

Entsorgung radioaktiver Abfälle

ISBN 92-64-02064-0

**Die Sicherheit der geologischen  
Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA  
in der Schweiz**

**Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen  
Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung  
im Opalinuston des Zürcher Weinlands**

© OECD 2004  
NEA No. 5569

NUCLEAR ENERGY AGENCY  
ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT

## **ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT**

Pursuant to Article 1 of the Convention signed in Paris on 14th December 1960, and which came into force on 30th September 1961, the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) shall promote policies designed:

- to achieve the highest sustainable economic growth and employment and a rising standard of living in member countries, while maintaining financial stability, and thus to contribute to the development of the world economy;
- to contribute to sound economic expansion in member as well as non-member countries in the process of economic development; and
- to contribute to the expansion of world trade on a multilateral, non-discriminatory basis in accordance with international obligations.

The original member countries of the OECD are Austria, Belgium, Canada, Denmark, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, the Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, the United Kingdom and the United States. The following countries became members subsequently through accession at the dates indicated hereafter: Japan (28th April 1964), Finland (28th January 1969), Australia (7th June 1971), New Zealand (29th May 1973), Mexico (18th May 1994), the Czech Republic (21st December 1995), Hungary (7th May 1996), Poland (22nd November 1996); Korea (12th December 1996) and the Slovak Republic (14th December 2000). The Commission of the European Communities takes part in the work of the OECD (Article 13 of the OECD Convention).

## **NUCLEAR ENERGY AGENCY**

The OECD Nuclear Energy Agency (NEA) was established on 1st February 1958 under the name of the OEEC European Nuclear Energy Agency. It received its present designation on 20th April 1972, when Japan became its first non-European full member. NEA membership today consists of 28 OECD member countries: Australia, Austria, Belgium, Canada, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Japan, Luxembourg, Mexico, the Netherlands, Norway, Portugal, the Republic of Korea, the Slovak Republic, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, the United Kingdom and the United States. The Commission of the European Communities also takes part in the work of the Agency.

The mission of the NEA is:

- to assist its member countries in maintaining and further developing, through international co-operation, the scientific, technological and legal bases required for a safe, environmentally friendly and economical use of nuclear energy for peaceful purposes, as well as
- to provide authoritative assessments and to forge common understandings on key issues, as input to government decisions on nuclear energy policy and to broader OECD policy analyses in areas such as energy and sustainable development.

Specific areas of competence of the NEA include safety and regulation of nuclear activities, radioactive waste management, radiological protection, nuclear science, economic and technical analyses of the nuclear fuel cycle, nuclear law and liability, and public information. The NEA Data Bank provides nuclear data and computer program services for participating countries.

In these and related tasks, the NEA works in close collaboration with the International Atomic Energy Agency in Vienna, with which it has a Co-operation Agreement, as well as with other international organisations in the nuclear field.

### **© OECD 2004**

Permission to reproduce a portion of this work for non-commercial purposes or classroom use should be obtained through the Centre français d'exploitation du droit de copie (CCF), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, Tel. (33-1) 44 07 47 70, Fax (33-1) 46 34 67 19, for every country except the United States. In the United States permission should be obtained through the Copyright Clearance Center, Customer Service, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA, or CCC Online: <http://www.copyright.com/>. All other applications for permission to reproduce or translate all or part of this book should be made to OECD Publications, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

## VORWORT

Im Rahmen des Projektes Entsorgungsnachweis hat die schweizer Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) eine Langzeitsicherheitsanalyse für die geologische Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen (BE), verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) im Opalinuston im Zürcher Weinland im Norden der Schweiz vorgelegt. Gegenstand der Langzeitsicherheitsanalyse ist der Sicherheitsnachweis. Dieser wird ergänzt durch einen Standortnachweis und einen Nachweis der bautechnischen Machbarkeit. Diese drei Teile bilden zusammen den Entsorgungsnachweis, der die Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz nachweisen soll.

Auf Ersuchen des Schweizer Bundesamtes für Energie (BFE) hat die Kernenergieagentur (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit (OECD) eine internationale Expertenprüfung der Nagra-Langzeitsicherheitsanalyse vorgenommen. Das Hauptziel dieser Expertenprüfung war eine unabhängige Bewertung der Qualität der von der Nagra vorgelegten Langzeitsicherheitsanalyse aus internationaler Sicht. Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse dieser Expertenprüfung, die von einer internationalen Gruppe („International Review Team“ – IRT) aus neun anerkannten Experten durchgeführt wurde. Die Mitglieder der Gruppen, darunter auch unter zwei Mitarbeiter des NEA-Sekretariates, ergänzten sich gegenseitig hinsichtlich ihrer Expertise für diese Untersuchung.

Hauptgegenstand der Expertenprüfung war der Nagra-Sicherheitsbericht (Nagra Technischer Bericht NTB 02-05). Die Informationen in diesem Sicherheitsbericht sowie in mehreren Zusatzdokumenten, schriftliche Antworten der Nagra auf ebenfalls schriftlich eingereichte Fragen des Expertenteams und zwei Treffen mit Diskussionen mit Nagra-Mitarbeitern, von denen eines auch eine Begehung des Mont Terri-Felslabors beinhaltete, bildeten die Basis für die Urteile und Empfehlungen des internationalen Expertenteams.

In der Durchführung der Expertenprüfung war sich die internationale Expertengruppe im Klaren, dass das Projekt Entsorgungsnachweis nur ein

Meilenstein in einem schrittweisen Entscheidungsprozess ist, und dass jegliche Entscheidung hinsichtlich eines Standortes und weiterhin hinsichtlich des Baus eines Lagers weit in der Zukunft liegt.

Die Expertengruppe hat sich bemüht sicherzustellen, dass alle Informationen in diesem Bericht richtig und vollständig sind, und in Übereinstimmung mit dem gängigen Verfahren für von der NEA organisierte Expertenprüfungen wurde der Nagra Gelegenheit gegeben, den abschliessenden Entwurf dieses Berichtes hinsichtlich einer korrekten Darstellung sachlicher Gegebenheiten zu kommentieren. Alle evtl. verbliebenen Fehler in der Darstellung sachlicher Gegebenheiten liegen in der Verantwortung der internationalen Expertengruppe.

Die vorliegende deutsche Version des Berichtes ist eine Übersetzung des englischen Originalberichtes, der unter dem Titel „Safety of Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-lived ILW in Switzerland“ von der OECD/NEA veröffentlicht wurde. In Zweifelsfällen sind die Aussagen des englischen Originalberichts massgebend.

## **DANKSAGUNG**

Die Mitglieder der internationalen Expertengruppe möchten der Nagra für ihre Offenheit und Hilfe bei der Durchführung der Expertenprüfung danken, sowie für die Gastfreundschaft und ausgezeichnete organisatorische Unterstützung, die ihre Arbeit sehr erleichterte. Ebenso hat die internationale Expertengruppe dankbar die Möglichkeit wahrgenommen, während ihrer Tätigkeit das Felslabor Mount Terri besichtigen zu können.

## INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT.....	3
ZUSAMMENFASSUNG.....	7
1. EINFÜHRUNG.....	21
1.1 Hintergrund .....	21
1.2 Projekt Entsorgungsnachweis .....	22
1.3 Die internationale Expertenprüfung .....	23
1.4 Durchführung der Expertenprüfung .....	25
1.5 Aufbau des Berichts .....	26
2. DAS SCHWEIZERISCHE KONZEPT DER KONTROLLIERTEN GEOLOGISCHEN LANGZEITLAGERUNG .....	29
2.1 Internationaler Vergleich.....	29
2.2 Bewertung des Nagra-Konzeptes .....	30
3. BEWERTUNG DES SICHERHEITSNACHWEISES DER NAGRA ...	35
3.1 Allgemeine Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit.....	35
3.2 Verwendete Methode für den Aufbau des Sicherheitsnachweises und für die Durchführung der Sicherheitsanalyse .....	39
3.3 Die Dokumentation des Sicherheitsnachweises .....	53
3.4 Qualitätssicherung.....	55
4. BEWERTUNG DER KOMPONENTEN UND PROZESSE DES MEHRFACHBARRIERENSYSTEMS .....	59
4.1 Charakterisierung des geologischen Umfelds .....	59
4.2 Inventar und Quellterme.....	63
4.3 Barrieren und Prozesse im Nahfeld.....	65
4.4 Verhalten und Charakterisierung der Opalinuston-Barriere.....	79
4.5 Gasproduktion und -transport.....	83
4.6 Verhalten der Rahmengesteine.....	85

4.7	Potenzielle Auswirkungen der Lagerauslegung und -entwicklung auf die Langzeitsicherheitsanalyse.....	87
4.8	Analyse der Systementwicklung und der Zeitskalen.....	88
4.9	Behandlung der Biosphäre .....	90
4.10	Interaktion zwischen dem IRT und der Nagra .....	92
5.	DIE WICHTIGSTEN AUSSAGEN.....	95
5.1	Aussagen aus der Perspektive der Ziele des Nagra-Sicherheitsberichts .....	95
5.2	Aussagen aus der Perspektive des Pflichtenhefts des IRT .....	98
6.	REFERENZEN .....	101
<i>ANHANG 1: VERGLEICH DES SICHERHEITSNACHWEISES DER NAGRA MIT BEISPIELEN VON GRUNDSÄTZEN UND GUTER PRAXIS GEMÄSS DEM NEA CONFIDENCE DOCUMENT (NEA 1999) .....</i>		
		109
<i>ANHANG 2: AUSZUG AUS DEM PFLICHTENHEFT BEZÜGLICH UMFANG UND ZIELE DER EXPERTENPRÜFUNG .....</i>		
		127
<i>ANHANG 3: MITGLIEDER DER INTERNATIONALEN EXPERTEN-GRUPPE (IRT).....</i>		
		129
<i>ANHANG 4: ABKÜRZUNGEN .....</i>		
		138

## ZUSAMMENFASSUNG

### **Einleitung**

Die von der schweizer Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) durchgeführte Analyse der radiologischen Langzeitsicherheit der geologische Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen (BE), verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) im Opalinuston im Zürcher Weinland im Norden der Schweiz ist einer internationalen Expertenprüfung unterzogen worden. Die Sicherheitsanalyse der Nagra ist ein Teil des Projekts Entsorgungsnachweis, das sich mit dem Standortnachweis, dem Nachweis der bautechnischen Machbarkeit und dem Nachweis der Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung in der Schweiz befasst. Die NEA hat die Expertenprüfung in die Wege geleitet, nachdem sie vom Bundesamt für Energie (BFE) eine entsprechende Anfrage erhalten hatte.

Der vorliegende Bericht ist das Resultat der rund sieben Monate dauernden Arbeit einer internationalen Expertengruppe („International Review Team“ - IRT) mit neun Mitgliedern. Hauptziel der Expertenprüfung ist die unabhängige Bewertung der Qualität der Langzeitsicherheitsanalyse der Nagra aus internationaler Sicht. Der Schwerpunkt der Expertenprüfung ist der Sicherheitsbericht (NTB 02-05) der Nagra. Die Feststellungen und Empfehlungen des IRT beruhen auf Informationen im Sicherheitsbericht und unterstützenden Dokumenten, schriftlichen Antworten der Nagra auf schriftlich gestellte Fragen des IRT sowie auf persönlichen Gesprächen der IRT Mitglieder mit Nagra-Mitarbeitern während zweier Treffen, von denen das eine einen Besuch des Felslabors Mont Terri einschloss.

Das IRT hat bei seiner Expertenüberprüfung berücksichtigt, dass das Projekt Entsorgungsnachweis nur ein Schritt im stufenweisen Entscheidungsprozess ist und der Standortentscheid sowie der Bau des Tiefenlagers noch weit in der Zukunft liegen.

## **Die wichtigsten Aussagen**

### ***Zum Sicherheitsbericht allgemein***

Das IRT ist beeindruckt von der Überzeugungskraft und Qualität des von der Nagra erstellten Sicherheitsnachweises für die geologische Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlands. Nach Ansicht des IRT beruht der Sicherheitsnachweis generell auf einer soliden wissenschaftlichen Basis mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen quantitativen und qualitativen Argumenten. Auf mehreren Gebieten ist die Sicherheitsanalyse an vorderster Front der Wissenschaft – beispielsweise in der Geochemie und bei der Analyse der Brennstoffauflösung. Die im Sicherheitsnachweis aufgeführten relevanten Phänomene und die wissenschaftliche Argumentation sind in den unterstützenden Dokumenten generell gut beschrieben.

Im Sicherheitsbericht beschreibt die Nagra deutlich und klar die Ziele und Grundsätze bezüglich:

1. der geologische Tiefenlagerung im Allgemeinen;
2. des schrittweisen Vorgehes bei der Lagererstellung;
3. der Sicherheitsfunktionen des Lagersystems;
4. der Vorgehensweise, umfassende Sicherheit und Robustheit zu erreichen;
5. der Standortwahl, Auslegung und Erstellung des Tiefenlagers;
6. der Sicherheitsanalyse und zugehörigen Dokumentation.

Diese Ziele und Prinzipien zeigen, dass die Nagra einer Art der Realisierung der Entsorgung verpflichtet ist, die flexibel ist, Langzeitsicherheit gewährleistet und gleichzeitig den Bedürfnissen und Werten der schweizerischen Gesellschaft Rechnung trägt.

### ***Zum Entsorgungskonzept der Nagra***

Die Nagra hat die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers bewertet, das etwa 650 m unter der Oberfläche im Opalinuston des Zürcher Weinlands liegt. Passive Sicherheit wird durch den Einsatz mehrfacher Barrieren erreicht, die den Abfall einschliessen und dafür sorgen, dass die künftige Strahlenexposition infolge eventuell freigesetzter Radionuklide unter dem Schutzziel bleibt. Das IRT stellt fest, dass die Verwendung von mehrfachen Barrieren mit Entsorgungskonzepten anderer Länder übereinstimmt.

Es ist vorgesehen, dass eine Realisierung vorsichtig und schrittweise erfolgt. Der Einlagerung der Abfälle würde eine ausgedehnte Beobachtungsperiode folgen, während der eine Rückholung der Abfälle verhältnismässig einfach möglich ist. Wie die von der Schweizer Regierung einberufene Arbeitsgruppe EKRA vorschlägt, ist zusätzlich der Bau eines Test- und eines Pilotlagers vorgesehen. Periodische Überprüfungen würden die Reversibilität von Entscheidungen und sogar die Rückholung der Abfälle erlauben. Das IRT betrachtet dieses Vorgehen als vorsichtig und im Einklang mit dem Vorgehen in mehreren anderen Ländern.

Die Abfälle sollen in horizontalen Lagerstollen und -tunneln eingelagert werden, die anschliessend mit Bentonit versiegelt werden. Die Tunnel für LMA sind räumlich von den Stollen für BE und HAA getrennt, um ungünstige geochemische oder physikalische Wechselwirkungen zu vermeiden. Auch sollen für LMA mehrere separate Lagertunnel gebaut werden – einer für LMA, die organische Verbindungen enthalten, die anderen für LMA, die ausschliesslich inorganisches Material enthalten. Das IRT beurteilt diese Aufteilung der Abfälle auf verschiedene Lagerteile als eine gute Sicherheitsmassnahme.

Die Lagerstollen für HAA und BE würden je nach Bedarf erstellt, die angelieferten Abfälle eingelagert und die Stollen laufend verfüllt und versiegelt, so dass ein bestimmter Stollen höchstens während zwei Jahren offen bliebe. Nach der Einlagerung aller Abfälle im Hauptlager würde die Zugangsrampe während einer ausgedehnten Überwachungsperiode offen bleiben, während die Zugangstunnel und der Lüftungsschacht versiegelt würden, um langfristige passive Sicherheit selbst dann zu gewährleisten, wenn der Verschluss der Zugangsrampe schliesslich nicht wie geplant vorgenommen würde. Der Fall, dass das Lager ohne Versiegelung der Zugangswege bleibt, wurde in die Sicherheitsbewertung einbezogen. Das IRT betrachtet diese Strategie der Abfalleinlagerung und die Verwendung von mehrfachen Versiegelungen zur Unterteilung in Kompartimente und zur Isolierung der einzelnen Abfallgebinde als machbar und vorsichtig.

### ***Zur Sicherheitsanalyse***

Das IRT ist generell der Ansicht, dass die Nagra ein vernünftiges und praktikables Lagerkonzept vorgelegt hat, welches auf einer spezifischen Umsetzung des Mehrfachbarrierenkonzepts beruht. Die Sicherheitsanalyse berücksichtigt die wichtigen Aspekte und Ungewissheiten und zeigt ein solides Verständnis des Verhaltens des Gesamtsystems sowie des Verhaltens der einzelnen Barrieren. In der Modellierung des Systems wurde eine geeignete

Kombination von deterministischen und probabilistischen Ansätzen verwendet. Die Funktionsweise des Systems wurde durch die Analyse seiner erwarteten Entwicklung klar dargestellt und mit speziell zu diesem Zweck entwickelten Modellen zum Aufbau von Systemverständnis verdeutlicht.

Der FEP-Managementprozess (FEP: **F**eatures, **E**vents, **P**rocesses; d.h. die für das Lagersystem relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse) wurde wirkungsvoll eingesetzt um sicherzustellen, dass alle einschlägigen Prozesse und Phänomene in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden. Damit hat die Nagra auf überzeugende Weise die Wirksamkeit dieses Werkzeugs aufgezeigt. Das IRT stellt ausserdem fest, dass die Einführung der so genannten „Reserve-FEPs“, die in der Zukunft berücksichtigt werden können, sehr hilfreich ist und das Vertrauen in die Sicherheitsanalyse stärkt.

Durch die Analyse gut gewählter Rechenfälle wird eine breite Palette von Ungewissheiten berücksichtigt. Die Ungewissheiten werden durch Variation der Parameterwerte innerhalb der entsprechenden Bandbreiten und durch verschiedene Modellannahmen abgedeckt. Obschon nicht mit absoluter Sicherheit nachgewiesen werden kann, dass es keinerlei unberücksichtigte Ungewissheiten gibt, die das Systemverhalten irgendwie beeinträchtigen könnten, zeigt die Nagra überzeugend auf, dass dies jedoch höchst unwahrscheinlich ist.

Das IRT stellt fest, dass wegen der sehr günstigen Eigenschaften des Opalinustons eine grosse Bandbreite von Ungewissheiten im Verhalten der technischen Barrieren und der Abfallmatrizen toleriert werden kann, ohne damit die Sicherheit eines Tiefenlagers im Opalinuston in Frage zu stellen. Gleichwohl empfiehlt das IRT der Nagra, die wichtigsten Elemente eines robusten Systems von technischen Barrieren beizubehalten und ihre Arbeiten zur Verringerung von Ungewissheiten fortzuführen.

Die Nagra hat auch so genannte „Was wäre wenn?“-Rechenfälle analysiert. Diese Fälle stellen Situationen dar, die ausserhalb des Bereichs liegen, der durch wissenschaftliche Beobachtungen gestützt wird. Das IRT stellt fest, dass die von der Nagra untersuchten „Was wäre wenn?“-Rechenfälle für die Bildung von Vertrauen in die Robustheit des Sicherheitsnachweises eine gute zusätzliche Stütze bilden. Auch sind die Aufsichtsbehörden und die Öffentlichkeit an solchen „Was wäre wenn?“-Rechenfällen interessiert. Ihre erfolgreiche Anwendung beruht weitgehend auf dem ausgezeichneten Rückhaltevermögen des Opalinustons; dieser Sachverhalt verleiht dem Sicherheitsnachweis der Nagra zusätzliches Gewicht.

Die Nagra erkennt an, dass die Auswahl der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle subjektiv und demnach etwas beliebig ist. So hat die Nagra festgehalten, dass die „Was wäre wenn?“-Rechenfälle die Auswirkung von Störungen auf Schlüsseigenschaften der „Pfeiler der Sicherheit“ untersuchen, dass aber zwischen den „Was wäre wenn?“-Rechenfällen und den „Pfeilern der Sicherheit“ keine eindeutige Zuordnung besteht. Für die Zukunft wäre es hilfreich, wenn die Nagra klarere Kriterien für die Auswahl der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle aufstellen würde.

### ***Zum Opalinuston im Zürcher Weinland***

Bei der Sicherheitsanalyse eines jeden Mehrfachbarrierensystems müssen die Eigenschaften des Standorts und die Auslegung des Lagers berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang, und auch weil das Projekt Entsorgungsnachweis einen Standortnachweis enthält, hat sich das IRT besonders mit der Arbeit der Nagra zur Charakterisierung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Opalinustons auseinandergesetzt. Das IRT ist sich bewusst, dass die Schweizer Behörden eine eigene Überprüfung der geologischen Kenntnisse zum Standort vornehmen werden: Das IRT hat die Arbeit der Nagra zur Standort-Charakterisierung aus der Sicht des Langzeitsicherheitsnachweises betrachtet.

Nach Ansicht des IRT hat die Nagra einen belastbaren Nachweis vorgelegt, basierend auf vielen verschiedenen Argumenten, wonach der Opalinuston im Zürcher Weinland ein geeignetes Wirtgestein ist. Es handelt sich um ein dichtes, selbstabdichtendes Material, das ausgeprägte Fähigkeiten bzgl. Isolation, Rückhaltung, Verzögerung und Dispersion von Radionukliden besitzt, die aus einem darin befindlichen Tiefenlager freigesetzt werden könnten. Untersuchungen an natürlichen Analoga, Labor- und Feldexperimente sowie theoretische Analysen erhärten diesen Befund.

Die von der Nagra zur Charakterisierung der geologischen Lage und der Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland verwendeten Techniken und Methoden entsprechen den gebräuchlichen geologischen Praktiken. Die Schlussfolgerungen werden durch mehrfache Argumentationsketten gestützt, die im Geosynthesebericht (NTB 02-03) dargestellt werden – einem zentralen Referenzbericht zum Sicherheitsnachweis.

Nach Ansicht des IRT ist das geometrische Modell des Opalinustons im Zürcher Weinland wissenschaftlich gut fundiert. Aufgrund des vorgelegten Materials erscheint es dem IRT als vernünftig, den Opalinuston des Zürcher Weinlands in der Sicherheitsanalyse als eine homogene Schicht zu behandeln. Vernünftig ist auch die Schlussfolgerung, dass die sicherheitsrelevanten

Eigenschaften auf eine grosse Region extrapoliert werden können. Diese Eigenschaften wurden aus der Sondierbohrung Benken und aus vielen weiteren Untersuchungen im Opalinuston, darunter andere Tiefbohrungen und Arbeiten im Felslabor Mont Terri, abgeleitet.

Im Tiefenlager wird, infolge von Eisenkorrosion und Abbau von Organika, die sich in einigen Abfallbinden befinden, Gas gebildet. Die Nagra hat die Auswirkungen dieser Gasproduktion bewertet. Die Gasfreisetzung aus der Tonformation ist eine der zentralen Fragen bei der Lagerung von Abfällen in einer gering durchlässigen Formation, wie sie der Opalinuston darstellt. Das IRT stellt fest, dass die Prozesse, die die Gasmigration durch gering durchlässige Formationen bestimmen, kompliziert sind, und dass das Verständnis solcher Prozesse nicht vollständig ausgereift sind. Die Nagra ist sich dessen bewusst und trägt mit sorgfältig ausgesuchten und gut ausgerichteten Untersuchungen zum weiteren Fortschritt auf diesem Gebiet bei. Die Nagra verfolgt die Entwicklungen in anderen Entsorgungsprogrammen und in der entsprechenden Sparte der Wissenschaft.

Die Nagra hat in den letzten Jahren im Verständnis der Gasmigration bedeutende Fortschritte gemacht, und die Gasthematik findet in der gegenwärtigen Projektphase ausreichende Beachtung. Die Nagra wird ermutigt, ihre theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Gastransportprozesse fortzusetzen.

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

### ***Zu den technischen Barrieren und Abfallmatrizen für BE und HAA***

Das IRT stellt fest, dass das System der technischen Barrieren für die geologische Tiefenlagerung allgemein einen Behälter, eine dauerhafte Abfallmatrix und üblicherweise eine Verfüllung umfasst. Die Behälter für BE und HAA sind dazu ausgelegt, die Freisetzung von Radionukliden während Tausenden von Jahren zu verhindern. Die Abfallmatrix begrenzt die Radionuklid-Freisetzungsraten nach dem Versagen der Behälter. Mit seinen Abdichtungs- und Rückhalteeigenschaften isoliert das Verfüllmaterial die Behälter untereinander und vom Wirtgestein. Das IRT findet, dass

- das von der Nagra vorgeschlagene Lagerkonzept all diese Eigenschaften umfasst;
- die Auslegung der Stahlbehälter für BE und HAA den vollständigen Einschluss der Radionuklide für mindestens 10 000 Jahre gewährleistet, mit der möglichen Ausnahme einiger weniger fehlerhafter Behälter, z.B. solchen mit schwachen Schweißnähten;
- der Kupferbehälter eine sinnvolle Alternative zum Stahlbehälter darstellt;
- BE und verglaste HAA dauerhafte Abfallmatrizen sind, die sich sehr langsam auflösen und die Radionuklide unter den im Tiefenlager erwarteten Bedingungen nur sehr langsam abgeben (d.h. während zehn- bis hunderttausenden von Jahren oder sogar noch länger für abgebrannte Brennelemente);
- in der Auslegung der Nagra die Bentonitverfüllung nicht nur ein günstiges chemisches Umfeld schafft und eine starke Einschlussbarriere bildet, die gleichzeitig auch den Abtransport der von den Abfällen produzierten Wärme gewährleistet, sondern auch einen gut verstandenen Mechanismus (Quell-Eigenschaft) zur Selbstabdichtung der die Lagerstollen umgebenden Auflockerungszone darstellt.

Die abgebrannten Brennelemente steuern den grössten Beitrag zum Quellterm bei, da sie 85 % des gesamten Aktivitätsinventars im Lager umfassen. Die Vorgehensweise der Nagra ist im Einklang mit dem international verfolgten Ansatz, zwei Komponenten zu untersuchen: (a) die anfängliche, rasche Freisetzung mobiler Elemente aus dem Brennstoff und (b) die langsame Freisetzung von Uran und anderen Elementen im Gleichschritt mit der Auflösung der Brennstoffmatrix. Das IRT stellt fest, dass das Systemverständnis der Nagra im Bezug auf das Verhalten der abgebrannten Brennelemente unter Lagerbedingungen führend im Stand der Wissenschaft ist.

Das IRT anerkennt, dass die Auflösung von verglasten HAA unter Lagerbedingungen komplex ist und dass das mechanistische Verständnis dieser Prozesse noch nicht vollständig ausgereift ist. Andererseits enthalten verglaste HAA nur ein geringes Inventar an mobileren Radionukliden. Sehr konservative Analysen zeigen, dass das Entsorgungssystem genügend robust ist, um Ungewissheiten der Glasauflösungsrate zuzulassen. Trotz der Ungewissheiten hält das IRT fest, dass Glas eine dauerhafte Abfallmatrix darstellt und dass der Auflösungsprozess über sehr lange Zeiträume (einige zehn- bis hunderttausende

von Jahren) stattfindet. Es ist deshalb angemessen, dass die Nagra die Glasmatrix als wichtige Barriere im Mehrfachbarrierensystem betrachtet.

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

### ***Zu den LMA***

Die LMA werden in Tunnels eingelagert und mit zementhaltigem Mörtel verfüllt. Die Nagra hat die Auswirkungen der folgenden Prozesse betrachtet: Strahlung, Temperaturentwicklung, Gasproduktion (von eisenhaltigen und organischen Materialien), Tunnelkonvergenz, Porenwasserchemie und, am wichtigsten, die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne auf die Eigenschaften des Opalinustons. Potenziell oxidierende Bedingungen, zurückzuführen auf chemische Reaktionen von Nitrat in einigen LMA-Gebinden, wurden ebenfalls in geeigneter Weise berücksichtigt, indem spezielle, für diese oxidierenden Bedingungen abgeleitete Sorptions- und Löslichkeitswerte zur Anwendung gelangten. Die physische Trennung der LMA einerseits in verschiedenen Tunnels und andererseits abgesondert von den BE/HAA-Stollen ist ein wichtiges Auslegungsmerkmal, welches die Auswirkungen allfälliger Ungewissheiten infolge chemischer Prozesse oder Gasproduktion im LMA-Nahfeld verringern würde.

Für das sicherheitsrelevante Verhalten der LMA wählt die Nagra ein einfaches Vorgehen, indem sie von der Annahme ausgeht, dass die

Radionuklidfreisetzung nicht vor Ablauf von 100 Jahren nach der Einlagerung erfolgt. Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt alle Radionuklide entweder im Porenwasser gelöst sind oder aber als Festphase (d.h. sorbiert an der Festphase oder ausgefällt) auftreten. Angesichts der Komplexität der Abfallmatrizen und des geringen Inventars von Radionukliden betrachtet das IRT die gewählte Methode als konservativ, angemessen und im Einklang mit anderen nationalen Programmen.

### ***Zur bautechnischen Machbarkeit***

Das IRT hat die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands nicht bewertet, ist sich jedoch keines wichtigen Umstands bewusst, der diese Machbarkeit in Frage stellen könnte. Das IRT geht deshalb davon aus, dass der Bau des Lagers die günstigen Eigenschaften des Opalinustons nicht in signifikanter Weise beeinträchtigt. Gleichzeitig weist das IRT auf die wichtige Rolle von Felslabors wie jenem im Mont Terri und von Versuchsanlagen unter Tag an einem vorgesehenen Standort eines Tiefenlagers hin. Diese besteht darin, grossmasstäbliche Untersuchungen zur Bewertung und/oder zum Nachweis besonderer technischer Eigenschaften von verschiedenen Auslegungsvarianten vorzunehmen, um nachzuweisen, dass die entscheidenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Tiefenlagers erhalten bleiben.

### ***Zu den Rahmengesteinen***

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

Weitere Untersuchungen der Eigenschaften der Rahmengesteine würden mehrere Zwecke erfüllen. Als erstes könnte damit das Verständnis der Transportpfade in die Biosphäre verbessert werden, insbesondere der horizontale Transport durch die höherdurchlässigen Schichten. Als zweites würde dies der Nagra erlauben, die Barrierenfunktion der Rahmengesteine in die Referenzkonzeptualisierung mit einzubeziehen. Drittens müssen die Rahmengesteine für die Auslegung und die technischen Arbeiten in

ausreichendem Masse charakterisiert werden, um zu gewährleisten, dass der Lagerbau gefahrlos durch diese Schichten vorangetrieben werden kann.

### ***Zur Biosphäre***

Die Nagra verwendet einen konventionellen Ansatz für die Biosphärenmodellierung, beruhend auf Kompartimenten und Transferkoeffizienten zur Modellierung des Schadstofftransports in der Biosphäre und zur Dosisberechnung für Personen der kritischen Bevölkerungsgruppe. Ungewissheiten in Bezug auf das Klima und zukünftige menschliche Tätigkeiten wird mit stilisierten Modellannahmen zur Biosphäre Rechnung getragen. Bei diesen stilisierten Modellannahmen ist es wichtig zu beachten, dass die berechneten Dosen als Sicherheitsindikatoren und nicht als genaue Voraussage der erwarteten Konsequenzen betrachtet werden sollten.

In der Modellierung der Biosphäre wird eine erhebliche Verdünnung in oberflächennahem Wasser angenommen, um Dosen aufgrund der Freisetzung von Radionukliden in die Umwelt zu berechnen. Das IRT betrachtet die Verdünnungsfaktoren als hinreichend begründet, hält aber fest, dass die berechneten Dosen umgekehrt proportional zum Verdünnungsvolumen sind. Sollte das Verdünnungsvolumen mit bedeutenden Fehlern behaftet sein, würden sich die berechneten Dosen entsprechend ändern. Auch wenn das Verdünnungsvolumen kleiner wäre, lägen die berechneten Dosen in Anbetracht des grossen Abstands zwischen den berechneten Dosen aller Wahrscheinlichkeit nach unterhalb des behördlichen Schutzziels.

### ***Zur Dokumentation***

Das IRT kommt zum Schluss, dass die Nagra ihren Entsorgungsnachweis in hervorragender Weise dokumentiert hat, angefangen mit einer klaren Darstellung der Ziele und Prinzipien für den Entsorgungsnachweis und seine Dokumentation. Wie schon in früheren komplexen Bewertungen von geologischen Tiefenlagern werden die Hauptargumente im Sicherheitsbericht aufgeführt, wobei im Text auf unterstützende Dokumente hingewiesen wird.

Im Sicherheitsbericht beginnt jedes Kapitel mit einer Einleitung, die aufzeigt, welche Art von Informationen präsentiert werden und wo sie in der gesamten Bewertung ihren Platz haben. Aufeinanderfolgende Kapitel stellen das vorgeschlagene Lagersystem vor, erörtern und bewerten es. Der Aufbau ist logisch, die Darstellung hervorragend, der Text klar und bemerkenswert fehlerfrei. Der Sicherheitsnachweis beruht auf einer guten Mischung von

quantitativen Daten und qualitativen Argumenten. Allgemein handelt es sich bei dem Sicherheitsbericht und seinen unterstützenden Berichten um Dokumente von sehr hoher Qualität.

Der gewählte Aufbau ist allerdings nicht perfekt. Die von der Nagra für den Sicherheitsbericht gewählte Vorgehensweise bedeutet beispielsweise, dass ein bestimmtes Thema üblicherweise in mehreren Kapiteln behandelt wird. Der Bericht ist deshalb etwas zerstückelt und repetitiv. Allgemein gesehen ist die Nachvollziehbarkeit dennoch gut und der Leser kann die Argumente verfolgen vom Sicherheitsbericht zu den Detailinformationen, zu den Rechenprogrammen und Daten in den untergeordneten Dokumenten. In einzelnen Fällen enthält der Hauptbericht jedoch unbelegte Aussagen ohne Hinweise auf Dokumente einer tieferen Ebene. Das IRT vertritt die Ansicht, dass die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit in Zukunft verbessert werden könnten, indem die Nagra eine standardisierte Methode benützen würde um sicherzustellen, dass im Sicherheitsbericht – vor allem bei umstrittenen Aussagen – klare Hinweise auf detaillierte Erklärungen in unterstützenden Dokumenten zu finden sind.

Das Zielpublikum für den Sicherheitsbericht scheinen Spezialisten und Sicherheitsbehörden zu sein, nicht das breite Publikum. Das IRT ist der Ansicht, dass für viele Leser eine Kurzfassung des Entsorgungsnachweises (inkl. Geosynthese und Anlagen- und Betriebskonzept) von etwa 50 bis 60 Seiten sehr nützlich wäre.

Das IRT stellt fest, dass der Sicherheitsbericht im Detail nicht alle Elemente eines expliziten so genannten „statement of confidence“ enthält, wie es von der NEA empfohlen wird. Eine prägnante Zusammenfassung der Gründe, weshalb die Nagra ein hohes Mass an Vertrauen in die Sicherheit eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlands hat, wurde vorgelegt. Die Nagra benennt und untersucht Ungewissheiten im ganzen Sicherheitsbericht, doch ordnet sie diese in der Zusammenfassung nicht nach Prioritäten. Hinweise zum weiteren Vorgehen werden nur kurz diskutiert. Im Gespräch mit dem IRT wies die Nagra darauf hin, dass sie in der gegenwärtigen Phase des Entsorgungsprogramms keinen detaillierten Arbeitsplan aufstellen wollte, weil sie weder dem Prozess der Entscheidungsfindung noch den Ergebnissen verschiedener Prüfungsverfahren (einschliesslich der vorliegenden Expertenprüfung) vorgreifen wollte. Das IRT versteht diesen Entscheid. Für den Fall des Entscheids, das schweizerische Entsorgungsprogramm auf ein Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands auszurichten, empfiehlt das IRT der Nagra jedoch, die verbleibenden Ungewissheiten nach Prioritäten zu ordnen und ein Arbeitsprogramm vorzubereiten, um diese Ungewissheiten weiter zu reduzieren.

### ***Zur Qualitätssicherung***

Das IRT hat sich besonders für die von der Nagra angewandte Methode der Qualitätssicherung (QS) interessiert, denn eine gute Qualitätssicherung erhöht das Vertrauen in den Sicherheitsnachweis; umgekehrt wird das Vertrauen durch Anzeichen fehlender Qualitätssicherung untergraben. Das IRT hat das QS-System der Nagra keinem formellen Audit unterzogen. Es stellt jedoch fest, dass das QS-Programm der Nagra viele Elemente eines modernen QS-Systems enthält. Dazu gehören beispielsweise ein grosses Engagement der Führung sowie der Einsatz externer Expertenprüfungen und -befragungen. Ein wichtiger Aspekt der QS ist die Bewertung und Behandlung von Ungewissheiten in den Daten, da die Auswirkungen solcher Ungewissheiten in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden müssen. Nach Ansicht des IRT wird die Zertifizierung des QS-Systems der Nagra nach ISO 9001:2000 das verwendete Qualitätssystem aufwerten.

### ***Zur Übereinstimmung mit der internationalen Praxis und Empfehlungen***

Nach Ansicht des IRT steht der Sicherheitsnachweis der Nagra mit an der Spitze der internationalen Praxis. Er kombiniert quantitative und qualitative Argumente. Das Konzept der mehrfachen Barrieren und die „Pfeiler der Sicherheit“ werden hervorgehoben. Das geologische Umfeld ist ein sehr wirkungsvoller Teil des Systems. Mit mehrfachen Argumentationsketten wird überzeugend nachgewiesen, dass im Opalinuston der langsame Prozess der Diffusion der entscheidende Transportmechanismus ist. Im Einklang mit der gegenwärtigen Betonung von wirkungsvollen technischen Barrieren beträgt die erwartete Lebensdauer der BE- und HAA-Behälter 10 000 Jahre. Der Aufbau des Sicherheitsnachweises entspricht den neuesten internationalen Empfehlungen.

### ***Zum Programm der Nagra***

Das IRT stellt fest, dass die Nagra:

- ein ausgereiftes Programm mit hoch kompetenten, aufgeschlossenen Mitarbeitern hat und ein Programm, in dem Wissenschaft, Standort-Charakterisierung, technische Auslegung und Sicherheitsanalyse wirkungsvoll miteinander verbunden sind;
- hoch stehende Programme in bestimmten Gebieten wie Geochemie und Standort-Charakterisierung hat, die intern oder an Instituten wie dem Paul Scherrer Institut (PSI) und der Universität Bern und im Rahmen des internationalen Felslabors Mont Terri durchgeführt werden;

- spezifische Entwicklungen in anderen Programmen verfolgt und solche Entwicklungen erfolgreich in das eigene Programm einbezieht;
- internationale Entwicklungen verfolgt, zu internationalen Entwicklungen beiträgt und die Ergebnisse in das eigene Programm einfließen lässt.

