktive Abfälle vergehen mehrere Jahrzehnte, welche die Nagra nutzen will, um die offenen Fragen abzuklären; entsprechende Arbeiten haben bereits begonnen. Mit den diesbezüglichen Hinweisen in den Gewährsberichten ist die HSK einverstanden. Sie fasst hier die wichtigsten offenen Punkte noch einmal zusammen, die sich aus ihrer Beurteilung des Projekts für das C-Lager ergeben haben.

Als eine der ersten Hauptaufgaben betrachtet die HSK die Ausdehnung der Endlagerkonzepte auf andere als kristalline Wirtgesteine und sie erwartet, dass künftige Untersuchungen vermehrt auch Sedimentgesteine umfassen. Die weitere Standortsuche soll dabei nicht nur von den Eigenschaften der Wirtgesteine selbst ausgehen, sondern ebenso sehr auch günstige geologische Situationen möglicher Standortregionen (Prognostizierbarkeit, lange Wasserfließwege, etc.) gewichten.

Die folgenden Probleme verdienen wegen ihrer Bedeutung für die Sicherheitsbeurteilung besondere Aufmerksamkeit:

##### Geologie (5.4)

Die geologische Erforschung der in Betracht gezogenen Standortregion soll intensiv weitergetrieben werden. Vordringlich ist eine regionale geologische Synthese der bereits vorliegenden Daten, die auch die erdgeschichtliche Entwicklung der Region berücksichtigt. Sie wird die Grundlage geben, auf der weitere Daten gezielter erhoben werden können. Ferner ist der Einfluss des Permokarbon-Trogs auf den tektonischen Aufbau des kristallinen Grundgebirges zu untersuchen. Zum geologischen Verständnis gehört schliesslich auch die Erklärung der geothermischen Anomalie des unteren Aaretals.

##### Hydrogeologie (5.5)

Die Sicherheitsanalyse zeigte immer wieder, welche überragende Bedeutung die Wasserfließwege vom Endlager zur Biosphäre haben. Sie bestimmen nicht nur

selbst massgeblich die Sicherheit, sondern sind auch Grundlage für eine sinnvolle Störfallanalyse. Nach einer Synthese der vorhandenen Daten sind deshalb die hydrogeologischen Untersuchungen gezielt weiterzuführen, und die Modelle sind den neu erworbenen Erkenntnissen anzupassen. Das hinreichende Erfassen der tatsächlichen Wasserfliesswege ist vielleicht die wichtigste Aufgabe der Standorterkundung für ein Endlager. Die vorliegenden hydrogeologischen Arbeiten der Nagra sind ein Anfang und müssen intensiv fortgesetzt werden.

#### Rückhaltemechanismen der Wasserfliesswege (5.10)

Die wesentliche Eigenschaft der Wasserfliesswege, welche zur Sicherheit beiträgt, ist das Rückhaltevermögen für Nuklide. Die Kenntnisse über die verschiedenen Rückhaltemechanismen sind zu verbessern. Die im Labor bestimmten Sorptionswerte für die verschiedenen Gesteine und Nuklide schwanken stark. Eine bessere Bestimmung der Werte muss auf die mineralogische Zusammensetzung der betrachteten Gesteine Rücksicht nehmen. Für eine Bestätigung des Sorptionskonzepts sind Feldexperimente nötig. Die Matrixdiffusion in Kalkriten und Ganggesteinen, allenfalls auch im intakten Gestein, die einen grossen Beitrag zur Sicherheit liefern kann, muss ebenfalls im Feld bestätigt werden.

#### Behälterkorrosion (5.7)

Die Endlagerbehälter könnten durch Spannungsrisskorrosion vorzeitig undicht werden. Eine kombinierte Analyse des Werkstoffverhaltens und der Zusammensetzung des Tiefenwassers im Kontakt mit den Behältern muss zeigen, ob ein frühzeitiges Behälterversagen ausgeschlossen werden kann. Gegebenenfalls sind auch andere Werkstoffe einer vertieften Bewertung zu unterwerfen.

### Stabilität von Bentonit (5.8)

Die Bentonitverfüllung ist die Barriere mit der grössten Anzahl Funktionen, und einige davon hängen von der langfristigen Stabilität ab. Es ist abzuklären, ob sich durch lokale Mineralumwandlungen oder andere Prozesse allenfalls durchgehende Wasserwege öffnen könnten. Ferner ist das Kriechverhalten über lange Zeiten, das die Tragfähigkeit des Bentonits beeinflussen kann, noch zu wenig bekannt. Untersuchungen über Bentonit sind deshalb fortzusetzen.

### Kolloide (5.9)

Wenn sich, insbesondere beim Uebergang aus dem Endlager ins Wirtgestein, Kolloide bilden, könnten unter Umständen mehr Radionuklide freigesetzt werden als nach den Löslichkeitslimiten erwartet. Mit dem Kolloidproblem verwandt ist auch die Frage, ob Mikroorganismen die Sicherheit beeinträchtigen könnten. Die Kenntnisse über Bildung, Stabilität und Transport von Kolloiden sind heute noch gering und müssen erheblich verbessert werden.

### Validierung der Modelle

Viele Modelle und ihre Parameter beruhen auf Kenntnissen, die überwiegend auf Laboruntersuchungen zurückgehen. Es ist grundsätzlich anzustreben, Modelle und Modellketten unter endlagerähnlichen Bedingungen zu validieren. Dazu gehört auch die Untersuchung von Naturanaloga, welche gezielt voranzutreiben ist.

Neben diesen prioritären Fragen gibt es eine Reihe von Themen, die im Hinblick auf ein Ausführungsprojekt ebenfalls noch zu bearbeiten sind. Sie seien hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit stichwortartig aufgezählt:

- Einfluss grösserer Betonmengen auf die Nahfeldchemie
- Versiegelung von Schächten und Stollen und ihre Langzeitbeständigkeit
- Qualitätssicherung für die Bentonitverfüllung, zulässige Inhomogenität des Rohmaterials, Einfluss auf die Einbaudichte

- Sättigungsvorgang im Bentonit
- Verdrängung von Porenwasser durch Gasausstoss in der Bentonitverfüllung
- Wechselwirkung des Systems Wasser / Bentonit / Eisenkorrosionsprodukte / Abfallglas
- Vertiefte Behandlung des Nahfelds
- Bestimmung der Löslichkeitslimiten unter realistischen Bedingungen, breitere Variation des Referenzwassers

In der Störfallanalyse der Nachverschlussphase sind auch folgende Fälle zu behandeln, sobald der Basisfall besser bekannt ist:

- Vorzeitiges Behälterversagen
- Versagen der Schachtversiegelung
- Langzeitszenarien bei Absinken des Schwarzwalds
- Veränderung der Wasserfliesswege durch natürliche Vorgänge und Ereignisse (Flie ssdistanzen, Verdünnungsfaktoren, etc.)
- Abklärung, ob die bentonitverfüllten Stollen eine bevorzugte Bruchstelle bei tektonischen Bewegungen bilden können
- Unbeabsichtigtes Anbohren des Endlagers und des Wirtgesteins

Die Sicherheitsanalyse für ein Ausführungsprojekt muss selbstverständlich alle Abfälle, also auch die im C-Lager vorgesehenen mittelaktiven Abfälle (WA-4) berücksichtigen. Das unterschiedliche Einlagerungskonzept für diese Abfälle kann neue Fragen hervorrufen, die ebenfalls abzuklären sind.

Schliesslich wird für ein Ausführungsprojekt auch die hier nicht behandelte Sicherheit während des Baus und des Betriebs Gegenstand näherer Untersuchungen sein müssen.

## 6. Gesamtbeurteilung C-Lager

Die folgende Gesamtbeurteilung ist in vier Teile gegliedert. Zuerst werden kurz die Untersuchungen gewürdigt, welche die Nagra zur Beschaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für das Projekt des C-Lagers durchführte (6.1). Dann geht die HSK auf die beiden Hauptfragen ein, die in Abschnitt 4.4 definiert wurden: Sicherheitsnachweis (6.2) und Standortfrage (6.3). Schliesslich äussert sie sich zusammenfassend zur Frage, wieweit mit dem vorgelegten Projekt die geforderte Gewähr geboten ist (6.4).

### 6.1 Grundlagenbeschaffung

Im Jahre 1978 veröffentlichten die Nagra und die Betreiber der Kernkraftwerke erstmals ein umfassendes Konzept [5] für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz. Inzwischen hat die Nagra eine grosse Zahl von Untersuchungen durchgeführt; die wichtigsten sind im Abschnitt 4.2 erwähnt. Das Projekt Gewähr kann sich so auf eine gegenüber 1978 weit festere Basis abstützen. Gemessen am damaligen Konzept sind heute wesentliche Fortschritte festzustellen, die insbesondere auch eine Konkretisierung der Vorstellungen mit sich gebracht haben. So war beispielsweise 1978 der kristalline Sockel der Nordschweiz noch weitgehend terra incognita, und man sprach von ungeklüftetem, dichtem Kristallin; heute ist man von solchen Idealvorstellungen abgekommen und setzt Klüftung und Wasserzirkulation in die Sicherheitsanalyse ein. Die Fortschritte, die dank den Untersuchungen der Nagra eingetreten sind, haben auch ausserhalb des Kontexts "Gewähr" eine grosse Bedeutung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Wegen des engen zeitlichen Rahmens, der durch die Gewährsforderung gesetzt war, mussten einige der Arbeiten intensiviert, andere vorgezogen werden. Das hatte zur Folge, dass die Nagra zuweilen Untersuchungen parallel durchführen musste, wo ein Hintereinander zweckmässiger gewesen wäre. Unter dem Zeitdruck mag auch mitunter die Auswertung der Ergebnisse etwas zu kurz gekommen sein. Im Rahmen des zeitlich Möglichen ist es der Nagra jedoch ge-

lungen, umfangreiche wissenschaftliche Grundlagen zur Erarbeitung und Beurteilung von Endlagerprojekten zu beschaffen.

