

Bundesamt für Strahlenschutz BfS

Projekt: PSP-Nr. WS 0008 / BfS-Bestell-Nr. 8391-0

Titel: **Auswertung von
Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich
Kriterien für die Auswahl von
Endlagerstandorten
Schlussbericht**

**Auftragnehmer/
Verfasser/
Bearbeiter** **Arbeitsgemeinschaft**
**Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver
Abfälle, CH – 5430 Wettingen**
Colenco Power Engineering AG, CH – 5405 Baden
**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH,
D – 38122 Braunschweig**

Wettingen, 15. Mai 2002

Unterschrift:

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf die Studie nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.



Danksagung

Der Bericht wurde unter der Leitung von M. Hugi (Nagra) erarbeitet mit Beiträgen von I. McKinley (Technischer Koordinator), N. Chapman, F. van Dorp, L. Johnson, C. McCombie, F. Neall, P. Zuidema (Nagra), G. Resele, L. Schlickenrieder, J. Lützenkirchen (Colenco Power Engineering AG), D. Buhmann, R. Storck (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH) sowie T. McEwen, P.A. Smith, T. Sumerling (Safety Assessment Management). Für die Ausgestaltung des Berichtes war A. Playfair (Nagra) verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Aufbau des Berichtes	3
2 STANDORTAUSWAHL: VORGEHEN, KRITERIEN, ROLLE DER LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN	5
2.1 Zweck der Langzeitsicherheitsanalysen	5
2.2 Vorgehensweise bei der Standortauswahl	6
2.3 Gesetzliche Grundlagen für die Standortauswahl in Deutschland	9
2.4 Internationale Richtlinien zur Standortauswahl	10
2.4.1 Internationale Atomenergieagentur	10
2.4.2 Europäische Union	13
2.4.3 Nationale gesetzliche Grundlagen und Richtlinien zur Standortauswahl	14
2.4.4 Die Gefahren von quantitativen Ausschlusskriterien	19
2.5 Internationale Projekte mit Sicherheitsanalysen für die Untersuchung generischer geologischer Endlageroptionen	20
2.5.1 PAGIS	20
2.5.2 PACOMA	21
2.5.3 EVEREST	22
2.6 Rolle der Langzeitsicherheitsanalyse bei der Standortauswahl	23
3 LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN FÜR GEOLOGISCHE ENDLAGER UND IHR EINFLUSS AUF NATIONALE PROGRAMME ZUR STANDORTAUSWAHL	25
3.1 Übersicht zu nationalen Sicherheitsanalysen	26
3.1.1 Belgien	26
3.1.2 Deutschland	27
3.1.3 Schweden	28
3.1.4 Finnland	29
3.1.5 Frankreich	31
3.1.6 Grossbritannien	32

3.1.7	Japan	33
3.1.8	Kanada	34
3.1.9	Schweiz	35
3.1.10	Spanien	37
3.1.11	USA	37
3.2	Überblick und Zusammenfassung	41
4	AUSWERTUNG VON LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN	45
4.1	Bewertungsfaktoren	45
4.2	Umfang	46
5	BEDEUTUNG DER STANDORTEIGENSCHAFTEN FÜR DIE LANGZEITSICHERHEIT UND DIE STANDORTAUSWAHL	49
5.1	Zielsetzung	49
5.2	Vorgehen	50
6	STANDORTAUSWAHL IM KRISTALLIN	51
6.1	Programme im Kristallin	53
6.2	Generalisiertes Sicherheitskonzept für kristallines Wirtgestein	55
6.2.1	Behandlung kristalliner Wirtgesteine in Sicherheitsanalysen	58
6.3	Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme	59
6.3.1	Wesentliche Eigenschaften des geologischen Umfeldes	59
6.3.2	Unvorteilhafte Eigenschaften	61
6.4	Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme	62
6.5	Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises	63
6.6	Auswirkungen auf die Standortwahl	66
6.6.1	Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl	67
6.6.2	Allgemeine Ausschlusskriterien	68
7	STANDORTAUSWAHL IN SEDIMENTGESTEINEN	70
7.1	Programme im Sedimentgestein	73
7.2	Generalisiertes Sicherheitskonzept für sedimentäre Wirtgesteine	75
7.2.1	Behandlung sedimentärer Wirtgesteine in Langzeitsicherheitsanalysen	79
7.3	Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme	80

7.3.1	Wesentliche Eigenschaften des geologischen Umfeldes	80
7.3.2	Unvorteilhafte Eigenschaften	81
7.4	Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme	84
7.5	Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises	85
7.6	Auswirkungen auf die Standortwahl	87
7.6.1	Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl	91
7.6.2	Allgemeine Ausschlusskriterien	93
8	STANDORTAUSWAHL IN EVAPORITFORMATIONEN	94
8.1	Programme für Salzformationen	95
8.2	Generalisiertes Sicherheitskonzept für Salzgestein	96
8.3	Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme	97
8.3.1	Vorteilhafte Eigenschaften des geologischen Umfeldes	99
8.3.2	Unvorteilhafte Eigenschaften	100
8.4	Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme	101
8.5	Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises	103
8.6	Auswirkungen auf die Standortauswahl	105
8.6.1	Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl	106
8.6.2	Allgemeine Ausschlusskriterien	108
9	KRITERIEN FÜR DIE STANDORTAUSWAHL	109
9.1	Geologische Gesamtsituation	110
9.1.1	Stabilität der Standortbedingungen	110
9.1.2	Erkundbarkeit	112
9.1.3	Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers	113
9.1.4	Geologische und geographische Verhältnisse	113
9.2	Gesamtsystem	114
9.2.1	Abfalltypen	114
9.2.2	Technisches Barrierensystem	116
9.2.3	Funktionelle Anforderungen wichtiger Systemkomponenten	117
9.2.4	Einlagerungskonzept	121
9.2.5	Grösse des Endlagers	122
9.3	Wirtgesteinstypen	122
9.3.1	Eigenschaften spezifischer Wirtgesteine	123
9.3.2	Spezifische Einflussfaktoren	124

9.3.3	Kritikalität	130
9.3.4	Gasbildung	132
9.3.5	Menschliches Eindringen	134
9.4	Weitere wichtige Kriterien für die Standortauswahl	139
10	SCHLUSSFOLGERUNGEN	140
11	LITERATURVERZEICHNIS	145
11.1	Kapitel 2 – Rolle der Sicherheitsanalyse bei der Standortauswahl	145
11.2	Kapitel 3 – Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager und ihr Einfluss auf nationale Programme zur Standortauswahl	146
11.3	Kapitel 5 bis 8 – Bedeutung der Standorteigenschaften für die Standortauswahl	151
11.4	Kapitel 9 – Kriterien für die Standortauswahl	155
12	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	156
TABELLENVERZEICHNIS		
Tabelle 2.1:	Nationale Richtlinien zur Standortauswahl	15
Tabelle 3.1:	Wichtige Analysen der Langzeitsicherheit für geologische Endlager von radioaktiven Abfällen und ihre Bedeutung für das Standortauswahlverfahren	43
Tabelle 4.1:	Auswerteschema für Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten	46
Tabelle 4.2:	Langzeitsicherheitsanalysen, welche hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten ausgewertet wurden	48
Tabelle 6.1:	Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager in kristallinen Gesteinsformationen	53
Tabelle 7.1:	Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager in Sedimentgesteinen	74
Tabelle 8.1:	Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Salzformationen	95
Tabelle 8.2:	Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile verschiedener Salzformationen	96

Tabelle 9.1:	Charakteristische Eigenschaften abgebrannter Brennelemente (BE)	115
Tabelle 9.2:	Charakteristische Eigenschaften verglaster hochaktiver Abfälle (HAA)	115
Tabelle 9.3:	Charakteristische Eigenschaften langlebiger mittelaktiver Abfälle (LMA und TRU)	116
Tabelle 9.4:	Erforderliche und günstige Eigenschaften geklüfteter (stark konsolidierter) Gesteine	123
Tabelle 9.5:	Erforderliche und günstige Eigenschaften plastisch-toniger Sedimente	123
Tabelle 9.6:	Erforderlich und günstige Eigenschaften von Salzgesteinen	124
Tabelle 9.7:	Zusätzliche Erkenntnisse für geklüftete (stark konsolidierte) Gesteine	126
Tabelle 9.8:	Zusätzliche Erkenntnisse für (plastisch-tonige) Sedimentgesteine	128
Tabelle 9.9:	Zusätzliche Erkenntnisse für Salzgesteine	129
Tabelle 10.1:	Sicherheitsrelevante Kriterien für die Auswahl eines Endlagerstandortes	142

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 6.1:	Wichtige Einflussfaktoren für kristalline und geklüftete sedimentäre Wirtgesteine	57
Abbildung 7.1:	Wichtige Einflussfaktoren für tonige Sedimentgesteine	77
Abbildung 8.1:	Wirksamkeit des Endlagersystems in Salzformationen bei gestörter Entwicklung	98

ZUSAMMENFASSUNG

Das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat einen Arbeitskreis "Auswahlverfahren Endlagerstandorte" eingerichtet, dessen Aufgabe u.a. darin besteht, Kriterien für die Suche nach Endlagerstandorten mit günstigen geologischen Gesamtsituationen zu entwickeln. Zur Unterstützung des Vorhabens hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) eine technisch-wissenschaftliche Untersuchung ausgeschrieben in der Absicht, bestehende Sicherheitsanalysen für geologische Endlager radioaktiver Abfälle in verschiedenen Ländern hinsichtlich der Kriterien für die Auswahl der Standorte auszuwerten.

Analysen zur Langzeitsicherheit haben sich in der Vergangenheit als ein nützliches Hilfsmittel für die quantitative Beurteilung der Sicherheit des Endlagersystems erwiesen. Einerseits beurteilt die Langzeitsicherheitsanalyse einzelne, zur Sicherheit beitragende Systemkomponente und deren Wechselwirkungen. Andererseits betrachten sie zur Quantifizierung der Freisetzung von Radionukliden und eventueller gesundheitlicher Auswirkungen das Endlagersystem als Ganzes. Sie werden sowohl als Entscheidungshilfe bei der Planung eines Endlagers, als auch – wenn es um die Beurteilung von Unbestimmtheiten bzgl. der Charakterisierung von Einzelkomponenten geht – zur Festlegung von Prioritäten bei F&E-Studien eingesetzt.

Die vorliegende Studie der Arbeitsgemeinschaft Nagra – Colenco – GRS zeigt jedoch, dass es eher die Ausnahme als die Regel ist, der Sicherheitsanalyse im Verfahren zur Standortauswahl eine zentrale Bedeutung zuzuordnen. Die Analyse der Langzeitsicherheit beantwortet traditionell vielmehr die Frage nach der Eignung (bzw. Nicht-Eignung) des betrachteten Standortes als dass sie Bedingungen für die Standortauswahl festlegt. Zum Teil erlangen andere als rein sicherheitstechnische Kriterien ein grosses Gewicht im Standortauswahlverfahren.

Die Betrachtung von mehreren Sicherheitsanalysen und deren Gruppierung nach Wirtgesteinstypen ermöglicht es jedoch, in Abhängigkeit des Wirtgesteins einige Schlüsselfaktoren aufzuzeigen, welche für die nachgewiesenen Einschluss- und Rückhaltewirksamkeiten unterschiedlicher Endlagersysteme von Bedeutung sind. Ferner erlaubt dieses Vorgehen, wichtige Kriterien für die Standortauswahl in Bezug

auf die geologische Gesamtsituation (unabhängig vom Endlagerkonzept) und für das Gesamtsystem des geologischen Endlagers auszuarbeiten. In Bezug auf das Gesamtsystem sind die Kriterien bereits nicht mehr allgemeiner Natur, sondern ausschliesslich für bestimmte Abfalltypen und Endlagerkonzepte anwendbar.

In den wenigen Fällen, in denen formelle Verfahren zur Standortauswahl hinreichend dokumentiert sind, wird die nachgewiesene Langzeitsicherheit von möglichen Endlagerstandorten sehr hoch gewichtet. Gleichwohl führte dieser Faktor allein selten zu einer signifikant unterschiedlichen Bewertung der Standortoptionen. Stattdessen sind – unter anderem – Gesichtspunkte wie konventionelle Umweltverträglichkeit, Sicherheit während der Betriebsphase, bestehende Infrastruktur und Datengrundlagen zur Geologie, Kosten, Akzeptanz in der Öffentlichkeit usw. für den Entscheid zwischen Standorten ausserordentlich stark massgebend.

Gestützt auf die erfolgte Auswertung wurden gewisse Kriterien aus den Langzeitsicherheitsanalysen abgeleitet, welche bei der Auswahl von Endlagerstandorten in Deutschland verwendet werden können. Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit mag auf den ersten Blick als etwas enttäuschend erscheinen, besteht es doch aus einigen eher selbstverständlichen, allgemeinen Kriterien und einer umfangreicheren Zahl von Kriterien, die eher vage und qualitativ bzw. abhängig vom Endlagerkonzept sind. Tatsächlich ist dies jedoch eine Folge des verbesserten Verständnisses von Endlagersystemen, welches zur Erkenntnis führte, dass das gesamte System von geologischen und technischen Barrieren als ein Ganzes beurteilt werden muss. Der simplizistische Ansatz der 60'er und 70'er Jahre, in dem die "geologische" Suche nach dem idealen Standort gänzlich losgelöst von den "technischen" Arbeiten der Endlagerauslegung und den "physiko-chemischen" Aspekten der modellmässigen Sicherheitsbetrachtungen erfolgen kann, ist nicht mehr haltbar.

Das Problem der übermässigen Vereinfachung der Analyse ist nirgends offensichtlicher als bei der Gegenüberstellung der drei Haupttypen von Wirtsgesteinen (Kristallines Gestein, Sedimentgestein, Salzgestein). Jeder dieser Haupttypen zeichnet sich durch deutliche Vor- und Nachteile aus:

- Kristalline Gesteine sind im Bezug auf die Prozesse zur Grundwasserbewegung und zum Schadstofftransport einfach zu verstehen und bautechnisch günstig, aber sie können heterogen und schwierig zu charakterisieren sein.
- Sedimentgesteine können homogen und einfach zu charakterisieren sein, aber ihr Verhalten bei Störeinwirkungen ist unter Umständen schwierig vorherzusagen und Bauaktivitäten können einige ihrer vorteilhaften Eigenschaften beeinträchtigen.
- Salzgesteine können als die beste Option eingestuft werden, wenn das Gewicht auf den vollständigen Einschluss der Abfälle (Nullfreisetzung) und die Einfachheit der Bautätigkeit gelegt wird. Unter dem Gesichtspunkt eines potentiellen Rohstoffes sowie der Wahrscheinlichkeit und der Auswirkungen menschlichen Eindringens weisen Salzgesteine jedoch wichtige Nachteile auf.

Für das deutsche Programm können die Ergebnisse des vorliegenden Berichts dazu beitragen, ein strukturiertes Verfahren für die Standortauswahl zu entwickeln. Die aus der Langzeitsicherheitsanalyse ableitbaren Entscheidungsgrundlagen für die Standortauswahl sollen gewährleisten, dass die Langzeitsicherheit erstrangig berücksichtigt wird. Gleichzeitig sind aber auch die inhärenten Grenzen jeder Sicherheitsanalyse zur Kenntnis zu nehmen und eine Überinterpretation ihrer Ergebnisse zu vermeiden.

Die vorliegende Studie macht deutlich, dass mit der Analyse der Langzeitsicherheit im Zusammenhang mit der Planung und Realisierung eines geologischen Endlagers für radioaktive Abfälle unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Ein wichtiges Ziel ist der Nachweis, dass ein vorgeschlagener Standort – zusammen mit der entsprechenden Endlagerauslegung – den vorgeschriebenen Sicherheitsanforderungen (inklusive angemessenen Sicherheitsreserven) genügt. Die Ableitung einer quantitativen Rangfolge für die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Standortes insb. der geologischen und hydrogeologischen Situation und andere Komponenten des Endlagersystems ist auf der Grundlage der Langzeitsicherheit nicht machbar, weil die "Auflösung" der Analyse im allgemeinen zu grob ist. Ein spezielles "Ranking" der sicherheitsrelevanten Eigenschaften ist aber auch nicht notwendig, weil andere Kriterien im Rahmen einer "Multi-Attribute Decision Analysis" (Nutzwertanalyse) zu berücksichtigen sind.

Als positive Erkenntnis zeigen Sicherheitsanalysen, dass tiefe geologische Endlager ein Sicherheitsniveau aufweisen können, das jenes von normalen Industriebranchen übertrifft, und dass daher – auch wenn ein "idealer" Standort nie gefunden werden kann – zahlreiche unterschiedliche Optionen bestehen, um ausreichend gute Standorte zu finden, die nahezu jede vernünftige Randbedingung für ein Endlagerprojekt erfüllen.

1 EINLEITUNG

1.1 Veranlassung

Das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat einen Arbeitskreis "Auswahlverfahren Endlagerstandorte" (AkEnd) eingerichtet. Im Rahmen der Aufgaben dieses Arbeitskreises sollen Kriterien für die Suche nach Endlagerstandorten mit günstigen geologischen Gesamtsituationen entwickelt werden.

Zur Unterstützung des Vorhabens hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Rahmen eines beschleunigten nicht-offenen Verfahrens der Europäischen Gemeinschaft eine technisch-wissenschaftliche Untersuchung ausgeschrieben in der Absicht, bestehende Sicherheitsanalysen für geologische Endlager radioaktiver Abfälle in verschiedenen Ländern hinsichtlich der Kriterien für die Auswahl der Standorte auszuwerten.

Die Arbeitsgemeinschaft zusammengesetzt aus der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Hardstrasse 73, CH-5430 Wettingen, Colenco Power Engineering AG (Colenco), Mellingerstrasse 207, CH-5405 Baden und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Theodor-Heuss-Strasse 4, D-38122 Braunschweig erhielt am 29. Juni 2000 den Zuschlag für das Vorhaben.

1.2 Zielsetzung

Die Bedeutung der geologischen Standorteigenschaften im Einzelnen und im Zusammenwirken mit technischen oder geotechnischen Barrieren hinsichtlich der Langzeitsicherheit des Endlagers muss bei der Entwicklung von Kriterien zur Standortwahl angemessen berücksichtigt werden. Dies weil die Endlagerkonzeption eng an die geologische Situation gekoppelt ist. Dabei ist insbesondere entscheidend, welche Bedeutung technischen oder geotechnischen Barrieren für die Schadstoffrückhaltung zugewiesen wird. Die Sicherheitsrelevanz einer Standorteigenschaft bzw. von Komponenten des Endlagers und ihre Abbildbarkeit in

Langzeitsicherheitsanalysen muss bekannt sein, um angemessene Kriterien für die Standortwahl zu entwickeln.

Im Rahmen des Vorhabens sollen Langzeitsicherheitsanalysen ausgewertet werden, die in den vergangenen Jahren für eine Vielzahl nationaler Endlagerprojekte in verschiedenen Ländern durchgeführt wurden. Generische Studien und Sicherheitsanalysen für fiktive Standorte sollen ebenfalls berücksichtigt werden.

Vorgabe des Auftraggebers für die Studie war, dass die Auswertung der Sicherheitsanalysen unter folgenden Gesichtspunkten zu erfolgen hat:

- Welche positiven bzw. negativen Eigenschaften wurden der geologischen und hydrogeologischen Situation am Endlagerstandort bzw. den anderen Komponenten des Endlagers zugewiesen?
- Welche dieser Eigenschaften wurden in den Langzeitsicherheitsanalysen abgebildet?
- Welche Eigenschaften haben das Isolationsvermögen (Rückhaltezeit) und welche die Höhe einer Schadstofffreisetzung massgeblich beeinflusst?
- Welche Rangfolge in ihrer Sicherheitsrelevanz haben die analysierten Eigenschaften (evtl. schadstoffspezifisch)?

Mit dem Hinweis auf die aktuelle Diskussion um die Festlegung des Standortauswahlverfahrens in Deutschland und die Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000 fordert der Auftraggeber zusätzlich eine spezielle Bewertung der Gasbildung in Folge von Korrosion und Zersetzung von Abfällen, der Re-Kritikalität sowie des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens.

Die durchgeführten Arbeiten sollen den derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik darstellen und die erstellten Unterlagen sollen in sich schlüssig und nachvollziehbar sein. Die genannten Fragestellungen sind für alle untersuchten Studien in möglichst gleichem Tiefgang zu beantworten. Die gewonnenen Erkenntnisse

sollen für alle Studien zunächst getrennt und ausführlich dargestellt, begründet und bewertet werden. Anschliessend ist eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung zu erarbeiten.

Die Untersuchungsergebnisse sollen den Auftraggeber in die Lage versetzen, schnelle und fachgerechte Entscheidungen treffen zu können. Dazu sind die Aussagen des Auftragnehmers nachvollziehbar darzustellen und zu bewerten und schliesslich in Berichtsform zu dokumentieren.

1.3 Aufbau des Berichtes

Der Bericht zur Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten gliedert sich folgendermassen.

Das anschliessende Kapitel 2 geht der Frage nach, welche Rolle die Langzeitsicherheitsanalyse bei der Standortauswahl spielt bzw. spielen könnte. Dazu wird untersucht, welche Zwecke die Langzeitsicherheitsanalysen innerhalb der Endlagerprogramme verfolgen und wie sie im Standortauswahlverfahren im allgemeinen zur Anwendung gelangen. Ferner werden die für die Standortauswahl relevanten gesetzlichen und anderen Grundlagen diskutiert. Neben den Verhältnissen in Deutschland werden entsprechende Richtlinien für eine Auswahl von Programmen anderer Länder und internationaler Organisationen vorgestellt. Schliesslich werden im selben Zusammenhang drei europäische generische Studien zur geologischen Endlagerung diskutiert.

Kapitel 3 liefert eine kurze Zusammenfassung zur historischen Entwicklung der Programme zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in verschiedenen Ländern und insbesondere zur Bedeutung der Langzeitsicherheitsanalyse bei der Standortauswahl. Die Auswertung zeigt, dass die Langzeitsicherheitsanalysen für die meisten der bis heute ausgewählten Endlagerstandorte nur eine untergeordnete – oder überhaupt keine – Rolle gespielt haben.

Kapitel 4 (inklusive Anhang) beinhaltet eine detaillierte Auswertung und zusammenfassende Darstellung von ausgewählten wichtigen Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien, die für die Auswahl des betreffenden Standorts bzw. Standortvorschlages von Bedeutung sind. Die dabei betrachteten Wirtgesteinstypen umfassen kristalline Gesteine, Sedimente und Salzformationen.

Kapitel 5 (Einführung), Kapitel 6 (Kristallin), Kapitel 7 (Sedimentgesteine) und Kapitel 8 (Salzgestein) sind der Bedeutung der Standorteigenschaften für die Standortauswahl gewidmet. Dazu werden ausgehend von einem wirtgesteins-spezifischen Sicherheitskonzept ausgewählte Langzeitsicherheitsanalysen wichtiger nationaler Endlagerprogramme im Hinblick auf gemeinsame Ergebnisse und spezifische Unterschiede analysiert. Schliesslich werden die Auswirkungen des Sicherheitsnachweises auf die Standortauswahl diskutiert.

Kapitel 9 beinhaltet die Synthese der Arbeiten, in welcher wichtige Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten zusammengefasst werden, wie sie sich aus den ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen (und anderen Gesichtspunkten) ergeben. Die Systematik der abgestuften Synthese besteht darin, dass zuerst – unabhängig vom Endlagerkonzept – wichtige Anforderungen an die geologische Gesamtsituation ausgearbeitet werden. Anschliessend werden wichtige, nicht-geologische Anforderungen, welche das Gesamtsystem eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten betreffen, zusammengestellt. Der sich anschliessende Syntheseschritt betrifft die sicherheitsrelevanten Eigenschaften spezifischer Wirtgesteinstypen. Es folgt eine Zusammenstellung zusätzlicher Kriterien (z. T. aus Bereichen ausserhalb der Langzeitsicherheitsanalyse), die für die Auswahl von Endlagerstandorten von Bedeutung sind.

Schliesslich werden in Kapitel 10 die Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Arbeiten präsentiert und die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst. Dabei wird versucht, in einer Uebersicht präzise und zielgerichtet auf die in Kapitel 1.2 gestellten Fragen des BfS einzugehen.

2 STANDORTAUSWAHL: VORGEHEN, KRITERIEN, ROLLE DER LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN

Analysen zur Langzeitsicherheit haben sich in der Vergangenheit als ein nützliches Hilfsmittel für die quantitative Beurteilung der Sicherheit des Endlagersystems erwiesen. Einerseits beurteilen die Langzeitsicherheitsanalysen einzelne, zur Sicherheit beitragende Systemkomponenten und deren Wechselwirkungen. Andererseits betrachten sie zur Quantifizierung der Freisetzung von Radionukliden und eventueller gesundheitlicher Auswirkungen das Endlagersystem als Ganzes, wobei die Ergebnisse mit behördlichen Schutzziele (Strahlendosis, Risiko) bzw. anderen Vorgaben verglichen werden.

Die Analysen werden sowohl als Entscheidungshilfe bei der Planung eines Endlagers, als auch – wenn es um die Beurteilung von Unbestimmtheiten bzgl. der Charakterisierung von Einzelkomponenten geht – zur Festlegung von Prioritäten bei F&E-Studien eingesetzt. Nicht zuletzt dienen sie der Entwicklung und Überprüfung ihrer eigenen Methodik und besitzen in Bezug auf den Aufbau von Systemverständnis eine vertrauensbildende Komponente.

Inwieweit die Langzeitsicherheitsanalysen direkt zur Optimierung der Standortauswahl eingesetzt wurden oder werden könnten, ist Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

2.1 Zweck der Langzeitsicherheitsanalysen

Die Zwecke der Langzeitsicherheitsanalysen sind vielseitig und hängen vom Bearbeitungsstand und den aktuellen Zielen des Endlagerprogramms ab. Am Anfang steht die vergleichende Beurteilung unterschiedlicher generischer Endlagerkonzepte im Vordergrund, später die Optimierung der technischen Barrieren – meist in einem iterativen Prozess zwischen ingenieurmässiger Auslegung und sicherheitstechnischer Bewertung. Durch den Einsatz von Sicherheitsanalysen können die wichtigsten (sicherheits-) relevanten Parameter für das Wirtgestein und das weitere geologische Umfeld identifiziert werden. Sie ermöglichen zudem die vergleichende Beurteilung

potentieller Endlagerstandorte im Idealfall bis hin zur Festlegung einer Rangfolge während des Standortauswahlverfahrens. Darüberhinaus sind sie für die Lenkung von Forschung und Entwicklung in allen Phasen der Endlager-Implementierung von hohem Nutzen.

Mit fortschreitendem Programm wachsen nicht nur beim Antragsteller, sondern auch bei den Aufsichts- und Bewilligungsbehörden Erfahrung, Verständnis und Vertrauen in die Methoden der Sicherheitsanalyse; ein wichtiges Ziel, da die Sicherheitsanalyse ein grundlegender Bestandteil der behördlichen Auflagen im Genehmigungsverfahren ist. Gleichermassen fördert die Durchführung und offene Darstellung von Analysen zur Langzeitsicherheit die Akzeptanz der breiten Öffentlichkeit und der lokalen Bevölkerung am potentiellen Endlagerstandort.

2.2 Vorgehensweise bei der Standortauswahl

Bei der Standortauswahl eines Endlagers kommt der Langzeitsicherheitsanalyse eine heute wachsende Bedeutung zu, die schliesslich zu einem Vorschlag für eine spezifische Auslegung des Endlagers an einem bestimmten Standort unter Berücksichtigung des gegebenen Abfallinventars und der vorgegebenen betrieblichen Rahmenbedingungen führt. Eine auf der Analyse der Langzeitsicherheit basierende Standortauswahl könnte typischerweise die unten aufgeführten Schritte beinhalten.

Es ist an dieser Stelle zu bemerken, dass ähnliche rein technische "Einengungsverfahren" bereits in den achtziger Jahren (z.B. durch die Internationale Atomenergieagentur, IAEA) erarbeitet wurden. In der Praxis ist das Vorgehen jedoch selten oder nie rigoros ausgeführt worden. In späteren Publikationen anerkennt auch die IAEA, dass Sicherheitsanalysen als wertvolle Werkzeuge zur Beurteilung eines Standortes eingesetzt werden können – unabhängig davon wie die Standortauswahl erfolgt ist (siehe Kapitel 2.4.1).

Vergleichende Beurteilung von Endlagerkonzepten

In einem ersten Schritt wird gewöhnlich eine vergleichende Beurteilung von Endlagerkonzepten für spezifische, generisch gehaltene Wirtgesteinstypen, wie zum

Beispiel Kristallin, Sedimentgestein und Steinsalz durchgeführt. International kann heute dieser Verfahrensschritt als abgeschlossen erachtet werden, da solche Arbeiten hauptsächlich in den siebziger und achtziger Jahren durchgeführt wurden und eine Wiederholung in einem neuen nationalen Endlagerprogramm unwahrscheinlich erscheint.

Geologische / hydrogeologische Gesamtsituation

Ein weiterer Schritt besteht in der Auswertung und dem Vergleich verschiedener hypothetischer geologischer bzw. hydrogeologischer Gesamtsituationen (z.B. Kontinentalstandorte oder Küstenregionen), in Kombination mit einer Auswahl von Wirtgesteinstypen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten vermitteln frühe Hinweise auf eine "vergleichbare" Sicherheit und auf technische Schlüsselfaktoren, welche die Langzeitsicherheit eines Endlagers in einer vorgegebenen Situation bestimmen. Ferner liefern die Analysen wertvolle Erkenntnisse bzgl. der relativen Kosten und der technischen Machbarkeit eines Endlagers mit vergleichbarer und ausreichender Sicherheit. Dabei basieren die Beurteilungen auf Informationen und Daten aus verschiedenen Quellen, wie beispielsweise internationaler Literatur zu Forschung und Entwicklung (radioaktive und konventionelle Abfälle), nationalen geowissenschaftlichen Datenbanken und Daten aus Felslabors für die Untersuchung von Endlagern für radioaktive Abfälle.

Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems

Der dritte Schritt widmet sich der Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems. Die Sicherheit wird auf der Grundlage eines realistischen Abfallinventars und einer Vorauswahl von realen Standorten - oder eines einzelnen Standorts, falls dieser aus gegebenen Gründen frühzeitig ausgewählt wurde - beurteilt, wobei für die Standorte bereits beschränkte Standortinformationen verfügbar sein müssen. Wichtige Erkenntnisse betreffen in diesem Zusammenhang ebenso praktische Aspekte wie die Platzierung des Endlagers innerhalb der geologischen Strukturen eines bestimmten Standorts, Einschränkungen bezüglich der Tiefenlage oder des Ausbruchsvolumens, insbesondere aber die Abhängigkeit der Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems von spezifischen Standorten oder Standorttypen (z.B. Granitformationen im Inland im Vergleich zu einer Küstenregion). Dieser Schritt unterstützt die Entscheidungsträger

bei der optimalen Auswahl von einen oder wenigen Standorten für die Durchführung von detaillierten Studien.

Detaillierte Vergleichsstudien

Im letzten Schritt werden Detailuntersuchungen eines einzelnen Standorts bzw. detaillierte Vergleichsstudien einer geringen Anzahl von Standorten angestellt. Voraussetzung für die Standorte ist, dass sie die Anforderungen gemäss den vorangegangenen Auswahlritten erfüllen und aufgrund bestehender Standortuntersuchungen bereits gut charakterisiert sind. In einzelnen nationalen Programmen ist die Anzahl der detailliert zu untersuchenden bzw. zu vergleichenden Standorte gesetzlich vorgeschrieben worden. Das Ziel dieses Schritts ist die Erarbeitung einer wissenschaftlich-technischen Informationsbasis, die endgültige Entscheidungen zur Auswahl des definitiven Endlagerstandorts unterstützt bzw. bestätigt. Weitere sicherheitstechnische Untersuchungen konzentrieren sich auf die Optimierung der Endlagerauslegung und die Erbringung des gesetzlich erforderlichen Sicherheitsnachweises.

Umweltverträglichkeit

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Langzeitsicherheitsanalyse im Zusammenhang mit der Standortauswahl nur ein Element einer umfassenderen Umweltverträglichkeitsprüfung darstellt, die zusätzlich Überlegungen in Bezug auf Bau und Betrieb des Endlagers beinhaltet. Daher erfolgt die Beurteilung des empfohlenen Endlagerkonzepts nicht ausschliesslich auf der Grundlage der radiologischen Langzeitsicherheit. Weitere Aspekte bezüglich der Auswirkung von Bau und Betrieb des Endlagers für radioaktive Abfälle auf die Umwelt umfassen die Luftqualität, die Qualität von Oberflächen- und Grundwasser, gesundheitliche Aspekte (nicht-radiologische Auswirkungen, z.B. Lärmauswirkungen, Verkehr, Umweltverschmutzung), Ökosysteme, Landnutzung, natürliche Rohstoffe (inkl. deren Verbrauch für das Endlager selbst), Kultur und Erbe, sowie soziale Strukturen.

Allgemein wird erwartet, dass die Umweltverträglichkeitsprüfung auch Alternativen für eine sichere langzeitliche Verwahrung radioaktiver Abfälle beurteilt. Damit sind nicht nur alternative Standorte gemeint, sondern auch alternative Entsorgungsstrategien. In

der Europäischen Union ist die Umweltverträglichkeitsprüfung für alle bedeutenden nationalen Infrastrukturprojekte zwingend vorgeschrieben. Weitere Erläuterungen zu den Vorgaben und zur Nutzung von Umweltverträglichkeitsprüfungen sind jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

2.3 Gesetzliche Grundlagen für die Standortauswahl in Deutschland

Die folgenden Gesetze und Regelungen tangieren die Genehmigung sowie den Bau und Betrieb von Endlagern für radioaktive Abfälle und sind somit auch für die Auswahl eines Standortes von Belang.

Das deutsche Atomgesetz (AtG 1985) regelt in § 9a, dass der Bund für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig ist. Die Errichtung eines Endlagers bedarf einer Planfeststellung. Im Verfahren zur Planfeststellung werden alle Fachrechte ausser dem Bergrecht gebündelt, unter anderem werden die Belange der Umweltverträglichkeit und des Wasserrechts durch den Plan abgedeckt.

Das Bundesberggesetz (BBergG 1980) regelt u.a. Details des Planfeststellungsverfahrens und der Betriebsplanpflicht für ein Endlagerbergwerk; es wird von den Bundesländern vollzogen. Bau und Betrieb eines Endlagers sind der Aufsicht der Bergbehörde unterstellt. Eine untertägige Standorterkundung ist betriebsplan-, aber nicht planfeststellungspflichtig.

Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 1986) enthält Regelungen zum Schutz des in der Natur vorhandenen Wassers, u.a. des Oberflächen- und Grundwassers. Die für ein Endlager wesentliche Bestimmung ist § 34 mit dem Reinhaltungsgebot für das Grundwasser.

Neben den gesetzlichen Regelungen, die keine Standortauswahlkriterien ansprechen, existieren konkretisierende Endlager-Sicherheitskriterien (BMI 1983), die auch allgemeine Kriterien zur Standortauswahl enthalten. Zunächst wird gefordert, dass der Standort eine geringe tektonische Aktivität und günstige hydrogeologische Verhältnisse aufweisen soll. Ferner wird die topographische Lage und Bevölkerungsdichte als

nachrangig angesehen, vorrangig ist die Langzeitsicherheit des Standorts. Ehemalige Gewinnungsbergwerke sind grundsätzlich zulässig. An Wirtgesteine werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- viskoplastische Gesteine werden bevorzugt,
- Grubenbaue müssen standfest errichtet werden können,
- es darf keine Wegsamkeiten für unzulässige Flüssigkeitsmengen geben,
- das Gestein darf nur geringe Wechselwirkungen mit den Abfällen aufweisen.

Für das Deckgebirge und das Nebengestein wird eine hohe Sorptionsfähigkeit für Radionuklide gefordert. Als eines der Schutzziele wird für die Zeit nach der Beendigung der Betriebsphase vorgegeben, dass die in § 47 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2001) vorgegebenen Grenzwerte der Individualdosis auch bei Berücksichtigung nicht restlos auszuschliessender Radionuklidfreisetzungen aus dem Endlager eingehalten werden. Zur Erreichung des Schutzziels wird ein Mehrfachbarrierenkonzept gefordert.

2.4 Internationale Richtlinien zur Standortauswahl

2.4.1 Internationale Atomenergieagentur

Im Rahmen der "Safety Series" der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) erschien 1994 ein umfassender Bericht über Normen, Kriterien und Spezifikationen für tiefe geologische Endlager für radioaktive Abfälle (IAEA 1994). Dieser Bericht richtet sich gleichermaßen an antragstellende Organisationen und Aufsichtsbehörden. Wichtige Aussagen bezüglich der Standortauswahl werden im folgenden in einer kurzen Übersicht zusammengefasst:

- Ein geeigneter Standort wird identifiziert a) entweder durch stufenweises Eingrenzen innerhalb einer Gruppe potentieller Kandidaten oder b) durch sachliche Bewertung eines oder mehrerer vorgegebenen Standorte.
- Bereits bestehende Standorte von Nuklearanlagen und deren Umgebung verdienen unter Umständen eine besondere Aufmerksamkeit, da sich die reduzierten

Anforderungen bezüglich des Transports als vorteilhaft erweisen können.

- Möglicherweise kann das Interesse von Gemeinden bzw. von Grundbesitzern für freiwillige Standortangebote geweckt werden.
- Es ist weder erforderlich noch möglich, den "besten" Standort zu finden.
- Unabhängig vom bevorzugten Auswahlverfahren muss das Vorgehen für die Langzeitsicherheitsanalyse stets ähnlich sein.
- In jeder Phase der Standortauswahl sind soziale und ökologische Aspekte sowie gesetzliche Bestimmungen gemäss den nationalen Vorgaben anzusprechen und zu bewerten.
- Die Bewilligungsbehörden sind während des Auswahlverfahrens zu informieren bzw. bei wichtigen Entscheiden mit einzubeziehen.
- Ein angemessenes Qualitätssicherungssystem ist bereits frühzeitig zu etablieren.
- Die Erfassung, Präsentation und Archivierung von Daten muss bereits während der ersten Phasen des Standortauswahlverfahrens in standardisierter Form erfolgen.

Der IAEA-Bericht enthält ferner generelle Richtlinien zur Standortauswahl, die zusammen mit anderen Gesichtspunkten wie Sicherheit, Machbarkeit, gesellschaftliche, wirtschaftliche und Umweltaspekte zur Entwicklung nationaler Vorschriften beitragen können - sofern solche als notwendig erachtet werden. Einzelne Richtlinien sollen aber nicht unabhängig von einander und nur unter Berücksichtigung von nationalen Auflagen angewandt werden. Der Bericht zitiert ferner den Informationsbedarf, der zur Erfüllung der einzelnen Richtlinien notwendig ist.

Die folgende Zusammenstellung fasst die Richtlinien kurz zusammen, für die gemäss IAEA kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird und die nicht in einer bestimmten Reihenfolge der Wichtigkeit zu verstehen sind:

- Die geologische Situation muss erkundbar sein und geometrische, geomechanische, geochemische und hydrogeologische Eigenschaften aufweisen, welche die Ausbreitung von Radionukliden verhindern bzw. begrenzen und einen sicheren Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers gewährleisten.

- Das Wirtgestein und die Endlagerbauten dürfen nicht durch zukünftige dynamische Prozesse wie klimatische Veränderungen, Neotektonik, Erdbeben, Vulkanismus, Diapirismus (Salztektonik), usw. ungünstig beeinflusst werden.
- Die hydrogeologische Situation sollte so sein, dass die Grundwasserflüsse gering sind und somit den Einschluss der Abfälle unterstützen.
- Die physikalisch-chemischen und geochemischen Eigenschaften des Standorts sollen die Radionuklidfreisetzung begrenzen.
- Mögliche zukünftige menschliche Tätigkeiten müssen bei der Standortauswahl berücksichtigt werden; die Wahrscheinlichkeit einer ungünstigen Beeinflussung der Isolationsfähigkeit des Endlagersystems soll minimiert werden.
- Die Eigenschaften der Geländeoberfläche und des geologischen Untergrunds sollen eine optimale Auslegung der Infrastruktur in Übereinstimmung mit bergbaulichen Vorschriften erlauben.
- Die Abfalltransporte dürfen nicht zu unzulässigen Strahlenbelastungen oder anderen Umweltauswirkungen führen.
- Die Qualität der (lokalen) natürlichen Umgebung darf nicht ungünstig beeinflusst werden bzw. negative Einflüsse sollen auf zumutbares Niveau gemildert werden.
- Die Landnutzung und Besitzverhältnisse im Standortgebiet müssen hinsichtlich möglicher Entwicklungen (Regionalplanung) berücksichtigt werden.
- Die gesellschaftlichen Auswirkungen der Entwicklung eines Endlagerprojekts sollen verträglich sein, wobei günstige Auswirkungen zu fördern und ungünstige Auswirkungen einzuschränken sind.

Obwohl die IAEA keine direkten Empfehlungen über den Einsatz von Sicherheitsanalysen gibt, ist ersichtlich, dass die ersten fünf Hinweise von Überlegungen oder Analysen der Langzeitsicherheit abgeleitet worden sind.

2.4.2 Europäische Union

Zusätzlich zu den IAEA-Richtlinien wurden 1992 im Rahmen einer Studie internationale Empfehlungen der Europäischen Union publiziert (CEC 1992). Der Bericht beschreibt die parallel gültigen Voraussetzungen bezüglich nuklearer Sicherheit - Strahlenschutz/-Planung - Umweltschutz - gesellschaftspolitische Aspekte. Als übergeordnetes Ziel wird betont, dass das gesamte Endlagersystem die Normen des Strahlenschutzes erfüllen muss und dass der Standort selbst zur Gesamtsicherheit des Endlagersystems beizutragen hat, d.h. standortspezifische Sicherheitsaspekte dürfen nicht unabhängig vom Verhalten des gesamten Endlagersystems beurteilt werden.