### ***Abschliessende Erklärung***

*Zusammenfassend stellt das IRT für die Zwecke der vorliegenden Bewertung fest:*

- *Die allgemeine Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist gut durchdacht und klar dargestellt; sie ist in Übereinstimmung mit internationalen Überlegungen, was in einem Sicherheitsnachweis enthalten sein sollte.*
- *Die Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Barrieren im Mehrfachbarrierensystem sind klar beschrieben und analysiert worden. Aufgrund seiner Eigenschaften spielt der Opalinuston im Zürcher Weinland mit seinem Beitrag zur Sicherheit eines Lagers eine herausragende Rolle, aber die anderen Komponenten des Mehrfachbarrierensystems tragen ebenfalls zum allgemeinen Sicherheitsnachweis bei und stützen ihn.*
- *Die Methodik, Modelle und Rechenprogramme, die für die Bewertung der Sicherheit verwendet wurden, sind vergleichbar mit jenen, die in anderen nationalen Programmen verwendet werden.*
- *Die wissenschaftliche Basis für die Modellierung der Prozesse und Barrierenfunktionen ist auf dem neuesten Stand von Forschung und Technik und ist für den Anwendungszweck geeignet.*
- *Die Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEPs), welche die Entwicklung des Lagersystems beeinflussen, sind klar dokumentiert; die Nagra hat einen detaillierten Vergleich mit der internationalen FEP-Datenbank der NEA vorgenommen, um sicherzustellen, dass sie genügend umfassend sind.*
- *Die in der Sicherheitsanalyse berücksichtigten Szenarien und Rechenfälle decken eine breite Auswahl an Möglichkeiten ab und sind genügend umfassend.*
- *Die Auswirkungen der mit den Daten und Modellen verbundenen Ungewissheiten auf die Sicherheit sind umfassend analysiert worden*

*und solche Ungewissheiten sind im Sicherheitsnachweis auf geeignete Weise berücksichtigt worden.*

- *Die relevanten Phänomene und die wissenschaftliche Argumentation sind in der Dokumentation gut beschrieben.*

Das IRT ist beeindruckt von der Überzeugungskraft und Qualität des Sicherheitsnachweises der Nagra für die geologische Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlands. Der Sicherheitsbericht sollte in der bevorstehenden nationalen Debatte über die zukünftigen Phasen des schweizerischen Entsorgungsprogramms einen wichtigen Bestandteil der Diskussionsgrundlagen bilden.

# 1. EINFÜHRUNG

## 1.1 Hintergrund

In der Schweiz sind die Verursacher für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen verantwortlich. Die Betreiber der Kernkraftwerke, zuständig für die Abfälle aus ihren Kraftwerken, und der Bund, zuständig für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung, gründeten 1972 die Nagra um ihren gesetzlichen Verpflichtungen nachzukommen. Die Nagra befasst sich mit Forschung, Entwicklung, Strategien und Projekten für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schweiz.

Die Schweiz setzt seit vielen Jahren auf die geologische Tiefenlagerung als Methode der nuklearen Entsorgung. Kristallin wie auch Sedimentgesteine wurden für die geologische Tiefenlagerung in Betracht gezogen. In ihrem Projekt Gewähr (1985) untersuchte die Nagra die Eignung des kristallinen Grundgesteins für die Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle (HAA). Im Jahr 1988 entschied der Bundesrat, gestützt auf die behördliche Überprüfung des Projekts Gewähr, dass der Bau eines Tiefenlagers im kristallinen Grundgestein machbar sei und Langzeitsicherheit erreichbar wäre. Die Daten der geologischen Felduntersuchungen erlaubten es jedoch nicht, auf das Vorhandensein von geeigneten kristallinen Gesteinskörpern in ausreichender Grösse zu schliessen. Deshalb beurteilte der Bundesrat den Standortnachweis als nicht ausreichend (Nagra 2002a).

Seit den späten 80er Jahren untersucht die Nagra zusätzlich die geologische Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen, verglasten HAA und LMA in Sedimentgesteinen. Zwei potenzielle Wirtgesteine wurden ausgewählt: der Opalinuston und die Untere Süsswassermolasse.

Die von der Schweizer Regierung (Bundesrat) einberufene Arbeitsgruppe EKRA (Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle) schlägt ein Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung vor (EKRA 2000). Es basiert auf dem Prinzip der passiven Sicherheit, die durch eine Kombination von technischen und natürlichen Barrieren erreicht wird, und ermöglicht Reversibilität durch Rückholung der Abfälle.

Im Sinne eines schrittweisen Vorgehens auf dem Weg hin zur geologischen Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen schlägt die EKRA neben dem Hauptlager den Bau eines Test- und eines Pilotlagers vor. Eine Beobachtungsphase soll dem Verschluss der Anlage vorausgehen. Das Testlager würde vor dem Hauptlager in Betrieb gesetzt und Informationen liefern, die für den Bau, den Betrieb und die Bewertung der Sicherheit nach Verschluss nötig sind. Das Pilotlager würde einen kleinen aber repräsentativen Teil des gesamten radioaktiven Abfalls enthalten.

Das neue Kernenergiegesetz (KEG 2003) enthält die von der EKRA vorgeschlagenen Konzepte. Es schreibt vor, dass radioaktive Abfälle in einem geologischen Tiefenlager entsorgt werden müssen, das vor dem Verschluss überwacht wird. Falls nötig soll der Abfall vor dem endgültigen Verschluss ohne grossen Aufwand zurückgeholt werden können. Gemäss Schweizer Recht sind die folgenden Bewilligungen nötig:

- Bewilligung für vorbereitende Handlungen (z.B. erdwissenschaftliche Untersuchungen).
- Rahmenbewilligung (mit Standortentscheid).
- Baubewilligung.
- Betriebsbewilligung und
- Bewilligung zum Verschluss.

Das von der Nagra entwickelte Entsorgungskonzept umfasst zwei geologische Tiefenlager. Ein Lager ist bestimmt für abgebrannte Brennelemente (sowohl  $UO_2$  wie MOX), verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen (HAA) sowie langlebige und alphahaltige mittelaktive Abfälle (LMA), die hauptsächlich bei der Wiederaufarbeitung anfallen. Das zweite Lager ist für die übrigen radioaktiven Abfälle vorgesehen.

## **1.2 Projekt Entsorgungsnachweis**

Der gegenwärtige Meilenstein im Programm der Nagra für BE, HAA und LMA ist das Projekt Entsorgungsnachweis. Die Dokumentation des Entsorgungsnachweises für langlebige Abfälle im Opalinuston des Zürcher Weinlands im Norden der Schweiz wurde von der Nagra im Dezember 2002 eingereicht. Der Entsorgungsnachweis verfolgt zwei Hauptziele:

1. Entsorgungsnachweis für BE, HAA und LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlands. Drei Aspekte der Machbarkeit müssen nachgewiesen werden (Nagra 2002a):

- a) Ein geeigneter geologischer Standort für das Tiefenlager ist vorhanden (Standortnachweis).
  - b) Der Bau und Betrieb des Tiefenlagers ist an einem solchen Standort möglich (Nachweis der bautechnischen Machbarkeit).
  - c) Der Schutz vor den Risiken, die dem Abfall innewohnen, ist mit einem solchen Lager langfristig gewährleistet (Sicherheitsnachweis).
2. Schaffung einer Diskussions- und Entscheidungsgrundlage für die Weiterführung des schweizerischen Entsorgungsprogramms für hochaktive Abfälle.

Die Dokumentation für das Projekt Entsorgungsnachweis umfasst eine Reihe von Berichten, die den drei Elementen der Machbarkeit zugeordnet sind. Die höchste Ebene wird von den drei folgenden Berichten gebildet: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, NTB 02-03 (Nagra 2002b), deutsch; Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, NTB 02-02 (Nagra 2002c), deutsch; und dem Sicherheitsbericht, NTB 02-05 (Nagra 2002a), englisch. Der Sicherheitsbericht und die vorliegende internationale Expertenprüfung befassen sich mit dem Tiefenlager für langlebige Abfälle, welches im Entsorgungsnachweis beschrieben ist.

### **1.3 Die internationale Expertenprüfung**

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat im Jahr 2003 die NEA ersucht, die schweizerische Begutachtung des Projektes Entsorgungsnachweis mit einer internationalen Expertenprüfung zu ergänzen. Diese sollte sich auf die Sicherheit der Anlage nach dem Verschluss beziehen, wie sie im Sicherheitsbericht (Nagra 2002a) dargestellt ist. Die Überprüfung befasst sich mit der Methodik, der Durchführung und den Resultaten der sicherheitstechnischen Bewertung.

Das Pflichtenheft für die Expertenprüfung ist im Anhang 2 zu finden. Für die Expertenprüfung wurden die folgenden Punkte identifiziert:

1. Die allgemeine Strategie für den Nachweis der Langzeitsicherheit.
2. Die Rolle und die Gewichtung der Sicherheitsfunktionen der einzelnen Barrieren.
3. Die Methodik, die für die Sicherheitsanalyse verwendet wird.
4. Die wissenschaftliche Basis für die Darstellung der Prozesse und Barrieren-Funktionen.

5. Die Vollständigkeit der Vorgänge und Ereignisse, welche die Entwicklung des Lagersystems beeinflussen.
6. Die umfassende Ableitung der Szenarien und die Auswahl der untersuchten Rechenfälle.
7. Die Behandlung der Ungewissheiten bzgl. Daten und Modellen.

Das Pflichtenheft liess den Experten die Möglichkeit offen, weitere Aspekte zu kommentieren, falls sich solche als wichtig erweisen sollten.

Die NEA hat dem schweizerischen Gesuch entsprochen, dem Pflichtenheft zugestimmt und eine Expertenprüfung der Langzeitsicherheitsanalyse organisiert. Von der Schweizer Regierung wurde die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) als Koordinationsstelle bestimmt.

Zur Durchführung der Überprüfung hat die NEA eine internationale Expertengruppe („International Review Team“ - IRT) zusammengestellt, die aus bekannten Persönlichkeiten besteht, die sich auf dem Gebiet der Sicherheitsanalysen gut auskennen. Es gehören ihr auch Spezialisten in verschiedenen, für die Langzeitsicherheit relevanten Gebieten an. Anhang 3 enthält kurze Lebensläufe der IRT-Mitglieder. Die Experten haben sich unter der Bedingung zur Verfügung gestellt, dass es klar ausgewiesen werden muss, dass die Ansichten des IRT nicht notwendigerweise mit jenen der Organisationen übereinstimmen muss, denen die Mitglieder des IRT angehören.

Im Einklang mit dem Pflichtenheft ist das IRT bei seiner technisch orientierten Expertenprüfung davon ausgegangen, dass der endgültige Entscheid über den Sicherheitsnachweis durch die Schweizer Behörden zu fällen ist. Die Aufgabe des IRT bestand einzig darin, zu prüfen, ob die Nagra im Hinblick auf das schrittweise Vorgehen der Schweiz bei der Entwicklung von Lagerprojekten die Langzeitsicherheit (d.h. nach Verschluss des Tiefenlagers) auf nachvollziehbare, dem internationalen Standard entsprechende Art bewertet hat. Gemäss dem Pflichtenheft muss der Sicherheitsnachweis zeigen, dass im gewählten Wirtgestein innerhalb des voraussichtlichen Standortgebiets, mit den aufgrund von Sondierbefunden nachgewiesenen geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften und mit dem System der technischen Barrieren, die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers gewährleistet ist.

Das IRT hat sich nicht mit der Standortwahl und der bautechnischen Machbarkeit befasst. Dennoch stellt das IRT fest, dass die Themen Standortwahl, Bautechnik und Sicherheit unter sich verknüpft sind; d.h. Änderungen in einem Gebiet wirken sich auch auf die anderen Gebiete aus.

Deshalb müsste jede Änderung bzgl. Standortwahl oder bautechnische Machbarkeit auch auf mögliche Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit untersucht werden.

Das IRT hat bei seinen Überlegungen berücksichtigt, dass der Sicherheitsbericht ein Element des schrittweisen Vorgehens ist, das der Entscheidungsfindung auf dem Weg zur Realisierung des Tiefenlagers dient und dass er nicht Bestandteil eines Gesuchs für eine Bewilligung ist. Sowohl die Nagra wie auch andere beteiligten Organisationen anerkennen, dass weitere Arbeiten sowie Stellungnahmen der Schweizer Bevölkerung notwendig sind, um das Projekt auf einen Stand zu bringen, der die Einreichung eines Rahmenbewilligungsgesuchs ermöglichen würde. Erst die Erteilung der Rahmenbewilligung würde auch eine formelle Standortwahl bedeuten.

#### **1.4 Durchführung der Expertenprüfung**

Die Expertenprüfung wurde wie folgt durchgeführt:

- Ein erstes Treffen am Nagra-Hauptsitz fand vom 30. Juni bis 2. Juli 2003 statt. Die internationale Expertengruppe IRT wurde durch die HSK über die Ziele der Überprüfung in Kenntnis gesetzt. Die Nagra erläuterte Teile des Entsorgungsnachweises und beantwortete Fragen des IRT. Am 2. Juli besuchte das IRT das Felslabor Mont Terri, wo es Einblick in verschiedene laufende Untersuchungen erhielt.
- Von Juli bis November 2003 überprüften alle IRT-Mitglieder den Sicherheitsbericht (Nagra 2002a). Die Nagra hat zudem viele weitere technische Berichte an die IRT-Mitglieder abgegeben. Zwei Mitglieder widmeten sich der Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, NTB 02-03 (Nagra 2002b), die nur in deutscher Sprache vorliegt. Je nach Spezialgebiet wurden IRT-Mitglieder aufgefordert, weitere Berichte kritisch zu prüfen. Die Nagra stellte den IRT-Mitgliedern auf Verlangen weitere Dokumente zur Verfügung.
- Im August und Oktober 2003 unterbreitete das IRT der Nagra je einen Satz von Fragen, um einzelne Punkte zu klären. Die Fragen wurden von der Nagra schriftlich beantwortet. Dieser Schriftwechsel war ein wichtiger Teil der Expertenprüfung.
- Das IRT traf sich am 23. November in privatem Rahmen und vom 24. bis 28. November am Nagra-Hauptsitz. Mitarbeiter der Nagra hielten auf Verlangen des IRT eine Reihe von ergänzenden Vorträgen.

Besondere technische Themen wurden in kleinem Kreis zwischen IRT-Mitgliedern und Wissenschaftlern der Nagra und des Paul Scherrer Instituts (PSI) besprochen. Das IRT traf sich zusätzlich hinter geschlossenen Türen, um die diskutierten Fragen zu besprechen und zu einer Einigung zu kommen. Am Nachmittag des 28. November gab Colin Allan, der Vorsitzende des IRT, die vorläufigen Ergebnisse der Expertenprüfung mündlich bekannt. Schweizerische Beobachter und Vertreter der HSK waren zu allen Sitzungen des IRT mit der Nagra zugelassen. Vertreter der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit der Kernanlagen (KSA) und der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) waren an einigen oder allen Sitzungen zugegen.

- Nach der letzten Sitzung stellte das IRT einen Berichtsentwurf zusammen und legte ihn der Nagra zur Überprüfung der Fakten vor; d.h. der Überprüfung, ob die dargestellten Sachverhalte mit der an die Behörden abgegebenen Dokumentation zum Entsorgungsnachweis übereinstimmen. Zusätzlich zu den Änderungsvorschlägen zur Sicherstellung der Faktentreue machte die Nagra auch redaktionelle Änderungsvorschläge, welche jedoch nicht den materiellen Inhalt des Berichts betrafen. Der Berichtsentwurf mit den Änderungsvorschlägen der Nagra wurde bei der Fertigstellung des vorliegenden Berichts berücksichtigt.

Das IRT war mit der Qualität und der Termintreue der von der Nagra gelieferten Informationen durchwegs zufrieden. Die Nagra hat die zahlreichen Fragen des IRT ebenso rasch beantwortet, wie sie verlangte Berichte und andere Informationen zur Verfügung stellte. Die von der Nagra zur Verfügung gestellte Infrastruktur war ausgezeichnet.

Das IRT unterzog den Sicherheitsbericht und viele seiner Grundlagenberichte einer gründlichen Überprüfung. Wichtige Schlussfolgerungen und Empfehlungen sind im vorliegenden Bericht in kursiver Schrift dargestellt. Weil der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit ausserhalb des Pflichtenhefts lag, wurde das Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers (Nagra 2002c) nicht im Detail geprüft. Das IRT ist der Ansicht, dass seine Bewertung die Anforderungen aus dem Pflichtenheft erfüllt, so wie es im Anhang 2 wiedergegeben ist.

## **1.5 Aufbau des Berichts**

Dieser Bericht ist wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 betrachtet das Entsorgungskonzept der Nagra aus internationaler Sicht.

- Kapitel 3 enthält eine Bewertung des Sicherheitsnachweises.
- Kapitel 4 ist eine technische Bewertung der Komponenten und Prozesse des Systems der mehrfachen Sicherheitsbarrieren mit besonderer Berücksichtigung ihrer Beiträge zum Sicherheitsnachweis und zum wissenschaftlichen Verständnis der Barrierenfunktionen und -prozesse.
- Kapitel 5 enthält eine Zusammenfassung der Erkenntnisse, welche das IRT im Verlaufe der Expertenprüfung gewonnen hat.

Der Bericht hat vier Anhänge:

- Anhang 1 vergleicht den Sicherheitsnachweis mit den Grundsätzen aus einem neueren NEA-Bericht, der die Vertrauensbildung in die Langzeitsicherheit von geologischen Tiefenlagern zum Gegenstand hat (NEA 1999);
- Anhang 2 enthält das Pflichtenheft für die Expertenprüfung;
- Anhang 3 enthält kurze Lebensläufe der IRT-Mitglieder;
- Anhang 4 ist ein Abkürzungsverzeichnis.



## **2. DAS SCHWEIZERISCHE KONZEPT DER KONTROLLIERTEN GEOLOGISCHEN LANGZEITLAGERUNG**

### **2.1 Internationaler Vergleich**

Die international bevorzugte Methode für die Entsorgung langlebiger radioaktiver Abfälle besteht in der Einlagerung der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager, wobei ein System von technischen und natürlichen Barrieren die Langzeitsicherheit gewährleistet (System der mehrfachen Sicherheitsbarrieren). Das Ziel der geologischen Tiefenlagerung ist die dauerhafte Entsorgung ohne Absicht einer Rückholung. Falls die Gesellschaft dies wünscht, kann das Tiefenlager überwacht werden. Selbst die Rückholung durch zukünftige Generationen ist nicht ausgeschlossen. Eine solche Strategie ermöglicht Anpassungen im Sinne des wissenschaftlichen Fortschritts und der gesellschaftlichen Akzeptanz über mehrere Jahrzehnte und schliesst die Entwicklung neuer Konzepte in der Zukunft nicht aus (NEA 1995). Das Entsorgungskonzept der Nagra ist im Einklang mit dieser Strategie und dem Entwurf der IAEA für die Sicherheitsanforderungen an die geologische Entsorgung von nuklearen Abfällen (IAEA 2004).

In einer gegebenen Auslegung mögen die einzelnen Elemente eines solchen Systems der mehrfachen Sicherheitsbarrieren über die gesamte Dauer gesehen nicht völlig unabhängig und redundant sein. Sollte sich eine Barriere weniger gut verhalten als erwartet, würden die anderen Barrieren gleichwohl noch einen hohen Schutz bieten und die Auswirkungen des Lagers auf die Bevölkerung beschränken. Ein wichtiger Gradmesser der Robustheit eines Systems ist seine Fähigkeit, trotz eventuell auftretender verminderter Leistungsfähigkeit einzelner Barrieren noch einen genügenden Schutz zu gewährleisten.

Alle modernen Entsorgungskonzepte basieren auf einer Kombination von technischen und natürlichen Barrieren, wie sie die Nagra vorschlägt. Dabei sieht die Auslegung, je nach den chemischen Bedingungen und der geologischen Schicht, die für das Tiefenlager vorgesehen ist, anders aus.

Auf internationaler Ebene sind mehrere Gesteinsformationen untersucht worden, darunter kristalline Gesteine (z.B. in Finnland, Schweden, Kanada und

der Schweiz), Salzgestein (z.B. in den USA und Deutschland), Tuffstein (in den USA) und Tonformationen, zu denen auch der Opalinuston des Zürcher Weinlands gehört (z.B. Belgien, Frankreich, Italien, Ungarn und die Schweiz). Die Wahl des Gesteins hängt von vielen Faktoren ab, wie Vorhandensein, Mächtigkeit, allgemeine Eigenschaften im Hinblick auf die Sicherheit wie hydraulische Durchlässigkeit, sowie die Zugänglichkeit für Untersuchungen von der Oberfläche aus.

Die Vorteile von Tonen als potenzielle Wirtgesteine liegen in der generell geringen Durchlässigkeit, dem starken Rückhaltevermögen für viele Radionuklide und der Fähigkeit der Selbstabdichtung. Diese und andere mechanische Eigenschaften sind je nach der Art der geologischen Ablagerung unterschiedlich und müssen für jeden Standort neu untersucht werden.

Die chemischen Bedingungen und andere Faktoren können die Wahl der technischen Barrieren beeinflussen. So kann unterschiedliches Material für Behälter verwendet werden, je nachdem, ob die chemischen Bedingungen im Wirtgestein oxidierend oder reduzierend sind.

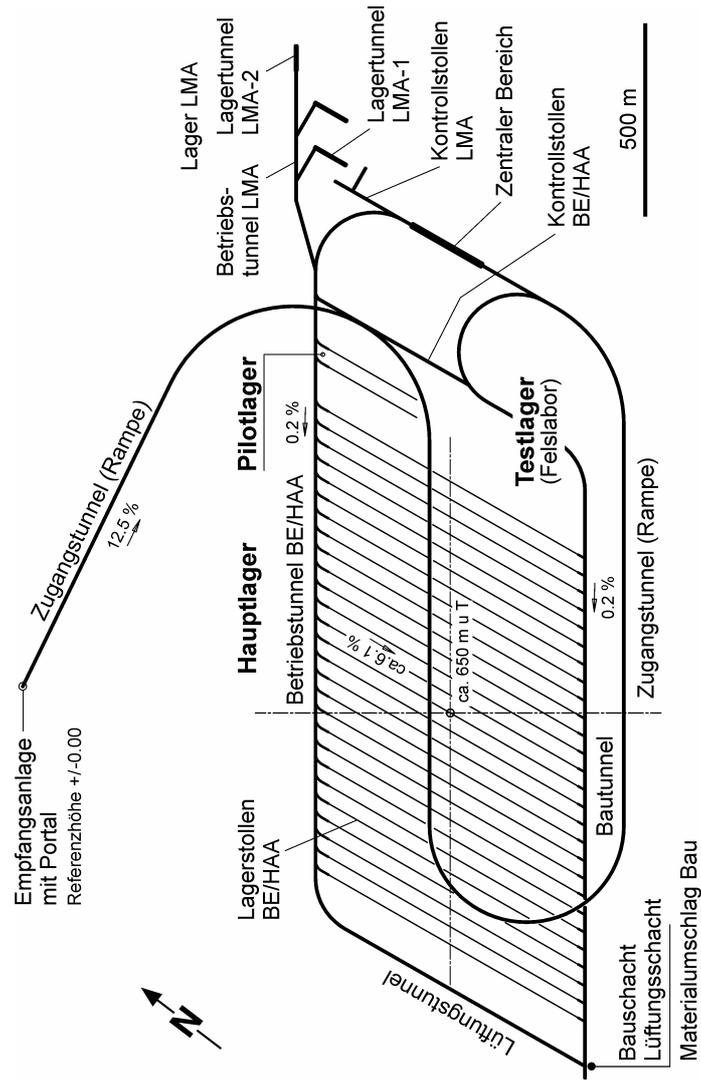
## **2.2 Bewertung des Nagra-Konzeptes**

Abbildung 1 zeigt das Lagerkonzept der Nagra. Das Tiefenlager befindet sich im Opalinuston des Zürcher Weinlands (typische Mächtigkeit etwa 100 m) in einer Tiefe von etwa 650 m unter der Oberfläche. Die passive Sicherheit wird durch den Einsatz mehrfacher Barrieren erreicht, die den Abfall isolieren und dafür sorgen, dass die künftige Strahlenexposition aus allfällig entweichenden Radionukliden unter dem Schutzziel bleibt. Die behördliche Richtlinie (HSK/KSA, 1993) schreibt eine maximale Strahlendosis für Einzelpersonen von 0.1 mSv/a vor.

Das Referenzkonzept geht von der Abfallmenge aus, die durch die Produktion von 192 GWa(e) Elektrizität aus Kernenergie entsteht. Das entspricht der Produktion der gegenwärtig in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke während 60 Jahren. Dabei fallen folgende Abfallmengen an (Nagra 2002a):

- BE: 2 065 Lagerbehälter mit 3 217 t ursprünglichem Schwermetallgehalt (UO<sub>2</sub> und MOX).
- Verglaste HAA: 730 Stahlbehälter aus der Wiederaufarbeitung von 1 195 t BE.

Abbildung 1: Grundriss des von der Nagra vorgeschlagenen Lagerkonzepts  
 (aus Nagra 2002a, Fig. 4.5-1)



- LMA: Total 1 680 bis 1 880 Abfallfässer verschiedener Typen von COGEMA und BNFL mit einem totalen Volumen von etwa 1 400 m<sup>3</sup> (oder ~ 500 m<sup>3</sup> für die Option „High Force Compacted Waste“).

Im Nagra-Konzept werden BE und verglaste HAA in dickwandige Stahlbehälter eingebracht, die den Abfall während über 10 000 Jahren absolut einschliessen. Die Behälter werden waagrecht in Stollen von 800 m Länge und einem Durchmesser von 2.5 m verbracht. Die mit den Behältern bestückten Stollen werden mit Bentonit versiegelt. Der Abstand zwischen den Stollen beträgt 40 m.

Die Lagerstollen für HAA und BE werden je nach Bedarf erstellt, die angelieferten Abfälle eingelagert, die Stollen verfüllt und versiegelt, so dass ein bestimmter Stollen höchstens während zwei Jahren offen bleibt. Nach der Einlagerung aller Abfälle im Hauptlager bleibt der Zugangstunnel (Rampe) während einer ausgedehnten Überwachungsperiode offen, während das Hauptlager versiegelt wird, um langfristige passive Sicherheit selbst dann zu erreichen, wenn der Verschluss des Zugangstunnels schliesslich nicht wie geplant vorgenommen würde. Das IRT betrachtet diese Methode der Einlagerung von Abfällen mit Hilfe von mehrfachen Versiegelungen zur Unterteilung und Isolierung der Abfallbinde als machbar und vorsichtig.

Ebenso wie andere Länder (z.B. Frankreich, Schweden und Finnland) schlägt die Nagra für die Schweiz vor, dass LMA in Lagertunnel verbracht werden, die derselben Anlage angehören. Die LMA-Fässer werden in Behälter geladen und diese in grössere Lagertunnel eingebracht, die mit Mörtel verfüllt werden. Die Tunnel für LMA werden von den Stollen für BE und HAA getrennt angeordnet, um sicherzustellen, dass die günstigen geochemischen Bedingungen in den Lagerstollen für BE und HAA nicht beeinträchtigt werden. Für LMA werden separate Lagertunnel gebaut: einen für LMA, die organische und potenziell komplexbildende Verbindungen enthalten, die anderen für inorganische LMA. Das IRT beurteilt diese Aufteilung des Abfalls als gute Sicherheitsmassnahme.

Die vom Bundesrat einberufene Arbeitsgruppe EKRA sieht den zusätzlichen Bau eines Test- und eines Pilotlagers vor. Die Erstellung soll vorsichtig und schrittweise erfolgen. Auf die Einlagerung der Abfälle soll eine ausgedehnte Beobachtungsperiode folgen, während der eine verhältnismässig einfache Rückholung der Abfälle möglich wäre. Periodische Überprüfungen würden die Reversibilität von Entscheidungen und sogar die Rückholung der Abfälle erlauben. Diese Methode entspricht solchen, die in mehreren anderen Ländern vorgeschlagen werden und ist im Einklang mit neueren internationalen Überlegungen (NEA 1995, NEA 1999, IAEA 2004). Andere (Simmons and

Baumgartner 1994, SKB 2000) haben den Bau einer Testanlage vor Ort vorgeschlagen, ähnlich der im EKRA-Konzept vorgesehenen. Sie sehen nach der Abfalleinlagerung die Offenhaltung der Entsorgungsanlage für eine ausgedehnte Beobachtungsperiode vor, siehe z.B. AECL (1994) und USDOE (2000). Die Nagra hat einen wichtigen Beitrag geleistet mit der Analyse der Auswirkungen auf die Sicherheit im Falle, dass die Anlage während der Dauer der Überwachung in teilweise unversiegeltem Zustand verlassen würde (siehe weitere Ausführungen im Abschnitt 4.7).

Gemäss dem IRT ist das Entsorgungskonzept der Nagra mit allen wünschenswerten Elementen eines kontrollierten, rückholbaren geologischen Tiefenlagers ausgestattet. Die mehrfachen Sicherheitsbarrieren für BE und HAA erfüllen eine Reihe von Funktionen, die dem chemischen und geologischen Umfeld des vorgeschlagenen Tiefenlagers entsprechen. Zu diesen Barrieren zählen:

- Dauerhafte Abfallmatrizen (BE und HAA), die umgeben sind von langlebigen Behältern, die mit wenigen möglichen Ausnahmen das Potenzial haben, den Abfall während mehr als 10 000 Jahren absolut einzuschliessen. Während dieser Zeitspanne sinkt die Radioaktivität der Abfälle deutlich.
- Bentonit-Verfüllmaterial, das verschiedene Funktionen ausübt; es gewährleistet u.a. die Versiegelung der Auflockerungszone und die Isolation der Abfallgebände sowohl gegenseitig wie auch gegenüber dem Wirtgestein.
- Wirtgestein, d.h. der Opalinuston des Zürcher Weinlands, der ein geologisch stabiles Umfeld schafft und sicherstellt, dass die Migration von Radionukliden vom Tiefenlager an die Oberfläche dank der geringen hydraulischen Durchlässigkeit und dem Rückhaltevermögen des Opalinustons verzögert wird.

Die wichtigste dieser Barrieren im Nagra-Konzept ist – wegen seiner Eigenschaften – das Wirtgestein. Nach Ansicht des IRT weist die Nagra in überzeugender Weise nach, dass das geologische Umfeld des Opalinustons im Zürcher Weinland einfach strukturiert und stabil ist. Der Ton ist selbstabdichtend und der advective Wasserfluss ist vernachlässigbar, der Ton ist chemisch stabil und hat ein hohes Rückhaltevermögen und er bietet annehmbare technische Eigenschaften für den Bau. Zusätzlich verringert die Abwesenheit von abbauwürdigen Bodenschätzen in dem Gebiet die Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens ins Lager. Die Eigenschaften des Wirtgesteins werden im Kapitel 4 detailliert beschrieben.

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

### **3. BEWERTUNG DES SICHERHEITSNACHWEISES DER NAGRA**

In diesem Kapitel wird der Sicherheitsnachweis der Nagra bewertet. Dabei wird Bezug genommen auf andere nationale Programme und die internationale Praxis sowie auf Dokumente, die durch internationale Organisationen erstellt wurden, darunter vor allem ICRP (1991, 1997, 1998), NEA (1997, 1999, 2001a, 2001b, 2002a, 2002b, 2004) und IAEA (1994, 1995, 1996, 2000, 2001a, 2004).

Die meisten Punkte im Pflichtenheft des IRT (siehe Abschnitt 1.3 und Anhang 2) werden in diesem Kapitel angesprochen, darunter die allgemeine Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit (Punkt 1), die Methodik der Sicherheitsanalyse (Punkt 3), die Behandlung von Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen (FEPs), welche die Entwicklung des Lagersystems beeinflussen (Punkt 5), die Ableitung von Szenarien und die Auswahl von Rechenfällen (Punkt 6) sowie der Umgang mit Ungewissheiten (Punkt 7). (Die beiden übrigen Punkte werden in den Kapiteln 2 und 4 behandelt).

Die allgemeinen Schlussfolgerungen dieses Kapitels werden durch die in Kapitel 4 und Anhang 1 präsentierten, detaillierteren Beobachtungen gestützt. Anhang 1 ist ein integraler Bestandteil dieses Berichts.

#### **3.1 Allgemeine Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit**

Laut IAEA definiert die Sicherheitsstrategie die Methode, mit der die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers entwickelt wird (IAEA 2004). Die Nagra stellt ihre Sicherheitsstrategie und ihre Ziele im Abschnitt 2.6 ihres Sicherheitsberichts klar dar (Nagra 2002a).

Bei der Bewertung der allgemeinen Strategie für den Nachweis der Langzeitsicherheit müssen drei verwandte, aber unterschiedliche Aspekte getrennt betrachtet werden, nämlich

1. Das schrittweise Vorgehen bei der Entscheidungsfindung, welches die mehrfache Überprüfung und die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse im Laufe der Zeit ermöglicht.

2. Der Nachweis der Sicherheit nach Verschluss, der iterativ erbracht wird und die Diskussionen und Entscheide auf wichtigen Stufen des Entscheidungsfindungsprozesses unterstützt.
3. Die Sicherheitsanalyse, die bei jeder Iteration des Sicherheitsnachweises die Einhaltung der behördlichen Schutzziele überprüft.

### ***3.1.1 Das schrittweise Vorgehen bei der Entscheidungsfindung***

Die IAEA und die NEA haben festgehalten, dass es sich bei der Entwicklung und Realisierung von geologischen Tiefenlagern und der Vorbereitung von Sicherheitsberichten um schrittweise Vorgänge handelt (IAEA 2004, NEA 2004). Diese Methode bietet viele Vorteile, darunter die Gelegenheit für unabhängige technische Überprüfungen sowie öffentliche und politische Einsichtnahme auf jeder Stufe des Projekts. Das schrittweise Vorgehen ist nötig für die Wahrung der notwendigen Flexibilität um unerwarteten Standort-Eigenschaften, technischen Schwierigkeiten oder Ungewissheiten gewachsen zu sein und Nutzen ziehen zu können aus den Fortschritten von Wissenschaft und Technik (NEA 2004).

In ihrem Sicherheitsbericht hebt die Nagra das schrittweise Vorgehen hervor, das in der Schweiz bisher befolgt wurde. Gesetze und Verordnungen unterstützen die schrittweise Entscheidungsfindung, die auch der Arbeit der Nagra zu Grunde liegt. Zusätzlich hat die Nagra mehrere Gebiete bezeichnet, in denen das Entsorgungsprogramm noch geändert werden kann. Das IRT betrachtet das Vorgehen der Nagra als logisch, sorgfältig und in Übereinstimmung mit internationalen Empfehlungen.

Die im Sicherheitsnachweis verlangten formalen und technischen Details sind abhängig von der jeweiligen Projektstufe und den spezifischen nationalen Anforderungen (IAEA 2004). Infolgedessen hat das IRT berücksichtigt, dass sich die Schweiz bei der Entwicklung eines Tiefenlagers noch in einem frühen Stadium befindet und deshalb gewisse Informationen (wie z.B. detaillierte Angaben über die Abfallbehälter) auf dieser Stufe vernünftigerweise noch nicht erwartet werden können. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen *kommt das IRT zum Schluss, dass es sich beim Sicherheitsbericht der Nagra und den technischen Berichten, auf die er sich stützt, um bemerkenswert ausgereifte Dokumente handelt und sie deshalb in der gegenwärtigen Phase des Entscheidungsfindungsprozesses einen wertvollen Beitrag darstellen.*

### **3.1.2 Nachweis der Sicherheit nach Verschluss**

Die Nagra definiert den Sicherheitsnachweis als eine „Reihe von Argumenten und Analysen, welche die Schlussfolgerung begründen, dass ein spezifisches Lagersystem sicher sein wird“. Dazu gehört insbesondere eine Zusammenstellung der Grundlagen, die aufzeigt, dass alle relevanten Sicherheitsanforderungen der Behörden erfüllt werden können. Ausserdem enthält er eine Reihe von Dokumenten, welche die Auslegung des Systems, seine Sicherheitsfunktionen und sein Verhalten beschreiben. Diese bilden die Grundlage, die die Argumente und Analysen abstützen, und welche die Bedeutung von Ungewissheiten und offenen Fragen im Zusammenhang mit der Entscheidungsfindung für die Weiterentwicklung des Systems beschreiben. Diese Definition stammt teilweise von der NEA (1999) und stimmt mit neueren internationalen Überlegungen überein (IAEA 2004, NEA 2004).

Wie das IRT feststellt, enthält der Sicherheitsnachweis eine Zusammenstellung der Grundlagen, die aufzeigt, dass alle relevanten behördlichen Schutzziele eingehalten werden können, d.h. die Sicherheitsanalyse. Der Sicherheitsnachweis geht jedoch wesentlich darüber hinaus. Zusätzlich zur gründlichen und robusten Sicherheitsanalyse enthält er viele andere Elemente wie die folgenden: die Erklärung der Prinzipien und Richtlinien; der Einsatz des Systems der mehrfachen Sicherheitsbarrieren mit ausreichender Redundanz, um Robustheit zu gewährleisten; der Nachweis des ausreichenden wissenschaftlichen Verständnisses; der Anwendung bewährter Technik und guter Führungsprinzipien einschliesslich Qualitätssicherung; sowie wissenschaftliche Beweise für die dem Standort innewohnenden Qualitäten, natürliche Analoga, transparente Dokumentation von hoher Qualität sowie eine Synthese der Beweise, Analysen und Argumente in der Form einer gesamtheitlichen Bewertung (IAEA 2004, NEA 1999, NEA 2004).

Im Sicherheitsbericht stellt die Nagra die folgenden Ziele und Prinzipien deutlich und klar dar:

1. Geologische Tiefenlagerung im Allgemeinen.
2. Schrittweises Vorgehen bei der Lagererstellung.
3. Sicherheitsfunktionen des Lagersystems.
4. Art und Weise, um umfassende Sicherheit und Robustheit zu erreichen.
5. Standortwahl, Auslegung und Erstellung des Tiefenlagers.
6. Sicherheitsanalyse und die dazugehörige Dokumentation.

Diese Ziele und Prinzipien zeigen, dass die Nagra einer Art der Realisierung der Entsorgung verpflichtet ist, die flexibel ist, Langzeitsicherheit gewährleistet und gleichzeitig den Bedürfnissen und Werten der schweizerischen Gesellschaft Rechnung trägt.

Der Sicherheitsnachweis der Nagra wird im Detail im nachstehenden Abschnitt 3.2 behandelt. Das IRT stellt allgemein fest, dass die Nagra alle Anforderungen erfüllt hat, die an einen modernen Sicherheitsnachweis gestellt werden. Zusätzlich zu den Informationen im Abschnitt 3.2 zog das IRT bei der Erarbeitung seiner Bewertung Nutzen aus den kürzlich von der NEA (1999) entwickelten Kriterien. Ein eingehender Vergleich des Sicherheitsnachweises der Nagra mit diesen Kriterien ist in Anhang 1 zu finden.

### **3.1.3 Sicherheitsanalyse**

Die IAEA definiert die Sicherheitsanalyse als den Prozess der systematischen Analyse (i) der mit dem geologischen Tiefenlager verbundenen Strahlenrisiken, und (ii) der Fähigkeit der Anlage, die Schutzfunktionen zu gewährleisten und den technischen Anforderungen zu genügen. Die Sicherheitsanalyse enthält quantitative Angaben über das allgemeine Verhalten des Systems, eine Analyse der damit verbundenen Ungewissheiten und einen Vergleich mit den relevanten Anforderungen an die Auslegung und die Sicherheitsstandards. Die Sicherheitsanalyse sollte auch auf alle wesentlichen Lücken im wissenschaftlichen Verständnis, in den Daten oder Analysen hinweisen, welche sich auf die Resultate auswirken könnten. Je nach erreichtem Stand der Entwicklung kann die Sicherheitsanalyse mithelfen, die zukünftige Forschung zu fokussieren. Ihre Resultate können auch dazu verwendet werden, um Übereinstimmung mit internen oder externen Sicherheitszielen und -standards zu ermitteln (IAEA 2004).