Die wenigsten der erwähnten Arbeiten sind heute abgeschlossen, und neue werden hinzukommen; es ist das Zeichen eines noch jungen Forschungsgebiets, dass neue Erkenntnisse neue Fragen aufwerfen. Die Anstrengungen sind weiterzuführen, um die Lücken in den Grundlagen zur Projektierung von Endlagern zu stopfen. Nach Ansicht der HSK wird es in Zukunft auch vermehrt darum gehen müssen, die Vielzahl von Einzelergebnissen auszuwerten und zu einem Gesamtbild zu integrieren. Ein typisches Beispiel einer solchen Integrationsaufgabe, die noch sehr viel Zeit beanspruchen wird, ist die Hydrogeologie: Erst das Zusammenspiel vieler einzelner Sachgebiete von der Bestimmung der Isotopenverhältnisse über die Wasserchemie bis zur hydrodynamischen Modellierung führt zu einem wirklichen Verständnis der so wichtigen Wasserfliesswege um ein Endlager. Die bisher erworbenen Kenntnisse ergeben eine Basis, auf der man das weitere Vorgehen festlegen kann.

## 6.2 Sicherheitsnachweis

Die erste Hauptfrage lautet, ob die Sicherheit des Endlagers genügend nachgewiesen sei unter der Voraussetzung, dass der gesamte Endlagerbereich die Referenzeigenschaften aufweist, die aus den Beobachtungen in der Bohrung Böttstein (Referenzstandort) abgeleitet worden sind. Die Beurteilung der Sicherheit richtet sich primär nach dem Schutzziel 1 (Kap. 2.2). Die Forderung von Schutzziel 2 ist eingehalten, da die Nagra in ihrer Sicherheitsanalyse nirgends Sicherheits- und Ueberwachungsmassnahmen nach dem Verschluss des Endlagers voraussetzte.

Zunächst ist festzuhalten, dass bei der Beurteilung keine Argumente aufgetaucht sind, die den Sicherheitsnachweis grundsätzlich zum Scheitern bringen müssten. Das ist zwar noch keine positive Antwort, aber die Aussage ist doch nicht inhaltsleer, weil sie aufgrund von Kenntnissen erfolgt, deren Umfang heute wesentlich grösser ist als noch vor einigen Jahren.

In der Methodik und rechnerischen Durchführung der Sicherheitsanalyse stimmt die HSK mit der Nagra überein, ebenso im wesentlichen in der Anerkennung der noch offenen Punkte. Unterschiedliche Auffassungen bestehen bei einzelnen Modellannahmen, insbesondere beim Wasserfliessmodell.

Die Ergebnisse der HSK-Sicherheitsanalyse sind als potentielle Strahlendosen in der Tabelle 5.1 von Abschnitt 5.13.4 wiedergegeben. Daraus ergibt sich, dass unter vorsichtig realistischen Annahmen das Endlager den Anforderungen des Schutzziels 1 genügt. Dies gilt sicher für den Fall, dass im Wirtgestein eine Wasserströmung nach dem Kakiritfliessmodell stattfindet; es gilt selbst noch für das Ganggesteinmodell, wobei dann aber je nach Annahmen für noch verbleibende Ungewissheiten und für die Auswirkung von Störfällen keine grosse Sicherheitsmarge mehr besteht.

Aus diesen Gründen beantwortet die HSK die erste Hauptfrage mit einem vorsichtigen, bedingten Ja: Mit den Eigenschaften des Referenzstandorts ist die Sicherheit des C-Lagers nachgewiesen, falls

- kein erheblicher Nuklidtransport durch Kolloide stattfindet,
- zusätzliche Störfallanalysen keine unzulässigen Dosen ergeben,
- weitere Untersuchungen die Annahmen, die aufgrund bisheriger Kenntnisse getroffen wurden, bestätigen oder als eindeutig konservativ ausweisen.

Die Frage, ob und in welchem Ausmass ein Transport der Radionuklide durch Kolloide stattfinden kann, ist in der Endlagerung verhältnismässig neu. Ueber Bildung, Transport und Zerfall von Kolloiden in tiefen Grundwässern ist heute noch zu wenig bekannt, als dass die Nagra dieses Problem im Projekt Gewähr angemessen hätte berücksichtigen können. Die Kolloidfrage lässt sich auch nicht kurzfristig beantworten und bleibt deshalb ein offener Punkt für zukünftige Forschungen.

Die Analyse der möglichen Störfälle ist noch zu ergänzen und zu verfeinern (siehe Kap. 5.14), doch kann dies mit Erfolg erst getan werden, wenn genügend standortspezifische Befunde vorliegen und das Endlagersystem einschliesslich der Wasserfliesswege besser bekannt ist.

Die technischen Beurteilungen zeigten, dass mancherorts noch offene Fragen bestehen zum Verhalten der Barrieren, zur Wahl der Modelle und besonders zur Festlegung der Eingangsdaten; typische Beispiele solcher Ungewissheiten sind die Löslichkeitslimiten und der Wasserstrom durch das Endlager (Tab. 5.1). Wollte man diese und weitere Fragen ungünstig beantworten, so liessen sich durch Häufung von Konservativitäten leicht Szenarien konstruieren, die nicht mehr die geforderte Sicherheit gewährleisten. Man darf jedoch nicht mehr die geforderte Sicherheit gewährleisten. Man darf jedoch nicht einfach einzelne Aspekte für sich isoliert betrachten, sondern muss versuchen, das Endlagersystem als Ganzes zu sehen. Es gilt auch zu beachten, dass die Sicherheit nicht schlechter sein muss als berechnet, wenn eine Eingangsgrösse ungewiss ist; genausogut kann sie auch besser sein.

Die grosse Streubreite der Ergebnisse zeigt, dass es heute im Grunde genommen noch zu früh ist für Sicherheitsaussagen, die einen fundierten Entscheid über das konkrete, weitere Vorgehen in Richtung auf ein Ausführungsprojekt erlauben würden. In Zukunft wird es somit vor allem darum gehen müssen, die Ungewissheiten und damit auch die Konservativitäten der Sicherheitsanalyse durch verbesserte Kenntnisse abzubauen. Der enorme Unterschied in den Sicherheitsergebnissen zwischen dem Ganggesteinmodell und dem Kakiritfliessmodell zeigt, dass schon ein Wasserfliessweg, der nur um wenig günstiger ist als im angenommenen Ganggesteinmodell der HSK, grosse Sicherheitsreserven bringen kann, die dann auch die verbleibenden Ungewissheiten, etwa bei den Löslichkeitslimiten und dem Wasserstrom oder beim Einfluss von Störfällen, abzudecken vermögen. Die tatsächlichen Wasserfliesswege zu erfassen, wird deshalb ein Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen sein müssen. Daneben muss man aber auch vermehrt danach trachten, die verwendeten Modelle und ihre bestimmenden Parameter, die nur zu oft allein aus Labormessungen bekannt sind, unter endlagerähnlichen Bedingungen zu validieren.

### 6.3 Standortfrage

Die zweite Hauptfrage lautet, ob sich ein Endlagerstandort finden lasse, der nicht nur lokal, sondern in einem hinreichend grossen Gebiet alle jene Eigenschaften hat, die für einen positiven Sicherheitsnachweis notwendig sind. Die vorläufigen Mindestanforderungen an den Standort folgen aus den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse, wie sie als Grundlage zur Beantwortung der Frage 1 (Sicherheitsnachweis) diene: Der Lagerbereich muss über eine horizontale Ausdehnung von einigen Quadratkilometern und eine Tiefenerstreckung von einigen hundert Metern so gering durchlässig sein, dass der Wasserstrom durch das Endlager auf eine Grössenordnung von etwa zehn Kubikmetern pro Jahr beschränkt bleibt. Falls die weiteren Untersuchungen grössere Sicherheitsmargen ergeben, vermindern sich die Anforderungen an den Standort.

Die Standortfrage ist heute noch weitgehend offen; die vorhandenen Grundlagen genügen nicht zur Beantwortung. Neben weiteren Sondierungen ist vor allem eine regionale geologische Synthese nötig; erst sie wird es erlauben, fundierte Aussagen über ein Gebiet zu machen, das über den engen Bereich einer einzelnen Bohrung hinausgeht. Die Antwort auf die Standortfrage lässt sich auch nur schwer terminieren. Die Untersuchungen und Auswertungen brauchen Zeit. Ob sich ein gegebener Standort im kristallinen Grundgebirge für ein Endlager eignet, kann man mit grösserer Gewissheit erst beurteilen, wenn - wie die Nagra dies vorsieht - ein Schacht und ein den Endlagerbereich umfahrender Sondierstollen gebaut sind; im Extremfall müsste sogar der Standort dann noch aufgegeben werden. Zwischen Beginn des Schachtbaus und Abschluss des Sondierstollens vergehen 10-15 Jahre. Der Projektant eines Endlagers wird jedoch das Risiko eines Misserfolgs nach derart langer Zeit erst auf sich nehmen können, nachdem er sich durch sorgfältige Untersuchungen und geologische Prognosen davon überzeugt hat, dass im gewählten Gebiet gute Aussichten bestehen, die erhofften Eigenschaften zu finden. Deshalb ist eine gute Prognostizierbarkeit der Standortgeologie erwünscht.