Die im Bericht empfohlenen sicherheitsrelevanten Kriterien für die Standortauswahl für ein geologisches Endlager betreffen

- geologische Stabilität
- Hydrogeologie
- chemische und geochemische Eigenschaften
- mechanische und thermische Eigenschaften
- Tiefe und Ausdehnung des Wirtgesteins
- natürliche Rohstoffvorkommen.

Im allgemeinen entsprechen diese Kriterien weitgehend den oben erläuterten IAEA-Richtlinien und sind nicht im besonderen Masse verbindlich quantifiziert. Eine Ausnahme bilden die Kriterien zur Stabilität im Sinne von tektonischen und seismischen Aktivitäten, die quantitative Angabe beinhalten (Zitate):

"...tectonic movement should not be expected to occur (or to induce significant phenomena) before, e.g. 10,000 years, evaluated at regional levels and forecasted from present trends and evidences of events in the past. More generally, the site should be deemed to be stable as long as necessary according to the safety assessment."

"Seismicity shall be low. Its acceptable level depends on the option and the site, but it shall be shown that tectonic movements are not expected to reach Level 7 of the Richter scale (or an intensity of IX - X in the modified Mercalli scale)."

Es ist erwähnenswert, dass offenbar keine der neueren nationalen Vorschriften in Europa diese beiden Kriterien berücksichtigen. Nur die aktuellen französischen Richtlinien (siehe Kapitel 2.4.3) haben die 10'000 Jahre für das Stabilitätskriterium übernommen.

2.4.3 Nationale gesetzliche Grundlagen und Richtlinien zur Standortauswahl

Die IAEA-Richtlinien werden in nationalen Vorschriften zur Standortauswahl unterschiedlich stark berücksichtigt. Tabelle 2.1 zeigt für eine Auswahl von verschiedenen Ländern einen Überblick über die wichtigsten Elemente der nationalen gesetzlichen Grundlagen bzw. Richtlinien zur Standortauswahl. Ein Grossteil der Informationen wurde dem Tagungsband zum (Nuclear Energy Agency) NEA-Workshop 1997 in Cordoba (NEA 1997) entnommen.

Der Detaillierungsgrad ist länderspezifisch stark unterschiedlich. Wiederum wird in den nationalen Richtlinien der Einsatz von formellen Sicherheitsanalysen selten (Ausnahme Finnland) direkt verlangt. Die Mehrzahl der Kriterien dient dazu, die Langzeitsicherheit des geologischen Endlagersystems zu fördern bzw. die Sicherheitsanalysen zu vereinfachen.

Tabelle 2.1: Nationale Richtlinien zur Standortauswahl

Land (Aufsichtsbehörde)	Kriterien bzgl. der Standortauswahl
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> ➤ siehe Kapitel 2.3
Finnland (STUK)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Standort muss sich (soweit es die verfügbaren Untersuchungsmethoden erlauben) aufgrund einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse als geeignet erweisen. ➤ Grundsätzliche Voraussetzungen für die Standortauswahl: genügend Abstand zu nutzbaren Rohstoffvorkommen, keine ausgesprochen hohe Gesteinsspannungen, Vermeiden von seismischen oder tektonischen Anomalien sowie aussergewöhnlichen chemischen Zusammensetzungen des Grundwassers (z.B. Salinität). ➤ Für den Bau des Endlagers in angemessener Tiefe muss der Gesteinskörper ein ausreichendes Volumen aufweisen. ➤ Aufsichtsbehörden vermuten, dass formale Kriterien über wünschenswerte bzw. ungünstige geologische Eigenschaften nicht automatisch zu einer eindeutigen "Rangliste" der potentiellen Standorte führen.
Frankreich (DSIN)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die Sicherheitsregel Nr. III.2.f des Ministeriums für Industrie und Handel (MIPTT 1991) gibt eine Reihe von überwiegend qualitativen Standortkriterien vor, die wie folgt zusammengefasst werden können: <i>Grundlegende Kriterien</i> ➤ Mögliche Veränderungen der ursprünglichen Standortbedingungen aufgrund von Vergletscherung, Erdbeben oder Neotektonik müssen hinsichtlich der Langzeitsicherheit vertretbar sein. Die Stabilität des Standortes (unter Berücksichtigung einer begrenzten vorhersehbaren Entwicklung) muss für einen Zeitraum von mindestens 10'000 Jahren gesichert sein. ➤ Sehr geringe Permeabilität und geringer hydraulischer Gradient in der Wirtgesteinsformation sind unabdingbare Voraussetzungen; möglichst geringer Gradient auch in Nebengesteinen. <i>Wichtige Kriterien</i> ➤ Standort soll günstige mechanische und thermische Eigenschaften aufweisen. ➤ Geochemische Eigenschaften der Gesteinsformationen müssen zur Untersuchung der Radionuklid Ausbreitung quantitativ erfasst werden. ➤ Genügende Endlagertiefe soll erheblichen Einwirkungen durch Erosion, Erdbeben oder menschliches Eindringen vorbeugen; Tiefe soll mindestens 150 – 200 m betragen. ➤ Bekannte und "aussergewöhnliche" Interessegebiete für Rohstoffvorkommen/Resourcen sind zu vermeiden.

Land (Aufsichtsbehörde)	Kriterien bzgl. der Standortauswahl
	<p><i>Auslegungsbestimmende Vorgaben</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausreichend grosser Wirtgesteinskörper ohne grosse wasserführende Störungszonen; Einlagerungshohlräume abseits von mittleren Klüften (Kristallingestein) oder in einer Formation ohne erhebliche Heterogenitäten und abseits von Grundwasserleitern (Sedimentgestein). ➤ Thermische Einflüsse und Auswirkungen der untertägigen Zugangsbauten dürfen den Einschluss nicht erheblich beeinträchtigen.
Grossbritannien (UKEA)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die Aufsichtsbehörde erwartet bereits zu einem frühen Zeitpunkt in das Entwicklungsprogramm eines Endlagers eingebunden zu werden. ➤ Für die Standortauswahl bestehen keine Richtlinien. Die Aufsichtsbehörde erwartet jedoch, bei der Frage der Eignung eines Standorts konsultiert zu werden. ➤ Vorgaben zu Standortuntersuchungen: Der Antragsteller soll ein gut begründetes Vorgehenskonzept entwickeln, die potentiellen Störeffekte am Standort durch Untersuchungen berücksichtigen, eine adäquate Umweltcharakterisierung vornehmen; über Kenntnisse und Auswertemöglichkeiten verfügen, um einen Nachweis dafür zu erbringen, dass die Standorteigenschaften auf die Ausbreitung von Radionukliden limitierend wirken; glaubhaft machen, dass zukünftige Umweltveränderungen berücksichtigt und dass potentiell wertvolle Rohstoffvorkommen in der Region identifiziert und das mögliche Ausmass der Einwirkungen des Endlagers auf den Standort in Betracht gezogen wurden.
Kanada (AECB)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Wirtgestein und geologische Gesamtsituation sollen günstige Eigenschaften aufweisen, welche die Freisetzung von Radionukliden verzögert. ➤ Geringe Wahrscheinlichkeit, dass der Standort künftig zur Rohstoffgewinnung genutzt wird. ➤ Gesteinsformationen müssen in der Lage sein, mechanischen Spannungen ohne signifikante strukturelle Verformung oder Kluftbildung zu widerstehen. ➤ Abmessung des Wirtgesteinskörpers soll eine tiefe Positionierung des Endlagers in genügendem Abstand von grossen Störungszonen erlauben.
Spanien (NSC)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Die Aufsichtsbehörde hat eine Liste von "generellen Standortkriterien" erstellt: ➤ Form und Ausdehnung der Wirtgesteinsformation müssen angemessen sein. ➤ Lithologie und Tiefe des Wirtgesteins sind mit der Art und Menge der Abfälle abzustimmen. ➤ Standort muss angemessen erkundbar sein.

Land (Aufsichtsbehörde)	Kriterien bzgl. der Standortauswahl
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stabile tektonische Bedingungen sind notwendig; aktive Strukturen und potentielle Störzonen sind zu vermeiden. ➤ Standort darf nicht durch seismische Bewegungen beeinflusst werden. ➤ Gebiete mit ungewöhnlich hohen geothermischen Gradienten oder Anzeichen junger vulkanischer Aktivitäten sind zu vermeiden. ➤ Eigenschaften des Standortes müssen ein ganzheitlich günstiges Einschlusspotential für die Abfälle aufweisen. ➤ Standorteigenschaften sollen auf die Freisetzung der Radionuklide limitierend wirken. ➤ Endlager darf weder von den geotechnischen Verhältnissen noch von oberflächennahen Vorgängen ungünstig beeinflusst werden. ➤ Standortregionen mit geringer Bevölkerungsdichte sind zu bevorzugen; einem zukünftigen Bevölkerungszuwachs ist Rechnung zu tragen. ➤ Regionen mit potentiellen natürlichen Rohstoffen/Resourcen sind zu vermeiden; die Notwendigkeit eines Endlagers ist den zukünftigen Rohstoffbedürfnissen gegenüberzustellen. ➤ Endlager sollte keine lokalen Umweltbeeinträchtigungen verursachen.
Schweiz (HSK)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Umfassende Beurteilung der Langzeitsicherheit erfolgt durch die schweizerische Sicherheitsbehörde (HSK) bei der Begutachtung von Gesuchen zur Rahmen-, Bau-, Betrieb- und Verschlussbewilligung. ➤ Beurteilung erfolgt anhand der Erfüllung von Schutzzielen, welche in der Richtlinie R-21 (HSK & KSA 1993) festgehalten sind. ➤ Zum Zeitpunkt der qualitativen Evaluation möglicher Standortgebiete liegen gemäss HSK die notwendigen Kenntnisse für umfassende Abklärungen und Berechnungen noch nicht vor; deshalb hat die HSK die vorläufigen Beurteilungskriterien in ihrer Stellungnahme zur Standortauswahl für ein Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle festgehalten (HSK 1994): <ul style="list-style-type: none"> <i>Qualitativen Kriterien zur Langzeitsicherheit betreffen:</i> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins ➤ Hydrogeologische Verhältnisse ➤ Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung ➤ Konflikte mit anderen Nutzungen ➤ Explorier- und Prognostizierbarkeit <i>Qualitativen Kriterien zur Sicherheit von Bau und Betrieb betreffen:</i> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bautechnische Eignung des Gesteins ➤ Versiegelungsfähigkeit ➤ Erschliessung für Schwertransporte ➤ Gefährdung der Portalzone

Land (Aufsichtsbehörde)	Kriterien bzgl. der Standortauswahl
	<p><i>Quantitative Ausschlusskriterien</i> Im Zusammenhang mit dem Konzessionsgesuch für den Bau eines Sondierstollens für ein Endlager SMA am Standort Wellenberg hat die Sicherheitsbehörde vier Ausschlusskriterien zu folgenden Gesichtspunkten formuliert (HSK 2000):</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ausscheidung von wasserführenden Zonen ➤ Ausscheidung von Zonen mit gering mineralisierten Wässern ➤ Minimale Ausdehnung der Wirtgesteinsbereiche ➤ Wasserfluss in den verbleibenden Stollenabschnitten.
<p>Schweden (SKI)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aufsichtsbehörden machen keinerlei Auflagen für die Standortauswahl , daher fehlen entsprechende gesetzliche Vorgaben. ➤ Regierung hat ein Gesetz zur Finanzierung der Entsorgungskosten erweitert mit a) zeitlichen Vorgaben für die Standortauswahl, b) zur Zusammenarbeit von Aufsichtsbehörde und Antragsteller während der Standortauswahl und c) zur Anzahl der Standorte, die in die jeweils nächste Implementierungsphase übernommen werden sollen. ➤ Die Regierung hat einen Koordinator zur Unterstützung der Standortdiskussionen ernannt.

Offensichtlich weisen lediglich die spanischen Richtlinien einen ähnlichen Detaillierungsgrad auf, wie er im Bericht der IAEA vorgeschlagen wurde. Andere Länder wählten einen weniger "vorschriftsbetonten" Ansatz. Sie appellieren stattdessen an den "gesunden Menschenverstand" als Richtschnur für die Standortauswahl und bauen ihre Richtlinien letztlich vom Standpunkt der (Langzeit-) Sicherheit aus auf, d.h. der Erbringung eines ordnungsgemässen Sicherheitsnachweises, welcher die verbindlichen radiologischen Schutzziele erfüllt.

2.4.4 Die Gefahren von quantitativen Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterien gelangen in den nationalen Richtlinien zur Standortauswahl nur sehr beschränkt zur Anwendung. Äquivalente Ausschlusskriterien existieren aber unter Umständen bereits in anderen bestehenden nationalen Richtlinien, wie z.B. zur Nutzung von Nationalparks oder industriellen Einrichtungen in der Nähe von Ballungszentren usw.

Ausschlusskriterien werden gewöhnlich in der Anfangsphase („screening“) des Standortauswahlverfahrens angewandt. Sie können technischer (z.B. Abstand von bekannten geologischen Störzonen) oder gesellschaftspolitischer Art (z.B. keine Nationalparks) sein. Derartige Ausschlusskriterien sind unproblematisch: sogar ein grundsätzlich als sicherheitstechnisch günstig beurteilter Standort ist aufzugeben, falls er sozio-ökologisch klar akzeptierten Grundnormen widerspricht. Schwierigkeiten können jedoch während der Untersuchungsphase auftreten, wenn quantitative Kenngrößen bestimmt werden: Die Öffentlichkeit drängt oft bereits vor dem Beginn der genauen Standortuntersuchungen auf die Festlegung von Grenzwerten für einzelne Schlüsselparameter wie z.B. die hydraulische Durchlässigkeit und die Klüftigkeit. Diese extrem vereinfachte Sichtweise bedeutet, dass ein Überschreiten der kritischen Grenzwerte zwingendermassen zur Aufgabe des Standorts führt.

Ein Standort würde mit Sicherheit nicht weiter berücksichtigt werden, wenn die Untersuchungen in grossen Tiefen auf sehr junge Formationswässer oder auf vielversprechende Erdgas- und Erdöllagerstätten stiessen. Alle weiteren Anwendungen von zulässigen Grenzwerten sind für die Beurteilung der Eignung eines Standorts irreführend. Die Eignung eines Standorts muss zuerst auf der Grundlage der Beurteilung des Gesamtsystemverhaltens erfolgen (die in späteren Phasen erfolgt), das heisst auf der Basis von Sicherheitsanalysen und Umweltverträglichkeitsprüfungen. Im zweiten Schritt ist aufgrund der räumlichen Variabilität vieler Eigenschaften der Geosphäre zu erwarten, dass für viele Parameter auf kleinem Massstab stets „Ausreisser“ aufgezeichnet werden (z.B. Klufftransmissivität). Die Sicherheit ist nie von nur einem einzigen Parameter abhängig, sondern von der Wirksamkeit des Gesamtsystems bestimmt.

2.5 Internationale Projekte mit Sicherheitsanalysen für die Untersuchung generischer geologischer Endlageroptionen

Verschiedene generische Untersuchungen über Endlagersicherheit sind im internationalen Rahmen durchgeführt worden. Obwohl diese nicht standortspezifisch sind, liefern sie z.T. nützliche Hinweise über die Bedeutung von spezifischen Eigenschaften von Standorten oder Wirtgesteinen.

2.5.1 PAGIS

Die in den Jahren 1982 bis 1988 durchgeführte Studie diente in erster Linie der Förderung der Methodik von Langzeitsicherheitsanalysen zur geologischen Endlagerung in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union. Sie befasste sich mit Endlagerungsstrategien für verglaste hochaktive Abfälle an Standorten auf dem Festland in drei Typen von Wirtgesteinen: Steinsalz, Ton und Granit. Als Alternative wurde trotz erheblich geringerem Kenntnisstand eine Endlagerung in Sedimenten des Tiefseebodens in Erwägung gezogen.

Als Schlussfolgerung wurde festgehalten, dass betreffend der Machbarkeit einer sicheren Endlagerung für keine der untersuchten Gesteinsformationen berechnete Zweifel bestehen, solange angemessene Standorte ausgewählt und die Endlager ingenieurtechnisch richtig geplant und gebaut werden. Ferner wurde die Geosphäre für die betrachteten Mehrfachbarrierensysteme als wichtigste Barriere erachtet, da lange Transportzeiten einen wesentlichen Beitrag des radioaktiven Zerfalls ermöglichen. Entsprechend wurden diejenigen Modellparameter, welche die Transportzeiten in der Geosphäre beeinflussen, als die wichtigsten Kenngrößen der Langzeitsicherheit (Freisetzung im Grundwasser) identifiziert. Der bautechnischen Auslegung des Endlagers wurde hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine untergeordnete Rolle zugeordnet, obwohl festgestellt wurde, dass eine ungünstige Beeinflussung der Geosphäre durch das technische Barrierensystem zu vermeiden ist.

Die Option Tongestein bezog sich auf den Boom-Ton am Standort Mol (Belgien). Die

Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse zeigten die folgenden Schlüsselparameter auf: Grundwasserflussrate im Aquifer, Mächtigkeit der Tonformation und deren retardierende Eigenschaften.

Der hypothetische Referenzstandort für Granit basierte auf geologischen und hydrogeologischen Grundlagen von einem Granitaufschluss bei Auriat in Frankreich. Als alternative Standorte wurden der küstennahe Granit bei Barfleur (Frankreich) und ein fiktiver, mit mächtigen Sedimenten überdeckter Granit in Grossbritannien betrachtet. In den Resultaten zeigte sich die relative Bedeutung einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit und der Sorptionseigenschaften von Granit. Insbesondere wurde der Qualität des Granits im Umfeld des Endlagers aufgrund der retardierenden Wirkung eine wichtige Rolle zugeteilt. Die Untersuchungen bestätigten die Bedeutung der Verdünnung für den Fall eines küstennahen Standorts und die Verzögerung der Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre durch die Sedimentdecke für den Standort in Grossbritannien.

Die Untersuchungen zum Steinsalz beruhten auf den Gegebenheiten des Salzstockes Gorleben in Deutschland. Bei einer normalen zeitlichen Entwicklung des Standorts und des Endlagersystems ergaben sich keine Freisetzungen in die Biosphäre, d.h. sofern der Salzstock nicht durch Subrosion verändert wird und sich dabei hydraulische Verbindungen zwischen dem Endlager und den Grundwasserleitern der geologischen Deckschichten bilden.

2.5.2 PACOMA

Die europäische PACOMA-Studie wurde im Jahre 1991 abgeschlossen. Sie behandelte Abfallinventare für schwach- und mittelaktive Abfälle, zwei Einlagerungsmethoden und drei Arten von Steinsalzvorkommen – Salzstock, Salzkissen und geschichtete Steinsalzablagerungen (wie in der PAGIS-Studie).

Die Zielsetzung von PACOMA galt der Optimierung der Parameter für die Endlagerauslegung für eine maximale Wirksamkeit des Gesamtsystems. Folglich enthält die Studie keine relevanten Schlussfolgerungen bezüglich

Standortauswahlkriterien, obwohl die Barrierenwirkung der Geosphäre - ähnlich wie bei PAGIS - im Sinne einer Verzögerung bzw. Limitierung der Radionuklidfreisetzung als wichtiger Faktor für die Langzeitsicherheit des Gesamtsystems identifiziert wurde.

2.5.3 EVEREST

Zielsetzung der europäischen EVEREST-Studie von 1996 war die Beurteilung der Auswirkungen von Variabilitäten und Unbestimmtheiten in den Modellparametern auf die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers für verglaste hochaktive Abfälle bzw. abgebrannte Brennelemente und langlebige mittelaktive Abfälle. Für die Referenzformationen wurden Ton, Granit und Steinsalz herangezogen (Standorte wie früher in PAGIS), um Variationen in den Modellparametern, den konzeptuellen Modellen, den Szenarien und zukünftigen Endlagerbedingungen zu untersuchen. Es wurde erwartet, dass die Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen zur Formulierung von Zielsetzungen für die Standortcharakterisierung beitragen würden, indem sie Empfehlungen für die Durchführung von Felduntersuchungen und Auswertung natürlicher Analoge hervorbringen.

Für den Ton wurden als Schlüsselparameter im Hinblick auf die berechnete Strahlendosis vor allem die Eigenschaften der Tonbarriere identifiziert, insbesondere die effektive Mächtigkeit, die Diffusionskoeffizienten und die Retardationsfaktoren (Sorptionsparameter) für die massgebenden Radionuklide wie Radioisotope von Cäsium, Neptunium, Iod, Selen und Kohlenstoff. Im Fall der langlebigen mittelaktiven Abfälle, wo Freisetzungen für normale zeitliche Entwicklungen des gesamten Endlagersystems berechnet wurden, spielten die Kenngrößen der letztlich verdünnenden Aquifere eine wesentliche Rolle. Aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Wirksamkeit des Wirtgesteins waren im Steinsalz, zusätzlich zu den Grundwasserfließraten, auch Salzaufstieg (Diapirismus) und tiefenabhängige Subrosionsraten ausschlaggebend. Die hydraulische Durchlässigkeit (Klüftung) des Wirtgesteins und die Sorptionskoeffizienten für sicherheitsrelevante Radionuklide waren die Schlüsselparameter für die Endlagerung langlebiger mittelaktiver wie auch hochaktiver Abfälle in Granit.

Die Ergebnisse der Studien sind in gewissem Masse durch die (Über-)Bewertung der Barrierenwirkung der Geosphäre gegenüber der Wirkung des Nahfelds geprägt. Unbestimmtheiten in Daten und Modellen sowie Szenarienvariationen betrafen hauptsächlich die Geosphäre, während die Nahfeldparameter grösstenteils konstant gehalten wurden. Veränderungen im Quellterm des Nahfelds, zum Beispiel durch wechselnde Löslichkeitslimiten einzelner Elemente oder Anpassungen der Endlagergeometrie, bewirkten aufgrund der sehr hoch angesetzten Wirksamkeit der Geosphärenbarriere lediglich geringfügige Schwankungen der Strahlendosis, so dass Veränderungen in der Wirkung des Nahfelds tendenziell überdeckt wurden.

2.6 Rolle der Langzeitsicherheitsanalyse bei der Standortauswahl

Die Analyse der Langzeitsicherheit beinhaltet grundsätzlich die Beurteilung der Sicherheit des gesamten Endlagersystems und nicht nur der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Standortes. So ist es möglich, dass unterschiedliche Standorte - sogar in Anbetracht verschiedener Wirtgesteinstypen und Endlagerkonzepte - mit unterschiedlicher Gewichtung der technischen und natürlichen Sicherheitsbarrieren letztlich die selben Anforderungen bzgl. der Langzeitsicherheit erfüllen können.

Im Prinzip ist es denkbar, bei gleichen Wirtgesteinstypen und gleicher technischer Auslegung des Endlagers vergleichende Langzeitsicherheitsanalysen durchzuführen und damit die spezifischen sicherheitsrelevanten Faktoren verschiedener Standorte miteinander zu vergleichen (SKB 1997 & 1998). In der Praxis erweist sich ein solches Verfahren allerdings aus folgenden Gründen als problematisch:

- Die Auflösung (Empfindlichkeit) der Sicherheitsanalyse erweist sich dafür im allgemeinen als ungenügend (z.B. wegen lückenhaftem Prozessverständnis, Verwendung eines konservativer Modellansatzes mit vereinfachenden Annahmen, unbestimmte Datengrundlage).
- Sobald eine genügend hohe Sicherheit erreicht wird (z.B. durch nachgewiesene Einhaltung des Schutzzieles) erhöht sich die Bedeutung anderer, nicht

notwendigerweise sicherheitsrelevanter Standortkriterien.

- Der Aufwand, um über die Analyse der Langzeitsicherheit zu sicheren und belastbaren Aussagen zu kommen, ist gross, insbesondere was die Akquisition standortspezifischer Daten betrifft; er kann innerhalb eines nationalen Endlagerprogrammes gewöhnlich nur für eine sehr beschränkte Zahl (oft nur ein bis zwei) potentieller Standorte erbracht werden.

Es erscheint damit realistischer, dass durch die Sicherheitsanalysen für verschiedene Wirtgesteinstypen, charakteristische Standorte, Endlagerkonzepte usw. hilfreiche "sekundäre" und meistens qualitative Standortkriterien abgeleitet werden. Wie die bisherigen Ausführungen zeigen, wurden diese Arbeiten im Rahmen internationaler Projekte bereits abgewickelt.

Inwieweit nationale Endlagerprogramme solchermassen abgeleitete Standortkriterien oder auch die direkten Resultate ihrer eigenen Langzeitsicherheitsanalysen zur Standortauswahl verwendet haben, ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels.

3 LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN FÜR GEOLOGISCHE ENDLAGER UND IHR EINFLUSS AUF NATIONALE PROGRAMME ZUR STANDORTAUSWAHL

Verfahren zur Standortauswahl für geologische Endlager für radioaktive Abfälle variieren nicht nur stark zwischen den nationalen Programmen, sie haben sich in den letzten beiden Jahrzehnten auch erheblich entwickelt. Bis in die achtziger Jahre hatte die Endlagerung radioaktiver Abfälle in den meisten Ländern eine relativ geringe politische Bedeutung und die Standortauswahl basierte auf eher einfachen Auswahlkriterien (z.B. Morsleben, WIPP, Oak Ridge, sowjetische Standorte). Insbesondere für militärische Abfälle herrschten eher lockere Entsorgungspraktiken, die im Lichte des Kalten Krieges betrachtet werden sollten – als die Risiken eines grossen nuklearen Konfliktes sämtliche Belange von Langzeit-Konsequenzen der Abfallentsorgung vergleichsweise trivial erscheinen liessen. Sicherheitsanalysen, falls überhaupt festgehalten, konzentrierten sich in der Regel auf die Bestätigung der Eignung eines Standorts, anstatt selbst ein Bestandteil des Verfahrens zur Standortwahl zu sein. Die Tendenz, Sicherheitsanalysen als eine Schlüsselkomponente in die Standortauswahl einzubeziehen und als Instrument zur koordinierten Entwicklung eines Sicherheitskonzepts zu verwenden, welches die Eigenschaften der technischen und natürlichen Barrieren verbindet, kann wahrscheinlich bis zur zukunftsweisenden Serie der schwedischen Sicherheitsanalysen KBS-1, KBS-2, KBS-3 (KBS 1977, KBS 1978, KBS 1983) zurückverfolgt werden. Besonders über KBS-3 wurde sehr ausführlich berichtet, sie wurde offen internationalen Kritiken ausgesetzt und diente als Vorbild für viele spätere Sicherheitsanalysen auch anderer Länder.

In den achtziger und neunziger Jahren wurde von verschiedenen nationalen und internationalen Organisationen eine grosse Anzahl von Sicherheitsanalysen veröffentlicht, die jedoch in sehr unterschiedlichem Masse in die Standortauswahl einbezogen waren. Auf der einen Seite gab es wenige sehr transparente Programme für die Standortwahl (Schweden, Finnland, Schweiz), wo Serien von Sicherheitsanalysen die Bedeutung von Meilensteinen hatten. Diese Programme durchliefen einen oder mehrere generische oder regionale Schritte, bevor mögliche Standortkandidaten identifiziert wurden. Am anderen Ende des Spektrums wurden Sicherheitsanalysen für

Standorte durchgeführt, die bereits vorher ausgewählt waren (z.B. Deutschland und Belgien). Zudem gab es Sicherheitsanalysen, deren unmittelbare Zielsetzung nicht der Standortauswahl galt, sondern die Machbarkeit eines Konzepts (z.B. Kanada, Spanien, Japan) oder die Darstellung und Prüfung der Methodik von Sicherheitsanalysen selbst veranschaulichen sollten (z.B. PAGIS-Studie der europäischen Kommission, PAGIS 1988). Einige Programme gaben zwar vor, eine strukturierte technische Vorgehensweise für die Standortwahl zu haben, wurden aber in Wirklichkeit offenbar von politischen Einflüssen (z.B. USA und Grossbritannien) vorangetrieben und wendeten Sicherheitsanalysen nicht planmässig an. Zum Beispiel wurden Sellafield und Dounreay in Grossbritannien (und zuvor Billingham) und Yucca Mountain in den USA ausgewählt, ohne dass vergleichende Sicherheitsanalysen einen wesentlichen Beitrag zum Verfahren leisteten.

3.1 Übersicht zu nationalen Sicherheitsanalysen

3.1.1 Belgien

Die Vorgehensweise zur Entwicklung einer zentralen Einrichtung für die Abfallkonditionierung und die Endlagerung am bereits bestehenden Nuklearstandort Mol wurde bereits in den späten siebziger Jahren festgelegt. Als Wirtsgestein für das Endlager wurde der Boom-Ton identifiziert. Zum Verfahren der Standortauswahl existiert nur wenig Literatur, doch lag der Schwerpunkt deutlich auf qualitativen Kriterien. Aufgrund des plastischen Sediments mit sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten basierte das Sicherheitskonzept für den Boom-Ton auf der Abwesenheit von advektiven Grundwasserflüssen. Unter solchen Bedingungen ist es einfach, sogar ohne eine volle Sicherheitsanalyse, überzeugende Sicherheitsargumente bereitzustellen.

Seit Mitte der achtziger Jahre läuft ein umfassendes Programm zur Standortcharakterisierung. Den Schwerpunkt bildet das HADES Untertage-Labor (zugleich ein Ort für umfangreiche, von der europäischen Gemeinschaft finanzierte, gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten). Zwei bedeutende Sicherheitsanalysen wurden für diesen Standort bereits publiziert, welcher auch als Referenzstandort für

Ton in die PAGIS-Studie aufgenommen wurde (SCK•CEN 1992, SCK•CEN 1994). Bisher ergaben sich noch keinerlei Anzeichen für irgendwelche kritischen Probleme, die diesen Standort als ungeeignet erscheinen liessen.

3.1.2 Deutschland

Programme zur Endlagerung radioaktiver Abfälle im tiefen Untergrund wurden sowohl in der Bundesrepublik Deutschland als auch in der Deutschen Demokratischen Republik in den sechziger und siebziger Jahren begonnen. Hierzu wurden die stillgelegten Salzgruben an den Standorten Asse und Morsleben ausgewählt und für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle genutzt. Das Auswahlverfahren orientierte sich in erster Linie an der Verfügbarkeit und der bergmännischen Nutzbarkeit der untertägigen Hohlräume. Sicherheitsanalysen für Endlager waren zum Zeitpunkt der Auswahl weitgehend unbekannt und wurden dementsprechend auch nicht durchgeführt. Beim Endlager Morsleben wurden für die Genehmigungen späterer Einlagerungsphasen erste Sicherheitsbetrachtungen zur nachträglichen Bestätigung des Einlagerungskonzeptes durchgeführt.

Beim geplanten Endlager Konrad wurde zunächst ebenfalls von der Verfügbarkeit des stillgelegten Erzbergwerks ausgegangen und die Eignung des Standortes hinsichtlich der Einlagerung nicht-wärmeproduzierender Abfälle untersucht. In diesem Zusammenhang wurden erste Betrachtungen zu Ausbreitungsvorgängen für Radionuklide in der Nachbetriebsphase durchgeführt. Im späteren Verlauf wurden Langzeitsicherheitsanalysen auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zur Bestätigung der Eignung des Standortes und als Unterlage für die Genehmigung des Endlagers durchgeführt (PTB 1986). Vor der Auswahl des Standortes und für einen möglichen Vergleich mit Alternativen wurden keine Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt.

Für die Auswahl eines Salzstocks zur Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden wenige und einfache Eignungskriterien aufgestellt, die sich auf die geologische Gesamtsituation konzentrierten. Für die spezifische Auswahl des Salzstockes in Gorleben waren aber letztendlich politische Argumente ausschlaggebend. Das Auswahlverfahren ist insgesamt wenig dokumentiert und somit schwer nachvollziehbar.

Für die nachträgliche Bestätigung der Standortauswahl wurden Sicherheitsanalysen im Rahmen von Forschungsprojekten des Bundes durchgeführt, in denen vorläufige Daten insbesondere im Hinblick auf die Standortverhältnisse verwendet wurden (PSE 1985, GSF 1991). Vor der Auswahl des Standortes und für einen möglichen Vergleich mit Alternativen wurden ebenfalls keine Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt.

3.1.3 Schweden

Das schwedische Programm für die Entsorgung radioaktiver Abfälle entwickelte sich in den späten siebziger und frühen achtziger Jahren sehr rapide. Vorangetrieben wurde es von einem Gesetz, das die Betriebsgenehmigung für Kernkraftwerke mit dem Nachweis für die Machbarkeit der Endlagerung von radioaktiven Abfällen koppelte. Die KBS-1 Studie zur Endlagerung von verglasten hochaktiven Abfällen (KBS 1977, KBS 1978) wurde bald durch KBS-3 (KBS 1983) abgelöst, nachdem die Entscheidung gefallen war, den abgebrannten Kernbrennstoff keiner Wiederaufarbeitung zu unterziehen, sondern die Brennelemente direkt endzulagern.

Schweden verfügt über ein gut strukturiertes und umfassend dokumentiertes Programm für die Standortauswahl für ein geologisches Endlager für die direkte Endlagerung von abgebrannten Brennelementen und für die (bis vor kurzem geplante) gemeinsame Endlagerung von langlebigen mittelaktiven Abfällen. Dieses Programm beinhaltet schwerpunktmässig eine Reihe von umfassenden Sicherheitsanalysen zu verschiedenen Projektphasen – durchgeführt nicht nur von der ausführenden Organisation (SKB, ehemals KBS; SKB 1992), sondern auch von der Aufsichtsbehörde (SKI 1996). Die Sicherheitsanalysen konzentrieren sich hauptsächlich auf das ursprüngliche KBS-3 Endlagerungskonzept, jedoch wurden in den "WP-Cave" (SKAGIUS & SVEMAR 1989) und "PASS-Studien" (PASS 1992) auch andere Optionen untersucht. Im Vergleich kann festgestellt werden, dass die Standortauswahl des geologischen Endlagers in mittlerer Tiefe für schwach- und mittelaktive Abfälle (SFR, in der Nähe des Forsmark-Reaktorstandorts) weniger transparent war und weniger gut dokumentiert wurde als dies für das Endlager für hochaktive Abfälle der Fall ist.

Wie auch in Finnland, konzentrierten sich Projekte in Schweden gänzlich auf die kristallinen Gesteine des fenno-skandinavischen Schilds. Die SKB-Serie von Langzeitsicherheitsanalysen war bis SR 97 (SKB 1999) insofern generisch, als das Konzept für ganze Bereiche von Eigenschaften des Grundgebirges untersucht wurde, ohne Standorte direkt zu vergleichen. Seit der Zeit der KBS-3-Studie wurden standortspezifische Daten von einer grossen Anzahl von Lokalitäten in Schweden verwendet. Unmittelbar vor SR 97 war die Schlussfolgerung, dass die Sicherheit eher standortunabhängig sei und daher beachtliche Flexibilität bei der Standortwahl herrsche. Mittlerweile muss SKB einen oder mehrere potentielle Standorte für die Detailuntersuchungen nennen. Als Startpunkt wird sie den Vergleich dreier Standorte aus der SR 97-Studie verwenden. Der letzte Bericht in der Serie (SR 97; SKB 1999) vergleicht drei Modellstandorte aufgrund von Charakterisierungsdaten von drei Lokalitäten. Wie in allen Studien, die auf dem KBS-3 Konzept basieren, ist die lange Lebensdauer des Abfallbehälters die Hauptkomponente des Sicherheitskonzepts. Der Unterschied zwischen den Standorten (der hauptsächlich auf ihre Rückhalteeigenschaften für Ra-226 zurückzuführen ist) konzentriert sich auf die Konsequenzen aus der Freisetzung aus ein paar wenigen schadhaften Kanistern. Die durchgeführte Analyse wurde schliesslich zur Formulierung von Anforderungen an das Wirtgestein und an das Erkundungsprogramm verwendet, aber auch zur Festlegung der funktionellen Anforderungen an das technische Barrierensystem.

Die Sicherheitsanalysen durch die schwedische Aufsichtsbehörde (SKI) haben immer mit hypothetischen Standorten gearbeitet, deren Eigenschaften aus den Charakteristiken von einer Auswahl von realen Standorten künstlich erstellt wurden.

3.1.4 Finnland

Die Verantwortung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem geologischen Endlager wurde ursprünglich von den Betreibern der beiden finnischen Kernkraftwerke getragen (IVO und TVO), dann aber in der gemeinsamen Gesellschaft Posiva Oy zentralisiert. Das finnische Programm stand vom Konzept her und durch eine enge Zusammenarbeit stets in enger Verbindung mit dem Programm des schwedischen Nachbarn.

In beiden Ländern bietet sich das Kristallingestein des fenno-skandinavischen Schields am ehesten als Wirtgestein an. Strukturierte Verfahren zur Standortwahl wurden erstellt, in denen regelmässige Aktualisierungen der Sicherheitsanalyse vorgesehen waren. Im letzten Stadium der Standortauswahl kam es kürzlich zu der ungewöhnlichen Situation, dass die lokalen Gemeinden der beiden ausgewählten Reaktorstandorte darum wetteiferten, das Endlager realisieren zu dürfen. Die endgültige Entscheidung wurde kürzlich von Posiva Oy gefällt und traf den Standort Olkiluoto. Heute gilt als wahrscheinlich, dass dort das weltweit erste Endlager für hochaktive Abfälle in Betrieb genommen wird. Der Grundsatzentscheid, mit der Planung für dieses Endlager fortzufahren, wurde vom finnischen Parlament am 18. Mai 2001 ratifiziert.

Finnische Analysen zur Langzeitsicherheit betrachten die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente von Leichtwasserreaktoren in einem Endlager vom Typ "KBS-3" (YJT 1992, POSIVA 1996 & 1999). Die Hauptkomponente des Sicherheitskonzepts ist der extrem langlebige Kanister (ursprünglich aus reinem Kupfer, später jedoch der von POSIVA Oy entwickelte ACP-Kanister aus Stahl und Kupfer). Die Serie von Sicherheitsanalysen basiert zunehmend auf spezifischen Daten von Untersuchungsstandorten (speziell die aktuelle – TILA 99). Die Resultate sind aber aufgrund der ausgezeichneten technischen Barrieren - von seiner geographischen Lage abgesehen (Verdünnung) - verhältnismässig unempfindlich gegenüber den Eigenschaften des potentiellen Standorts. Die Serie von Sicherheitsanalysen ist durch einen simplen robusten Ansatz gekennzeichnet. Man ist sich jedoch einig, dass dieser in der nächsten geplanten Analyse – die im Jahre 2010 für eine Baugenehmigung fällig wird – detaillierter werden soll.

Die Zielsetzung der aktuellen Analysen zur Langzeitsicherheit im finnischen Endlagerprogramm lag einerseits wiederum in der Beurteilung des gewählten Endlagerkonzepts und andererseits in der Beurteilung der standortspezifischen Gegebenheiten der (vier) ausgewählten Standortregionen (zwei Standorte im Landesinnern - zwei an der Küste). Im Ergebnis erwiesen sich die Sicherheitsanalysen als vergleichbar und die Resultate

lagen innerhalb der gesetzlichen Bestimmungen. Wichtige Erkenntnisse aus den finnische Arbeiten beinhalten, dass eine vergleichende Beurteilung von Standorten in Bezug auf die Langzeitsicherheit einen vorrangig qualitativen Charakter haben soll und eine quantitative "Rangfolge" der Standorte aufgrund der berechneten zeitlichen Radionuklidfreisetzung oder aufgrund der berechneten Strahlendosis wenig sinnvoll erscheint. Vielmehr erscheint - bei erfüllten gesetzlichen Bestimmungen - eine Fokussierung auf geotechnische Faktoren äusserst sinnvoll, da günstige Bau- und Betriebsbedingungen für das Endlager grundsätzlich eine gute Basis für die Langzeitsicherheit darstellen.

3.1.5 Frankreich

Eine nationale Bewertung von potentiellen Wirtsgesteinen führte Mitte der achtziger Jahre zur Identifizierung einer Anzahl von Optionen (die auf "einfachen" Auswahlkriterien beruhen) und zur Entscheidung, mit der Errichtung von mehreren Untertage-labors bei der Charakterisierung zweigleisig – im Ton und im kristallinen Grundgebirge – weiterzufahren. Der Standort für das Untertagelabor im Ton steht bereits fest. Das Kristallin-Programm ist zur Zeit durch Akzeptanzprobleme in der Öffentlichkeit behindert. Im übrigen verpflichtet das Gesetz vom 30. Dezember 1991¹ die französische Regierung, neben der reversiblen oder irreversiblen geologischen Endlagerung der hochaktiven und langlebigen Abfälle auch alternative Entsorgungskonzepte zu untersuchen, nämlich die Separation und Transmutation langlebiger radioaktiver Isotope sowie die langfristige Zwischenlagerung der Abfälle an der Oberfläche.

Verantwortliche Organisation für die Entwicklung des französischen Endlagerprogramms ist die ANDRA, die einige Sicherheitsanalysen von potentiellen Standorten zwar durchgeführt, jedoch kaum offen publiziert hat. Die im Rahmen der PAGIS-Studie (PAGIS 1988) der europäischen Kommission veröffentlichten Analysen für zwei französische Kristallin-Standorte (Aureat, Barfleury) sind rein konzeptueller Natur und beinhalten keine vollständige sicherheitstechnische Beurteilung.

¹ Loi no. 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (travaux préparatoires)

3.1.6 Grossbritannien

In Grossbritannien wurde das Endlagerprogramm für hochaktive Abfälle bis zum Beginn der Charakterisierung einer Reihe von F+E Standorten im Kristallin (die aufgrund einfacher geologischer und hydrologischer Kriterien ausgewählt worden waren) durchgeführt, bevor es aus politischen Gründen in den frühen achtziger Jahren aufgegeben wurde. Die damaligen generischen Sicherheitsanalysen von der NRPB waren im Vergleich zu heutigen Standards ziemlich stark vereinfacht. Es wurde nicht versucht, potentielle Endlagerstandorte zu identifizieren, obwohl geologisch geeignete Regionen auf Karten, die als Beitrag für einen europäischen Atlas produziert wurden, definiert wurden.