Die von der Nagra für ihre Sicherheitsanalyse verwendete Methode wird im Abschnitt 3.2 weiterbehandelt. *Das IRT stellt hier jedoch fest, dass die Sicherheitsanalyse der Nagra mit dieser Definition der IAEA übereinstimmt.* Speziell hat die Nagra quantitative Analysen durchgeführt, um berechnete Dosen im Verlauf der Nachverschluss-Phase mit den behördlichen Schutzzielen zu vergleichen. Die wichtigsten Klassen von Ungewissheiten werden ausreichend beschrieben und in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt, und bestehende Lücken im wissenschaftlichen Verständnis werden aufgezeigt.

### **3.2 Verwendete Methode für den Aufbau des Sicherheitsnachweises und für die Durchführung der Sicherheitsanalyse**

Abbildung 2 zeigt die von der Nagra verwendete Methode für den Aufbau des Sicherheitsnachweises und für die Durchführung der Sicherheitsanalyse. Sie umfasst unter anderem:

- a) Die Wahl eines Systems mit mehrfachen Sicherheitsbarrieren für die Entsorgung und die Entwicklung eines Auslegungskonzeptes mit genügend Redundanz und Auslegungsvarianten (bewertet in den Kapiteln 2 und 4).
- b) Die Entwicklung des phänomenologischen und wissenschaftlichen Verständnisses für das Verhalten dieses Systems, seiner Teile und seiner Entwicklung im Laufe der Zeit (bewertet im Kapitel 4).
- c) Die klare Beschreibung des erwarteten Verhaltens des Systems der mehrfachen Sicherheitsbarrieren und des Beitrags seiner Bestandteile zum Einschluss, zur Rückhaltung, zur Verzögerung und zur Dispersion von Radionukliden (bewertet im nachstehenden Abschnitt 3.2.6).
- d) Die Identifizierung von Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen (FEPs), welche die Langzeitsicherheit beeinflussen könnten und die in den Sicherheitsnachweis einbezogen werden müssen: z.B. müssen sie entweder durch besondere Auslegungsmassnahmen vermieden oder ihre Auswirkungen in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden (bewertet im nachfolgenden Abschnitt 3.2.1).
- e) Bezeichnung von Ungewissheiten, die betrachtet werden sollten, Durchführung von Sensitivitätsanalysen und probabilistischen Analysen, um die Bedeutung dieser Ungewissheiten abschätzen zu können (bewertet im nachfolgenden Abschnitt 3.2.2).
- f) Entwicklung und Analyse von Szenarien und Rechenfällen, welche die erwartete Entwicklung des Systems und allfällige Ungewissheiten abdecken (bewertet im nachfolgenden Abschnitt 3.2.3).
- g) Durchführung von quantitativen Modellrechnungen für das System und seine Bestandteile, um die so erhaltenen quantitativen Schätzungen der Strahlenexposition mit den behördlichen Schutzziele zu vergleichen und damit einen Indikator für die Sicherheit zu erhalten (bewertet im nachfolgenden Abschnitt 3.2.4).
- h) Verwendung von unterstützenden Argumenten und zusätzlichen Analysen mit komplementären Sicherheitsindikatoren, die sich auf mehrfache Beweisketten stützen, einschliesslich die geologische

Entwicklung in der Vergangenheit und natürliche Analoga (bewertet im nachfolgenden Kapitel 3.2.5 und im Kapitel 4).

- i) Zusammenfassung der Hauptargumente und Resultate des Sicherheitsnachweises in einem so genannten „statement of confidence“ gemäss NEA (NEA 1999, bewertet im Abschnitt 3.2.6).

Die Schritte d) bis g) umfassen die Sicherheitsanalyse, wie sie im Abschnitt 3.1.2 beschrieben worden ist.

Dieses Vorgehen wird in den meisten nationalen Programmen angewendet. *Was den Nagra-Nachweis jedoch heraushebt, ist nach Ansicht des IRT die Klarheit, mit welcher der Sicherheitsnachweis aufgebaut ist, die hohe nachgewiesene Robustheit und die starke Betonung der unterstützenden Argumente, welche die quantitative Sicherheitsanalyse aufwerten.*

Die Schritte d) bis h) werden nachfolgend im Detail behandelt, gefolgt von den Schritten c) und i).

### **3.2.1 Behandlung von Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen (FEPs)**

Eine wichtige Aufgabe bei der Bewertung der Sicherheit der Lagerung von radioaktiven Abfällen ist die Bezeichnung, Auswahl und Dokumentation aller Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEPs), welche die Langzeitsicherheit beeinflussen könnten. Wie auch andere entsprechende Organisationen verwendet die Nagra die FEPs als ein Werkzeug um festzustellen, ob alle sicherheitsrelevanten Faktoren in Betracht gezogen und ob sie in geeigneter Weise berücksichtigt worden sind. Die Nagra stellt klar, und das IRT pflichtet ihr bei, dass die Sicherheitsanalyse kein linearer, sondern ein in hohem Masse iterativer (sich wiederholender) Prozess ist (siehe Bild 2). Somit geschieht die Bestimmung und die Dokumentation der FEPs sowohl parallel als auch iterativ mit der Identifikation von Szenarien und Rechenfällen sowie mit der Analyse der Sensitivitäten und Ungewissheiten.

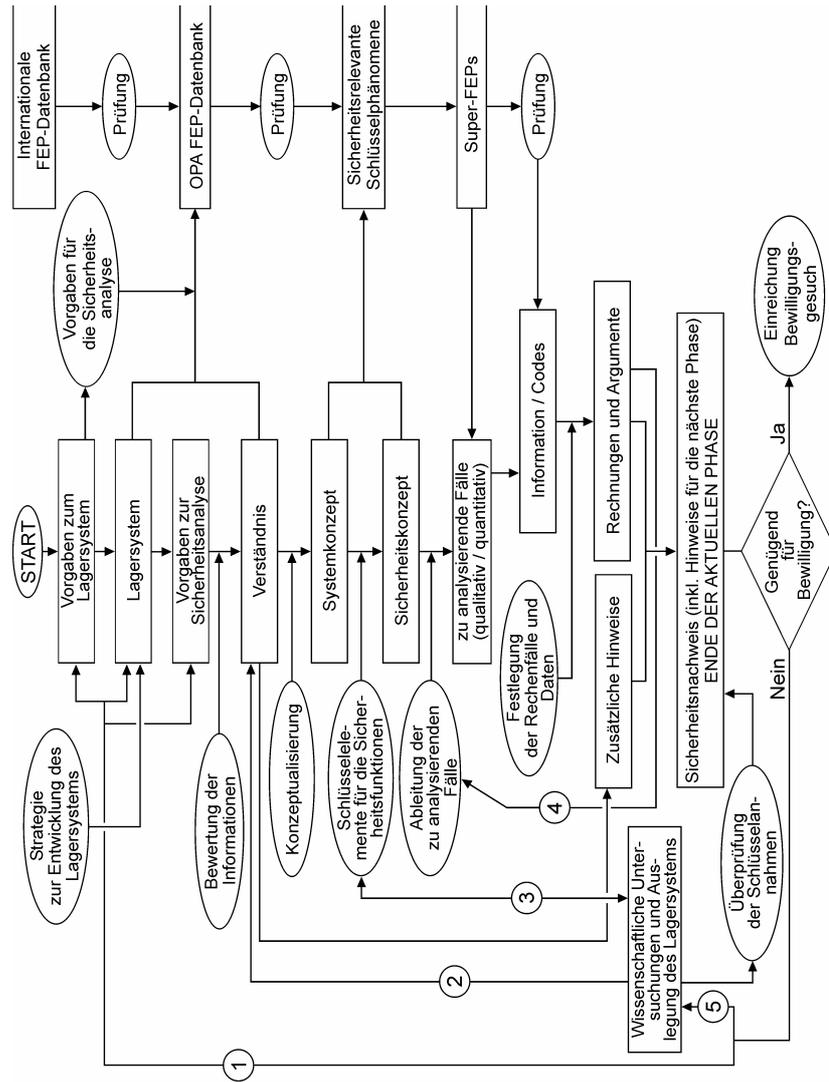
Die Nagra dokumentiert ihren FEP-Managementprozess in einem grösseren Bericht, NTB 02-23 (Nagra 2002d). Das IRT ist der Ansicht, dass dies ein umfassender Bericht ist, der es dem kundigen Leser ermöglicht nachzuvollziehen, wie die FEPs ausgewählt wurden, welches ihr Bezug zu sicherheitsrelevanten Phänomenen ist und wie sie in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden. Jeder FEP ist gut dokumentiert und die Strategie zur Untersuchung der FEPs ist gut dargestellt. Der Bericht über die Behandlung der FEPs zeigt überdies auf klare Weise, wie die FEPs auf verschiedenen Wegen in die Sicherheitsanalyse einbezogen werden. Dieser Bericht (und vor allem die Anhänge 4 und 5) hilft dem Leser, ein besseres Verständnis dafür zu

entwickeln, wie die Nagra jeden Rechenfall im Hinblick auf damit verbundene Ungewissheiten auswählte und auch die Vollständigkeit der in Betracht gezogenen Ungewissheiten bewertete.

Die FEP-Datenbank der Nagra unterscheidet 482 einzelne FEPs. Sie wurde mit der internationalen NEA-FEP-Datenbank verglichen (NEA 2000) und mit einer noch neueren Datenbank aus dem NEA FEPCAT-Projekt (NEA 2003) um – soweit möglich – sicherzustellen, dass kein relevanter FEP übersehen wurde. Das IRT betrachtet die von der Nagra entwickelte Methodik (2002d) als zweckdienlich um sicherzustellen, dass alle wichtigen FEPs in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden.

Zusätzlich hat die Nagra ein neues Konzept von übergeordneten FEPs eingeführt, die sie Super-FEPs nennt. Diese sind verknüpft mit sicherheitsrelevanten Phänomenen und somit mit den Rechenfällen. Die Super-FEPs erleichtern die Diskussionen unter Experten, wenn es um wichtige Eigenschaften und Prozesse geht. Die Nagra bezeichnet ausserdem „Reserve-FEPs“, die sich zwar günstig auf die Sicherheit auswirken, für die jedoch das wissenschaftliche Verständnis und vor allem die konzeptuellen Modelle noch nicht genügend verlässlich sind, um in die gegenwärtige quantitative Analyse miteinbezogen zu werden. Die Reserve-FEPs können in zukünftigen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden, falls die wissenschaftlichen Unterlagen für solche Modelle bis dahin weiterentwickelt werden.

Abbildung 2: Das Vorgehen der Nagra beim Aufbau des Sicherheitsnachweises mit den wichtigsten Elementen. Ebenfalls klar ersichtlich ist die Rolle der Iterationen in diesem Prozess (aus Nagra (2002a), Fig. A4.1)



Zur weiteren Erwägung durch die Nagra und die Sicherheitsbehörden macht das IRT die folgenden Bemerkungen zum FEP-Managementprozess:

1. Die verschiedenen Tabellen im Bericht Nagra (2002d) listen die identifizierten, mit den Super-FEPs verbundenen Ungewissheiten und die sicherheitsrelevanten Phänomene auf. Sie fassen kurz zusammen, auf welche Art sie in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden. Für den Leser wäre es sehr hilfreich, wenn die Tabellen auch auf untergeordnete Berichte hinweisen würden, welche die wissenschaftlichen Erklärungen der betrachteten Phänomene und Modellvereinfachungen enthalten, die in der Sicherheitsanalyse verwendet wurden. Ohne solche Hinweise entsteht der Eindruck, die Tabellen sollten nur die Nachvollziehbarkeit der getroffenen Entscheidungen ermöglichen und sie werden nicht als Teil des iterativen Prozesses in der Sicherheitsanalyse erkannt.
2. Die Rechenfälle beruhen auf dem Verständnis der sicherheitsrelevanten Phänomene, einschliesslich der Entwicklung der Barrieren und der damit verbundenen Ungewissheiten, die ihrerseits auf Erkenntnissen aus der OPA FEP-Datenbank beruhen (siehe Bild 2). Die sicherheitsrelevanten Phänomene dienen der Identifikation von Super-FEPs, die ihrerseits teilweise in die Rechenfälle einfließen und, möglicherweise noch wichtiger, als Werkzeuge der Buchhaltung dienen.
3. Die Auswahl der FEPs geschieht unabhängig von den Zeiträumen für die Systementwicklung. Die Herstellung eines Bezugs zwischen den FEPs und den Zeiträumen sollte in Betracht gezogen werden, weil die Grösse der Ungewissheiten und ihre Auswirkungen vom betrachteten Zeitraum abhängen.

*Das IRT ist allgemein der Ansicht, dass die Nagra den FEP-Managementprozess wirkungsvoll eingesetzt hat um sicherzustellen, dass alle einschlägigen Prozesse und Phänomene in die Sicherheitsanalyse einbezogen wurden. Damit hat die Nagra einen überzeugenden Beweis für die Wirksamkeit dieses Werkzeugs geliefert. Das IRT stellt ausserdem fest, dass die so genannten „Reserve-FEPs“, die in der Zukunft berücksichtigt werden können und die in der Kristallin-I Studie (Nagra 1994) eingeführt wurden, eine hilfreiche Methode darstellen und das Vertrauen in die Sicherheitsanalyse allgemein stärken.*

### ***3.2.2 Analyse der Auswirkungen der Ungewissheiten***

In ihrer Analyse teilt die Nagra die Ungewissheiten in verschiedene Klassen ein:

- Ungewissheiten des Szenariums, d.h. Ungewissheiten über die Entwicklung des Tiefenlagers.
- Ungewissheiten in der Konzeptualisierung, d.h. Ungewissheiten über die Annahmen und das konzeptuelle Modell, mit denen ein bestimmtes Szenarium dargestellt wird.
- Ungewissheiten der Parameter, d.h. Ungewissheiten über die Parameterwerte, die in einem Modell verwendet werden, und
- Ungewissheit der Vollständigkeit, welche auf der Möglichkeit beruht, dass einige wichtige FEPs hätten übersehen werden können.

Die Nagra weist darauf hin, dass die mit den Optionen der Auslegung verbundenen Ungewissheiten von den anderen Unsicherheitsquellen getrennt behandelt werden, weil sie weitgehend der Kontrolle des Entsorgungsprogramms unterstehen.

#### *Ungewissheiten der konzeptuellen Modelle*

Auf Grund des wissenschaftlichen und technischen Verständnisses der Nagra wurden für das Referenzszenarium und die Alternativen Szenarien 1 und 2 verschiedene Konzeptualisierungen in Betracht gezogen. Diese entsprechen unterschiedlichen konzeptuellen Annahmen für die Modellierung von Schlüssel-FEPs, welche die Freisetzungs- und Transportmechanismen von Radionukliden beeinflussen. Beispiele sind alternative Modelle für die Auflösung von abgebrannten Brennelementen (siehe auch Abschnitt 4.3.3) und unterschiedliche Annahmen über das Verhalten der Bentonitverfüllung im Zusammenhang mit möglichen Materialveränderungen als Folge einer erhöhten Temperatur (siehe auch Abschnitt 4.3.4).

#### *Ungewissheiten der Parameter*

Die Bedeutung von Ungewissheiten der Parameter wird mit deterministischen und probabilistischen Methoden evaluiert. Vereinfachte so genannte Verständnismodelle werden zur Illustration der Beiträge der einzelnen Barrieren zum Systemverhalten eingesetzt. Deterministische Analysen werden zur Bestimmung der Sensitivität von errechneten Dosen auf die Veränderung

eines bestimmten Parameters verwendet. Beispielsweise werden deterministische Analysen durchgeführt, um den Einfluss einer Veränderung des Zeitpunkts des Behälterversagens, der Grundwasserflussrate oder der Sorptionswerte ( $K_d$ ) festzustellen. Probabilistische Analysen wurden gemacht, um den Einfluss kombinierter Veränderungen mehrerer Parameter zu untersuchen, deren Wertebereiche durch wissenschaftliche Kenntnisse gestützt sind. Probabilistische Sensitivitätsanalysen wurden benutzt, um den Beitrag verschiedener Input-Parameter zur Ungewissheit in den errechneten Dosen zu ermitteln. Bei anderen nationalen Projekten, wie Yucca Mountain, wurde mehr Gewicht auf probabilistische Analysen gelegt. Allerdings sind deterministische Analysen einfacher zu verstehen. *Das IRT kommt zum Schluss, dass die von der Nagra durchgeführten probabilistischen Analysen zusammen mit der hohen Zahl deterministisch analysierter Rechenfälle ein für den jetzigen Stand des Projekts ausreichendes Vertrauen in die Robustheit des Systems schafft.*

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

#### *Expertenbefragungen und -prüfungen*

Expertenbefragungen und -prüfungen werden ausdrücklich als integraler Bestandteil der Nagra-Methodik anerkannt. Im Verlauf des Projekts hat die Nagra häufig Experten eingesetzt und Expertenprüfungen durchgeführt. Diese Experten können sowohl innerhalb wie ausserhalb des schweizerischen Programms stehen. Die Meinung der Experten wird dazu benutzt, um ein möglichst ausgeglichenes Bild des gegenwärtigen Standes der Wissenschaft zu erhalten, auch auf dem Gebiet der Ungewissheiten. Damit können die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf geeignete Weise in die Sicherheitsanalyse aufgenommen werden, können besondere Themen wissenschaftlich überprüft und Daten freigegeben werden zur Verwendung in der Sicherheitsanalyse. Die zu entsprechenden Sitzungen eingeladenen Experten werden vorab über die allgemeinen Prinzipien informiert, unter welchen die Nagra die Expertenbefragung durchführt.

### *Nicht reduzierbare Ungewissheiten über lange Zeiträume*

Für die Bewertung der Auswirkungen zukünftiger menschlicher Tätigkeiten und für die Modellierung der Biosphäre wurden stilisierte Ansätze angewandt (siehe Abschnitt 4.9). Diese dienen dazu, die Hauptteile der Analyse von jenen Teilen zu trennen, die durch nicht reduzierbare Ungewissheiten charakterisiert sind. Obschon sie mit offensichtlichen Vereinfachungen und Ungewissheiten verbunden sind, werden solche stilisierten Ansätze bei den meisten Entsorgungsprojekten standardmässig angewandt und von den Sicherheitsbehörden akzeptiert.

Die langfristige Entwicklung des Systems wird im Abschnitt 4.8 abgehandelt.

### *„Was wäre wenn?“-Rechenfälle zur Prüfung der Robustheit gegenüber Ungewissheiten*

Die Nagra berücksichtigt durch die Analyse verschiedener Szenarien, Konzepte und Rechenfälle eine breite Palette von Ungewissheiten. Obschon es nicht möglich ist, mit absoluter Sicherheit nachzuweisen, dass es keinerlei unberücksichtigte Ungewissheiten gibt, die das Systemverhalten beeinträchtigen könnten, zeigt die Nagra überzeugend auf, dass dies höchst unwahrscheinlich wäre. Diese Argumentation erhält zusätzliches Gewicht durch den Einbezug von „Was wäre wenn?“-Rechenfällen, wie er von der NEA (NEA 2002b, NEA 2004) und der IAEA (IAEA 2004) vorgeschlagen wird. Die hervorstechenden Merkmale der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle bestehen darin, dass sie ausserhalb des Bereichs liegen, der durch wissenschaftliche Beobachtungen gestützt wird, und dass sie dazu verwendet werden, um die Robustheit des Entsorgungssystems zu testen.

Das IRT stellt fest, dass die von der Nagra dargestellten „Was wäre wenn?“-Rechenfälle für den Aufbau von Vertrauen in die Robustheit des Sicherheitsnachweises eine gute zusätzliche Stütze bilden. Ihre erfolgreiche Anwendung beruht weitgehend auf dem ausgezeichneten Rückhaltevermögen des Opalinustons. Dieser Sachverhalt stärkt den Sicherheitsnachweis der Nagra. Das IRT bemerkt einerseits, dass es möglich sein sollte, einen Sicherheitsnachweis zu führen, der innerhalb der Grenzen der möglichen Ungewissheiten bleibt, ohne mit Analysen darüber hinauszugreifen. Andererseits sind Aufsichtsbehörden und die Öffentlichkeit an solchen „Was wäre wenn?“-Rechenfällen interessiert.

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

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

### **3.2.3 Herleitung von Szenarien und Bestimmung von Rechenfällen**

Die Herleitung von Szenarien, Konzeptualisierungen und Rechenfällen durch die Nagra geschieht aufgrund von sicherheitsrelevanten Eigenschaften, Phänomenen und Entwicklungen, wie sie im Kapitel 5 des Sicherheitsberichts (Nagra 2002a) dargestellt sind. Wie dies auch in anderen Ländern geschah, hat die Nagra die Meinung von Experten eingeholt, um die zu modellierenden Rechenfälle zu entwickeln. Ihre wissenschaftlichen Kenntnisse, Modelle, Codes und Sicherheitsanalysen hat sie externen Experten zur Prüfung vorgelegt, einschliesslich der vorliegenden Prüfung durch das IRT.

Der Ausgangspunkt der Analyse ist das Referenz-Szenarium, das sich mit der Freisetzung gelöster Radionuklide durch das Grundwasser in die Biosphäre befasst. Innerhalb dieses Szenariums werden alternative Konzeptualisierungen und Parametervariationen betrachtet, woraus 22 Rechenfälle resultieren. Das Referenz-Szenarium zieht alle wichtigen Eigenschaften in Betracht und ist gut dokumentiert. Bei einem dieser Fälle handelt es sich um den Referenzfall, den die Nagra als zu erwartende Entwicklung auffasst. Nach Ansicht des IRT ist dieser Fall solide begründet und logisch aufgebaut.

Zusätzlich zum Referenz-Szenarium hat die Nagra alternative Szenarien entwickelt, von denen einige einen alternativen Freisetzungspfad repräsentieren (Freisetzung von volatilen Gasen und Auswirkung menschlicher Tätigkeiten), während andere die Auslegungsoptionen oder Ungewissheiten in Zusammen-

hang mit der Biosphäre abdecken. *Im Ganzen gesehen kommt das IRT zum Schluss, dass die von der Nagra untersuchten Rechenfälle gut begründet und repräsentativ sind für die erwartete Entwicklung und zur Abdeckung möglicher Ungewissheiten.*

Das IRT fand die im Sicherheitsbericht verwendete Terminologie etwas verwirrend, soweit sie Szenarien, Konzeptualisierungen und Rechenfälle betrifft. Das IRT anerkennt die Vielfalt der weltweit verwendeten Methoden (NEA 2001b, NEA 2002b), ermuntert jedoch die Nagra zur Weiterführung internationaler Diskussionen zu diesem Thema.

### ***3.2.4 Modellrechnungen zum Nachweis der Einhaltung der behördlichen Dosislimiten***

Ein wichtiger Aspekt des Sicherheitsnachweises der Nagra besteht im Nachweis, dass die berechneten Dosen die behördlichen Anforderungen erfüllen. Diese Dosen betreffen Mitglieder einer hypothetischen Bevölkerungsgruppe (die kritische Gruppe), welche aus dem Tiefenlager entweichenden Radionukliden ausgesetzt wären. Die Nagra hat für jeden Teil des Systems mathematische Modelle entwickelt (siehe Nagra 2002e), um Prozesse zu beschreiben, welche die Freisetzung und den Transport von Radionukliden zur Folge haben könnten. Die Modelldaten stammen aus Laboruntersuchungen, Feldarbeiten oder der allgemeinen Literatur. Diese Modelle werden zusammen für Schätzungen der Radionuklid-Migration durch das mehrfache Barrierensystem in die Biosphäre benützt, wobei die Resultate zeitabhängig sind. Mit einem Biosphärenmodell werden sodann die Dosen der Mitglieder der kritischen Gruppe berechnet.

Die Nagra hat Modelle entwickelt für die Freisetzung und den Nahfeldtransport von Radionukliden von abgebrannten Brennelementen (SPENT), verglasten HAA (STRENG) und zementförmigen Abfallformen (STALLION), für den Transport in der Geosphäre (PICNIC), für den Druckaufbau und den Transport von Gas sowie für die Berechnung der Dosen als Folge der Radionuklidfreisetzung (TAME). Das IRT hat diese Modelle nicht im Detail untersucht. Das IRT stellt jedoch fest, dass die Modelle verifiziert worden sind und dass einige unter ihnen schon seit geraumer Zeit gebraucht werden, z.B. im früheren Kristallin-I-Projekt (Nagra 1994).

Die von der Nagra verwendeten Modelle, wie auch solche, die in anderen Ländern eingesetzt werden, enthalten eine Mischung von realistischen und vereinfachten Modellannahmen sowie Näherungen für Komponenten und Untersysteme. Letztere werden üblicherweise dann benützt, wenn ein System

derart komplex ist, dass ein realistisches Modell über den Stand der Wissenschaft hinausginge oder signifikante Ungewissheiten die Gültigkeit des Modells in Frage stellten. In allen Fällen argumentiert die Nagra, die mit den Vereinfachungen einhergehenden Abweichungen überschätzten die Konsequenzen. Ein Beispiel solcher Vereinfachungen ist die Annahme, dass alle Abfallgebinde zum selben Zeitpunkt versagen würden statt verteilt über einen längeren Zeitraum. Weitere Vereinfachungen bestehen darin, die Barrierenfunktion der BE-Hüllrohre oder HAA-Kokillen zu vernachlässigen oder stilisierte Biosphärenmodelle zu verwenden.

Das IRT war von den verhältnismässig einfachen mathematischen Formeln beeindruckt (die häufig eher auf analytischen Gleichungen als numerischen Methoden beruhen). Dieses Vorgehen erleichtert das Verständnis der Schlüsselprozesse und der Wirkungen der verschiedenen Variablen. Der Gebrauch von Verständnismodellen ist in dieser Hinsicht ebenfalls hilfreich.

Bei der Bewertung der Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands hat die Nagra angestrebt zu zeigen, dass die schweizerischen Schutzziele eingehalten werden können. Dabei ging es besonders um die Einhaltung der Anforderung, wonach die Freisetzung von Radionukliden aus einem versiegelten Tiefenlager aufgrund aller vernünftigerweise zu erwartenden Prozessen und Ereignissen in keinem Zeitpunkt eine Strahlendosis für Einzelpersonen von 0.1 mSv/a übersteigen dürfe. In der Schweiz ist diesem Schutzziel keine zeitliche Grenze gesetzt, während in anderen Ländern, je nach Ansicht der Aufsichtsbehörden, die Zeitskala üblicherweise zwischen 10 000 und einer Million Jahre liegt (NEA 2002a).

Die Nagra hat Modellsimulationen vorgenommen, die bis zu 100 Millionen Jahre umfassen. Sie räumt jedoch ein, dass es für Zeitskalen, die eine Million Jahre übersteigen, zunehmend schwieriger wird, wichtige Veränderungen des geologischen Umfelds auszuschliessen. Die Nagra argumentiert mit dem Konzept des Radiotoxizitätsindex. Gemäss diesem Konzept ist die Strahlengefahr, die nach einer Zeitspanne von ca. einer Million Jahren von einem geologischen Tiefenlager mit abgebrannten Brennelementen (und HAA sowie LMA) ausgeht vergleichbar mit der Gefährlichkeit (a) eines Lagers von hochgradigem Uranerz mit einem vergleichbaren Volumen und (b) der in einem km<sup>3</sup> Opalinuston natürlich vorkommenden Radionuklide. Das IRT betrachtet die von der Nagra vorgelegten Radiotoxizitäts-Argumente als annehmbar. Sie stützen a) die Aussage, dass die Zeitskala etwa eine Million Jahre umfasst, während der abgebrannte Brennelemente ein Risiko darstellen, das besondere Aufmerksamkeit erfordert, und b) die Begründung der Beschränkung der Zeitskala für die Berechnungen auf 10 Millionen Jahre.

Weil die Radiotoxizität nichts über die eigentliche Strahlenexposition aussagt, stellt das IRT ebenfalls fest, dass solche Argumente in anderen Teilen der Sicherheitsanalyse nur mit Vorsicht verwendet werden sollten. Die in der Nagra-Sicherheitsanalyse dosisdominierenden Radionuklide ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$  and  $^{79}\text{Se}$ ) sind im Uranerz nicht vorhanden und kommen am vorgesehenen Standort auch nicht natürlich vor.

In allen Fällen, selbst den extremsten, liegen die von der Nagra errechneten Strahlendosen um Grössenordnungen unter dem Schutzziel von 0.1 mSv/a pro Person. Dies ist weitgehend dem ausgezeichneten Verhalten des Opalinustons zuzuschreiben, der seiner Eigenschaften wegen zur dominierenden Barriere des Systems wird.

Die Nagra betrachtet bei der Dosisabstützung nur Dosen über  $10^{-7}$  mSv/a, was deutlich unter dem von der IAEA (1996) empfohlenen Wert (0.01 mSv/a). Das Risiko, an dieser Dosis zu sterben, liegt laut Nagra bei  $5 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ , doch darf bezweifelt werden, dass dies für irgendwen leicht zu verstehen ist. Das IRT stellt fest, dass es sinnvoller wäre, die geschätzten Dosen mit der natürlichen Strahlung zu vergleichen. Dann würde sich zeigen, dass  $10^{-7}$  mSv einer Dosis entspricht, die ein Mensch im Alltagsleben in wenigen Sekunden aufnimmt.

Für zukünftige Sicherheitsanalysen schlägt das IRT vor, dass weniger Gewicht auf den quantitativen Vergleich von Szenarien und Rechenfällen gelegt wird, bei denen qualitativ gezeigt werden kann, dass sie vernachlässigbare Dosen ergeben, die zudem erst spät auftreten. Während das Projekt von der konzeptuellen Phase zur detaillierten technischen Auslegung entwickelt wird, sollte mehr Gewicht auf die systematische Analyse denkbarer Szenarien gelegt werden, die zu früheren Zeiten (erste 10 000 Jahre) signifikante Dosen ergeben könnten. Ein Beispiel sind mögliche Auswirkungen von Betriebsunfällen und -problemen auf die Nachverschlussphase.

Allgemein stellt das IRT fest, dass das Vorgehen der Nagra in Bezug auf die quantitative Modellierung zweckmässig ist.

### ***3.2.5 Unterstützende Argumente einschl. mehrfacher Argumentationsketten***

Die Nagra macht häufigen Gebrauch von natürlichen Analoga um ihr Verständnis der Eigenschaften der Komponenten des Mehrfachbarrierensystems zu bestätigen und um aufzuzeigen, dass die Teile des Systems sich wie erwartet entwickeln werden (siehe z.B. Tabelle 8.2-1 in Nagra 2002a). Das IRT war besonders beeindruckt von der Stärke der geochemischen und geophysikalischen Argumente, welche die Opalinuston-Barriere betreffen. Diese

Argumente gründen auf (i) Hydrochemie- und Isotopenprofilen in der Tonschicht, welche nachweisen, dass sich gelöste Stoffe in der Vergangenheit sehr langsam fortbewegten (behandelt in den Abschnitten 4.1 und 4.4), (ii) auf den anhaltenden Überdrücken, welche die geringe Durchlässigkeit des Tons nachweisen, und (iii) auf das Fehlen signifikanter Verwerfungen oder Porenwasser-Anomalien. Auf Analoga basierende Argumente werden auch für die Brennelementmatrix, die Behälter und die Bentonitverfüllung verwendet. Das IRT stellt fest, dass die Nagra an internationalen Programmen beteiligt ist, um weiterhin natürliche Tracer zu erforschen. Die Nagra spielt mit der Unterstützung der Universität Bern eine führende Rolle in einem internationalen Programm, das 2004 im Rahmen des Clay Club der NEA lanciert wird. Das IRT ermuntert die Nagra zur Fortsetzung dieser Programme.

Die mehr ins Detail gehenden quantitativen Modelle werden unterstützt durch Modelle zum Aufbau von Verständnis, welche die Rolle des Opalinustons bei der Zurückhaltung von sorbierenden Radionukliden und bei der Dispersion von nicht-sorbierenden Radionukliden, was eine sehr langsame Freisetzung in die Biosphäre bewirkt, klar darstellen. Zusätzlich zur quantitativen Bewertung benützt die Nagra viele weitere Argumente, um ihren Sicherheitsnachweis zu untermauern. Dazu zählen zusätzliche Sicherheitsindikatoren wie Radiotoxizität, Radiotoxizitätsflüsse und Radiotoxizitätskonzentrationen. Das IRT stuft die letztgenannten Indikatoren eher als qualitativ ein, erkennt jedoch an, dass sie die Resultate der Sicherheitsanalyse ergänzen und dass sie hilfreiche Erkenntnisse über die potenzielle Gefährlichkeit der Abfälle als Funktion der Zeit liefern. Das IRT kommt demnach zum Schluss, dass Vergleiche von Radiotoxizitätsflüssen vom Tiefenlager in die Biosphäre mit Flüssen von natürlich vorkommenden Radionukliden einen nützlichen zusätzlichen Indikator ergeben, der ebenfalls für die Einschränkung der Analysen spricht.

Das IRT kommt zum Schluss, dass der Sicherheitsnachweis die wissenschaftlichen Kenntnisse erfolgreich verwertet und ein hohes Mass an Systemverständnis aufzeigt.

### ***3.2.6 Bewertung der Hauptargumente des Sicherheitsnachweises***

Die Nagra hat eine grosse Zahl von Rechenfällen untersucht, um die Robustheit der Auslegung des geologischen Tiefenlagers zu testen, darunter einige sehr konservative „Was wäre wenn?“-Rechenfälle. In all diesen Fällen wurden die Schutzziele mit einer grossen Sicherheitsmarge eingehalten. Im Referenzfall gewährleistet der diffusive Radionuklidtransport im Opalinuston, dass die Freisetzungsraten sehr klein sind und die Personendosen weit unter den Schutzzielen liegen. Variationen des Referenzfalls untersuchen Faktoren wie

kürzere Lebensdauer der Behälter und geringere Wirkung der technischen Barrieren. Dabei hat sich erwiesen, dass die Schutzziele immer noch eingehalten würden, selbst wenn die Wirkung der technischen Barrieren viel schlechter wäre als erwartet. Das gilt so lange als im Opalinuston diffusiver Transport vorherrscht. Dennoch wird erwartet, dass sich die technischen Barrieren wie vorgesehen verhalten; sie sind weiterhin ein wichtiger Teil des Konzepts und des Sicherheitsnachweises. Die alternativen Rechenfälle, darunter die „Was wäre wenn?“-Rechenfälle, liefern zusätzliche Argumente, wonach die behördlichen Schutzziele selbst dann deutlich unterboten würden, wenn die Eigenschaften des Opalinustons weit ungünstiger als im Referenzfall wären.

Die Resultate der alternativen Rechenfälle können mindestens teilweise dazu benutzt werden, in einem weiteren Sinn andere Situationen einzuschätzen, für die keine Rechenfälle analysiert wurden. Beispielsweise hat die Nagra im Referenzszenarium den Fall eines fehlerhaft hergestellten Stahlbehälters nicht explizit analysiert. Dagegen gibt es einen entsprechenden Rechenfall für einen defekten Kupferbehälter. Das Ergebnis dieses Rechenfalls kann dazu benutzt werden, die potenzielle Auswirkung eines defekten Stahlbehälters zu verstehen.

Wie in der Dokumentation erklärt, gibt es eine Reihe von Eigenschaften, die zwar zur Sicherheit beitragen, in den Modellen jedoch nicht berücksichtigt wurden. Einige davon werden von der Nagra als „Reserve-FEPs“ eingestuft, die bei Bedarf in zukünftigen Sicherheitsanalysen verwendet werden können. Somit sind die Schlussfolgerungen im Kapitel 9 des Sicherheitsberichts (Nagra 2002a) allgemein gut nachgewiesen und überzeugend. Das will nicht heissen, dass es nicht weitere Themen gäbe, die berücksichtigt werden sollten. Vielmehr bedeutet dies, dass nach weiteren Arbeiten und Untersuchungen, darunter Abklärungen unter Tag in einem unterirdischen Felslabor am vorgesehenen Standort des Lagers, gute Aussichten für einen Sicherheitsnachweis bestehen, der ausreicht, um ein Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands zu bewilligen.

Wie im Abschnitt 3.1.2 beschrieben, muss ein Sicherheitsnachweis eine Synthese der Projektunterlagen, Analysen und Argumente in der Form eines so genannten „statement of confidence“ enthalten. Im Kapitel 8 des Sicherheitsberichts hat die Nagra eine solche Synthese gemacht (Nagra 2002a). *Das IRT betrachtet diese Synthese als klar, übersichtlich dargestellt und gut mit Argumenten untermauert; die Synthese stimmt mit internationalen Standards überein.* Die Synthese fasst zusammen, weshalb die Nagra hohes Vertrauen in die Sicherheit der Entsorgung von BE, HAA und LMA in einem Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands hat.

Das IRT stellt fest, dass der Sicherheitsbericht im Detail nicht alle Elemente eines expliziten so genannten „statement of confidence“ enthält, wie es von der NEA (1999) empfohlen wird. Zwar benennt und untersucht die Nagra Ungewissheiten im ganzen Sicherheitsbericht, doch ordnet sie diese in der Zusammenfassung nicht nach Prioritäten (Kapitel 8 und 9 des Sicherheitsberichts). Hinweise zum weiteren Vorgehen werden nur kurz im Kapitel 8 des Sicherheitsberichts erwähnt. Im Gespräch mit dem IRT erklärte die Nagra, dass sie in der gegenwärtigen Phase des Entsorgungsprogramms keinen detaillierten Arbeitsplan aufstellen wollte, weil sie weder dem Prozess der Entscheidungsfindung noch den Ergebnissen verschiedener Prüfungsverfahren (einschliesslich der vorliegende Expertenprüfung) vorgreifen wollte.

Das IRT versteht diesen Entscheid. Für den Fall des Entscheids, das schweizerische Entsorgungsprogramm auf ein Tiefenlager im Opalinuston im Zürcher Weinland auszurichten, empfiehlt das IRT der Nagra jedoch, nochmals auf den Sicherheitsnachweis, wie er im Bericht Nagra (2002a) dokumentiert ist, zurückzukommen und unter Berücksichtigung der Resultate der verschiedenen Überprüfungen des Projekts Entsorgungsnachweis die verbleibenden Ungewissheiten nach Prioritäten zu ordnen und ein Arbeitsprogramm vorzubereiten, mit dem diese Ungewissheiten weiter verkleinert werden könnten.

Das IRT betrachtet den Sicherheitsnachweis (dokumentiert im Sicherheitsbericht), wonach BE, HAA und LMA sicher und im Einklang mit den schweizerischen behördlichen Richtlinien entsorgt werden können, als vernünftig und gut durchdacht. Er enthält eine Mischung von quantitativen und qualitativen Argumenten. Das Konzept der mehrfachen Barrieren und die „Pfeiler der Sicherheit“ werden hervorgehoben. Im Einklang mit der gegenwärtigen Betonung von wirkungsvollen technischen Barrieren beträgt die erwartete Lebensdauer der BE- und HAA-Behälter 10 000 Jahre. Das geologische Umfeld ist ein sehr wirkungsvoller Teil des Systems. Mit mehrfachen Argumentationsketten wird überzeugend nachgewiesen, dass im Opalinuston der langsame Prozess der Diffusion der entscheidende Transportmechanismus ist.

### **3.3 Die Dokumentation des Sicherheitsnachweises**

Das wichtigste Dokument des Sicherheitsnachweises ist der Sicherheitsbericht, NTB 02-05 (Nagra 2002a). Er wird von vielen anderen Dokumenten gestützt. Die wichtigsten unter diesen sind das Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, NTB 02-02 (Nagra 2002c), die Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, NTB 02-03 (Nagra 2002b), Models, Codes and Data, NTB 02-06 (Nagra 2002c) und der FEP Management Report, NTB 02-23 (Nagra 2002d).