Während die HSK mit der Nagra darin übereinstimmt, dass die Standortfrage vorerst offen bleibt, beurteilt sie die Aussichten auf eine erfolgreiche

Standortsuche im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz weniger optimistisch als die Nagra. Obwohl beim heutigen Stand der Kenntnisse jede positive oder negative Äusserung zu den Standortaussichten bis zu einem gewissen Grade spekulativ und nur unter Vorbehalten entgegenzunehmen ist, möchte die HSK einige Eigenheiten des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz im Bereich der bisherigen Tiefbohrungen erwähnen, die es bei der Standortfrage zu bedenken gilt:

- Der Permokarbon-Trog, die heute bekannten Störungszonen und die relativ starke Zunahme der Temperatur mit der Tiefe schränken im bisherigen Untersuchungsbereich die möglichen Standortgebiete auf einige kleine Areale ein.
- Die verschiedenen Sondierbohrungen erbrachten kein einheitliches Bild der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Kristallin, sondern unterstrichen dessen Vielfalt und Heterogenität.
- Das Kristallin der Nordschweiz ist tektonisch sehr kompliziert aufgebaut und stark zergliedert; entsprechend komplex sind auch die möglichen Wasserflusswege.
- Kristalline Formationen sind schwieriger zu prognostizieren als ungestörte oder wenig gestörte Sedimente; Standortabklärungen sind deshalb vermehrt auf Sondierbohrungen angewiesen, was mehr, sicherheitsmässig problematische, Perforationen des Wirtgesteins verursacht.

Nach Ansicht der HSK ist die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz schwierig, aufwendig und zeitraubend. Deshalb scheint ihr ein flexibles Vorgehen angezeigt, das sich nicht nur auf Kristallin festlegt, sondern auch Konzepte für die Endlagerung in Sedimentgesteinen prüft. Die HSK empfiehlt der Nagra, ihre Anstrengungen in dieser Richtung zu verstärken.

#### 6.4 Gewähr

Die Frage, ob das vorgelegte Projekt die gewünschte Gewähr für eine sichere Endlagerung der hochaktiven Abfälle zu erbringen vermöge, lässt sich in die zwei Hauptfragen der beiden vorangehenden Kapitel unterteilen; die Antworten seien hier nochmals kurz zusammengefasst. In der Frage des Sicherheitsnachweises mit den Eigenschaften der Referenzbohrung (6.2) gelangte die HSK, mit einigen Vorbehalten, zu einer vorsichtig positiven Antwort; die errechneten Auswirkungen des Endlagers streuen je nach zugrundegelegten Annahmen über einen weiten Bereich, was darauf hindeutet, dass es heute noch zu früh ist für eine konkretere Antwort. Die Standortfrage (6.3) ist vorerst noch offen; die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz ist nach Ansicht der HSK schwierig, und ein Erfolg ist nicht garantiert. Da mithin die beiden Hauptfragen nur mit Vorbehalten oder gar nicht beantwortet sind, wurde noch nicht ausreichend nachgewiesen, dass die sichere Endlagerung der hochaktiven Abfälle unter Einhaltung der Schutzziele gemäss Kap. 2.2 in der Schweiz machbar ist.

Misst man das Projekt Gewähr 1985 an dem, was in der verfügbaren Zeit möglich war, dann betrachtet es die HSK als wertvollen Schritt auf dem Weg zum geforderten Nachweis. Das Projekt hält den heutigen Stand der Kenntnisse und die Fortschritte seit 1978 fest und brachte wichtige Teilerfolge, die zeigen, dass man dem Ziel einer sicheren Endlagerung ein beträchtliches Stück näher gekommen ist:

- Die Sicherheitsanalyse mit den Eigenschaften der Referenzbohrung zeigte, dass unter fast allen Annahmen über die massgebenden Einflussgrössen die Strahlendosen für die Bevölkerung jederzeit kleiner sind als die Schutzzieellimite von 10 mrem/a. Bei sehr pessimistischen Annahmen (Kurve 5 in Abb. 5.2) wird das Schutzziel während etwa 10'000 Jahren eingehalten; anschliessend steigt die errechnete Dosis auf ein Maximum von einigen 100 mrem/a nach mehreren 100'000 Jahren. Sie liegt dann im Bereich der Dosislimite für Einzelpersonen der Bevölkerung gemäss Schweizerischer Strahlenschutzverordnung vom 30. Juni 1976. Diese Aussagen gelten unter Vorbehalt der in 6.2 erwähnten offenen Fragen.

- Die Sicherheitsanalyse zeigte auch, dass technische Barrieren wie Endlagerbehälter und Bentonitverfüllung die Radionuklide während langer Zeit wirksam zurückhalten können. Das Projekt Gewähr wurde nicht auf eine möglichst lange Standzeit der Endlagerbehälter ausgelegt, und längere Standzeiten sind denkbar. So sah beispielsweise das schwedische Projekt KBS-3 [6] einen Endlagerbehälter vor, der in einer Umgebung von ebenfalls kristallinem Gestein während mindestens 100'000 Jahren dicht bleiben soll. Es kann erwartet werden, dass mit entsprechender Auslegung der technischen Barrieren auch in einem schweizerischen Endlager die Schutzzie llimite während mindestens einiger 10'000 Jahre einzuhalten wäre, sogar an einem ungünstigen Standort, der selbst kaum etwas zur Rückhaltung beiträgt. Für spätere Zeiten lässt sich aufgrund der heute noch lückenhaften Kenntnisse eine Ueberschreitung der Schutzzie llimite nicht ausschliessen. Die radiologische Toxizität der Abfälle ist zu dieser Zeit etwa gleich gross wie diejenige des ursprünglich verwendeten Uranerzes; die Freisetzungs- und Ausbreitungseigenschaften können jedoch verschieden sein.

Welche Folgerungen sind daraus für das weitere Vorgehen zu ziehen? Der Gewährsforderung lag die Frage zugrunde, ob die radioaktiven Abfälle aus dem Bereich der Kernenergie sicher beseitigt werden können. Das Projekt Gewähr gibt hierzu eine erste Antwort. Die Antwort ist nicht abschliessend, und weitere, intensive Untersuchungen sind im Hinblick auf ein Ausführungsprojekt notwendig. Zeit dafür ist vorhanden, denn die hochaktiven Abfälle lassen sich auch länger zwischenlagern, als für ihre Kühlung notwendig ist. Die HSK empfiehlt, dass die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten weitergeführt werden und darüber periodisch (beispielsweise alle vier Jahre) ein aufdatierter Bericht vorgelegt wird. Voraussetzung für einen Erfolg ist, dass die Nagra ihre Anstrengungen zur Suche nach einem geeigneten Standort im Kristallin und in anderen Wirtgesteinen genügend breit und flexibel fortsetzt. Dabei sollten diese Arbeiten nicht unter einengenden zeitlichen Beschränkungen und Terminen leiden müssen. Dann sieht die HSK beim heutigen Stand der Kenntnisse keinen Grund, weshalb die sichere Endlagerung der hochaktiven Abfälle nicht machbar sein sollte.

## DRITTER TEIL : B-LAGER

---

### 7. Technische Beurteilung

#### 7.1 Ueberblick

Alle Abfälle, die nicht für die Beseitigung im C-Lager vorgesehen sind, sollen gemäss Projekt Gewähr im Lager vom Typ B Platz finden. Es handelt sich um die sogenannten schwach- und mittelaktiven Abfälle, d.h. um die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung mit Ausnahme der hochaktiven Abfälle und der Strukturteile von Brennelementen, um die Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke und um die radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung. Ihre Gesamtmenge wird zu 200'000 m<sup>3</sup> angenommen. Volumenmässig bilden sie den überwiegenden Teil aller Abfälle; ihre Toxizität beträgt demgegenüber nur 1 % der Gesamtttoxizität. Eine Diskussion des Abfallinventars und der Zuteilung auf die Lagertypen findet sich in Kap. 5.2.

Das Lagerkonzept sieht ein Kavernenlager im Berginnern mit horizontalem Zugangsstollen vor (Abb. 7.1). Als Standort für das Gewährsprojekt dient der Oberbauenstock. Das Wirtgestein ist Valanginienmergel, das Ausbruchsvolumen beträgt ca. 1 Million m<sup>3</sup>. Dieser Standort wurde nicht wie im Falle des C-Lagers als Ergebnis einer gezielt angesetzten Sondierkampagne ausgewählt, sondern weil einige seiner Eigenschaften aus dem Bau des Seelisbergtunnels der Nationalstrasse N2 bekannt sind. Insgesamt ist der geologische Modelldatensatz beim B-Lager weniger gut auf Sondierungen abgestützt als beim C-Lager; eigene Untersuchungen der Nagra sind geplant.