Das Programm von Nirex für die geologische Endlagerung von mittelradioaktiven Abfällen litt erheblich unter politischen Schwierigkeiten. Mitte der achtziger Jahre wurden die Untersuchungen an vier potentiellen Standorten für oberflächennahe Endlager abgebrochen und die geologische Endlagerung von allen mittelaktiven Abfällen zur Regel gemacht. Die vier Standorte waren ausschliesslich anhand technischer Richtlinien selektiert worden, in Kombination mit der Verfügbarkeit von Land und der Vorgehensweise "Entscheidung – Bekanntgabe – Verteidigung".

Ein ähnlicher Ansatz wurde für geologische Endlager verwendet. Ein anscheinend technisches Verfahren für die Standortwahl, einschliesslich einer öffentlichen Anhörung, verlor einiges an Glaubwürdigkeit, als sich die Auswahl auf die beiden britischen Wiederaufarbeitungsanlagen und schliesslich auf Sellafield (von Anfang an vom Hauptproduzenten der Abfälle, BNFL, bevorzugt) einschränkte. Im öffentlichen Baugesuch der Nirex für ein Untertagelabor in Sellafield wurde das verwendete MADA-Verfahren (Multi-Attribute Decision Analysis) erstmals publiziert (NIREX 1997). Die getroffenen Annahmen wurden daraufhin stark kritisiert. Sicherheitsanalysen spielten im MADA-Verfahren eine Nebenrolle (Einsatz von CASCADE, einer unveröffentlichten, eher einfachen Sicherheitsanalyse, die den Vergleich verschiedener Typen von Standortregionen erlaubt). Ein Projekt zur Evaluation von Standorten auf der Grundlage von grösstenteils generischen Daten (standortspezifische Angaben waren

nicht verfügbar) ergab eine einfache Rangliste. Es wurde festgehalten, dass, wenn alle Standorte Sicherheitsziele erfüllen würden, die Sicherheit im MADA-Verfahren kein hohes Gewicht bekommen sollte, obwohl manche Standorte deutlich besser abschnitten als andere. Dieser taktische Fehler (es kam noch hinzu, dass "deutlich bessere" Konzepte bzw. Standorte degradiert wurden) war einer der Hauptgründe für das Versagen von Nirex im öffentlichen Baugesuch.

3.1.7 Japan

In Japan wurde die Organisation für die Entwicklung eines Endlagers für hochaktive Abfälle erst im Jahr 2000 gegründet. Davor war die Unterstützung der F+E Arbeiten an diesem Projekt überwiegend Aufgabe von JNC (vormals PNC). JNC hat bereits zwei grosse Sicherheitsanalysen (H-3 und H-12) durchgeführt, um das Konzept für die Endlagerung hochaktiver Abfälle aufzuzeigen und grundsätzlich zu zeigen, dass in Japan ein Standort für solch ein Endlager gefunden werden kann (PNC 1992, JNC 2000 a, b, c & d). Sowohl Sediment- als auch Kristallingesteine werden berücksichtigt und die Sicherheitsanalysen sind relativ generisch, obwohl sich speziell H-12 eher auf die Kenngrössen aus den Untersuchungslabors Tono und Kamaishi konzentriert, auch wenn diese als schlechte Beispiele für potentielle Wirtsgesteine betrachtet werden müssen. Japans ausgeprägte tektonische Aktivität hat dazu geführt, dass in diesen Berichten zur Standortwahl ein grosses Gewicht auf die Vermeidung von Störungen des Endlagers aufgrund von Vulkanismus, grossen Verschiebungen entlang von Störzonen oder Hebungen bzw. Erosion gelegt wird.

Für andere Abfallkategorien sind weitere Endlagerprojekte geplant. Es ist beabsichtigt, bei der Wiederaufarbeitungsanlage in Rokkasho die Voraussetzungen für ein Endlager in mittlerer Tiefe für "hochaktive Beta/Gamma-Abfälle" zu erkunden. Zur Anlage gehört bereits ein Endlager an der Oberfläche für schwachaktive Abfälle. Eine Sicherheitsanalyse im Zusammenhang mit diesem Projekt (nicht veröffentlicht, aber von der Nagra nachgeprüft) sollte dabei helfen, die geeignete Lage dieser Einrichtung im Gebiet von Rokkasho zu finden und ihre technische Ausführung zu entwickeln.

Die Zuständigkeit für TRU-Abfälle (charakterisiert durch einen hohen Gehalt an Alpha-

emittierenden Radionukliden) wurde noch nicht festgelegt. Allerdings führte kürzlich eine Arbeitsgemeinschaft eine vollständige Sicherheitsanalyse für diesen Abfalltyp durch und benutzte dafür im wesentlichen die gleiche geologische Datengrundlage wie für H-12 (JNC/FEPC 2000).

3.1.8 Kanada

Die Grundsätze des kanadischen Programms für geologische Endlagerung (für abgebrannten Brennstoff aus Natururan von CANDU-Reaktoren) stammen aus den späten siebziger bzw. frühen achtziger Jahren. Damals wurde beschlossen, sich auf das plutonische Kristallingestein des kanadischen präkambrischen Schilds zu konzentrieren. Das Wirtsgestein wurde auf einen geologisch ausgelegten Review abgestützt, um die potentiell geeignetste Gesteinsformation in Ontario auszuwählen – da es wahrscheinlich erschien, dass das erste Endlager in der Provinz mit der höchsten Konzentration an Kernkraftwerken gebaut würde (DYNE 1975). AECL wurde für die Entwicklung des Endlagerkonzepts ausgewählt, wobei die Arbeiten hauptsächlich im Whiteshell-Forschungslabor durchgeführt werden sollten. Zur Veranschaulichung der Technologie für die Standortcharakterisierung diente der nahe gelegene Lac du Bonnet Batholit, wo Mitte der achtziger Jahre ein Felslabor errichtet wurde.

Basierend auf der Lokalität des Felslabors wurde während fast zehn Jahren eine umfangreiche standortbezogene Sicherheitsanalyse (für einen Referenzstandort) für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente durchgeführt. Die Sicherheitsanalyse wurde in eine weitreichende (aber nicht umfassende) Umweltverträglichkeitsprüfung integriert (AECL 1994 a & b). Diese sollte zeigen, dass der generische konzeptuelle Rahmen für die Endlagerung abgebrannter Brennstoffe reichte, um den Schritt zum Standortwahl-Programm zu erlauben. Einige wichtige Charakteristiken dieser Sicherheitsanalyse sind:

- ihre probabilistische Grundlage, aufgebaut auf dem Code SYVAC; dieser Code war von solch zentraler Bedeutung für das kanadische Programm, dass die gesetzlichen Bestimmungen in Form von SYVAC Resultaten spezifiziert wurden!
- ein Abbrechen der quantitativen Berechnungen nach 10'000 Jahren, wodurch die

Analyse zu einem Zeitpunkt angehalten wurde, an dem die vorausgesagten Konsequenzen markant ansteigende Trends aufwiesen, und Vergletscherungsszenarien nur ansatzweise für die Biosphärenmodellierung berücksichtigt wurden (in Schweden und Finnland als wichtig befunden)

- die Annahme extrem guter geologischer Bedingungen (spezifisch für das Felslabor Whiteshell) im Vergleich zu anderen Sicherheitsanalysen für kristalline Gesteine
- ein extrem komplexes, iteratives internes Review-Verfahren, was dazu führte, dass ein kleines Projektteam über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich Text neu entwarf
- die daraus entstandenen dicken Berichte, die auf jeden, der nicht mit dem Projekt vertraut ist, eher unverständlich wirken
- Tadel an der selektiven Wahl "ungewöhnlicher" Gesteinsbedingungen und daran, dass die Öffentlichkeit in den vorangegangenen 10 Jahren, in denen externe Review-Gruppen tätig waren, nicht einbezogen wurde

Der letzte Faktor war entscheidend, und die negative Reaktion auf diese Arbeit hat dazu geführt, dass AECL die Verantwortung für diese Aufgabe verlor, das Whiteshell-Labor geschlossen wurde und derzeit das gesamte Programm zur Endlagerung hochaktiver Abfälle in Kanada stagniert.

3.1.9 Schweiz

Seit der Entwicklung des Konzepts für getrennte geologische Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle sowie für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle wird das Verfahren der Standortwahl in der Schweiz strukturiert und offen transparent durchgeführt. Wie das schwedische, wurde auch das schweizerische Programm in den frühen achtziger Jahren durch die Kopplung der Genehmigung von Kernkraftwerken mit dem Nachweis, dass die Entsorgung der radioaktiven Abfälle gewährleistet ist, zur raschen Entwicklung gezwungen.

Für schwach- und mittelaktive Abfälle wurde eine Anzahl von technischen und sozio-politischen Kriterien eingesetzt, um ursprünglich 100 potentielle Standorte zu selektieren, die erst auf zwanzig und schliesslich auf drei Kandidaten eingeschränkt

wurden. Einer dieser drei Standorte wurde im Projekt Gewähr (1985) einer vollen Sicherheitsanalyse unterzogen, in der Absicht, damit die Machbarkeit des Konzepts zu demonstrieren (NAGRA 1985 a & b). Im Anschluss daran wurden jedoch für alle drei Standorte (und einen später ausgewählten Standort – Wellenberg) Sicherheitsanalysen auf der Grundlage der Daten aus den jeweiligen Voruntersuchungen durchgeführt (NAGRA 1988 a, b & c, NAGRA 1993 a). Diese Sicherheitsanalysen stellten einen wichtigen Input für die Selektion des bevorzugten Standortes (Wellenberg) dar. Aufgrund der bei allen vier Standorten gefundenen Sicherheitsreserven im Endlagerkonzept (Einlagerungsstollen in einem Berg mit horizontalem Zugangsstollen) wurden jedoch neben der Sicherheitsanalyse weitere Faktoren für die Wahl des Standortes Wellenberg beigezogen. Anschliessend wurde im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für das Endlager am Standort Wellenberg eine zusätzliche Sicherheitsanalyse erarbeitet (NAGRA 1994). Ferner wurde eine erste Bewertung eines angepassten Lagerkonzepts durchgeführt, das es erlauben würde, die Abfälle bis zu 100 Jahren nach Einlagerung zu überwachen und ohne grosse Schwierigkeiten zurückzuholen (NAGRA 1998). Die vorläufig letzte Ueberarbeitung des Projektes erfolgte im Rahmen einer Anpassung des Konzeptes an die Empfehlungen der schweizerischen "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (EKRA 2000) im Hinblick auf eine Ueberwachung des Endlagers und die Rückholbarkeit der Abfälle (GNW 2000).

Das geplante Endlager für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle kann verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, direkt konditionierte abgebrannte Kernbrennstoffe (UO₂ und MOX) und eine Auswahl von langlebigen mittelaktiven Abfällen aufnehmen, obwohl sich die detaillierten Sicherheitsanalysen bis heute vor allem auf die zwei erstgenannten Abfalltypen konzentrieren (NAGRA 1985 c & d, NAGRA 1993 b, NAGRA 1988 d). Aufgrund der fortwährenden Hebung der Alpen im Süden und der Komplexität der verschiedenen Permokarbontröge sowie des Jura im Norden reduzieren Ausschlusskriterien die potentiellen Standortregionen für ein derartiges Endlager auf einen schmalen Streifen im Norden des Landes. In dieser Region stellen das kristalline Grundgebirge und Sedimente im Hangenden potentielle Wirtgesteine dar. Frühe Sicherheitsanalysen konzentrierten sich auf die kristalline

Variante (NAGRA 1985 c & d, NAGRA 1993 b), aber die späteren Evaluationen von möglichen Sedimentoptionen hoben mit Hilfe der Sicherheitsanalyse die relevanten Charakteristiken von zwei potentiellen Formationen, dem Opalinuston und der Unteren Süsswassermolasse, hervor. Dies führte zur Wahl des viel homogeneren Opalinuston im nördlichsten Landesteil als bevorzugte Variante für spätere Felduntersuchungen (NAGRA 1988 d) und der Unteren Süsswassermolasse im Schweizerischen Mittelland als Reserveoption. Die Arbeiten an der nächsten grossen Sicherheitsanalyse für hochaktive Abfälle haben bereits begonnen. Die Berichterstattung für das Projekt Entsorgungsnachweis ist für Ende 2002 vorgesehen.

3.1.10 Spanien

In einem Programm, das in den späten Achtzigern initiiert wurde, wurden kristallines Grundgebirge, Sedimentgesteine und Salzstöcke als potentielle Wirtsgesteine für ein geologisches Endlager für hochaktive Abfälle identifiziert. Für jeden dieser Gesteinstypen wurden generische Sicherheitsanalysen durchgeführt (ENRESA 1998), die jedoch nicht gross publiziert wurden (ausschliesslich auf Spanisch). Derzeit herrscht in Spanien bei den Arbeiten zur Standortauswahl ein zehnjähriges Moratorium, obwohl die Enresa aktiv an Projekten in relevanten Gesteinen in Zusammenarbeit mit anderen Ländern (z.B. im Felslabor Grimsel, dem Sondierstollen Mont Terri, dem Versuchsbergwerk Mol, dem Untertagelabor Asse) beteiligt ist.

3.1.11 USA

In den USA laufen zwei Grossprojekte für geologische Endlager: Das kürzlich genehmigte WIPP-Endlager für militärische Abfälle mit hohem Gehalt an Alpha-emittierenden Radionukliden (TRU-Abfälle) und das Yucca Mountain-Projekt, überwiegend für abgebrannte Brennelemente aus der zivilen Nutzung der Kerntechnik.

Der Bau von WIPP begann vor 20 Jahren und, wie der Name ("Waste Isolation Pilot Plant") suggeriert, war die Anlage ursprünglich dafür gedacht, die Machbarkeit der Endlagerung von TRU-Abfällen in mächtigen Salzsichten aufzuzeigen. Die Standortwahl ging aus der ursprünglichen Identifizierung von Salz als idealem Wirtsgestein und

der Bevorzugung einer entlegenen Wüstenumgebung hervor. Während der vergangenen 15 Jahre wurde für diesen Standort eine umfangreiche Serie von Sicherheitsanalysen erstellt, was zu seiner endgültigen Genehmigung führte. Einige Charakteristiken dieser Sicherheitsanalysen sind (US DOE 1996):

- Schwerpunkt auf der probabilistischen Sicherheitsanalyse
- komplexe Szenarienanalyse für das Eindringen von Grundwasser (Formationswässer unterhalb der Wirtgesteinsformation mit hohem Porendruck)
- beschränkte (oder keine) Berücksichtigung von möglicherweise katastrophalen Szenarien zum menschlichen Eindringen (z.B. Abbau von Pottasche aus der Lagerstätte im Liegenden, der grössten in den USA)
- Verkleinerung des Risikos, das von Erdöl- bzw. Erdgasbohrungen ausgehen würde, durch spezifische Vorschriften, die auf geschichtlichen Bohraufzeichnungen für die Region basieren.

Das amerikanische Verfahren für die Standortwahl für hochaktive Abfälle war relativ transparent und basierte bis zur Auswahl dreier Kandidaten für das erste Endlager – Hanford (Basalt), Deaf Smith County (Salzstock) und Yucca Mountain (Tuff) – auf einer umfangreichen "Multi-Attribute Decision Analysis". Ein Kristallinprogramm für das zweite Endlager umfasste eine sehr ausgefeilte Methode für die Standortwahl, die auf dem MADA-Ansatz aufbaute, wurde jedoch in den späten achtziger Jahren eingestellt. Obwohl die durchgeführten Sicherheitsanalysen ergaben, dass alle drei Kandidaten potentiell geeignet sind (US DOE 1998, US DOE 1999), wurde aus wirtschaftlichen und politischen Gründen das geplante Programm für die gleichzeitige Charakterisierung aller drei Standorte abgebrochen und ohne detaillierte Berücksichtigung der Sicherheitsanalysen Yucca Mountain als einziger Standort ausgewählt.

Sicherheitsanalysen für das Yucca Mountain-Projekt wurden damit in erster Linie in Hinblick auf die Weiterentwicklung der Standortcharakterisierung und des Endlagerkonzepts sowie in Bezug auf das Genehmigungsverfahren durchgeführt; hinsichtlich der Standortauswahl dienten die Analysen einzig der Bestätigung des bereits gewählten Standorts.

Das Konzept des Yucca Mountain-Projekts ist einzigartig für hochaktive Abfälle: Das Endlager befindet sich oberhalb des tiefen Grundwasserspiegels in einer Wüste. Für diesen speziellen Standort wurde eine ganze Reihe von vollständigen Sicherheitsanalysen (TSPA, "Total System Performance Assessment") durchgeführt. Sie konzentrierten sich auf eine probabilistische Methodik und sind durch Vorschriften auf eine Frist von 10'000 Jahren (gesetzliches Abschneidekriterium für Dosis- bzw. Risikoberechnungen) und Zielvorgaben für das Funktionieren einzelner technischer und natürlicher Barrieren begrenzt. Aus diesen Untersuchungen geht deutlich hervor, dass die ursprünglich angenommenen Standorteigenschaften vollkommen unrealistisch waren. Durch das Hinzufügen zusätzlicher technischer Barrieren wurde versucht, den Sicherheitsrichtlinien gerecht zu werden. Einige Charakteristiken in der historischen Entwicklung dieser Sicherheitsanalysen sind:

- 1987: Wasserfliessgeschwindigkeit (entsprechend einem Darcy-Fluss durch die Endlagerzone) 10^{-7} bis 0.5 mm/a, technische Barriere 1 cm Stahl, keine Verfüllung (Kosten ca. 5000 \$/Gebinde)
- 1990: Wasserfliessgeschwindigkeit <0.1 mm/a, technische Barriere 1 cm Stahl, keine Verfüllung
- 1993: Wasserfliessgeschwindigkeit <0.5 mm/a (vorübergehend >20 mm/a), technische Barriere 1 cm Stahl, Verfüllung der Einlagerungsstollen
- 1995; Wasserfliessgeschwindigkeit 0.01 bis 2 mm/a, technische Barriere Stahl inkl. Legierung 825, Verfüllung, zusätzliche "Tropfabschirmung" (drip shield)
- 1997: Wasserfliessgeschwindigkeit ca. 20 mm/a, technische Barriere Stahl inkl. Legierung 825, Verfüllung, "Tropfschirm", Keramikbeschichtung (Kosten ca. 500'000 \$ /Gebinde)
- derzeit: Sicherheitsanalyse beinhaltet vulkanische Aktivitäten vom Stromboli-Typ.

Die Auswertung der Sicherheitsanalysen wird weiter kompliziert durch das fortwährende Hinzufügen von Konzeptvarianten (z.B. das Anstreben einer hohen Wärmeleistung, um die Temperatur während 10'000 Jahren über 100°C zu halten, verschiedene Verfüll- und Pufferoptionen usw.). Eine zentrale Erkenntnis aus den aktuelleren Untersuchungen ist, dass für Zeiten $>10^4$ Jahre unzulässig hohe

Dosiswerte errechnet werden können – hauptsächlich aufgrund der Kombination von Auslaugung der Abfälle unter oxidierenden Bedingungen und geringer Verdünnung. Die Datierung neuerer vulkanischer Aktivitäten in der Umgebung des Endlagerstandortes hat den Zeitpunkt des letzten Ausbruchs immer näher in die Gegenwart gelegt, was zur Folge hat, dass Analysen für ein Szenarium mit einer Eruption direkt unter dem Endlager angestellt werden. In solch einem Fall kann die Entscheidung zur Aufgabe des Standorts nicht ausgeschlossen werden – was sicherlich politische Probleme auf nationaler Ebene verursachen, jedoch lokal auf Genugtuung stossen würde, denn der Widerstand des Staates Nevada hat sich in den letzten 10 Jahren dramatisch verstärkt.

Einige standortspezifische Informationen z.B. zur Geologie oder zu den klimatischen Verhältnissen waren für den Standort Yucca Mountain schon zu Beginn des Endlagerprojekts im gewünschten Umfang vorhanden. Die Wasserflussrate durch die Endlagerzone beruhte erwiesenermassen auf einer Fehlinterpretation des Infiltrationsprozesses für seltene Starkniederschläge in ariden Gebieten. Standortspezifische Untersuchungen haben im Laufe der Zeit immer wieder zu signifikanten Anpassungen weiterer wichtiger Modellparameter geführt, und umfassende Analysen resultierten in neuester Zeit in einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für starke vulkanischen Aktivitäten im betrachteten Gebiet.

In den letzten Jahren hat die amerikanische Energiebehörde US-DOE seine Sicherheitsanalysen sehr offen durchführen und durch unabhängige nationale und internationale Experten begutachten lassen. Der Entscheid, ob die Resultate genügen, um ein Bewilligungsverfahren einzuleiten, soll vom amerikanischen Präsidenten im Frühjahr 2002 gefällt werden.

Auch wenn das betrachtete Endlagerkonzept für das, was in Deutschland möglich wäre, nicht unmittelbar relevant ist, so gibt es doch einzelne allgemeine Schlussfolgerungen, die dieser Serie von Sicherheitsanalysen entnommen werden können:

- eine verfrühte Auswahl eines einzigen Standortes mit zu starker Gewichtung politischer und sozialer Aspekte ist gefährlich – die Politik ändert sich schneller als

Sicherheitskonzepte und Standortanforderungen

- neuartige Konzepte können zu unerwarteten Problemen führen (vor allem wenn sie wissenschaftliche Komplexität bewirken)
- technische Massnahmen zur Kompensation eines schlechten geologischen Umfelds sind teuer
- es ist kaum möglich, die Nachteile eines schlechten Standorts durch technische Massnahmen zu kompensieren.

3.2 Überblick und Zusammenfassung

Die zusammenfassende Tabelle 3.1 erlaubt es, den Status der Standortwahl, das Ausmass, in dem Sicherheitsanalysen in der Standortwahl eingesetzt wurden und den Umfang, in dem standortspezifische Informationen in den wichtigsten Sicherheitsanalysen bzw. Endlagerprogrammen der einzelnen Länder eingesetzt wurden, zu vergleichen. Daraus geht klar hervor, dass es eher die Ausnahme als die Regel ist, der Sicherheitsanalyse im Verfahren zur Standortauswahl eine zentrale Bedeutung zuzuordnen.

Die Analyse der Langzeitsicherheit beantwortet traditionell vielmehr die Frage nach der Eignung (bzw. Nicht-Eignung) des betrachteten Standorts als das sie Bedingungen für die Standortauswahl festlegt. Zum Teil erlangen andere als rein sicherheitstechnische Kriterien ein grosses Gewicht im Standortauswahlverfahren.

Standortwahlen, die vor mehr als zehn Jahren durchgeführt wurden, beruhten in der Regel auf der Strategie "Entscheidung – Bekanntgabe – Verteidigung", in der politische Faktoren oftmals eine dominante Rolle spielten. Wahrscheinlich wird sich dies jedoch in Zukunft ändern – besonders dort, wo aus einer Anzahl potentiell geeigneter Standorte ausgewählt wird. In Ländern, in denen die potentiellen Standortregionen ausserordentlich eingeschränkt sind (Schweiz, teilweise Japan), liegt der Schwerpunkt sicherlich viel stärker auf der Bestätigung, dass Standorte, die hauptsächlich aus der

Anwendung von (hydro-) geologischen und anderen Ausschlusskriterien hervorgehen, wirklich geeignet sind.

In Bezug auf das Verhältnis zwischen dem vorgesehenen Endlagerkonzept und den Anforderungen an den Standort bilden das Programm für hochaktive Abfälle in den USA und in den skandinavischen Ländern, insb. Schweden, zwei extreme Positionen: In den USA wurde ein Standort ausgewählt und das Endlagerkonzept den vorgefundenen Eigenschaften dieses Standortes angepasst – auch wenn sie weniger vorteilhaft als erwartet waren. Demgegenüber stützt sich die Sicherheit des Endlagers (für abgebrannte Brennelemente) in Skandinavien primär auf die Langlebigkeit des Abfallbehälters - noch bevor die Studien zur Standortwahl überhaupt begonnen haben. So sind in Schweden die Anforderungen an Standort bzw. Geologie relativ gut eingegrenzt und beschränken sich in erster Linie auf einen Schutz der Behälter. Im finnischen Programm geht die Langzeitsicherheitsanalyse für das Referenzszenarium von absolut dichten Abfallbehältern aus. Entsprechend wurde in der Standortauswahl mehr Gewicht auf Bau und Betrieb des Endlagers gelegt und das Endlagerkonzept diesbezüglich den jeweiligen standortspezifischen Gegebenheiten angepasst.

Die Resultate der Langzeitsicherheitsanalysen haben im allgemeinen keinen Einfluss auf die nationalen gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen im geologischen Untergrund ausgeübt. Das amerikanische WIPP-Projekt bildet hier eine Ausnahme, indem die zulässige maximale Häufigkeit von Explorationsbohrungen im Untersuchungsgebiet direkt als gesetzliche Festlegung im Genehmigungsverfahren verwendet wurde.

Tabelle 3.1: Wichtige Analysen der Langzeitsicherheit für geologische Endlager von radioaktiven Abfällen und ihre Bedeutung für das Standortauswahlverfahren

Land	Abfallart	Endlagerstandort/ Wirtgestein	Einsatz der Sicherheitsanalyse zur Standort- auswahl	Einsatz standort- spezifischer Daten in der Sicherheits- analyse	Typ
Belgien	LMA/HAA	Mol/ Boom-Clay	Nein	Ja	c
Deutschland	SMA	Asse II/ Steinsalz	Nein	Ja	a
	SMA	Morsleben/ Steinsalz	Nein	Ja	a
	SMA *)	Konrad/ Korallenoolith	Nein	Ja	a
	alle Arten	Gorleben/ Steinsalz	Nein	Ja	b
Finnland	SMA	Reaktorstandorte/ Kristallines Schild	Nein	Ja	a
	BE	Olkiluoto/ Kristallines Schild	Ja	Ja	b/c
	LMA	Gemeinsame Endlagerung mit BE	Nein	Noch nicht	b/c
Frankreich	HAA	Potentielle Standorte Bure/Ton & Wirtgesteine Ton, Kristallin	Nein	Nein	d
Grossbritannien	LMA	Sellafield/ Borrowdale Volcanic Group	Nein	Ja	b
Japan	HAA	Noch nicht ausgewählt/ Sediment und Kristallin	Noch nicht	Nein (generisch – Input von URL- Standorten)	c
Kanada	BE (CANDU)	Nicht ausgewählt/ Kristallines Schild	Noch nicht	URL Standort (Lac du Bonnet)	c
Schweden	SMA	SFR/ Kristallines Schild	Nein	Ja	a
	BE	Selektion andauernd Kristallines Schild	Ja	Ja	c/d
	LMA	Gemeinsame Endlagerung mit BE	Noch nicht	Ja	c
Schweiz	SMA	Wellenberg/ Mergel	Ja	Ja	a
	HAA (BE)	Nordschweiz/ Kristallin + Ton	teilw.	Ja	c
	LMA	Gemeinsame Endlagerung mit HAA	teilw.	teilw.	c

Fortsetzung

<i>Land</i>	<i>Abfallart</i>	<i>Endlagerstandort/ Wirtgestein</i>	<i>Einsatz der Sicherheitsanalyse zur Standortwahl</i>	<i>Einsatz standort- spezifischer Daten in der Sicherheits- analyse</i>	<i>Typ</i>
Spanien	HAA	Noch nicht ausgewählt Sediment / Kristallin / Steinsalz	Noch nicht	Nein (generisch)	d
USA	TRU	WIPP/ Salzschichten	Nein	Ja	a
	BE (HAA)	Yucca Mountain/ Vulkanische Tuffe	Nein	Ja	b

Legende:SMA *kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle*LMA *langlebige mittelaktive Abfälle*TRU *Alpha-haltige mittelaktive Abfälle*HAA *verglaste hochaktive Abfälle*BE *abgebrannte Brennelemente**) *nicht-wärmeproduzierende Abfälle*a *Sicherheitsanalysen für Genehmigungsverfahren*b *Standortspezifische Sicherheitsanalysen*c *Systemanalysen mit Standortdaten*d *Systemanalysen mit generischen Daten oder Daten verschiedener Standorte*

4 AUSWERTUNG VON LANGZEITSICHERHEITSANALYSEN

In Bezug auf die Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten sind der Abfalltyp in Kombination mit den bautechnischen Barrieren sowie die geologische bzw. hydrogeologische Gesamtsituation die wichtigsten Bewertungsfaktoren. Daher bilden neben dem generellen Sicherheitskonzept des geologischen Endlagers vor allem die Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihre Abhängigkeit vom Standort, sowie Fragestellungen hinsichtlich der Wirksamkeit der Geologie die Schwerpunkte in der zusammenfassenden Darstellung der ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen. Weitere Fragestellungen beinhalten

- Positive (bzw. negative) Eigenschaften der geologischen und hydrogeologischen Situation am Endlagerstandort
- Positive (bzw. negative) Eigenschaften der übrigen Systemkomponenten
- Berücksichtigung dieser Eigenschaften in der Langzeitsicherheitsanalyse
- Einfluss dieser Eigenschaften auf das Isolationsvermögen (Einschlusszeit) des Endlagersystems und auf die Höhe der Radionuklidfreisetzung.

In Bezug auf den letzten Punkt ist darauf hinzuweisen, dass Rückhaltezeit und Höhe der Freisetzung nicht unabhängige Kenngrößen darstellen, sondern dass die Höhe der Freisetzung durch den radioaktiven Zerfall mit der Rückhaltezeit gekoppelt ist. Zusätzlich zur Rückhaltezeit bewirkt eine zeitliche und räumliche Verdünnung eine Verminderung der Radionuklidfreisetzung.

4.1 Bewertungsfaktoren

Die Übersicht in Tabelle 4.1 zeigt die zentralen Gesichtspunkte, welche bei der Auswertung der Langzeitsicherheitsanalysen detailliert berücksichtigt wurden.

Tabelle 4.1: Auswerteschema für Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten

Akronym	Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der Geosphäre
Organisation	
Datum	Schlüsselfragen hinsichtlich Standortauswahl
Zielsetzung und Randbedingungen	Fragestellungen in Hinblick auf die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl
Abfälle	
Geologie	Weitere Gesichtspunkte
Standort	Anmerkungen aus der Review - relevant für die Standortauswahl
Sicherheitskonzept	
Erkenntnisse bezüglich der Wirksamkeit der technischen Barrieren und ihrer Abhängigkeit vom Standort	Referenzen

4.2 Umfang

In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine grosse Anzahl unterschiedlicher Langzeitsicherheitsanalysen für Endlagersysteme für radioaktive und konventionelle Abfälle durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Zielsetzungen für die vorliegende Arbeit wurden Analysen mit geringerer Bedeutung für die geologische Endlagerung von konditionierten radioaktiven Abfällen von einer detaillierten Auswertung ausgeschlossen, wie z.B. Analysen für

- oberirdische und oberflächennahe Endlager
- kontaminierte Standorte
- Deponien für chemotoxische Abfälle
- Abraumhalden des Uranbergbaus
- Injektionen von flüssigen Abfällen in geologische Formationen
- Meeresversenkung und Endlagerung unterhalb des Meeresbodens

Für die verbleibenden Studien konzentriert sich die Auswertung auf Langzeitsicherheitsanalysen, welche

- in nationalen Programmen zur Auswahl von Endlagerstandorten eine entscheidende Rolle gespielt haben (was eher selten der Fall war) oder relevante Aussagen bzgl. der Bedeutung der geologischen Standorteigenschaften und deren Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Barrieren beinhalten,
- genügend gut dokumentiert und in einer europäischen Sprache abgefasst sind,
- in vernünftiger Weise dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen (d.h. keine "vereinfachten" Betrachtungsweisen),
- innerhalb der letzten 15 Jahre durchgeführt worden sind.

Die ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen sind in der nachfolgenden Tabelle 4.2 nach dem betrachteten Wirtgestein gegliedert (Kristalline Gesteine, Sedimentgesteine, Salzformationen, Verschiedene) und in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt. Die einzelnen Auswertungen sind als "Steckbriefe" im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Langzeitsicherheitsanalysen, welche hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten ausgewertet wurden

Akronym	Land	Wirtgestein	Abfallkategorie	Jahr
AECL - EIS	Kanada	Kristallin	BE	1994
Kristallin - I	Schweiz	Kristallin	HAA	1994
SITE 94	Schweden	Kristallin	BE	1996
SR 97	Schweden	Kristallin	BE	1999
TILA 99	Finnland	Kristallin	BE	1999
Dry Run 3	Grossbritannien	Sediment	SMA, LMA	1992
Plan Konrad	Deutschland	Sediment	SMA, LMA	1986
Nirex 95/97	Grossbritannien	Sediment	LMA	1997
Wellenberg	Schweiz	Sediment	SMA	1994
ERAM	Deutschland	Salz	SMA	2001
PROSA	Holland	Salz	HAA, LMA, SMA	1993
SAM	Deutschland	Salz	HAA, BE, LMA	1991
WIPP CCA	USA	Salz	TRU	1996
H12	Japan	Kristallin, Sediment	HAA	2000
1 st TRU Report	Japan	Kristallin, Sediment	TRU	2000
PAGIS ^a	Belgien, Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Holland	Kristallin, Sediment, Salz	HAA	1988
PACOMA			LMA	1990/91
EVEREST			HAA, LMA	1996

^a inklusive Endlagerung im Tiefsee-Meeressboden ("sub-seabed")

Legende:

SMA	kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle
LMA	langlebige mittelaktive Abfälle
TRU	Alpha-haltige mittelaktive Abfälle
HAA	verglaste hochaktive Abfälle
BE	abgebrannte Brennelemente

5 BEDEUTUNG DER STANDORTEIGENSCHAFTEN FÜR DIE LANGZEITSICHERHEIT UND DIE STANDORTAUSWAHL

5.1 Zielsetzung

Das Ziel der nachfolgenden Kapitel 6 bis 8 ist, auf der Grundlage der auszuwertenden Analysen zur Langzeitsicherheit die Anforderungen an das Wirtgestein bzw. die Geosphäre in Hinblick auf den Sicherheitsnachweis ("safety case") eines geologischen Endlagers für radioaktive Abfälle abzuleiten. Dabei soll untersucht werden, inwiefern die Schlussfolgerungen vom vorgeschlagenen Endlagerkonzept, von den getroffenen Modellannahmen oder von spezifischen gesetzlichen Rahmenbedingungen abhängen. Das Ergebnis soll dazu dienen, Kriterien für ein künftiges Standortauswahlverfahren in Deutschland zu definieren.

Der Bearbeitung liegt das folgende Konzept zu Grunde: Da die Bedeutung der Standorteigenschaften hinsichtlich der Langzeitsicherheit des Endlagers stark vom betrachteten Wirtgestein abhängt, erfolgt die Auswertung der ausgewählten Sicherheitsanalysen grundsätzlich in Gruppen der betrachteten Wirtgesteinstypen - kristalline Gesteine, Sedimente, Evaporite bzw. Salzformationen.

Die zu diesen Gruppen gehörenden, wichtigen nationalen Endlagerprogramme wurden im Kapitel 4 identifiziert, hinsichtlich den Kriterien zur Standortauswahl ausgewertet und im Anhang zusammenfassend dargestellt. Daher beschränken sich die vorliegenden Zusammenstellungen darauf, die durchführende Organisation, die Charakteristik des Wirtgesteins, den Zweck der Sicherheitsanalyse sowie wichtige Literaturhinweise zu vermitteln.

5.2 Vorgehen

Was die geologische Endlagerung von hochaktiven Abfällen (verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und abgebrannte Brennelemente) betrifft, wird für jeden der drei betrachteten Wirtgesteinstyp ein generalisiertes Sicherheitskonzept abgeleitet und die modellmässige Umsetzung der Gesteinscharakteristiken für die Analyse der Langzeitsicherheit (Freisetzung mit Tiefengrundwasser/Lösungen) diskutiert. Es werden die Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen aus den nationalen Programmen diskutiert, welche die Wirksamkeit des Endlagersystems entweder positiv oder negativ beeinflussen. Wo nötig, wird auf die spezifischen Aspekte eines nationalen Programms eingegangen, welche beispielsweise durch die Eigenschaften der endzulagernden Abfälle, die besonderen geologischen Verhältnisse eines Landes oder durch spezielle gesetzliche Rahmenbedingungen bedingt sind.

Schliesslich wird die Rolle der Geosphäre im Zusammenhang mit der Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises untersucht. Daraus ergeben sich wichtige Schlussfolgerungen für die Standortauswahl, insbesondere auch Anforderungen an die Standortcharakterisierung während dem Auswahlverfahren. In welchem Umfang sich damit generelle Ausschlusskriterien ableiten lassen, ist jeweils Gegenstand einer abschliessenden Diskussion.

6 STANDORTAUSWAHL IM KRISTALLIN

Im allgemeinen zeichnen die folgenden Eigenschaften kristalline Gesteinsformationen als potentielle Wirtgesteine für Endlager radioaktiver Abfälle aus:

- Eine hohe Standfestigkeit, welche gute Voraussetzungen für den Bau und Betrieb des Endlagers in grosser Tiefe schafft (in den meisten Endlagerkonzepten 500 m oder tiefer)
- Eine geringe Porosität und hydraulische Durchlässigkeit
- Eine geringe Grundwasserzirkulation (zum Teil auch abhängig von der Tiefe) und
- Ein stabiles physikalisches und chemisches Milieu, welches die technischen Barrieren insbesondere vor Degradation schützt.

Die betrachteten Gesteine werden in ihrer Zusammensetzung gewöhnlich von Feldspat dominiert und weisen je nach chemischer Zusammensetzung und Genese Beimengungen von Quarz und verschiedenen Aluminosilikaten wie Glimmer, Amphiboliten und Pyroxen auf. Der Ausdruck "kristalline Gesteinsformation" deckt jedoch ein breites Spektrum verschiedener geologischer Gegebenheiten mit jeweils unterschiedlichen Charakteristiken ab.

Schildgestein

Das Schildgestein (Bezeichnung "S" in Tabelle 6.1) besteht normalerweise aus verschiedenen Gesteinstypen (sedimentären und magmatischen Ursprungs), die jedoch aufgrund verschieden ausgeprägter Metamorphose gesamthaft betrachtet "Festgesteins"-Charakteristiken aufweisen (z.B. Klüfte, geringe Porosität der Gesteinsmatrix). Ein Hauptvorteil des Schildgesteins liegt in der Stabilität, so dass Tektonik, Hebung und Erosion kaum von Bedeutung sind. Die Eignung eines Schildgesteinsblocks für ein Endlager hängt von der Lage und den Eigenschaften grosser Klüfte und Störungen sowie von lithologischen Inhomogenitäten ab. Im allgemeinen ist die Gesamtausdehnung der Standortgebiete jedoch ausreichend gross, um das Endlager in einem intakten Block plazieren zu können. Heterogenitäten können aber für die Standortcharakterisierung (im Massstab des Endlagers) und die Endlagererrichtung ein Problem darstellen. Weiter ist die Ausbildung einer (sedimentären) Überdeckung von

Bedeutung. Das Fehlen einer signifikanten Überdeckung bewirkt zum einen eine direkte Kopplung der Geosphäre zur Geländeoberfläche (Biosphäre), andererseits verbessert sie jedoch die Bedingungen für Untersuchungen und die Charakterisierung von der Oberfläche aus.

Granitplutone

Granitplutone (P) bestehen gewöhnlich aus einem homogenen Gesteinskörper mit guten bautechnischen Voraussetzungen und mit einer erheblichen Tiefenausdehnung für eine flexible Endlagerplanung, selbst wenn die laterale Ausdehnung beschränkt ist. Aufgrund ihrer Intrusion in ältere Gesteinsformationen sind Granitplutone eher weniger geklüftet als das Grundgebirge (besonders was grossräumige Strukturen anbelangt). Dies gilt insbesondere für Gegenden, wo post-intrusive tektonische Aktivitäten gering waren. Junge Plutone (z.B. in der Schweiz und Japan) treten aber bevorzugt in geologisch aktiveren Gebieten auf, wo aktive Tektonik, Hebung und Erosion möglicherweise ein Problem für den Langzeitnachweis darstellen können. Plutone mit geringer Überdeckung weisen insofern die gleichen Nachteile wie Schildgesteine auf, als die Geosphäre ebenfalls direkt mit der Geländeoberfläche gekoppelt ist. Jedoch sind sicherheitsrelevante Merkmale wie Störungen und Heterogenitäten wiederum einfacher zu identifizieren.

Grundgebirge mit sedimentärer Überdeckung

Diese Situation (GS) umfasst Grundgebirgsarten, wie sie oben unter "Schildgestein" beschrieben wurden, jedoch mit einer erheblich jüngeren und normalerweise strukturgeologisch einfachen sedimentären Überdeckung. Die Überdeckung bewirkt eine Entkopplung potentieller Fließsysteme im Grundgebirge von denen im oberflächennahen Bereich und verstärkt dadurch die Isolation des tiefen Systems. Die Auswirkungen von Klimaveränderungen und Vergletscherungen sind im Vergleich zur Situation ohne Überdeckung wesentlich geringer. Falls die Sedimentüberdeckung Aquifere enthält, kann sie auch erheblich zur Verdünnung beitragen. Nachteilig gestalten sich die Schwierigkeiten bei der Charakterisierung des potentiell heterogenen Wirtgesteins und die Problematik, Störungen mittlerer Grösse bereits vorgängig zu den untätigen Untersuchungen aufzuspüren. Sogar grossräumige Störungen bleiben in

Oberflächenerkundungen eventuell unerkannt.

6.1 Programme im Kristallin

Verschiedene nationale Programme haben Standorterkundungen in kristallinen Gesteinsformationen verfolgt. Tabelle 6.1 vermittelt einen Überblick einer Auswahl von Sicherheitsanalysen, die im Rahmen dieser Programme entstanden sind.