Wie auch schon in früheren komplexen Sicherheitsanalysen von geologischen Tiefenlagern werden die Hauptargumente im Sicherheitsbericht aufgeführt, wobei im Text auf unterstützende Dokumente hingewiesen wird.

Im Sicherheitsbericht beginnt jedes Kapitel mit einer Einleitung, die aufzeigt, welche Art von Informationen präsentiert werden und wo sie in der gesamten Bewertung der Sicherheit ihren Platz haben. Aufeinanderfolgende Kapitel stellen das vorgeschlagene Lagersystem vor, erörtern und bewerten es. Der Aufbau ist logisch, die Darstellung hervorragend, der Text klar und bemerkenswert fehlerfrei. Das Zielpublikum sind Spezialisten und die Sicherheitsbehörden, nicht das breite Publikum. Der Sicherheitsnachweis beruht auf einer ausgewogenen Mischung von quantitativen Daten und qualitativen Argumenten. Allgemein handelt es sich beim Sicherheitsbericht und seinen unterstützenden Berichten um Dokumente von sehr hoher Qualität.

Der gewählte Aufbau ist allerdings nicht perfekt. Die von der Nagra für den Sicherheitsbericht gewählte Vorgehensweise bedeutet beispielsweise, dass ein bestimmtes Thema üblicherweise in mehreren Kapiteln behandelt wird. Deshalb muss der Leser ständig Informationen aus verschiedenen Kapiteln untereinander vergleichen. Der Bericht ist deshalb etwas zerstückelt und repetitiv. Trotzdem ist die Nachvollziehbarkeit gut. Der Leser kann die Argumente verfolgen vom Sicherheitsbericht zu den Detailinformationen, Rechenprogrammen und Daten in den untergeordneten Dokumenten. In einzelnen Fällen enthält der Hauptbericht jedoch unbewiesene Aussagen ohne Hinweise auf Dokumente einer tieferen Ebene. In einigen wenigen Fällen waren relevante Informationen selbst in untergeordneten Dokumenten nicht vorhanden.

Obschon die Nagra offensichtlich sehr bemüht war, transparente und nachvollziehbare Informationen zu liefern, ist es für den Leser anstrengend, die interessanten grundlegenden Informationen zu finden. Dies ist allerdings keine Eigenheit des vorliegenden Nagra-Sicherheitsnachweises, sondern die Realität, mit der ein Experte leben muss. Beträchtliche Anstrengungen sind erforderlich, um den Sicherheitsnachweis, die ihm zugrunde liegenden Informationen und das modellhafte Verhalten eines gegebenen Systems zu verstehen.

Das IRT kommt zum allgemeinen Schluss, dass die Nagra ihren Entsorgungsnachweis in hervorragender Weise dokumentiert hat, angefangen mit einer klaren Darstellung der Ziele und Prinzipien, welchen der Entsorgungsnachweis und seine Dokumentation folgen.

Das IRT vertritt die Ansicht, dass die Transparenz und die Nachvollziehbarkeit in Zukunft verbessert werden könnten, indem die Nagra

eine standardisierte Methode benützen würde um sicherzustellen, dass im Sicherheitsnachweis vor allem bei umstrittenen Angaben klare Hinweise auf detaillierte Erklärungen in unterstützenden Dokumenten zu finden sind. Für viele Leser sehr nützlich wäre eine Kurzfassung von etwa 50-60 Seiten des Entsorgungsnachweises und seiner Dokumentation, einschliesslich der Berichte zur Geosynthese und zum Konzept für die Anlage und den Betrieb (Nagra 2002b und 2002c).

### **3.4 Qualitätssicherung**

Im Aufbau eines Sicherheitsnachweises spielt die Qualitätssicherung (QS) eine wichtige Rolle. Deutlich feststellbare Anzeichen, die auf eine gute Qualitätssicherung hinweisen, erhöhen das Vertrauen in den Sicherheitsnachweis; dagegen wird das Vertrauen durch Anzeichen fehlender Qualitätssicherung untergraben. Die Qualität des Projektmanagements hat zwei Aspekte: „die Dinge richtig tun“ und „die richtigen Dinge tun“. Beide Aspekte profitieren von einer starken Qualitätskultur.

Die Nagra hat ihre Qualitätssicherungsmaßnahmen und ihr Qualitätssicherungssystem in Anhang 8 von Nagra (2002e) allgemein beschrieben. Das Thema war ebenfalls Gegenstand eines besonderen Vortrags für das IRT. Das System besteht aus den folgenden Grundelementen:

- einer Firmenpolitik, wonach die Arbeit von gut qualifizierten Leuten mit geeigneten Instrumenten geleistet wird;
- einem Projektplan für ein gegebenes Projekt und, falls erforderlich, für Unterprojekte;
- einem Qualitätssicherungsplan, der die für ein gegebenes Projekt vorzunehmenden Massnahmen auflistet und, wenn im Projektplan verlangt, QS-Plänen für besondere Unterprojekte;
- einem Projekt-Dokumentationssystem, das dafür sorgt, dass alle wichtigen Dokumente für zukünftigen Gebrauch katalogisiert und archiviert werden;
- einem Datenfreigabe-Prozess, um eine konsistente Verwendung der Daten sicherzustellen, welche auf dem neusten Stand und angemessen sind;
- Audits, um dafür zu sorgen, dass die QS-Verfahren befolgt werden und das QS-System verbessert wird; und

- spezifischen Arbeitsabläufen, Qualitätsrichtlinien und Qualitätsmassnahmen für spezifische Arbeitsschritte, auch für das Projekt Entsorgungsnachweis, für die Durchführung von Sicherheitsanalyse-Berechnungen und die Entwicklung resp. Weiterentwicklung von Sicherheitsanalyse-Codes.

Das IRT hat eine Reihe von Beispielen vernünftiger Qualitätssicherungsmassnahmen gefunden, welche von der Nagra befolgt werden. Zu diesen zählen, neben einer engagierten Führung, die den QS-Massnahmen eine hohe Priorität einräumt, der Einsatz eines formellen Projektplans, der die Ziele des Projekts, seine Randbedingungen, die Verantwortlichkeiten der Mitarbeiter und der Projektgruppen auflistet. Weiter zu nennen sind der umfassende Einsatz von formalisierten Expertenprüfungen, interner wie externer Spezialisten, einschliesslich besonderer Überprüfung des wissenschaftlichen Verständnisses (siehe auch Abschnitt 3.2.2), formelle Verfahren zur Kontrolle von Software-Modifikationen und eine formelle Datenkontrolle. Ausserdem setzt die Nagra eine formelle Kontrolle von Daten für die Sicherheitsanalyse an, die auch besondere Audit-Sitzungen vor der Freigabe von Daten vorsieht. Ein anderes Beispiel guter Handlungsweise war die Evaluation und Dokumentation der Daten aus der 3D-Seismik-Untersuchung, die der Abteufung der Benken-Tiefbohrung vorausging, und die Verwendung der Informationen aus der Bohrung Benken zur Verfeinerung der Auswertung der seismischen 3D (und 2D)-Daten. Eine Projektgruppe, die so genannte Audit-Gruppe, stellt sicher, dass bei der Definition der Rechenfälle das relevante wissenschaftliche Verständnis berücksichtigt wird. Zur Bewertung des Einflusses von Ungewissheiten und der Robustheit des vorgeschlagenen Lager-systems wurden Experten befragt. Dabei wurde über die Definition eines alternativen Rechenfalls entweder Konsens erzielt oder es wurde ein zusätzlicher Rechenfall eingeführt, um die unterschiedlichen Ansichten der Experten zu berücksichtigen.

*Allgemein fand das IRT bei der Nagra klare Hinweise für eine ausgeprägte Qualitätskultur. Dazu gehören ein grosses Engagement der Führung, der Einsatz von qualifizierten und erfahrenen Mitarbeitern, gute interne Kommunikation unter dem Personal, die Zuteilung von Projektverantwortung und der Einsatz eines formellen Qualitäts-sicherungssystems.*

Als das QS-System ursprünglich entwickelt wurde, war eine Zertifizierung nach ISO 9000 vorgesehen. Bisher wurde das QS-System bei der ISO noch nicht formell zertifiziert und wurde auch noch nicht einem formellen externen Audit unterzogen, obschon ein externer QS-Spezialist hinzugezogen wurde. *Die Nagra hat allerdings erklärt, dass sie eine Zertifizierung ihres QS-Systems nach ISO 9001:2000 anstrebt und das IRT empfiehlt der Nagra mit der*

*Zertifizierung fortzuführen. Damit wird das QS-System der Nagra einem formellen Audit unterzogen. Das IRT schlägt der Nagra ausserdem vor, in künftige Projektpläne und in ihr QS-System einen formellen Audit-Plan einzubeziehen und dabei eine Mischung von internen und externen Audits zu verwenden.*

Das IRT stuft das Informationsmanagement als einen kritischen Teil der Arbeit der Nagra ein. Das IRT ist der Ansicht, dass sich die Nagra der Bedeutung des Informationsmanagements bewusst ist und ihre Informationen bisher auf befriedigende Weise mit spezifischen Projektdokumentationen gesichert hat. In der Schweiz finden geologische Untersuchungen im Zusammenhang mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle seit 1978 statt. Es besteht ein allgemeiner Bedarf für die Sicherstellung, dass Daten aus der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft geordnet, aufbewahrt und leicht zugänglich gehalten werden. Das geschieht beispielsweise mit einer relationalen Datenbank oder einem ähnlichen Informationssystem, das im Gleichschritt mit der Entwicklung der Informationstechnologie ausgebaut werden kann.

Das IRT ermuntert die Nagra zur Überprüfung der Instrumente und Methoden, die sie zur Archivierung, zur Suche und zum Bezug von Informationen benutzt, um das Firmengedächtnis zu erhalten – im Hinblick darauf, dass in einigen anderen Organisationen die Projektdokumentation nicht ausreichte, um alle wichtigen Informationen langfristig zu sichern.



## **4. BEWERTUNG DER KOMPONENTEN UND PROZESSE DES MEHRFACHBARRIERENSYSTEMS**

Dieses Kapitel bewertet, wie die Strategie, Grundsätze und Methodik, die im Sicherheitsnachweis verwendet werden (Diskussion siehe Kapitel 3) in der Analyse der Nagra zur Anwendung gelangen: a) sicherheitstechnisches Verhalten der Komponenten des Mehrfachbarrierensystems, und b) die verschiedenen Prozesse, die für die Freisetzung und den Transport der Radionuklide verantwortlich sind. Die Behandlung der Biosphäre ist ebenfalls Gegenstand der Diskussion. Bei der Durchführung der Bewertung widmet das IRT dem wissenschaftlichen Verständnis der Barrieren und der Prozesse besondere Aufmerksamkeit.

### **4.1 Charakterisierung des geologischen Umfelds**

Der Sicherheitsnachweis beruht in wesentlichem Masse auf den sehr günstigen Eigenschaften des geologischen Umfelds im Zürcher Weinland und insbesondere der Opalinustonsschicht. Entsprechend richtet das IRT grosses Interesse auf die geologische Charakterisierung, die im Sicherheitsbericht (Nagra 2002a) zusammengefasst und in der Geosynthese (Nagra 2002b) detailliert beschrieben wird.

Der geologische Rahmen der vorliegenden Studie wurde aus einer systematischen Studie der Wirtgesteine in der gesamten Schweiz abgeleitet. Mit Beginn im Jahre 1978 umfassten die geologischen Studien:

- die Auswahl von tektonisch inaktiven und einfach strukturierten Gebieten;
- die Analyse der Grundwasserfliessverhältnisse (Fliebsregime) und der Grundwasserchemie;
- das Verständnis der wichtigen Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete des Grundwassers.

Die Untersuchung der kristallinen Gesteine war Gegenstand des Projekts Gewähr (Nagra 1985) und wurde im Bericht Kristallin-I (Nagra 1994) sicherheitstechnisch erneut bewertet.

Zu Beginn konzentrierten sich die Untersuchungen der Sedimentablagerungen auf die Identifizierung und auf eine allgemeine Bewertung der geeigneten Wirtgesteine mit geringer Durchlässigkeit und genügender Mächtigkeit in der Nordschweiz. Danach wurden die Merkmale potenzieller Wirtgesteine bestimmt und aus baulicher, hydrodynamischer und sicherheitstechnischer Sicht bewertet.

Die für die Sicherheitsanalyse Opalinuston relevanten Informationen stammen aus Untersuchungen von Nagra-Sondierbohrungen (1982-1988), oberflächennahen Bohrungen (1989-1994), Mont Terri (ab 1996) und Benken (1998-2001). Die Untersuchungen umfassten:

- Daten zur Mineralogie und Porosität aus den Sondierbohrungen Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim, sowie aus Mont Terri;
- Daten zur Felsmechanik aus Benken und Mont Terri;
- hydraulische Daten und andere Informationen aus *in situ*-Tests in Benken, Riniken, Schafisheim, Weiach, Mont Terri; aus Labortests an Bohrkernen von Benken und Mont Terri; aus 10 Tunnels im Faltenjura und 40 oberflächennahen Bohrungen in horizontal gelagertem Opalinuston;
- Gastransport-Eigenschaften aus *in situ*-Tests und Bohrkernen von Benken und Mont Terri;
- geochemische Porenwasserdaten aus Bohrkernen von Benken sowie aus *in situ*-Tests und Bohrkernen von Mont Terri;
- Diffusionsdaten aus Bohrkernen von Benken, aus *in situ*-Tests und Bohrkernen von Mont Terri sowie aus natürlichen Konzentrationsprofilen von Benken und Mont Terri.

Das IRT ist der Meinung, dass die Auswahl des Zürcher Weinlands als bevorzugtes Gebiet für lokale Untersuchungen im Projekt Entsorgungsnachweis aus geologischer Sicht verständlich ist, da es das grösste tektonisch ungestörte Gebiet mit Opalinuston-Vorkommen in geeigneter Tiefe darstellt. Seit 1991 beinhalten die Untersuchungen im Zürcher Weinland:

- eine Sondierbohrung (Benken) mit umfassendem Test- und Profilaufnahmeprogramm;
- oberflächennahe Bohrungen (zwei Piezometer, verschiedene Messbohrungen für die 3D-Seismik);
- ca. 60 km an 2D-Seismik;

- ca. 50 km<sup>2</sup> an 3D-Seismik, interpretiert mit modernen Auswertungswerkzeugen; und
- die Erfassung der hydrogeologischen Randbedingungen aus regionalen Untersuchungen.

Die Methodik und die Zielsetzungen der geologischen Untersuchungen stimmen mit der internationalen Praxis und Empfehlungen der IAEA und NEA überein (IAEA 1999, IAEA 2001b, IAEA 2003, NEA 2001c, NEA 2003, ITC 2003, Witherspoon *et al.* 2001). Das Verständnis der geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet basiert auf der hohen Qualität der 2D- und 3D-Seismikkampagnen sowie auf der Bohrkernaufnahme und den umfassenden Tests der Benken-Sondierbohrung (Nagra 1995, Nagra 2001a, Nagra 2001c, Nagra 2001d). Das Bohrkernmaterial wurde sorgfältig aufgenommen und ausgewählte Bohrkernabschnitte wurden einer detaillierten stratigrafischen, mineralogischen und petrografischen Analyse unterworfen (Nagra 2001b, Nagra 2001c, Nagra 2001d). In einem umfassenden geophysikalischen Programm wurden petrophysikalische Untersuchungen und Strukturuntersuchungen sowie seismische Messungen durchgeführt (Nagra 2001c, Nagra 2001d). Ferner wurden neotektonische Beobachtungen, die sich über mehrere Jahre erstreckten (Nagra 2002f), und hydraulische Untersuchungen in der Sondierbohrung Benken durchgeführt (Nagra 2001c, Nagra 2001d).

Bezogen auf die Sicherheit eines Tiefenlagers lassen sich die wichtigsten Resultate der neotektonischen Beobachtungen wie folgt zusammenfassen (Nagra 2002f):

- In ausgedehnten Gebieten der Nordschweiz, und insbesondere im Zürcher Weinland, blieb der Opalinuston seit seiner Bildung vor ca. 180 Millionen Jahren im Wesentlichen ungestört.
- Seismische Analysen zeigen, dass es im Zürcher Weinland nur geringfügige seismische Aktivität gibt.
- Es sind keine sicherheitsrelevanten Einwirkungen (d.h. keine mechanische Schädigung des Barrierensystems) von Erdbeben auf ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston (650 m unter der Erdoberfläche) zu erwarten, auch nicht im unwahrscheinlichen Fall eines grossen Erdbebens.
- Basierend auf Daten verschiedener Herkunft (Geomorphologie, Überdeckungs- und Hebungsgeschichte, Geodäsie) ist anzunehmen, dass die lineare Erosion mit der Langzeit-Hebung Schritt hält.

Das IRT interessierte sich besonders für die Resultate und die Interpretation von chemischen und Isotopenprofilen im Porenwasser des Opalinustons und der angrenzenden Schichten. Die Nagra führte Modellierungen der Daten für Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotope durch und argumentiert, dass sich dadurch nachweisen lässt, dass Diffusion statt Advektion der dominierende Transportprozess im Opalinuston in der Zeitperiode von der Grössenordnung der letzten Million Jahren war. Die Isotopendaten für Chlor sind zwar weniger konsistent, stehen aber nicht im Widerspruch zu dieser Schlussfolgerung (Gimmi and Waber, 2003). Das IRT war beeindruckt von dem Gewicht dieses Arguments aufgrund der betroffenen langen Zeiträume und weil es andere, auf der Durchlässigkeit beruhende Hinweise ergänzt.

Aus der Sicht der Sicherheitsanalyse und mit Bezug auf das Zürcher Weinland hält das IRT fest:

- Die Systemgeometrie, einschliesslich der Tiefe und Mächtigkeit des Wirtgesteins und der angrenzenden Formationen, ist im Allgemeinen hinreichend gut bekannt.
- Die meisten sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Opalinustons sind charakteristisch für den Gesteinstyp. Daten verschiedener Herkunft zeigen, dass sich diese Eigenschaften räumlich wenig ändern. Dies erlaubt eine Extrapolation der Informationen aus der Sondierbohrung Benken auf das 3D-Seismik-Untersuchungsgebiet.
- Einige Sicherheitsfunktionen des Opalinustons, einschliesslich des Selbstabdichtungsvermögens, hängen vom Gesteinsdruck und damit von der Gesteinsüberdeckung ab. Die Tiefe des Opalinustons im Zürcher Weinland, und damit die Mächtigkeit der Gesteinsüberdeckung, sind in der Sondierbohrung und in den seismischen Untersuchungen klar ausgewiesen.
- Die Bewertung der für die Sicherheitsanalyse und für die bautechnische Machbarkeit relevanten Wirtgesteinseigenschaften basieren nicht nur auf Untersuchungen in der Sondierbohrung Benken, sondern auch auf einer grossen Anzahl anderer Untersuchungen im Opalinuston, wie z.B. Sondierbohrungen in der näheren und weiteren Umgebung des Zürcher Weinlands, in Tunnels, im Felslabor Mont Terri, in oberflächennahen Bohrungen und Tongruben.
- Für die jetzige Projektphase ist das Vertrauen in die Charakterisierung des Opalinustons ausreichend für die Sicherheitsanalyse. Obwohl es möglich ist, dass unerkannte geologische Merkmale (tektonische

Heterogenitäten) in umfassenderen Untersuchungen an den Tag treten könnten, so ist es doch unwahrscheinlich, dass sich diese Merkmale als eine Quelle grösserer Ungewissheiten erweisen werden. Die natürlichen Isotope in Porenwässern und die hydraulischen Überdrücke deuten darauf hin, dass die Durchlässigkeit in allen interessierenden zeitlichen und räumlich Skalen sehr gering ist für den Transport durch den Opalinuston, in Übereinstimmung mit *in situ*- und Labormessungen.

*Zusammenfassend kommt das IRT zu den folgenden Schlussfolgerungen bzgl. des geologischen Umfelds im Untersuchungsgebiet:*

- *Das geometrische Modell des Opalinustons im Zürcher Weinland ist gut untermauert.*
- *Die von der Nagra verwendeten Methoden zur Charakterisierung des geologischen Umfelds sind in Übereinstimmung mit der akzeptierten geologischen Praxis und die Schlussfolgerungen werden durch mehrfache Argumentationsketten gestützt.*
- *Die Nagra hat gewichtige Anhaltspunkte für die Homogenität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Opalinustons im Zürcher Weinland sowie für die Extrapolierbarkeit dieser Eigenschaften auf ein grösseres Gebiet vorgelegt.*
- *Die Charakterisierung des untertägigen Umfelds beinhaltet Ungewissheiten, einschliesslich der Möglichkeit von Durchlässigkeitschwankungen und Störungszonen. Diese Ungewissheiten finden in der Sicherheitsanalyse ausreichende Berücksichtigung.*
- *Die Arbeiten zur Standortcharakterisierung stehen im Einklang mit den aktuellen internationalen Normen, z.B. IAEA (2004).*

In diesem Zusammenhang hält das IRT fest, dass die Nagra gute Gründe hat, ihre zukünftigen Anstrengungen auf den Opalinuston im Zürcher Weinland zu fokussieren. Das IRT pflichtet dem Vorhaben der Nagra bei, eine oder mehrere zusätzliche Sondierbohrungen in den Opalinuston im Zürcher Weinland abzuteufen, bevor sie – im Falle eines entsprechenden, positiven Entscheids – Untertagebauten in Angriff nimmt.

## **4.2 Inventar und Quellterme**

Die Bestimmung des Abfallinventars für das Lager und der zugehörigen Radionuklid-Quellterme ist der Startpunkt für die Berechnungen zur Radionuklidfreisetzung in die geologischen Schichten und weiter in die

Umwelt. Genaue Informationen über das Abfallinventar sind von zentraler Bedeutung für die Sicherheitsanalyse.

Die Nagra hat eine Rechenvorschrift zur Festlegung der sicherheitsrelevanten Radionuklide entwickelt (siehe Appendix 5 in Nagra 2002e). Insgesamt erfüllen 74 Radionuklide dieses Kriterium. Das IRT hat die entsprechende Liste der Nagra geprüft und – für die Zwecke der Sicherheitsanalyse – für vollständig befunden.

Eine Zusammenfassung der Abfalltypen und Radionuklidinventare ist in Nagra (2002a) zu finden und detailliertere Informationen liefert McGinnes (2002). Die verwendeten Annahmen zur Bestimmung des Abfallinventars (Herkunft, Art und Menge), in Übereinstimmung mit der schweizerischen Gesetzgebung in Sachen Kernenergie, sind klar ausgewiesen, obgleich die Unterscheidung zwischen der bereits vorhandenen und der in Zukunft (wahrscheinlich oder mit Sicherheit) produzierten Abfallmenge nicht ersichtlich ist.

Die Abfallinventare basieren auf einer Betriebsdauer der fünf Schweizer Kernkraftwerke von 60 Jahren. Die Gesamtleistung dieser Kernkraftwerke beträgt 3.2 GW(e). Die angenommene, während 60 Jahren erzeugte Leistung beläuft sich auf 192 GWa(e), was einer Auslastung von 100 % entspricht. Ein alternativer Fall mit 300 GWa(e) wird ebenfalls betrachtet. Die verwendeten Annahmen zur Bestimmung des Inventars werden vom IRT als vernünftig und konservativ bewertet.

Für ca. 27 % der abgebrannten Brennelemente bestehen Verträge zur Wiederaufarbeitung mit BNFL und COGEMA, woraus sowohl verglaste HAA als auch verschiedene, mit Zement oder Bitumen konditionierte Typen von LMA (z.B. Hüllrohre und Endstücke, Schlämme) entstehen.

Die Berechnung der Aktivität von Radionukliden in abgebrannten Brennelementen basiert auf ausgereiften Verfahren unter Verwendung von Rechenprogrammen, die seit 30 Jahren im Einsatz stehen und stetig weiterentwickelt wurden. Das meist verwendete Rechenprogramm ist ORIGEN (verschiedene Versionen). Die Nagra verwendet dieses Programm für einen Teil der Berechnungen und ein anderes, vom PSI entwickeltes Programm, BOXER, für Berechnungen von Brennelementen mit hohem Abbrand. Gemäss Nagra stimmen die Resultate von BOXER und anderen Programmen – in den Fällen, in denen beide anwendbar sind – in angemessener Weise überein (McGinnes 2002). Von Berechnungen dieser Art ist eine Genauigkeit von ca. 20 % zu erwarten, was für den Zweck der Sicherheitsanalyse mehr als zufrieden stellend ist.

Das IRT hat Vergleiche der Aktivitäten spezifischer Radionuklide für abgebrannte Brennelemente angestellt, wie sie von der Nagra berechnet und in anderen Sicherheitsanalysen veröffentlicht wurden (USA und Frankreich). Besonderes Augenmerk galt dabei den Aktivitäten von langlebigen, beweglichen Radionukliden (wie z.B.  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  und  $^{14}\text{C}$ ), die am meisten zu den geschätzten Dosen beitragen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Abbrände fällt die Übereinstimmung mit anderen Datenquellen im Allgemeinen gut aus. Das IRT hält fest, dass die Nagra die neuesten Daten für die Halbwertszeit von  $^{79}\text{Se}$  verwendete ( $1.1 \times 10^6$  Jahre); diese galt in früheren Sicherheitsanalysen als ungewiss. Das IRT kommt zur Schlussfolgerung, dass die Inventare für SWR  $\text{UO}_2$ , DWR  $\text{UO}_2$  und MOX im Allgemeinen mit den in anderen Programmen verwendeten übereinstimmen, und dass sie für die Zwecke der Sicherheitsanalyse ausreichend sind.

Das IRT fand weder in Nagra (2002a) noch in den Referenzberichten genügend Informationen, um die Aktivitäten spezifischer Radionuklide für HAA und LMA nachzuvollziehen. Die Nagra weist darauf hin, dass diese Daten teilweise auf Berechnungen und zusätzlichen Informationen der BNFL und COGEMA basieren; es werden jedoch keine weiteren Informationen geliefert und die Methodik ist nicht klar. Später erfolgte Diskussionen mit Nagra-Mitarbeitern deuten darauf hin, dass beträchtliche Ungewissheiten in den heutigen Abschätzungen für  $^{129}\text{I}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  und  $^{14}\text{C}$  sowohl für HAA als auch für LMA bestehen. Dies ist auf die Prozessvariabilität und die Schwierigkeiten bei der Messung solcher Betastrahler in hochaktiven Materialien zurückzuführen. Trotz dieser Ungewissheiten sind die abgeschätzten HAA- und LMA-Quellterme begrenzt und wirken sich nicht in bedeutendem Masse auf die gesamthafte Sicherheitsanalyse aus. Das IRT folgert, dass die Abschätzung der Inventare für die jetzige Projektphase ausreichend sind.

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

### **4.3 Barrieren und Prozesse im Nahfeld**

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Barrieren und Prozessen im Nahfeld, welches die Abfallmatrix, den Abfallbehälter oder das Abfallgebäude, und das Verfüllmaterial umfasst.

#### 4.3.1 Chemische, physikalische und geochemische Daten und Prozesse

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

Die Nagra hat vier geochemische Datensätze für das BE/HAA-Nahfeld (Berner 2002, Bradbury and Baeyens 2003a) und das LMA-Nahfeld erstellt (Berner 2003, Wieland and Van Loon 2002). Die Nagra hat einen integrierten Ansatz für die Behandlung der Löslichkeit, Rückhaltung und Transportprozesse in der Sicherheitsanalyse angewandt. Dieser integrierte Ansatz basiert auf den Grundsätzen der chemischen Thermodynamik, auf experimentell gemessenen Sorptions- und Diffusionsdaten sowie ergänzend auf dem Urteil von Experten, wo keine Daten verfügbar sind.

Das IRT betrachtet die Methodik zur Beurteilung des chemischen und geochemischen Milieus im Nahfeld als einwandfrei und auf dem neuesten Stand. Das anfänglich oxidierende Milieu wird ebenso betrachtet wie die Entwicklung zu einem reduzierenden Milieu, das aufgrund des in Behältern und Gebinden vorhandenen Eisens und der in Bentonit und Wirtgestein vorhandenen, reduzierenden Mineralien auftritt.

*Das IRT zieht die Schlussfolgerung, dass das schweizerische Programm eine international führende Rolle in der Entwicklung von geochemischen Datensätzen im Zusammenhang mit der Lagerung radioaktiver Abfälle spielt, und diese Datensätze in geeigneter Weise auf ihre Analyse der Nahfeldprozesse angewandt hat.*

Die chemische Rückhaltung in den Berechnungen der Sicherheitsanalyse basiert auf Löslichkeitslimiten und Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ -Werte) für sicherheitsrelevante Elemente. Die Retardationsprozesse werden als linear, reversibel und im Gleichgewicht angenommen. Ferner wird angenommen, dass die maximalen Löslichkeiten die Radionuklidkonzentration im Nahfeld begrenzt und diese Konzentration auch im Fernfeld nie überschritten wird. Diese Annahmen sind vernünftig, zweckdienlich und stehen im Einklang mit internationalen Gepflogenheiten.

In der Anwendung des integrierten Ansatzes wurden die verfügbaren Daten hierarchisch gegliedert und die Ungewissheiten in „beste Schätzungswerte“ (best estimate), pessimistische und optimistische Werte übersetzt. Die Nagra räumte ihren – veröffentlichten und unveröffentlichten – eigenen experimentellen Arbeiten oder „hauseigenen“ Daten höchste Priorität ein. Ferner wurden Daten, wo geeignet, aus der Literatur und aus chemischen Analoga verwendet. In den Fällen, in denen die obigen Daten nicht verfügbar waren, wurde auf das Urteil von Experten zurückgegriffen. Die Nagra verglich die aus Batch- und Diffusionsexperimenten abgeleiteten  $K_d$ -Werte für eine breite Auswahl von Elementen. Die Übereinstimmung wurde als vernünftig eingestuft, aber die Nagra anerkennt, dass Unterschiede zwischen den zwei Experimenttypen bestehen, vor allem für redox-sensitive vierwertige Ionen.

Für die Beschreibung von Diffusionsprozessen sowohl im Nahfeld als auch in der Geosphäre gelangt das Fick'sche Gesetz zum Einsatz. Einige Radionuklide sind dem Anionen-Ausschluss unterworfen, der ihre Diffusionskoeffizienten und die für sie zugängliche Porosität beeinflusst. Ferner werden Kolloide im Bentonit und Opalinuston als unbeweglich angenommen; sie tragen so nicht zu einem erhöhten Transport bei. Diese Annahme wird durch einen technischen Bericht gestützt (Voegelin and Kretzschmar 2002) und ist in Anbetracht der Filtereigenschaften von Tonen vernünftig.

#### ***4.3.2 Verhalten der Behälter und Gebinde***

Die Behälter und Gebinde, welche die Abfälle umschließen, sind die erste der mehrfachen Barrieren, da eine allfällige Radionuklidfreisetzung erst nach ihrem Versagen beginnt.

##### *HAA und BE*

Kohlenstoffstähle bilden das Referenzmaterial für die BE- und HAA-Behälter. Der Stahl der BE-Behälter ist 150 mm dick, derjenige der HAA-Behälter 250 mm dick. Die Auslegungs-Lebensdauer beider Behältertypen beträgt 1 000 Jahre, aber die erwartete Lebensdauer ist 10 000 Jahre (Johnson and King 2003). Kupfer ist eine dauerhaftere Alternative mit einer Lebensdauer von mehr als 100 000 Jahren. Die Nagra hat darauf hingewiesen, dass die Auslegung der BE-Behälter konzeptueller Natur ist und die Details noch zu erarbeiten sind (Nagra 2002a). Der HAA-Behälter ist gleich wie der im Projekt Gewähr vorgeschlagene Behälter (Nagra 1985, Nagra 1994).

Korrosion durch Wasser ist der hauptsächliche Prozess, der zum Versagen der BE- und HAA-Behälter führt. Johnson und King (2003) liefern eine gute Beschreibung und Analyse aller möglicher Korrosionsmechanismen

unter Lagerbedingungen. Dazu zählen die allgemeine Korrosion unter oxidierenden Bedingungen in der anfänglich aeroben Phase, die anaerobe Korrosion, die Loch- und Risskorrosion, die Rissbildung durch druckinduzierte Korrosion, die mikrobielle Korrosion durch Sulfide und die Auswirkungen der Strahlung. Die Nagra bewertet auch die umfangreiche Literatur zum Thema anaerobe Korrosion von Baustahl und folgert daraus, dass die Korrosionsraten im Bereich von 0.1 bis 10 µm pro Jahr liegen. Das IRT ist der Meinung, dass die von der Nagra betrachteten Korrosionsmechanismen im Einklang mit dem wissenschaftlichen Verständnis stehen. Ausserdem sind die angenommenen Korrosionsraten vernünftig (zwar konservativ, aber nicht in übertriebenem Masse) und stimmen mit den in anderen Programmen verwendeten Werten überein, insbesondere für reduzierende Bedingungen, wie sie sich erwartungsgemäss nach dem Lagerverschluss rasch entwickeln.

Im Referenzfall nimmt die Nagra an, dass keine von Anfang an beschädigten Behälter vorliegen und dass alle Behälter nach 10 000 Jahren versagen. Die Annahme eines gleichzeitigen Versagens aller Behälter ist konservativ, da vernünftigerweise eine zeitliche Staffelung erwartet werden darf. Die Wahl von Kohlenstoffstahl für die Behälter begrenzt das Risiko eines frühen Versagens, aber das IRT findet, dass dieses Risiko nicht auszuschliessen ist, insbesondere wegen möglicher fehlerhafter Schweissstellen. Infolgedessen hätte das IRT erwartet, dass eine kleine Anzahl schadhafter Stahlbehälter Bestandteil des Referenz-Szenariums gewesen wären. Das IRT akzeptiert jedoch, dass die Auswirkungen eines frühen Behälterversagens durch andere Rechenfälle abgedeckt sind (alternative Rechenfälle 5.3b und 5.3c zum Kupferbehälter und der „Was wäre wenn?“-Rechenfall 4.7 mit einem ungünstigen Nahfeldverhalten, in dem unter anderem die angenommene Lebensdauer aller Behälter 100 Jahre beträgt). Der letztere Fall illustriert die überragende Rolle des Opalinustons bei der Begrenzung der Radionuklid-freisetzung in die Biosphäre.

Die Nagra ordnet den Edelstahlkokillen, in welche die HAA-Glasmasse gegossen wird, oder den Zircaloy-Hüllrohren, die den Kernbrennstoff umhüllen, keine Sicherheitsfunktion zu. Diese beiden Annahmen sind konservativ, im Einklang mit den Annahmen in den meisten anderen Programmen. Im Yucca Mountain-Projekt fällt den Hüllrohren jedoch eine signifikante Barrierenfunktion zu (USDOE 2000).

*Zusammenfassend gelangt das IRT zur Schlussfolgerung, dass die Bewertung der BE- und HAA-Behälter, als Teil des Mehrfachbarrierensystems, angemessen und im allgemeinen konservativ ist. Obwohl das IRT die Wahl von Stahl als Behältermaterial als angemessen beurteilt, empfiehlt das IRT, dass Kupfer aufgrund seiner Vorteile, einschliesslich der längeren Lebensdauer und*

*der geringeren Gaserzeugung, als Option beibehalten wird.* Das IRT hält fest, dass die Fehlerrate bei der Herstellung von Kupferbehältern ungewiss ist, und pflichtet deshalb der Entscheidung der Nagra bei, die Fortschritte bei der Evaluierung von Kupfer in anderen Programmen zu verfolgen (z.B. Schweden und Finnland).

#### *LMA*

Eine Anzahl unterschiedlicher Gebindetypen werden für LMA vorgeschlagen; im Allgemeinen handelt es sich um Stahl- oder Faserzementfässer, die in einem Betoncontainer mit Wandstärke 20-25 cm (Nagra 2002c) platziert werden. Nicht alle Gebinde sind wasserdicht, weshalb relativ bald nach der Abfalleinlagerung mit einem Feuchtigkeitzutritt zu rechnen sein dürfte.

Die Korrosion der metallischen LMA-Gebinde und Abfälle ist Gegenstand der Diskussion in Nagra (2003a). Die Metalle sind Kohlenstoffstähle, Eisen und Edelmetalle. Die Korrosionsmechanismen im zementhaltigen Milieu mit Temperaturen bis zu 40°C und in Anwesenheit von Chloriden werden nicht im Detail diskutiert, aber die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Informationen stehen im Einklang mit den neuesten Erkenntnissen. Aufgrund der Redox-Pufferung durch Eisen ist zu erwarten, dass sich stark reduzierende Bedingungen einstellen. Die Korrosionskinetik wird diskutiert und die gewählten Werte sind angemessen (0.1 µm pro Jahr für Kohlenstoffstähle und 0.01 µm pro Jahr für Edelstahl).

Im Referenz-Szenarium und in anderen Rechenfällen nimmt die Nagra an, dass die Radionuklidfreisetzung in die Zementverfüllung nach Ablauf von 100 Jahren erfolgt. Demzufolge wird den LMA-Gebinden nur eine untergeordnete Sicherheitsfunktion zugeordnet. Dies ist konservativ, steht aber im Einklang mit dem in anderen Programmen verfolgten Ansatz für diesen Abfalltyp.

#### **4.3.3 Verhalten der Abfallmatrix**

Dieser Abschnitt betrachtet die Analyse der Nagra bzgl. Radionuklidfreisetzung aus den drei Abfalltypen (BE, verglaste HAA und LMA) nach dem Versagen des Einschlusses und nach dem ersten Kontakt mit Wasser.

### *Abgebrannte Brennelemente (BE)*

Die abgebrannten Brennelemente steuern den grössten Beitrag zum Quellterm bei, da sie 85 % des gesamten Aktivitätsinventars im Lager umfassen. Das Verhalten von abgebrannten Brennelementen war und ist Gegenstand intensiver, weltweiter Forschung. Der Ansatz der Nagra steht im Einklang mit dem international verfolgten Ansatz, der darin besteht, zwei Komponenten zu untersuchen: (a) die anfängliche, rasche Freisetzung beweglicher Elemente aus dem Brennstoff und (b) die langsame Freisetzung von Uran und anderen Elementen im Gleichschritt mit der Auflösung der Brennstoffmatrix.

Flüchtige und bewegliche Radionuklide, erzeugt während des Reaktorbetriebs, tendieren zum Transport entlang der Risse und Korngrenzen in den Brennstofftabletten. Ein Teil dieser Radionuklide gelangt in den Zwischenraum zwischen Brennstoff und Hüllrohren. Die Radionuklide in Zwischenräumen und an Korngrenzen lösen sich rasch auf, sobald der Brennstoff in Kontakt mit Wasser gelangt. Die Nagra bezeichnet den Radionuklidanteil in den Zwischenräumen und in gut zugänglichen Korngrenzen als „Instantan freigesetzte Radionuklidfraktion“ (engl. Abkürzung IRF). Die IRF hängt vom Abbrand und anderen Faktoren ab, wie zum Beispiel den Temperaturen, denen der Brennstoff während des Reaktorbetriebs ausgesetzt war. Die IRF hat einen hohen Stellenwert in der Sicherheitsanalyse, da sie den anfänglichen Freisetzungspuls in das Verfüllmaterial bestimmt und da die Matrixauflöserate als sehr klein eingeschätzt wird.