Unterschiede zum C-Projekt bestehen auch bei den technischen Barrieren. Die meisten Abfälle sind in Zement verfestigt; die Gebinde sind Fässer aus Stahlblech, die in Grosscontainer aus Beton gestellt und eingegossen werden. Diese Lagerbehälter werden in den Lagerkavernen gestapelt und die Zwischenräume mit Sonderbeton ausgefüllt. Die Versiegelung des Zugangsstol-

lens soll nach ähnlichen Konzept wie beim C-Lager mit einem Gemisch aus Bentonit und Sand erfolgen.

Das B-Lager-Projekt erhält im Rahmen der Gewährsfrage weniger Gewicht als das C-Projekt, wie dies bereits in der AGNEB-Definition [2] festgehalten ist. Entsprechend bearbeitete die HSK das B-Projekt denn auch mit geringerer Intensität. Dies erschien ihr umsomehr angebracht, als heute beim B-Lager viel rascher als beim C-Lager mit kommenden Bewilligungsverfahren zu rechnen ist. Sicherheitsfragen lassen sich dannzumal besser behandeln im Zusammenhang mit einem konkreten Ausführungsprojekt, das auf einen sondierten Standort bezogen ist.

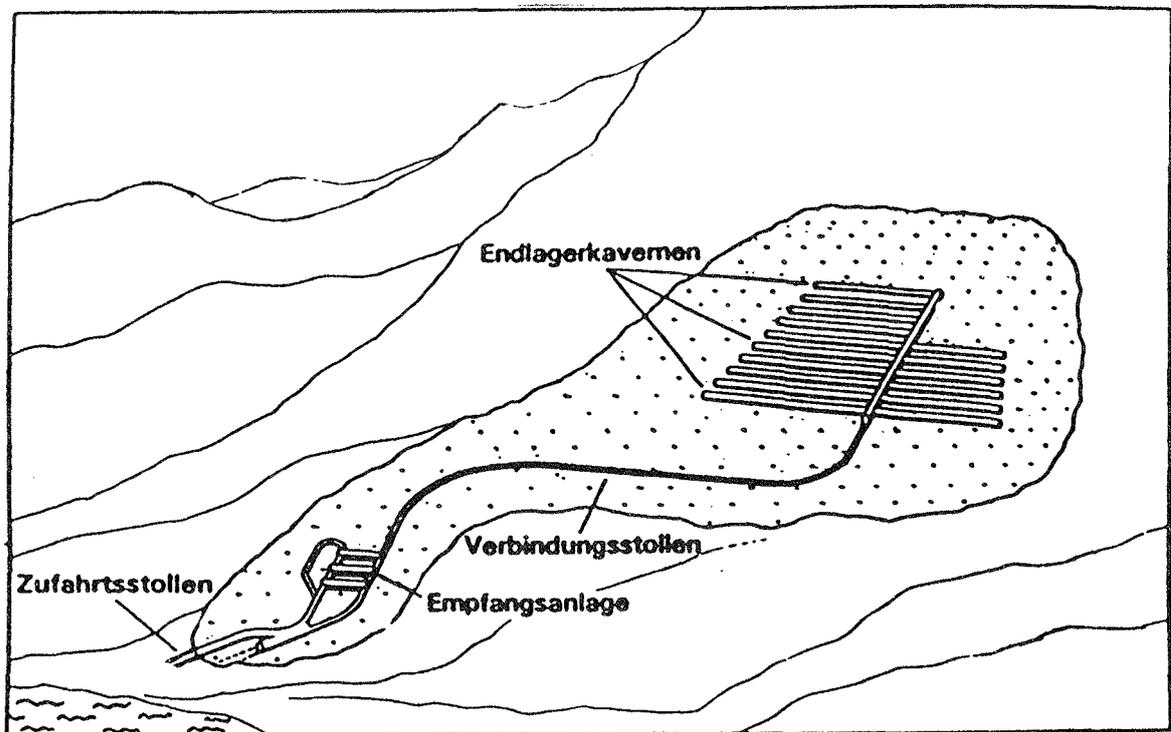


Abb. 7.1: Perspektivische Uebersicht des Endlagers Typ B (nach NGB 85-07)

## 7.2 Technische Barrieren

### 7.2.1 Bautechnische Aspekte

Das Endlager vom Typ B besteht im wesentlichen aus der Empfangsanlage, dem Verbindungsstollen und den Endlagerkavernen (Abb. 7.1). Die Nagra konnte ihr Bauprojekt auf die Erfahrungen beim Bau des Seelisbergtunnels abstützen, der streckenweise die gleichen Gesteinsformationen durchfährt. Nach Ansicht der HSK ist das Bauprojekt zweckmässig und technisch durchführbar; das Wirtgestein Valanginienmergel ist zwar bautechnisch nicht einfach, doch lassen sich erfahrungsgemäss für die auftretenden Probleme Lösungen finden. Wie schon im Falle des C-Lagers muss auch hier die Langzeitbeständigkeit der Materialien, die zur Verfüllung und Versiegelung von Kavernen und Stollen dienen, noch besser untersucht werden.

### 7.2.2 Aufbau

Die technischen Barrieren, die einer Freisetzung der Radionuklide aus den Abfällen in das Wirtgestein entgegenwirken, bestehen von innen nach aussen aus fünf Zement- oder Betonstrukturen: Abfallmatrix, Verfüllung und Schale der Lagerbehälter, Kavernenverfüllung und Kavernenauskleidung. In ihrer Gesamtheit sollen sie bewirken, dass das Gebirgswasser nur die Porenräume ausfüllt, aber nicht die verfüllten Endlagerkavernen durchströmt, sodass die Radionuklide nur durch langsame Diffusion in das Wirtgestein gelangen können. Die innerste Barriere ist die Abfallmatrix selbst, die bei über 90% der Abfälle aus Zement besteht; die in Bitumen oder Kunststoffen verfestigten Abfälle sind anteilmässig gering. Die einzelnen Abfallfässer stehen in quaderförmigen Lagerbehältern aus armiertem Beton, die mit Fließzement ausgegossen werden. Die Wahl von Fließzement ist zweckmässig, weil damit eine gute Verfüllung der Hohlräume möglich ist. Da der Anteil des Fließzements am Gesamtvolumen der technischen Barrieren nur etwa 10 % beträgt, ist seine Bedeutung als Diffusionsbarriere jedoch gering. Dasselbe gilt für die Schale des Lagerbehälters, weil die Korrosion der Armierungseisen zu Expan-

sionsrissen führen könnte, welche den Diffusionswiderstand langfristig herabsetzen.

Die HSK betrachtet die Kavernenverfüllung als Hauptkomponente des Systems technischer Barrieren. Als Material, mit dem die Zwischenräume um die gestapelten Lagerbehälter ausgefüllt werden, schlägt die Nagra einen fliessfähigen Sonderbeton vor, der gut injizierbar ist und sich plastischer verhält als Normalbeton, sodass er Gebirgsspannungen ohne Rissbildung aufnehmen sollte. Allerdings ist der Sonderbeton poröser als gewöhnlicher Beton, und seine Durchlässigkeit könnte deshalb mit zunehmender Zersetzung grösser werden, als die Nagra annimmt. Da ferner die pH-Werte des Porenwassers von Sonder- und Normalbeton unterschiedlich sind, könnte sich in den technischen Barrieren ein Löslichkeitsgradient für einzelne Nuklide ausbilden, der möglicherweise zu deren Ausfällung und unerwünschtem Transport durch Kolloide führt. Die HSK erwartet, dass vor der endgültigen Spezifikation des Sonderbetons diese Probleme abgeklärt werden.

Die Kavernenauskleidung aus Beton grenzt als äusserste der technischen Barrieren direkt an das Wirtgestein. Da mit der Einlagerung der Abfälle erst begonnen wird, wenn sämtliche Kavernen ausgebrochen sind, stehen diese Kavernen lange offen, und die Kavernenauskleidung hat im Mittel über Jahrzehnte hinweg den Gebirgsdruck aufzunehmen. Weil sie zudem in direktem Kontakt mit dem Felswasser steht und dessen chemischem Angriff in verstärktem Masse ausgesetzt ist, könnten sich Risse bilden, welche die Durchlässigkeit erhöhen. Die HSK ist deshalb der Ansicht, dass die Kavernenauskleidung nicht unbesehen als Diffusionsbarriere beansprucht werden darf. Ohne genauere Abklärungen muss man sie eher zur Auflockerungszone um die Kavernen rechnen, die vom Felswasser durchströmt wird.

Obwohl die fünf erwähnten technischen Barrieren unterschiedlich gestaltet sind, bestehen sie alle aus ähnlichen Materialien und erfüllen sicherheitsmässig alle dieselbe Funktion als Diffusionsbarriere, weshalb sie gesamthaft wohl nur als eine einzige Barriere zu betrachten sind. Das hat Vor- und Nachteile: Einerseits ist wegen dieser mehr oder weniger ausgeprägten Einheitlichkeit keine grosse Diversität der Sicherheitsbarrieren

vorhanden; andererseits können die technischen Barrieren in der Sicherheitsanalyse als gesamtes Paket behandelt werden, das vergleichsweise einfach zu modellieren ist. Insgesamt erscheint der HSK das Konzept der technischen Barrieren als vertretbar und zweckmässig, was selbstverständlich spätere Verbesserungen nicht ausschliesst.