Tabelle 6.1: Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager in kristallinen Gesteinsformationen

Land und Organisation	Typ ¹	Zweck der Sicherheitsanalyse	Dokumentation
Finnland (TVO) (Posiva)	S	Evaluation von fünf potentiellen Standorten Klärung, ob das Entsorgungskonzept den Sicherheitsanforderungen gerecht wird Aktualisierung der Sicherheitsanalyse mit neuen Daten	TVO 92 (YJT, 1992)
		Weiterführung und Aktualisierung von TVO 92 Evaluation von vier potentiellen Standorten Bestandteil der Anforderungen für den Grundsatzentscheid im Rahmen des Bewilligungsverfahrens für das Endlager	TILA 99 (POSIVA, 1999)
Frankreich (ANDRA)	P	Dokumentation der Vorgehensweise	PAGIS 1988
Grossbritannien (Nirex)	GS	Demonstration der Sicherheit eines Endlagers für LMA und TRU-Abfälle am Standort Sellafield, Bestandteil des Genehmigungsantrags für ein unterirdisches Untersuchungslabor	NIREX 1997
Japan (PNC) (JNC)	GS	Darstellung der technischen Machbarkeit und Sicherheit eines geologischen Endlagers für HAA-Abfälle in Japan	H3 (PNC, 1992)
		Weitere Darstellung der technischen Machbarkeit und Verlässlichkeit des geologischen Endlagerkonzepts Grundlage für Standortwahl und Entwicklung des Regelwerkes	H12 (JNC, 2000d)
Kanada (AECL)	S	Teil der Umweltverträglichkeitsprüfung für ein geologisches Endlager für abgebrannte Brennelemente (CANDU) in Granit	AECL EIS (AECL, 1994b)
Schweden (SKB)	S	Machbarkeitsdarstellung der sicheren Endlagerung abgebrannter Brennelemente in Schweden (gesetzliche Auflage)	KBS-3 (KBS, 1983)
		Bestimmung des Einflusses geologischer Standortcharakteristiken auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers	SKB 91 (SKB, 1992)
		Untersuchung der Relevanz geologischer Gegebenheiten für die Ermittlung der Langzeitsicherheit an drei Standorten	SR 97 (SKB, 1999)

Schweden (SKI)	S	Entwicklung einer Vorgehensweise für Sicherheitsanalysen	SKI Project 90 (SKI, 1991)
		Entwicklung der Vorgehensweise und Erfahrungsaufbau für Sicherheitsanalysen	Site 94 (SKI, 1996)
Schweiz (Nagra)	GS	Darstellung der Machbarkeit der HAA Endlagerung in der Schweiz (gesetzliche Auflage)	Project Gewähr 1985 (NAGRA, 1985c, d)
		Integration der Daten aus der Geosynthese für das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz in die Darlegung der Eignung dieses Wirtgesteins für ein HAA Endlager	Kristallin-I (NAGRA, 1993b)
	2	Unterstützung der Auswahl eines SMA-Endlagerstandortes aus vier Kandidaten	NAGRA 1993c
Spanien (Enresa)	P	Entwicklung einer Vorgehensweise für Sicherheitsanalysen Evaluation von Granit als potentielles Wirtgestein	ENRESA 97 (ENRESA, 1998)
USA (US DOE)	3	Hanford, Washington State Vergleich mit alternativen Standorten in Salz und Tongesteinen	US DOE 1986
1	S P GS	<i>kristallines Schildgestein Granitplutone kristallines Grundgebirge mit sedimentärer Überdeckung</i>	
2		<i>kristalline Gneisse und Schiefer</i>	
3		<i>Basalt</i>	

Wegen der fortgeschritteneren Methodologie der Sicherheitsanalyse und der Qualität der verfügbaren Dokumentation beruhen die Ausführungen dieses Kapitels grösstenteils auf den kürzlich erstellten Analysen für die Endlagerung verglasteter hochaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (Kristallin-I, H12), direkt endgelagerte abgebrannte Kernbrennstoffe (AECL EIS, SR 97, TILA 99), sowie für langlebige mittelaktive Abfälle (NIREX 97). Relevante Erkenntnisse aus anderen Sicherheitsanalysen werden jedoch in angemessener Weise ebenfalls herangezogen.

6.2 Generalisiertes Sicherheitskonzept für kristallines Wirtgestein

Das Sicherheitskonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in kristallinen oder geklüfteten sedimentären Wirtgesteinen beruht im allgemeinen sowohl auf technischen als auch auf natürlichen (geologischen) Barrieren. Die technischen Barrieren, die aus grossen Mengen Material mit gut bekannten günstigen Eigenschaften und vorhersagbarer Rückhaltefähigkeit für Radionuklide bestehen, gewährleisten die primäre Rückhaltung. Es wird erwartet, dass die meisten Radionuklide noch innerhalb der technischen Barrieren zu insignifikanten Konzentrationen zerfallen. Die geologischen Barrieren bieten den technischen Barrieren eine stabile und schützende Umgebung und gewährleisten damit deren Beständigkeit. Sie haben zudem Rückhaltefähigkeit für Radionuklide, die aus den technischen Barrieren freigesetzt werden können. Die Rückhaltefähigkeit für Radionuklide wird optimiert durch die Wahl eines gering durchlässigen Wirtgesteins, das in einem tektonisch stabilen Gebiet liegt und eine günstige Grundwasserchemie aufweist.

Das System der technischen und natürlichen Barrieren eines Endlagers für hochaktive Abfälle im Kristallin (oder in geklüfteten sedimentären Wirtgesteinen) setzt sich typischerweise aus folgenden Komponenten zusammen:

- Brennstoffmatrix und (Zirkaloy-) Hüllrohre im Fall der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente bzw. Glasmatrix für hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
- Dünnwandiger Behälter aus rostfreiem Stahl (für verglaste hochaktive Abfälle)
- Massiver Stahl- oder Stahl-/Kupferbehälter (eventuell Titan)
- Kompaktierte Bentonitverfüllung der vertikalen Einlagerungs-Bohrlöcher oder (alternativ) der horizontalen Einlagerungsstollen
- Gering durchlässiges Wirtgestein
- Gegebenenfalls benachbarte geologische Einheiten (z.B. Störungszonen, durchlässiges Kristallingestein, Sedimentüberlagerungen).

Für das technische Barrierensystem für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA bzw. TRU)

im selben Wirtgestein liegen heute unterschiedliche Konzepte vor. Grundsätzlich wird aber eine Endlagerung entweder in Kavernen, horizontalen Strecken oder vertikalen Silos in Betracht gezogen. Die entsprechenden Systemkomponenten sind z.B.:

- (Stahl-) Gebinde mit konditionierten Rohabfällen
- Endlagerbehälter aus Beton oder Stahl
- Zementverfüllung der Endlagerbehälter sowie des Restvolumens der Einlagerungshohlräume
- Kavernen- bzw. Siloverkleidung aus Beton
- Eventuell: umhüllendes Sand/Bentonit-Gemisch als hydraulische Barriere oder Sand/Kies-Gemisch als "hydraulischer Käfig"
- Geringdurchlässiges Wirtgestein.

Abbildung 6.1 zeigt eine schematische Darstellung der wichtigen Einflussfaktoren für die Endlagerung hochaktiver Abfälle im Kristallin. Die für die Mobilisierung, den Transport bzw. die Rückhaltung der Radionuklide relevanten Prozesse sind auf der linken Seite der Abbildung aufgeführt. Einen indirekten Einfluss auf die Radionuklidfreisetzung üben auch die auf der rechten Seite angegebenen Faktoren aus, nämlich die durch die Behälterkorrosion verursachte Gasbildung im Endlager und die Langzeitentwicklung des Barrierensystems. Die im mittleren Bereich der Abbildung aufgeführten Eigenschaften der Abfälle, der Bentonitverfüllung, des Wirtgesteins sowie der Schacht- und Tunnelversiegelung beeinflussen über physikalisch-chemische, mechanische und hydraulische Wechselwirkungen die an der Radionuklidfreisetzung beteiligten Prozesse.

Einige Systemeigenschaften, wie die der Abfälle und der Bentonitverfüllung, sind gut verstanden und/oder können experimentell relativ gut quantifiziert werden. Entsprechend sind auch einige Systemmerkmale standortspezifisch gut quantifizierbar. Zu diesen Systemeigenschaften zählen die minimale Isolationsdauer, die auf Kenntnissen über die Korrosionsrate und andere Versagensmechanismen für die Abfallbehälter beruht, und die Raten der Radionuklidfreisetzung aus den Abfällen und dem Bentonit.

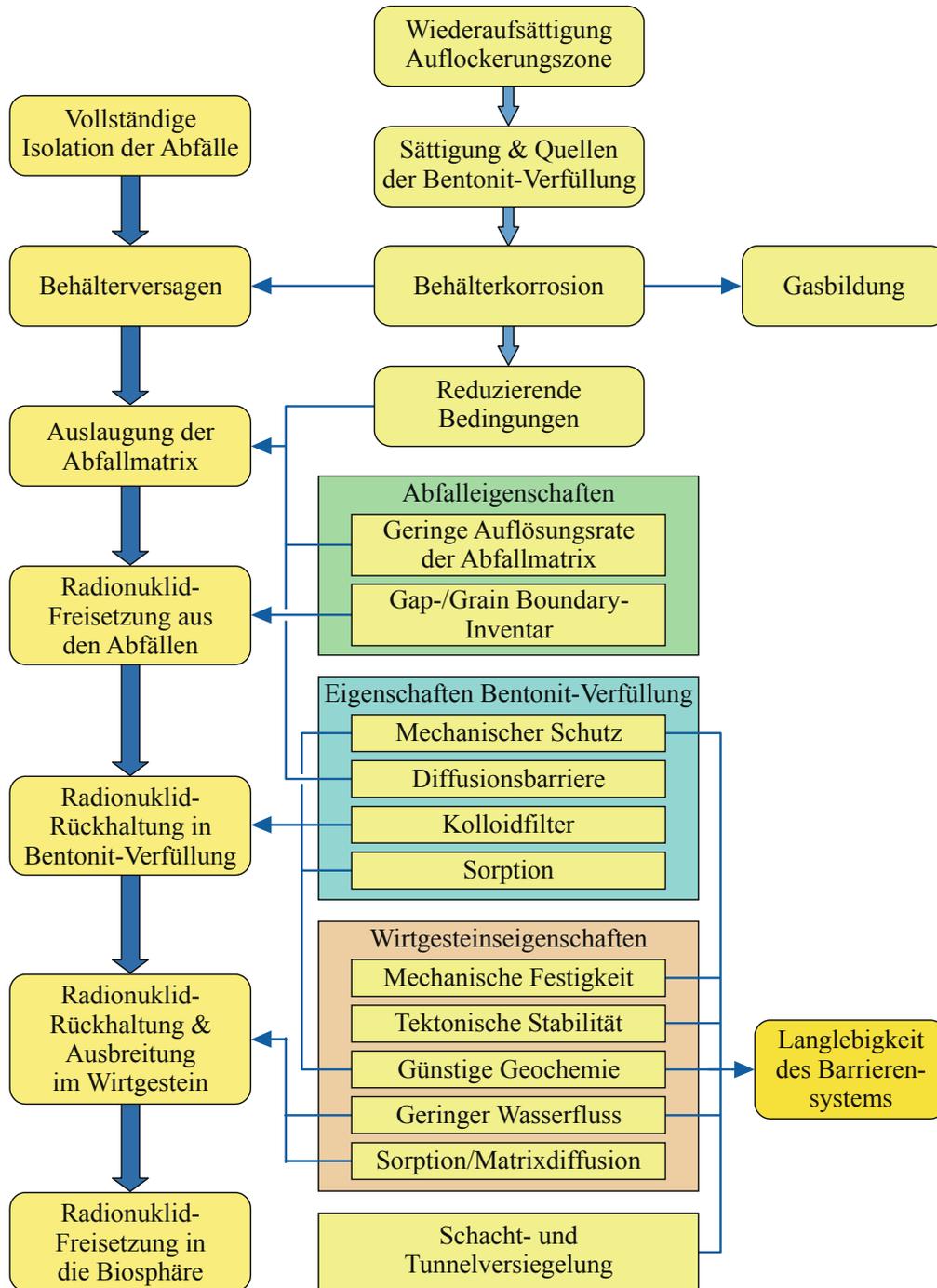


Abbildung 6.1: Wichtige Einflussfaktoren für kristalline und geklüftete sedimentäre Wirtgesteine

Die Wirtgesteinseigenschaften, die zur Wirksamkeit der natürlichen Barriere in Bezug auf den Radionuklidtransport beitragen, sind sehr viel schwieriger zu quantifizieren. So ist das Ausmass der Rückhaltung und der Ausbreitung im Wirtgestein weniger gut bekannt als die Rückhaltung im Nahfeld. Deshalb liegt der Schwerpunkt für das Wirtgestein in den frühen Projektphasen auf der Gewährleistung einer langen Lebensdauer der technischen Barrieren. In späteren Phasen, wenn die Informationsbasis zuverlässiger ist, kann eventuell mehr von der Wirksamkeit als Transportbarriere Gebrauch gemacht werden.

6.2.1 Behandlung kristalliner Wirtgesteine in Sicherheitsanalysen

Die geringe Porosität und Permeabilität eines typischen Kristallingesteins führten zunächst zur Annahme, dass der Wasserfluss in der Teufe eines Endlagers, gewöhnlich 500 bis 1000 m unter Geländeoberfläche, sehr gering bis vernachlässigbar ist. Informationen aus Tiefbohrungen veranlassten jedoch in einigen Fällen ein Überdenken dieser Annahme. Es wurde deutlich, dass zwar der Grossteil der Gesteinsmasse tatsächlich sehr geringe Porositäten und Permeabilitäten aufweist, dass allerdings Strukturen mit lokalisiertem Wasserfluss auftreten, die im allgemeinen mit Störungszonen und Klüften zusammenhängen. In diesen Strukturen können offene Porositäten mit bedeutend höheren Permeabilitäten auftreten als in der intakten Gesteinsmatrix. Diese Erkenntnis musste in den Rechenprogrammen der Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden. Für derart lokalisierte Fließsysteme erwiesen sich Geosphärenmodelle, die auf der Vorstellung eines äquivalent porösen Mediums beruhen, als ungeeignet für die Modellierung von Transportprozessen. Ansätze mit einer Grundwasserbewegung in plan-parallelen Klüften ("parallel plate models") oder Kanälen erlauben eine realistischere Beschreibung dieser Prozesse.

Der Einsatz von zunehmend realistischen Modellen, in denen die Fließwege in den Klüften als diskrete "Röhren" anstelle von zweidimensionalen Flächen dargestellt werden, hat weiter zum besseren Verständnis bezüglich Einfluss der Kluffgeometrie auf die Rückhaltung im Wirtgestein beigetragen.

Im Besonderen konnte das für die Matrixdiffusion zugängliche Gesteinsvolumen als eine der ausschlaggebenden Wirtgesteinseigenschaften identifiziert werden, welches seinerseits von der benetzten Oberfläche in der durchströmten Kluft und von der Tiefe der Diffusion in die angrenzende Gesteinsmatrix abhängt. Weiter kann die Kluftverteilung für die Transportgeschwindigkeit der Radionuklide wichtiger sein als die Kluftweite.

Derzeit werden Kluftnetzwerk-Modelle für die Untersuchung der Einflüsse von Verteilungen von Kluftigenschaften eingesetzt. Dies lenkte die Aufmerksamkeit vermehrt auf die Relevanz von Heterogenitäten und die Nachteile der Verwendung von gemittelten Strömungseigenschaften, da die schnellsten Transportpfade trotz ihrer geringen Häufigkeit die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre dominieren.

6.3 Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme

Aus den in den verschiedenen nationalen Programmen (Tabelle 6.1) durchgeführten Untersuchungen gingen verschiedene Eigenschaften des kristallinen Wirtgesteins hervor, welche die Wirksamkeit des Endlagersystems beeinflussen. Einige dieser Eigenschaften zeichnen sich bereits in einem frühen Stadium der Standortuntersuchungen ab, während andere schwieriger zu quantifizieren sind und ihre Einflüsse stark vom Standort abhängen können.

6.3.1 Wesentliche Eigenschaften des geologischen Umfeldes

Geringer Grundwasserfluss

Eine niedrige Grundwasserfließrate wurde als Schlüsseleigenschaft der geologischen Gegebenheiten eines kristallinen Gesteins identifiziert (z.B. Kristallin-I, H12, TILA 99, NIREX 97 etc.). Im Besonderen sind lange Grundwasserfließzeiten vom Endlager zur Biosphäre vorteilhaft, speziell für Plutone und für Schildgestein, wo es keine oberflächennahen Aquifere gibt, die zur Verdünnung und Ausbreitung beitragen können. Dies ist ein wesentlicher Punkt bei der Beurteilung eines Standortes hinsichtlich der Endlagerung abgebrannter Brennelemente, wo ein Behälterversagen

anfänglich eine pulsartige Freisetzung aus dem "Gap-/Grain Boundary"-Inventar wie ^{129}I , ^{126}Sn und ^{36}Cl zur Folge hat, also Elementen, deren Löslichkeit zudem normalerweise nicht begrenzt ist und die sowohl in den technischen Barrieren als auch in der Geosphäre am wenigsten durch Sorption zurückgehalten werden. Die Auswirkungen sind in den Maxima der Freisetzungs- oder Dosiskurven ersichtlich, welche in TILA 99 und SR 97 sehr rasch nach dem Behälterversagen auftreten. Wegen der Absenz der entsprechenden Inventarkomponenten besteht für verglaste hochaktive Abfälle diese Problematik nicht, und die Freisetzung der Radionuklide wird von Beginn an durch die Auslaugung der Glasmatrix begrenzt.

Schutz der technischen Barrieren

Die Schutzwirkung bzw. die mechanische Stabilität der Geosphäre ist eine weitere generelle Anforderung an das kristalline Wirtgestein. Eine Schlüsselaufgabe der Geosphäre ist der Schutz der technischen Barrieren. Da in den skandinavischen Programmen die Vergletscherung als wichtiges Szenarium erachtet wird, muss dort zum Beispiel die Geosphäre sicherstellen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Behälterversagens nicht nennenswert ansteigt. Alle Programme sind darauf ausgerichtet, grosse tektonische Störungen mit möglichen erheblichen Verwerfungsaktivitäten zu vermeiden. Kleinere Strukturen, die womöglich reaktiviert werden können, sind in den meisten betrachteten kristallinen Wirtgesteinen jedoch akzeptabel.

Günstiges und stabiles chemisches Milieu

Sämtliche Untersuchungen bezeichnen ein günstiges chemisches Milieu für einen potentiellen Endlagerstandort als äusserst wichtig (Ausnahme: reduzierende Bedingungen am Standort Yucca Mountain). Ein solches gewährleistet hydrochemische Verhältnisse, die weder Veränderungen des Bentonits noch eine erhöhte Korrosion der Behälter verursachen (Bedeutung von Eh und pH, Salinität). Weiter gehört zu diesem eine Mineralogie in der Geosphäre, die die Radionuklidenausbreitung durch Sorption hemmt.

Die günstigsten Bedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Niedriger Eh-Wert (reduzierende Bedingungen) – für nahezu alle Sicherheitsanalysen von grundlegender Wichtigkeit
- Annähernd neutraler pH-Wert
- Geringe bis mässige Salinität
- Geringe Konzentrationen ungünstiger Spezies, wie z.B. SO_4 oder NH_4 für Kupferkanister.

Wünschenswert ist ebenfalls ein möglichst stabiles chemisches Milieu. In einer Reihe von Programmen werden Standorte mit ähnlicher Geologie, aber einer breiten Spanne an chemischen Zusammensetzungen des Grundwassers betrachtet. In SR 97 wiesen die drei untersuchten Standorte Grundwässer von sehr niedrigem bis sehr hohem Salzgehalt auf. Dies schlug sich in der Wirksamkeit des Endlagersystems im Vergleich zu den Auswirkungen anderer Standortmerkmale jedoch nur geringfügig nieder. In den skandinavischen Studien (SKB 91, TVO 92, SITE 94 und SR 97) wurden die Auswirkungen von Klimaveränderungen hinsichtlich eines möglichen Eindringens von oxidierendem Gletscherschmelzwasser in die Endlagerumgebung untersucht. Da die Langlebigkeit der Behälter für das gewählte Endlagerkonzept für abgebrannte Brennelemente von äusserster Wichtigkeit ist, ist die Möglichkeit einer signifikant erhöhten Korrosionsrate aufgrund von Veränderungen in der Grundwasserchemie für den Sicherheitsnachweis extrem ungünstig. Oxidierende Bedingungen im Nahfeld wären hinsichtlich der Löslichkeit und der Sorption von Radionukliden ebenfalls nachteilig.

6.3.2 Unvorteilhafte Eigenschaften

Wie bereits angesprochen, wurden schnelle Fließpfade als dominierende Faktoren für die Radionuklidfreisetzung identifiziert (z.B. Kristallin-I, H12, SR 97). Die Charakterisierung des vollen Spektrums an Transmissivitäten ist deshalb zwingend notwendig, der Durchschnittswert beschreibt nicht in adäquater Weise das Wirtgesteinsverhalten. Infolgedessen sind Wirtgesteine oder geologisch / hydrogeologische Umgebungen mit einer sehr breiten Streuung der Klufftransmissivitäten wegen der

Schwierigkeiten einer ausreichenden Charakterisierung weniger günstig als solche mit begrenzten Klufftransmissivitäten.

Hoch saline Formationswässer, die das Quellen von Bentonit und die Sorption von Radionukliden in der Bentonitbarriere behindern können, werden ebenfalls als eine sehr nachteilige Eigenschaft des Wirtgesteins betrachtet (z.B. SR 97), die am besten durch eine geeignete Standortwahl vermieden werden kann.

6.4 Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme

Bedingt durch die spezifischen geologischen Verhältnisse eines Landes oder durch Besonderheiten des Endlagerkonzeptes – welche sich im Laufe der Konzeptoptimierung noch ändern können – ergeben sich für die einzelnen nationalen Programme besondere Einflussfaktoren. Auch behördlich vorgegebene Randbedingungen können zu programmspezifischen Aspekten führen.

Im Folgenden sind Beispiele für Einflussfaktoren aufgeführt, die sich aus den Unterschieden zwischen den nationalen Programmen ergeben:

- Schweden: Der Einsatz eines sehr langlebigen Kupferbehälters bedeutet, dass die Sicherheitsanalyse empfindlich von Faktoren abhängt, die die Langlebigkeit des Behälters beeinflussen könnten. Die Sicherheitsanalyse (SR 97) wurde unter der Annahme des Versagens eines einzelnen Behälters durchgeführt, das Versagen von einigen oder sogar hunderten von Behältern wurde nicht berücksichtigt.
- Japan: Gegenden mit einem hohen geothermischen Gradient bereiten womöglich Schwierigkeiten im Zusammenhang mit Bentonitveränderungen bei hohen Temperaturen (sowie Probleme während der Bau- und Betriebsphase).
- Schweden und Finnland: Die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Vergletscherungen bedeutet für diese Länder, dass die Standorte mit den geringsten negativen Auswirkungen einer Vergletscherung (zusätzlicher Druck/Spannungen auf die Behälter, Möglichkeit von oxidierendem Grundwasser und erhöhte Grundwasserfließraten) bevorzugt werden. Generell bewirken klimatische Veränderungen mit

einer Vergletscherung jedoch günstige Bedingungen, zum Teil bedingt durch die Verminderung der Biosphärenaktivität.

- Schweden und Finnland: Für potentielle Endlagerstandorte im Schildgestein bzw. in Plutonen bieten Küstenstandorte mit einer weniger ausgeprägten Topographie den Vorteil einer guten Verdünnung ohne wesentliche Überdeckung des Wirtgesteins.
- Schweiz: Die allgemein sehr ausgeprägte Topographie und die Tektonik haben zur Folge, dass sich potentielle Standorte ausschliesslich in der Nordschweiz befinden. In dieser Region bietet das kristalline Grundgebirge mit seiner mächtigen Überdeckung des Mesozoikums auch Vorzüge durch die Dämpfung der Auswirkungen zukünftiger Vergletscherungen und einer Verdünnung in den darüberliegenden Aquiferen. Ein Merkmal des schweizerischen Kristallinprogrammes ist die aufwendige Erkundung des Gesteins (wegen der sedimentären Überdeckung) verbunden mit komplexer Tektonik (im Kristallin eingebetteter Permokarbondrog).
- Kanada: Der kluftarme Granit, der in der AECL EIS Studie als Wirtgestein unterstellt wurde, bildet eine einzigartige, kristalline Diffusionsbarriere und mindert die Notwendigkeit für mächtige Tonbarrieren mit hohem Bentonitanteil um die einzelnen Kanister.

6.5 Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises

Ein belastbarer Sicherheitsnachweis ("robust safety case") für ein Endlager für radioaktive Abfälle basiert auf den folgenden Voraussetzungen:

- Ein robustes, d.h. auf Ungewissenheit bzw. Störungen wenig empfindliches Endlagersystem; der Nachweis dazu stützt sich unter anderem auf Parametervariationen und probabilistische Verfahren zur Behandlung von Daten- und Modellunsicherheiten
- Der Einsatz von möglichst einfachen, umfassend getesteten Modellen und gut erfassbaren, zuverlässigen Daten unter Beachtung von Qualität, Transparenz und Nachvollziehbarkeit; d.h. ein belastbarer Sicherheitsnachweis beruht so weit wie möglich auf gut bekannten und quantitativ beschreibbaren Prozessen und

Eigenschaften von Materialien

- Angemessene Sicherheitsreserven des Gesamtsystems auch wenn konservative (d.h. "auf der sicheren Seite liegende") Annahmen getroffen werden; für weniger gut erfasste Wissensbereiche oder bei Unsicherheiten in den zu Grunde liegenden Daten sollte die Konservativität der Methode möglichst einfach nachweisbar sein.

Dieses Prinzip der Belastbarkeit kann auf sämtliche Aspekte des Sicherheitsnachweises, von der Standortauswahl und der Konzeptdefinition bis hin zur Sicherheitsanalyse, angewendet werden. Im Rahmen der Standortauswahl bedeutet Belastbarkeit, dass Standorte vermieden werden, deren Umfeld langfristig die Sicherheit beeinträchtigen könnte. Dies beinhaltet zum einen die Vermeidung von Orten mit geologischen Prozessen wie Vulkanismus oder aktiven Störungen, zum anderen auch solche mit wirtschaftlich bedeutsamen Bodenschätzen. Der mögliche Standort sollte keine Merkmale aufweisen, die komplexe ingenieurtechnische Lösungen erfordern.

Bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes verringert der Einsatz von möglichst grossen Mengen gut bekannter Materialien bei den technischen Barrieren die Auswirkungen von unerwünschten Prozessen und erleichtert deren Analyse. Zudem wird dadurch das Potential für versehentliche oder unerwartete Wechselwirkungen zwischen den Barrieren minimiert. Das Mehrfachbarrieren-Konzept, bei dem die Wirkung der einzelnen Barrieren durch unterschiedliche Eigenschaften und Prozesse zustande kommt, bewirkt, dass bei ungünstigem Verhalten einer einzelnen Barriere die Wirksamkeit des Gesamtsystems nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Ferner können Prozesse, welche die Wirksamkeit nachteilig beeinflussen könnten, durch die Wahl des Konzeptes und der Materialien vermieden werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in einem belastbaren Sicherheitsnachweis die meisten Phänomene, die sich nachteilig auf die Sicherheit auswirken könnten

- entweder ausgeschlossen (z.B. ingenieurmässig) oder

- auf eine geringe Eintretenswahrscheinlichkeiten reduziert (z.B. durch die Standortwahl) oder
- auf geringe Auswirkungen reduziert werden (z.B. durch die Endlagertiefe).

Die nicht auszuschliessenden Phänomene können in der Sicherheitsanalyse mittels quantitativer Modelle für die gut verstandenen Prozesse und eine nachweisbar konservative Handhabung der übrigen Prozesse berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der Eigenschaften des kristallinen Wirtgesteins verbleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit, die nicht durch dessen Charakterisierung verringert werden kann, da eine vollumfängliche Charakterisierung der Geosphäre ohne Beschädigung ihrer günstigen Eigenschaften nicht möglich ist (z.B. durch Tiefbohrungen von der Geländeoberfläche aus, durch Bohrlöcher oder Einrichtungen wie Felslabors in Endlagertiefe etc.). Zudem kann es aufgrund der naturgemässen Heterogenität schwierig nachzuweisen sein, dass Parameterwerte, die für ein gewisses Gesteinsvolumen ausserhalb des eigentlichen Endlagerbereichs (z.B. in einem angrenzenden Untersuchungslabor) bestimmt wurden, tatsächlich auf die Endlagergeosphäre übertragbar sind.

Der belastbare Sicherheitsnachweis berücksichtigt diese Unsicherheit durch eine Betonung der Rolle der Geosphäre für die Langlebigkeit der technischen Barrieren, anstatt ihre eigene Barrierenfunktion hervorzuheben. Im Fall Kristallin-I ist es beispielsweise möglich, ein adäquates Mass an Sicherheit nachzuweisen, ohne das Rückhaltevermögen der Geosphäre zu beanspruchen: Aus dem Nahfeld freigesetzte Radionuklide gelangen in der Berechnung der Strahlungsexposition direkt und ohne jegliche Rückhaltung in die Biosphäre.

Dies veranschaulicht, dass Sicherheit garantiert werden kann, sofern die technischen Barrieren die erwartete Schutzwirkung über den gesamten erforderlichen Zeitraum erbringen, und dass die Hauptaufgabe der Geosphäre darin besteht, dass das erwartete Verhalten der technischen Barrieren über diese Zeitspanne hinweg gesichert ist und nachgewiesen werden kann. Dies ist vor allem für jene Konzepte für die

Endlagerung abgebrannter Brennelemente wichtig, bei denen von den Behältern eine ausgesprochene Langlebigkeit (ca. 1 Million Jahre) erwartet wird und bei denen die Sicherheitsanalyse vom Versagen einer geringen Anzahl Behälter ausgeht. Das Versagen vieler oder gar aller Behälter könnte zur Überschreitung von behördlich vorgegebenen Grenz- oder Richtwerten für die Strahlendosis führen. Trotzdem betrachtet beispielsweise TILA 99 das Versagen sämtlicher Behälter für eine grosse Auswahl verschiedener Freisetzung- und Transportszenarien, um die Belastbarkeit der Sicherheitsanalyse aufzuzeigen.

Speziell im schwedischen und finnischen Programm ist die durch natürliche Analoge belegbare hohe Beständigkeit der verwendeten Kupfer / Stahl-Behälter für die hochaktiven Abfälle ein wertvolles Argument für die Langzeitsicherheit des Endlagers in einer kristallinen (und zugleich mit salinem Grundwasser gesättigten) Gesteinsformation, das auch von einer breiteren Öffentlichkeit gut verstanden werden kann.

6.6 Auswirkungen auf die Standortwahl

Aus der besonderen Bedeutung des Schutzes der technischen Barriere ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Standortauswahl potentielle Störeinflüsse auf die technischen Barrieren auszuschliessen. Weiter ist aber auch eine gute Barrierenwirkung der Geologie anzustreben. Bei der Untersuchung von möglichen Standorten müssen deshalb folgende Faktoren in Betracht gezogen werden:

- Tektonische Stabilität zum Schutze der technischen Barrieren vor mechanischer Beeinträchtigung und zur Verhinderung der Neubildung (oder Reaktivierung) von hydrogeologisch relevanten Störungen im Wirtgestein
- Niedrige Grundwasserfliessraten vermindern die Möglichkeit nachteiliger Veränderungen der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (z.B. Redoxveränderungen) sowie der Bentonit-Erosion und bewirken kleine Nahfeld-Freisetzungsraten
- Niedrige Grundwasserfliessraten im Endlagerumfeld können auch durch die

Plazierung des Endlagers in einem intakten Grundgebirgsblock zwischen grossen Störzonen erzielt werden

- Mechanische Stabilität hält die Auswirkungen der Endlagererstellung auf das Wirtgestein klein
- Ein günstiges chemisches Milieu – Redoxbedingungen, pH-Wert, Salinität – sichert niedrige Korrosionsraten, minimale Bentonitveränderungen, niedrige Radionuklid-löslichkeiten und hohe Sorption sowohl im Nahfeld wie auch in der Geosphäre
- Mässige Temperaturen im Endlager verhindern mögliche Bentonitveränderungen
- Das Volumen des Wirtgesteins muss gross genug sein, um eine angemessene Distanz des Endlagers von Störungen und Klüften, die während der Standortwahl und -charakterisierung identifiziert wurden, zu ermöglichen und um kleinere Strukturen, die während des Vortriebs festgestellt werden, meiden zu können.

6.6.1 Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die Anforderungen an die Standortcharakterisierung hängen von der jeweiligen Phase des Untersuchungsprogramms ab. In den Anfangsphasen werden Untersuchungen zur Ausdehnung und zu den mechanischen Eigenschaften des potentiellen Wirtgesteins, den Zusammensetzungen von Gestein und Grundwasser, der regionalen und der ungefähren lokalen Hydrogeologie (insbesondere Hydrochemie) und dem Bestand an grossen Strukturen wie Störzonen oder ungünstiger Lithologien gebraucht, um die möglichen Standorte grob einzustufen. Mit dem Fortschreiten des Programms werden zunehmend Informationen zur Grundwasserbewegung in verschiedenen Massstäben anfallen,

- als Input für die regionalen hydrogeologischen Modelle und
- für die Modellierung der einzelnen Klüfte, so dass Modelle für die Radionuklid-ausbreitung und -rückhaltung angemessen angewendet werden.

Im Stadium der Untersuchungen zum Vergleich mehrerer möglicher Standorte wird die Wirksamkeit der Geosphäre stark betont, da jene des Nahfelds, welche jeweils auf der

gleichen technischen Barriere basiert, nicht so empfindlich von den Eigenschaften des Wirtgesteins und der Geologie abhängt. Der Schutz der technischen Barrieren ist eine wichtige Voraussetzung aller potentiellen Wirtgesteine, welche normalerweise in einer sehr frühen Phase sichergestellt wird. Spätere Untersuchungsphasen fokussieren zusätzlich auf der Barrierenwirkung des Fernfeldes. Die genaue Untersuchung der Kluftigenschaften, einschliesslich der Detailparameter wie die benetzte Oberfläche der durchflossenen Kluftanteile, die Tiefe der Matrixdiffusion, die Sorptionseigenschaften der Kluftfüllung sowie der Transmissivitäten und deren Häufigkeiten ist daher ein wesentliches Element der Standortcharakterisierung, welches erlaubt, die Eignung verschiedener möglicher Standorte zu vergleichen.

6.6.2 Allgemeine Ausschlusskriterien

Diverse Faktoren können dazu führen, dass ein gewisses Wirtgestein bzw. geologisches Umfeld als ungeeignet erachtet wird. Sie werden jedoch generell nicht anhand der Ergebnisse von Sicherheitsanalysen identifiziert. In SR 97 wurde explizit festgehalten: "*Since the integrated performance of the deep repository ... is dependent on a large number of interacting processes, it is difficult to specify more detailed requirements (for) individual initial conditions.*" (Da die Wirksamkeit des geologischen Endlagers insgesamt von einer grossen Anzahl sich gegenseitig beeinflussender Prozesse abhängt, ist es schwierig, für einzelne Bedingungen detaillierte Anforderungen zu spezifizieren.)

Zum Beispiel wurden für die Beschreibung der generischen Geosphäre in der japanischen Sicherheitsanalyse H12 teilweise Daten des Felslabors Kamaishi verwendet. Kamaishi ist jedoch eine alte Eisenerzmine in alpinem Umfeld, stark geklüftet, oberflächennah (im Vergleich zur Teufe von mehr als 500 m des potentiellen HAA-Endlagers) und hohen Grundwasserflüssen ausgesetzt (in der Mine befindet sich eine Mineralwasserabfüllanlage). Kamaishi wird nicht als Endlagerstandort in Betracht gezogen. Trotzdem waren die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse nicht katastrophal und es konnte ein akzeptabler Sicherheitsnachweis erbracht werden. Dies zeigt, dass andere Komponenten des Systems, in diesem Fall die sehr wirkungsvollen technischen

Barrieren, ausgleichend wirken können. Es sollte allerdings auch zur Kenntnis genommen werden, dass manche Aspekte des Geosphärenmodells (z.B. die benetzte Kluftoberfläche und die Tiefe der Matrixdiffusion) bei H12 im Vergleich zu Evaluationen ähnlicher geologischer Systeme als eher nicht-konservativ beurteilt werden können.

Für Plutone kann deren *beschränkte Ausdehnung*, soweit sie die Endlagerauslegung zu stark einengt, ein Ausschlusskriterium darstellen. Das Vorhandensein *zu vieler grosser Strukturen* (wie z.B. Störungszonen) sowohl im Schildgestein als auch im Grundgebirge mit sedimentärer Überdeckung kann zu kleinen Blockgrössen führen und dadurch die Endlagerauslegung einengen. Die *sedimentäre Überdeckung* kann die Erkundbarkeit des Grundgebirges stark erschweren. Dies kann ebenfalls einen Grund für das Zurückstellen eines Standortes sein.

Ferner kommen für kristalline Gesteine als mögliche Ausschlusskriterien *oxidierende Bedingungen in tiefem Untergrund, sehr junge Wässer in der Tiefe* und eine *ausgeprägte geothermische Anomalie* in Frage.

7 STANDORTAUSWAHL IN SEDIMENTGESTEINEN

Eigenschaften, die einige Sedimentgesteine als potentielle Wirtgesteine für Endlager radioaktiver Abfälle auszeichnen, beruhen auf

- deren geringer Permeabilität
- den entsprechend niedrigen Grundwasserfließraten
- den Retardationseigenschaften für Radionuklide
- den beständigen physikalischen und chemischen Bedingungen in der Gesteinsformation
- der potentiellen Homogenität.

Derart vorteilhafte Eigenschaften finden sich generell in tonigen Sedimentgesteinen ("argillaceous rocks"), d.h. in Sedimentgesteinen mit hohen Anteilen an Tonmineralien. Diese Gesteine variieren von sehr plastischen Tonen mit einer hohen Tonfraktion und geringer Kompaktion und Zementation bis hin zu stark konsolidierten Siltsteinen und Mergeln mit teilweise erheblich geringeren Anteilen an Tonmineralien. Die stärker konsolidierten Sedimentgesteine weisen eine höhere Druckfestigkeit und damit geringe Deformationen und über kurze Zeitspannen ein duktiles Verhalten auf, versagen jedoch mit einem Spröbruch. In Ländern wie Japan können potentiell geeignete, gering permeable Sedimentgesteine auch bedeutende Anteile an vulkanischem Material, wie z.B. Asche, beinhalten.

Der Unterschied zwischen den verschiedenen Typen von tonigen Sedimentgesteinen ist, dass plastische Tone selbstheilende Klüfte aufweisen, während die am stärksten konsolidierten Sedimentgesteine häufig offene Kluftnetzwerke aufweisen, allerdings in einem weit geringeren Masse als die meisten Kristallingesteine. Innerhalb eines tonigen Sedimentgesteins bzw. einer sedimentären Schichtabfolge mit tonigen Gesteinen kann der Grad der Konsolidierung (Verfestigung des Lockergesteins) variieren. Wenn Teile der Abfolge offene Klüfte aufweisen, bedeutet das jedoch nicht unbedingt, dass sie mit Klüften ausserhalb dieser Zone in Verbindung stehen; d.h. konsolidierte tonige Sedimentgesteine sind konzeptionell nicht notwendigerweise wie

kristalline Gesteine zu behandeln, in denen meistens von zusammenhängenden Klufnetzen ausgegangen wird. Eine mögliche Ausnahme ist das Nahfeld eines Endlagers, wo klufrelevante Prozesse in kristallinen Gesteinen und konsolidierten tonigen Gesteinen tatsächlich ähnlich ablaufen können.

Von Interesse kann in Sedimentgesteinen auch eine eventuelle klein- oder grössräumige Heterogenität sein, die in der Ablagerungsgeschichte begründet ist. Derartige Heterogenitäten sind entweder geometrisch einfach und durchgehend (z.B. Sandschichten) oder komplex und diskontinuierlich (z.B. Sandrinnen/-linsen).

Tonige Sedimentgesteine weisen im Vergleich zu kristallinen Gesteinen sehr andersartige strukturelle Eigenschaften auf. Die als Wirtgesteine geeigneten Sedimentformationen sind meist jene mit einfachen Struktureigenschaften, d.h. mit kleinem, gleichmässigem Gefälle; nur vereinzelt Störungen und mit begrenzten lateralen Variabilitäten in der Lithologie und Formationsmächtigkeit. Diese Faktoren sind von grosser Bedeutung im Hinblick auf die geologische Prognostizierbarkeit und die Untersuchungsmethoden, die während der Standortauswahl und der Entwicklung des Endlagerprogramms angewendet werden. Auf diese Themen wird später in diesem Kapitel eingegangen.

Grundsätzlich gilt, dass Sedimentgesteine im allgemeinen homogen und dadurch verhältnismässig einfach charakterisierbar sind. Hingegen sind die für die Grundwasserbewegung und die Radionuklidenausbreitung massgebenden Prozesse häufig komplex; dies im Gegensatz zu kristallinen Wirtgesteinen, wo die entsprechenden Verhältnisse gerade umgekehrt sind.

Die Sedimentgesteine, die in diesem Kapitel weiter erläutert werden, können in zwei Gruppen unterteilt werden:

Plastisch-tonige Sedimente

Plastische Tone (Bezeichnung "P" in Tabelle 7.1) sind meist relativ jung (d.h. vornehmlich aus dem Tertiär) und weisen einen hohen Anteil an Tonmineralien auf. Ihre Gesamtporosität ist hoch und bedeutend höher als diejenige von kristallinen

Gesteinen. Wegen geotechnischen Einschränkungen, welche die Grösse und Tiefenlage der untertägigen Hohlräume begrenzen, ist die maximale Endlagerteufe in diesem Gestein möglicherweise beträchtlich geringer als im Kristallin. Die Transportwege vom Endlager zur Biosphäre können daher entsprechend kürzer sein als im Kristallin. Dieser negative Umstand wird durch die Tatsache abgeschwächt, dass die Ausbreitung von gelösten Stoffen (Radionukliden) in Tonen im allgemeinen von diffusiven Prozessen dominiert wird. Nahe der Oberfläche sind in solchen Gesteinen auf Grund der Entlastung des Gesteins oft Risse und Klüfte sichtbar. Werden derartige Klüfte und Störungszonen in der Tiefe beobachtet, sind sie gewöhnlich tektonisch bedingt und scheinen hydraulisch nicht wirksam zu sein.