Die Nagra berichtet von experimentellen Messungen der IRF für Zerfallsgase, Cäsium, Strontium, Technetium, Jod und Kohlenstoff (Johnson and McGinnes 2002). Für einige andere Elemente wurden Abschätzungen durchgeführt, die auf chemischen Betrachtungen basieren (z.B. Selen, Chlor). Die IRF-Werte der Schlüsselemente betragen für den Referenzabbrand 4-9 % für Jod, 4-5 % für Cäsium, 10-13 % für Chlor, 10 % für Kohlenstoff und 4-9 % für Selen. Deutlich höhere Werte werden für höhere Abbrände und MOX-Brennstoff verwendet. Das IRT betrachtet diese Werte als im Einklang mit anderen Untersuchungen und als leicht konservativ.

Die Nagra betrachtet zwei Modellansätze für die Auflösung von BE: ein radiolytisches Modell (Referenzfall) und ein löslichkeitslimitiertes Modell (das Gegenstand des alternativen Rechenfalls 1.2 ist). Die Diskussion der verschiedenen Mechanismen steht im Einklang mit den neuesten Kenntnissen, insbesondere in Bezug auf die radiolytische Brennstoffauflösung. Es wird klar darauf hingewiesen, dass die Matrixauflösung unter reduzierenden Bedingungen langsam und unter oxidierenden Bedingungen vergleichsweise schnell vonstatten geht.

Selbst wenn das chemische Milieu im gesamten Lager reduzierend ist, so werden doch oxidierende Wasserinhaltsstoffe (Radikale und Wasserstoff-Peroxyd) durch alpha-Radiolyse erzeugt. Die Nagra nimmt in ihrem radiolytischen Modell an, dass die Matrixauflöserate proportional zur alpha-Aktivität ist. Das Modell basiert auf einem  $G_{\text{eff}}$ -Wert von 0.01 für die Erzeugung von Wasserstoffperoxyd und nimmt konservativ an, dass alle erzeugten Oxidationsmittel mit der Matrix reagieren (Johnson and Smith 2000). Im Rahmen dieses Modells verringern sich die fraktionalen Freisetzungsraten (für den Referenz-Brennstoff) von  $2 \times 10^{-6}$  pro Jahr nach 100 Jahren auf  $5 \times 10^{-7}$  pro Jahr nach 10 000 Jahren und ca.  $2 \times 10^{-8}$  pro Jahr nach  $10^6$  Jahren.

Im Referenzfall beträgt die maximale Dosis für BE  $4.8 \times 10^{-5}$  mSv/a, tritt nach einer Million Jahren auf und wird durch  $^{129}\text{I}$  dominiert. Der überwiegende Teil (75 %) stammt von der IRF und nicht aus der Matrixauflösung.

Obwohl das radiolytische Modell im Referenzfall mit der Begründung, dass es konservativ sei, zur Anwendung gelangt, weist die Nagra nachdrücklich darauf hin, dass die radiolytische, oxidierende Auflösung unter den im Lager zu erwartenden Bedingungen mit Wasserstoffgas-Überdrücken nicht stattfindet (Nagra 2002a). Diese Aussage könnte für Leser, die nicht über Expertenwissen verfügen, verwirrend sein.

Im löslichkeitslimitierten Modell wird angenommen, dass die Uran-Konzentration im Behälter nach dessen Versagen gleich dem gesättigten Wert für reduzierende Bedingungen ist ( $3 \times 10^{-9}$  M oder 0.7 ppb) (Nagra 2002e). In der Folge diffundiert Uran in die Geosphäre, wo es wie im Referenzfall der Sorption, Diffusion und Advektion unterliegt. Dieser Ansatz scheint gut begründet zu sein. Die so berechnete Matrixauflöserate fällt um mehr als zwei Größenordnungen tiefer aus als im Referenzfall. Daraus folgt, dass die Radionuklidfreisetzung im Zeitraum bis zu einer Million Jahren durch die IRF, und nicht durch die Matrixauflösung, bestimmt wird. Die maximale Dosis für die löslichkeitslimitierte Konzeptualisierung (Rechenfall 1.2) beträgt  $3.7 \times 10^{-5}$  mSv/a, ungefähr 25 % weniger als im Referenzfall.

Die Nagra betrachtet auch zwei „Was wäre wenn?“-Rechenfälle (4.3a und 4.3b) mit erhöhten Auflöseraten für abgebrannte Brennelemente. In diesen Fällen wird die Matrixauflöserate willkürlich um einen Faktor 10 bzw. 100 gegenüber dem Referenzfall erhöht. Unter diesen Bedingungen gewinnt die Matrixauflösung im Vergleich mit der IRF an Gewicht und entsprechend steigen die geschätzten Dosen. Für die 10-fach grössere Auflöserate erhöht sich die maximale Dosis um ca. einen Faktor 4. Im Falle einer 100-fachen grösseren Auflöserate erhöht sich die maximale Dosis ( $5 \times 10^{-4}$  mSv/a) um ca. einen Faktor 10. Der hauptsächliche Wert der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle liegt

darin, zu zeigen was passierte, wenn die Matrixauflöserate viel grösser ausfiele, wie das z.B. unter oxidierenden Bedingungen der Fall wäre. Die 100-fache Erhöhung der Auflöserate entspricht einer vollständigen Matrixauflösung innerhalb ca. 50 000 Jahren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wissenschaftler der Nagra beträchtliche Arbeit in der Erforschung und Bewertung der Auflösung von abgebrannten Brennelementen und der Strahlenwirkung geleistet haben. *Das IRT kommt zum Schluss, dass die Sicherheitsanalyse in Bezug auf das Verhalten der abgebrannten Brennelemente dem neusten Kenntnisstand entspricht.* Das heisst nicht, dass es nichts mehr zu lernen und zu verstehen gäbe, insbesondere in Bezug auf die Wirkung der Radiolyse. Entsprechend besteht Raum für weitere Grundlagenforschung auf diesem Gebiet, weil es international eine breite Palette an Meinungen zur Wirkung der Radiolyse auf die Matrixauflösung gibt.

Die Frage der Kritikalität fand in der Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase zwar Eingang, war aber nicht Gegenstand einer vertieften Diskussion. Basierend auf einer Rückmeldung anlässlich des letzten Treffens nimmt das IRT befriedigt zur Kenntnis, dass die Nagra

- sich der Fragestellung bewusst ist;
- die Arbeiten anderer Programme auf diesem Gebiet verfolgt;
- zu gegebener Zeit geeignete Massnahmen zur Vermeidung der Kritikalität in der Nachbetriebsphase (und Betriebsphase) umsetzen wird.

Es besteht in der jetzigen Projektphase keine Dringlichkeit, diese Frage weiter zu untersuchen.

#### *Verglaste HAA*

Die Schweiz wird den grössten Teil des primären Flüssigabfalls aus der Wiederaufarbeitung ihrer abgebrannten Brennelemente als verglaste HAA erhalten; ein Teil dieses Materials wurde bereits in Empfang genommen. Die von der BNFL und COGEMA erzeugten Gläser sind ähnlich in der Zusammensetzung, aber die spezifische Radioaktivität des COGEMA-Produkts fällt ca. 15 % tiefer aus als dasjenige von BNFL. Die Gläser werden in Abfallkokillen verfestigt; es gibt 730 Kokillen, wovon jede ca. 400 kg Glas enthält. Insgesamt enthalten die HAA ca. 15 % der Gesamtaktivität im Lager, wobei der Gehalt an  $^{36}\text{Cl}$  vernachlässigbar klein ist und  $^{129}\text{I}$  sowie  $^{14}\text{C}$  auffallend gering vertreten sind.

Curti (2003) vermittelt eine ausgewogene Wertung des heutigen Kenntnisstandes zur Glasauflösung. Kurz zusammengefasst bestehen widersprüchliche Modellansätze für die Langzeitauflöseraten, aber es herrscht Übereinstimmung, dass die gelöste Silikatkonzentration und die Ionendiffusion durch die Schicht aus Silikatgel wichtige Faktoren sind. Der Bericht verweist auf die von anderen Forschern gemachte Beobachtung von erhöhten Auflöseraten in Anwesenheit von Bentonit und Eisenkorrosionsprodukten, die auf die Abnahme von Silikat in der Lösung zurückzuführen sind.

Die Nagra schätzt die Langzeitauflöseraten von simulierten (nicht-radioaktiven) BNFL und COGEMA Abfallgläsern anhand von PSI-Experimenten ab, die seit 1990 laufen. Diese Experimente unterscheiden sich in mehreren Belangen (Temperatur, Partikelgrößen, Oberflächen-Volumen-Verhältnis) von den erwarteten Lagerbedingungen. Überdies hat das PSI keine Experimente unter Einbezug von Bentonit und Eisenkorrosionsprodukten durchgeführt. Für die Abschätzung der Langzeitauflöseraten benutzte das PSI ein lineares Regressionsverfahren zur Extrapolation der Freisetzungsraten im Zeitraum ab 500 Tagen. Die so erhaltenen Werte betragen  $1.5 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  für BNFL-Glas und  $2 \times 10^{-4} \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  für COGEMA-Glas (Curti 2003). Das IRT anerkennt, dass die gemessenen Auflöseraten im Bereich der in anderen experimentellen Studien dieser Art erhaltenen Werte liegen. Das PSI ordnet die grosse Abweichung der BNFL- und COGEMA-Daten dem Magnesiumgehalt im BNFL-Glas zu. Diese Experimente werden weitergeführt und die Auflöseraten werden möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt revidiert.

Die Nagra weist auf einige Ungewissheiten in den heutigen Abschätzungen der Langzeit-Glaskorrosionsraten hin, insbesondere in Bezug auf die Sorption von Silikat an Bentonit (Nagra 2002a). Um diesen Ungewissheiten Rechnung zu tragen, betrachtet die Nagra ebenfalls eine Parametervariation (Rechenfall 1.1e), bei der die Auflöserate um einen Faktor 100 erhöht ist. Dies führt allerdings aufgrund der tiefen Konzentrationen an beweglichen Radionukliden in den HAA und der langen Transportzeiten durch den Opalinuston nicht zu einer merklichen Erhöhung der Gesamtdosis. Das IRT anerkennt, dass das Verhalten der verglasten HAA für die Sicherheitsanalyse der Nagra insgesamt nicht kritisch ist.

Auf der anderen Seite findet es das IRT bedauerlich, dass der Kenntnis- und Verständnisstand des Langzeitverhaltens einer international derart wichtigen Abfallmatrix noch nicht ausgereift ist. Das IRT anerkennt, dass die Auflösung von verglasten HAA unter Lagerbedingungen komplex ist, stellt aber einen Bedarf an sorgfältig ausgewählten und gut fokussierten Gemeinschaftsprogrammen fest, die auf eine internationale Übereinstimmung abzielen. Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sollten sich nicht nur

auf experimentelle Messungen der Elementfreisetzungsraten aus der Glasmatrix richten, sondern auch auf das Wachstum und die Merkmale der Gelschicht, die Rolle von sekundären, siliziumhaltigen mineralischen Phasen und die Auswirkungen von Nahfeldmaterialien. Die Nagra ist sich dieser Fragestellungen bewusst und arbeitet mit dem PSI im Rahmen von Gemeinschaftsprogrammen auf eine Verbesserung des grundlegenden Verständnisses und von Vorhersagen mittels Modellen hin.

Trotz der oben erwähnten Ungewissheiten hält das IRT fest, dass Glas eine dauerhafte Abfallmatrix darstellt und dass der Auflösungsprozess über sehr lange Zeiträume (einige zehn- bis hunderttausende von Jahren) stattfindet. Es ist deshalb angemessen, dass die Nagra die Glasmatrix als wichtige Barriere im Mehrfachbarrierensystem betrachtet.

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

#### LMA

Die LMA enthalten nur 0.1 % der Gesamtaktivität im Lager, aber vergleichsweise höhere Mengen an  $^{129}\text{I}$  (0.9 %),  $^{36}\text{Cl}$  (1.7 %) und  $^{14}\text{C}$  (8.7 %) (McGinnes 2002). Sie umfassen eine Anzahl unterschiedlicher physikalischer Abfalltypen mit mässig bis hoher chemischer Beständigkeit, wie z.B. Zement, Bitumen und Zircaloy-Metall. Die Abfallmatrizen sind in Stahlfässern eingeschlossen.

Die Nagra verwendet ein einfaches Modell für das Verhalten der LMA, das auf der Annahme beruht, dass die Radionuklidfreisetzung nicht vor Ablauf von 100 Jahren nach der Abfalleinlagerung erfolgt (da vor diesem Zeitpunkt der Einlagerungsbereich noch nicht mit Wasser gesättigt ist). Es wird angenommen, dass alle Radionuklide nach 100 Jahren mit sofortiger Wirkung in das zementhaltige Verfüllmaterial freigesetzt werden, d.h. der Radionuklid-Immobilisierung in der Abfallmatrix wird keine Sicherheitsfunktion zugeordnet (Nagra 2002a). Jedoch wird die Löslichkeitslimitierung berücksichtigt. In Anbetracht der komplexen Abfallmatrizen und des geringen Radionuklidinventars schätzt das IRT den Ansatz der Nagra als konservativ und angemessen für die jetzige Projektphase ein. Das IRT erachtet es als möglich, in Zukunft realistischere Modelle für das Verhalten einiger LMA, wie z.B. Zircaloy, zu definieren.

#### **4.3.4 Verhalten der Verfüllmaterialien**

Dieser Abschnitt betrachtet die Analyse der Nagra bzgl. der Bentonitverfüllung im Falle von BE und HAA sowie des zementhaltigen Verfüllmaterials im Falle der LMA. Diese Barrieren erfüllen eine Reihe von wichtigen Funktionen, einschliesslich:

- (1) Gewährleistung eines physischen Einschlusses des Abfallgebindes am Ort seiner Einlagerung.
- (2) Schutz der geologischen Barrieren vor den thermischen Auswirkungen der Wärmeerzeugung.
- (3) Versiegelung der Lagerstollen und -tunnels und Verhinderung der Tunnelkonvergenz.
- (4) Verringerung des Radionuklidtransports aufgrund von Sorption und langsamer Diffusionsprozesse.

#### ***BE und HAA***

Bentonit ist aufgrund seiner Quellfähigkeit und seines Selbstabdichtungsverhaltens, gepaart mit seinem ausgezeichneten Sorptionsvermögen, das bevorzugte Verfüllmaterial für BE und HAA in den meisten internationalen Programmen. Bentonit weist auch eine hohe Verträglichkeit mit Opalinuston auf, da er aus Tonmineralien besteht.

Das IRT stellt fest, dass das von der Nagra vorgeschlagene Bentonitverfüllkonzept sich in zweierlei Hinsicht von den internationalen Verfahrensweisen unterscheidet: nämlich (i) Verwendung von Bentonitgranulat, und (ii) Auslegung für maximale Temperaturen über 100°C in der inneren Hälfte der Bentonitverfüllung.

Die Verwendung von Bentonitgranulat anstatt von Blöcken für die Verfüllung des Leerraums um und über den Abfallgebinden ist eine Neuerung, die eine verbesserte Versiegelung verspricht, da das Granulat besser in der Lage ist, einen allenfalls unregelmässigen Leerraum zu füllen. Heutzutage sind jedoch wenige Daten für die technische Auslegung eines solchen Granulats verfügbar. Ein laufender Test im Felslabor Mont Terri zur Untersuchung von thermohydraulisch-mechanischen (THM) Prozessen dürfte vielfältige Informationen liefern und wird für andere Programme von Interesse sein. Zum jetzigen Zeitpunkt schätzt das IRT die Verwendung von Bentonitgranulat als vielversprechend, aber nicht vollständig ausgereift ein.

Die Verwendung von Granulat mit geringem Wassergehalt resultiert in einer niedrigen thermischen Leitfähigkeit und somit in einer höheren maximalen Temperatur im Bentonit. Die Nagra hat zeitabhängige Temperaturprofile in der Verfüllung für BE und HAA berechnet (Johnson *et al.* 2002). Die maximalen Temperaturen an der Behälteroberfläche, die nach ca. 10 Jahren erreicht werden, befinden sich im Bereich 140-160°C. Die Temperaturen verringern sich langsam mit der Zeit, insbesondere für BE, und bleiben für mehrere hundert Jahre über 100°C.

Unter hohen Temperaturen ist Bentonit mineralogischen Veränderungen unterworfen, die seine Quellfähigkeit und Plastizität beeinflussen. Die Nagra diskutiert diese Fragen im Sicherheitsbericht (Nagra 2002a) und legt als Auslegungskriterium fest, dass die Temperatur in der äusseren Hälfte der Verfüllung 125°C nicht übersteigen darf. Auf der Grundlage von begrenzten wissenschaftlichen Daten führt die Nagra dazu aus, dass der Bentonit unter diesen Bedingungen seine Funktionen erfüllen wird, ohne dass sich bedeutende thermische Langzeitauswirkungen auf Quelldruck, Sorptionseigenschaften und Durchlässigkeit unter gesättigten Bedingungen ergeben. Das IRT betrachtet diese Daten in der jetzigen Projektphase nicht als in strengem Sinne validiert. Das IRT hält fest, dass die Ungewissheiten zur thermischen Degradation der Bentonitverfüllung durch die in der Sicherheitsanalyse untersuchten Rechenfälle abgedeckt werden. Das IRT weist ferner darauf hin, dass der Entscheid über die Auslegungstemperatur für die Bentonitverfüllung nicht vor Inangriffnahme der Untertagecharakterisierung zu fällen ist.

Die Modellierung des Radionuklidtransports durch die Bentonitbarriere basiert auf der Annahme eines rein diffusiven Transports mit linearen Sorptions-Isothermen, beschrieben durch  $K_d$ -Werte für jedes Element. Es werden reduzierende Bedingungen vorausgesetzt und, wo anwendbar, Löslichkeits-grenzwerte aus der PSI/Nagra-Datenbank abgeleitet (siehe Abschnitt 4.3.1). Die Auswirkungen der Gaserzeugung und einer allfälligen Tunnelkonvergenz auf den Radionuklidtransport werden als vernachlässigbar angenommen. Das IRT betrachtet diese Annahmen als vernünftig.

Die Nagra leitete  $K_d$ -Werte für den Bentonit im Nahfeld aus gut definierten Batch-Experimenten ab, deren Resultate anschliessend auf kompaktierte *in situ*-Bedingungen extrapoliert wurden. Dieser Ansatz ist ausgesprochen innovativ und seine Gültigkeit wurde von Bradbury and Baeyens (2002) nachgewiesen. Ihre Methode schliesst die Anpassung an die *in situ*-Mineralogie und Porenwasserchemie ein und basiert auf den neuesten Sorptionsmodellen.

Es existieren weitere mögliche Wechselwirkungen zwischen der Bentonitbarriere und andere Komponenten des Lagersystems, einschliesslich der Wechselwirkung Eisen/Bentonit und der Silikat-Zementation. Das IRT stellt fest, dass die Nagra diese chemischen Auswirkungen implizit als vernachlässigbar annimmt.

Die Co-Präzipitation fällt mit Ausnahme von Radium ausser Betracht. Dies ist konservativ, führt aber zur Vorhersage von bedeutenden Mengen an Actiniden (z.B.  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{229}\text{Th}$ ), die in die Bentonitverfüllung freigesetzt werden. Dies steht im Widerspruch mit Erfahrungen aus Uranerz-Analoga. Co-Präzipitation ist ein „Reserve-FEP“, und die Nagra sollte danach trachten, sie in Modelle einzubauen, sobald mehr Daten verfügbar sind.

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

Die Auswirkungen thermischer Veränderungen sind Gegenstand des Rechenfalls 1.3 des Referenz-Szenariums. In diesem Rechenfall werden die Sorptionseigenschaften des Bentonits als durch die Degradation unbeeinflusst angenommen, aber der Diffusionskoeffizient in der inneren Hälfte des Bentonits wird demjenigen von freiem Wasser gleich gesetzt. Die berechneten Dosisraten für diesen Rechenfall fallen im Wesentlichen gleich wie im Referenzfall aus. Dies ist zu erwarten, da die Opalinustonschicht viel mächtiger ist als die Bentonitschicht und demnach den grössten Teil der Konzentrationsverringerung der Radionuklide liefert. Dieses Resultat bedeutet jedoch nicht, dass dem Bentonit nur geringe Bedeutung zukommt, da seine übrigen Funktionen [siehe (1) und (3) weiter oben] in allen Analysen der Nagra implizit vorausgesetzt werden.

Zusammenfassend stellt das IRT fest, dass die Bentonitverfüllung nicht nur als günstiges chemisches Milieu, starke Einschlussbarriere und wärmeleitfähiges Medium wirkt, sondern auch einen gut verstandenen Mechanismus zur Gewährleistung der Selbstabdichtung der die Lagerstollen mit den Abfallbehältern umgebenden Auflockerungszone liefert. Die verbleibenden Ungewissheiten betreffen Fragen der Auslegung (Verwendung von

Bentonitgranulat, höhere Temperaturen und die Notwendigkeit einer Stollenabstützung), die vor Einreichung des Baubewilligungsgesuchs geklärt werden können.

Mit Bezug auf die heute bestehenden Ungewissheiten *empfiehlt das IRT, dass:*

- *die Forschung zum Verhalten des Bentonits unter erhöhten Temperaturen fortzusetzen ist, zum Zwecke der Festlegung der maximalen Bentonit-Temperatur, die ohne Beeinträchtigung des Barrierenverhaltens innerhalb des Mehrfachbarrierensystems toleriert werden kann;*
- *Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie Grossversuche zur Verwendung von Bentonitgranulat als Verfüllmaterial mit dem Ziel fortzusetzen sind, diese Technik für die Anwendung in den Lagerstollen zu etablieren;*
- *mögliche Wechselwirkungen zwischen der Bentonitbarriere und anderen Komponenten des Lagersystems, einschliesslich der Eisen/Bentonit-Wechselwirkung und Silikatzementation, weiter zu untersuchen sind.*

Falls die bestehenden Ungewissheiten nicht geklärt werden können, so könnte die Temperatur des Verfüllmaterials durch verschiedene Massnahmen gesenkt werden, wie z.B. durch Vergrösserung des Abstands zwischen den Abfallgebänden, durch Verlängerung der Abkühlzeit vor der Einlagerung oder durch Veränderung der Eigenschaften der Verfüllmaterialien mit dem Zweck, deren Wärmeleitfähigkeit zu verbessern. Das IRT pflichtet der Aussage im Sicherheitsbericht bei, dass der Bentonit ein geeignetes Umfeld für die Behälter und Abfallmatrizen bildet.

#### *LMA*

Die LMA werden in Tunnels mit grösserem Durchmesser eingelagert und mit zementhaltigem Mörtel verfüllt. Die Nagra hat die Auswirkungen der folgenden Prozesse betrachtet: Strahlung, Temperaturentwicklung, Gasproduktion (von eisenhaltigen und organischen Materialien), Tunnelkonvergenz, Porenwasserchemie und, von grösster Wichtigkeit, die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne auf die Eigenschaften des Opalinustons. Potenziell oxidierende Bedingungen, zurückzuführen auf chemische Reaktionen von Nitrat in LMA-2, wurden ebenfalls in geeigneter Weise berücksichtigt, indem Sorptions- und Löslichkeitswerte für diese oxidierenden Bedingungen zur Anwendung gelangten.

Das Referenz-Szenarium basiert auf der Annahme, dass die Radionuklidfreisetzung vom Gebinde in den zementhaltigen Mörtel 100 Jahre nach der Einlagerung erfolgt. Lineare Sorptions-Isotherme, beschrieben durch elementspezifische  $K_d$ -Werte, wurden entweder experimentell bestimmt oder aus der Literatur entnommen. Löslichkeitslimiten gelangten ebenfalls zur Anwendung, wo angebracht. Die Auswirkungen von Ungewissheiten wurden in mehreren Rechenfällen berücksichtigt und bewertet: Freisetzung infolge Konvergenz, Freisetzung infolge Porenwasserverdrängung durch Gas und Freisetzung in der Gasphase. Das IRT betrachtet diese Analysen als für die jetzige Programmphase zufriedenstellend.

Das IRT hält fest, dass die Freisetzung beweglicher Radionuklide aus LMA anteilmässig höher ausfällt als im Falle von BE und HAA, aber dass der LMA-Quellterm insgesamt relativ klein ist (siehe Abschnitt 4.3.3). Infolgedessen fällt der Dosisbeitrag von LMA typischerweise eine Grössenordnung tiefer aus als derjenige von BE. Die physisch getrennte Einlagerung der LMA einerseits in verschiedenen Tunnels und andererseits abgedockt von den BE/HAA-Stollen ist ein wichtiges Auslegungsmerkmal, welches die Auswirkungen allfälliger Ungewissheiten infolge chemischer Prozesse oder Gasproduktion im LMA-Nahfeld verringern würde.

Das IRT stellt fest, dass heutzutage mehrere internationale Programme die Fragestellung der Auswirkungen eines Hoch-pH-Milieus untersuchen, das auf die Verwendung von herkömmlichen Zementen zurückzuführen ist, und dass Interesse an Alternativen zur Verringerung der gesamthaften Alkalinität besteht. *Das IRT empfiehlt, die Entwicklung von alternativen Zementen zu verfolgen, die auf eine Verringerung der chemischen Wechselwirkungen zwischen Verfüllmaterialien und Geosphäre abzielen.*

#### **4.4 Verhalten und Charakterisierung der Opalinuston-Barriere**

Der Opalinuston im Zürcher Weinland ist die dominierende Barriere im von der Nagra vorgeschlagenen Lagerkonzept. Einige Merkmale des Opalinustons wurden im Abschnitt 4.1 diskutiert. Der vorliegende Abschnitt diskutiert die Nagra-Bewertung des Verhaltens dieser Barriere im gesamten Lagersystem.

Die Nagra verwendete mehrfache Argumentationsketten in der Bewertung des Opalinustons im Zürcher Weinland, einschliesslich der folgenden:

- Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons wurde in Feldtests in der Sondierbohrung Benken und in verschiedenen Labortests gemessen. Die gemessenen Werte liegen im Bereich  $1-6 \times 10^{-14}$  m/s aus Packertests (schichtparallele Richtung) und  $0.6-3 \times 10^{-14}$  m/s (senkrecht zur Schichtung) aus Permeametertests. Im Referenzfall wird eine hydraulische Durchlässigkeit von  $2 \times 10^{-14}$  m/s senkrecht zur Schichtung verwendet.
- Messungen bestätigten, dass der Opalinuston einen Überdruck aufweist. Obschon verschiedene mögliche Erklärungen für den Überdruck vorliegen, legt doch allein seine Existenz Zeugnis der sehr niedrigen Durchlässigkeit des Opalinustons ab. Die Modellierung des Überdrucks durch die Nagra deutet darauf hin, dass die hydraulische Durchlässigkeit entweder sehr niedrig sein muss ( $\leq 10^{-15}$  m/s) und/oder dass das Fließregime nicht Darcyscher Natur ist, im Sinne einer Überschreitung eines Schwellwerts für den hydraulischen Gradienten als Flussbedingung. Die Herkunft und Beständigkeit des Überdrucks scheinen weitere Studien wert zu sein, zwecks Vertiefung des wissenschaftlichen Verständnisses. Dies ist aber nicht kritisch für den Sicherheitsnachweis.
- Die Isotopenprofile für Sauerstoff und Wasserstoff im Opalinuston aus der Sondierbohrung Benken (siehe Abschnitt 4.1) stehen im Einklang mit reiner Diffusion und zeigen signifikante Abweichungen von den modellierten Profilen für hydraulische Durchlässigkeiten grösser als  $10^{-12}$  m/s.
- 2D- und 3D-Seismiktests zeigen eine vergleichsweise homogene Struktur über grosse Distanzen.
- Geochemische Erkenntnisse deuten darauf hin, dass das Porenwasser des Opalinustons während Jahrtausenden stabil war, ohne identifizierbare Störungen durch Eiszeiten oder andere Klimazyklen.
- Eine Analyse der mechanischen Eigenschaften zeigt, dass der Opalinuston selbstabdichtend ist; diese Aussage wird durch die in gefalteten Zonen gemessenen tiefen Transmissivitäten gestützt.

Das IRT ist der Ansicht, dass gewichtige Hinweise für die von der Nagra in ihren Modellierungen verwendeten, niedrigen Durchlässigkeitswerte vorliegen. Diese und andere, oben zitierte Hinweise stützen das Argument der Nagra, dass der langsame, diffusive Transport, gekoppelt mit der Sorption für viele Radionuklide, der vorherrschende Mechanismus für die Migration von gelösten Stoffen durch den Opalinuston ist. Ferner findet das IRT, dass die geologischen und geophysikalischen Hinweise für die ausgedehnte

Homogenität der Durchlässigkeit im Opalinuston überzeugend sind. Zwar existiert eine kleinräumige Variabilität, aber auf der in der Sicherheitsanalyse interessierenden Längenskala, im Bereich einiger Dekameter, kann die Variabilität in geeigneter Weise durch Verwendung eines Mittelwerts berücksichtigt werden.

Basierend auf den im Opalinuston vorhandenen Mengen an Pyrit, Siderit und organischem Kohlenstoff werden die *in situ*-Redoxbedingungen als reduzierend eingestuft. Die verbleibenden Ungewissheiten in der Porenwasser-Zusammensetzung beziehen sich auf den pH-Wert und den Partialdruck von Kohlendioxid. Diesen Ungewissheiten wurde jedoch in geeigneter Weise durch die Verwendung von abdeckenden Werten Rechnung getragen, die in der Bewertung der Radionuklid-Geochemie Eingang fanden.

Für die sicherheitstechnische Bewertung des Opalinustons wurde eine geochemische Datenbank aufgebaut (Bradbury and Baeyens 2003b). Die in der Modellierung verwendeten  $K_d$ -Werte basieren weitgehend auf Opalinuston-Daten aus Batch-Experimenten (Lauber *et al.* 2000, Bradbury and Baeyens 2003b). Das IRT betrachtet diesen Ansatz als gerechtfertigt, unter Berücksichtigung der mit den sehr niedrigen Durchlässigkeiten verbundenen Schwierigkeiten bei der Durchführung von Migrationsexperimenten im Opalinuston, insbesondere für stark sorbierende Elemente. Das IRT ermutigt die Nagra jedoch, die Möglichkeiten anderer, in neuerer Zeit entwickelten Methoden auf dem Gebiet der Diffusions- und Retentionsstudien zu erforschen, wie z.B. die Elektromigrations-Methode (Maes *et al.* 2002).

Wie im Falle von Bentonit stehen die von der Nagra verwendeten  $K_d$ -Werte in vernünftiger Übereinstimmung mit den in anderen Programmen für Tongesteine verwendeten Werten, mit Ausnahme der drei- und vierwertigen Elemente. Für diese Elemente liegen die Nagra-Werte im oberen Bereich der Bandbreiten. Diesen Ungewissheiten wurde jedoch mittels Rechenfällen, die auf pessimistischen Werten basieren, Rechnung getragen. Ferner wurde in einer Präsentation der Nagra für das IRT klar, dass die Nagra die Robustheit des Systems sogar unter Annahme von verschwindenden Sorptionswerten getestet hat.

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

Ein eindimensionales Transportmodell (PICNIC) mit linearer Sorption wird für die Beschreibung des Radionuklidtransports durch den Opalinuston verwendet. Dieses Modell entspricht dem Stand der Technik. Mangels spezifischer Informationen wird im Referenzfall je ein gemeinsamer Wert für den effektiven Diffusionskoeffizienten ( $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ) und die zugängliche Porosität (0.12) aller Kationen verwendet, und ein anderer gemeinsamer Wert für den effektiven Diffusionskoeffizienten ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) und die zugängliche Porosität (0.06) aller Anionen. Das IRT betrachtet diese Werte als vernünftig. Das IRT ermutigt die Nagra jedoch, die detaillierten Diffusionsprozesse in Tonsystemen vertiefter auszuarbeiten, um die noch offenen Fragen, wie z.B. die erhöhte effektive Diffusivität von  $\text{Na}^+$  gegenüber Tritium, zu klären.

Die Nagra verwendet ein Modell zum Verständnisaufbau, das illustriert, wie der langsame Transport durch den Opalinuston, gepaart mit radioaktivem Zerfall, die Freisetzung der einzelnen Radionuklide verringert. Dieses Modell zeigt klar, dass nur langlebige, nicht sorbierende ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$  und organisches  $^{14}\text{C}$ ) oder schwach sorbierende Radionuklide ( $^{129}\text{I}$ ) die Tonbarriere ohne Zerfall überwinden können, während sorbierende Radionuklide dies nicht vermögen.

Wegen der grossen Bedeutung des Opalinustons beziehen sich viele der in der Sicherheitsanalyse untersuchten Rechenfälle auf den Transport in der Tonbarriere. Die betrachteten Rechenfälle berücksichtigen eine erhöhte Wasserflussrate im Opalinuston, eine verringerte Mächtigkeit der Tonschicht und den Transport in durchlässigen Diskontinuitäten. Das IRT findet, dass die Ungewissheiten in Bezug auf die Wasserflussrate und auf mögliche Inhomogenitäten im Ton durch die untersuchten Rechenfälle vernünftig abgedeckt werden.

Zusammenfassend stellt das IRT fest, dass die Nagra starke, auf mehrfachen Argumentationsketten beruhende Hinweise vorlegt, dass sich der Opalinuston im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Abfalllager eignet. Beim Opalinuston handelt es sich um ein dichtes, selbstabdichtendes Material mit starkem Einschluss-, Rückhalte-, Verzögerungs- und Dispersionsvermögen für allfällige Radionuklide, die aus einem darin erstellten Lager entweichen. Studien über natürliche Analoga, Labor- und Feldmessungen sowie theoretische Analysen stützen diese Aussagen.

Das IRT betrachtet die Behandlung der Diffusion und Rückhaltung insgesamt als für die jetzige Projektphase ausreichend, insbesondere was die Art und Weise der Behandlung von Ungewissheiten in der Sicherheitsanalyse anbelangt. Für zukünftige Projektphasen *empfiehlt das IRT der Nagra jedoch*

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

Studien dieser Art würden sowohl das Expertenwissen erhalten als auch das Verständnis verbessern und so das Vertrauen in das Lagerkonzept insgesamt stärken.

#### **4.5 Gasproduktion und -transport**

Mehrere Prozesse führen zur Gasproduktion im Lager. Die wichtigsten sind die anaerobe Eisenkorrosion, die Wasserstoffgas erzeugt, und der Abbau von Organika, der Methan und Kohlendioxyd erzeugt. Die Mechanismen, die zur Gasproduktion im Lager führen, sind gut verstanden und modellierbar, was Prozesse und Parameter betrifft. Es bestehen einige Ungewissheiten in Bezug auf die Gasproduktionsrate. Diese wurden aber von der Nagra durch die Verwendung von pessimistischen Bandbreiten der Produktionsrate berücksichtigt. Die Hauptannahmen betreffend Gasproduktion sind teilweise nur in Referenzberichten zu finden. Das IRT findet, dass diese auch im Sicherheitsbericht Eingang finden sollten.

Die Gasproduktion führt zum Druckaufbau, der das Verhalten der technischen Barrieren und die Integrität der Geosphäre beeinflussen könnte. Sie könnte auch als treibende Kraft für die Verdrängung von radionuklidhaltigem Porenwasser wirken. Die Auswirkungen des Gasdruckaufbaus und der Gasmigration sind wichtige Fragestellungen für die Lagerung von radioaktiven Abfällen in gering durchlässigen Formationen (NEA 2001d).

Die Komplexität der Gasmigration wird von der Nagra umfassend erkannt und einer detaillierten Untersuchung unterworfen. Die Gasmigration vom Nahfeld durch die Tonformation wurde durch Zweiphasen-Flussmodelle beschrieben und bewertet. Die Modelle berücksichtigen die relativen Permeabilitäten der beiden Phasen und die Kapillardrücke als Funktion der Sättigung und des Gaseintrittsdrucks. Die Erhöhung der Durchlässigkeit infolge von Mikroriss-Erzeugung bei hohen Gasdrücken fand in den Analysen ebenfalls Eingang.

Die Nagra weist nach, dass das Gas durch Zweiphasen-Mechanismen entweichen kann. Falls dieser Prozess nicht genügend Transportkapazität für das erzeugte Gas schafft, so kann dieses auch durch Mikroriss-Erzeugung abgeführt werden. Keines dieser Phänomene führt zur Klüftung der Tonformation und lässt deswegen die Langzeit-Integrität der Tonbarriere unbeeinflusst. Durch Vermeidung der Entwicklung von Gasklüften, die lange und hochdurchlässige, bevorzugte Transportpfade bilden würden, bleibt die Diffusion der Hauptmechanismus für die Radionuklidmigration. Die günstigen Merkmale der Tonformation als Hauptbarriere des Lagersystems bleiben somit gemäss den Untersuchungen der Nagra erhalten.

Für die Gasfreisetzung aus der Tonformation wurde der direkte Transportpfad durch die Tonformation betrachtet. Dies kann als konservativer Ansatz betrachtet werden, da das Porenvolumen des Verfüllmaterials das Gas speichern und so den Druckaufbau verzögern könnte. Die Auswirkungen des Gasdrucks auf das Verhalten des Verfüllmaterials und andere Teile der technischen Barrieren sind gemäss den vorliegenden Resultaten der Zweiphasenfluss-Berechnungen vernachlässigbar klein.

Das IRT stellt jedoch fest, dass die Gasmigration durch gering durchlässige Formationen komplizierte Prozesse mit sich bringt, und dass die Kenntnis und das Verständnis solcher Prozesse nicht vollständig ausgereift sind. Das IRT hält fest, dass die Nagra in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte im Verständnis und in der Modellierung der Gasmigration gemacht hat. Die unterschiedlichen Prozesse sind im Sicherheitsbericht gut dargelegt und die Gasthematik fand in der gegenwärtigen Projektphase ausreichende Beachtung.

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

*Das IRT empfiehlt auch, dass die Modellierung der Gastransportprozesse in Hinsicht auf eine erhöhte Durchlässigkeit infolge Mikroriss-Erzeugung verbessert werden sollten. Ferner sind weitere Anstrengungen notwendig, um die grundlegenden Ansätze zum Zweiphasenfluss und die entsprechenden Rechencodes zu validieren.*

Falls die verbleibenden Ungewissheiten hinsichtlich der Gasmigration in gering durchlässigen Tonen durch zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nicht im erforderlichen Umfang reduziert werden können, so steht für BE und HAA eine Lösung zur Verfügung, die darin besteht, Kupferbehälter und Behältereinsätze zu verwenden, die nicht auf Eisen basieren. Derartige Behälter vermeiden die Produktion von Gas und stellen auch dauerhaftere Einschlussbarrieren dar. Im Falle der LMA besteht eine modifizierte Lagerstrategie darin, zu gewährleisten, dass die Gase durch die Zugangstunnels statt durch die Tonformation entweichen.

#### **4.6 Verhalten der Rahmengesteine**

Die Rahmengesteine unmittelbar ober- und unterhalb des Opalinustons stellen eher heterogene hydrogeologische Einheiten dar und zeichnen sich durch eine diskontinuierliche Natur aus. Diese Einheiten bestehen hauptsächlich aus gering durchlässigen, tonreichen Sedimenten, die ein komplexes System von teilweise verbundenen, teilweise nicht verbundenen durchlässigen Sandsteinen und Karbonatgesteinen enthalten. Die laterale Ausdehnung dieser Fazies ist im Wesentlichen unbekannt. Ihre grossräumige, laterale hydraulische Verbundenheit ist nicht bekannt, und es sind keine Daten verfügbar, um die regionalen Wasserflüsse oder deren Exfiltration in das oberflächennahe Grundwassersystem nachzuprüfen. Isotopen- und hydrochemische Hinweise (Nagra 2002a, 2002b) deuten jedoch darauf hin, dass die Wasserflüsse in diesen Schichten klein sind. Die Rahmengesteine halten ein günstiges chemisches Milieu für den Opalinuston aufrecht, und die geringen Wasserflussraten stellen eine dauerhafte Mächtigkeit der geologischen Hauptbarriere sicher. Über und unter den Rahmengesteinen befinden sich regionale Aquifere, mit Kalkstein und Dolomitgesteinen, die eine beträchtliche Verdünnung mit sich bringen, aber keine signifikante Barrierenwirkung für Radionuklide entfalten. Die Rahmengesteine sind zusätzliche geologische Barrieren, aufgrund ihres guten Radionuklid-Rückhaltevermögens, und – im Falle eines lateralen Transports – der langen Transportpfade bis an die Erdoberfläche.