### 7.2.3 Kenngrössen

Die wesentlichen Kenngrössen der technischen Barrieren sind neben der Anordnung und Ausdehnung die Diffusivitäten, die angeben, wie rasch ein Nuklid durch das Porenwasser wandert, und die Retentionsfaktoren, die angeben, wie stark die Diffusion durch Sorption der Nuklide an den Porenwänden verzögert wird. Die Porendiffusivitäten der verschiedenen Barrieren müssen zweifellos noch besser bestimmt werden, wenn möglich direkt durch Eindring- und Durchdringversuche. Die Retentionsfaktoren sind aufgrund des heutigen Kenntnisstandes vorsichtig gewählt und liegen teilweise deutlich auf der konservativen Seite.

Die technischen Barrieren werden sich mit der Zeit verschlechtern, weil verschiedene Prozesse wie Auslaugung von Zementbestandteilen, Korrosion der Armierungseisen und Gasentwicklung den Beton zersetzen und rissig werden lassen. Die Nagra nimmt für die Sicherheitsanalyse an, dass sich der Beton im Laufe der Jahrtausende zersetzt und schliesslich die Diffusivität von kompaktem Sand annimmt. Nach Ansicht der HSK ist diese Annahme einer allmählichen Verschlechterung der technischen Barrieren durchaus realistisch.

### 7.2.4 Barrierenwirkung

Dass die technischen Barrieren insgesamt als Diffusionsbarriere wirken, muss näher begründet werden. Die Nagra argumentiert, dass die hydraulische Durchlässigkeit von Beton wesentlich geringer ist als die der Auflocke-

rungszone um die Kavernen und auch geringer als die des Wirtgesteins. Das Gebirgswasser würde somit vor allem in der viel leitfähigeren Auflockerungszone fließen und kaum die Kavernen selbst durchströmen; das Wasser in den Kavernen sei im wesentlichen stagnierend, und der Nuklidtransport könne nur durch Diffusion stattfinden. Dieses Argument ist grundsätzlich richtig, hingegen ist es für die HSK nicht von vornherein klar, dass die Unterschiede in den Durchlässigkeiten tatsächlich so gross sind. Zum einen werden die technischen Barrieren mit zunehmender Zersetzung leitfähiger, was sich besonders beim Sonderbeton auswirken kann, der poröser ist als Normalbeton. Zum anderen braucht die Auflockerungszone nicht so durchlässig zu sein, wie die Nagra annimmt, denn durch Quellen des Mergels könnten die Risse wieder verheilen. Wenn sich aber die Durchlässigkeiten nicht mehr so stark unterscheiden, können die Kavernen teilweise vom Gebirgswasser durchströmt werden, und neben dem diffusiven Transport findet dann auch ein konvektiver Transport statt, bei dem die Nuklide von bewegtem Wasser mitgetragen und so rascher aus den Kavernen freigesetzt werden. Die Nagra behandelte den konvektiven Fluss durch das Endlager nur als alternatives Freisetzungsszenario. Da der heutige Stand der Kenntnisse noch nicht gestattet, sich eindeutig für den einen oder anderen der beiden Transportmechanismen zu entscheiden, gebietet die Vorsicht, den konvektiven Transport als Grundannahme der Sicherheitsanalyse zu verwenden. Die HSK betrachtet ihn deshalb ebenfalls als Basisfall.

### 7.3 Geologie und Hydrogeologie

Die Nagra wählte als Standort für das B-Lager im Projekt Gewähr den Oberbauenstock westlich des Urnersees; das Wirtgestein ist Valanginienmergel, ein aus tonigen und kalkigen Bestandteilen gemischtes Sedimentgestein. Die Geologie der Oberfläche ist gut bekannt. Das Berginnere wurde bisher einzig beim Bau des Seelisbergtunnels aufgeschlossen, der einige hundert Meter von der potentiellen Lagerzone entfernt das Wirtgestein durchfährt; damals waren aber andere Untersuchungsziele massgebend, sodass heute die erdwis-

senschaftlichen Kenntnisse, die sich speziell auf die Eignung des Standorts für ein Endlager beziehen, noch weitgehend fehlen. Die Lage wird sich verbessern, wenn einmal die gezielten Sondierungen angelaufen sind, welche die Nagra plant. Die folgenden Aeusserungen der HSK stützen sich unter anderem auch auf die Ergebnisse einer Expertise (C. Schindler) über die Geologie des B-Lagers.

### 7.3.1 Geologie

Die geologische Situation des Standortgebiets ist durch eine ausgeprägte Falten tektonik gekennzeichnet: Die geschichteten Kalke, Mergel und Schiefer sind in überkippten und liegenden Falten angeordnet, die von tektonischen Bruchzonen durchzogen sind. Der Valanginienmergel liegt an der Basis einer Ueberschiebungsdecke (Drusbergdecke) und diente als Abscherhorizont, auf dem die oberen, starren Teile der Decke gleiten konnten. Dabei wurde er intensiv verformt, was einen komplizierten und gestörten tektonischen Aufbau zur Folge hatte. Die Geometrie des Wirtgesteinskörpers kann ausser am nordöstlichen Rand, wo der Seelisbergtunnel durchführt, nur aus Extrapolationen von der Oberfläche her abgeschätzt werden. Die kommenden Sondierungen werden zeigen müssen, ob die Ausdehnung des Valanginienmergels genügend gross ist für ein Endlager. Nach unten ist das Wirtgestein durch Ueberschiebungskontakte begrenzt; unterhalb der Kontaktfläche werden Valanginienkalke oder tertiäre Schiefer vermutet. Da diese Frage einstweilen noch offen ist, rechnete die Nagra überall dort, wo die Gesteine unterhalb der Lagerzone eine Rolle spielen, richtigerweise mit beiden der erwähnten Varianten.

Die beabsichtigten Standortuntersuchungen müssen auch die geologischen Schichten rund um die Lagerzone erkunden. Wegen der schlecht zugänglichen Oberfläche kommen dafür vor allem Sondierungen aus Untertagebauten in Betracht. Weil Bohrungen aber stets mit der Gefahr von Schichtverletzungen und möglicherweise auch Wassereinbrüchen verknüpft sind, plant die Nagra, die Untersuchungen mehrheitlich mit geophysikalischen Methoden durchzu-

führen. Die HSK pflichtet dem bei, weist aber darauf hin, dass die geologische Erkundung des Standorts schwierig sein könnte, weil die geophysikalischen Methoden bei den vermutlich komplexen geologischen Verhältnissen nicht unbedingt schlüssige Ergebnisse zu liefern brauchen.

### 7.3.2 Hydrogeologie

Die Wasserverhältnisse im Innern des Oberbauenstocks sind noch kaum bekannt, und man ist auf Vermutungen und einstweilige Modellvorstellungen angewiesen. Das gebirgige Relief der Oberfläche, die Abfolge von wasserleitenden und wasserstauenden Gesteinsschichten im Innern und das Netz tektonischer Bruchzonen lassen erwarten, dass die Wasserströmungen komplex und lokal stark variabel sind. Die Nagra nimmt eine allgemeine Entwässerung des Endlagerbereichs nach Osten an, was der HSK vertretbar scheint, weil diese Annahme für die Sicherheitsbeurteilung konservativ ist. Immerhin wäre auch die günstigere Variante denkbar, dass der Lagerbereich zumindest teilweise über längere Fließwege nach Westen entwässert; erst die Standortuntersuchungen werden hierüber mehr Aufschluss geben können.

Die Nagra nimmt an, dass die Wasserführung im Valanginienmergel an poröse Trennflächen und Bewegungszonen, sogenannte Ruschelzonen, gebunden ist und praktisch kein Wasser durch den ungestörten Mergel fließt. Für die Durchlässigkeiten verwendete sie geschätzte Zahlenwerte, die auf Vergleichen mit ähnlichen geologischen Formationen beruhen. Die HSK beurteilt dieses Vorgehen als zweckmässig; es erlaubt erste Abschätzungen der Wasserzirkulation, die später aufgrund von standortspezifischen Messungen und Erkenntnissen zu verbessern sind. Sie empfiehlt indessen, das Modell der Wasserströmung in Ruschelzonen zu erweitern und auch eine Strömung in Klüften mit einzubeziehen; Beobachtungen beim Bau des Seelisbergtunnels ergaben, dass rund die Hälfte der Wasseraustrittsstellen in feingeklüfteten Mergeln oder kalkigen Einschaltungen lagen.

Die HSK möchte schliesslich noch auf das Problem der Gasführung im Wirtgestein hinweisen. Beim Tunnelbau wurden im Valanginienmergel verschiedent-

lich Gasaustritte festgestellt; einer davon hält heute noch an. Es ist nicht auszuschliessen, dass das Gas aus einem tiefer liegenden, ausgedehnten Reservoir stammt und auch nach Abschluss der Einlagerung noch durch ein Endlager strömen könnte. Es ist deshalb zu untersuchen, welchen Einfluss die Gasführung auf die Sicherheit des Endlagers hat.