Die vertikale Auslegung des Endlagers ist wahrscheinlich durch die Formationsmächtigkeit begrenzt. Die Lithologie, die geologische Struktur wie auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften solcher Gesteine können in vertikaler und horizontaler Richtung aus verhältnismässig wenigen Messdaten prognostiziert werden. Aufgrund der geringen Endlagerteufe können Tone ausschliesslich unter geologischen Gegebenheiten in Betracht gezogen werden, in denen die Hebungs- und Erosionsvorgänge von untergeordneter Bedeutung sind.

Stark konsolidierte tonige Gesteine

Diese Gesteine (K) weisen viele der Vorteile plastischer Tongesteine auf, ohne deren Nachteile zu besitzen. Auch in den konsolidierten tonigen Gesteinen wird die Ausbreitung gelöster Stoffe - trotz einzelner Klüfte - von der Diffusion dominiert und die Prognostizierbarkeit der physikalischen und chemischen Eigenschaften ist hoch. Die Einschränkung bei der Endlagerteufe in plastischen Tonen ist in konsolidierten tonigen Gesteinen ein weitaus geringeres Problem: Teufen annähernd oder gleich denen im Kristallin sind durchaus möglich.

In beiden Gesteinstypen stellen die (aus hydraulischer Sicht vorteilhaften) niedrigen Permeabilitäten und Diffusivitäten eine potentielle Schwierigkeit dar und rechtfertigen die Frage, wie die im Endlager produzierten Gase ausreichend schnell entweichen können, ohne dass sich übermässige Gas- und Porenwasserdrücke aufbauen. Eine

andere wichtige Frage ergibt sich aus der niedrigen thermischen Leitfähigkeit und den Auswirkungen eines Temperaturanstiegs auf die Scherfestigkeit des Gesteins.

7.1 Programme im Sedimentgestein

Tabelle 7.1 enthält eine Auswahl von Langzeitsicherheitsanalysen, die eine Endlagerung in Sedimentgesteinen in Erwägung ziehen, einschliesslich einer Zusammenfassung ihrer Ziele.

Die Ausführungen dieses Kapitels beschränken sich auf Standorte in gesättigten Sedimentgesteinen, wie sie derzeit als mögliche Wirtgesteine für die geologische Endlagerung radioaktiver Abfälle in Belgien, Deutschland, Frankreich, Japan, Spanien und der Schweiz zur Diskussion stehen. In der Vergangenheit wurden gesättigte Sedimentgesteine auch in Grossbritannien, Italien, Kanada und den USA als potentielle Wirtgesteine in Betracht gezogen.

In Deutschland wurde der Standort Konrad in der Eisenerzlagerstätte des Mittleren Korallenoolith (Jura / Oxford), mit einer Überlagerung von Ton- und Mergelgestein, als Endlager für nicht-wärmeentwickelnde Abfälle vorgeschlagen. In Belgien gilt das Hauptinteresse dem relativ plastischen Boom-Ton aus dem Eozän, der im nordöstlichen Belgien in geeigneten Tiefenlagen auftritt. Auch der Ypres-Ton im nordwestlichen Belgien wird inzwischen als Wirtgestein in Erwägung gezogen. Stärker konsolidierte Siltgesteine und Tonschiefer werden zur Zeit in Frankreich und der Schweiz untersucht. In Frankreich werden derzeit am Standort Meuse (Haute Marne) zwei Schächte für ein untertägliches Forschungslabor in jurassischen Tonen abgeteuft, und ein ehemaliger Eisenbahntunnel in Tournemire wird für Untersuchungen der Eigenschaften toniger Mergel genutzt. In der Schweiz wird der Opalinuston – ebenfalls jurassischen Alters – in einer Tiefbohrung in Benken im Zürcher Weinland (Nordschweiz) und einem untertägigen Forschungslabor am Mont Terri (Nordwestschweiz) untersucht. Eine Studie über plastische Tone im japanischen Horonobe wird vor Ort zum Bau eines untertägigen Forschungslabors führen.

Tabelle 7.1: Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager in Sedimentgesteinen

Land und Organisation	Typ ¹	Zweck der Sicherheitsanalyse	Dokumentation
Diverse europäische Antragsteller und Forschungseinrichtungen, koordiniert von der EU	P & K	Untersuchung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung hoch- und mittelaktiver Abfälle unter verschiedenen geologischen Bedingungen, einschliesslich Boom-Ton (Belgien) und tonigem Mergel im Pariser Becken (Frankreich)	PAGIS (EC 1988) PACOMA (MARIVOET & ZEEVAERT 1990) EVEREST (EC 1996)
Belgien (SCK·CEN und ONDRAF/ NIRAS)	P	Untersuchung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung im Boom-Ton (abgebrannte Brennelemente)	MARIVOET et al. (1996)
		Untersuchung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung im Boom-Ton (SAFIR-Konzept).	ONDRAF / NIRAS 1989
		Untersuchung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung im Boom-Ton (mittel- und hochaktive Abfälle)	UPDATING 1990 (MARIVOET, 1991)
Deutschland (BFS)	K	Planungsgrundlage für die Endlagerung nicht-wärmeentwickelnder Abfälle in einer Eisenerzgrube; Wirtgestein ist ein eisenhaltiger Korallenoolith (Jura: Oxford), überlagert von Tonen und Mergeln	Plan KONRAD (BFS, 1990)
Grossbritannien (HMIP)	K	Untersuchung einer Vorgehensweise für die probabilistische Risikoanalyse einer hypothetischen Endlagerung von langlebigen mittelaktiven Abfällen in den Oxford- und Gault-Tonen am Standort Harwell; Daten stammen aus tiefen Bohrungen am Standort Harwell (ebenfalls in PAGIS und PACOMA)	Dry Run 3 (SUMERLING, 1992)
Japan (JNC)	P & K	Entwicklung von Werkzeugen und Vorgehensweise für eine Machbarkeitsstudie zur Endlagerung von hochaktiven Abfällen in Japan; generische geologische Szenarien mit porösen und geklüfteten Medien	H3 (PNC, 1992)
		Machbarkeitsstudie für die Endlagerung von TRU Abfällen in Japan, vorgesehen als technische Grundlage für die neue Antragstellerorganisation; generische geologische Szenarien, einschliesslich Sedimentgestein	TRU Report (JNC, 2000a)
		Machbarkeitsstudie für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in Japan, vorgesehen als technische Grundlage für die neue Antragstellerorganisation; generische geologische Szenarien, einschliesslich Sedimentgestein	H12 (JNC, 2000b)

Schweiz (Nagra)	K	Machbarkeitsstudie einer Endlagerung aller Kategorien von radioaktiven Abfällen, einschliesslich schwach- und mittelaktiver Abfälle im Valanginienmergel	Projekt Gewähr 1985 (NAGRA, 1985)
		Beitrag zur Standortwahl für ein Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg	NAGRA 1993
		Beitrag zum Gesuch um die Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg.	NAGRA 1994
		Untersuchung von Endlageroptionen für langlebige radioaktive Abfälle in Sedimentformationen (Opalinuston und Untere Süsswassermolasse)	NAGRA 1989
Spanien (Enresa)	P & K	Entwicklung einer Vorgehensweise für die Sicherheitsanalyse; Evaluation der Barrierenfunktion in tonigem Wirtgestein	ENRESA 98 (ENRESA, 1999)

P plastisch-tonige Sedimente

K stark konsolidierte tonige Gesteine, sowie Silt und Mergel

Bemerkungen

1. Einige dieser Sicherheitsanalysen geben wenig Aufschluss über das Verfahren bei der Standortauswahl oder der Standortcharakterisierung. Sie sind aus Gründen der Vollständigkeit in der Tabelle aufgeführt, werden jedoch im Haupttext nicht weiter erwähnt.
2. Die britische Endlagerorganisation (Nirex Ltd.) erwägte die Endlagerung von langlebigen mittelaktiven Abfällen in Grossbritannien in ähnlichen tonigen Gesteinen wie jene, die derzeit in Frankreich und in der Schweiz untersucht werden. Nirex führte einfache Sicherheitsanalysen durch, um Vergleiche zwischen diesen Wirtgesteinen und den Bedingungen an Standorten wie Dounreay und Sellafield anstellen zu können. Obwohl sie nicht publiziert wurden, dienten die Ergebnisse aus diesen Sicherheitsanalysen als Input für das Programm zur Standortauswahl.

7.2 Generalisiertes Sicherheitskonzept für sedimentäre Wirtgesteine

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager radioaktiver Abfälle in tonigen Sedimentgesteinen (d.h. plastisch-tonige Sedimente und stark konsolidierte tonige Gesteine) beruht weitgehend auf den selben Prinzipien wie dasjenige für kristalline Gesteine und geklüftete Sedimente (vgl. Kapitel 6.2). Tendenziell erfolgt jedoch eine höhere Gewichtung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins, speziell dann, wenn der Radionuklidtransport durch Diffusion (und nicht durch Advektion/Dispersion) erfolgt. Konsequenterweise hat der Sicherheitsnachweis verstärkt Entwicklungen des Endlagersystems zu berücksichtigen, welche die Barrierenwirkung der Geosphäre

(Wirtgestein und angrenzende Gesteinsformationen) potentiell beeinträchtigen können, wie z.B. die Formation und Ausbreitung von Gasen aus dem Endlager.

Auch in Tongesteinen ist im allgemeinen eine Verfüllung der Restholräume der Endlagerstollen für hochaktive Abfälle mit Bentonit vorgesehen. Diese Wahl wird damit begründet, dass (kompaktierter) Bentonit im Vergleich zu anderen tonigen Gesteinen eine höhere Quellfähigkeit besitzt, eine zuverlässige Diffusionsbarriere mit guten Rückhalteeigenschaften (Löslichkeit, Sorption) darstellt und - mehr als andere Tongesteine - ein stabiles chemisches Umfeld gewährleistet (beispielsweise keine Pyritoxidation unter aeroben Bedingungen). Für andere Abfälle (LMA/TRU), die bereits wegen ihrer Konditionierung hohe Zementanteile beinhalten, wird als Verfüllmaterial gewöhnlich ein poröser Mörtel verwendet.

Abbildung 7.1 zeigt eine schematische Darstellung der wichtigen Einflussfaktoren für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in tonigen Sedimenten. Auf der linken Seite der Abbildung sind die für die Mobilisierung, den Transport bzw. die Rückhaltung der Radionuklide relevanten Prozesse aufgeführt. Die durch Behälterkorrosion verursachte Gasbildung im Endlager und die Langzeitentwicklung des Barrierensystems (rechte Seite der Abbildung) üben indirekt einen Einfluss auf die Radionuklidfreisetzung aus. Die an der Freisetzung beteiligten Prozesse werden durch die im mittleren Bereich der Abbildung aufgeführten Eigenschaften der Abfälle, der Bentonitverfüllung, des Wirtgesteins sowie der Schacht- und Tunnelversiegelung beeinflusst. Die Abbildung unterscheidet sich vom entsprechenden Diagramm für kristalline Gesteine hauptsächlich in Bezug auf die sicherheitsrelevanten Wirtgesteinseigenschaften (vgl. Abbildung 6.1).

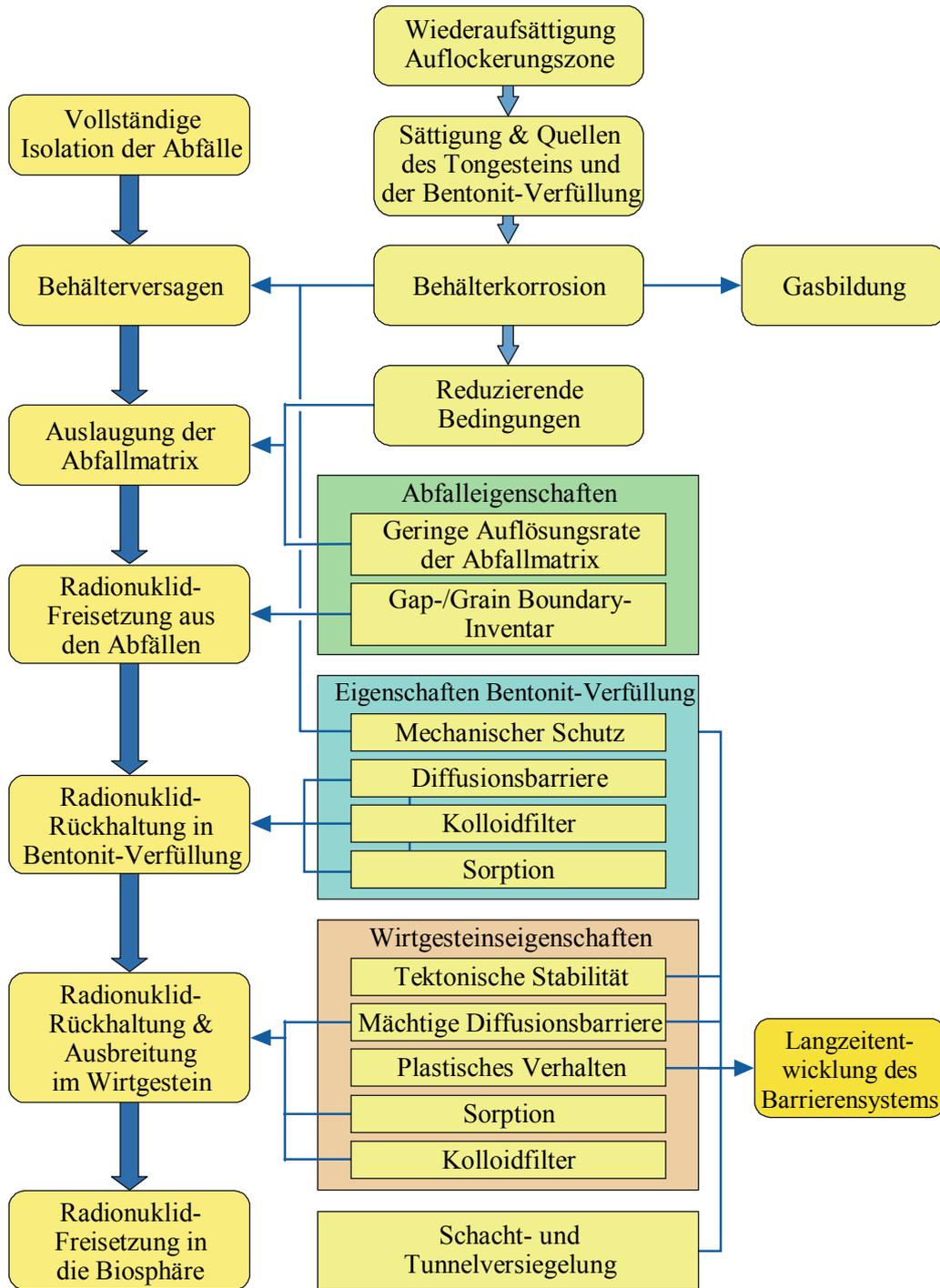


Abbildung 7.1: Wichtige Einflussfaktoren für tonige Sedimentgesteine

Die Auslegung eines Endlagers für hochaktive Abfälle und abgebrannten Kernbrennstoff in Sedimentgesteinen weist möglicherweise eine grössere Diversifizierung auf als diejenige für kristalline Gesteine. Untertägige Stollen oder Kavernen in plastischen Tonen werden permanente Einbauten benötigen, während gleiche Vorkehrungen in konsolidierten Sedimentgesteinen zumindest kurzfristig nicht notwendig sind. Abfälle werden hier in Stollen oder in von Stollen aus abgeteuften Bohrlöchern eingelagert, die bis zur Verfüllung ungestützt bleiben. Stolleneinbauten werden somit in plastischen Tongesteinen zu einem integralen Bestandteil des Endlagersystems. Sie bestehen meist entweder aus Beton oder aus Gusseisen, obwohl für beide Materialien bekannterweise chemische Wechselwirkungen mit dem Gestein auftreten. Die Machbarkeit eines Untertagebauwerks, in dem eine Einlagerung ohne den Einsatz permanenter Einbauten möglich ist, hängt nicht nur von der Standfestigkeit des Gesteins ab, sondern auch von anderen Faktoren, wie beispielsweise der Möglichkeit einer Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle.

Wie bereits in der Betrachtung für kristallines Gestein (Kapitel 6.2) ausgeführt wurde, können die Eigenschaften der Abfälle, der Behälter und des Verfüllmaterials mit den entsprechenden Experimenten gut quantifiziert werden. Speziell in plastischen Tonen ist es im Vergleich zum Kristallin im Verhältnis einfacher, die starke Wirksamkeit des Wirtgesteins als einer natürlichen Barriere für die Ausbreitung der Radionuklide quantitativ zu bestimmen. Infolgedessen ist es häufig möglich, anstelle der technischen Barrieren, auch das Wirtgestein schwerpunktmässig als Transportbarriere zu betrachten. Tatsächlich kamen frühe Sicherheitsanalysen, wie z.B. PAGIS/PACOMA, zum Schluss, dass wenn Abfälle in eine ausreichend mächtige Sedimentformation eingelagert werden und eine substantielle Schicht der Formation ungestört bleibt, über viele Zehntausende oder sogar Hunderttausende von Jahren ein absoluter Einschluss erzielt werden kann.

7.2.1 Behandlung sedimentärer Wirtgesteine in Langzeitsicherheitsanalysen

Die Behandlung eines Sedimentgesteins als Transportbarriere hängt stark von den Erkenntnissen aus den Felduntersuchungen hinsichtlich dem Auftreten vernetzter, wasserführender Strukturen ab. Sind derartige Strukturen beobachtet worden – oder auch dann, wenn sie nicht a priori ausgeschlossen werden können –, kann ein ähnliches Modellkonzept wie für kristalline Gesteine gewählt werden (siehe Kapitel 6.2.1). Dies obwohl die Voraussetzungen für eine konzeptionelle Charakterisierung unterschiedlich sind, je nachdem, ob die wasserführenden Strukturen tektonischer oder lithologischer Herkunft sind.

Im Vergleich zu kristallinen Gesteinen weisen viele tonige Gesteine hohe Porositäten und Feuchtigkeitsgehalte auf, wobei ihre effektive Porosität (d.h. die für den Stofftransport massgebende Porosität) erheblich geringer sein kann als ihre Gesamtporosität. Mit der Konsolidierung verlieren tonige Gesteine den Grossteil ihrer Porosität und ihr Feuchtigkeitsgehalt sinkt beträchtlich. In der Tiefe können Grundwasserfließraten in solchen Gesteinen extrem gering sein und die Diffusion wird zum dominanten Transportprozess für die gelösten Stoffe bzw. Radionuklide. Der diffusive Transport wird zudem durch die Rückhaltung der gelösten Stoffe infolge Sorption an Mineraloberflächen zusätzlich verlangsamt. Dies konnte anhand von geochemischen Porenwasserprofilen beispielsweise im stark konsolidierten Opalinuston am Standort Benken sowie im Felslabor Mont Terri (Schweiz) aber auch in der "Couche Silteuse" am Standort Marcoule (Frankreich) klar gezeigt werden. Bei der Modellierung der diffusiven Ausbreitung (und einem kleinen advektiven Anteil zum Stofftransport) müssen unter Umständen für die transportrelevanten Eigenschaften Gesteinsheterogenitäten und -anisotropien mit berücksichtigt werden. Sogar in relativ homogenen Formationen wie dem Boom-Ton müssen für eine adäquate geologische Datenbank für die Sicherheitsanalyse lithologische und tektonisch bedingte Heterogenitäten berücksichtigt werden.

Die für Tongesteine typischerweise hohe Wirksamkeit der Geosphäre als Transportbarriere hat zur Folge, dass viele Analysen der Langzeitsicherheit konzentriert auf Ereignisse oder Prozesse eingehen, welche die ungestörte Gesteinsformation mit ihren

ausgezeichneten Eigenschaften potentiell schädigen oder diese sogar umgehen, wie beispielsweise die Effekte von Gas, der Auflockerungszone um Untertagebauwerke oder tektonischen Verwerfungen. Im allgemeinen kann gezeigt werden, dass diese Ereignisse oder Prozesse für eine spezifische Auslegung des Endlagers an einem bestimmten Standort kein sicherheitstechnisches Problem darstellen. In bestimmten Fällen muss unter Umständen die Auslegung modifiziert oder der Standort überdacht werden, um ungünstige Vorgänge zu vermeiden oder ihre Auswirkungen einzuschränken.

7.3 Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme

7.3.1 Wesentliche Eigenschaften des geologischen Umfeldes

Die folgenden Eigenschaften wurden auf der Grundlage der ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle als günstige und gleichzeitig für viele gesättigte tonige Gesteine als typische Eigenschaften identifiziert:

- Geringe Permeabilität und grosse Homogenität, was die Grundwasserfließraten und die Wahrscheinlichkeit von schnellen Fließpfaden für den Radionuklidtransport minimiert
- Hohe chemische Pufferkapazität, was die reduzierenden Bedingungen und nahezu neutralen pH-Werte im Porenwasser aufrecht erhält, dabei die Korrosion verhindert und die Löslichkeit bestimmter Radionuklide minimiert
- Hohe Kationen-Austauschkapazität und grosse spezifische Oberfläche der Tonmineralien und der organischen Anteile, was für viele Radionuklide ein günstiges Sorptionsverhalten bewirkt
- Enge Porenöffnungen und elektro-restriktive Eigenschaften, die den Kolloidtransport begrenzen und die Diffusion anionischer Radionuklide reduzieren
- Plastizität und Quellkapazität (speziell für nicht-konsolidierte Tone) als mechanischen Schutz; diese Eigenschaften können auch dazu beitragen, dass Klüfte entweder überhaupt nicht auftreten oder nur kurzlebig sind (Selbstheilung).

Alle diese Eigenschaften sorgen insgesamt für einen wirkungsvollen Schutz der technischen Barrieren eines Endlagers und garantieren eine ausgezeichnete Wirkung der Geosphäre als Transportbarriere.

7.3.2 Unvorteilhafte Eigenschaften

Heterogenität

Wie in NEA (1999) beschrieben, wird der Heterogenität der Wirtgesteine als einer äusserst sicherheitsrelevanten, geologische Eigenschaft in neueren Studien zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet. In Sedimentgesteinen mit vernetzten, wasserführenden Strukturen (bzw. Gesteinen, in denen diese nicht ausgeschlossen werden können), sind die Verhältnisse ähnlich, wie sie im Zusammenhang mit kristallinen Gesteinen im Kapitel 6.3.2 besprochen wurden. In einer früheren schweizerischen Studie wurde die Untere Süsswassermolasse gleichzeitig mit dem Opalinuston hinsichtlich der Eignung als potentielles Wirtgestein für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle untersucht und gilt heute noch als Reserveoption. Die Formation zeigte sich räumlich sehr viel heterogener als der Opalinuston. Sandrinnen sind hier als bevorzugte Fliess- und Transportpfade nicht auszuschliessen (NAGRA 1989). Für die H3-Sicherheitsanalyse in Japan, welche Kristallin- wie auch Sedimentgesteine beinhaltet, wurden Sedimente als homogene, äquivalent poröse Medien behandelt, d.h. ohne Berücksichtigung diskreter wasserführender Strukturen. In den neueren H12- und TRU- Sicherheitsanalysen wurden den Sedimenten jedoch ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der Klüftung zugeteilt wie den kristallinen Gesteinen (JNC 2000a, b). Wegen dem generischen Charakter der Studien ist die Wahl des konzeptuellen Ansatzes in beiden Fällen eher willkürlich. Neuere Studien berücksichtigen hingegen gering durchlässige sandige Sedimente (Sandstein) als ein potentielles sedimentäres Wirtgestein. Derartige Sedimente können tatsächlich Klufteigenschaften aufweisen, die denen im Kristallin ähnlicher sind als denen im tonigen Gestein.

Weitere möglicherweise ungünstige Bedingungen, die in den Sicherheitsanalysen für tonige Gesteine identifiziert wurden, werden im folgenden vorgestellt. Einige dieser

Effekte – nämlich jene, die mechanische und chemische Störungen im Gestein verursachen – sind vor allem ausschlaggebend, wenn die Mächtigkeit der Wirtgesteinsformation gering ist, so dass ein signifikanter Anteil der Formation durch das Endlager beeinträchtigt wird.

Beschränkte Formationsmächtigkeit

Bedingt durch den Ablagerungsprozess weisen Sedimentgesteine häufig eine relativ geringe Mächtigkeit auf, was die Platzierung und Auslegung eines Endlagers (auch unter Berücksichtigung der Auflockerungszonen um Schächte und Stollen) unter Umständen starken Einschränkungen unterwirft oder gar unmöglich macht. In gewissen Situationen haben aber sedimentologische oder tektonische Prozesse zu einer Anhäufung der Ablagerungen und damit zu einer Zunahme der Formationsmächtigkeit geführt.

Thermische Effekte

Langfristige Temperaturerhöhungen aufgrund der mit radioaktivem Zerfall verbundenen Wärmeentwicklung der Abfälle und die für tonige Sedimente typisch niedrige Wärmeleitfähigkeit können potentiell Veränderungen der Toneigenschaften und übermässige Porendrücke verursachen. Durch die Temperaturerhöhung und dem damit verbundenen Anstieg des Porenwasserdruckes wird die geomechanische Situation beeinflusst. Als Folge können entlang natürlichen Embryonalklüften und – sofern vorhanden – an der Stollenauskleidung Scherbrüche entstehen, was wiederum zu einer Überbelastungen der Auskleidung führen kann. Weiter kann der Feuchtigkeitsverlust infolge Austrocknung lokal zur Bildung von Schrumpfungsrissen führen.

In Belgien wurden thermische Effekte in Studien zur räumlichen Auslegung eines Endlagers mit berücksichtigt, was eine relativ niedrige Einlagerungsdichte von wärmeentwickelnden Abfällen zur Folge hatte. Das Konzept für ein Endlager im Boom-Ton entwickelte sich zum Beispiel aus dem ursprünglichen HADES-Konzept aus dem Jahre 1978. Das aktuelle Konzept, das in der SAFIR-Studie (ONDRAF-NIRAS 1989)

evaluiert wurde, dient nicht zuletzt einer günstigeren Wärmeverteilung innerhalb des Endlagers².

Gasbildung und -freisetzung

Endlagergas entsteht bei der Zersetzung von eingelagerten Abfällen und Korrosion von Endlagerkomponenten. Bei stark überhöhten Drucken kann Porenwasser ausgepresst werden, das möglicherweise durch Radionuklide kontaminiert ist, und die technischen Barrieren sowie das Wirtgestein erleiden mechanische Schäden. Für ein Endlager in tonigen Sedimentgesteinen kann die Gasbildung und -freisetzung von besonderer Bedeutung sein, da die geringen Durchlässigkeiten und beschränkten Porenräume leicht zur Entstehung hoher Gasüberdrücke führen können.

Die Auswirkungen der Gasbildung können unter Umständen besondere Massnahmen notwendig machen, die das Entweichen von Endlagergas gewährleisten und das Auspressen von kontaminiertem Porenwasser verhindern, zum Beispiel durch eine geeignete Auslegung der Einlagerungshohlräume und die Art ihrer Verfüllung und Versiegelung (z.B. NAGRA 1993, 1994).

Auswirkungen der Betriebsphase und Wechselwirkungen zwischen Tongesteinen und Materialien der technischen Barrieren

Während der Betriebsphase, wie auch nach dem Verschluss des Endlagers, bestehen im Umfeld der Endlagerstollen grosse hydraulische und chemische Gradienten, die eine Reihe von geochemischen Veränderungen hervorrufen können, wie zum Beispiel Oxidation von Mineralien im Sedimentgestein oder die Ausfällung von Kalzit. Dies kann innerhalb einer gestörten Zone um die Stollen zu mineralogischen und rheologischen Veränderungen führen, welche die Wirksamkeit des sedimentären Wirtgesteins als Transportbarriere möglicherweise beeinträchtigen.

Anderen Wechselwirkungen kann mit Endlagerkonzepten entgegengewirkt werden, die den Einsatz von Stahl- oder Betoneinbauten zur Stabilisierung der Untertagebauwerke

² Dies ist ein gutes Beispiel für eine parallel und interaktiv verlaufende Durchführung der Sicherheitsanalyse, der Planung der Endlagerauslegung und Studie zur Standortwahl

gänzlich vermeiden oder zumindest minimieren. So wurde zum Beispiel im japanischen Endlagerprogramm ein Beton mit speziell niedrigem pH-Wert entwickelt, damit chemische Störeffekte möglichst gering gehalten werden (JNC 2000b).

7.4 Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme

Wie bereits in Kapitel 6.4 angesprochen wurde, sind verschiedene Gründe dafür verantwortlich, dass jedes nationale Programm seine spezifischen Eigenheiten aufweist. Dazu gehören z.B. die landesspezifischen geologischen Verhältnisse, die es zu berücksichtigen gilt, Besonderheiten des Endlagerkonzeptes und der Abfälle oder auch gesetzliche Vorgaben. Einflussfaktoren, die in Kapitel 6.4 für die Schweiz und Japan angeführt wurden, gelten gleichermassen für sedimentäre und kristalline Wirtgesteine.

In verschiedenen nationalen Programmen, die sich mit einer Endlagerung in tonigen Sedimenten beschäftigen, werden die Konsequenzen der Konsolidation (d.h. das Auspressen von Porenwasser bei der Umlagerung von Spannungen in den Porenräumen auf das Korngerüst) untersucht. Neben den Sedimentschichten im Hangenden können auch zukünftige Eislasten zur Erhöhung des Porenwasserdruckes beitragen, welcher schliesslich durch das langsame Auspressen von Porenwasser aus dem Sedimentgestein abgebaut wird. Dabei wird die Sedimentschicht kompaktiert. Es ist vorderhand offen, von welcher Bedeutung der Auspressvorgang ist, da die Auspressrate im gering durchlässigen Tongestein sehr niedrig sein dürfte. Eine entsprechende Untersuchung unter Berücksichtigung der standortspezifischen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen wird derzeit im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für ein Endlager im Opalinuston in der Nordschweiz durchgeführt.

Ein besonderer Aspekt von Programmen für plastisch-tonige Sedimente, wie den Boom-Ton und den Ypres-Ton in Belgien, ist die Notwendigkeit für Einbauten in Untertagebauwerke. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der generell geringen Festigkeit des Gesteins, seiner langfristigen Verformbarkeit und seiner Tendenz, beim Kontakt mit Luftfeuchtigkeit rasch zu verwittern. Ein gutes Verständnis für die

Wechselwirkungen zwischen den Einbaumaterialien und dem Wirtgestein ist daher wichtig.

7.5 Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises

Ein belastbarer Sicherheitsnachweis beruht auf einer beschränkten Zahl von Argumenten, die jedoch bezüglich der Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse im Endlager und dessen Umgebung sowie deren zeitlichen Entwicklung möglichst gut belegt sind. Die Vorzüge eines belastbaren Sicherheitsnachweises wurden im Zusammenhang mit kristallinen Gesteinen in Kapitel 6.5 diskutiert.

Eigenschaften toniger Sedimentgesteine, die sich günstig auf die Sicherheit auswirken, wurden in Kapitel 7.3.1 beschrieben. Gegenüber dem geklüftetem Kristallingestein haben viele Sedimentgesteine den Vorteil, dass es relativ leicht ist, standortspezifische Informationen zur räumlichen Verteilung ihrer Struktur zu erheben und somit Unsicherheiten zu minimieren. Tonige Sedimentgesteine sind flächenhaft oftmals verhältnismässig homogene und weiträumige Formationen, deren Eigenschaften anhand von wenigen Bohrungen und einer seismischen Untersuchung relativ gut prognostizierbar sind. Dies bedeutet nicht nur einen begrenzten Untersuchungsaufwand, sondern äussert sich auch darin, dass mögliche Störeinflüsse der Untersuchungen (Bohrungen) auf die günstigen Eigenschaften des Sedimentgesteins minimiert werden.

Für den potentiellen Standort eines Endlagers im Opalinuston im Zürcher Weinland (Nordschweiz) liess sich die Geometrie des Wirtgesteins inklusive seiner Strukturen von der Oberfläche aus mit einer 3-dimensionalen reflexionsseismischen Untersuchung gut prognostizieren. Die Resultate der 3D-Seismik wurden anhand der in der Region Benken abgeteufte Tiefbohrung hinsichtlich der Wirtgesteinseigenschaften kalibriert. Zum Verständnis der komplexen Vorgänge bei der Bewegung des Grundwassers und der Ausbreitung von gelösten Stoffen dient ein umfangreiches Forschungsprogramm im Felslabor Mont Terri (Nordwestschweiz) in derselben Tonformation. Die wohl wichtigste Eigenschaft dieser Formation im Hinblick auf die

Endlagerung radioaktiver Abfälle, nämlich die geringe hydraulische Durchlässigkeit, bestätigt sich in zahlreichen empirischen Befunden aus Tunnelbauwerken und anderen Untertagebauten, die gleichzeitig auch eine Bestätigung für die bautechnische Machbarkeit eines untertägigen Endlagers liefern. Schliesslich konnten in der Tiefbohrung Benken die paläo-hydrogeologischen Befunde aus anderen Untersuchungsregionen bestätigt werden.

Einerseits zeichnen sich tonige Sedimente vielfach durch ihre einfachen Strukturen und ihre Homogenität – verbunden mit einer gewissen Einfachheit bei der Standortcharakterisierung – aus. Andererseits beinhalten sie eine beträchtliche Komplexität im Zusammenhang mit der Bewegungen des Grundwassers und der Ausbreitung der darin gelösten Stoffe (beispielsweise Radionuklide). Die Durchlässigkeit der Tone und Schluffe ist so gering, dass nicht von einer gewöhnlichen Darcy-Strömung ausgegangen werden kann. Tatsächlich zeigen piezometrische Messungen oft erhebliche hydraulische Ungleichgewichte innerhalb und ausserhalb gering durchlässiger Sedimentformationen (e.g. NAGRA 1993, 1994). Dieser Zustand lässt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Generell wird dieser Befund jedoch als Ausdruck einer langen Reaktionszeit gedeutet, mit der tonige Formationen auf externe oder auch interne Ereignisse oder Prozesse reagieren. Dazu gehören beispielsweise normale Hebungen, Erosionsprozesse oder Vergletscherungen, sowie Gasentwicklung innerhalb der Gesteinsformation.

Gelöste Stoffe breiten sich in diesen Formationen nicht nur diffusiv aus, sondern gegebenenfalls auch wegen thermischen und chemischen Gradienten, die zum Beispiel aus thermo-osmotischen Effekten heraus entstehen. Ferner setzt die geringe Durchlässigkeit voraus, dass erhöhte Gasdrücke aufgrund der Gasentwicklung im Endlager wie auch der möglichen Gasentwicklung in der Formation gründlich untersucht und möglicherweise durch bautechnische Massnahmen verhindert werden.

Die von Natur aus günstigen Eigenschaften toniger Sedimentgesteine und die relative Einfachheit einer angemessenen Standortcharakterisierung haben es manchen Endlagerprogrammen (z.B. Belgien, MARIVOET 1996) erlaubt, den Schwerpunkt des

Sicherheitsnachweises auf die Geosphäre zu verlagern - mit entsprechend geringeren Anforderungen an die technischen Barrieren. Daraus resultieren jedoch sofort Bedenken über die Möglichkeit eines hydraulischen Kurzschlusses dieser Schlüsselbarriere über Stollen und Schächten (inklusive Auflockerungszonen), falls sich Verfüll- und Versiegelungsmassnahmen langfristig als ungenügend erweisen (vgl. Plan Konrad, BfS 1990). In anderen Programmen spielen die technischen Barrieren weiterhin eine wichtige Rolle, weil angenommen wird, dass einige der negativen Aspekte aus Kapitel 7.3.2 und die soeben diskutierten Ungewissheiten die Wirksamkeit der Geosphäre als Transportbarriere stark beeinträchtigen könnten (zumindest aus pessimistischer Sichtweise). Dennoch besteht eine Tendenz, im Sicherheitsnachweis für Sedimentgesteine mehr Gewicht auf die Geosphäre als Transportbarriere zu setzen, als dies für Kristallingesteine oft der Fall ist.

Das Potential einer ungestörten Sedimentformation, über einen langen Zeitraum einen vollständigen Einschluss der Radionuklide im Endlager zu gewährleisten, dürfte auch eine zentrale Botschaft sein, die relativ leicht an die Öffentlichkeit und die institutionellen Entscheidungsträger kommunizierbar ist.

7.6 Auswirkungen auf die Standortwahl

Viele Faktoren, die in Bezug auf ein potentiell günstiges sedimentäres Endlagerumfeld erfüllt sein müssen, sind denen für ein Kristallingestein ähnlich.

Tektonische Stabilität

Die Bedeutung der tektonischen Stabilität ist im Zusammenhang mit Hebung und Erosion möglicherweise grösser als im Kristallin, da die Endlagerteufe im Sedimentgestein geringer sein kann (z.B. NAGRA 1993,1994, JNC 2000a, b). Es ist anzunehmen, dass dies besonders für plastische Tone wichtig ist, wo ein Endlager eventuell in geringeren Tiefen errichtet werden muss als in konsolidierten Sedimenten.

Tektonische Stabilität steht ebenfalls in Verbindung mit der fortlaufenden Deformation und der Entwicklung oder Reaktivierung von Störungen. Tonige Sedimentgesteine sind

generell schwächer als kristalline Gesteine und sind entsprechend schneller und unter geringerem Druck verformbar. Die Reaktivierung von Störungszonen bzw. die fortwährenden Bewegungen entlang Störungen können das Grundwasserfließsystem in der Tiefe verändern, speziell in Formationen mit höherer Transmissivität, die an die tonige Wirtgesteinsschicht grenzen. Dadurch kann sich der hydraulische Gradient über das Wirtgestein verändern, was schliesslich in den Berechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden muss.

Grundwasserfliessraten

Es ist davon auszugehen, dass die Grundwasserfliessraten im Nahfeld klein bis sehr klein und auch in den angrenzenden Sedimentschichten relativ gering sind. Grundwasserfließsysteme können wegen der möglicherweise grossen hydraulischen Anisotropie in geschichteten Sedimenten erhebliche laterale Ausdehnungen aufweisen. Hydraulische Potentiale werden dadurch über sehr beachtliche Distanzen – viel grössere als im Kristallin wahrscheinlich sind – übertragen. Dies bedeutet, dass Grundwasser-Infiltrationsgebiete und Exfiltrationsgebiete im Zusammenhang mit Fließpfaden im Endlager-Fernfeld (Geosphäre) unter Umständen mehrere zehn Kilometer voneinander entfernt liegen können. Falls davon ausgegangen werden muss, dass die grossräumige Hydrogeologie eine wesentliche Bedeutung für die Langzeitsicherheit des Endlagers hat, hat dies Auswirkungen auf die Grösse des Gebietes, das bei einer solchen Standortwahl aus hydrogeologischer Sicht untersucht werden muss. Erfolgt der Stofftransport in den relevanten Formationen jedoch rein diffusiv, kann auf aufwändige Untersuchungen eventuell verzichtet werden.

Auch die Distanz grosser Störungszonen und ihre hydraulischen Eigenschaften sind wichtig für die Bestimmung des Grundwasserfließsystems.

Mechanische Stabilität

Die mechanische Stabilität ist für Sedimentstandorte möglicherweise von grösserer Wichtigkeit als für die kristallinen Gesteine. In plastischen Tonen muss die Stabilität während der Betriebsphase des Endlagers mit permanenten Einbauten (Stützvorrichtungen oder Stollenauskleidungen) erhalten werden. Diese

Stützmassnahmen können so ausgelegt werden, dass sie diejenigen Zeiträume überdauern, die unter Umständen für die Rückholbarkeit der Abfälle, für die Wiederaufsättigung des Endlagers usw. in Betracht gezogen werden. Es ist somit anzunehmen, dass die mechanische Stabilität des Endlagers solange erhalten werden kann, bis die Verfüllung der Hohlräume stützend wirkt. Für konsolidierte Gesteine ist es allerdings möglich, den Bau eines Endlagers ohne Einbauten zu erwägen. In diesem Fall gilt es, ein Gleichgewicht zwischen verschiedenen Einflussfaktoren zu finden. Dazu gehören die Festigkeit des Gesteins, die Tiefe des Endlagers, die notwendige Betriebszeit, die Dauer, während der sich das Gestein plastisch verhält sowie sämtliche Anforderungen bezüglich der Rückholbarkeit der Abfälle.

Geochemische Bedingungen

Tonige Gesteine bieten günstige chemische Bedingungen – z.B. im Sinne von Redoxbedingungen und pH-Werten – um geringe Korrosionsraten, minimale Veränderungen der technischen Barrieren, geringe Löslichkeiten und hohe Sorption der Radionuklide im Nahfeld und besonders auch in der Geosphäre zu gewährleisten. Wie bereits angesprochen, können manche tonige Gesteine jedoch unter atmosphärischen Bedingungen (Exkavation und Betrieb) mit schneller Oxidation reagieren, was in den Analysen zur Langzeitsicherheit berücksichtigt werden muss. Ferner bilden sich Sedimentablagerungen häufig auch unter relativ salinen Bedingungen. Ist dies der Fall, sind die daraus resultierenden Konsequenzen zwar nicht notwendigerweise ungünstig, müssen aber in der Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden.

Geothermischer Gradient

Ein geringer geothermischer Gradient ist günstig, da der Abfluss von (radiogener) Wärme mögliche geochemische Veränderungen der technischen Barrieren und unter Umständen auch des Wirtgesteins verhindert und der Entwicklung von übermässigen Porenwasserdrücken entgegenwirkt (welche über die daraus resultierenden Spannungen in der Gesteinsmatrix zu Scherbrüchen führen können). Allerdings gibt es gegensätzliche Ansichten bezüglich der Temperatur, bei der solche Effekte wirksam werden.