Bis heute konzentrierten sich die Nagra-Untersuchungen der Rahmengesteine hauptsächlich auf das allgemeine Systemverständnis. Die Entwicklung dieses Verständnisses ist noch nicht genügend weit fortgeschritten, dass die Barrierenfunktionen bezüglich Dispersion und Rückhaltung ausreichend definiert wären, um sie in den Sicherheitsnachweis einzubeziehen. Infolgedessen wird im Referenzfall angenommen, dass der Transport durch die Rahmengesteine in die Biosphäre ohne Verzögerung stattfindet. In Anbetracht der ausgezeichneten Eigenschaften des Opalinustons ist dieser Ansatz konservativ und vernünftig.

In der Konzeptualisierung des Rechenfalls 1.5 hat die Nagra die potenziell günstigen Auswirkungen illustriert, die aus der Berücksichtigung des Radionuklidtransports in den Rahmengesteinen resultieren würden. Zwei Rechenfälle wurden betrachtet: Der eine basiert ausschliesslich auf vertikalem Transport (Rechenfall 1.5a) und der andere sowohl auf vertikalem als auch auf horizontalem Transport (Rechenfall 1.5b). Die Modellrechnungen zeigten eine signifikante Reduktion in der Maximaldosis sowie eine Verzögerung ihres zeitlichen Auftretens.

Das IRT findet, dass weitere Untersuchungen der Eigenschaften der Rahmengesteine eine Reihe von Zwecken erfüllen würden. Als erstes könnte damit das Verständnis der Transportpfade in die Biosphäre verbessert werden, insbesondere der horizontale Transport durch die höherdurchlässigen Schichten. Als zweites würde dies der Nagra erlauben, die Barrierefunktion der Rahmengesteine in die Referenzkonzeptualisierung mit einzubeziehen. Ausserdem müssen die Rahmengesteine für die Auslegung und die technischen Arbeiten in ausreichendem Masse charakterisiert werden, um zu gewährleisten, dass der Lagerbau gefahrlos durch diese Schichten vorangetrieben werden kann.

Nach der Freisetzung aus den Rahmengesteinen wird das radionuklidhaltige Porenwasser in den regionalen Aquiferen ober- und unterhalb der Rahmengesteine verdünnt. Die Berechnung der Wasserflussrate im quartären Lockergesteinsaquifer (als Trinkwasserquelle angenommen) basiert auf einer Abschätzung der Querschnittsfläche, der hydraulischen Durchlässigkeit und des hydraulischen Gradienten. Die grundlegenden Annahmen der Verdünnungsberechnungen sind im Sicherheitsbericht (Nagra 2002a) nicht aufgeführt, konnten aber aus Referenzberichten und aus den Antworten der Nagra auf die IRT-Fragen entnommen werden. Die gesamthafte Wasserflussrate im quartären Lockergesteinsaquifer wurde von der Nagra mit  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  beziffert und in Nagra (2002a) auf  $10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  gerundet. Das IRT findet, dass die grundlegenden Annahmen und Daten für die Berechnung der Verdünnung in den oberflächennahen Aquiferen im Sicherheitsbericht hätten aufgeführt und diskutiert werden sollen.

Zusammenfassend betrachtet das IRT die Rahmengesteine als potenziell nützlichen Reserve-FEP. Weitere Untersuchungen dieser Rahmengesteine auf einer lokalen und regionalen Skala trügen ebenfalls zu einem verbesserten Verständnis der Transportpfade in die Biosphäre bei.

#### **4.7 Potenzielle Auswirkungen der Lagerauslegung und -entwicklung auf die Langzeitsicherheitsanalyse**

Die Sicherheitsanalyse für das Lager (und insbesondere für die Hauptbarriere Opalinuston) basiert auf der Annahme, dass die günstigen fundamentalen Eigenschaften (wie in den Abschnitten 4.1 und 4.4 diskutiert) von der Lagerentwicklung unbeeinflusst bleiben. In den Augen des IRT ist eine der Schlüsselfragen in der Sicherheitsanalyse des Nagra-Lagerkonzepts, inwiefern die technischen Arbeiten beim Bau, Betrieb und Verschluss des Lagers das Rückhaltevermögen des Opalinustons beeinträchtigen könnten.

Wie bereits im Abschnitt 1.3 festgehalten, ist die technische Machbarkeit nicht im Umfang der vorliegenden Studie enthalten. Aufgrund der Relevanz für die Langzeitsicherheit hat die Nagra jedoch dem IRT das technische Konzept präsentiert, einschliesslich der Methoden der Abfalleinlagerung, Verfüllung und Versiegelung des Stollensystems und der Zugangsrampe sowie der Rückholbarkeit (sollte diese notwendig sein). Das IRT stellt fest, dass der überwiegende Teil der technischen Konzepte (mit Ausnahme der Verwendung von Bentonitgranulat, wie in Abschnitt 4.3.4 diskutiert) denjenigen ähnlich sind, die von anderen nationalen Programmen vorgeschlagen werden, und dass die Konzepte dem Stand der Technik entsprechen.

Im Sicherheitsbericht wird den Auswirkungen der technischen Optionen und Ungewissheiten bzgl. der Entwicklung der Untertagebauten im Allgemeinen und der Auflockerungszone im speziellen auf die Langzeitsicherheit wenig Platz eingeräumt. Ungewissheiten entstehen aus dem Fehlen von detaillierten Ausführungen zu einigen Konzepten. Die technischen Optionen umfassen die Abmessungen und den Abstand der Stollen, die Verfüllmethode und die thermische Leistung. Eine vom IRT identifizierte Option betrifft die Vergrösserung des Abstands zwischen Abfallbehältern, um die Temperaturen in der Bentonitverfüllung zu senken (siehe Abschnitt 4.3.4). Eine detailliertere Analyse solcher Fragestellungen wäre in der Baubewilligungsphase zu erwarten.

Im Weiteren werden Experimente im Untergrund und die detaillierte technische Auslegung mit grösster Wahrscheinlichkeit einige Änderungen der konzeptuellen Auslegung mit sich bringen. Die technische Auslegung und die Lagersicherheit sind stark miteinander verknüpft, und die sicherheitstechnischen Auswirkungen allfälliger Änderungen in der Auslegung sind sorgfältig zu prüfen. Das IRT stellt fest, dass die Organisationsstruktur der Nagra die enge Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Wissenschaftlern, die sich mit der Sicherheitsanalyse beschäftigen, erleichtert.

Die Referenz-Konzeptualisierung basiert auf der Annahme, dass die geologischen Barrieren durch den Tunnelbau und andere technische Arbeiten unbeeinflusst bleiben. Als Teil des Referenz-Szenariums werden Rechenfälle mit einer unvollkommenen Versiegelung der Rampe (Rechenfall 1.6) und mit einer frühzeitigen Tunnelkonvergenz (Rechenfall 1.7) betrachtet. Ein Verlassen des Lagers ohne vollständigen Verschluss wird ebenfalls in Betracht gezogen (Rechenfall 3.3). Diese Varianten zeigen geringe Auswirkungen auf die Freisetzungsraten, da angenommen wird, dass die Versiegelungen in die Lagerstollen und -tunnels eingebracht worden sind und unversehrt sind. In einem Rechenfall werden pessimistischere Vorgänge betrachtet (z.B. Probleme im Zusammenhang mit einer mangelhaften technischen Ausführung, Verlassen des Lagers mit einem unversiegelten Lagerstollen).

Um signifikante Veränderungen des Opalinustons im Bereich der Stollenwand zu vermeiden, wird vorgeschlagen, einen gegebenen Lagerstollen nur für 1-2 Jahre offen zu halten (Nagra 2002a). Das IRT betrachtet dieses Vorgehen als vorteilhaft, sowohl in Bezug auf mögliche Degradationen des Opalinustons im Bereich der Stollenwände wie auch hinsichtlich der sicherheitstechnischen Auswirkungen im Falle eines aufgegebenen Lagers oder eines Zwischenfalls in der Betriebsphase. Eine mögliche Folge der Oberflächendegradation bestünde in der Verringerung der effektiven Mächtigkeit der Opalinustonbarriere. Das IRT hält in diesem Zusammenhang fest, dass die Nagra eine Verringerung der Transportmächtigkeit auf 30 m in Betracht gezogen hat. Eine derartige Verringerung bewirkt nur eine kleine Erhöhung der maximalen Dosisrate (um weniger als einen Faktor zwei).

*Aus dem Blickwinkel der Sicherheit zieht das IRT die Schlussfolgerung, dass die Nagra-Bewertung der Lagerauslegung und der betrieblichen Fragestellungen für die jetzige Projektphase zufriedenstellend ist. Zusätzliche Informationen werden aus laufenden Experimenten im Felslabor Mont Terri erhalten. Ferner würde das vorgeschlagene Testlager standortspezifische Informationen auf einer technisch relevanten Skala liefern. Wie bereits im Abschnitt 1.3 festgehalten, werden die sicherheitstechnischen Auswirkungen allfälliger Auslegungsvarianten in jeder Projektphase sorgfältig zu überprüfen sein.*

#### **4.8 Analyse der Systementwicklung und der Zeitskalen**

Die Nagra diskutiert die Entwicklung des Lagersystems im Kapitel 5 des Sicherheitsberichts (Nagra 2002a). Die Diskussion beinhaltet eine Analyse der frühen Phase (die ersten wenigen hundert Jahre), in der die Wärmeentwicklung im Nahfeld wichtig ist, der Periode der Aufsättigung der Auflockerungszone (mehrere hundert Jahre), der Periode der Nahfeldfreisetzung (nach Ablauf von

100 Jahren für LMA bzw. nach 10 000 Jahren für BE/HAA) und der Periode des Transports bis in die Biosphäre, die sich über Hunderttausende bis Millionen von Jahren erstreckt. Für den überwiegenden Teil argumentiert die Nagra, aus Sicht des IRT durchaus vernünftig, dass die Hauptvorgänge in unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen und die komplexeren Wechselwirkungen somit ignoriert werden können. Zum Beispiel sind die Auswirkungen der Wärmeentwicklung nur vor dem Versagen der BE/HAA Behälter wichtig und der Radionuklidtransport findet erst statt, nachdem die EDZ wieder aufgesättigt ist.

Das IRT stuft die von der Nagra präsentierte Analyse und Diskussion der Systementwicklung allgemein als befriedigend für die jetzige Projektphase ein. Im Hinblick auf die zukünftigen Phasen macht das IRT die folgenden Beobachtungen und Empfehlungen:

- Zusätzliche Aufmerksamkeit sollte sich auf den frühen Zeitbereich richten (0 - 10 000 Jahre), mit Betonung auf denkbare Fehlentwicklungen, insbesondere hinsichtlich der technischen Ungewissheiten und Störeinflüsse in der geologischen Umgebung, die sich aufgrund der Untertagebauten ergeben. Zum Beispiel wird die Wiederaufsättigungsphase in der vorliegenden Analyse nicht im Detail untersucht, weil die ersten BE/HAA-Behälter lange nach der Wiederaufsättigungsphase versagen. Das IRT betrachtet es als erforderlich, das phänomenologische Verständnis der Prozesse bei der Feuchtigkeitsverteilung nach Lagerverschluss einschliesslich des Einflusses der Temperatur zu verbessern. Ebenso bedürfen die Auswirkungen des Feuchtigkeitszuflusses in die Bentonitverfüllung auf den Opalinuston einer sorgfältigen Untersuchung.
- Aufgrund des ausgezeichneten Rückhaltevermögens des Opalinustons tritt die vorhergesagte maximale Dosis zu sehr späten Zeiten auf (typischerweise in etwa einer Million Jahren), in denen die Ungewissheiten, speziell in der Biosphäre, sehr viel grösser sind als heute. Da die Öffentlichkeit sich Langzeitprognosen gegenüber generell skeptisch zeigt, ist es für die Nagra wichtig klarzustellen, dass die durch Modellierung ermittelten Dosisraten nur Indikatoren für die Langzeitsicherheit – nicht aber Langzeitprognosen – sind.
- Die Langzeitentwicklung der Biosphäre wird weitgehend durch die zukünftigen Klimas kontrolliert. Die Nagra hat auf das beste verfügbare Expertenwissen über das zukünftige Klima in der Schweiz zurückgegriffen, sollte aber die allgemeinen Ungewissheiten solcher Vorhersagen klarer herausstreichen. Hinweise auf vergangene

klimatische Veränderungen, einschliesslich der Hinweise auf Gletscherränder in den letzten Eiszeiten, scheinen die stärksten Argumente zur Stützung der Nagra-Analysen der Geosphärenentwicklung zu sein.

- Das IRT ist sich bewusst, dass die Klimaexperten dazu neigen, die Auswirkungen der globalen Erwärmung als kurzzeitige Überlagerung der grösseren Klimazyklen aufzufassen. Das IRT anerkennt, dass diese Auswirkungen durch die Konzeptualisierungen von alternativen Klimatas abgedeckt sind (Fälle 6.2a bis d). Trotzdem ist das IRT der Meinung, dass die Auswirkungen der globalen Erwärmung – wegen der erhöhten Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit – in zukünftigen Berichten vertiefter diskutiert werden sollten.

Hinsichtlich der Analyse der Systementwicklung empfiehlt das IRT:

- *Vor der endgültigen Auslegung der Untertagebauten sollte eine sorgfältigere Analyse der Wiederaufsättigungsphase nach dem Lagerverschluss durchgeführt werden. Dazu bedarf es unter Umständen gekoppelter THMC-Modellierungen und Grossversuchen mit Mehrkomponentensystemen.* Das IRT regt auch an, weitere Untersuchungen der durch Feuchtigkeitstransfer im offenen Lager hervorgerufenen Langzeitwirkungen durchzuführen.
- *In zukünftigen Sicherheitsanalysen sollte bei der Präsentation der Resultate betont werden, dass Biosphärenmodelle den Charakter von Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit haben, aber nicht versuchen, die Dosen in ferner Zukunft vorauszusagen.*
- *In zukünftigen Berichten, speziell in solchen für die breite Öffentlichkeit, sollten die Folgen der globalen Erwärmung vertieft diskutiert werden.*

#### **4.9 Behandlung der Biosphäre**

Ungewissheiten, die sich auf die Biosphäre beziehen, werden von denjenigen des Barrierensystems getrennt behandelt. Die Nagra verwendet einen konventionellen Ansatz für die Biosphärenmodellierung, beruhend auf Kompartimenten und Transferkoeffizienten zur Modellierung des Schadstofftransports in der Biosphäre und zur Dosisberechnung für Mitglieder der kritischen Bevölkerungsgruppe. Ungewissheiten in Bezug auf das Klima und zukünftige menschliche Tätigkeiten wird mit vereinfachten Modelldarstellungen der Biosphäre Rechnung getragen. Dieses Vorgehen ist konsistent mit der schweizerischen Richtlinie (HSK/KSA 1993) und trotz der offensichtlichen

Vereinfachungen und Ungewissheiten handelt es sich dabei um Standardmethoden, die in den meisten Lagerprojekten Verwendung finden. Zum Beispiel wurde jüngst im Arbeitsbericht zu einem NEA Fachseminar (NEA 2002a) festgehalten (Originaltext in englischer Sprache): „Es besteht Übereinstimmung in der Ansicht, dass eine stilisierte Methode für die Behandlung der sehr begrenzten Vorhersagbarkeit der Biosphäre und der zukünftigen menschlichen Tätigkeiten geeignet ist. Die in dieser Methode betrachteten, stilisierten Situationen können – wo notwendig – eine Reihe von Situationen umfassen, einschliesslich verschiedener, repräsentativer Klimazustände. Die Fragestellung wurde von den Teilnehmern des Arbeitstreffens als effektiv ‚gelöst‘ betrachtet, obwohl von mehreren Teilnehmern betont wurde, dass die Bedeutung von Dosis und Risiko als Indikatoren für die Sicherheit – anstatt als präzise Masse für die erwarteten Konsequenzen – in der Präsentation der Resultate der Sicherheitsanalyse klar herausgestrichen werden muss.“

In der Analyse der Biosphäre wird angenommen, dass die schadstoffhaltigen, tiefen Grundwässer (mit Herkunft aus dem Lager im Opalinuston) in das Grundwasser des darüber liegenden Aquifers gelangen und dort recht stark verdünnt werden. Das IRT betrachtet die Verdünnungsfaktoren als in vernünftigem Masse gerechtfertigt, hält aber fest, dass die berechneten Dosen umgekehrt proportional zum Verdünnungsvolumen sind. Sollten die Verdünnungsvolumina mit bedeutenden Fehlern behaftet sein, so gälte dies auch entsprechend für die berechneten Dosen. Trotzdem hielten die berechneten Dosen das behördliche Schutzziel ein, in Anbetracht des grossen Abstands zwischen den berechneten Dosen und dem Schutzziel. Ferner können die im Referenzfall und in den alternativen Fällen dargestellten Informationen dazu benutzt werden, diejenigen Dosen abzuschätzen, die sich aus anderen Annahmen zur Schadstofffreisetzung in die Biosphäre ergäben. Nähme man beispielsweise an, dass gepumptes Wasser aus dem Malm-Aquifer für die Bewässerung von landwirtschaftlichen Erzeugnissen – und nicht nur zum Trinken – verwendet würde, so kann daraus unter Annahme einer beträchtlich kleineren kritischen Bevölkerungsgruppe von den Referenzfall-Resultaten durch Extrapolation auf die durch den kleineren Verdünnungsfaktor beeinflussten Resultate geschlossen werden. Sogar wenn der Verdünnungsfaktor um einen Faktor zehn kleiner wäre (was aus Konsistenzgründen eine um den Faktor zehn kleinere kritische Bevölkerungsgruppe bedingen würde), so fiel die berechnete Dosis nur um einen Faktor zehn höher aus als im Referenzfall und läge immer noch deutlich unterhalb des Schutzziels (s. beispielsweise Abbildung 7.10-1 in Nagra 2002a). Analog ergäbe sich aus der Annahme einer höher konzentrierten Schadstofffahne im Quartär-Aquifer eine geringere Verdünnung, und die Dosen des Referenzfalls können für eine Abschätzung der aus dem geringeren Verdünnungsfaktor resultierenden Dosen benutzt werden.

Es ist festzuhalten, dass der Schutz der Umwelt eine wichtige Zielsetzung des Abfall-Managements ist und dass er bei der Sicherheitsbewertung der Abfalllager in Betracht zu ziehen ist. Nach IAEA (2004) wird heutzutage davon ausgegangen, dass der Schutz des Menschen vor der Strahlengefahr auch das Bedürfnis nach dem Schutz der Umwelt befriedigt, dass aber der Schutz der Umwelt vor ionisierenden Strahlen gegenwärtig Gegenstand internationaler Diskussionen ist. Die Abschätzung von Schadstoffkonzentrationen und -flüssen und der Vergleich mit natürlichen Konzentrationen und Flüssen kann ein nützliches, von den Annahmen über das menschliche Verhalten unabhängiges Instrument sein. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist die ökologische Umweltsensitivität am Ort einer möglichen Schadstofffreisetzung.

Es ist auch festzustellen, dass die vorliegende Untersuchung keine umfassende Analyse von Gaspfaden beinhaltet, da angenommen wurde, dass gasförmige Freisetzungen im Vergleich mit im Grundwasser gelösten Gasen zu tieferen Dosen führen würden.

Im Lichte der obigen Diskussion *empfiehlt das IRT der Nagra:*

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

#### **4.10 Interaktion zwischen dem IRT und der Nagra**

Das IRT fand, dass sich die Nagra im gesamten Verlauf der Expertenprüfung offen und besorgt zeigte, dem IRT bei dem Review behilflich zu sein, und dass die Nagra hart an vom IRT aufgeworfenen Fragestellungen arbeitete.

Basierend auf der Interaktion mit der Nagra während der Expertenprüfung und auf der vorgängigen Kenntnis des Nagra-Programmes stellt das IRT fest, dass die Nagra:

- über ein ausgereiftes Programm mit einem hoch kompetenten, offenen Mitarbeiterstab verfügt, und dass Wissenschaft, Standortcharakterisierung, technische Auslegung und Sicherheitsanalyse wirksam in das Programm integriert sind;

- über starke Programme in spezifischen Gebieten verfügt, wie zum Beispiel in der Geochemie und in der Standortcharakterisierung, die innerhalb der Unternehmung, an Instituten wie dem PSI und der Universität Bern sowie im Rahmen des internationalen Felslabors Mont Terri ausgeführt werden;
- spezifische Entwicklungen in anderen Programmen verfolgt und diese wirksam im eigenen Programm nutzt;
- internationale Entwicklungen verfolgt und zu diesen beiträgt, und die Resultate im eigenen Programm integriert.



## 5. DIE WICHTIGSTEN AUSSAGEN

In diesem Kapitel fasst das IRT seine wichtigsten Aussagen aus zwei Perspektiven zusammen. Die erste Perspektive geht von den spezifischen, von der Nagra gesetzten Zielen des Sicherheitsberichts aus. Die zweite Perspektive bezieht sich auf das Pflichtenheft des IRT, wie es zusammengefasst in Abschnitt 1.3 und in Anhang 2 zu finden ist.

### 5.1 Aussagen aus der Perspektive der Ziele des Nagra-Sicherheitsberichts

Die spezifischen Ziele des Sicherheitsberichts sind auf Seite 12 von Nagra (2002a) wie folgt aufgelistet:

1. Beurteilung der Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Tiefenlager für BE/HAA/LMA aus Sicht der Langzeitsicherheit.
2. Verbesserung des Kenntnisstandes bzgl. der vielfältigen Sicherheitsfunktionen des betrachteten Lagersystems.
3. Bewertung der Robustheit des Lagersystems bzgl. der verbleibenden Ungewissheiten und der Auswirkung von Phänomenen, welche die Barrierenwirkung des Lagers beeinträchtigen könnten.
4. Bereitstellung einer Diskussionsgrundlage für eine Vielzahl von mit der Entsorgung zusammenhängenden Themen. Im Einzelnen bilden die in der Sicherheitsanalyse gemachten Aussagen zusammen mit den Stellungnahmen der zuständigen Behörden eine wichtige Grundlage im Hinblick auf die künftige Planung der Entsorgung.

Die Aussagen des IRT im Bezug auf diese Ziele werden nachstehend zusammengefasst.

### **5.1.1 Zur Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland als Wirtgestein**

*Nach Ansicht des IRT hat die Nagra überzeugende Beweise dafür vorgelegt, dass der Opalinuston im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Tiefenlager geeignet ist. Im einzelnen:*

- i) Vielfache Argumente wurden vorgelegt, wonach der Opalinuston im Zürcher Weinland ein dichtes und selbstabdichtendes Material ist, das über ausgesprochen günstige Eigenschaften bzgl. Isolation, Rückhaltung, Verzögerung und Dispersion von Radionukliden verfügt, die aus einem darin befindlichen Tiefenlager freigesetzt werden könnten. Untersuchungen an natürlichen Analoga, Labor- und Feldexperimente sowie theoretische Analysen erhärten diesen Befund.*
- ii) Der Opalinuston im Zürcher Weinland kommt in ausreichender Tiefe und mit genügender Ausdehnung vor, um ein Tiefenlager zu beherbergen. Er liegt in einer seismisch stabilen Region der Schweiz und seine Eigenschaften sind unempfindlich gegenüber Änderungen an der Erdoberfläche.*
- iii) Das geometrische Modell des Opalinustons im Zürcher Weinland ist wissenschaftlich gut fundiert. Aufgrund der vorgelegten Unterlagen erscheint es dem IRT als vernünftig, den Opalinuston des Zürcher Weinlands in der Sicherheitsanalyse als eine homogene Schicht zu behandeln. Vernünftig ist auch die Schlussfolgerung, dass die sicherheitsrelevanten Eigenschaften auf eine grosse Region extrapoliert werden können.*

### **5.1.2 Verständnis der mehrfachen Sicherheitsfunktionen des Lagersystems**

In Übereinstimmung mit dem international üblichen Vorgehen nennt die Nagra drei hauptsächliche Sicherheitsfunktionen für ein Tiefenlager:

1. Isolation vom menschlichen Lebensraum;
2. Langzeiteinschluss und radioaktiver Zerfall innerhalb des Lagersystems;
3. Verminderung von Freisetzungen in die Umwelt.

Diese Funktionen werden durch ein System von Eigenschaften erreicht, die gemeinsam von natürlichen und künstlichen Barrieren beigesteuert werden, wie sie in Kapitel 2 und ausführlicher in Kapitel 4 behandelt wurden. Das IRT vertritt die Ansicht, dass die Tiefe des Lagers (etwa 650 m) und die Eigenschaften der geologischen Schichten für eine hochgradige Isolation von der Biosphäre sorgen.

Der Langzeiteinschluss wird durch verschiedene Barrierenfunktionen gewährleistet. Zu den Barrieren zählen:

- der dickwandige Stahlbehälter für BE und HAA, welcher die Radionuklide für mindestens 10 000 Jahre absolut einschliesst, mit der möglichen Ausnahme einiger weniger fehlerhafter Behälter;
- die dauerhaften Abfallmatrizen – abgebrannte Brennelemente und verglaste HAA – die unter den geochemischen Bedingungen, die im Lager erwartet werden, bei ihrer Auflösung die Radionuklide sehr langsam abgeben (d.h. während zehn- bis hunderttausenden von Jahren oder sogar noch länger für abgebrannte Brennelemente);
- die Bentonitverfüllung, die nicht nur ein günstiges chemisches Umfeld, eine starke Transport- und Einschlussbarriere und einen Weg zum Abtransport der Wärme bildet, sondern auch einen gut verstandenen Mechanismus zur Selbstabdichtung der die Lagerstollen mit den Abfallbehälter umgebenden Auflockerungszone darstellt;
- die Opalinustonsschicht, die geologisch stabil ist und für viele Radionuklide eine extrem niedrige Durchlässigkeit und gute Rückhalteigenschaften aufweist.

Die Analysen der Nagra zeigen, dass die meisten der in den Abfällen vorhandenen Nuklide während einer Million Jahre und länger in der Geosphäre zurückgehalten würden. Nur langlebige, nichtsorbierende und schwach-sorbierende Radionuklide wie  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{14}\text{C}$  und  $^{36}\text{Cl}$  könnten aus der Geosphäre entweichen und würden durch quartäre Grundwässer verdünnt, bevor sie den menschlichen Lebensraum erreichen.

Das IRT ist der Ansicht, dass das Verständnis über das Verhalten der Komponenten des Mehrfachbarrierensystems, wie es von der Nagra vorgeschlagen wird, wissenschaftlich gut begründet ist. Ausserdem ist das Mehrfachbarrierensystem mit komplementären und redundanten Eigenschaften ausgestattet, die dafür sorgen sollten, dass die Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre erst nach sehr langer Zeit stattfinden würde und dass diese Freisetzung im Vergleich mit natürlichen Radionuklidflüssen klein wäre.

### ***5.1.3 Bewertung der Robustheit des Lagersystems bezüglich der verbleibenden Ungewissheiten***

Die Robustheit kann als Mass der Unempfindlichkeit gegenüber verbleibenden Ungewissheiten aufgefasst werden. Die Nagra hat die Robustheit durch ihr Lagerkonzept sichergestellt, das mehrfache Barrieren mit

angemessener Redundanz aufweist. Die Nagra hat die Robustheit ihres Konzepts mit der Analyse einer breiten Auswahl von Rechenfällen bewertet, darunter „Was wäre wenn?“-Rechenfälle, die ausserhalb des durch wissenschaftliche Beobachtungen gestützten Bereichs liegen. Wie im Abschnitt 3.2 ausgeführt, kommt das IRT zum Schluss, dass die Nagra die Robustheit für die gegenwärtige Phase des Projekts erfolgreich nachgewiesen hat.

#### ***5.1.4 Bereitstellung einer Diskussionsgrundlage für eine Vielzahl von mit der geologischen Tiefenlagerung zusammenhängenden Themen***

Das IRT ist mit der Nagra einig, dass die Erkenntnisse der Sicherheitsanalyse der Nagra beim nächsten und in den weiteren Schritten der Lagerplanung und -entwicklung in der Schweiz eine nützliche Entscheidungshilfe bieten werden. Trotz der Klarheit der Dokumentation ist das IRT der Meinung, dass der sehr grosse Umfang der Informationen es der breiten Öffentlichkeit erschweren würde, sich ein fundiertes Urteil zu bilden. Das IRT ermuntert deshalb die Nagra, eine Broschüre von ~ 50-60 Seiten herauszugeben, welche das Projekt Entsorgungsnachweis zusammenfasst. Diese Broschüre sollte eine Übersicht über die verschiedenen Dokumente enthalten, in denen der Leser zusätzliche, mehr ins Detail gehende Informationen finden kann.

Allgemein stellt das IRT fest, dass der Sicherheitsbericht der Nagra und die damit verbundene Dokumentation ein klares Abbild der Diskussionen und Überlegungen sind, die in den letzten zehn Jahren auf internationaler Ebene zum Thema eines modernen Sicherheitsnachweises stattgefunden haben. Für andere nationale Studien wird er ein nützlicher Massstab (Benchmark) sein.

#### **5.2 Aussagen aus der Perspektive des Pflichtenhefts des IRT**

Das IRT stellt für die Zwecke der vorliegenden Bewertung fest:

- 1. Die von der Nagra verfolgte allgemeine Strategie zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist gut durchdacht und klar dargestellt; sie ist in Übereinstimmung mit gegenwärtigen internationalen Überlegungen, was in einem Sicherheitsnachweis enthalten sein sollte.*
- 2. Die Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Barrieren im Mehrfachbarrierensystem sind klar beschrieben und analysiert worden. Aufgrund seiner Eigenschaften spielt der Opalinuston mit seinem Beitrag zur Sicherheit eines Lagers im Zürcher Weinland eine herausragende Rolle, aber die anderen Komponenten (dauerhafte Abfallmatrizen, langlebige Behälter für BE und HAA, Verfüllmaterial)*

*tragen ebenfalls zum allgemeinen Sicherheitsnachweis bei und stützen ihn.*

- 3. Die Methodik, Modelle und Rechenprogramme, die für die Bewertung der Sicherheit verwendet wurden, sind vergleichbar mit jenen, die in anderen Programmen verwendet werden, und sind für den Anwendungszweck geeignet.*
- 4. Die wissenschaftliche Basis für die Modellierung der Prozesse und Barrierenfunktionen ist auf dem neuesten Stand von Forschung und Technik und für den Zweck der Sicherheitsanalyse angemessen.*
- 5. Die Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEPs), welche die Entwicklung des Lagersystems beeinflussen, sind klar dokumentiert; die Nagra hat einen detaillierten Vergleich mit der internationalen FEP-Datenbank der NEA vorgenommen, um sicherzustellen, dass sie genügend umfassend sind.*
- 6. Die in der Sicherheitsanalyse berücksichtigten Szenarien und Rechenfälle decken eine breite Auswahl an Möglichkeiten ab und sind für die gegenwärtige Phase des Projekts genügend umfassend.*
- 7. Die Auswirkungen der mit den Daten und Modellen verbundenen Ungewissheiten auf die Sicherheit sind umfassend analysiert worden.*

Im Vergleich mit internationalen Standards und der internationalen Praxis ist die von der Nagra vorgelegte Langzeitsicherheitsanalyse von hoher Qualität. Sie wird in der bevorstehenden nationalen Debatte über die zukünftigen Phasen des schweizerischen Entsorgungsprogramms einen wichtigen Bestandteil der Diskussionsgrundlagen bilden.



## 6. REFERENZEN

- AECL (1994): Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste, Atomic Energy of Canada Report AECL-10711, COG-93-1, 1994.
- Berner, U. (2002): Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near field of a repository for spent fuel and vitrified high-level waste. Nagra Technical Report NTB 02-10. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Berner, U. (2003): Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near field of a repository for long-lived intermediate-level waste. Nagra Technical Report NTB 02-22. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2002): A comparison of  $D_a$  and  $K_d$  values deduced from diffusion experiments in compacted Kunigel V1 bentonite with those derived from batch sorption experiments: A case study for Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III), Zr(IV) and Np(V). Nagra Technical Report NTB 02-17. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2003a): Near-field sorption databases for compacted MX-80 bentonite for performance assessment of a high level radioactive waste repository in Opalinus Clay host rock. Nagra Technical Report NTB 02-18. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B. (2003b): Far-field sorption database for performance assessment of a high level radioactive waste repository in an undisturbed Opalinus Clay host rock. Nagra Technical Report NTB 02-19. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Curti, E. (2003): Glass dissolution parameters: Update for Entsorgungsnachweis. Nagra Technical Report NTB 02-21. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- EKRA (2000): Disposal concepts for radioactive waste: Final report. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle/Expert group on disposal concepts for radioactive waste (EKRA).

- Enachescu, C., Blümling, P., Castelao, A. and Steffen, P. (2002): Mont Terri /GP-A and GS Experiments – Synth. Rep., Unpubl. Nagra Internal Report, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Gimmi, T. and Waber, H.N. (2003): Modelling of profiles of stable water isotopes, chloride and chloride isotopes of porewater in argillaceous rocks in the Benken borehole. Unpubl. Nagra Internal Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Häring, M.O. and Müller, D.W. (1994): Faziesstudie Oberer Keuper bis Malm: Petrophysikalische Auswertung und geologische Interpretation der Fremd- und Eigenbohrungen in der Nordostschweiz und dem näheren Ausland. Unpubl. Nagra Internal Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- HSK/KSA (1993): Protection objectives for the disposal of radioactive waste, HSK-R-21/e. Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) and Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA), Villigen HSK, Switzerland.
- Hummel, W. and Berner, U. (2002): Application of the Nagra/PSI TDB 01/01: solubility of Th, U, Np and Pu. Nagra Technical Report NTB 02-12. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Hummel, W., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J. & Thoenen, T. (2002): Nagra/PSI Thermochemical database 01/01. Nagra Technical Report NTB 02-16. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- IAEA (1994): Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste disposal facilities, IAEA-TECDOC-767, Vienna (1994).
- IAEA (1995): The principles of radioactive waste management. IAEA Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1996): International basic safety standards for protection against ionising radiation and for the safety of radiation sources. IAEA Safety Fundamentals, Safety Series No. 115. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (1999): Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. IAEA Technical Reports Series No. 391. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

- IAEA (2000): Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel. Proceedings of an international seminar, October 1999, IAEA-TECDOC-1187. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2001a): Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA-TECDOC-1208. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2001b): The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste. IAEA-TECDOC-1243. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2003): Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes. IAEA Technical Reports Series No. 413. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA (2004): Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements, DS154, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- ICRP (1991): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21/1-3. Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (1997): Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. ICRP Publication 77, Annals of the ICRP 27 Supplement. Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (1998): Radiological protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81, Annals of the ICRP 28/ 4. Pergamon Press, Oxford and New York.
- ITC (2003): Methodologies for Geological Disposal. The Fundamentals of Geological Disposal. The Theory and Practice of Underground Rock Facilities. International Training Center. School of Underground Waste Storage and Disposal. 20 to 31 October 2003 Meiringen Switzerland, 3 to 7 November 2003, Grimsel Test Site, Switzerland.
- Johnson, L.H. and King, F. (2003): Canister options for the direct disposal of spent fuel. Nagra Technical Report NTB 02-11. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Johnson, L.H. and McGinnes, D.F. (2002): Partitioning of radionuclides in Swiss power reactor fuels. Nagra Technical Report NTB 02-07. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Johnson, L.H. and Smith, P.A. (2000): The interaction of radiolysis products and canister corrosion products and the implications for radionuclide transport in the near field of a repository for spent fuel. Nagra Technical Report NTB 00-04. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Johnson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P. and Gribi, P. (2002): Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 01-04. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (Nuclear Energy Law), 21 March 2003.
- Lauber, M., Baeyens, B. and Bradbury, M.H. (2000): Physico-Chemical Characterisation and Sorption Measurements of Cs, Sr, Ni, Eu, Th, Sn and Se on Opalinus Clay from Mont Terri. Nagra Technical Report NTB 00-11. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Leu, W., Greber, E. and Schegg, R. (2001): Basin modeling NE-Switzerland, burial, erosion and temperature history of wells Benken, Weiach and Herdern-1. Unpubl. Nagra Int. Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Maes, N., Moors, H., Wang, L., Delécaut, G., De Cannière, P. and Put, M. (2002): The use of electromigration as a qualitative technique to study the migration behaviour and speciation of uranium in the Boom Clay. *Radiochimica Acta*, **90**, 741-746, 2002.
- Marschall, P. Croisé, J., Schlickenrieder, L., Boisson, J.Y., Vogel, P. and Yamamoto, S (2003): Synthesis of hydrogeological investigations at the Mont Terri site (Phases 1-5). Unpubl. Mont Terri Tech. Rep. TR 2001-02, Federal Office of Water and Geology, Bern, Switzerland.
- Martin, C.D. and Lanyon, G.W. (2002): EDZ in Clay Shale: Mont Terri Tech. Rep. TR 2001-01, Federal Office of Water and Geology, Bern, Switzerland.
- McGinnes, D.F. (2002): Model radioactive waste inventory for reprocessing waste and spent fuel. Nagra Technical Report NTB 01-01. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985, Vols. 1-8, Vol. 9 (English Summary). Nagra Gewähr Report Series, NGB 85-01/09. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (1994): Kristallin-I safety assessment report. Nagra Technical Report NTB 93-22. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (1995): Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren – Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 94-14. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (1996): Sondierbohrung Benken, Arbeitsprogramm, Nagra Technischer Bericht NTB 96-07. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2001a): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 00-03. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2001b): Sondierbohrung Benken: Geological and mineralogical investigations. Unpubl. Nagra Internal Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2001c): Sondierbohrung Benken: Untersuchungsbericht. Textband. Nagra Technischer Bericht NTB 00-01. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2001d): Sondierbohrung Benken: Untersuchungsbericht. Beilagenband. Nagra Technischer Bericht NTB 00-01. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2002a): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2002b): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technical Report NTB 02-03. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2002c): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technical Report NTB 02-02. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Nagra (2002d): Project Opalinus Clay: FEP Management for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-23. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2002e): Project Opalinus Clay: Models, codes and data for safety assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-06. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2002f): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht NTB 99-08. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2003a): Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high level waste and long lived intermediate level waste sited in Opalinus Clay. Unpubl. Nagra Internal Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2003b): The aims and the role of Project Entsorgungsnachweis in the overall framework of the step-wise approach towards repository implementation: The required vs. the available level of confidence at the current stage. Nagra Internal Note provided to IRT. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2003c): Quality Management and its impact on the methodology used for making the safety case – The role of experts in the development of the Opalinus Clay safety case, Public presentation to the NEA International Review Team by P. Zuidema, November 2003 (available from Nagra).
- NEA (1995): The environmental and ethical basis of geological disposal: a collective opinion of the Radioactive Waste Management Committee. OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (1997): Lessons learnt from ten performance assessment studies. OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (1999): Confidence in the long-term safety of deep geologic repositories – its development and communication. OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.

- NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for geologic disposal of radioactive waste – an international database. OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (2001a): Reversibility and retrievability in geologic disposal of radioactive waste: reflections at an international level. OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (2001b): Scenario development methods and practice, an evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development, Proceedings, Madrid, Spain, May 1999, ISBN 92-64-18722-7.
- NEA (2001c): The Role of Underground Laboratories in Nuclear Waste Disposal Programmes. OECD/NEA. Paris, France.
- NEA (2001d): Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal, Safety-relevant issues, Workshop Proceedings, Reims, France, 26-28 June 2000, OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (2002a): The handling of timescales in assessing post-closure safety of deep geological repositories – Workshop Proceedings Paris, France, 16-18 April 2002.
- NEA (2002b): Establishing and communicating confidence in the safety of deep geological disposal; approaches and arguments, OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (2003): Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. OECD/NEA/RWM NEA4437 Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- NEA (2004): The nature and purpose of the post-closure safety case for geological disposal, Integration Group for the Safety Case (IGSC), NEA/RWM/IGSC(2003)11/PROV, OECD/NEA Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Pearson, F.J. (2002): Benken reference water chemistry. Unpubl. Nagra Int. Report. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Simmons, G.R. and Baumgartner, P. (1994): The disposal of Canada's nuclear waste: Engineering for a disposal facility, Atomic Energy of Canada Report AECL-10715, COG-93-5, 1994.

- SKB (2000): RD&D-Programme 2001 Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, SKB TR-01-30, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- US-DOE (2000): Total system performance assessment supporting the site recommendation (TSPA-SR), Prepared for US Department of Energy, Yucca Mountain Site Characterization Office, Las Vegas, Nevada December 2000.
- Voegelin, A. and Kretzschmar, R. (2002): Stability and mobility of colloids in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 02-14. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Wieland, E. and van Loon, L. (2002): Cementitious near-field sorption database for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 02-20. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Witherspoon P.A., Bodvarsson G.S. *et al* (2001): Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California. Prepared for the USDOE.
- Zuidema, P., Della Casa, A., Maxeiner, H. and Schweingruber. M. (1996): Konditionieren von radioaktiven Abfällen: Überblick und Diskussion endlagerrelevanter Eigenschaften. Course material for the Swiss Society for Nuclear Energy (SVA) „Vertiefungskurs“ on „Bewirtschaftung radioaktiver Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken“, 27-29 March 1996. Available from SVA, Postfach 5032, CH-3001 Bern, Switzerland.

## ANHANG 1:

### **VERGLEICH DES SICHERHEITSNACHWEISES DER NAGRA MIT BEISPIELEN VON GRUNDSÄTZEN UND GUTER PRAXIS GEMÄSS DEM NEA CONFIDENCE DOCUMENT (NEA 1999)**

Im Bericht „Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories“ (NEA 1999) führt die NEA in einer Reihe von Tabellen Beispiele von Grundsätzen und guter Praxis auf, die bei der Erarbeitung eines Sicherheitsnachweises berücksichtigt werden sollten. Im vorliegenden Anhang werden die Beispiele aus den Tabellen 4 bis 8 in NEA (1999) in Fettschrift aufgelistet, und für jedes Beispiel werden die Informationen aus Nagra (2002a) sowie aus den entsprechenden Referenzdokumenten zusammengetragen. Dies dient dem Zweck einer sachlichen Bewertung, wie der Sicherheitsnachweis der Nagra die international anerkannten NEA-Grundsätze und Beispiele widerspiegelt. Insgesamt wird aus diesem Vergleich klar, dass der Sicherheitsnachweis der Nagra mit den internationalen Überlegungen im Einklang steht.

- I. Grundsätze, Richtlinien und Prozeduren in der Betrachtung der Robustheit des Systemkonzepts [siehe Tabelle 4 in NEA (1999)]**
- 1) Verwendung von mehrfachen Sicherheitsbarrieren, die zu einem robusten Lagerkonzept führen, in dem Ungewissheiten entweder vermieden werden oder in dem die Sicherheit trotz der verbleibenden Ungewissheiten nachgewiesen werden kann. Dies schliesst das Mehrfachbarrierensystem ein, in dem eine übermässige Abhängigkeit von einer einzelnen Sicherheitsvorkehrung vermieden wird.**
- 1a)** Das Mehrfachbarrierenkonzept spielt im Sicherheitsnachweis der Nagra eine zentrale Rolle und die Grundsätze dieses Konzepts sind explizit im Abschnitt 2.6.2.2 des Sicherheitsberichts dargestellt (Nagra 2002a) sowie allgemein im gesamten Sicherheitsbericht [siehe z.B. Fig. 4.4-2, 4.4-3, 4.4-4; Abschnitt 5.8.2; Abschnitt 6.2 („Pfeiler der Sicherheit“) und Fig. 6.3-1 in Nagra (2002a)]. Die Hauptkomponenten des Mehrfachbarrierensystems sind mit den Sicherheitsfunktionen verknüpft; die letzteren werden im Abschnitt 2.6.2.1 in Nagra (2002a) definiert. Um das

Verhalten jeder einzelnen Barriere im Mehrfachbarrierensystem zu beschreiben werden verschiedene Modelle verwendet [siehe Appendix 1 in Nagra (2002e)].

**1b)** Die betrachteten Ungewissheiten sind explizit im Abschnitt 3.4 in Nagra (2002a) aufgeführt, und die Behandlung der Ungewissheiten wird in den Abschnitten 3.7.3 und 3.7.4 diskutiert. Ferner wird der FEP-Management-Prozess (Nagra 2002d) als Werkzeug für die Identifizierung und Behandlung der Ungewissheiten verwendet [siehe Tabellen in App. 4 und 5 in Nagra (2002d)]. Die Nagra diskutiert die Redundanz, die Unempfindlichkeit gegenüber Ungewissheiten, z.B. Einschluss durch BE/HAA-Behälter während der thermischen Phase, die Verwendung von Materialien mit entsprechenden Erfahrungen über das Langzeitverhalten (Stahl, Bentonit), siehe Abschnitt 5.8.4 auf S. 179 in Nagra (2002a), die Verwendung mehrfacher Bentonitverfüllungen und -Versiegelungen (Verfüllung, Stollenversiegelungen, Rampenversiegelung) zur Behandlung der mit der EDZ verknüpften Ungewissheiten [siehe Fig. 4.5-10, S. 109 in Nagra (2002a)]. Diejenigen Ungewissheiten, die nicht durch wissenschaftliche Argumentation ausgeschlossen werden können, finden in Rechenfällen Eingang, die einen weiten Bereich von Möglichkeiten und Ungewissheiten abdecken und die im Kapitel 7 in Nagra (2002a) analysiert werden. Das im Schweizer Programm angewandte schrittweise Vorgehen sieht unter anderem mehrfache Überprüfungen vor und stellt sicher, dass neue Erkenntnisse angemessen integriert werden. Das EKRA-Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (EKRA 2000), auf dem das Auslegungskonzept der Nagra basiert, beruht auf einem schrittweisen Entscheidungsfindungsprozess.

**2) Verwendung einer flexiblen Strategie mit dem Ziel, eine flexible Strategie für die Entwicklung und Verbesserung der Auslegung zu etablieren und anzuwenden um einer effiziente Nutzung des Sicherheitspotentials des Wirtgesteins zu gewährleisten (z.B. Auslegungsentwicklung mit Projektfortschritts, engl. „design-as-you-go“).**

Im Verständnis der Nagra bezieht sich der Begriff „Auslegung“ sowohl auf das Programm (z.B. Bewertung der Standortmöglichkeiten) als auch auf das Tiefenlager. Die Nagra hat andere Sicherheitsnachweise für ein HAA-Tiefenlager erstellt (Projekt Gewähr, Kristallin-I) und auch einige Analysen zum Opalinuston im Rahmen des Sedimentprogramms vorgenommen [siehe Abschnitt 1.2.4 in Nagra (2002a)]. Die in diesen Studien gewonnenen Erfahrungen, einschliesslich der Vorgaben der Behörden, wurden in der Ausrichtung des Programms vom kristallinen

Grundgebirge auf Sedimente, inklusive Opalinuston, berücksichtigt. Die Eigenschaften des Opalinustons erlauben Flexibilität in der Auslegung der technischen Barrieren. Die Nagra erwähnt ausdrücklich die Möglichkeit von Änderungen als eine der Zielsetzungen im Rahmen der schrittweisen Implementierung [(siehe Abschnitt 2.6.3 in Nagra (2002a)]. Es wird auf alternative Auslegungsoptionen hingewiesen (z.B. Kupferbehälter als Alternative zu Stahl). Der Einbezug eines Pilotlagers und eine ausgedehnte Beobachtungsphase sind zusätzliche Strategien, um das Ziel einer schrittweisen Implementierung zu erfüllen.

**3) Empfehlungen in Bezug auf die Standortcharakteristika. Z.B. ein Standort, der strukturell einfach und/oder einfach in Bezug auf die zu betrachtenden Vorgänge und Ereignisse ist, einschliesslich geologischer Vorgänge und eines möglichen, unbeabsichtigten menschlichen Eindringens.**

**3a)** Die Einfachheit des Standorts (insbesondere in Bezug auf die Einheitlichkeit sowohl in vertikaler als auch in lateraler Richtung), der Grad an Vertrauen in die Extrapolierbarkeit der Daten von der Sondierbohrung Benken auf das hochaufgelöste 3D-Seismikgebiet und die Verknüpfung mit den regionalen Verhältnissen sind in verschiedenen Dokumenten gut dargelegt (siehe Nagra (2003b); Nagra (2002a), Abschnitt 4.2; Nagra (2002b), Kapitel 3 bis 5; Nagra (2001a); Häring und Müller 1994).

**3b)** Die Nagra weist darauf hin, dass die günstigen Wirtgesteins-Eigenschaften in Bezug auf den Radionuklidtransport und auf die Langzeitstabilität zu den Grundsätzen der Standortsuche gehören [siehe Abschnitt 2.6.2.3 in Nagra (2002a)]. Diese werden im gesamten Sicherheitsnachweis und in Nagra (2002b) sowie als Teil der „Pfeiler der Sicherheit“ [siehe S. 184, Abschnitt 6.2 in Nagra (2002a)], vertieft diskutiert und dargelegt. Der wissenschaftliche Hintergrund dieser Fragestellungen wird in Abschnitt 5.2.2 in Nagra (2002a), in Nagra (2002b) und in Nagra (2002f) diskutiert. Das Fehlen von natürlichen Ressourcen wird in Abschnitt 3.9 in Nagra (2002b) diskutiert. Ferner sind Auslegungsmassnahmen vorgesehen, um die Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens zu minimieren (Kopartimentierung).

**4) Empfehlungen/Kriterien in Bezug auf die Abfallkonditionierung, z.B. das Verbot von flüssigen Abfällen, die Verwendung einer stabilen Abfallmatrix und eines langlebigen Behälters.**

Es wurden verschiedene Annahmebedingungen und Regelungen zur Abfallkonditionierung entwickelt und in Kraft gesetzt, z.B. für schwach- und mittelaktive Abfälle und für langlebige mittelaktive Abfälle [siehe Zuidema *et al.* (1996) und Zuidema *et al.* (1997), zitiert in Nagra (2002a)]. Gegenüber dem IRT wurde darauf hingewiesen, dass auch Vereinbarungen mit den Erzeugern von HAA zur Übernahme der Abfälle existieren. Diese bilden die Basis für ein Verfahren zur Untersuchung und Bescheinigung der Endlagerfähigkeit (siehe Nagra (2002a), S. 101). Die Nagra anerkennt, dass formale Annahmebedingungen für BE noch zu entwickeln sind und dass für die vorliegende Studie ein Schwellenwert für die thermische Leistung eines Abfallgebindes angenommen wurde. Die Nagra hält fest, dass das Radionuklidinventar gut definiert ist.

**5) Empfehlungen in Bezug auf die Auslegungsvorgaben. Z.B. könnte eine Mindestdiefe für das Lager vorgegeben werden; es könnte nach einem Standort gesucht werden, der grösser ist als das geforderte Minimum; die Möglichkeit der Rückholbarkeit und Überwachung könnte in die Auslegung mit einbezogen werden.**

Die Nagra präsentiert eine Lagerauslegung, die auf einer Kompartimentierung sowie auf der Möglichkeit der Langzeitüberwachung und -rückholung basiert. Dies in einer geeigneten Tiefe (ca. 650 m unter der Erdoberfläche) und an einem geeigneten Standort (der auf den Resultaten der 3D-Seismik beruht), siehe Nagra (2002a), Kapitel 4, und insbesondere Fig. 4.2-5, welche darauf hinweist, dass ausreichende Raumreserven zur Verfügung stehen. Die zugrunde liegenden Prinzipien für das System und die Auslegung sind in der Tab. 2.6-1 in Nagra (2002a), S. 43, zusammengefasst.

**6) Review-Verfahren bei Entscheidungen bzgl. Standortwahl und Auslegung.**

Es existieren Review-Verfahren für Entscheide bzgl. Auslegung und Standortwahl [siehe Appendix 4 in Nagra (2002a)]. Spezielle Sitzungen mit externen Experten werden zu Schlüsselthemen durchgeführt, siehe Appendix 4, S. D-5 in Nagra (2002a). Die Ansichten der Experten werden in der Projektdokumentation festgehalten [siehe Punkt 4 in Appendix 8 in Nagra (2002e)]. Die endgültigen Entscheide zur Auslegung und zur Standortwahl liegen jedoch bei der Nagra. Eine allgemeine Beschreibung der Qualitätssicherungsmaßnahmen für die

Sicherheitsanalyse wird in Appendix 8 in Nagra (2002e) präsentiert. Diese weist im Punkt 3 darauf hin, dass die Notwendigkeit einer Überprüfung aller Technischen Berichte der Nagra ein integraler Bestandteil der Qualitätssicherungsmassnahmen ist. Das Urteil von Experten wird über den FEP-Management-Prozess explizit in die gesamte Sicherheitsanalyse integriert (siehe Appendix 4 und 5 in Nagra (2002d) sowie die Kapitel 2 und 4 über die Audits). Das Urteil von Experten wird ebenfalls durch Befragung in internen und externen Reviews und Audits aufgenommen [S. D-5 in Nagra (2002a)]. Das Urteil von Experten findet im Datenfreigabeverfahren Verwendung, und zusätzliche Massnahmen, wie z. B. Reviews, sind notwendig, falls die Daten von besonderer Wichtigkeit sind [siehe Punkt 5 in Appendix 8 in Nagra (2002e)].

**7) Qualitätsrichtlinien für Standortcharakterisierung, Abfallkonditionierung und Behälterherstellung, Lagerbau und -betrieb.**

Die Nagra präsentierte dem IRT in mündlicher Form das intern entwickelte Qualitätsmanagement-System, das auf der Anwendung von fünf Qualitätsmanagement-Grundsätzen beruht [Nagra (2003c)], und diskutierte dieses mit dem IRT. Eine allgemeine Beschreibung der qualitätssichernden Massnahmen für die Sicherheitsanalyse ist im Appendix 8 in Nagra (2002e) zu finden. Für die Abfallkonditionierung werden in den Anlagen der Abfallerzeuger spezifische Qualitätsrichtlinien angewendet [siehe S. 101 in Nagra (2002a)]. Ein spezifisches Verfahren wurde für die Bewertung und Behandlung von Ungewissheiten entwickelt [siehe Kapitel 3 in Nagra (2002a), Abschnitte 3.7.3 S. 55 und 3.7.4 S. 56ff]. Was die Standortcharakterisierung angeht, hat das IRT die QM-Dokumentation keiner Prüfung unterzogen. Aber das IRT wurde dahingehend unterrichtet, dass die relevanten Qualitätsrichtlinien existieren und dass diese auf Anfrage zur Verfügung stünden. Jedenfalls scheint die Qualitätssicherung für die Standortcharakterisierung durchgeführt und in Qualitätssicherungsplänen dokumentiert worden zu sein. Letztere ähneln den Qualitätssicherungsplänen, die im Appendix 8 in Nagra (2002e) für die Sicherheitsanalyse erwähnt wurden. Siehe hierzu S. 68 in Nagra (1996). Insbesondere wird für die 3D-Seismik ein Überwachungsbericht zur Qualitätssicherung zitiert, siehe Laws, J. (1997) zitiert in Nagra (2001a).

## **II. Qualität der Methoden und Modelle der Sicherheitsanalysen (Test der Qualität der Sicherheitsanalyse) [siehe Tabelle 5 in NEA (1999)]**

### **II.a. Kriterien zur Beurteilung der Qualität des in der Langzeitsicherheitsanalyse angewandten Vorgehens**

- 1) Betonung der Komponenten des Lagerkonzepts, von denen aus begründetem Anlass erwartet werden darf, dass sie zur Sicherheit in einer gegebenen Projektphase beitragen. (In jeder Projektphase gibt es Ungewissheiten, die hinsichtlich einiger Aspekte des Systemkonzepts bedeutender sind als andere.)**

In der vorliegenden Projektphase, in welcher der Fokus auf der Beurteilung der Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Tiefenlager für BE/HAA/LMA liegt, richtet sich das Hauptaugenmerk auf die Opalinustonbarriere [siehe Abschnitt 1.3 in Nagra (2002a) sowie die umfassende geowissenschaftliche Informationsgrundlage im Geosynthese-Bericht, Nagra (2002b), in den Referenzberichten der Nagra (1995, 2001a, 2001c, 2001d, 2002f), und in Pearson (2002)]. Die Betonung des Opalinustons steht ebenfalls im Einklang mit dem erwarteten, ausgezeichneten Verhalten des Wirtgesteins als Radionuklid-Transportbarriere. In der jetzigen Projektphase ist es wichtig zu gewährleisten, dass die technischen Barrieren mit dem umliegenden Wirtgestein kompatibel sind. Gleichzeitig wird aber der Beitrag der technischen Barrieren zum Verhalten des Gesamtsystems ebenfalls untersucht, und einige Eigenschaften und Komponenten der technischen Barrieren werden als „Pfeiler der Sicherheit“ betrachtet (z.B. die Stabilität der BE/HAA-Abfallmatrizen im erwarteten Umfeld). Diese Fragestellungen sind Gegenstand der Kapitel 5-8 in Nagra (2002a) und Tab. 5.7-1 enthält für jede Komponente eine Übersicht der sicherheitsrelevanten Eigenschaften, Phänomene und Entwicklungen.

- 2) Verwendung einer kleinen Anzahl stilisierter Modelle (z.B. für das menschliche Eindringen und für die Biosphäre), in den Fällen, in denen Unsicherheiten bestehen, die in der Praxis nicht quantifiziert und vermindert werden können. Damit wird dieser Teil der Analyse vom Rest des Sicherheitsnachweises entkoppelt.**

Im Einklang mit dem internationalen Konsens über die Behandlung von weitgehend nicht reduzierbaren und nicht quantifizierbaren Ungewissheiten, wurden für die Behandlung zukünftiger Biosphären [S. 30-32 und Abschnitt 5.2.1 in Nagra (2002a)] und zukünftiger menschlicher Handlungen [S. 32-33 und Abschnitt 5.6 in Nagra (2002a)] stilisierte Ansätze verwendet. Diese dienen hauptsächlich dazu, die

Hauptteile der Analyse von denjenigen Teilen und Situationen zu entkoppeln, die von weitgehend unvorhersehbaren FEPs betroffen sind. Die Analyse enthält ebenfalls illustrierende Betrachtungen zu den Auswirkungen der Hebung auf die Lagerbedingungen nach Ablauf von mehreren Millionen Jahren [Nagra (2002a), Abschnitt 5.2.2.3, S. 122].

**3) Durch Betrachtung einer geeigneten Palette einhüllender Szenarien (wovon jedes eine Familie von Szenarien repräsentiert) für die Entwicklung des Systems.**

Die Fragestellung, ob eine ausreichende breite Palette an Szenarien/Rechenfällen vorliegt, wird mittels einer geeigneten Methodik für die Entwicklung des Sicherheitsnachweises angegangen (Nagra (2002a), Kapitel 3; insbesondere Abschnitte 3.4, 3.7.4 und 3.7.5). Die Klassifizierung eines jeden Szenariotyps ist im erwähnten Kapitel beschrieben. Eine Zusammenfassung ist in Nagra (2002a), Abschnitt 8.2.7, S. 328, zu finden. Eine Schlüsselkomponente dieser Methodik ist der FEP-Management-Prozess, siehe Nagra (2002d) und darin insbesondere Abschnitt 2.2. Das Ziel war, ein ausreichend breites Spektrum von Rechenfällen abzuleiten, das repräsentativ ist für alle realistischerweise denkbaren Möglichkeiten für die Eigenschaften und die Entwicklung des Systems (siehe z.B. Abschnitt 3.6.4 in Nagra (2002a), S. 49).

**4) Durch die Betrachtung alternativer konzeptueller Modelle.**

Alternative konzeptuelle Modelle wurden für wichtige Gebiete entwickelt, bei denen Ungewissheiten auf der konzeptuellen Ebene existieren, z.B. die zwei Auflösungsmodelle für BE (siehe auch Nagra (2002a), Tab. 6.8-2, Spalte 2 für andere Konzeptualisierungen). Dies steht im Einklang mit der in Kapitel 3 in Nagra (2002a), Abschnitt 3.4, S. 47 diskutierten Methodik. Appendix 9 in Nagra (2002d) vermittelt einen Überblick der Super-FEPs, die in der Analyse mit den entsprechenden alternativen Modellen und Rechenprogrammen berücksichtigt werden.

**5) Durch die Betrachtung von Ungewissheiten bzgl. der Parameter. Die sicherheitstechnische Bedeutung von Ungewissheiten in der Parametrisierung der Rechenmodelle bedarf einer Bewertung (z.B. durch Sensitivitätsanalyse und Analyse der Ungewissheiten, basierend auf deterministischen Verfahren oder durch probabilistische Stichprobeverfahren).**

Die Bedeutung der Ungewissheiten bzgl. der Parameter (Parameter-Sensitivität, analysiert sowohl durch deterministische als auch durch

probabilistische Analysen) wird in Kapitel 6 in Nagra (2002a) und auch in mehreren Rechenfällen [siehe Kapitel 7 in Nagra (2002a)] bewertet. Deterministische Analysen werden in Nagra (2002a) beschrieben, z.B. der Zeitpunkt des Behälterversagens (S. 216), die Grundwasserflussrate (S. 218-221), die  $K_d$ -Werte (Fig. 6.7-9, S. 223). Probabilistische Analysen werden ebenfalls beschrieben (Abschnitt 6.7.4, S. 226ff).

Zusätzlich werden die Auswirkungen der Ungewissheit bzgl. der Parameter auf die maximalen Dosisraten (summiert über alle Radionuklide) in Nagra (2002a) auf S. 316-318 zusammengefasst. Die Auswirkungen der Ungewissheiten bzgl. der Parameter werden auch mittels probabilistischer Berechnungen untersucht: für den Referenzfall (S. 267-268) sowie für die „was wäre wenn?“-Rechenfälle mit einer erhöhten Wasserflussrate (S. 295), mit einer transmissiven Diskontinuität (S. 299) und mit einer Ausbreitung einer Redoxfront im Nahfeld (S. 301).

Ungewissheiten bzgl. der Parameter und des Verständnisses werden in den Kapiteln 4 und 5 in Nagra (2002a) diskutiert.

Hinsichtlich der Ungewissheiten in den Parametern des Geodatensatzes: Referenz-Parameterwerte und alternative, pessimistische Parameterwerte des Geodatensatzes werden in Kapitel 9 in Nagra (2002b) zusammengefasst, einschliesslich der Argumentation und Begründung für deren Wahl. Die Ungewissheiten bzgl. des Opalinustons werden in diesem Bericht betrachtet, in der Form einer Diskussion der Daten (Referenzwerte, pessimistische Werte etc.), die – wie oben beschrieben – in die Sicherheitsanalyse einzubeziehen sind.

## **II.b. Verständnis bzgl. der sicherheitsrelevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEPs)**

### **1) Verständnis und Vollständigkeit der FEPs, die das Systemkonzept beschreiben**

Der FEP-Management-Prozess [siehe Nagra (2002d)] wurde wirksam eingesetzt (inkl. Vergleich mit den internationalen NEA FEP- und FEPCAT-Datenbanken), um zu gewährleisten, dass alle relevanten Prozesse und Phänomene in der vorliegenden Sicherheitsanalyse berücksichtigt wurden.

Das heutige Verständnis des Systems und seiner Entwicklung wird in den Kapiteln 4 und 5 in Nagra (2002a) zusammengefasst; die entsprechende Bewertung der Belastbarkeit („statement of confidence“) befindet sich im Kapitel 8 in Nagra 2002a, insbesondere im Abschnitt 8.2.6 und in Tab. 8.2-1. Unter Verwendung der im Kapitel 3 in Nagra (2002a) und detaillierter in Nagra (2002d) beschriebenen Methodik, wird diese

Information in Super-FEPs zerlegt. Die Vollständigkeit dieser Super-FEPs wird durch einen detaillierten Audit-Prozess mittels Vergleichen mit internationalen FEP-Datenbanken gewährleistet. Damit wird auch das Vertrauen in die Vollständigkeit der Bewertung des wissenschaftlichen Verständnisses gefördert.

Einige FEPs (nämlich die „Reserve-FEPs“) werden als potentiell günstig für die Sicherheit betrachtet, werden aber zum jetzigen Zeitpunkt nicht in die quantitativen Analysen einbezogen, sei es aus Mangel an geeigneten Daten, Verständnis oder Rechenprogrammen (z.B. Rahmengesteine, Ko-Präzipitation, [siehe Abschnitt 8.2.8.3 in Nagra (2002a)]. Die Reserve-FEPs könnten aber in einer späteren Projektphase aktiviert werden.

## **II.c. Verfügbarkeit der konzeptuellen und mathematischen Modelle sowie der Rechenwerkzeuge**

### **1) Formulierung konzeptueller Modelle für relevante Prozesse, deren Anwendbarkeit durch eine breite Palette an unabhängigen Argumenten gestützt wird.**

Das konzeptuelle Modell für den Opalinuston im Zürcher Weinland stützt sich auf mehrfache Argumentationsketten ab und wird in Nagra (2002b) präsentiert.

Die konzeptuellen Modelle beruhen auf dem aktuellen wissenschaftlichen Verständnis, das in den Kapiteln 4 und 5 in Nagra (2002a) sowie in den Referenzberichten zusammengefasst ist. Die Verwaltung der wissenschaftlichen Information (und deren Integration in die Sicherheitsanalyse) erfolgt im Rahmen des FEP-Management-Prozesses (Nagra 2002d, 2002e). Werden glaubwürdige, alternative konzeptuelle Modelle identifiziert, so werden diese in die Betrachtungen mit einbezogen. Im Falle des Geosphärentransports (einer der wichtigsten Prozesse) resultieren stark belastbare Hinweise aus der Beobachtung von Diffusionsprofilen natürlicher Wasserinhaltsstoffe und dem Fehlen von Wassereintrittsstellen auch aus Störzonen in Tunnels für Überdeckungen > 200 m. Ergänzende Argumente existieren auch für die technischen Barrieren (z.B. natürliche Analoga für die Auflösung von Glas und Brennstoff, für die Korrosion der Stahlbehälter und für die Stabilität von Bentonit). Steht kein geeignetes oder als relevant betrachtetes Rechenprogramm für die Behandlung von günstigen FEPs zur Verfügung, so werden diese als Reserve-FEPs betrachtet [siehe Nagra (2002d)].

**2) Verwendung von „angemessen“ konservativen Annahmen in der Sicherheitsanalyse, wo Ungewissheiten bestehen (und wo es möglich ist zu zeigen, dass die Annahmen tatsächlich konservativ sind).**

Das Verständnis der wichtigen Phänomene ist in den Kapiteln 4 und 5 in Nagra (2002a) dokumentiert. In den Berechnungen der Sicherheitsanalyse wird die Bewertung der Informationen dazu verwendet, angemessene Parameterwerte zu wählen: Im Falle von Ungewissheiten enthalten die Berechnungen pessimistische oder konservative Annahmen [vgl. Liste der Berechnungen in Tab. 6.8-2 in Nagra (2002a)]. Eine der konservativen Annahmen besteht darin, einige der für die Sicherheit günstigen FEPs absichtlich ausser Acht zu lassen [siehe Tab. 6.8-3 in Nagra (2002a)].

**3) Entwicklung geeigneter Analysemodelle und Parametrisierung.**

Für die Analysen wurde eine systematische und definierte Methode gewählt [S. 41 in Nagra (2002a)]. Dies schliesst ein systematisches Vorgehen bei der Beschaffung, Behandlung und Abstraktion von Informationen, bei der Behandlung von Ungewissheiten sowie bei der Entwicklung und Validierung von Modellen und Datensätzen ein. Die konzeptuellen Modelle und die Datensätze sind in den Kapiteln 3 bis 8 in Nagra (2002e) erschöpfend beschrieben. In allen wichtigen Gebieten wurden spezifische Tests durchgeführt, um sicherzustellen, dass die vereinfachten Modelle tatsächlich die detaillierteren Modelle in angemessener Weise repräsentieren [z.B. Vergleich des „Widerstands-Netzwerk“-Modells mit dem 3D-Hydromodell, siehe Nagra (2002e), S. 58/S.134; Vergleich des 2D-Transportmodells mit dem 1D-Transportmodell, siehe Nagra (2002e), Appendix 7].

Zusätzlich wird die Eignung der Modelle durch Vergleich mit unabhängigen Daten oder anderen Beobachtungen getestet (z.B. Diffusionsprofile für Geosphärentransport, mehrere Analoga für die technischen Barrieren, etc.).

**4) Verwendung von verifizierten Rechenprogrammen zur Lösung der Gleichungen der mathematischen Repräsentation der konzeptuellen Modelle (z.B. durch Vergleich mit analytischen Lösungen und mit unabhängigen Rechenprogrammen).**

Jedes der in der Sicherheitsanalyse verwendeten Rechenprogramme wurde vor seiner Anwendung durch Vergleich mit anderen Rechenprogrammen und/oder analytischen Lösungen verifiziert. Die durchgeführten Verifizierungsmassnahmen werden für jedes Rechenprogramm getrennt in Appendix 1 in Nagra (2002e) dokumentiert (siehe zum

Beispiel die S. A-28ff für SPENT, S. A-39ff für STRENG, S. A-46ff für STALLION, etc.). Der Quervergleich mit Super-FEPs wird in Appendix 9 in Nagra (2002d) dargelegt.

### **III. Zuverlässigkeit der Anwendung der Methoden, Modelle und Daten in der Sicherheitsanalyse [siehe Tabellen 6 und 7 in NEA (1999)]**

#### **1) Qualitätsrichtlinien für die durchgeführten Analysen, einschliesslich Review-Richtlinien.**

Der Einsatz einer so genannten Auditgruppe (engl. „Bias Audit Group“) ist ein integraler Bestandteil bei der Entwicklung des Sicherheitsnachweises, siehe Appendix 4 in Nagra (2002a). Es wurden Grundsätze für den Einsatz von Experten-Beurteilungen entwickelt, siehe Appendix 4, S. D-5 in Nagra (2002a). Protokolle der Sitzungen mit den beigezogenen Experten werden in der Projektdokumentation abgelegt [siehe Punkt 4 in Appendix 8 in Nagra (2002e); siehe auch Nagra (2003c)]. Reviews sind ein integraler Bestandteil der Qualitätssicherung. Es existiert ein Datenfreigabeverfahren. Diese Aspekte werden in den Punkten 3 und 5 des Appendix 8 in Nagra (2002e) und auch in Nagra (2003d) erwähnt.

#### **2) Verwendung von unabhängigen Argumenten (z.B. natürliche Analoga).**

Die Profile von natürlichen Wasserinhaltsstoffen grenzen die vertikalen advektiven Flüsse ein [Flüsse kleiner als  $3 \times 10^{-13}$  m/s, siehe Gimmi and Waber (2003)]. Das Fehlen von makroskopischen Hinweisen auf Wasserflüsse in Störungszonen in stark gefaltetem Opalinuston in Tunnels deutet darauf hin, dass Störungszonen nicht als bevorzugte Fliesspfade wirken, wenn die Überdeckung grösser als 200 m ist (Nagra (2002b), Abschnitt 5.8). Die beobachteten Überdrücke im Opalinuston in Benken weisen auf eine extrem tiefe Permeabilität (tiefer als diejenigen, die in hydraulischen Tests in Benken gemessen wurden) und/oder auf ein nicht-Darcy'sches Verhalten hin (Nagra (2002b), Abschnitt 6.3).

Ferner werden natürliche Analoga auf Komponenten der technischen Barrieren angewendet. Zum Beispiel werden Guss- und Baustähle seit über 1 000 Jahren verwendet; entsprechende Fundstücke geben Hinweise auf die Korrosionsraten solcher Materialien über eine Zeitdauer, die vergleichbar ist mit der erwarteten Lebensdauer der Behälter [siehe Abschnitt 5.7 in Nagra (2002a) sowie Johnson and King (2003)].

**3) Nachweis eines umfassenden Verständnisses der Resultate (z.B. durch Verwendung von vereinfachten Modellen für Schlüsselprozesse)**

Dies schliesst Vergleiche mit unabhängigen Argumenten ebenso ein wie die Verwendung von verschiedenen Modellen, von denen einige vereinfacht sind. So weisen die Modellierung der natürlichen Profile von Wasserinhaltsstoffen unter der Annahme von diffusionsdominiertem Transport und das Austesten verschiedener Annahmen in Bezug auf die Transporteigenschaften des Opalinustons durch vereinfachte Modelle zum Verständnisaufbau darauf hin, dass erwartet werden kann, dass der Radionuklidtransport im Opalinuston ebenfalls diffusionsdominiert ist [siehe Kapitel 4.2.5 und 6.7 in Nagra (2002a)]. Die auf der Annahme einer vollständigen Betondegradation basierenden Massenbilanzberechnungen und der kleine Anteil an Opalinuston, der mit dem Zementporenwasser reagiert, bestätigen, dass die betroffene Zone auf einige wenige Meter um die Tunnels herum begrenzt ist [siehe Abschnitt 5.4.4 auf S. 153 in Nagra (2002a)].

Generell trägt die Verwendung von Modellen zum Verständnisaufbau zum Systemverständnis bei [siehe S. 203 ff in Nagra (2002a) als Beispiel für eine Anwendung solcher Modelle auf Berechnungen zur Radionuklidfreisetzung].

**4) Anwendung eines schrittweisen Vorgehens bei der Lagererstellung.**

Das Schweizer Programm wendet ein schrittweises Vorgehen an (was sich auch in der Gesetzgebung widerspiegelt, die ein schrittweises Bewilligungsverfahren vorschreibt), siehe Nagra (2002a), Abschnitt 1.2.5, Fig. 1.2-3. Die Ziele einer schrittweisen Implementierung werden auch in den Abschnitten 2.4.5 und 2.6.3 in Nagra (2002a) diskutiert. Die Nagra weist explizit darauf hin, dass die vorliegende Sicherheitsanalyse als Diskussionsgrundlage und Richtschnur für zukünftige Projektphasen dient [siehe Abschnitt 9.5 in Nagra (2002a)].

**5) Etablierung einer „Sicherheitskultur“, d.h. ein konsistentes und konsequentes Vorgehen zur Erreichung von Sicherheit, das die Handlungen bei der Entwicklung des Tiefenlagers steuert.**

Im Appendix 4 in Nagra (2002a) definiert die Nagra die Rollen und Verantwortlichkeiten der Gruppen, die zum Sicherheitsnachweis beitragen. Die Nagra verfügt auch über ein QM-System [siehe Appendix 8 in Nagra (2002e)]. In den Präsentationen an das IRT hat die Nagra die Rolle von Experten beim Erzielen einer ausgewogenen und unvoreingenommenen Sicht auf die wissenschaftlichen Fragestellungen

und die Bedeutung einer angemessenen und unvoreingenommenen Integration des wissenschaftlichen Verständnisses in den Sicherheitsnachweis diskutiert und betont. Das Kapitel 2 in Nagra (2002a) präsentiert in klarer Form die sich auf die Sicherheitsanalyse beziehenden Grundsätze und Zielsetzungen. Die Nagra legte in den Diskussionen mit dem IRT ein offenes Verhalten an den Tag. Alle diese Aspekte stellen Beispiele für das Vorhandensein einer Sicherheitskultur in der Organisation dar.

**IV. Methoden zur Identifizierung und Verringerung von Ungewissheiten (in den drei Klassen von Ungewissheiten) im Rahmen der Analyse-möglichkeiten [siehe Tabelle 8 in NEA (1999)]**

**1) Ausrichtung der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf die Charakterisierung oder Verringerung von Ungewissheiten in den sicherheitsrelevanten Phänomenen.**

Eine Anzahl von Gebieten für die fortlaufende Programmfokussierung (einschliesslich zukünftiges Programm) werden auf S. 340 in Nagra (2002a) diskutiert. Die Nagra empfiehlt, dass die zukünftigen Arbeiten auf die Phänomene ausgerichtet sein sollten, die direkt mit den „Pfeilern der Sicherheit“ verknüpft sind. Wie während des Treffens mit dem IRT dargelegt, werden detaillierte Pläne für die Zukunft erst dann entwickelt, wenn die Erkenntnisse aus der technischen Review und der sozio-politischen Diskussionen zur Verfügung stehen.

**2) Expertenbefragung und Review. (Solche Methoden können beispielsweise zusätzlich Vertrauen aufbauen, dass geologische Störzonen nicht unentdeckt bleiben oder dass ein Eindringen von oxidierenden Wässern nicht auftritt.**

Expertenbefragungen und Reviews gelangten während des gesamten Projekts zum Einsatz, wie in Nagra (2002a), Appendix 4 und in Nagra (2002d) (z.B. Audits, Abschnitt 4 und 5) diskutiert. Die angewendeten Qualitätssicherungsmassnahmen sind in Nagra (2002e), Appendix 8, dargelegt. In den Präsentationen an das IRT erklärte und betonte die Nagra die Rolle der Expertenbefragungen und der Reviews. Die Resultate der Expertenbefragungen spiegeln sich in den in der Sicherheitsanalyse verwendeten Datensätzen und Rechenprogrammen wider.

Die Ungewissheiten bzgl. der Modelle wurden durch Expertenbefragungen bewertet. Die einbezogenen Experten wurden vor ihrem Einsatz über die von der Nagra angewandten, allgemeinen Grundsätze für das Expertenbefragungsverfahren unterrichtet [siehe Appendix 4, S. D-5 in

Nagra (2002a)]. Protokolle der Expertentreffen finden sich in der Projektdokumentation. Das Expertenbefragungsverfahren (z.B. standardisierte Fragen) war auch Gegenstand der Diskussionen während des Review-Treffens mit der NEA. Der Einsatz von externen Experten dient zwei Hauptzwecken, nämlich die Arbeiten der Nagra zu prüfen und das wissenschaftliche Verständnis, das in die Sicherheitsanalyse einfließt, zu entwickeln bzw. zu bestätigen, z.B. beim Screening von FEPs.

Ungewissheiten bzgl. der Parameterwerte in den Datensätzen (z.B. in geologischen Daten, geochemischen Daten, Inventaren, etc.) wurden durch Expertenbefragung bewertet.