#### 7.4 Sicherheitsanalyse

Die Sicherheitsanalyse des B-Lagers ist ähnlich aufgebaut wie die des C-Lagers. Die Nagra behandelte zuerst die vermutete ungestörte Entwicklung des Endlagersystems im Rahmen von zwei Basisfällen, die sie mit mehreren Variationen so weit ergänzte, dass die Ungewissheiten, die noch in den Modellvorstellungen stecken, möglichst gut abgedeckt sind. Anschliessend unterzog sie den möglichen Einfluss von störenden Ereignissen und Prozessen einer Störfallanalyse und berechnete die Auswirkungen einer Anzahl alternativer Freisetzungsszenarien. Als zeitlich abschliessenden Basisfall untersuchte die Nagra auch die Freilegung des Lagers durch Erosion nach einigen hunderttausend Jahren. Die HSK überprüfte die wichtigsten Berechnungen der Nagra stichprobenweise.

##### 7.4.1 Hydrogeologische Modelle

Weil die tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse am Lagerstandort noch wenig bekannt sind, musste die Nagra umfangreiche Modellrechnungen durchführen, um so möglichst alle denkbaren Situationen zu erfassen. Die Arbeit wurde dadurch erschwert, dass auch noch nicht feststeht, welche Gesteinsformation unterhalb des Wirtgesteins Valanginienmergel liegt. Da es hierfür mehrere Möglichkeiten gibt, unterschied die Nagra zwei wahrscheinliche Basisfälle und verfolgte sie getrennt weiter:

- Basisfall "Kalk": Unterhalb des Wirtgesteins liegt eine durchlässige Kalkschicht (Valanginienkalke), welche eine drainierende Wirkung ausübt. Das Gebirgswasser strömt zuerst nach unten und dann horizontal der Kalkschicht entlang in den Urnersee.
- Basisfall "Schiefer": Unterhalb des Wirtgesteins liegt eine Schicht toniger Schiefer mit gleicher Durchlässigkeit wie die Mergel. Das Gebirgswasser strömt aus einem Teil des Lagers zu den Hängen über dem Urnersee. Die Nagra nimmt konservativerweise an, dass dieser kürzeste Entwässerungspfad für das ganze Lager zutrifft.

Diese beiden aus der Palette der möglichen hydrogeologischen Verhältnisse ausgewählten Entwässerungsvarianten ermöglichen eine erste Abschätzung der potentiellen Auswirkungen des Endlagers. Die HSK erwartet, dass die vorgesehenen Standortuntersuchungen zu verbesserten hydrogeologischen Kenntnissen führen, die es erlauben, die Sicherheitsanalyse eines allfälligen Ausführungsprojekts auf ein wirklichkeitsgetreueres Entwässerungsmodell abzustützen.

#### 7.4.2 Freisetzung aus dem Endlager

Falls die Zement- und Betonstrukturen in den Kavernen so gering durchlässig sind und bleiben, dass sie ein Durchströmen der Lagerkavernen verhindern, können die Radionuklide nur über die Diffusion durch das stagnierende Porenwasser aus dem Endlager gelangen. Die Freisetzung verzögert sich zusätzlich für sorbierende Nuklide, die zum grössten Teil im porösen Material festgehalten werden. Am Rand der Kavernen werden schliesslich die hinausdiffundierenden Radionuklide vom langsam vorbeiströmenden Gebirgswasser wegtransportiert. Von einer begrenzten Nuklidlöslichkeit, welche die Freisetzung weiter erniedrigen könnte, machte die Nagra - im Gegensatz zur Sicherheitsanalyse für das C-Lager - keinen Gebrauch, was für einige Nuklide konservativ sein dürfte. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Nagra ist festzustellen, dass die Gesamtheit der technischen Barrieren eine

sehr gute Schutzwirkung hat und dass sie für die nicht sorbierenden Nuklide sogar die vielleicht wichtigste Sicherheitsbarriere darstellt. Das gilt indessen nur, solange ein rein diffusiver Transport stattfindet, also die Kavernen nicht durchströmt werden; die Auswirkungen eines konvektiven Transports werden weiter unten diskutiert.

#### 7.4.3 Ausbreitung durch die Geosphäre

Die Ausbreitung der Radionuklide hängt wesentlich davon ab, wo und wie das Wasser fließt, weshalb sich hier die Ungewissheit der hydrogeologischen Kenntnisse besonders stark bemerkbar macht. Die Nagra ging davon aus, dass der Wassertransport im Valanginienmergel nur in den sogenannten Ruschelzonen stattfindet; eine seitliche Diffusion in den intakten Mergel wird nicht beansprucht. Sie nahm ferner an, dass nur im Mergel eine Sorption von Radionukliden auftritt. Die Ungewissheiten der noch wenig untersuchten Retention im Mergel berücksichtigte sie, indem sie einen realistischen und einen konservativen Datensatz für die Retentionsfaktoren verwendete. Angesichts der noch geringen Kenntnisse über die Entwässerungspfade und deren Eigenschaften beurteilt die HSK die Modellierung der Nagra für eine erste Abschätzung als zweckmässig. Die wichtigsten Parameter sind erfasst und in den Berechnungen variiert, wenn auch keine ungünstigen Parameterkombinationen untersucht wurden. Sind einmal die Entwässerungspfade besser bekannt, so sind neue Rechnungen durchzuführen. Die Rückhaltewirkung der Geosphäre ist in den Berechnungen der Nagra insgesamt eher gering, denn die nichtsorbierenden Nuklide, welche im Normalfall die Dosis bestimmen, werden nur schwach verzögert.

#### 7.4.4 Dosisberechnung

Die Nagra untersuchte den Weg der freigesetzten Radionuklide durch die Biosphäre, indem sie die Konzentration durch die je nach Basisfallvariante verschiedenen Wasserkompartimente und Nahrungsmittelpfade verfolgte und daraus die möglichen Individualdosen berechnete. Im Basisfall "Kalk" ergibt sich eine wesentlich grössere Verdünnung als im Basisfall "Schiefer", der durchwegs zu höheren Dosen führt. Die modellmässige Beschreibung des Biosphärentransports ist nach Ansicht der HSK sorgfältig und hinreichend detailliert. Die verschiedenen Varianten der Hydrogeologie, der Freisetzung aus dem Endlager, der Parameter der geosphärischen und biosphärischen Ausbreitung und der Annahmen über die Klimaentwicklung ergeben eine sehr grosse Zahl von Kombinationen, aus denen die Nagra etwa ein Dutzend für die Weiterrechnung bis zur Dosis auswählte. Darunter findet sich auch die Freisetzung aus dem Endlager durch konvektiven Transport, jedoch nur in einer einzigen Kombination; die HSK hätte es vorgezogen, wenn der konvektive Transport, den sie als möglichen Basisfall betrachtet, in mehreren Varianten durchgerechnet worden wäre.

Modellannahmen	maximale Dosen [mrem/a]
"Kalk", Basisfall	$8 \cdot 10^{-4}$
"Kalk", konservativ	$2 \cdot 10^{-2}$ ( $3 \cdot 10^{-2}$ )
"Schiefer", Basisfall	$2,2 \cdot 10^{-1}$
"Schiefer", konservativ	$2,2 \cdot 10^{-1}$ (2,4)
"Schiefer", konvektiver Transport	1,1

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Dosisberechnung für das B-Lager unter verschiedenen Modellannahmen (nach NGB 85-08)

Die Dosen der wichtigsten Varianten sind in der Tabelle 7.1 zusammengestellt. "Konservativ" heisst hier, dass der konservative Datensatz für die Retention in der Geosphäre verwendet wurde. Die Dosen in Klammern treten erst nach fast einer Million Jahre auf, wenn das Endlager gemäss den Annahmen des Erosionsszenarios bereits freigelegt sein könnte. Die anderen Dosen werden überwiegend durch das Spaltprodukt I-129 verursacht, und die Maxima treten in 1'000-10'000 Jahren auf; im Falle "Kalk", konservativ, liegt das erste Maximum bei 60'000 Jahren und wird durch Sn-126 verursacht. In allen Varianten, auch den hier nicht wiedergegebenen aber von der Nagra berechneten, ist es praktisch nur I-129, das überhaupt je in der Zeit bis zu einigen hunderttausend Jahren zu Dosen grösser als 0,1 mrem/a führt. Das Nuklid stammt fast ausschliesslich aus den Abfällen der Wiederaufarbeitung, und die HSK wies bereits in Kapitel 5.2 darauf hin, dass sein Anteil in diesen Abfällen schwanken könnte. Wenn mehr I-129 vorhanden wäre, stiege die Dosis etwa proportional; deshalb ist diesem Nuklid in zukünftigen Projekten erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen. Die Dosen der Basisfälle liegen zwar alle noch unterhalb der Schutzzielimitate von 10 mrem/a, doch ist die Sicherheitsmarge, welche die noch bestehenden Ungewissheiten und die Störfälle abdecken sollte, teilweise recht schmal. Zudem wurden noch nicht alle Kombinationen der verschiedenen Varianten, insbesondere des konvektiven Transports, durchgerechnet.

#### 7.4.5 Erosion des Endlagers

Die Erosion der Erdoberfläche kann nach genügend langer Zeit, im Falle des B-Lagers nach einigen hunderttausend Jahren, das Endlager erreichen und seinen Inhalt freilegen. Um die Auswirkungen eines solchen Vorgangs zu berechnen, nahm die Nagra an, dass die Erosion nach hunderttausend Jahren das Endlager gleichmässig abzutragen beginnt; der Lagerinhalt wird mit dem erodierten Gestein des Endlagergebiets vermischt und bildet einen landwirtschaftlich genutzten Boden, der zugleich auch Grundwasserleiter ist. Aus den Beiträgen der verschiedenen Belastungspfade ergab sich eine maximale Gesamtdosis von 13 mrem/a.