Wirtgesteinsvolumen

Werden lateral kontinuierliche und homogene Sedimentschichten gewählt, stellt das Wirtgesteinsvolumen eher keine Einschränkung dar. Die begrenzte Mächtigkeit einiger Wirtgesteinsformationen setzt vermutlich eine im wesentlichen horizontale Auslegung des Endlagers mit begrenzter vertikaler Ausdehnung voraus. Das Fehlen bedeutender Störungen und Klüftzonen in einem geeigneten Wirtgestein wird gegebenenfalls eine einfachere und durchgehende Endlagerauslegung erlauben. Die niedrigere thermische Leitfähigkeit toniger Sedimentgesteine gegenüber den entsprechenden Werten für kristalline Gesteine kann allerdings bedeuten, dass die Grundfläche des Endlagers vergleichsweise grösser sein wird.

Gasentwicklung und -freisetzung

Die Ursachen der Gasproduktion liegen einerseits bei den Abfällen (z.B. Metallkorrosion) und andererseits in der Möglichkeit natürlicher Gasquellen im Wirtgestein selbst oder in den angrenzenden Formationen. Manche tonige Sedimentgesteine können substantielle Mengen an Gas produzieren und müssen bei der Standortauswahl ausgeschieden werden.

Erkundbarkeit

Sedimentformationen als potentielle Wirtgesteine für Endlager für radioaktive Abfälle werden bevorzugt in Gebieten mit einfacher Struktur ausgewählt, wo die Formationen flach einfallen und wo die sedimentären Ablagerungsbedingungen erhebliche laterale Variationen in der Lithologie verhinderten. Auf diese Weise wird die Extrapolation der Messdaten aus den Bohrlöchern vereinfacht und den Ergebnissen der Standortuntersuchungen kann ein grösseres Vertrauen zugemessen werden. Dies wiederum reduziert die Unbestimmtheiten in den Rechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse und macht die Studien belastbarer. Manche in Untersuchung befindliche Sedimentformation, wie z.B. der Valanginienmergel als mögliches Wirtgestein für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle in der Schweiz (NAGRA 1985, 1993, 1994), weisen jedoch eine relativ stark deformierte Geologie auf, bieten aber dennoch ein hohes Potential für die Isolation der Abfälle.

Glaziale Überlagerung

Die Reaktion der relativ schwachen, tonigen Sedimentgesteine auf eine Eisauflast wird bezüglich der Kompaktion/Deformation und der Porendruckreaktion erheblich stärker ausfallen, als die von kristallinen Gesteinen. Andererseits wird ein Durchfliessen des Endlagernahfeldes mit potentiell sauerstoffhaltigem Schmelzwasser durch das Fehlen von präferenziellen Fliesspfaden in solchen Formationen stark eingeschränkt.

7.6.1 Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl in Sedimentgesteinen sind von der jeweiligen Phase des Untersuchungsprogramms abhängig und sind mit den Anforderungen für die kristallinen Gesteine einigermaßen vergleichbar (vgl. Kapitel 6.6.1). Unterschiede bestehen jedoch in der Grösse der Untersuchungsgebiete, die für die Sedimente grösser sein können und – für den Fall der plastischen Sedimente – in der merklich schwächeren Gewichtung für die Untersuchung von Störungs- und geklüfteten Zonen. Der erste Punkt ist auf die grossräumige Ausdehnung der Grundwassersysteme in Sedimentgesteinen zurückzuführen. Während das Untersuchungsgebiet in einer vom Kristallin geprägten Geologie gewöhnlich in der Grössenordnung von wenigen Quadratkilometern liegt, kann es von Gebieten in einer Sedimentgeologie – falls die grossräumige Hydrogeologie tatsächlich eine Rolle spielen sollte – um mindestens eine Grössenordnung übertroffen werden. Der zweite Punkt ergibt sich daraus, dass sich die Untersuchungen auf Gebiete mit einfacher geologischer Struktur konzentrieren und dass – für plastische Sedimente – eine solche Voraussetzung auf dem Fehlen von bedeutenden Störungszonen beruht.

In den frühen Phasen der Standortauswahl werden die in Frage kommenden Gebiete und potentiellen Standorte einer groben Rangordnung unterstellt. Dies geschieht aufgrund einer Überprüfung des verfügbaren Gesteinsvolumens und der geomechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins, der mineralogischen bzw. chemischen Zusammensetzung von Gesteinen und Grundwasser, der regionalen und

(ungefähren) lokalen Hydrogeologie und dem Vorkommen grosser tektonischer Strukturen wie Störungszonen oder ungünstigen Lithologien.

Im weiteren Verlauf des Untersuchungsprogramms sind jedoch Informationen über die Grundwasserfliesssysteme auf verschiedenen räumlichen Massstäben unerlässlich

- um das Vertrauen in die regionalen hydrogeologischen Modellkonzepte zu stärken, die den Rahmen für die numerischen Modelle auf lokalem und Endlager-Massstab darstellen
- um die Strömungs- bzw. Ausbreitungsmechanismen im potentiellen Wirtgestein besser zu verstehen, so dass numerische Modelle zur Ausbreitung und Retardation der Radionuklide angemessen angewendet werden können.

In der Phase, in welcher Vergleiche innerhalb einer Reihe von potentiellen Endlagerstandorten durchgeführt werden, wird das Hauptaugenmerk auf die Wirksamkeit der Geosphäre fallen, da die auf ähnlich aufgebauten technischen Barrieren basierende Wirksamkeit des Nahfeldes generell weniger stark von den Eigenschaften des Wirtgesteins und der Geologie abhängt. Diese Aussage trifft allerdings eher für das Kristallin als für Sedimentgesteine zu. Unter sedimentären Bedingungen kann der Aufbau der technischen Barrieren in gewissem Masse variieren, besonders hinsichtlich der notwendigen Einbauten für die Untertagebauwerke.

Beispielsweise spielt die physikalische Auflockerungszone in plastischen Tonen wegen der Selbstheilung eine untergeordnete Rolle, während ihre Relevanz in konsolidierten tonigen Sedimentgesteinen noch nicht eindeutig feststeht. Im Bezug auf die Auswirkungen auf das Gestein in unmittelbarer Nähe des Endlagers sind die Konsequenzen des Endlagerbaus in stark konsolidierten Sedimenten wahrscheinlich grösser als in allen anderen Gesteinstypen. Grundsätzlich dürften geochemische Wechselwirkungen (z.B. Pyritoxidation), die mit dem Endlagerbau in Sedimenten generell in Zusammenhang stehen, ein wichtiger Aspekt darstellen.

7.6.2 Allgemeine Ausschlusskriterien

Folgende Faktoren können dazu führen, dass sedimentäre Gesteinsformationen als potentielle Wirtgesteine zurückgestellt oder sogar ausgeschlossen werden müssen:

- Hohe hydraulische Durchlässigkeit z.B. von Sandsteinformationen oder auf Grund von andern potentiell wasserführenden Strukturen (wie Störungszonen, Karsterscheinungen in karbonathaltigen Sedimenten usw.)
- Mangelnde Überdeckung der Gesteinsformation, speziell im Zusammenhang mit Hebungen und möglichen Erosionsprozessen, z.B. durch Vergletscherung
- Bautechnisch ungünstige Tiefenlage (felsmechanische Bedingungen)
- Zu geringe Mächtigkeit der Gesteinsformation
- Heterogenität (speziell in Zusammenhang mit wasserführenden Strukturen, Sandkanälen usw.)
- Signifikante Produktion natürlicher Gase im Wirtgestein
- Rohstoffkonflikte.

8 STANDORTAUSWAHL IN EVAPORITFORMATIONEN

Von den in Frage kommenden Evaporiten wird im vorliegenden Bericht nur Salzgestein betrachtet. Salzgestein hat mehrere Eigenschaften, die sich günstig auf seine Eignung als Endlagerformation auswirken. Diese wurden bereits in den ersten amerikanischen Studien in den 50-er Jahren über die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen erwähnt (NRC 1957) und führten ab den 60-er Jahren zu einer Reihe von Untersuchungsprogrammen in Europa und den USA. Salzformationen entsprachen im übrigen dem Wirtgestein von sieben aus neun detailliert betrachteten Standorten für ein erstes Endlager für abgebrannten Kernbrennstoff in den USA (US DOE 1986).

Zu den günstigen Eigenschaften der Salzformationen gehören:

- Hohe Standfestigkeit des Gebirges
- Günstige Kriecheigenschaften des Gebirges
- Geringe Permeabilität
- Abwesenheit von Grundwasser.

Die hohe Standfestigkeit ermöglicht eine einfache Erstellung untertägiger Hohlräume und eine einfache Erstellung geotechnischer Barrieren. Die Kriecheigenschaften des Gebirges führen bei einer ungestörten Entwicklung zu einer Isolation der Abfälle im Wirtgestein und verstärken die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren.

Die geringe Permeabilität verhindert den Zutritt von Grundwasser aus wasserführenden Schichten bzw. von Salzlösungen in die Einlagerungshohlräume. Die Abwesenheit von Grundwasser im Salzgestein bedeutet bei ungestörter Entwicklung den absoluten Einschluss der Radionuklide.

8.1 Programme für Salzformationen

Die ausgewählten nationalen Programme für die Errichtung von Endlagern in verschiedenen Ländern unterscheiden sich in der Art der Salzformation: es wurden entweder Salzstöcke, Salzstrukturen oder Salz in flacher Lagerung untersucht. Während Salzstöcke (Diapire) infolge Halokinese und Salzstrukturen infolge tektonischer Vorgänge entstanden sind, stellen die flach gelagerten Salze die ursprüngliche Schichtung dieser Evaporite dar. In Tabelle 8.1 sind die für diese Studie ausgewählten Sicherheitsanalysen der Endlagerprogramme in Deutschland, Holland und den USA zusammengestellt.

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Formationsarten im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers beziehen sich insbesondere auf deren räumliche Ausdehnung, Wasserführung, Verfaltung sowie auf die geochemischen Verhältnisse. Die Vor- und Nachteile der Formationsarten sind in Tabelle 8.2 angegeben.

Tabelle 8.1: Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Salzformationen

Land und Organisation	Formation	Zweck der Sicherheitsanalyse	Dokumentation
Deutschland (GSF)	Salzstock	Vergleich von Endlagerkonzepten mit abgebranntem Brennstoff (BE) und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (HAA, MAA)	SAM - Gorleben (GSF 1991)
(GRS, Colenco)	Salzstruktur	Planunterlage für ein Genehmigungsverfahren zum Verschluss eines existierenden Endlagers (SMA)	ERAM - Morsleben (GRS 2000, COLENCO 2000)
Holland (ECN)	Salzstock	Darstellung der Machbarkeit der HAA- und LMA-Endlagerung	PROSA (OPLA 1993)
USA (US DOE)	Flaches Lager	Unterlage für ein Genehmigungsverfahren zur Errichtung eines Endlagers mit TRU-Abfällen	WIPP (US DOE, 1996)

Tabelle 8.2: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile verschiedener Salzformationen

	Salzstock, Salzstruktur	Flache Lagerung
Vorteile	Grosse vertikale Ausdehnung Keine wasserführenden Schichten Intaktes Hutgestein	Grosse laterale Ausdehnung Keine Verfaltungen Intakte abdeckende Tonschichten
Nachteile	Verfaltungen als Folge des Salzaufstiegs (Diapirismus) Wegsamkeiten über Inhomogenitäten Begrenzte Homogenbereiche in lateraler Ausdehnung Möglicherweise keine intakten abdeckenden Tonschichten Komplexe geochemische Verhältnisse Dichtheit gegenüber Gasen	Geringe vertikale Ausdehnung Wasserführende horizontale Schichten Komplexe geochemische Verhältnisse (Dichtheit gegenüber Gasen, vgl. Kapitel 8.3.2) Evtl. Rohstoffe unterhalb des Endlagers

8.2 Generalisiertes Sicherheitskonzept für Salzgestein

Das Sicherheitskonzept beruht bei ungestörter Entwicklung und genügend mächtigen Steinsalzbereichen auf der vollständigen Isolation der eingelagerten Abfälle in der Wirtgesteinsformation. Dabei werden die nach der Einlagerung noch offenen Hohlräumen des Endlagers als Folge des Kriechens des Salzgesteins verschlossen. Wegen der Undurchlässigkeit des kompakten Steinsalzes und wegen der Abwesenheit von wasserführenden Schichten gibt es dann keine Möglichkeiten für die Freisetzung von Radionukliden. Die ungestörte Entwicklung kann durch die Art der Auffahrung der Grubenhohlräume und eine entsprechende Auslegung des Endlagers mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht werden. Um Freisetzungen zu bewirken, muss unterstellt werden, dass die Sicherheitsbarriere des Salzes durchbrochen wird; dies entspricht der gestörten Entwicklung des Endlagersystems.

Bei der gestörten Entwicklung beruht das Sicherheitskonzept auf der Begrenzung der radiologischen Konsequenzen für zukünftige Individuen. Dies ist in Abbildung 8.1 schematisch dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung sind die sicherheitsrelevanten Prozesse vom unterstellten Eindringen der Lösung in die Einlagerungshohlräume bis zur Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre

angegeben. Zwei weitere Faktoren, welche die Ausbreitung der Radionuklide indirekt beeinflussen, sind auf der rechten Seite der Abbildung angegeben: die durch Korrosion verursachte Gasproduktion und die Langzeitentwicklung des Barrierensystems. Alle Prozesse werden von den in der Mitte der Abbildung angegebenen Eigenschaften der Systemkomponenten beeinflusst.

In der Abbildung werden die folgenden Begriffe verwendet:

- *Nahfeld*: Hohlräume, Versatz und Verschlüsse in allen bergmännisch aufgefahrenen und wieder verfüllten Bereichen des Endlagers und die umgebende Wirtsfornation
- *Fernfeld*: Bereich zwischen dem Austrittsort aus dem Nahfeld und der Biosphäre. Ein wesentlicher Teil des Fernfelds ist das Deckgebirge und in Einzelfällen auch das Nebengebirge.

Die Begrenzung der radiologischen Konsequenzen erfolgt über die Rückhaltewirkung unterschiedlicher Prozesse und Materialien. Das Eindringen von Lösungen in die Einlagerungshohlräume und der Kontakt mit den Abfällen wird durch die Strömungswiderstände der Abdichtungen und des Versatzes behindert. Die Mobilisierung von Radionukliden wird durch Behälter und Abfallmatrizen verzögert oder behindert. Die Ausbreitung kontaminierter Lösungen innerhalb der Grube wird durch Versatz und Abdichtungen behindert, wobei Sorption und Ausfällungen die Ausbreitung weiter verzögern. Nach einer Freisetzung in das Fernfeld wird die Ausbreitung durch lange Transportzeiten sowie durch Sorption und Filterung kolloidgebundener Radionuklide behindert.

8.3 Gemeinsamkeiten in den Ergebnissen der nationalen Programme

Die Untersuchungen in den nationalen Programmen haben Gemeinsamkeiten bezüglich der Eigenschaften des Salzgesteins ergeben. Einige dieser gemeinsamen Eigenschaften wirken sich günstig, andere ungünstig auf die Wirksamkeit des Endlagersystems aus und werden daher getrennt dargestellt.

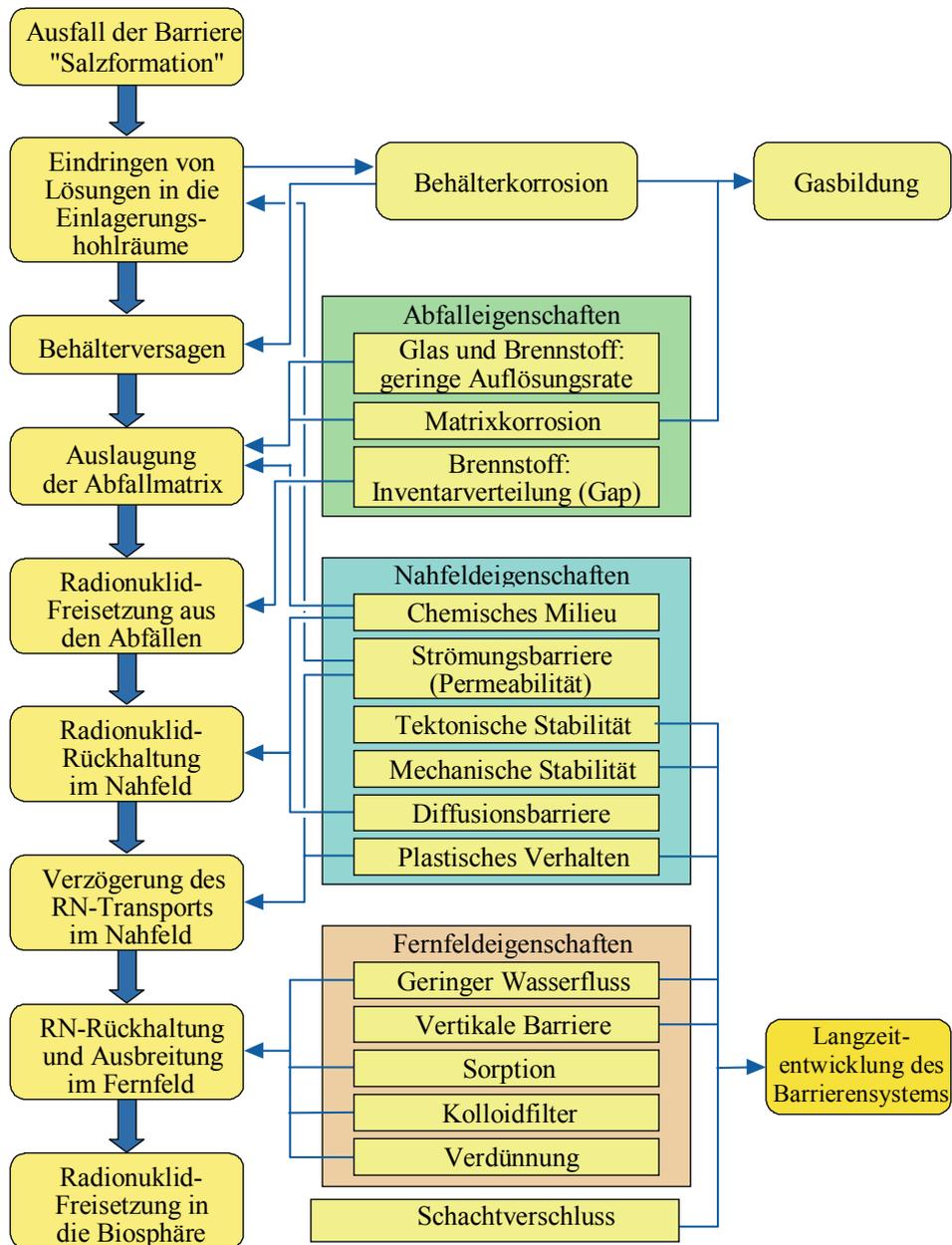


Abbildung 8.1: Wirksamkeit des Endlagersystems in Salzformationen bei gestörter Entwicklung

8.3.1 Vorteilhafte Eigenschaften des geologischen Umfeldes

Die wesentlichen Eigenschaften des Steinsalzes zur Eignung als Wirtgestein sind die Undurchlässigkeit des homogenen Steinsalzes für wässrige Lösungen und die Plastizität. Beide Eigenschaften zusammen bewirken, dass die Abfälle über lange Zeiten völlig im Wirtgestein isoliert werden, solange es nicht zu einer gestörten Entwicklung kommt. Die Plastizität verbessert darüber hinaus die Wirksamkeit der technischen Barrieren, indem eventuell vorhandene Auflockerungszonen um die Barrieren im Laufe der Zeit wieder verheilen und dadurch Umläufigkeiten um die Barrieren höchstens kurzfristig relevant sind.

Für ein günstiges Kriechverhalten ist eine geeignete Zusammensetzung des Salzgesteins erforderlich. Das Endlager muss auch in einer ausreichenden Tiefe liegen, um von dem beschleunigten Kriechen bei höheren Gebirgsdrücken und Temperaturen zu profitieren. Ausserdem sollten in der Salzformation keine wenig kriechfähigen Einlagerungen vorhanden sein, damit das Kriechen des Steinsalzes nicht behindert wird.

Innerhalb des Wirtgesteins müssen genügend mächtige und genügend ausgedehnte, homogene Steinsalzbereiche für die Einlagerungshohlräume verfügbar sein. Dabei sind Sicherheitsabstände zu potentiellen Wegsamkeiten einzuhalten sowie zu solchen Gesteinen, welche durch Umlösevorgänge zusätzliche Hohlräume und Wegsamkeiten verursachen können. Das Grubengebäude sollte so im Wirtgestein angeordnet werden können, dass Gesteinsschichten, die potentielle Wegsamkeiten darstellen können, möglichst wenig durchörtert werden müssen. Eine starke Verfaltung des Wirtgesteins erschwert die Einhaltung der genannten Anforderungen.

Neben den Eigenschaften des Wirtgesteins sind in Bezug auf die gestörte Entwicklung des Endlagersystems die Eigenschaften des Deckgebirges und der angrenzenden Formationen wichtig. Für die Eignung eines Standortes für ein Endlager in einer Salzformation haben sich als günstig herausgestellt:

- Abdeckung der Salzformation mit geringdurchlässigen Tonschichten

- Keine signifikante Klüftigkeit der abdeckenden Tonschichten
- Lange Grundwasserfliesszeit
- Gute Sorptionsfähigkeit für langlebige Radionuklide
- Ausreichende Wasserführung der oberflächennahen Sedimentschichten für Verdünnung.

Die ersten vier Eigenschaften beziehen sich auf den advektiven Stofftransport. Letztendlich zielen sie alle darauf ab, eine lange Transportzeit herbeizuführen, damit möglichst viele Radionuklide während des Transportes zerfallen können. Dieser Effekt wird durch hohe Sorption in den Deckgebirgsschichten erhöht. Falls dieser Effekt nicht ausreicht, beispielsweise bei einem kurzen Ausbreitungspfad, spielt die Verdünnung der freigesetzten kontaminierten Lösungen in den oberflächennahen Schichten eine grosse Rolle.

8.3.2 Unvorteilhafte Eigenschaften

Durch Korrosion und Zersetzung der eingelagerten Abfallmaterialien und Behälter können im Endlager erhebliche Gasmengen gebildet werden. Weil das Gas nicht durch die Matrix des Wirtgesteins entweichen kann, können hohe Gasdrücke entstehen, welche die Integrität des Wirtgesteins beeinträchtigen können. Im Fall der flachen Lagerung (WIPP) ist dieses Problem weniger gravierend, weil die entstehenden Gase über vorhandene Wegsamkeiten entweichen können. Für eine vollständige Isolation der Abfälle muss Vorsorge gegen die entstehenden Gasdrücke getroffen werden. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass die Hohlräume des Grubengebäudes nur teilweise versetzt werden, um den Gasen genügend Raum zur Verfügung zu stellen und um damit die Gasdrücke zu begrenzen. Da Gase vor allem bei schwach- und mittelaktiven Abfällen entstehen, sollten diese von den hochaktiven Abfällen räumlich getrennt sein, um bei den hochaktiven Abfällen die zusätzlichen Probleme durch Gasbildung zu vermeiden.

Der Aufstieg der Salzstöcke und Salzstrukturen infolge Halokinese und tektonischer Effekte sollte an potentiellen Standorten weitgehend abgeschlossen oder zumindest genügend klein sein. Trotzdem kann ein weiterhin möglicher Aufstieg die

Langzeitsicherheit in Frage stellen. Werden an einem Standort grosse Hebungsraten festgestellt, so kann dies zu einer schnellen Freisetzung von Radionukliden führen, wenn infolge von Subrosion die Einlagerungsbereiche bis in das Grundwasser gelangen. Erfolgt eine derartige Entwicklung zu schnell, ist der Standort ungeeignet.

Bei Salzstöcken und Salzstrukturen führen die Hebungsvorgänge zu einer starken Verfallung der Schichten, so dass unter Umständen keine genügend grossen homogenen Bereiche innerhalb des Steinsalzes für Einlagerungsbereiche zur Verfügung stehen.

Steinsalz ist ein potentieller Rohstoff und in seiner Umgebung muss immer mit anderen Rohstoffvorkommen gerechnet werden. Aus diesem Grund sind menschliche Aktivitäten zur Rohstofferkundung sehr wahrscheinlich und gestörte Entwicklungen mit menschlichen Einwirkungen sind für dieses Wirtgestein immer zu berücksichtigen. Das Risiko künftiger Bergbauaktivitäten in der Salzformation selbst oder in damit verbundenen natürlichen Rohstoffvorkommen ist eine Thematik, die eine spezielle Betrachtung erfordert.

8.4 Spezifische Aspekte in den Ergebnissen der nationalen Programme

Die Auswertung der nationalen Programme hat neben den im vorigen Kapitel dargestellten Gemeinsamkeiten spezifische Aspekte zur Standortwahl ergeben, die durch spezielle geologische Gegebenheiten eines Landes oder durch Besonderheiten der Endlagerkonzepte verursacht werden. Im folgenden sind Beispiele für Einflussfaktoren aufgeführt, die sich aus den Besonderheiten der nationalen Programme ergeben:

- In der Umgebung des WIPP-Standortes befinden sich grosse Kalisalzlager und potentielle Kohlenwasserstofflager (Erdgas, Erdöl). Wegen der Möglichkeit der Exploration dieser Rohstoffvorkommen haben Szenarien mit menschlichen Einwirkungen für diesen Standort eine grosse Relevanz.
- Die für WIPP vorgesehenen Transuran-Abfälle (TRU) enthalten Radionuklide mit

langen Halbwertszeiten, aber – in bestimmten chemischen Milieus – geringen Löslichkeiten. Daher beruht das Sicherheitskonzept u.a. auf einer effektiven Begrenzung der Aktinidenlöslichkeit im Nahbereich. Dies wird durch ein geeignetes chemisches Milieu erreicht, das durch Magnesiumoxid als Versatzmaterial eingestellt wird.

- In den Niederlanden gibt es Salzstöcke mit darüberliegenden durchgehenden Tonschichten. In dem Endlagerprogramm wurde daher angenommen, dass es einen geeigneten Standort mit solchen Tonschichten gibt. Der Sicherheitsnachweis profitiert dann von den langen Transportzeiten für Radionuklide vom Salzstock durch die Tonschichten bis in die Biosphäre. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Deckgebirge nur eine geringe Klüftigkeit aufweist.
- Für den Standort Gorleben sind insbesondere wärmeproduzierende Abfälle und Brennelemente zur Einlagerung vorgesehen. Deren hohe Wärmeproduktion beschleunigt das Kriechen des Salzgesteins und führt bei ungestörter Entwicklung zu einer schnellen Isolation der Abfälle im Wirtgestein. Der Salzstock Gorleben ist über grosse Abschnitte von Hutgestein überdeckt. Dieses wird jedoch von einer tiefen fluvioglazialen Rinne – die Gorlebener Rinne – durchschnitten, die an wenigen Stellen direkt mit dem Salzstock in Kontakt steht. Diese Rinne stellt einen der wichtigsten potentiellen Austragswege für Schadstoffe aus dem Salzstock nach dem Übertritt in das Deckgebirge dar. Der Salzwasserabfluss aus der Gorlebener Rinne gelangt in den ausgedehnten und mächtigen Aquifer der nördlichen Randsenke, in dem eine substantielle Verdünnung stattfindet.
- Am Standort Morsleben wurde das Endlager in einem bereits existierenden Grubengebäude mit einer hohen Durchörterung des Wirtgesteins eingerichtet. Ausserdem sind Salzpartien aufgeschlossen, die durch Umlösevorgänge weitere Hohlräume und Wegsamkeiten verursachen können. In diesem Fall müssen die technischen Barrieren hohe Anforderungen erfüllen, und der Sicherheitsnachweis ist schwieriger zu erbringen als für ein Grubengebäude, das eigens für ein Endlager errichtet wird.

Endlagerkonzepte oder Details der Konzepte können sich in einem iterativen Prozess im Laufe der Zeit durch Optimierung des Endlagersystems ändern. Beispielsweise

wurde im WIPP-Projekt das Versatzmaterial Magnesiumoxid erst zu einem späten Zeitpunkt eingeführt, nachdem sich herausgestellt hatte, dass es notwendig ist, das chemische Milieu im Nahfeld dauerhaft so einzustellen, dass die Aktinidenlöslichkeit gering ist.

8.5 Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises

Ein belastbarer (robuster) Sicherheitsnachweis stützt sich auf mehrere Aspekte:

- Ein robustes, d.h. auf Ungewissheiten bzw. Störungen wenig empfindliches Endlagersystem; dieser Nachweis stützt sich unter anderem auf Parametervariationen und probabilistische Verfahren zur Behandlung von Daten- und Modellunsicherheiten
- Der Einsatz von möglichst einfachen, umfassend getesteten Modellen und gut erfassbaren, zuverlässigen Daten unter Beachtung von Qualität, Transparenz und Nachvollziehbarkeit; d.h. ein belastbarer Sicherheitsnachweis beruht so weit wie möglich auf gut bekannten und quantitativ beschreibbaren Prozessen und Materialeigenschaften.
- Angemessene Sicherheitsreserven des Gesamtsystems auch wenn konservative Annahmen getroffen werden; für weniger gut erfasste Wissensbereiche oder bei Unsicherheiten in den Daten sollte die Konservativität der Methode möglichst einfach nachweisbar sein.

Das hohe Alter der Steinsalzformationen ist an sich bereits ein Indiz für die Eignung als Wirtgestein, da in der Vergangenheit keine nennenswerten Wasserbewegungen stattgefunden haben können. Die Sicherheitsanalysen dienen dazu, diese Aussage in die Zukunft zu extrapolieren, wobei sowohl ungestörte Entwicklungen der Standorte als auch Störfälle, wie beispielsweise Zutritte von Lösungen und menschliche Einwirkungen berücksichtigt werden.

Ein wesentliches Element der Belastbarkeit ist in allen Endlagerprogrammen das Multi-barrierenkonzept. Im Falle des Verlustes der Integrität der Salzformation gewährleisten

die technischen Barrieren und das Deckgebirge die Sicherheitsfunktion. Alle Programme gehen iterativ vor, wodurch das Vertrauen in die Aussagen der Analysen erhöht wird. Ausserdem werden die Erkenntnisse aus einem Iterationsschritt zur Optimierung von Komponenten oder des Gesamtsystems verwendet und in einem nächsten Schritt bewertet.

Aspekte der Belastbarkeit des Sicherheitsnachweises, die bei der Standortauswahl von Bedeutung sind, sind u.a. die Vermeidung von Standorten, deren Umfeld langfristig die Sicherheit beeinträchtigen kann. Dazu gehören, wie zuvor ausgeführt, Gebiete mit relativ viel Rohstoffvorkommen, starker Tektonik und hohen Hebungsraten der Salzformationen. Auch sollten komplexe ingenieurtechnische Lösungen vermieden werden, wie sie unter Umständen in Endlagern notwendig sind, die in bereits existierenden, stark durchörterten Grubengebäuden eingerichtet werden (siehe ERAM).

Ein belastbarer Sicherheitsnachweis ist auf eine ausreichende Datenbasis angewiesen. Da Salzformationen seit langem als Rohstoffquellen erkundet und ausgebeutet werden, liegen eine Vielzahl von Daten vor, beispielsweise zur Morphologie und Rheologie und zur chemischen Zusammensetzung von Lösungen in diesen Formationen. Für die Beurteilung eines konkreten Standortes sind standortspezifische Daten unabdingbar, die mit umfangreichen Messprogrammen ermittelt werden müssen. Die Messprogramme u.a. für WIPP und Gorleben haben dazu geführt, dass Salz inzwischen ein gut erforschtes Wirtgestein für ein Endlager ist.

Einige für die Langzeitsicherheit potentiell gefährliche Phänomene können bei Endlagern in Salzformationen durch die technische Auslegung des Nahfelds und durch eine ausreichende Endlagerteufe vermieden oder zumindest begrenzt werden. Die zukünftige Entwicklung eines Standortes unter Berücksichtigung der Exploration von Rohstoffvorkommen, ist schwer zu prognostizieren. Insofern sind die Sicherheitsnachweise mit Unsicherheiten behaftet, die für ein robustes Endlager zu quantifizieren sind.

Die Tatsache, dass es sich bei den betrachteten Salzformationen um absolut trockene und sehr alte geologische Einheiten handelt, dürfte in der breiten Öffentlichkeit als interessantes Argument bezüglich der Eignung als Wirtgestein gut kommunizierbar sein.

8.6 Auswirkungen auf die Standortauswahl

Das Wirtgestein Salz hat eine besondere Bedeutung innerhalb des Sicherheitskonzeptes zur Langzeitisolation der Abfälle bei ungestörter Entwicklung und zur Unterstützung der technischen Barrieren bei gestörter Entwicklung. Daher sind bei der Auswahl eines geeigneten Standortes folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Die Steinsalzformation sollte für die Aufnahme der Einlagerungsbereiche eine ausreichende Mächtigkeit haben, damit die Barrierenwirkung des vom Endlager unbeeinflussten Gesteins gewährleistet ist
- Die Formation sollte lateral genügend ausgedehnt sein, damit ausreichend grosse homogene Steinsalzbereiche für die Einlagerung zur Verfügung stehen
- Das Wirtgestein sollte möglichst wenig Heterogenitäten aufweisen, um diese potentiellen Wegsamkeiten zu vermeiden
- Salzformationen mit grossen Kalisalzbereichen sind ungünstig, weil diese Bereiche durch Umlösungen zu zusätzlichen Hohlräumen und Wegsamkeiten führen können, wenn sie im Grubengebäude nicht weiträumig umfahren werden können
- Das Wirtgestein sollte ausreichend tief sein, damit die Grube in Bereichen erstellt werden kann, die eine günstige Temperatur und einen günstigen Gebirgsdruck aufweisen
- Salzformationen mit hohen Subrosionsraten sind zu vermeiden. Die Subrosion ist gering, wenn die Salzformation von einer gering durchlässigen Schicht abgedeckt ist.

Wie das Wirtgestein hat auch das Deckgebirge eine besondere Bedeutung für die Langzeitsicherheit eines Standortes. Daher sind bei der Wahl eines geeigneten Standortes die folgenden Faktoren zu berücksichtigen:

- Tektonische Stabilität: Gebiete mit geringer tektonischer Aktivität weisen wenig Störzonen auf und ändern sich wenig über lange Zeiträume. Störzonen begünstigen den vertikalen Transport vom Endlager in die Biosphäre und sind daher weitgehend zu vermeiden. Bei flacher Lagerung ist die Schichtstruktur in tektonisch stabilen Gebieten weitgehend ungestört, was den advektiven, vertikalen Transport effektiv behindert.
- Eine eventuelle Abdeckung des Wirtgesteins mit durchgehenden Tonschichten hat eine positive Auswirkung auf die Langzeitsicherheit; Dies hat sich in vielen Sicherheitsanalysen bestätigt. Die abdeckenden Tonschichten dürfen nicht von signifikanten Störzonen durchzogen sein.
- Ein mächtiges Deckgebirge mit einem grossen Grundwasserreservoir wirkt sich durch Verdünnungseffekte günstig auf die Langzeitsicherheit aus. Dabei sollte die Fließrate des Grundwassers gering sein, damit die Transportzeit von der Salzformation in die Biosphäre gross ist. Eine grosse Transportzeit verringert im Zusammenspiel mit Sorption und radioaktivem Zerfall die Freisetzung in die Biosphäre.

8.6.1 Anforderungen an die Standortcharakterisierung während der Standortauswahl

Die Standortcharakterisierung bezieht sich im wesentlichen auf das Wirtgestein selbst und auf das Deckgebirge. Die Anforderungen an die Charakterisierung hängen von der Phase des Untersuchungsprogramms ab. In der Anfangsphase werden Untersuchungen zum Deckgebirge sowie zur Ausdehnung und zum internen Aufbau des potentiellen Wirtgesteins im Vordergrund stehen. Dazu gehören die Untersuchungen von Störzonen und der lokalen Hydrogeologie sowie der Zusammensetzung von Gesteinen und Grundwasser. Bei Salzstöcken und Salzstrukturen werden auch Daten zur Hebungsrate und zu den abdeckenden Schichten benötigt.

Für Salzstöcke hängt die Grösse des Untersuchungsgebietes einerseits von der lateralen Ausdehnung der Salzformation selbst, andererseits von der hydrogeologischen Situation in den Nebengesteinen und den sedimentären Überlagerungen

ab. Im Gegensatz zu den lithologisch meist komplex aufgebauten Salzstöcken kann die Erkundung flacher Salzablagerungen technisch wesentlich einfacher sein, obwohl hier das Standortgebiet u. U. durch das Vorkommen natürlicher Ressourcen grossräumiger untersucht werden muss.

Grundsätzliche Unterschiede in der Grösse der Untersuchungsgebiete für Salzformationen im Vergleich zu anderen Wirtgesteinen (Kristallin, tonige Sedimente) existieren nicht: Die Grösse des zu untersuchenden Gebietes ist in jedem Fall stark von der geologischen Gesamtsituation des Standortes und der geplanten Anordnung der Einlagerungshohlräume abhängig.

Der zur Erkundung der inneren Strukturen notwendige Aufwand richtet sich – wie bei anderen Wirtgesteinen – nach der Komplexität der kleinräumigen Stratigraphie der Salzformationen sowie dem Ausmass eventuell vorhandener tektonischer Störungen.

Mit fortschreitendem Programm werden detailliertere Informationen benötigt, u.a. um Standorte besser miteinander vergleichen zu können. Für das Deckgebirge werden Daten zur Permeabilität der einzelnen Schichten sowie der eventuell vorhandenen Störzonen und Daten zur Sorption benötigt. Der Aufbau des Deckgebirges sollte im Detail bekannt sein, inklusive eines hydrogeologischen Modells, um potentielle Ausbreitungspfade mit hinreichender Genauigkeit identifizieren zu können. Dabei ist auch zu untersuchen, ob die Grundwasserbewegung in einem stationären Zustand ist. Für das Wirtgestein selbst muss der innere Aufbau untersucht werden, d.h. das Ausmass der Verfaltungen, die Mächtigkeit und die laterale Ausdehnung homogener Steinsalzbereiche, Vorkommen von Kalilagern, Häufigkeit und Menge von Lösungsvorkommen sowie Gesteinsparameter. Erkundungsbohrungen und eventuell vorhandene ehemalige Grubengebäude zum Abbau benachbarter Rohstoffvorkommen müssen als potentielle Wegsamkeiten vollständig dokumentiert werden.

8.6.2 Allgemeine Ausschlusskriterien

Auch andere Faktoren, die nur teilweise anhand der Ergebnisse von Sicherheitsanalysen identifiziert werden, können zum Ausschluss eines Standortes führen. Die Arbeiten zur WIPP haben gezeigt, dass menschliche Einwirkungen ein wesentlicher Faktor für die Langzeitsicherheit sein können. Daher sind beispielsweise Standorte, in deren Nähe in der Vergangenheit viel Bergbau betrieben wurde, wenig geeignet, da alle bergbaulich erstellten Hohlräume potentielle Wegsamkeiten für Radionuklide sind. Ausserdem sind möglicherweise nicht alle Hohlräume dieser Bergwerke bekannt und können daher nicht im Rahmen von Sicherheitsmassnahmen verschlossen werden. Auch wenn in Zukunft menschliche Einwirkungen sehr wahrscheinlich sind, beispielsweise wegen bedeutender Rohstoffvorkommen in der Nähe eines potentiellen Standortes, kann die Eignung von vornherein in Frage stehen.

Trotz des hohen Alters von Salzstöcken und Salzstrukturen kann es vorkommen, dass die Aufstiegsvorgänge noch nicht abgeschlossen sind. Sind die Hebungsraten sehr gross, so kann der Standort ungeeignet sein, weil in Zusammenwirken mit Subrosion der Einlagerungsbereich relativ schnell in den Bereich des Grundwassers gelangt. In diesem Fall ist davon auszugehen, dass die Menge der freigesetzten Radionuklide nicht tolerabel ist. Gebiete mit hohen Hebungsraten der Salzformationen sind daher auszuschliessen.

9 KRIERIEN FÜR DIE STANDORTAUSWAHL

Wie die bisherigen Ausführungen gezeigt haben, ist es schwierig, aus einer einzigen Langzeitsicherheitsanalyse allein Schlussfolgerungen mit allgemeiner Gültigkeit für die Standortauswahl abzuleiten. Die Betrachtung von mehreren Sicherheitsanalysen und deren Gruppierung nach Wirtgesteinstypen ermöglicht es jedoch, in Abhängigkeit des Wirtgesteins einige Schlüsselfaktoren aufzuzeigen, welche für die nachgewiesenen Einschluss- und Rückhaltewirksamkeiten unterschiedlicher Endlagersysteme von Bedeutung sind.

In diesem Kapitel werden diese Faktoren zusammengeführt, um einige Kriterien für die Standortauswahl in Bezug auf die geologische Gesamtsituation (unabhängig vom Endlagerkonzept) und für das Gesamtsystem des geologischen Endlagers auszuarbeiten. In Bezug auf das Gesamtsystem sind die Kriterien bereits nicht mehr allgemeiner Natur, sondern ausschliesslich für bestimmte Abfalltypen und Endlagerkonzepte anwendbar.

Für die Ausarbeitung von Kriterien werden die allgemeinen Eigenschaften der verschiedenen Wirtgesteine, die für die Langzeitsicherheit eines Endlagers wichtig sind, aufgeführt und als "erforderlich" oder als "günstig" eingestuft. In einem vertieften Analysenschritt werden hier weitere wirtgesteinsspezifische Faktoren zusammengestellt, die für bestimmte Abfälle und Endlagerkonzepte eine wichtige Rolle spielen.

Um die Betrachtung aus dem Blickwinkel der Langzeitsicherheitsanalyse in den richtigen Rahmen zu setzen, werden abschliessend für andere Gesichtspunkte weitere relevante Kriterien angesprochen, bevor dann die Schlussfolgerungen gezogen werden.