**3) Einbezug der allgemeinen wissenschaftlichen und technischen Erfahrungen und der Literatur (theoretische und experimentelle Erfahrungen inner- und ausserhalb des Wissensgebietes über die radioaktiven Abfälle). (Allgemeine wissenschaftliche und technische Erfahrungen können beispielsweise dazu verwendet werden, Ungewissheiten über Sekundärprozesse, die den Radionuklidtransport beeinflussen, zu identifizieren.)**

Die allgemeine Literatur über Tongesteine betreffend Geochemie, Porosität und hydraulische Leitfähigkeit wurde ausgiebig verwendet zur Untermauerung des Verständnisses und der Modellentwicklung, siehe z.B. S. 81 in Nagra (2002a) und Kapitel 5 in Nagra (2002b). Es sei dazu auch auf die Referenzen im internen Bericht über den Gastransport in tonhaltigen Wirtgesteinen verwiesen (Nagra 2003a). Studien, die ausserhalb der Nagra durchgeführt wurden, spielten eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Behälterkorrosion [Johnson and King (2003)], in Löslichkeitsuntersuchungen (integriert in der thermodynamischen Nagra/PSI-Datenbank, die wiederum die Datenbank der NEA integriert) und in Sorptions-/Diffusionsmodellen [S. 147 ff, Nagra (2002a)]. Die Informationen und Daten liefern eine Grundlage, um die Ungewissheiten bzgl. der Modelle einzugrenzen. Die Informationen im Geosynthese-Bericht, der die auf mehrfachen Argumentationsketten basierenden Schlussfolgerungen präsentiert (Nagra 2002b), spielen eine Schlüsselrolle in der Sicherheitsanalyse.

Generell wurde die publizierte Literatur aus dem universitären Bereich, der Öl- und Gasindustrie und den angewandten technischen Geowissenschaften berücksichtigt, sofern sie zweckdienlich war [ausführliche Referenzliste in Nagra (2002b)]. Insbesondere werden die breiten Erfahrungen der Öl- und Gasindustrie in der 3D-Seismik und in der geophysikalischen Auswertung von Sondierbohrungen (Feldaktivitäten, Verfahrenstechnik, Auswertungswerkzeuge) in vollem Umfang

berücksichtigt [siehe Nagra (2001a, 2001c, 2001d)]. Die Erfahrungen von Experten aus der Öl- und Gas-Exploration [*Gasfrac*-Tests, Langzeitverhalten von tonhaltigen Deckgesteinen (*Cap Rocks*)] wurden ebenfalls genutzt [siehe Protokolle von Expertentreffen, sowie zahlreiche Referenzen in den Abschnitten 5.9 und 7.7 in Nagra (2002b)]. Experten aus dem universitären Bereich und solche mit breiten geotechnischen Erfahrungen im Umgang mit Untertagebauten nahmen an Audits und Reviews teil (siehe verschiedene Dokumente in der Projektdokumentation). Dies gilt auch für das Gebiet der Geochemie [siehe z.B. Referenzen in PSI-Berichten (Hummel and Berner (2002), Hummel *et al.* (2002)]. Behälteroptionen [siehe Johnson and King (2003)] wurden auch mit Hilfe umfangreicher Referenzen bewertet, insbesondere basierend auf den technischen Erfahrungen anderer Forscher (z.B. Kupferbehälter-Studien in Schweden und Finnland).

**4) Verwendung eines strukturierten Vorgehens bei der Systembeschreibung. (Beispielsweise können, um möglichst vollständig zu sein, Prozesse und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemelementen durch den Einsatz von „Wechselwirkungs-Matrizen“ systematisch erfasst werden).**

Eine strukturierte Systembeschreibung ist in den Kapiteln 4 und 5 in Nagra (2002a) enthalten. Die Systematik für den Einbau von Ungewissheiten in FEPs und Super-FEPs wird in Nagra (2002d) vermittelt, insbesondere in den Tab. 4.2-1 und A5.4.1. Zu beachten ist hingegen auch das zweigleisige Vorgehen der Nagra bei der Entwicklung einer Systembeschreibung mittels sicherheitsrelevanter Schlüsselphänomene (Nagra (2002a), Kapitel 4 und 5, insbesondere Tab. 5.7-1 und Fig. 5.7-1) und, auf der anderen Seite, der Systembeschreibung mittels Super-FEPs, siehe Tab. 6.8-1 in Nagra (2002a) und Nagra (2002d). Der FEP-Management-Prozess [siehe Nagra (2002d)] wird als „Buchhaltungsinstrument“ zur Gewährleistung der Vollständigkeit sowie der sauberen Behandlung von FEPs und FEP-Wechselwirkungen verwendet. Die Wechselwirkungen der FEPs werden ausgewiesen [siehe Appendix A5.4 in Nagra (2002d) mit der umfangreichen Tabelle A5.4.1, in der die Wechselwirkungen systematisch auf ihre Relevanz und auf ihre Berücksichtigung in Rechenfällen überprüft werden].

**5) Identifizierung einer Anzahl konzeptueller Modelle, die mit den verfügbaren Informationen im Einklang stehen, und Vergleich der Resultate der verschiedenen konzeptuellen Modelle zwecks Bewertung der Konsequenzen der Ungewissheiten.**

Verschiedene alternative konzeptuelle Modelle sind in Tab. 6.8-2 auf S. 250 in Nagra (2002a), gestützt auf Nagra (2002e), zusammengefasst. Diese ergeben sich aus der Identifizierung der verschiedenen möglichen Systementwicklungen, die zu unterschiedlichen Pfaden oder Mechanismen der Radionuklidfreisetzung führen.

**6) Verwendung von natürlichen Analoga.**

Natürliche Analoga werden vielfach benutzt zur Stützung des Verständnisses und der Modellentwicklung sowie zur Eingrenzung von Ungewissheiten in vielen wichtigen Gebieten, beispielsweise für den Opalinuston [S. 167, Nagra (2002a)], die begrenzte Eindringtiefe der Hoch-pH-Fahne in gering durchlässigen Gesteinen [Nagra (2002b), S. 485-486], die Stahlkorrosion (Fig. 5, S. 25, Johnson and King (2003); S. 168, Nagra (2002a)], die Brennstoffauflösung [S. 15, Johnson and Smith (2000); S. 168, Nagra 2002a], die Radionuklidlöslichkeiten (S. 169, Nagra (2002a)) und das Bentonitverhalten [S. 167, Nagra (2002a)]. Tab. 8.2-1 in Nagra (2002a) fasst alle Argumente zusammen, einschliesslich Hinweise von natürlichen Analoga.

**7) Untersuchung des früheren Verhaltens ähnlicher Gesteinsformationen.**

Die Untersuchung des früheren Verhaltens ähnlicher Gesteinsformationen sowie des Opalinustons in anderen Gebieten fliesst in die Beckenmodellierung [Versenkungs- und Temperaturgeschichte; Nagra (2002a), Fig. 4.2-3; Nagra (2002b), Abschnitt 3.3; Nagra (2002f) und Leu *et al.* (2001)] sowie in den Vergleich der kritischen Parameter von Tongesteinen mit unterschiedlichem Reifegrad ein [siehe S. 81 und insbesondere Fig. 4.2-11 in Nagra (2002a)].

**8) Grossmasstäbliche Versuche im Feld und im Felslabor.**

Ein grossskaliger Tunnelauffahrtstest (*mine-by-Test*) wurde im Felslabor Mont Terri mit dem Ziel durchgeführt, hydromechanische Modelle, welche die Kurzzeit-Entwicklung von Untertagebauten vorhersagen, zu überprüfen [Martin and Lanyon (2002)]. Versuche im Felslabor Mont Terri, die mehrere Bohrungen einbeziehen, schränken die Ungewissheiten bzgl. der Modelle und Parameterwerte zum Gastransport und zur Gaskluft-Selbstabdichtung ein [Marschall *et al.* (2003), Enachescu *et al.*

(2002)]. Für den Radionuklidtransport sind sowohl die Migrationsexperimente im Felslabor Mont Terri als auch die Messungen der Konzentrationsprofile natürlicher Wasserinhaltsstoffe relevant (Benken, Mont Terri; [siehe Nagra (2002b), Abschnitt 5.10]).

## **9) Internationale Zusammenarbeit.**

Die Nagra beteiligt sich seit vielen Jahren aktiv an Projekten der internationalen Zusammenarbeit, was auch im Sicherheitsnachweis zum Ausdruck kommt. Die Nagra nahm an einer Reihe von entsprechenden Projekten teil, einschliesslich GAMBIT [integriert im internen Nagra-Bericht zum Gastransport, Nagra (2003a)]; Clay Club; bilateraler Austausch mit der ANDRA [z.B. Diffusionsdaten, siehe S. 81 in Nagra (2002a)]; EU GLASTAB (Teilnahme der Nagra und des PSI und Beitrag zum Thema Glasauflösungsdaten); EU SFS (Stabilität der Matrix bei abgebrannten Brennelementen – die Nagra trägt zur IRF-Modellentwicklung bei und bezieht Daten aus den Matrixauflösungs-Experimenten anderer Mitglieder). Es fand ein breiter Austausch mit Wissenschaftlern statt, deren Kompetenzen ausserhalb des Fachgebiets des Abfallmanagements liegen, insbesondere in den Fachgebieten Hydrogeologie (einschliesslich Gasmigration) und geologische Langzeitentwicklung. Die Mitwirkung der Nagra bei der Entwicklung der FEPCAT-Datenbank ist anerkannt und diese Datenbank wurde im gesamten FEP-Management-Prozess und bei Quervergleichen berücksichtigt.

Die internationale Zusammenarbeit hat wesentliche Elemente geliefert, die sich in Beiträgen zur Modellentwicklung und zur Bewertung von Ungewissheiten in Modellen und Daten niederschlagen. Die Bewertung von internationalen Daten und Parameterwerten aus anderen Programmen findet in den folgenden Gebieten Verwendung: Geochemie [Nagra (2002a)], geologische Eigenschaften [Geosynthese, Permeabilität, Diffusion, siehe Nagra (2002b)] und technische Barrieren [z.B. Brennstoffauflösung, Glasauflösung, etc., siehe Kapitel 5 in Nagra (2002a)]. Für spezifische Themen sei auf Nagra (2002a) verwiesen: Gasfreisetzung durch Bentonit (S. 131); Nahfeld-Geochemie (S. 134); Bentonitstabilität (S. 138); Brennstoffauflösung (S. 142); Radionuklidrückhaltung (S. 145 ff), etc.

**10) Identifizierung kritischer, sicherheitsrelevanter Parameter (durch Sensitivitätsanalyse und Analyse der Ungewissheiten) und Verringerung der Ungewissheiten bzgl. dieser Parameter durch Standortcharakterisierung und experimentelle Programme.**

Sicherheitsrelevante Parameter werden durch Sensitivitätsanalysen im Kapitel 6 in Nagra (2002a) und im Referenzbericht Nagra (2002e) identifiziert. Die Bedeutung der Ungewissheiten wird in der Tab. 6.8-1 in Nagra (2002a) zusammengefasst. Die Schwerpunkte der zukünftigen Planung und der experimentellen Forschung werden auf S. 340 in Nagra (2002a) diskutiert. Diese werden aber nach Vorliegen der Resultate der technischen Review und der sozio-politischen Diskussion in einem detaillierteren Plan zu vertiefen sein.

**11) Entwicklung mechanistischer Modelle für die Extrapolation von Labormessungen auf *in situ* Bedingungen.**

Mechanistische Modelle wurden für die Interpretation und Extrapolation von Labordaten und Feldversuchen in vielen Gebieten abgeleitet, in denen die Ungewissheiten bzgl. der Parameterwerte bewertet wurden. Dies schliesst ein: Brennstoffauflösung [IRF als Funktion des Abbrands – S. 17-19, Johnson and McGinnes (2002)]; Brennstoffauflöserate als Funktion des Abbrands [S. 28, Johnson and Smith (2000)]; Stahlkorrosionsrate [S. 26, Johnson and King (2003)]; Glasauflösung [S. 143-144 in Nagra (2002a) und Curti (2003)]; Diffusions- und Sorptionsmodelle [S. 144 ff in Nagra (2002a); für Details siehe Bradbury and Baeyens (2002)].

## ANHANG 2:

### **AUSZUG AUS DEM PFLICHTENHEFT BEZÜGLICH UMFANG UND ZIELE DER EXPERTENPRÜFUNG**

Die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen, hochaktiven und langlebigen Abfällen wird weithin auf internationaler Ebene diskutiert. Internationale Expertenprüfungen von nationalen Projekten haben sich als sehr wertvoll erwiesen. Deshalb möchten die zuständigen Schweizer Behörden ihre Bewertung der Arbeit der Nagra mit einer internationalen Expertenprüfung ergänzen. Die Schweiz, vertreten durch das Bundesamt für Energie (BFE), hat folglich die NEA ersucht, im Laufe des Jahres 2003 eine solche Expertenprüfung durchzuführen. Die NEA hat dem Ersuchen der Schweiz stattgegeben und eine internationale Expertenprüfung organisiert.

#### **Umfang**

Gegenstand der Expertenprüfung ist die Langzeitsicherheitsanalyse, wie sie im Sicherheitsbericht der Nagra NTB 02-05 enthalten ist. Der Sicherheitsbericht dokumentiert die Methodik, die Durchführung und die Resultate der sicherheitstechnischen Bewertung des Referenz-Lagersystems.

Soweit Informationen aus den Berichten zur Geosynthese (NTB 02-03) und zum Anlagen- und Betriebskonzept (NTB 02-02) als Grundlagen für einzelne Aspekte des Sicherheitsnachweises, dokumentiert in NTB 02-05, herangezogen werden, kann sich eine Überprüfung von Teilen dieser beiden Berichte als notwendig erweisen.

Soweit nötig erstreckt sich der Umfang der Expertenprüfung auch auf andere Dokumente, auf die sich der Sicherheitsbericht stützt und die sicherheitsrelevante Aspekte der technischen und natürlichen Barrieren behandeln.

## **Ziele**

Das Hauptziel der Expertenprüfung besteht in einer unabhängigen Bewertung der Qualität der Langzeitsicherheitsanalyse der Nagra aus internationaler Sicht. Die Bewertung soll auf internationalen Standards und Vorgehensweisen in diesem Gebiet beruhen.

Es wird erwartet, dass die Expertenprüfung technisch orientiert ist und eine kritische Analyse der folgenden Aspekte umfasst:

- Die allgemeine Strategie für den Nachweis der Langzeitsicherheit.
- Die Rolle und die Gewichtung der Sicherheitsfunktionen der einzelnen Barrieren.
- Die Methodik, die für die Sicherheitsanalyse verwendet wird.
- Die wissenschaftliche Basis für die Modellierung der Prozesse und Barrierenfunktionen.
- Die Vollständigkeit der Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse, welche die Entwicklung des Lagersystems beeinflussen.
- Die umfassende Ableitung der Szenarien und die Auswahl der zu untersuchenden Rechenfälle,
- Die Behandlung der Ungewissheiten bzgl. Daten und Modelle.

Dem IRT ist es freigestellt, weitere Aspekte zu kommentieren, falls sich solche als wichtig erweisen sollten.

Erwartet werden Empfehlungen für spezifische Verbesserungen, die dem Nachweis der Sicherheit für geologische Tiefenlager zugute kommen würden.

Die Expertenprüfung sollte ein breites Spektrum von Aussagen ergeben, welche die zuständigen Schweizer Behörden für ihre eigene Beurteilung des Sicherheitsnachweises in Erwägung ziehen können.

### ANHANG 3:

#### MITGLIEDER DER INTERNATIONALEN EXPERTENGRUPPE (IRT)

##### **Colin J. Allan (Präsident der Allan Enterprises, Kanada) – Vorsitzender des IRT**

Colin Allan erwarb an der Universität von Manitoba mit Ehreenauszeichnung den Titel eines Bachelor of Science (B.Sc.) in Mathematik und Physik sowie jenen eines *Doctor of Philosophy* (Ph.D.) in Nuklearphysik. 1972 trat er in die Dienste der *Atomic Energy of Canada Ltd.* (AECL), für die er bis zum Eintritt in den Ruhestand im November 2002 für über 30 Jahre lang tätig war. Bei AECL arbeitete er auf verschiedenen technischen Gebieten, darunter die Sicherheit von Schwerwasseranlagen, Reaktorinstrumentierung, industrielle Anwendungen von Strahlung und Tomographie, industrielle Beschleuniger, Entwicklung von Reaktoren, Produktion und Aufbereitung von Schwerwasser, Entsorgung radioaktiver Abfälle und die Stilllegung von Kernanlagen. Bei seinem Rücktritt war er bei der AECL als General Manager zuständig für Stilllegung und Entsorgung. In dieser Stellung war er verantwortlich für die Tätigkeiten der AECL in der geologischen Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen; für das Büro für die Entsorgung von schwachradioaktiven Abfällen, das für die Sanierung alter Lagerstandorte zuständig ist, die unter der Verantwortung der kanadischen Bundesregierung stehen. Ausserdem wachte er über die Stilllegung von nuklearen Anlagen und die Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle, für die die AECL verantwortlich ist; Projekte für eine verbesserte Entsorgung sowie Ingenieur- und Projektdienstleistungen in den *Chalk River Laboratories*. Von 1991 bis 1997 war er als Senior Manager verantwortlich für das kanadische Programm für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, welches das Konzept für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle im plutonischen Gestein des Kanadischen Schilds entwickelte. Dieses Projekt wurde dann einer umfassenden Umweltverträglichkeitsprüfung unterzogen, welche eine gründliche wissenschaftliche Sicherheitsbewertung des Konzepts umfasste und zum Schluss kam, dass aus technischer Sicht und für die aktuelle Konzeptphase die Sicherheit des AECL-Konzepts allgemein ausreichend nachgewiesen wurde.

Colin Allan war resp. ist Mitglied vieler nationaler und internationaler Ausschüsse. Zu diesen zählen: *Bureau of the Radioactive Waste Management Committee* der OECD-NEA; *Radioactive Waste Safety Standards Advisory Committee* (WASSAC); *International Safety Advisory Group* (INSAG); *International Waste Management Advisory Committee* (INWAC); *International Radioactive Waste Technical Committee* (WATEC); *Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal* der IAEA; *Board on Radioactive Waste Management* der U.S. National Academy of Sciences; *Economic Innovation Technology Council of Manitoba* und das dazu gehörende *Standing Committee on Science and Technology*; *Conseil d'administration du Centre canadien de fusion magnétique*; und, als Vorsitzender, *Steering Committee of the Canadian Fusion Fuels Technology Programme*. Seit kurzem arbeitet Dr. Allan zudem am *IAEA International Project on Innovative Reactors and Fuel Cycles (INPRO)* mit, um den Schlussbericht der ersten Phase dieses Projekts zu verfassen.

#### **Johan Andersson (JA Streamflow, Schweden)**

Johan Andersson ist Diplomingenieur in technischer Physik, Doktor der Wasserbautechnik und Doktor der Hydraulik. Seit 1999 ist er Privatdozent für Ingenieurgeologie am Chalmers Institute of Technology. Nach vier Jahren postdoktoraler Forschung auf dem Gebiet der Fluss- und Transportmodellierung in porösem Medien und im Kristallingestein verbrachte er sechs Jahre beim Schwedischen Kernenergie-Inspektorat (SKI). Dort leitete er u.a. die integrierten Sicherheitsanalyse-Projekte des Inspektorats und überprüfte in leitender Stellung die Forschungsprogramme der Industrie. Er war Projektmanager der SKI Sicherheitsanalysen Project-90 und SITE-94. Seit 1995 arbeitet er als selbständiger Berater. In dieser Funktion war er eng beteiligt an der SKB SR 97-Sicherheitsanalyse, für die er alle notwendigen Daten für die Konsequenzenanalyse zusammentrug, war als Geosphären-Experte tätig und führte interne Expertenprüfungen durch. Zudem half er der SKB bei der Planung des nunmehr laufenden Standort-Charakterisierungsprogramms. Während seiner Zeit bei der SKI war er Mitglied der *Core Group of the Performance Assessment Advisory Group* (PAAG) der OECD/NEA. Später arbeitete er als Berater der OECD/NEA an deren IPAG-Programm mit.

Johan Andersson ist Präsident der JA Streamflow AB, Schweden. Er bietet allgemeine Beratungen an für Projekte im Zusammenhang mit der Entwicklung und der Sicherheitsanalyse im Bereich der Lagerung radioaktiver Abfälle und anderer Anlagen mit Auswirkungen auf die Umwelt. Johan Andersson wirkt gegenwärtig bei Standortbewertungen der SKB mit, die im Zusammenhang stehen mit der laufenden Standortcharakterisierung und der

dazugehörenden Sicherheitsanalyse und der Planung der technischen Auslegung. Er hat mitgeholfen, als es darum ging, die Sicherheitsanalyse für das Lager für Betriebsabfälle (SFR) auf den neusten Stand zu bringen. Er redigierte den Posiva *ONKALO Underground Characterisation and Research Plan* und leitet nun die Arbeitsgruppe für integrierte Modellierung für ONKALO. Er ist ein Mitglied des Internationalen Beratungskomitees (ITAC) für die NUMO, der Agentur für nukleare Entsorgung in Japan. Er erbringt ausserdem Dienstleistungen für die OECD/NEA, das Schwedische Kernenergie-Inspektorat, das Bundesamt für Strahlenschutz in Deutschland und die Eisenbahnbehörde in Schweden.

#### **Ann Dierckx (NIRAS/ONDRAF, Belgien)**

Ann Dierckx hat ihre Studien an der *Katholieke Universiteit Leuven*, Belgien, als Ingenieurin für Chemie und Agrarindustrie und mit dem Dokortitel in Agrarwissenschaft abgeschlossen. Ihre Doktorarbeit befasste sich mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle und entstand innerhalb des Projekts *Mirage* (Migration von Radionukliden in der Geosphäre) der Europäischen Kommission.

1995 trat sie in die Dienste des belgischen Nuklearforschungszentrums in Mol. Sie arbeitete dort vorerst als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Erforschung des Einflusses organischer Materie auf die Mobilität der Radionuklide. Später wurde sie Projektleiterin für die Forschung und Entwicklung des Verhaltens von Radionukliden in Tongesteinen. Sie war verantwortlich für die allgemeine wissenschaftliche Koordination des von der EU unterstützten Projekts TRANCOM-Clay über die Rolle organischer Materie beim Transport von Radionukliden.

Im Jahr 2000 wechselte sie zur belgischen Agentur für radioaktive Abfälle und angereicherte spaltbare Materialien (NIRAS/ONDRAF). Im Programm für die Entsorgung von hochaktiven Abfällen ist sie vor allem zuständig für geochemische Fragen, Rückhalteprozesse, Migrationsstudien im Boom Clay und geochemische Aspekte des Nahfelds. Sie stellt ebenfalls die wissenschaftliche Koordination des Arbeitsprogramms für schwachaktive Abfälle sicher und koordiniert die Tätigkeiten der NIRAS bei der Sanierung von mit Radium kontaminierten Standorten. Sie ist beteiligt an mehreren internationalen Aktivitäten der Europäischen Union, der IAEA, der NEA, und ist Mitglied des *Management Board* der NEA-Projekte TDB III und Sorption II.

### **Des Levins (Selbständiger Berater für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, Australien)**

Des Levins hat an der Universität von Sydney die Titel *Bachelor of Engineering* (B.E.) und *Doctor of Philosophy* (Ph.D.) in technischer Chemie erworben. Von 1969 bis 1999 arbeitete er für die Australische Nuklearwissenschaft und -technologie-Organisation (ANSTO) und ihre Vorgängerin, die Australische Atomenergie-Kommission (AAEC). Er verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung auf den Gebieten der nuklearen Entsorgung und der Umweltaspekte des nuklearen Kernbrennstoffkreislaufs. Er hat umfassende Forschungen über die chemische Dauerhaftigkeit von hochaktiven Abfallmatrizen und über die Auswirkungen der Uranförderung und -verarbeitung auf die Umwelt durchgeführt.

Von 1972-1975 war er Gastwissenschaftler am *Oak Ridge National Laboratory*, Tennessee, wo er Forschungsarbeiten zur Produktion von transuranschen Elementen und zur Behandlung von radioaktiven Abfällen durchführte.

Bei ANSTO erfüllte er verschiedene Funktionen, darunter Chef der technischen Sektion für Chemie und Abfall, Leiter für Abfallbehandlung und Technologieentwicklung sowie Direktor des Aktionsprogramms für Abfallentsorgung der ANSTO.

Er war Mitglied von mehreren Komitees der IAEA und der NEA. Er war der australische wissenschaftliche Leiter im Rahmen des koordinierten Forschungsprogramms der IAEA über das Verhalten verfestigter hochaktiver Abfallmatrizen und technischer Barrieren unter Lagerbedingungen.

Von 1996-1998 wirkte er an einer internationalen Studie der IAEA mit, welche die radiologische Situation der Atolle Mururoa und Fangataufa in Französisch Polynesien untersuchte. Dr. Levins war verantwortlich für die Koordination der wissenschaftlichen Bewertung der Langzeit-Freisetzung von Radionukliden aus den unterirdischen Hohlräumen, in denen Atomversuche durchgeführt wurden.

Im Jahr 2001 war er Mitglied einer NEA/IAEA-Expertengruppe, die eine internationale Expertenprüfung der *Total System Performance*-Studie zum geplanten Tiefenlager für hochaktive Abfälle in Yucca Mountain, Nevada, für das USDOE durchführte.

Im Jahr 2002 verfasste Dr. Levins für die IAEA einen Bericht über den Stand der radioaktiven Entsorgung in Ostasien und im pazifischen Raum.

### **Zoltan Nagy (PURAM, Ungarn)**

Zoltan Nagy schloss seine Studien an der *Eötvös-Lorand-Universität* in Budapest als Diplom-Geophysiker (1972) und zusätzlich als Diplom-Geologe (1979) ab.

Nach dem Studium nahm er anfangs als Geophysiker, später als Geologe an der Erforschung der Uranerzlagerstätten in Ungarn teil. Sein Fachgebiet war die Erforschung sowohl oberflächennaher wie auch tiefliegender Uranerze in Sediment-Formationen.

Seit 1993 arbeitet er am Projekt zur sicheren Endlagerung langlebiger und hochradioaktiver Abfälle in Ungarn mit. Im Rahmen dieses Programms führten die kanadische AECL und die ungarische MECSEK in einem Felslabor in 1 100 m Tiefe in der Boda- Tonsteinformation *in situ*-Untersuchungen durch. Das Ziel dieses Projekts war die eingehende Untersuchung dieser Gesteinsformation.

Nach der Schliessung des Felslabors setzte er seine Tätigkeit bei der Stilllegung und der Sanierung der Uranerzbergwerke, der Erzverarbeitungsanlagen und Abraumhalden in Ungarn fort.

Zurzeit ist Zoltan Nagy leitender Geologe der Gesellschaft für die Entsorgung radioaktiver Abfälle in Ungarn (PURAM). Er ist hier verantwortlich für die Koordination der Forschung im Hinblick auf die sichere Endlagerung von:

- schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in granitischen Gesteinen, und
- hochradioaktiven und langlebigen Abfällen und abgebrannten Brennelementen in der Boda-Tonsteinformation.

Zoltan Nagy verfügt darüber hinaus über weitreichende Erfahrungen auf dem Gebiet der Geomathematik, der Sicherung der Datenqualität und in der Planung und Entwicklung von relationalen Datenbanken für wissenschaftliche Informationssysteme.

### **Claudio Pescatore (OECD/NEA)**

Claudio Pescatore hat an der Universität von Illinois, *Urbana-Champaign* (USA), den Titel eines *Doctor of Philosophy* (Ph.D.) in Nukleartechnik erworben. Er verfügt über mehr als 25 Jahre Erfahrung in der nuklearen Entsorgung und der Forschung auf den Gebieten der Lagerung und Entsorgung von schwach- und hochaktiven Abfällen sowie von abgebrannten Brennelementen.

Claudio Pescatore trat 1982 in die Dienste des *Brookhaven National Laboratory*, wo er sich an Studien beteiligte, die Entsorgungskonzepte für hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente in Basalt-, Salz- und Tuff-Formationen zum Gegenstand hatten. Seine Arbeiten umfasste Zuverlässigkeits- und Modellstudien zum Verhalten von Abfallgebundematerial während der Lagerung und der Entsorgung, die Analyse des Gas- und Grundwasserpflads für die Migration von Radionukliden und Expertenprüfungen von Umweltverträglichkeitsstudien und Plänen für die Standortcharakterisierung. In Brookhaven war er Gruppenchef für Sicherheitsanalysen auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung. Bis 1995 war er auch Assistenz-Professor für Meeresumweltwissenschaft an der Universität von New York in Stony Brook.

Claudio Pescatore kam 1992 zur OECD/NEA in die Abteilung für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen und Strahlenschutz, wo er stellvertretender Leiter der Abteilung Entsorgung von radioaktiven Abfällen ist. Er stand im Zentrum einer Reihe von internationalen Vorhaben, wie die IPAG-Studien, die Zusammenstellung der NEA-Arbeitsgruppe für den Entsorgungsnachweis (IGSC), das *Forum on Stakeholder Confidence* (FSC) und die Arbeitsgruppe für Stilllegung (WPDD). Er ist Mitautor mehrerer NEA-Berichte über den Stand und die aktuellen Schwerpunkte der Entsorgung radioaktiver Abfälle weltweit. Insbesondere ist er Mitautor des NEA-Berichts zur Vertrauensbildung, der eine zentrale Rolle spielte bei der Definition des modernen Konzepts eines Sicherheitsnachweises. Er führt das technische Sekretariat für mehrere NEA-Komitees, deren Arbeit sowohl strategisch wie technisch ausgerichtet ist: das Komitee für radioaktive Entsorgung (RWMC), das RWMC-Forum für Aufsichtsbehörden, das WPDD und das FSC.

Claudio Pescatore organisierte für die NEA zahlreiche internationale Expertenprüfungen, die nationale Sicherheitsanalysen zum Gegenstand hatten und in denen er auch selbst mitarbeitete. Zu diesen zählen: *Project-90* der SKI (Schweden), die Umweltverträglichkeitsstudie der AECL zur Entsorgung der abgebrannten Brennelemente in Kanada, die Sicherheitsanalyse für das amerikanische WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*) von 1996, Projekt SITE-94 der SKI (Schweden), die Nirex-Methodik zur Entwicklung von Szenarien und konzeptuellen Modellen (Vereinigtes Königreich), das Projekt H-12 der JNC zur Schaffung der technischen Basis für die HAA-Entsorgung in Japan, die schwedische SR97-Studie der SKB, der SAFIR2-Bericht der belgischen Agentur für radioaktive Abfälle und angereicherte spaltbare Materialien (NIRAS/ONDRAF) und das *Dossier 2001* für Tongesteine der französischen Nationalen Behörde für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (Andra).

### **Frédéric Plas (Andra, Frankreich)**

Frédéric Plas hat die Schule für angewandte und technische Geologie am Nationalen Polytechnischen Institut von Nancy als Bauingenieur abgeschlossen. Er verfügt auch über den Abschluss eines Masters in Hydraulik und Mechanik.

Seine Karriere begann er 1985 am *Commissariat à l'Énergie Atomique* im Forschungslabor für das thermische, hydraulische, mechanische und chemische Verhalten von Tonen und technischen Materialien im Rahmen von Machbarkeitsstudien für geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle. Auf diesem Gebiet war er in mehreren europäischen Forschungsprojekten tätig, entweder als Teilnehmer oder als Koordinator.

Frédéric Plas wechselte in den frühen 1990er Jahren zur französischen Nationalen Behörde für die Entsorgung radioaktiver Abfälle (Andra), um sich der Auslegung und dem phänomenologischen Verhalten von technischen Barrieren zu widmen. Von 1996 bis 2001 war er Leiter der Abteilung Materialien (die auch für Abfallbegebende zuständig ist) und arbeitete am *Dossier 2001* der Andra über die Machbarkeit der Lagerung von hochaktiven Abfällen, abgebrannten Brennelementen und mittelaktiven Abfällen in einer tiefen Tonformation mit. Seit 1999 bildet er an der Nationalen Schule für Chemie-Ingenieure (Universität von Paris) auf dem Gebiet der technischen Materialien und ihrer Verwendung für die Entsorgung radioaktiver Abfälle Studenten aus.

Während zweier Jahre war er in der Abteilung Sicherheitsanalysen verantwortlich für die Konzeptualisierung von Szenarien. Dabei widmete er sich besonders der Entwicklung von phänomenologischen und mathematischen Modellen für die Sicherheitsanalyse von Abfalllagern.

Seit 2000 hat sich Frédéric Plas an vielen Tätigkeiten der Integrationsgruppe für den Sicherheitsnachweis (IGSC) der Kernenergiebehörde der OECD (NEA) beteiligt. Speziell ist er Mitglied des Steuerungsausschusses des IGSC-EBS-Projekts, das sich mit dem System der technischen Barrieren befasst.

### **Richard Storck (GRS, Deutschland)**

Richard Storck hat die Technische Universität Berlin als Dipl. Ing. für Kerntechnik abgeschlossen. An derselben Universität erwarb er den Titel eines Dr. Ing. mit seiner Arbeit über die Methodik für probabilistische Sicherheitsbewertungen von technischen Anlagen. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Berlin arbeitete er danach während vier

Jahren am ersten deutschen Projekt für die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle in Salzformationen (PSE).

Er setzte seine Arbeit als Gruppen- und Projektmanager am GFS-Forschungszentrum in Braunschweig fort. Er wirkte mit an den Sicherheitsanalysen der Europäischen Gemeinschaft für hochaktive Abfälle (PAGIS), schwachaktive Abfälle (PACOMA) und abgebrannte Brennelemente (SPA). Für die deutschen Entsorgungsprojekte leitete er die Sicherheitsanalysen für die Schachanlage Konrad als Endlager für nicht-wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und für die Entwicklung und Demonstration von Methoden für die Sicherheitsbewertung des geplanten Lagers für alle Abfallarten am Standort Gorleben.

Im Jahre 1995 wurde die Forschungstätigkeit betreffend radioaktive Abfälle von der GSF an die GRS übertragen. Er wurde zum Leiter der Abteilung Sicherheitsanalyse ernannt. Diese Abteilung ist verantwortlich für die Entwicklung und Anwendung von Werkzeugen der Sicherheitsanalyse für die Entsorgung radioaktiver und chemischer Abfälle. In den letzten Jahren befasste sich die Abteilung vor allem mit der Entwicklung des Sicherheitsnachweises für die Verfüllung und Versiegelung des Endlagers für schwachaktive Abfälle in Morsleben. Er ist seit 1988 Mitglied der OECD/NEA Beratungsgruppe für Sicherheitsanalysen und die ihr nachfolgende Integrationsgruppe für den Sicherheitsnachweis.

#### **Sylvie Voinis (OECD/NEA)**

Sylvie Voinis hat ihre Studien an der ENSCT (*École Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse*) als Chemie-Ingenieurin abgeschlossen. Nach einigen Jahren in der Polymer-Forschung bei Philips wechselte sie in die Abteilung Sicherheitsanalysen der Andra (französische Nationale Behörde für die Entsorgung radioaktiver Abfälle). Sie verfügt über mehr als 15 Jahre Erfahrung auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung und der Forschung auf den Gebieten der Lagerung von schwach- und hochaktiven Abfällen sowie von abgebrannten Brennelementen.

Bei der Andra begann sie mit Arbeiten zum Quellterm und zum Nahfeld. Dann befasste sie sich mit verschiedenen Aspekten der nuklearen Entsorgung, besonders der Sicherheit. Während ihrer Zeit bei der Andra wirkte sie mit bei der Entwicklung von Methoden für die Sicherheitsanalyse und für andere Projekte, darunter Funktionsanalysen und qualitative Sicherheitsanalysen. Sie wurde Leiterin der Gruppe für Methoden für die Sicherheitsanalyse, welche

sowohl für die oberflächennahe wie auch für die geologische Tiefenlagerung zuständig war. Sie war auch Vorsitzende des ISAM-Projekts der IAEA.

Sylvie Voinis trat im Jahr 2000 in den Dienst der NEA, wo sie als wissenschaftliche Referentin für die Koordination der Tätigkeiten der IGSC (Integrationsgruppe für den Sicherheitsnachweis) und des Clay Club zuständig ist. Sie hat bei der Abfassung und der Publikation verschiedener technischer Berichte der NEA über den Stand und die aktuellen Schwerpunkte der Entsorgung radioaktiver Abfälle mitgewirkt. Für die NEA nahm sie an der internationalen Expertenprüfung des Berichts SAFIR2 teil, der von der belgischen Agentur für radioaktive Abfälle und angereicherte spaltbare Materialien (NIRAS/ONDRAF) verfasst wurde. Sie ist ebenfalls Mitglied der französischen ständigen Gruppe für Nukleare Anlagen ohne Kraftwerke und Entsorgungsanlagen.

ANHANG 4:

ABKÜRZUNGEN

Englische Abkürzung	Englisch	Deutsch	Deutsche Abkürzung
AECL	Atomic Energy of Canada Ltd.	(Firmenname, Kanada)	AECL
Andra	<i>Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs</i> (National Agency for Radioactive Waste Management)	Nationale Behörde für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen (Frankreich)	Andra
BFE	Swiss Federal Office of Energy	Bundesamt für Energie (Schweiz)	BFE
BNFL	British Nuclear Fuels Ltd.	(Firmenname, Grossbritannien)	BNFL
BWR	Boiling Water Reactor	Siedewasserreaktor	SWR
EBS	Engineered Barrier System	System der technischen Barrieren	–
EDZ	Excavation Disturbed Zone	Auflockerungszone	–
EKRA	Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste	Expertengruppe „Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“ (Schweiz)	EKRA
FEP	Features, Events and Processes	Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (engl. Abkürzung auch im Deutschen gebräuchlich)	FEP
FEPCAT	Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media	FEP-Bewertungskatalog für Tongesteine	FEPCAT
HLW	High Level Waste	Hochaktive Abfälle	HAA
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate)	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (Schweiz)	HSK
IAEA	International Atomic Energy Agency	Internationale Atomenergie Organisation	IAEA
ICRP	International Commission on Radiological Protection	Internationale Strahlenschutz-Kommission	ICRP

IGSC	Integration Group for the Safety Case	Integrationsgruppe für den Sicherheitsnachweis	IGSC
ILW	Intermediate Level waste	Langlebige mittelaktive Abfälle	LMA
IRF	Instant Release Fraction	Instantan freigesetztes Radionuklidinventar	IRF
IRT	International Review Team	Internationale Expertengruppe	IRT
ISAM	Implementation of Safety Assessment Methodologies	Umsetzung von Sicherheitsanalyse-Methodiken	ISAM
ISO	International Standards Organisation	Internationale Organisation für Standardisierung	ISO
KNE	Swiss Federal Commission on Nuclear Waste Management	Kommission Nukleare Entsorgung (Schweiz)	KNE
KSA	Swiss Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations	Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (Schweiz)	KSA
MOX	Mixed Oxide (fuel)	Mischoxyd-Kernbrennstoff	MOX
Nagra	Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)	Nagra
NEA	Nuclear Energy Agency (of the OECD)	Kernenergieagentur (der OECD)	NEA
OPA	Opalinus Clay	Opalinuston	OPA
PSI	Paul Scherrer Institute	Paul Scherrer Institut (Schweiz)	PSI
PWR	Pressurised Water Reactor	Druckwasserreaktor	DWR
QM	Quality Management	Qualitäts-Management	QM
SF	Spent Fuel	abgebrannte Brennelemente	BE
SKI	Swedish Nuclear Power Inspectorate	Schwedisches Kernenergie-Inspektorat	SKI
THM	Thermal-hydraulic-mechanical	Thermo-hydro-mechanisch (gekoppelte Prozesse)	THM
ToR	Terms of Reference	Pflichtenheft	–
UO <sub>2</sub>	Uranium Oxide (fuel)	Uranoxyd-Kernbrennstoff	UO <sub>2</sub>
URL	Underground Research Laboratory	Felslabor	–