Die HSK begrüsst es, dass die Nagra dieses Szenario untersuchte, das grundsätzlich als realistisch zu bezeichnen ist. Die Ergebnisse sind allerdings nicht mehr als eine vorläufige, noch sehr grobe Abschätzung der möglichen Auswirkungen. Neben der allgemeinen, flächenhaften Erosion sind auch andere Erosionsarten zu behandeln, beispielsweise eine lokale Erosion durch Gletscher, die an einem Standort mit derart gebirgiger Topographie das Endlager rascher freilegen könnte. Ferner ist auch eine zeitlich ungleichmässige, schubweise Freilegung anzunehmen, die Dosisspitzen verursachen kann. Die HSK erwartet deshalb, dass das Erosionsszenario in einem Ausführungsprojekt umfassender untersucht wird.

Die errechnete Maximaldosis übersteigt die Limite von 10 mrem/a. Dazu sind zwei Bemerkungen nötig:

- Etwa 80 % der Dosis stammen vom Nuklid Np-237, und für dieses Nuklid liegen neuste metabolische Angaben [9] vor, welche den Dosisfaktor auf etwa einen Zehntel seines bisherigen Werts erniedrigen, sodass die Maximaldosis wieder unterhalb der Limite liegt.
- Bei den vielfältigen und komplexen Belastungspfaden, wie sie eine Freilegung des Lagers durch Erosion mit sich bringt, ist es sinnvoll, neben einer Dosisberechnung auch die freigesetzte Aktivität mit der Aktivität natürlich vorkommender Radionuklide zu vergleichen, beispielsweise der Nuklide aus dem zugleich mit dem Endlager erodierten Gestein. Die Nagra stellte einen ähnlichen Vergleich an und zeigte, dass in Trinkwasser und Boden die Nuklidkonzentrationen aus der Erosion des Endlagers geringer sind als die mittleren Konzentrationen vergleichbarer natürlicher Radionuklide.

Das Erosionsszenario wird erst abschliessend beurteilt werden können, wenn der Vorgang der Erosion unter Berücksichtigung aller Erosionsarten, welche am gegebenen Standort zu erwarten sind, vertieft modelliert ist. Die HSK schliesst nicht aus, dass die Konsequenzen des Erosionsszenarios die endgültige Wahl des Standorts beeinflussen können.

#### 7.4.6 Störfälle

Die Nagra untersuchte fünf als weniger wahrscheinlich eingestufte alternative Freisetzungsszenarien und errechnete ihre Auswirkungen. Der konvektive Fluss durch das Endlager anstelle des rein diffusiven Transports wurde bereits erwähnt. Eine weitere Variante der Freisetzung aus dem Endlager besteht darin, dass Gase das kontaminierte Porenwasser aus den technischen Barrieren austossen und so die Radionuklide rascher in fliessendes Wasser befördern. Beide Szenarien führen zu ähnlichen Dosen, die unterhalb der Limite liegen. Der Fall eines ariden Klimas, in dem die landwirtschaftlich genutzten Böden des Standortgebietes bei abgesunkenem Seespiegel intensiv mit Grundwasser bewässert werden, führt zu wesentlich höheren Dosen als der Basisfall, erfüllt aber immer noch das Schutzziel. Die HSK hält die Wahl dieser drei Szenarien für sinnvoll, und die berechneten Dosiserhöhungen relativ zu den Basisfällen scheinen ihr zutreffend zu sein. Sie wiederholt jedoch, dass sie den konvektiven Transport vorsichtigerweise als Basisfall, der mit den Störfallszenarien zu kombinieren ist, betrachtet sehen möchte.

Die beiden weiteren Störfälle betreffen die unbeabsichtigten menschlichen Eingriffe in das Endlagersystem: Das direkte Anbohren und den Tunnelvortrieb durch den Lagerbereich. In beiden Fällen errechnete die Nagra Maximaldosen oberhalb der Limite, doch gilt hier, was bereits in den Kapiteln 2.2 und 5.14 gesagt wurde, dass eine sinnvolle Beurteilung solcher Dosen nur möglich ist, wenn auch die Eintretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses mit berücksichtigt werden darf; die Beurteilung ist deshalb später nachzuholen. Nach Ansicht der HSK wurden mit diesen beiden Szenarien die wesentlichen menschlichen Eingriffe erfasst. Hingegen sind ihre Auswirkungen zum Teil noch ungenügend abgeschätzt. So genügt es nicht, beim Tunnelszenario die Strahlenbelastung des Tunnelarbeiters zu berechnen; vielmehr ist auch zu untersuchen, inwieweit beispielsweise der Tunnel den Endlagerbereich drainiert und damit neue Entwässerungsvarianten schafft, die nicht mehr den Annahmen der Basisfälle entsprechen. Die HSK erwartet, dass solche Untersuchungen nachgeholt werden, sobald die standortspezifischen Wasserfliesswege besser bekannt sind.

Andere als die erwähnten Störfälle handelte die Nagra nur knapp und qualitativ ab. Die HSK stimmt mit ihr überein, dass der mögliche Nuklidtransport durch Kolloide auch beim B-Lager ein offener Punkt ist, der in Zukunft noch untersucht werden muss. Daneben gibt es aber auch Störfälle durch natürliche Prozesse und Ereignisse, die mehr Aufmerksamkeit erheischen. Weil der Projektstandort im Gebirge liegt, können insbesondere exogene Vorgänge wie Bach- und Gletschererosion, Rutschungen und Bergstürze erhebliche Auswirkungen auf das Endlagersystem haben, die näher zu untersuchen sind.

#### 7.5 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Offene Punkte, die im Hinblick auf ein Ausführungsprojekt noch abgeklärt werden müssen, sind teilweise ähnlich jenen des C-Projekts, die in 5.16 aufgezählt worden sind (insbesondere: Wasserfliesswege, Rückhalte-mechanismen, Kolloide, Validierung der Modelle, Stollenversiegelung). Die HSK will deshalb nur drei Aufgaben hervorheben, die sich spezifisch auf das B-Lager beziehen:

- Die Eigenschaften und das langfristige Verhalten des Sonderbetons sind besser zu bestimmen; von ihnen hängt ab, ob das Gebirgswasser die Lagerkavernen durchströmen und die Nuklide mit sich forttragen kann. Die Untersuchungen sollen zeigen, ob der konvektive Transport als Basisfall für die Freisetzung aus dem Endlager ausgeschlossen werden kann.
- Das Erosionsszenario muss realistischer modelliert werden, wobei auch eine lokale und zeitlich ungleichmässige Erosion zu berücksichtigen ist.
- Die ausführliche und quantitative Störfallanalyse ist auf die exogenen Vorgänge und Ereignisse auszudehnen, die mit der Gebirgsnatur des Standorts zusammenhängen. Sie soll ferner auch untersuchen, ob und wieweit die behandelten Störfälle die Nuklidausbreitung und die Entwässerungspfade der Basisfälle ungünstig beeinflussen können. Grundlage der Störfall-

analyse muss aber eine verbesserte standortspezifische Kenntnis der Basisfälle sein.

Wie intensiv die letzten beiden Punkte zu bearbeiten sind, hängt bis zu einem gewissen Grade auch von der Abfallzuteilung ab; je mehr langlebige Abfallsorten aus der Wiederaufarbeitung für die Beseitigung im B-Lager vorgesehen sind, desto höher sind die Ansprüche an die Sicherheitsanalyse, und desto schwieriger sind die Schutzziele zu erreichen.

## 8. Gesamtbeurteilung B-Lager

Das im Rahmen des Projekts Gewähr gewählte B-Lagerprojekt bezieht sich auf den Standort Oberbauenstock, der in groben Zügen aus dem Bau des Seelisbergtunnels bekannt ist. Weiterreichende und gezielte Untersuchungen, welche die Eignung des Standorts für die Endlagerung abklären sollen, sind geplant, standen aber der Nagra bei der Ausarbeitung des Projekts nicht zur Verfügung. Die geologischen und hydrogeologischen Projektannahmen sind somit wenig abgestützt. Die Frage, ob sich dieser spezifische Standort für ein B-Lager eignet, bleibt daher offen; eine umfassende Standortbeurteilung ist aber auch nicht Gegenstand des Projekts Gewähr.

Ein B-Lager unterscheidet sich vom C-Lager in einem wesentlichen Punkt, der für die Beurteilung der Gewährsfrage wichtig ist: Abfälle, die für das B-Lager nicht geeignet sind, können im C-Lager beseitigt werden, das einen besseren Schutz bietet. Bei einem konkreten B-Lager stellt sich daher primär die Frage, für welche Abfallsorten der Sicherheitsnachweis erbracht wurde. Die Abfallzuteilung ist eine Variable der Endlagerplanung, die man - wie die HSK dies im folgenden tut - im Falle des B-Lagers den vorliegenden Sicherheitsaussagen über ein gegebenes Lagerprojekt geeignet anpassen kann.