9.1 Geologische Gesamtsituation

Bei den Überlegungen zur Standortauswahl für ein Endlager für radioaktive Abfälle können unabhängig von der Abfallart und dem Wirtgestein einige wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden, welche die wesentlichen Anforderungen an die geologische Gesamtsituation des Endlagers betreffen. Diese Beurteilung umfasst

- die Stabilität der Standortbedingungen,
- die Erkundbarkeit,
- die Ausdehnung des Wirtgesteins und
- die geologischen und geographischen Standortverhältnisse.

9.1.1 Stabilität der Standortbedingungen

Stabile Standortbedingungen über lange Zeiten sind unbestritten von grosser Bedeutung, da der sichere Einschluss der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle über sehr lange Zeiträume gewährleistet werden muss. Diese Langzeitstabilität beinhaltet vor allem die folgenden Aspekte:

Tektonische Stabilität

Von besonderer Bedeutung ist die Beurteilung der tektonischen Stabilität in Ländern mit tektonisch aktivem Untergrund, d.h. Gebieten in der Nähe von tektonischen Plattengrenzen. Dazu gehören potentielle Standortregionen in der Schweiz (Kristallin-I) und Japan (H12, 1st TRU Report), während die Tektonik beispielsweise in Nordeuropa und im Zentrum Kanadas stabil ist und darum eine weniger wichtige Rolle spielt.

Vulkanismus

Standorte mit (potentiellen) vulkanischen Aktivitäten sind zu vermeiden. Diese Anforderung ist besonders von Bedeutung in Ländern mit Regionen mit nachgewiesenem Vulkanismus wie beispielsweise in Italien, Japan (H12, 1st TRU Report) und USA (Yucca Mountain Project).

Hebung und Denudation

Geringe Hebungs- und Erosions-/Denudationsraten sind erforderlich, um das langzeitliche Einschussvermögen des Endlagers zu gewährleisten (H12, Wellenberg, Kristallin-I). Selbst geringe bis mittlere Hebungs- und Erosionsraten von ca. 1 mm pro Jahr können zu einer Freilegung des Endlagers innerhalb eines Zeitraums von 10^5 - 10^6 Jahren führen.

Hydrogeologische Verhältnisse

Günstige Standorte erfahren durch Veränderungen an der Geländeoberfläche und bei Klimaänderungen, wie beispielsweise Vergletscherung, Permafrost, Bebauung, Landnutzung, Überschwemmungen usw. möglichst geringe Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse. Mögliche Einwirkungen beeinflussen unter Umständen das Langzeitverhalten des Nah- und Fernfeldes des Endlagers, beispielsweise durch Veränderungen der Grundwasserbewegung und der Lage der Exfiltrationsgebiete. Dies kann dadurch verhindert werden, dass das Endlager in grossen Teufen errichtet wird und solche Standorte ausgewählt werden, welche diesen Prozessen nur in geringem Masse unterliegen (SR 97, TILA 99, H12).

Physikalisch-chemische Bedingungen

Die Stabilität der physikalisch-chemischen Bedingungen hinsichtlich der Gesteinseigenschaften und der Zusammensetzung des Grundwassers ist eine wichtige Voraussetzung für einen Endlagerstandort. Ferner ist die physikalische und chemische Kompatibilität zwischen den Endlagerkomponenten und dem Wirtgestein bzw. dem Grundwasser ebenfalls massgebend, um ungünstige gegenseitige Beeinflussungen möglichst gering zu halten. Dazu gehören beispielsweise Veränderungen der natürlichen Gesteinseigenschaften durch hyperalkalines (Zement-) Porenwasser aus dem Endlager, Verlust der Barrierenwirkung durch Gasbildung und Druckaufbau oder Veränderungen der Endlagerkomponenten durch geochemische Wechselwirkungen mit dem Tiefengrundwasser.

9.1.2 Erkundbarkeit

Die Belastbarkeit der Sicherheitsanalyse für einen potentiellen Standort ist stark von der Qualität der verwendeten Datengrundlage abhängig. Es ist daher erforderlich, einen geeigneten Standort ausreichend zu charakterisieren, um seine Eignung zuverlässig nachweisen zu können. Darüber hinaus dürfen die Erkundungsarbeiten den Standort in seiner Eignung nicht beeinträchtigen.

Die Erkundbarkeit eines Endlagerstandorts hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Zu den wichtigsten Faktoren gehören:

- Typ des Wirtgesteins (z.B. Sedimentgesteine gegenüber Kristallingesteine)
- die geologische Gesamtsituation (z.B. Mächtigkeit einer allenfalls vorhandenen Sedimentüberdeckung, Küstenstandorte gegenüber Kontinentalstandorte usw.)
- der geologische Aufbau (geologische Schichtabfolge, Nebengesteine, duktile Deformationsstrukturen, Sprödstrukturen / Störungszonen usw.)
- die Topographie der Geländeoberfläche
- die beabsichtigte Teufe des Endlagers
- die Wahl der geeigneten bzw. anwendbaren geophysikalischen und geologischen Untersuchungsmethoden
- die für die Standorterkundung zur Verfügung stehenden Finanzmittel; bei ausreichenden Finanzmitteln kann praktisch jeder potentiell interessante Standort hinreichend erkundet werden, während begrenzte Mittel zu erheblichen Einschränkungen der Standorte führen, die im erforderlichen Masse untersucht werden können.

9.1.3 Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers

Das Wirtgestein muss einen ausreichend ausgedehnten Bereich mit geeigneten Gesteinseigenschaften aufweisen, um darin das Endlager errichten zu können. Dieser Wirtgesteinsbereich hat den notwendigen Sicherheitsabstand zu Störungen, Klüftzonen und anderen Schwächezonen zu berücksichtigen, was eine Platzierung des Endlagers in nennenswertem Masse einschränken kann, speziell in geklüfteten Formationen.

Allerdings ist eine flexible Auslegung des Endlagers bei der Festlegung des erforderlichen Gesteinsvolumens in Betracht zu ziehen, z.B. durch die Errichtung mehrerer kleinerer Einlagerungsfelder (d.h. Felder mit parallelen Einlagerungsstrecken oder -kammern) ggf. in unterschiedlichen Teufen anstelle eines einzigen grossen Feldes.

9.1.4 Geologische und geographische Verhältnisse

Erforderlich sind günstige geographische und geologische Verhältnisse, welche ein gutes Isolations- und Retardationsvermögen des Wirtgesteins bezüglich der Radionuklidfreisetzung gewährleisten. Günstige Faktoren dafür sind

- ein gering durchlässiges Wirtgestein,
- eine einfache (ebene) Geländeoberfläche (d.h. möglichst kleine hydraulische Gradienten),
- einfacher geologischer Aufbau und
- ein hohes Verdünnungspotential.

Insbesondere der letzte Faktor (hohes Verdünnungspotential) ist stark mit der geographischen Situation des Standortes verknüpft (Extremfälle: kontinentale Wüstengebiete gegenüber Küstenregionen).

Eine zwingende Standortvoraussetzung betrifft die bautechnische Machbarkeit des Endlagers, welche Bedingungen an die mechanische Stabilität des Gesteins und die Tiefenlage stellt.

Ferner verringert das Fehlen natürlicher Rohstoffe und fehlende Möglichkeiten zur Nutzung geothermischer Energie aus Formationen oberhalb oder unterhalb der Einlagerungshorizonte die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in das Endlager (vgl. Kapitel 9.3.5).

9.2 Gesamtsystem

Aus der Gesamtheit der ausgewerteten Sicherheitsanalysen folgt eindeutig, dass das Endlager, das Wirtgestein und dessen geologisches Umfeld als Gesamtsystem untersucht werden muss, bevor Schlussfolgerungen zur Bedeutung von spezifischen Gesteinseigenschaften oder spezifischen geologischen Aspekten gezogen werden können. Wichtige Systemelemente sind

- der Abfalltyp,
- das technische Barrierensystem,
- die natürlichen Barrieren (Wirtgestein, Geosphäre) und
- die Biosphäre.

Dabei gilt es, die funktionellen Anforderungen des Gesamtsystems bezgl. Aktivitätseinschluss und Radionuklidrückhaltung in ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit zu beurteilen.

9.2.1 Abfalltypen

Die Anforderungen für die sichere Endlagerung der verschiedenen Arten von radioaktiven Abfällen hängen stark von deren Eigenschaften ab. Wichtige Schlüsselfaktoren für die unterschiedlichen Abfalltypen können den Langzeitsicherheitsanalysen entnommen werden.

Diese Schlüsselfaktoren werden in den folgenden Tabellen 9.1 bis 9.3 für drei Abfalltypen "Abgebrannte Brennelemente – verglaster hochaktiver Abfall – langlebige mittelaktive Abfälle" zusammengestellt; für die schwach- und mittelaktiven Abfälle genügt dazu ein kurzer Kommentar.

Tabelle 9.1: Charakteristische Eigenschaften abgebrannter Brennelemente (BE)

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zuverlässig charakterisierbare Abfalleigenschaften (vorbehältlich MOX-Brennelemente) ➤ Hohe Radiotoxizität und starke Strahlung ➤ Starke Wärmeentwicklung (besonders bei Kernbrennstoff mit hohem Abbrand) ➤ Rasche Freisetzung von flüchtigen Radionukliden nach Behälterversagen ("Gap- und Grain Boundary" - Inventar) ➤ Keramik-Matrix schwer auflösbar ➤ Verschiedene Radionuklide unterliegen einer starken Löslichkeitsbegrenzung (limitierte Radionuklidfreisetzung) <p>Aber:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Abfallmatrix unterliegt unter oxidierenden Bedingungen einer erhöhten Auflösungsrate ➤ Abfallauflösung kann Kolloide erzeugen ➤ Sehr langlebige Radionuklide (besonders ¹²⁹I) dominieren i.a. die im Sicherheitsnachweis berechnete Strahlenexposition; wesentliche Expositionsbeiträge stammen von den spaltbaren Isotopen ²³⁵U, ²³⁹Pu
--

Tabelle 9.2: Charakteristische Eigenschaften verglaster hochaktiver Abfälle (HAA)

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Homogener, gut und genau charakterisierbarer Abfall ➤ Hohe Radiotoxizität und starke Strahlung (jedoch geringer als BE) ➤ Signifikante Wärmeentwicklung (jedoch geringer als BE) ➤ Verschiedene Radionuklide unterliegen einer starken Löslichkeitsbegrenzung (limitierte Radionuklidfreisetzung) ➤ Niedrige Auflösungsrate der Matrix über lange Zeiten im Bereich neutraler pH-Werte (unabhängig vom Redox-Potential) ➤ Abfallauflösung kann Kolloide erzeugen ➤ Sehr langlebige Radionuklide (z.B. ¹³⁵Cs) dominieren die berechnete Strahlenexposition
--

Tabelle 9.3: Charakteristische Eigenschaften langlebiger mittelaktiver Abfälle (LMA und TRU)

- Sehr heterogene Abfälle (viele verschiedene Abfallströme)
- Chemisch komplexe Zusammensetzung; einige Abfalltypen sind ungenügend charakterisiert
- Mässige Radiotoxizität pro Volumeneinheit, aber grosse Gesamtaktivität
- Einige Abfälle sind wärmeproduzierend (in viel geringerem Ausmass als BE und HAA)
- Möglicherweise besteht eine chemische "Unverträglichkeit" zwischen Abfallmatrix und Wirtgestein
- Gasbildung durch Abbau organischer Stoffe und Metallkorrosion
- Löslichkeitsbegrenzung aufgrund des beschränkten Aktivitätsgehaltes der Abfälle meist nur für wenige Radionuklide wirksam
- Entstehung von Kolloiden und organischen Komplexbildnern (Degradationsprodukte)
- Teilweise sehr langlebige Radionuklide (Halbwertszeit ≥ 1 Mio. Jahre)

Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)

Die wichtigsten Eigenschaften der schwach- und mittelaktiven Abfälle sind ähnlich wie diejenigen der langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA und TRU); sie werden deshalb weitgehend durch die oben aufgeführte Auflistung abgedeckt.

9.2.2 Technisches Barrierensystem

Für die geologische Endlagerung der verschiedenen Abfalltypen werden zur Sicherstellung guter Eigenschaften des Nahfeldes im allgemeinen unterschiedliche technische Rückhaltesysteme verwendet:

- Ein langlebiger, korrosionsresistenter Behälter (Cu/Ti) wird dann eingesetzt, wenn ein absoluter Einschluss (und somit keine Freisetzung von Radionukliden) über sehr lange Zeiträume erforderlich ist, z.B. für abgebrannte Brennelemente (BE).
- Sofern eine kürzere (dennoch garantierte) Einschlusszeit der Behälter in Verbindung mit geringen Freisetzungsraten über lange Zeiträume ausreichend ist – wie z.B. für verglaste hochaktive Abfälle (HAA) – kann ein korrodierender Behälter (Eisen, Stahl) eingesetzt werden. Dieser ermöglicht einen Einschluss während mindestens 1'000 Jahren, wirkt darüber hinaus als Redoxpuffer und verzögert nach dem

Behälterversagen auch noch die Freisetzung auf Grund der stark absorbierenden Korrosionsprodukte. Hingegen erfordert die H₂-Gasbildung möglicherweise eine grössere Aufmerksamkeit hinsichtlich der Beurteilung der Langzeitsicherheit.

- Betonbehälter mit und ohne Eisenarmierung werden häufig für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) bzw. für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) eingesetzt. Sie erzeugen ein günstiges chemisches Milieu, bei dem viele Radionuklide gut sorbieren und somit nur in geringen Mengen ins Grundwasser freigesetzt werden. Hochalkalische Auslaugprodukte, Kolloid- und Gasbildung beeinträchtigen aber unter Umständen die Barrierenwirkung des Gesamtsystems.
- Zementgebundene Verfüllmaterialien stellen ein gutes bautechnisches Mittel dar, wenn es erforderlich ist, für grosse Volumen ein günstiges chemisches Milieu zu schaffen, oder eine Verbesserung der Standfestigkeit der untertägigen Anlagen zu gewährleisten. Alternativen dazu sind gering- oder hochpermeable Verfüllmaterialien, je nach dem erwarteten Einfluss der Gasbildung.
- Tonhaltige Barrieren- und Verfüllmaterialien, wie z.B. Bentonit oder Sand-Bentonit-Gemische, sind plastisch, quellen bei Wasserzutritt, erreichen dadurch eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und erzwingen einen diffusionsdominierten Transport im Nahfeld. Diese Materialien weisen gute Sorptions- und Kolloidfiltrationseigenschaften auf, schützen die Abfallbehälter sowohl mechanisch als auch chemisch und verringern die Radionuklidfreisetzung nach dem Behälterversagen.

9.2.3 Funktionelle Anforderungen wichtiger Systemkomponenten

Abhängig von der Art der einzulagernden Abfälle ergeben sich unterschiedlich hohe sicherheitstechnische Anforderungen an das Endlagersystem und dadurch an das Wirtgestein sowie das geologische Umfeld. Diesbezüglich gelten als zentrale Aspekte:

- Vollständiger Einschluss der Abfälle
- Verzögerte bzw. beschränkte Freisetzung der Radionuklide
- Ausbreitung und Verdünnung in der Geosphäre bzw. Biosphäre

Vollständiger Einschluss

Besonders für verglaste hochaktive Abfälle (HAA) und abgebrannte Brennelemente (BE) wird für einen vorgegebenen Zeitraum der vollständige Einschluss des gesamten Aktivitätsinventars gefordert. Dies setzt voraus, dass eine minimale Lebensdauer der Behälter gewährleistet werden kann. Diese hängt sowohl für Cu/Ti- als auch für Stahl- und Gussbehälter von einer Vielzahl von Faktoren ab, die massgeblich vom Wirtgestein und den Standorteigenschaften beeinflusst werden, wie z.B.

- Chemische Zusammensetzung des Grundwassers
- Geochemische Bedingungen in der Endlagerzone
- Geomechanische Eigenschaften des Wirtgesteins
- Häufigkeit und Eigenschaften kleinräumiger tektonischer Störungen/Klüftung.

Die beiden letzten Punkte unterstreichen die Bedeutung eines mechanischen Schutzes der Abfallbehälter, der – im Fall hochaktiver Abfälle (HAA und BE) – zudem durch eine Bentonitbarriere (oder durch ein plastisch-toniges Wirtgestein) gewährleistet wird.

Für Evaporite (insbesondere Salzformationen) wird andererseits erwartet, dass der vollständige Einschluss durch das Wirtgestein selbst sichergestellt wird. Die Lebensdauer des Behälters besitzt deshalb in diesem Fall eine weniger grosse Bedeutung. Allerdings sind dann die Anforderungen an die Integrität des Wirtgesteins entsprechend grösser als bei anderen Gesteinstypen.

Verzögerte bzw. beschränkte Radionuklidfreisetzung

i) aus dem Nahfeld

Für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) sowie langlebige mittelaktive Abfälle (LMA), die entweder in Betongebinden oder dünnwandigen Stahlbehältern verpackt sind, aber auch für hochaktive Abfälle (HAA) in dickwandigen Stahlbehältern kann ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im allgemeinen nicht über eine Zeitspanne gewährleistet werden, die zum weitgehenden Zerfall aller Radionuklide ausreicht. Es sind somit technische Vorkehrungen notwendig, um eine Freisetzung der Radionuklide

aus dem Nahfeld (d.h. dem System der technischen Barrieren) zu verzögern und die Höhe der Freisetzung zu beschränken. Solche Vorkehrungen beinhalten:

- Den Einsatz von Bentonitbarrieren im HAA- (BE-), evtl. LMA-Endlager, um im Nahfeld diffusionsdominierte Transportprozesse, ggf. eine limitierte Löslichkeit, günstige Sorptionsbedingungen und eine gute Filterwirkung für Nahfeldkolloide zu erreichen. Falls der Bentonit diese Funktion über einen Zeitraum von mehr als 10^6 Jahren gewährleisten soll, muss der Bentonit seinerseits vor schädigenden Einwirkungen geschützt werden, so z.B. vor physikalischen und chemischen Veränderung sowie vor Erosion durch kluftgebundenen Grundwasserfluss. Dies wiederum führt u.a. zu einer Begrenzung der maximal zulässigen Temperatur im Bentonit, dadurch auf eine Begrenzung des geothermischen Gradienten und der Tiefe des Endlagers, primär aber zu einer limitierten Einlagerungsdichte für wärmeentwickelnde Abfälle. Weitere Voraussetzungen für die Stabilität der Bentonitbarriere sind stabile chemische und physikalische Bedingungen im Wirtgestein sowie langfristig geringe Wasserflüsse in den Klüften, welche ggf. bis zu den Einlagerungstrecken bzw. -kammern führen.
- Den Einsatz von Zement, sowohl um die Abfälle (insbesondere SMA und LMA) zu verfestigen als auch als Verfüllmaterial, um einen hohen pH-Wert und damit eine zusätzlich erhöhte Sorptionskapazität im Nahfeld zu erreichen. Zudem begünstigen Zementminerale wie z.B. CaCO_3 oder CSH-Phasen die Co-Präzipitation von Radionukliden im Nahfeld. Die Dauerhaftigkeit dieser günstigen Nahfeld-Bedingungen wird durch den Grundwasserfluss, die Zusammensetzung des Grundwassers und die Temperatur beeinflusst.
- Eine (geo-) chemische Konditionierung des Nahfeldes zur Verzögerung des Radionuklidtransportes (Sorption) durch den Einsatz von Materialien wie Zement (hoher pH-Wert) sowie durch Eisen- und Stahlbehälter (reduzierende Bedingungen). Dies kann jedoch zu Einschränkungen bezüglich des Wirtgesteins führen, damit die Verträglichkeit zwischen Endlagerkomponenten und geologischem Umfeld gewährleistet ist.

ii) aus der Geosphäre in die Biosphäre

Was die Verzögerung der Radionuklidfreisetzung in der Geosphäre anbelangt, unterscheiden sich die betrachteten Gesteinsformationen wie folgt:

- Bezüglich Retardation (Rückhaltung) in der Geosphäre wird in tonigen Sedimentgesteinen ein diffusions-dominierter Radionuklidtransport mit starker Sorption erwartet; dazu ist eine homogene Gesteinsformation ohne diskrete Freisetzungspfade eine wichtige Voraussetzung.
- Im geklüfteten Festgestein sind die Transportvorgänge i.a. durch die Advektion bestimmt, wobei Matrixdiffusion und Sorption im angrenzenden Wirtgestein die erforderliche Verzögerung gewährleisten. Sofern auch genügend lange Fließzeiten des Grundwassers vom Endlager zur Biosphäre für eine ausreichende Verzögerung der Freisetzung notwendig sind, begrenzt diese Anforderung zusätzlich den Grundwasserfluss und die zulässige Transportgeschwindigkeit in den Klüften.
- Bei Evaporitformationen, wie z.B. Salzstöcken/Salzstrukturen, welche die Abfälle über sehr lange Zeiträume vollständig einschliessen, besteht i.a. keine Notwendigkeit für eine zusätzliche Verzögerung der Freisetzung in der Geosphäre.

Die Forderung nach günstigen chemischen Bedingungen im geologischen Umfeld des Endlagers stellt (abfallspezifische) Anforderungen sowohl an die Mineralogie des Wirtgesteins (Redox-Pufferkapazität, ggf. alkalische Beständigkeit für SMA und LMA) als auch an die chemische Zusammensetzung des Grundwassers (reduzierende Bedingungen, schwache Mineralisierung, niedrige Konzentration von komplexbildenden Substanzen bzw. Kolloiden). Es ist darauf hinzuweisen, dass die oben beschriebene Konditionierung der chemischen Verhältnisse im Nahfeld nicht in jedem Fall Defizite in den natürlichen chemischen Verhältnissen ausgleichen kann. Zum Beispiel können die grossen Mengen an einzulagerndem Eisen im Yucca Mountain-Projekt keine reduzierenden Bedingungen in den dort herrschenden ungesättigten Verhältnissen sicherstellen.

Ausbreitung und Verdünnung

Falls Radionuklide durch die Geosphäre transportiert werden, kann eine deutliche Verringerung ihrer Konzentrationen in der Biosphäre durch Ausbreitung (Dispersion) und Verdünnung von kontaminierten Wässern in grossen Wasservolumen wie z.B. Grundwasserleitern, Flüssen, Seen oder dem Meer erreicht werden. Dabei ist das Verdünnungspotential abhängig von

- den lokalen hydrogeologischen Verhältnissen (z.B. Aquifere in der geologischen Überdeckung, Exfiltration in Flussschotter)
- der geologischen Gesamtsituation (z.B. Grundgebirge unter Sedimentschichten, flache Salzgesteinslagerung), oder direkt
- dem Standort und seinen hydrologischen Verhältnissen (z.B. küstennaher Standort, Insel).

9.2.4 Einlagerungskonzept

In vielen Endlagerprogrammen muss das Endlagerkonzept bereits bestehende Abfälle und deren erfolgte Konditionierung berücksichtigen. Dies kann zu erheblichen Einschränkungen bezüglich des Einlagerungskonzeptes und damit des Wirtgesteins führen. Werden z.B. schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) mit Bitumen als Abfallmatrix konditioniert, erhöht dies den Gehalt an organischen Substanzen im Endlager wesentlich, was möglicherweise zu einem verstärkten Problem mit der Gas- und Komplexbildung führt. Später anfallende Abfälle derselben Art können unter Umständen mit Zement konditioniert werden, um so den Anteil an Organika im Endlager zu minimieren. Allerdings ist es wahrscheinlich, dass sowohl zement- als auch bitumenverfestigte schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) oder langlebige mittelaktive Abfälle (LMA, TRU) am selben Ort eingelagert werden müssen, so dass auch weniger günstig konditionierte Abfälle im Einlagerungskonzept mit zu berücksichtigen sind.

9.2.5 Grösse des Endlagers

Das notwendige Endlagervolumen ist in erster Linie abhängig von der Art und Menge der einzulagernden Abfälle. Die daraus abgeleitete Dimensionierung der Einlagerungstrecken, -kammern oder -kavernen sowie der Abstand der Einlagerungshohlräume zueinander legt eine minimale Ausdehnung des Endlagers und somit das Volumen des Wirtgesteins fest, das für die Errichtung des Endlagers erforderlich ist. Die Eigenschaften des Wirtgesteins, wie Wärmebeständigkeit, Ausdehnung und Häufigkeit von Klüften, sowie seine bautechnischen Eigenschaften werden unter Umständen zu Anpassungen dieses minimalen Volumens führen. Beispielsweise können die notwendigen Sicherheitsabstände zu Störzonen oder Mindestabstände zwischen den Einlagerungsbauten aufgrund der Festigkeit des Gesteins (anstatt der Abstände zwischen den Gebinden wegen der Wärmeentwicklung der Abfälle) die Endlagergeometrie bestimmen. Ein weiteres wichtiges Beispiel ist, dass grosse Kavernen für nicht wärmeentwickelnde langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) in weichem Ton bautechnisch nicht machbar sind.

9.3 Wirtgesteinstypen

Jeder der in den ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen analysierten Wirtgesteinstypen

- geklüftete (stark konsolidierte) Gesteine
- plastisch-tonige Sedimente
- Evaporite (bzw. Salzformationen)

hat eine Anzahl von Eigenschaften, die entweder erforderlich oder zumindest günstig für eine sichere Endlagerung sind. Die Bedeutung einiger Eigenschaften hängt von den Anforderungen des Einlagerungskonzeptes und den Eigenschaften der eingelagerten Abfälle ab.

9.3.1 Eigenschaften spezifischer Wirtgesteine

Verallgemeinert können die erforderlichen und günstigen Eigenschaften der Wirtgesteine und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit des Endlagers in den Tabellen 9.4 bis 9.6 wie folgt zusammengefasst werden.

Tabelle 9.4: Erforderliche und günstige Eigenschaften geklüfteter (stark konsolidierter) Gesteine

Eigenschaft	Relevanz
Vorhandensein grosser stabiler Wirtgesteinsblöcke	erforderlich
Hohe Druck- und Zugfestigkeit (bautechnische Machbarkeit, Schutz der technischen Barrieren)	günstig
Geringe hydraulische Durchlässigkeit	günstig
Geringe Häufigkeit kleiner (unvermeidbarer) wasserführender Strukturen (Klüfte)	günstig
Reduzierende Bedingungen	günstig
Günstige lokale Spannungsverhältnisse (geringe Anisotropie)	günstig
Grundwasser: annähernd pH-neutrale Bedingungen bei geringem Salzgehalt	günstig
Erhebliches Potential für Matrixdiffusion längs des Transportpfades	günstig
Gute Sorptionskapazität	günstig
Homogenität	günstig

Tabelle 9.5: Erforderliche und günstige Eigenschaften plastisch-toniger Sedimente

Eigenschaft	Relevanz
Ausreichende Mächtigkeit der Sedimentformation	erforderlich
Homogenität	günstig
Fehlen von Brüchen / Klüften / hoch durchlässigen Strukturen	günstig
Gute Plastizität (Selbsteilung von Brüchen / Klüften)	günstig
Sehr geringe Permeabilität	günstig
Gute Sorptionskapazität	günstig
Reduzierende Bedingungen	günstig
Günstige lokale Spannungsverhältnisse (geringe Anisotropie)	günstig
Annähernd pH-neutrale Bedingungen bei geringem Salzgehalt	günstig

Tabelle 9.6 Erforderlich und günstige Eigenschaften von Salzgesteinen

Eigenschaft	Relevanz
Ausreichende Mächtigkeit und Ausdehnung der Formation	erforderlich
Sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit	erforderlich
Geringe Porosität, geringer Wassergehalt	erforderlich
Überdeckung mit mächtigen Aquitarden	günstig
Homogenität	günstig
Gute Plastizität	günstig
Günstige lokale Spannungsverhältnisse	günstig

Auflockerungszone

Als ein wichtiges Element des gesamten Endlagersystems ist an dieser Stelle die Auflockerungszone (als eine Konsequenz der untertägigen Stollen und Kavernen) zu erwähnen. Die Auflockerungszone ist abhängig von den geomechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins und von der gewählten Vortriebsmethode. Sie ist damit mehr oder weniger stark ausgeprägt und sicherheitstechnisch sowohl bezüglich ihrer negativen Auswirkung (erhöhte hydraulische Durchlässigkeit – "hydraulischer Kurzschluss") wie auch ihrer positiven Auswirkung (Umströmung der Einlagerungsbauwerke – "hydraulischer Käfig") zu beurteilen. In duktilen und quellfähigen Gesteinsformationen (z.B. tonige Sedimente), aber auch im Salzgestein, spielt die "Selbsteilung" von Klüften und Entlastungsrissen eine wichtige Rolle für eine mechanische und hydraulische Rückbildung der Auflockerungszone.

9.3.2 Spezifische Einflussfaktoren

Neben den vorher aufgeführten, allgemeinen Eigenschaften der Wirtgesteine kann eine Anzahl von weiteren Einflussfaktoren aus den ausgewerteten Sicherheitsanalysen abgeleitet werden, die ebenfalls wesentlich für die Standortcharakterisierung und den Standortentscheid sind.

Die spezifischen Einflussfaktoren betreffen im allgemeinen wiederum die Zeitdauer des vollständigen Einschlusses, die Anforderungen an die geologische Barriere bezüglich

der Verzögerung der Freisetzung und die Beeinflussung des chemischen Milieus im Nahfeld (vgl. auch Kapitel 9.2.3).

Diese zusätzlichen Erkenntnisse für die Standortcharakterisierung und Standortauswahl, so wie sie aus den ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen resultieren, sind in den folgenden Tabellen 9.7 bis 9.9 – nach den spezifischen Wirtgesteinstypen getrennt – zusammengestellt. Die Tabellen beinhalten einige Anmerkungen zu ihrer Bedeutung und einen Hinweis auf spezifische nationale Endlagerprogramme, in denen sie besonders hervorgehoben wurden. Die Bedeutung dieser Faktoren ist zum Teil abhängig von der Art der einzulagernden Abfälle, vom betrachteten Endlagerkonzept und von der geographischen Lage des Standortes.

Weil die Tabellen die betrachteten Wirtgesteine in einfache Kategorien einteilen, ist eine Vorbemerkung angebracht. Mehrere publizierte Analysen zur Langzeitsicherheit (z.B. H12 und TRU Report, Japan) beinhalten die explizite Annahme, dass ein hartes, stark konsolidiertes Sedimentgestein wie ein kristallines Gestein behandelt werden kann. Damit wird davon ausgegangen, dass ein advektiver Transport in einem Sedimentgestein innerhalb eines Kluftnetzwerkes erfolgt, was den Nachweis der Langzeitsicherheit (d.h. Freisetzung der Radionuklide mit dem Grundwasser) ähnlicher demjenigen macht für ein kristallines Gestein als jenem für ein "weiches" Sedimentgestein, in welchem diffusive Transportprozesse dominieren. Ein Beispiel dazu liefert die sicherheitstechnische Beurteilung des Valanginian-Mergels des schweizerischen Wellenbergs im Vergleich zum belgischen Boom-Ton.

Trotzdem wird eine stereotype Unterscheidung gemäss

- stark konsolidiertes Sedimentgestein (→ Kluftnetzwerk) → advektiver Transport
- plastisch-toniges Sedimentgestein → Diffusion

oft gemacht. Dies ist allerdings stark vereinfachend und Vorsicht ist angebracht bei der Beurteilung von potentiellen Wirtgesteinen, welche nicht diesen einfachen Stereotypen entsprechen.

Tabelle 9.7: Zusätzliche Erkenntnisse für geklüftete (stark konsolidierte) Gesteine

Einflussfaktor	Relevanz	Beispiele (Land – Abfalltyp)
Generelle Nähe zu grossen Klüftzonen	Potentiell positiv: Spannungsentlastung, Verringerung des hydraulischen Gradienten (hydraulischer Käfig)	Schweiz, Japan – HAA Kanada – BE
Bedeutung sub-horizontaler Klüftzonen	Auswirkungen bei Auflast durch Gletschervorstoss / Zufluss von oxidierendem Wasser	Schweden, Finnland, Kanada – BE
Lokalisierung von Klüften im nicht aufgeschlossenen Grundgebirge	Haupteinschränkung der Exploration von der Oberfläche aus	Schweiz – HAA
Detaillierte Charakterisierung der Klüftung	Machbarkeit des Standortnachweises, Strömungsmodellierung	Schweden, Finnland, Schweiz, Japan – BE/HAA/TRU
Relevanz der lokalen räumlichen Variabilität von Strukturen / Gestein	Erhöht die Schwierigkeit der Charakterisierung – "Mittelwerte" nicht ausreichend	Schweiz, Japan – HAA/TRU
Lokalisierung potentieller schneller Fliesspfade für Gas	Freisetzung flüchtiger Radionuklide, z.B. ¹⁴ C, ¹²⁹ I	Japan – TRU
Lokalisierung potentieller schneller Fliesspfade für Wasser	Schnelle Fliesspfade dominieren die Freisetzung, geringere Wirkung des radioaktiven Zerfalls, usw.	Alle Langzeit- sicherheitsanalysen
Möglichkeit zur Charakterisierung kleinräumiger Eigenschaften wasserführender Strukturen ("benetzte Klüftoberfläche")	Wesentlich für die Bestimmung der Geosphärenretardation	Schweiz, Japan – HAA/TRU
Festlegung der Tiefenlage unter Berücksichtigung zukünftiger Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Klüfte	Mögliche Auswirkungen einer erhöhten Auflast durch Gletschervorstoss	Schweden, Finnland – BE
Verständnis der Kolloidbewegungen in Klüften	Wichtig zur Vermeidung übermässiger Konservativität	Schweiz – HAA
Detaillierte Kenntnisse der Auflockerungszone	Könnte die Konservativität der Langzeitsicherheitsanalyse verringern	Schweiz, Schweden, Japan – HAA
Kenntnis der Strömungsverhältnisse in den Einlagerungshohlräumen	LMA – Auflösung des Zements abhängig vom Wasserfluss	Schweiz, Grossbritannien, Japan – TRU

Tabelle 9.7 - Fortsetzung

Einflussfaktor	Relevanz	Beispiele (Land – Abfalltyp)
Bedeutung der Durchströmung der Einlagerungshohlräume & ihrer räumlichen Variabilität	Räumlich veränderliche Dichte / Permeabilität des Verfüllmaterials (Beton) verursacht Fliess-"Kanäle", heterogene Verhältnisse in den Einlagerungshohlräumen	Schweiz, Japan – LMA
Nachweis für strömungs- oder diffusions-dominiertes Nahfeld	Diffusion im Nahfeld ausschlaggebend für HAA/BE, sehr günstig für LMA	Alle Langzeit-sicherheitsanalysen
Abhängigkeit des Sicherheitsnachweises vom Einlagerungsort der Behälter	BE –Versagen von wenigen Behältern unterstellt	Schweden, Canada – BE
Paläohydrogeologie am Standort	Auftreten "alter Wässer", Zonen mit Unterdruck usw.	Schweden – BE / Schweiz – LMA
Bedeutung des Salzgehalts im Wasser	Einfluss auf Quellverhalten von Bentonit, Zementauflösung, Sorption	Schweden, Finnland – BE
Mögliche Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung des Wassers durch klimatische Veränderungen	Möglichkeit von oxidierenden Wässern, Änderungen des Salzgehalts durch Meeresspiegelschwankungen usw.	Japan – LMA/TRU, Schweden, Finnland – BE
Möglichkeit zur Offenhaltung des Endlagers über lange Zeiträume	Möglichkeit zur Stärkung der Akzeptanz in der Öffentlichkeit; potentiell stärkste Auswirkungen auf LMA, wo die Einlagerungshohlräume unverfüllt belassen werden können	Schweiz – SMA/LMA
Bedeutung der langzeitigen Funktionsfähigkeit von Schacht- und Streckenverschluss	Möglicher direkter Verbindungspfad zur Biosphäre bei Versagen der Verschlussbauwerke	Schweiz – HAA Deutschland – SMA, LMA

Tabelle 9.8: Zusätzliche Erkenntnisse für (plastisch-tonige) Sedimentgesteine

Einflussfaktor	Relevanz	Beispiele (Land – Abfalltyp)
Charakterisierungsmöglichkeiten von der Oberfläche	Vorteil bei gutem seismischem Kontrast	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Bedeutung lokaler räumlicher Variabilität der Lithologie	Möglichkeit bevorzugter Fließwege durch schluffig / sandige Schichten mit höherem kf-Wert	Schweiz, Japan – HAA, LMA (TRU), SMA
Gasvorkommen im Gestein	Positiv: Evidenz für dichte Gesteinsformationen Negativ: Potentielle Probleme bzgl. Druckaufbau durch Endlagergas; Risiko von menschlichem Eindringen	Schweiz, Japan – HAA, LMA (TRU), SMA
Detaillierte Kenntnisse der Auflockerungszone	Möglichkeit eines hydraulischen Kurzschlusses	Schweiz, Japan, Belgien, Deutschland – HAA, LMA (TRU), SMA
Nachweis für ein strömungs- oder diffusions-dominiertes Nahfeld	Diffusion im Nahfeld ausschlaggebend für HAA/BE, sehr günstig für LMA	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Nachweis für ein strömungs- oder diffusions-dominierten Transport durch das Wirtgestein	Diffusion ist ausschlaggebend für eine wirksame geologische Barriere	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Paläohydrogeologie am Standort	Auftreten "alter Wässer", Zonen mit Unterdruck usw.	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Bedeutung gekoppelter THMC3- Prozesse	Möglicherweise wichtig für diffusionsdominierte Systeme	Belgien – HAA
Möglichkeit zur Offenhaltung des Endlagers über lange Zeiträume	Einlagerungshohlräume / Strecken könnten unverfüllt bleiben: Austrocknung, Oxidation, Karbonatisierung von Beton	Schweiz, Japan – LMA (TRU), SMA
Bedeutung der langzeitigen Funktionsfähigkeit von Schacht- und Streckenverschluss	Möglicher direkter Verbindungspfad zur Biosphäre bei Versagen der Verschlussbauwerke	Schweiz – LMA, SMA

³ Thermo-hydro-mechanisch-chemisch

Tabelle 9.9: Zusätzliche Erkenntnisse für Salzgesteine

Einflussfaktor	Relevanz	Beispiele (Land – Abfalltyp)
Charakterisierungsmöglichkeiten von der Oberfläche	Minimierung der Möglichkeit von Störzonen, besonders bei räumlich begrenztem Wirtgestein	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Bedeutung lokaler räumlicher Variabilitäten der Lithologie	Möglichkeit für Umlösungsprozesse sowie für Fließpfade durch höher permeablen Anhydrit	Deutschland - LMA, SMA
Festlegung der Tiefenlage unter Berücksichtigung von Einflüssen zukünftiger klimatischer Veränderungen	Möglichkeit für verkürzte Transportzeiten der Schadstoffe im Deckgebirge	Deutschland - HAA, LMA Holland - HAA, LMA
Neotektonische Evidenzen für andauernden / potentiellen Diapirismus	Erhöhte Hebungsraten führen langfristig zur Verkürzung der Transportzeiten und zu einer früheren Abtragung der Salzabdeckung	Deutschland Holland
Bedeutung des lokalen geothermischen Gradienten	Im Versatz wird keine Konvektionsbewegung und kein entsprechender Transport induziert.	Deutschland
Hinweise für Transportprozesse im Wirtgestein	Nur bei Bildung von Wegsamkeiten an Inhomogenitäten und bei Verformungen	Alle Langzeitsicherheitsanalysen
Paläohydrogeologie am Standort	Zufluß aus abgeschlossenem Reservoir mit Überdruck und Beginn der Ausbreitung von Schadstoffen	USA -TRU Deutschland – HAA, LMA
Relevanz gekoppelter Prozesse	Die Speicherung von Gasen im Porenraum verdrängt Lösungen und transportiert Schadstoffe	USA -TRU
Möglichkeit zur Offenhaltung des Endlagers über lange Zeiträume	Einlagerungshohlräume / Strecken könnten unverfüllt bleiben: Konvergenz von Strecken / Einlagerungshohlräumen (LMA), geomechanische Einflüsse auf das Wirtgestein, Schäden an Abfallbehältern	Holland - HAA
Bedeutung der langzeitigen Funktionsfähigkeit von Schacht- und Streckenverschluss	Möglicher direkter Verbindungspfad zur Biosphäre bei Versagen der Verschlussbauwerke	USA -TRU Deutschland – HAA, LMA, SMA
Wahrscheinlichkeit und mögliche Auswirkungen menschlichen Eindringens	Schwierigkeit der Vermeidung von "Rohstoffen" in einer Salzlagerstätte, Potential für Erdöl/Erdgas in den Strukturen	Alle Langzeitsicherheitsanalysen

Weitere sicherheitsrelevante Gesichtspunkte, die zumindest teilweise mit den spezifischen Gegebenheiten des Wirtgesteins in Verbindung stehen, betreffen

- Kritikalität
- Gasbildung und -ausbreitung
- Menschliches Eindringen.

Mit dem Hinweis auf die aktuelle Diskussion um die Festlegung des Standortauswahlverfahrens in Deutschland und die Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000 – speziell betreffend Anlage 4: Erklärung des Bundes zur Erkundung des Salzstockes Gorleben – werden diese Themen in den folgenden Kapiteln einer vertieften Betrachtung unterzogen.

9.3.3 Kritikalität

Die Analysen zur Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle beinhalten normalerweise Untersuchungen zur (Re-) Kritikalität, falls die Abfälle grössere Mengen spaltbares Material enthalten. Betroffen sind damit in erster Linie die zur direkten Einlagerung bestimmten abgebrannten Brennelemente (BE) sowie ggf. langlebige mittelaktive Abfälle (LMA und insbesondere TRU)⁴.