Die Beurteilung der Sicherheit des B-Lagers richtet sich primär nach dem Schutzziel 1 (Kap. 2.2). Die Forderung von Schutzziel 2 ist eingehalten, da die Nagra in ihrer Sicherheitsanalyse nirgends Sicherheits- und Ueberwachungsmassnahmen nach dem Verschluss des Endlagers voraussetzte.

Die Sicherheitsanalyse mit dem von der Nagra zugrundegelegten Abfallinventar einschliesslich der schwach- und mittelaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ergibt für die normalerweise zu erwartende Entwicklung des Endlagersystems Strahlendosen, die je nach Annahmen um mehrere Grössenordnungen schwanken. Sie liegen unterhalb der Dosislimite des Schutzziels. Die

Sicherheitsmargen sind allerdings teilweise gering angesichts dessen, dass es noch standortbezogene Ungewissheiten gibt und dass die Störfallanalysen noch zu ergänzen sind.

Die Auswirkungen des Erosionsszenarios liegen im Bereich der Dosislimite. Sie treten erst zu einem so späten Zeitpunkt ein, dass das Szenario nur noch für die langlebigen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Bedeutung ist. Die für das Erosionsszenario berechneten Dosen sind indessen nur grobe Abschätzungen der Auswirkungen, und eine ausführlichere Bearbeitung könnte allenfalls höhere Dosen ergeben.

Untersucht man, welche Nuklide des B-Lagers die Dosen im Bereich der Schutzzellimite verursachen, so stellt man fest, dass sie ausnahmslos den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung entstammen, insbesondere den mittelaktiven Abfallsorten WA-2 und WA-6 (siehe Kap. 5.2). Die Dosen der Nuklide aus den übrigen Abfällen betragen in den Basisfällen weniger als einen Hundertstel der Dosislimite.

Die HSK ist deshalb der Meinung, dass für die nicht aus der Wiederaufarbeitung stammenden Abfälle der Nachweis der sicheren Endlagerung erbracht wurde; das gilt auch noch für die schwach  $\alpha$ -haltigen Abfälle WA-3 und WA-5, die volumenmässig gut die Hälfte der Wiederaufarbeitungsabfälle ausmachen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die kommenden Untersuchungen am schliesslich gewählten Standort Ergebnisse bringen, die nicht wesentlich in ungünstiger Richtung von den Projektannahmen abweichen.

Es ist grundsätzlich möglich, die stärker  $\alpha$ -haltigen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im C-Lager zu beseitigen, wie dies ja auch im Projekt Gewähr vorgesehen ist für die Abfallsorte WA-4, die ein ganz ähnliches Nuklidinventar hat wie die Sorten WA-2 und WA-6. Allerdings wurde im C-Projekt keine Sicherheitsanalyse für die Sorte WA-4 durchgeführt, weil dort die hochaktiven Abfälle (WA-1) potentiell weit grössere Auswirkungen haben. Insgesamt bleibt so der Sicherheitsnachweis für die Abfälle WA-2/4/6 aus der Wiederaufarbeitung noch nachzuholen. Ob dies mit einem B-Lager, einem C-Lager oder allenfalls mit einem Lager eines neuen Typs geschehen soll, wird mit

Vorteil erst entschieden, wenn für alle in Frage kommenden Lagertypen bessere standortspezifische Kenntnisse vorhanden sind.

Abschliessend empfiehlt die HSK, die weiteren Untersuchungen zum Sicherheitsnachweis eines B-Lagers direkt mit den Evaluations- und Bewilligungsverfahren für ein Ausführungsprojekt zu verknüpfen. Die Nagra hat gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die schwach- und mittelaktiven Abfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke und aus dem Bereich ausserhalb der Kernenergie sicher zu beseitigen. Die Suche nach geeigneten Standorten hat begonnen, und im Rahmen der Bewilligungsverfahren wird sich zeigen, ob ein konkretes B-Lager allenfalls auch für einige der langlebigen Abfallsorten aus der Wiederaufarbeitung taugt.

Würenlingen, 1. September 1986

HAUPTABTEILUNG FUER DIE SICHERHEIT  
DER KERNANLAGEN  
Der Direktor

*R. Naegelin*

R. Naegelin

LITERATURVERZEICHNIS

---

Projektberichte Gewähr 1985 der Nagra

(Alle Januar 1985)

- NGB 85-01      Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Uebersicht über das  
Projekt Gewähr 1985
- NGB 85-02      Radioaktive Abfälle: Eigenschaften und Zuteilung auf die  
Endlager-Typen
- NGB 85-03      Endlager für hochaktive Abfälle: Bautechnik und Betriebsphase
- NGB 85-04      Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbar-  
rieren
- NGB 85-05      Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht
- NGB 85-06      Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Bautechnik und  
Betriebsphase
- NGB 85-07      Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Das System der  
Sicherheitsbarrieren
- NGB 85-08      Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbe-  
richt

Technische Berichte der Nagra

(Nur die im Gutachten zitierten Berichte sind aufgeführt)

- NTB 84-26 Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz (Januar 1985)
- NTB 84-40 Radionuclide Sorption Database for Swiss Safety Assessment (January 1985)
- NTB 84-47 Inventar und Charakterisierung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz (Dezember 1984)
- NTB 85-01 Sondierbohrung Böttstein, Untersuchungsbericht; Textband, Beilagenband A, Beilagenband B (Juni 1985)
- NTB 85-40 Radionuclide Chain Transport in Inhomogeneous Crystalline Rocks; Limited Matrix Diffusion and Effective Surface Sorption (February 1985)

Berichte der HSK zur Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle

- ASK-E7 Schwach- und mittelaktive Abfälle in der mittelländischen Molasse; Modellstudie (Juli 1980)
- HSK-E8 Störfälle bei einem Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle in der mittelländischen Molasse; Modellstudie, 2 Bände (Dezember 1982)
- HSK-E9 Endlager für hochaktive Abfälle im kristallinen Grundgebirge; Modellstudie, 3 Bände (Januar 1985)

Technischer Bericht der HSK

HSK 23/29      Technischer Bericht zum Gutachten über das Projekt Gewähr 1985  
(erscheint Herbst 1986)

Berichte der HSK-Experten zum Projekt Gewähr

- M.O. Speidel; Beurteilung der Nagra Arbeiten zum Behälter für hochaktive Abfälle: Werkstoffwahl und Korrosion (Institut für Metallforschung und Metallurgie, ETH-Zürich; September 1985)
- H.P. Laubscher; Struktur des Grundgebirges und des Paläozoikums in der Nordschweiz (Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel; erscheint Herbst 1986)
- C. Schindler; Beurteilung der geologischen Aspekte des Gewähr-Projekts der Nagra für ein Endlager Typ B (schwach- und mittelaktive Abfälle) (Geologisches Institut/Ingenieurgeologie, ETH-Zürich; März 1986)
- P.C. Robinson, C.P. Jackson, A.W. Herbert and R. Atkinson; Review of the groundwater flow modelling of the Swiss Project Gewähr (UKAEA, Harwell, Theoretical Physics Division; February 1986)
- J. Tóth; Comments on Selected Hydrogeological Aspects of Nagra's Radioactive Waste disposal Project "Gewähr" (J. Tóth Hydrogeological Consulting Ltd.; June 1986)
- W.S. Fyfe; The Nagra Feasibility Study for the Disposal of High Level Waste in Crystalline Rocks: Review of Some Geochemical Aspects (Department of Geology, University of Western Ontario; January 1986)
- B. Fritz; Appréciation des travaux de la Cédra: Le comportement et la stabilité de la bentonite (CNRS Strasbourg, Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface; Janvier 1986)

Expertisen der Untergruppe Geologie der AGNEB

- A. Parriaux, P. Tissières, J.-J. Miserez; Projet "Garantie" 1985 de la Cédra: Appréciation des modèles hydrodynamiques du point de vue hydrogéologique (Janvier 1986)
- W. Eugster, L. Rybach; Ueberprüfung von geothermischen Angaben im Projekt Gewähr 1985 (Institut für Geophysik, ETH-Zürich; Oktober 1985)

Referenzen

- [1] Nagra; Ueberlegungen zur Ausdehnung geeigneter kristalliner Wirtgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Nordschweiz (Vorläufiger Vorabdruck, Dezember 1985)
- [2] Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung; Definition des Projekts "Gewähr" (AGNEB-150). Beilage III zum vierten Tätigkeitsbericht der Arbeitsgruppe (Bundesamt für Energiewirtschaft; Mai 1982)
- [3] Eidg. Kommission für die Sicherheit der Atomanlagen, Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen; Richtlinie für Kernanlagen R-21: Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Oktober 1980)
- [4] International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 46: Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste (Pergamon Press; 1985)
- [5] Verband schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und -projektanten (GKBP), Konferenz der Ueberlandwerke (UeW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra); Konzept für die nukleare Entsorgung in der Schweiz (9. Februar 1978)

- [6] Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS; Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3 (May 1983)
  
- [7] Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle unter dem Meeresboden der Tiefsee: Das internationale Seabed-Disposal Programm und die Stellung der Schweiz (Bericht einer ad hoc Arbeitsgruppe des Bundesamtes für Energiewirtschaft; Januar 1984)
  
- [8] Nagra; Beantwortung der KSA-Fragen vom 16.8.1985 (Brief mit Beilage vom 30.9.1986 an die KSA)
  
- [9] International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 48: The Metabolism of Plutonium and Related Elements (Pergamon Press; 1986)