Eine kürzlich von der englischen Umweltbehörde (Environment Agency) durchgeführte Arbeit gibt eine umfassende Übersicht über Langzeit-Kritikalitätsstudien in mehreren nationalen Entsorgungsprojekten (z.B. Waste Isolation Pilot Plant WIPP, Yucca Mountain Project, Endlager Konrad, sowie für weitere geologische Endlager in Grossbritannien, Kanada und Schweden), und untersucht gleichzeitig den Umgang mit Kritikalitätsfragen in verschiedenen Wiederaufarbeitungsanlagen und Zwischenlagern für radioaktive Abfälle (UKEA 1999).

⁴ Falls die vorgeschlagene direkte Endlagerung von überflüssigem konditioniertem Plutonium stattfindet, sind solche Abfälle bezüglich Kritikalität zu prüfen.

Die betrachteten Studien kommen im allgemeinen zum Schluss, dass die Langzeitbetrachtung zur (Re-) Kritikalität ein integraler Bestandteil des Sicherheitsnachweises darstellt, obwohl die meisten Untersuchungen den Kritikalitätsfall als wenig wahrscheinliches Ereignis mit geringen Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers bezeichnen.

Überlegungen zum Ablauf von Prozessen und zur Kombination von möglichen Ereignissen, welche zu einer erhöhten Konzentration von spaltbaren Materialien an verschiedenen Orten innerhalb des Endlagersystems führen könnten, hat bisher zur Identifizierung von fünf unterschiedlichen Kritikalitäts-Szenarien geführt - obwohl diese Auswahl nicht eindeutig ist. Die Szenarien beinhalten:

- Kritikalität im intakten bzw. undichten Abfallbehälter
- Kritikalität in einem oder mehreren kollabierten Abfallbehältern
- Kritikalität im Nahfeld bzw. Fernfeld (Geosphäre).

Die Szenarien in Bezug auf kritische Konfigurationen in intakten Abfallbehältern sind unabhängig von der Endlagerauslegung und benötigen daher keine spezifischen Informationen über Endlagerstandort, Auslegung oder Gesteinseigenschaften. Andererseits braucht die sicherheitstechnische Beurteilung der Szenarien mit undichten oder kollabierten Behältern Vorgaben zur (Nahfeld-) Hydraulik, Hydrochemie und den geochemischen Verhältnissen in der Umgebung der Abfallbehälter – die Beurteilung erfolgt damit standortabhängig.

Die Kritikalitäts-Szenarien für das Nahfeld und die Geosphäre sind direkt für die Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers relevant. Die Szenarien haben gleichzeitig Radionuklidinventare aus mehreren Abfallbehältern zu berücksichtigen. Die Analyse für das Endlager Konrad hat z.B. gezeigt, dass die Berücksichtigung der Kritikalität im Nahfeld zu restriktiveren Grenzwerten für spaltbare Materialien in Abfallbehältern führen kann als denjenigen aus Kritikalitätsanalysen für die Handhabung und die Zwischenlagerung.

Die Untersuchung der Kritikalitäts-Szenarien in der Geosphäre basiert einerseits, was die Akkumulation von spaltbaren Materialien betrifft, auf detaillierten Kenntnissen über die geometrischen, hydrogeologischen und mineralogischen Eigenschaften der wasserführenden Strukturen (Klüfte). Andererseits bestimmen die chemischen Eigenschaften des Grundwassers und die Mineralogie des Gesteins die Absorption und Moderation der Neutronen. Die Analyse hängt damit vom betrachteten Endlagerstandort ab. In Anbetracht der geringen sicherheitstechnischen Bedeutung der Kritikalitäts-Szenarien für die Langzeitsicherheit des Gesamtsystems ergeben sich praktisch aber keine Einschränkungen bzgl. der Auswahl eines spezifischen Wirtgesteins oder eines Endlagerstandorts.

Bezüglich der (Re-) Kritikalität ist damit zu empfehlen, direkte Massnahmen bei der Konditionierung des Abfalls und der Endlagerauslegung anzuwenden, statt im Rahmen einer (Langzeit-) Sicherheitsanalyse potentielle Konsequenzen einer Kritikalitäts-Exkursion zu beurteilen. Die direkteste Art, kritische Konfigurationen zu verhindern, besteht in der Begrenzung der Menge spaltbaren Materials in den Abfallbehältern, obwohl auch weitere Sicherheitsmassnahmen für Abfallmatrix, Abfallbehälter, Raumgeometrie der Einlagerungshohlräume und für das Verfüllmaterial möglich sind. Als effektiv erweist sich u.a. der Einsatz von neutronen-absorbierendem Material oder die in Deutschland geplante Kompaktierung der Brennstäbe.

Salzgestein weist bzgl. Kritikalität gegenüber anderen Wirtgesteinstypen gewisse Vorteile auf. Fehlendes (Poren-) Wasser macht das Salz einerseits zu einem schlechten Neutronenmoderator, andererseits gilt es als guter Neutronenabsorber.

9.3.4 Gasbildung

Die Entstehung und der Transport von Gasen in und um ein geologisches Endlager für radioaktive Abfälle ist ein wichtiges Thema, das in den Sicherheitsanalysen üblicherweise als Alternative zu den erwarteten Szenarien der "normalen" Endlagerentwicklung behandelt wird (OECD/NEA, 2001). Prinzipiell fallen in einem

"konventionellen" geologischen Endlager⁵ drei verschiedene Gasquellen in Betracht:

- a) Gasproduktion durch die eingelagerten Abfälle sowie durch andere im Endlager vorhandene Materialien
- b) Im Gestein vorhandenes Gas
- c) Gas (Luft), das während dem Bau und Betrieb ins Endlagersystem gelangt.

Die Analysen des Langzeitverhaltens des Endlagersystems konzentrieren sich normalerweise auf die erste Möglichkeit (a). Es gibt drei Hauptmechanismen für die Entstehung von Gasen in einem geologischen Endlager, nämlich die Korrosion von Metallen, die Biodegradierung von organischen Stoffen sowie die Radiolyse (vor allem von Wasser). Bei den meisten Endlagersystemen wird hauptsächlich Wasserstoff (H₂) durch die Korrosion von Metallen produziert. Um die Bedeutung der Gasproduktion zu beurteilen, müssen folgende Parameter untersucht werden (EC, 2000):

- Effektive Produktionsraten (als Funktion der Zeit und unter Berücksichtigung möglicher Verbrauchsmechanismen)
- Transportraten durch die Komponenten des technischen Barrierensystems
- Transportraten durch das umgebende Gestein unter Berücksichtigung einer allfällig vorhandenen Auflockerungszone.

Was die Kriterien für die Standortauswahl betrifft, gibt es verschiedene Faktoren, welche die oben aufgeführten Raten beeinflussen können (NIREX, 1998). So kann z.B. die Grundwasserchemie einen Einfluss auf die Gasproduktionsraten ausüben, die Transportraten durch das System der technischen Barrieren können durch das Spannungsfeld im umgebenden Gestein beeinflusst werden, und der Transport durch die Geosphäre hängt entscheidend von der (Gas-) Permeabilität sowohl des intakten Gesteins als auch allfällig vorhandener Heterogenitäten (z.B. Klüfte, Störungszonen, Auflockerungszone) ab.

Auf einem regionalen Massstab betrachtet stellt das Vorhandensein bedeutender

⁵ Ausgeschlossen ist hier insbesondere die ungewöhnliche Situation in Yucca Mountain, wo ein ungesättigtes System mit inhärenter Gasphase vorhanden ist.

natürlicher Gasdrücke im Gestein (siehe b) oben) einen Hinweis für eine niedrige Gaspermeabilität dar. Obwohl diese Drücke keine direkte Auswirkung auf die Langzeitsicherheit haben (hingegen auf Bau und Betrieb), können sie zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für ein menschliches Eindringen führen, nämlich dann, wenn möglicherweise nutzbare Gasvorkommen vorhanden sind. Gasvorkommen können im Prinzip ebenfalls wichtig sein für die Sicherheitsanalyse der Betriebsphase, zum Beispiel wenn denkbare Szenarien (z.B. Ausfall des Ventilationssystems für eine bestimmte Zeit) zu einer Explosionsgefahr oder zu erhöhten Radonkonzentrationen führen.

Die dritte Gasquelle – nämlich die Ventilation während der Betriebsphase (siehe c) oben) – ist dann von Bedeutung, wenn die Eigenschaften des Wirtgesteins durch Reaktionen mit Luft verändert werden, so z.B. durch die Oxidation von Pyrit, die zu einer klassischen "sauren Grubenentwässerung" führt. Wenn solche Mechanismen nicht ausgeschlossen werden können, müssen sowohl das Ausmass als auch die Konsequenzen solcher Veränderungen für das Langzeitverhalten des Endlagersystems bewertet werden.

Was die Standortauswahl betrifft, kann festgehalten werden, dass hydraulisch dichte Wirtgesteine, d.h. Gesteine mit einem vernachlässigbar kleinen advektiven Wasserfluss wie Tone und Salz (positiv für die Langzeitsicherheit im Bezug auf das Grundwasserszenarium) tendenziell grössere Probleme mit dem Aufbau von Gasdrücken aufweisen können als z.B. geklüftete, hydraulisch aktive Gesteine. Die Bedeutung von Gas für das Langzeitverhalten des Endlagers ist aber in jedem Fall auf standort- und konzeptspezifischer Basis zu evaluieren.

9.3.5 Menschliches Eindringen

Die Möglichkeit, dass Personen – wenn sie in ein Endlager eindringen – erheblicher radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind und evtl. das Barrierensystem schädigen, ist eine unabdingbare Folge der konzentrierten Einlagerung von Abfällen in ein kleines Gesteinsvolumen. In der Auswahl möglicher Auswirkungen zukünftiger menschlicher

Aktivitäten auf das Endlager stellt das Eindringen einen Extremfall dar. Das Gesamtspektrum erstreckt sich von Veränderungen der Geländeoberfläche mit Auswirkungen auf die Verteilung von Grundwasseranreicherungs- und -exfiltrationsgebieten, über Veränderungen nahe gelegener untertägiger Hohlräume (Berg- oder Tunnelbau) bis hin zu eigentlichen Störeinflüssen auf das Endlager und die Abfälle durch direktes Eindringen. Dieser Kapitel behandelt ausschliesslich das direkte Eindringen, hier definiert als Eindringen in den Gesteinskörper bzw. das Grundwassersystem des Endlagers, das Endlager selbst sowie dessen Zugänge, welche Abfälle enthalten oder von den Abfällen radioaktiv kontaminiert wurden.

Mögliche zukünftige Eindringsszenarien werden gewöhnlich wie folgt unterschieden:

- *Absichtliches Eindringen*, mit voller Kenntnis über das Endlager und seine wahrscheinlichen Inhalte
- *Unabsichtliches Eindringen*, versehentliches Eindringen aufgrund verlorener Kenntnisse über die Existenz des Endlagers, oder Unkenntnis über die Gefährlichkeit der Abfälle.

Es gibt ferner eine dritte Gruppe von Eindringsszenarien, die aber nur selten berücksichtigt wird: absichtliches Eindringen aus Neugierde, nachdem Kenntnisse zu den Folgen in Vergessenheit geraten sind, genannt "*naives Eindringen*". Auf dieses Thema wird hier nicht näher eingegangen.

Generell wird davon ausgegangen, dass gesetzliche Vorgaben nicht den Schutz der Bevölkerung bei einem absichtlichen Eindringen anstreben sollen. Stattdessen sollte es das Ziel sein, dass Massnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit eines unabsichtlichen Eindringens (und, wenn möglich, der Folgen) nach dem Entfallen der institutionellen Kontrolle (normalerweise in der Grössenordnung von bis zu 500 Jahren nach der Stilllegung) getroffen werden.

Unabsichtliches Eindringen in ein geologisches Endlager kann im Zuge von Tiefbohrungen zur Erkundung von Bodenschätzen bzw. zu wissenschaftlichen Zwecken, oder durch untertägigen Abbau zur Rohstoffgewinnung bzw. zur Nutzung des Untergrunds für Speicherzwecke erfolgen. Bisherige Szenarienuntersuchungen

waren hauptsächlich der Wahrscheinlichkeit und den Folgen unabsichtlichen Eindringens gewidmet. Ein unabsichtliches Eindringen kann einerseits zu einer direkten Exposition von Personen führen, andererseits zur Kontamination von Gestein, Wässern oder Endlagerbaustoffen, die durch die Freisetzung von Radionukliden aus den (in ihrer Schutzwirkung beeinträchtigten) Abfallbehältern hervorgerufen wird. Ebenso können dabei Schäden an den technischen Barrieren und der Endlagereinrichtung entstehen, welche die Wirksamkeit des Endlagersystems beeinträchtigen und einige Zeit nach dem Eindringen zu erhöhten Freisetzungen führen. Die bisherigen Betrachtungen konzentrierten sich mehrheitlich auf die Auswirkungen einer direkten Strahlenexposition. Zum Verhalten eines geschädigten Endlagers bestehen dagegen relativ wenige Studien (SMITH et al. 1999).

Das menschliche Eindringen in ein Endlager ist bei der Standortauswahl und Endlagerauslegung, der Sicherheitsanalyse und der zugehörigen Gesetzgebung kein Thema rein technischer Natur. Ihm gebührt Berücksichtigung im Sinne unterschiedlicher Gesichtspunkte, darunter folgende:

- Besteht eine moralische Verpflichtung zum Schutz der zukünftigen Bevölkerung?
- Wie sollen die Folgen eines Eindringens bewertet werden?
- Sollen die Ergebnisse aus den Analysen zum menschlichen Eindringen mit anderen Szenarien verglichen werden? Wenn ja, wie?
- Sollen gesonderte gesetzliche Regelungen für menschliches Eindringen erstellt werden?
- Welches sind die zu beachtenden zeitlichen Massstäbe?

Bisher war es üblich, unabsichtliches Eindringen auf der Basis von Risikobetrachtungen auszuwerten. Die Aufmerksamkeit derartiger Analysen gilt typischerweise dem wahrscheinlichsten und mit relativ schweren Folgen verbundenen Ereignis, nämlich dem Abteufen von Bohrlöchern in den Abfall oder in das Endlager – obwohl das Ereignis letztlich nur eine kleine kritische Gruppe betrifft. Veröffentlichte Ergebnisse zum Eindringen durch Bohren unter verschiedenen Voraussetzungen zeigen tendenziell geringe Wahrscheinlichkeiten und Risiken, jedoch potentiell schwere

Konsequenzen für die Eindringenden. Es ist allerdings klar, dass die Analysen sehr spekulativ sind und von den gewählten Bedingungen stark beeinflusst werden, insbesondere von den Annahmen zu zukünftigen Bohraktivitäten und den Gründen dafür. Da auch vollkommen andere Werte durchaus logisch begründet werden können, sind die Ergebnisse solcher Studien schwierig zu vertreten. Die kürzlich erteilte Bewilligung für das WIPP-Endlager wurde dadurch vereinfacht, indem die amerikanische Aufsichtsbehörde dem Antragsteller die Häufigkeit für die in den Sicherheitsanalysen anzusetzenden Bohrungen vorgab (30 Bohrungen pro km² über einen Zeitraum von 10'000 Jahren: dieser interessanten Zahl wurden aktuelle Bohrdaten zugrunde gelegt). Die Einhaltung der Vorschriften war dadurch einfacher zu gewährleisten, das allgemeine Vertrauen in die Sicherheit des Endlagers konnte damit jedoch nicht gestärkt werden; die Meinungen zur Wahrscheinlichkeit eines Eindringens am Standort durch Bohrungen gehen weit auseinander.

Studien zum unabsichtlichen Eindringen befassen sich mit verschiedenen Expositionsszenarien:

- Anbohren von Abfällen und die direkte Exposition zu den radioaktiven Stoffen im geförderten Bohrkern (Deutschland, Grossbritannien, Kanada, die Niederlande, USA – WIPP & Yucca Mountain Project, Schweiz – Wellenberg)
- Anbohren eines kontaminierten Aquifers bzw. bergmännischer Abbau in einer Kontaminationsfahne in der Nähe des Abfalls oder des Endlagers; Ingestion von kontaminiertem Trinkwasser und landwirtschaftlichen Produkten, die mit kontaminiertem Wasser aus der Bohrung bewässert wurden (PAGIS – Salz, Finnland, Kanada, Schweden und Schweiz – Kristallin, USA – WIPP)
- Überbauen oder Bewohnen von Land, das durch radioaktives Material im Bohrgut kontaminiert wurde (Grossbritannien, Kanada)
- Beschädigung des Endlagers durch Bergbauaktivitäten oder Bohrprogramme, welche unterhalb des Endlagers Formationswässer mit Überdruck tangieren (PAGIS – Salz, Frankreich, USA – WIPP)

Die aktuellen, von der amerikanischen Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency) vorgegebenen Normen für Yucca Mountain (EPA 2001) schreiben lediglich die Berechnung der Strahlendosen vor, welche aus Freisetzungen entlang eines unverfüllten, instabilen Bohrlochs resultieren, welches einen Abfallbehälter und den darunter liegenden Aquifer durchdringt. Berechnungen zur Strahlenexposition des Bohrpersonals werden nicht verlangt.

Bezüglich der Standortauswahl gilt grundsätzlich, dass bekannte Gebiete mit natürlichen Rohstoffvorkommen und anderen Ressourcen (Geothermie) zu vermeiden sind. Bei einer Gegenüberstellung der Notwendigkeit eines Endlagers und den zukünftigen Rohstoffbedürfnissen (so genannter Vorrangentscheid) zeigen sich einige Länder bis zu einem gewissen Masse kompromissbereit, indem beispielsweise ein "genügender" Abstand zu bekannten Vorkommen oder eine "geringe" Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Rohstoffnutzung verlangt wird (vgl. Tabelle 2.1 in Kapitel 2.4.3).

Kristalline Standorte sind insbesondere hinsichtlich einer geothermischen Nutzung, Mineralwässer und potentiellen Vererzungen zu beurteilen. In Sedimentbecken sind Erdöl, Kohle, Erdgas, Ton und nutzbare Aquifere (Mineralwässer) als potentielle Rohstoffe und damit als Nutzungsmöglichkeiten grundsätzlich in Betracht zu ziehen. Gegenüber anderen Wirtgesteinstypen weisen Salzformationen als eigentliche Rohstoffvorkommen für Stein- und Kalisalze im Bezug auf das menschliche Eindringen wichtige Nachteile auf. Ölfällen an Salzstöcken gehören mit zu den wichtigsten Typen von Erdöl- / Erdgasvorkommen (PRESS & SIEVER, 1995). Zudem dienen Salzformationen vereinzelt zur Untergrundspeicherung von flüssigen oder gasförmigen Energieträgern und Grundstoffen für die chemische Industrie. Die Standorteignung ist somit in jedem Fall auf der Grundlage der geologischen Gesamtsituation zu beurteilen.

9.4 Weitere wichtige Kriterien für die Standortauswahl

Wie bereits in Kapitel 3 "Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager und ihr Einfluss auf nationale Programme zur Standortauswahl" ausgeführt, spielen die quantitativen Langzeitsicherheitsanalysen bis anhin eine eher untergeordnete Rolle bei der Standortauswahl für geologische Endlager. In den wenigen Fällen, in denen formelle Verfahren zur Standortauswahl hinreichend dokumentiert sind, gewichteten diese die nachgewiesene Langzeitsicherheit bei der "Multi-Attribute Decision Analysis" (Nutzwertanalyse) von möglichen Standorten sehr hoch. Gleichwohl führte dieses Kriterium selten zu einer signifikant unterschiedlichen Bewertung der Standortoptionen. Stattdessen waren – unter anderem – die folgenden Faktoren für den Entscheid zwischen Standorten massgebend:

- Konventionelle Umweltverträglichkeit
- Sicherheit während der Betriebsphase
- Distanzen und Optionen für den Transport
- Bestehende Infrastruktur
- Bestehende Datengrundlagen zur Geologie
- Kosten
- Akzeptanz in der Öffentlichkeit

Während des vergangenen Jahrzehnts konnte eine zunehmende Bedeutung der beiden letztgenannten Faktoren beobachtet werden. Die höhere Bedeutung der öffentlichen Akzeptanz und die Probleme, die an Standorten wie z.B. Sellafield, Yucca Mountain, Gorleben und Konrad durch ein kaum nachvollziehbares Auswahlverfahren entstanden sind, führen dazu, dass ein offenes und transparentes Vorgehen bei der Standortauswahl zunehmend an Gewicht gewinnt. Eine Auswertung der Arbeiten auf diesem Gebiet läge jedoch ausserhalb des Rahmens dieser Studie.

10 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Gestützt auf die erfolgte Auswertung der Ergebnisse von Arbeiten, die während der vergangenen dreissig Jahre ausgeführt wurden, die einen Aufwand von Tausenden von Mannjahren erforderten und deren Dokumentation mehrere Zehner (wenn nicht Hunderte) von Laufmetern umfasst, wurden gewisse Kriterien aus den Langzeitsicherheitsanalysen abgeleitet, welche bei der Auswahl von Endlagerstandorten in Deutschland verwendet werden können. Auf den ersten Blick mag das Ergebnis, das in der vorliegenden Arbeit dargestellt wurde, als etwas enttäuschend erscheinen, besteht es doch aus einigen eher selbstverständlichen, allgemeinen Kriterien und einer umfangreicheren Zahl von Kriterien, die eher vage und qualitativ bzw. abhängig vom Endlagerkonzept sind. Tatsächlich ist dies jedoch eine Folge des verbesserten Verständnisses von Endlagersystemen, welches zur Erkenntnis führte, dass das gesamte System von geologischen und technischen Barrieren als ein Ganzes beurteilt werden muss. Der simplizistische Ansatz der 60'er und 70'er Jahre, in dem die "geologische" Suche nach dem idealen Standort gänzlich losgelöst von den "technischen" Arbeiten der Endlagerauslegung und den "physiko-chemischen" Aspekten der modellmässigen Sicherheitsbetrachtungen erfolgen kann, ist nicht mehr haltbar.

Das Problem der übermässigen Vereinfachung der Analyse ist nirgends offensichtlicher als bei der Gegenüberstellung der drei Haupttypen von Wirtsgesteinen (Kristallines Gestein, Sedimentgestein, Salzgestein). Jeder dieser Haupttypen zeichnet sich durch deutliche Vor- und Nachteile aus:

- Kristalline Gesteine sind im Bezug auf die Prozesse zur Grundwasserbewegung und zum Schadstofftransport einfach zu verstehen und bautechnisch günstig, aber sie können heterogen und schwierig zu charakterisieren sein.
- Sedimentgesteine können homogen und einfach zu charakterisieren sein, aber ihr Verhalten bei Störeinwirkungen ist unter Umständen schwierig vorherzusagen und Bauaktivitäten können einige ihrer vorteilhaften Eigenschaften beeinträchtigen.
- Salzgesteine können als die beste Option eingestuft werden, wenn das Gewicht auf den vollständigen Einschluss der Abfälle (Nullfreisetzung) und die Einfachheit der

Bautätigkeit gelegt wird. Unter dem Gesichtspunkt eines potentiellen Rohstoffes sowie der Wahrscheinlichkeit und der Auswirkungen menschlichen Eindringens weisen Salzgesteine jedoch wichtige Nachteile auf.

Eine Wahl zwischen diesen Gesteinsarten kann also erst getroffen werden, wenn einige andere Randbedingungen ausreichend festgelegt sind (Abfalltyp, Endlagerkonzept, geographische Einschränkungen, gesetzliche Vorgaben, Kostenrahmen, usw.). Bevor man eine Gesteinsart wählt, ist es insbesondere wichtig die gesamte geologische Situation, in welcher sich die entsprechenden Formationen befinden, zu beurteilen.

Im Hinblick auf die zentralen Fragestellungen des Vorhabens, die im Zusammenhang stehen mit der Ableitung von Kriterien für die Auswahl eines Endlagerstandortes, nämlich

- den positiven bzw. negativen Eigenschaften der geologischen und hydrogeologischen Situation am Endlagerstandort bzw. der anderen Komponenten des Endlagers
- der Berücksichtigung dieser Eigenschaften in den Langzeitsicherheitsanalysen
- dem Einfluss dieser Eigenschaften auf das Isolationsvermögen (Rückhaltezeit) und die Höhe einer Schadstofffreisetzung
- ihrer Rangfolge in ihrer Sicherheitsrelevanz

ergibt sich im Überblick das in Tabelle 10.1 dargestellte vereinfachte Bild. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass gewisse Resultate und Schlussfolgerungen aus den einzelnen Sicherheitsanalysen stark abhängig sind von den spezifischen Rahmenbedingungen, unter welchen die entsprechende Analyse erfolgt ist. Diese Tatsache wird sich in einer vereinfachten Betrachtung gemäss der untenstehenden Tabelle im allgemeinen nicht widerspiegeln.

Tabelle 10.1: Sicherheitsrelevante Kriterien für die Auswahl eines Endlagerstandortes

Positive Eigenschaft	Bedeutung	Berücksichtigung in der Langzeitsicherheitsanalyse	Sicherheitsfunktion	Relevanz
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tektonische Stabilität Geringe vulkanische Aktivität Geringe Hebungsrate Geringe Kluffbewegungen Geringe Erdbeben­tätigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> + E W + 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme Annahme / Störeinfluss Annahme / Störeinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss Einschluss Einschluss Einschluss 	<ul style="list-style-type: none"> erforderlich erforderlich günstig / erforderlich untergeordnet
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geologische Struktur Ausreichende Ausdehnung Homogenität 	<ul style="list-style-type: none"> E W 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme Annahme / Störeinfluss (Inhomogenität ^{II)}) 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss / Retardation ^{I)} Einschluss / Retardation 	<ul style="list-style-type: none"> erforderlich günstig
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Hydrogeologie Geringer Wasserfluss Geringe Wassergeschwindigkeit Hohe Verdünnung 	<ul style="list-style-type: none"> + + + 	<ul style="list-style-type: none"> quantitativ quantitativ quantitativ 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss / Retardation (Einschluss) / Retardation – ^{III)} 	<ul style="list-style-type: none"> günstig (erforderlich für Salzgestein) günstig günstig
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Geochemie Kompatibilität mit technischem Barrierensystem Starke Sorption (Wirtgestein) 	<ul style="list-style-type: none"> E W 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme / Störeinfluss quantitativ 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss / Retardation Retardation 	<ul style="list-style-type: none"> günstig günstig
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bauliche Machbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> E 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme 	<ul style="list-style-type: none"> – 	<ul style="list-style-type: none"> erforderlich
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gute Standfestigkeit ^{IV)} 	<ul style="list-style-type: none"> E / W 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme / Störeinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss 	<ul style="list-style-type: none"> günstig
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Beschränkte Rohstoffvorkommen / Ressourcen 	<ul style="list-style-type: none"> + 	<ul style="list-style-type: none"> Annahme / Störeinfluss 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss 	<ul style="list-style-type: none"> günstig / erforderlich
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Einfache Erkundbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> W 	<ul style="list-style-type: none"> Datenunsicherheit (Parametervariation) 	<ul style="list-style-type: none"> Einschluss / Retardation 	<ul style="list-style-type: none"> günstig

Legende (siehe nächste Seite)

Legende:

- I) inklusive Begrenzung der Freisetzung
- II) Inhomogenitäten z.T. im Referenzfall berücksichtigt (grosse Störungen, kleine Klüfte)
- III) anderes als Einschluss oder Retardation
- IV) positive oder negative Bedeutung (je nach Wirtgestein)
- + in allen Fällen positiv
- E abhängig vom Endlagerkonzept
- W abhängig vom Wirtgestein

Annahme: geht als Voraussetzung in die Sicherheitsanalyse ein

Störeinfluss: nicht Bestandteil des Referenzfalles; separate Analyse

Für das deutsche Programm können die Ergebnisse des vorliegenden Berichts dazu beitragen, ein strukturiertes Verfahren für die Standortauswahl zu entwickeln. Die aus der Langzeitsicherheitsanalyse ableitbaren Entscheidungsgrundlagen für die Standortauswahl sollen gewährleisten, dass die Langzeitsicherheit erstrangig berücksichtigt wird. Gleichzeitig sind aber auch die inhärenten Grenzen jeder Sicherheitsanalyse zur Kenntnis zu nehmen und eine Überinterpretation ihrer Ergebnisse zu vermeiden.

Die vorliegende Studie macht deutlich, dass mit der Analyse der Langzeitsicherheit im Zusammenhang mit der Planung und Realisierung eines geologischen Endlagers für radioaktive Abfälle unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Ein wichtiges Ziel ist der Nachweis, dass ein vorgeschlagener Standort – zusammen mit der entsprechenden Endlagerauslegung – den vorgeschriebenen Sicherheitsanforderungen (inklusive angemessenen Sicherheitsreserven) genügt. Die Ableitung einer quantitativen Rangfolge für die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Standortes insbesondere der geologischen und hydrogeologischen Situation und anderer Komponenten des Endlagersystems ist auf der Grundlage der Langzeitsicherheit nicht machbar, weil die "Auflösung" der Analyse im allgemeinen zu grob ist. Ein spezielles "Ranking" der sicherheitsrelevanten Eigenschaften ist aber auch nicht notwendig, weil andere Kriterien im Rahmen einer "Multi-Attribute Decision Analysis" (Nutzwertanalyse) zu berücksichtigen sind.

Als positive Erkenntnis zeigen Sicherheitsanalysen, dass tiefe geologische Endlager ein Sicherheitsniveau aufweisen können, das jenes von "normalen" Industriebranchen übertrifft, und dass daher – auch wenn ein "idealer" Standort nie gefunden werden kann – zahlreiche unterschiedliche Optionen bestehen, um "ausreichend gute" Standorte zu finden, die nahezu jede vernünftige Randbedingung für ein Endlagerprojekt erfüllen.

11 LITERATURVERZEICHNIS

11.1 Kapitel 2 – Rolle der Sicherheitsanalyse bei der Standortauswahl

AtG 1985: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren i. d. F. der Bek. vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S.1566), zuletzt geändert durch 9. Änderungsgesetz vom 5. März 2001 (BGBl. I S. 326).

BBergG 1980: Bundesberggesetz vom 13. August 1980, BGBl. I S. 1310, zuletzt geändert durch das Gesetz zur Änderung des Bundesberggesetzes vom 12. Februar 1990 (BGBl. I S. 215)

BMI 1983: Der Bundesminister des Innern: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. BAnz. Jahrgang 35, Nr. 2, vom 5. Januar 1983

CEC (1988): PAGIS Performance assessment of geological isolation systems for radioactive waste. CEC Nuclear Science and Technology Series EUR 11775 - 11778 EN, Commission of the European Communities, Luxembourg.

CEC (1991): Safety evaluation of geological disposal concepts for low and medium-level wastes in rock-salt (Pacoma project). CEC Nuclear Science and Technology Series EUR 13178 EN, Commission of the European Communities, Luxembourg.

CEC (1996): Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: Everest project. CEC Nuclear Science and Technology Series EUR 17122 EN, Commission of the European Communities, Luxembourg.

CEC (1992): Endlagerung radioaktiver Abfälle: Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers: Serie "Euradwaste" Nr. 6: Ein Leitfaden für Kriterien zur Standortwahl, ausgearbeitet von einer Gruppe von Sachverständigen im Rahmen des "Aktionsplans der Gemeinschaft auf dem Gebiet der radioaktiven Abfallstoffe"; (Cadelli N.; Orłowski S.) EUR 14598 DE Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel.

HSK & KSA 1993: Richtlinie für schweizerische Kernanlagen R-21. Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle; Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) und Eidg. Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Villigen (Schweiz), 1993.

HSK 1994: Stellungnahme zur Standortwahl für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen (Schweiz), Januar 1994

HSK 2000: Anforderung der HSK an das Projekt eines Lagers für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) am Wellenberg; HSK-Bericht 30/15, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen (Schweiz), November 2000

IAEA (1994): Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide, IAEA Safety Series No. 111-G-4.1, International Atomic Energy Agency, Vienna.

MIPTT (1991): Ministry of Industry, P&T and Tourism – Basic Safety Rules: Rule No. III.2.f.: Production, monitoring and processing of effluents and waste : Solid waste: Determination of the objectives to be adopted in the design and construction phases of the creation of a deep geological formation radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed. Nuclear Installations Safety Directorate (NISD), Paris.

NEA (1997): Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal, Proceedings of an NEA International Workshop, Córdoba, Spain, 20-23 January 1997.

SKB 1997: Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. Walker D.; Rhén I.; Gurban I. SKB Technical Report 97-23. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management, Stockholm, 1997.

SKB 1998: Summary of hydrochemical conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. Laaksoharju M.; Gurban I.; Skarman C. SKB Technical Report 98-03. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, 1998.

StrlSchV 2001: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen vom 20.07.2001, BGBl. I S. 1714

WHG 1986: Bekanntmachung der Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes vom 23. September 1986. (BGBl. I S. 1529,1654), zuletzt geändert durch Art. 6 des Gesetzes vom 26. August 1992 (BGBl. I S. 1564)

11.2 Kapitel 3 – Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager und ihr Einfluss auf nationale Programme zur Standortauswahl

International

NEA 1999: Geological disposal of radioactive waste - Review of developments in the last decade; OECD/NEA, Paris, 1999.

PAGIS 1988: Performance Assessment of Geological Isolation Systems, Commission of the European Communities, Directorate General for Science, Research and Development, EUR 11775 EN, 1988

Belgien

SCK•CEN 1992: Updating 1990 – Updating of the performance assessments of the geological disposal of high-level and medium-level wastes in the Boom Clay formation. Marivoet J., Bonne A. and Neerdael B.; SCK•CEN BLG-634.

Studiecentrum voor Kernenergie, Belgium.

SCK•CEN 1994: MOL 94 – Long-term performance studies: Selection of scenarios to be considered in performance assessments for the Mol site. Marivoet J.; SCK•CEN R-2987, SCK•CEN, Belgium.

Deutschland

GSF 1991: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle; Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R., GSF-Bericht 27/91. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig 1991.

PSE 1985: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Zusammenfassender Abschlussbericht, Kapitel 4, Entwicklung eines sicherheitsanalytischen Instrumentariums für das geologische Endlager für radioaktive Abfälle in einem Salzstock. Hahn-Meitner Institut, Berlin 1985.

PTB 1986: Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklidenausbreitung in der Nachbetriebsphase. Storck, R.; Bütow, E.; Heredia, L.; Hossain, S.; Kühle, T.; Lütke-meier-Hosseini-pour, S.; Nies, A.; Pröhl, G.; Struck, S., unveröffentlichter Bericht im Auftrag der PTB, TA-Nr. 2242.03, Braunschweig 1986.

Schweden

KBS 1977: KBS-1 – Handling of spent nuclear fuel and final storage of vitrified high-level reprocessing waste. SKBF/KBS Report (5 Vols), Stockholm.

KBS 1978: KBS-2 – Handling and final storage of unprocessed spent nuclear fuel. SKBF/KBS Report (2 Vols), Stockholm.

KBS 1983: KBS-3 – Final storage of spent fuel – KBS-3. SKBF/KBS Report, Stockholm, ISSN 0349-6015.

PASS 1992: Project on Alternative Systems Study, Final Report (PASS); SKB Technical Report TR 93-04, SKB, Stockholm, Sweden.

SKAGIUS K. & SVEMAR C. 1989: Performance and Safety of WP-Cave Concept; SKB Technical Report TR 89-26, SKB, Stockholm, Sweden.

SKB 1992: SKB 91 – Final disposal of spent nuclear fuel: Importance of the bedrock for safety. SKB Technical Report 92-20, SKB, Stockholm, Sweden.

SKI 1996: SITE 94 – Deep Repository Performance Assessment Project. SKI Report 96-36, SKI, Stockholm, Sweden.

SKB 1999: SR 97 – Deep repository for spent fuel: post-closure safety; Main Report (Volume 1+2 & Summary Report), SKB Technical Report TR-99-06, SKB, Stockholm, Sweden.

Finnland

POSIVA 1996: TILA 96 – Interim report on safety assessment of spent fuel disposal. POSIVA-96-17, Posiva, Helsinki, Finland.

POSIVA 1999: TILA 99 – Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. Posiva 99-07, Posiva, Helsinki, Finland.

YJT 1992: TVO-92 – Safety analysis of spent fuel disposal. YJT Technical Report YJT-92-33E (English edition), YJT, Helsinki, Finland.

Frankreich

PAGIS 1988: Performance Assessment of Geological Isolation Systems, Commission of the European Communities, Directorate General for Science, Research and Development, EUR 11775 EN, 1988

Grossbritannien

NIREX 1997: Nirex 97 – An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield. Nirex Report S/97/012, United Kingdom Nirex Ltd, Harwell, U.K.

Japan

PNC 1992: H3 – Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste. First Progress Report (H3). PNC TN1410 93-059, PNC (now JNC), Tokyo, Japan.

JNC 2000a: H12 – Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, 2nd progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan. JNC TN1410 2000-001, JNC, Japan.

JNC 2000b: H12 – Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 1: Geological Environment in Japan, 2nd progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan. JNC TN1410 2000-002, JNC, Japan.

JNC 2000c: H12 – Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 2: Repository Design and Engineering Technology, 2nd progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan. JNC TN1410 2000-003, JNC, Japan.

JNC 2000d: H12 – Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, 2nd Progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan. JNC TN1410 2000-004, JNC, Japan.

JNC/FEPC 2000: Progress Report on Disposal Concept for TRU Waste in Japan; Report No. JNC TY 1400 2000-002, TRU Coordination Office of Japan Nuclear Cycle Development Institute & Federation of Electric Power Companies, March 2000.

Kanada

AECL 1994a: Environmental impact statement on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste. AECL Report AECL-10711, COG-93-1. AECL, Pinawa, Canada.

AECL 1994b: Postclosure assessment of a reference system for disposal of Canada's nuclear fuel waste. Goodwin B.W., McConnell D.B., Andres T.H., Hajas W.C., Leneveu D.M., Melnyk T.W., Sherman G.R., Stephens M.E., Szekely J.G., Wuschke D.M., Bera P.C., Cosgrove C.M., Dougan K.D., Keeling S.B., Kitson C.I., Kummen B.C., Oliver S.E., Witzke K.H., Wojciechowski L.C. and Wikjord A.G.; AECL Report AECL-10717, COG-93-7. AECL, Pinawa, Canada.

DYNE P. 1975: AECL's responsibility and programs for management of high level radioactive waste; Atomic Energy of Canada Ltd., Report AECL-5111.

Schweiz

EKRA 2000: Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA); Wildi W. [et al.]: Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle : Schlussbericht. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern, Schweiz, 2000.

GNW 2000: Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg: Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen NW : Bericht zu Händen der Kantonalen Fachgruppe Wellenberg. Technischer Bericht 00-01. GNW, Wolfenschiessen, Schweiz, 2000.

NAGRA 1985a: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-07, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1985b: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-08, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1985c: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-04, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1985d: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-05, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1988a: Recherches sur l'aptitude des sites à accueillir un dépôt final de déchets faiblement et moyennement radioactifs – Rapport sur l'état des recherches phase I pour le site potentiel du Bois de la Glaive (Commune d'Ollon, VD). Nagra Rapport Technique 88-17, Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs, Wettingen, Suisse, Octobre 1988.

NAGRA 1988b: Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach und mittelaktiver Abfälle – Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Oberbauenstock (Gemeinde Bauen, UR). Nagra Technischer Bericht NTB 88-18, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Oktober 1988.

NAGRA 1988c: Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach und mittelaktiver Abfälle – Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Piz Pian Grand (Gemeinde Mesocco und Rossa, GR). Nagra Technischer Bericht NTB 88-19, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Oktober 1988.

NAGRA 1988d: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Oktober 1988.

NAGRA 1993a: Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW). Nagra Technischer Bericht NTB 93-26, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, September 1993.

NAGRA 1993b: Kristallin-I – Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), Wettingen, Switzerland, July 1994.

NAGRA 1994: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW). Nagra Technischer Bericht NTB 94-06, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Juni 1994.

NAGRA 1998: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg – Etappen aus dem Wege zum Verschluss; präzisierende Darstellung der Kontrollierbarkeit und Rückholbarkeit. Nagra Technischer Bericht NTB 98-04, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Oktober 1998.

Spanien

ENRESA 1998: Performance assessment of a deep geological repository in granite: March 1997. Enresa Publicación Technica Num. 02/98, Enresa, Madrid, Spain.

USA

US DOE 1996: WIPP – Title 40 CFR Part 191 Compliance certification application for the Waste Isolation Pilot Plant. DOE/CAO-1996-2184, Carlsbad, NM: United States Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad Area Office, NM, U.S.

US DOE 1998: YMP – Viability assessment of a repository at Yucca Mountain: Overview. DOE/RW-0508, US Department of Energy, Washington DC, U.S.

US DOE 1999: YMP – Draft Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. DOE/EIS-0250D, US Department of Energy, July 1999, Washington DC, U.S.

11.3 Kapitel 5 bis 8 – Bedeutung der Standorteigenschaften für die Standortauswahl

Kristallin

AECL 1994b: Postclosure assessment of a reference system for disposal of Canada's nuclear fuel waste. Goodwin B.W., McConnell D.B., Andres T.H., Hajas W.C., Leneveu D.M., Melnyk T.W., Sherman G.R., Stephens M.E., Szekely J.G., Wuschke D.M., Bera P.C., Cosgrove C.M., Dougan K.D., Keeling S.B., Kitson C.I., Kummen B.C., Oliver S.E., Witzke K.H., Wojciechowski L.C. and Wikjord A.G.; AECL Report AECL-10717, COG-93-7. AECL, Pinawa, Canada.

ENRESA 1998: Performance assessment of a deep geological repository in granite: March 1997. Enresa Publicación Technica Num. 02/98, Enresa, Madrid, Spain.

JNC 2000d: H12 – Project to Establish Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, 2nd Progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan. JNC TN1410 2000-004, JNC, Japan.

KBS 1983: KBS-3 – Final storage of spent fuel – KBS-3. SKBF/KBS Report, Stockholm, ISSN 0349-6015.

NAGRA 1985c: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-04, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1985d: Projekt Gewähr 1985 – Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht. Nagra Gewähr Bericht NGB 85-05, Nationale Genossenschaft

für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz, Januar 1985.

NAGRA 1993b: Kristallin-I – Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), Wettingen, Switzerland, July 1994.

NAGRA 1993c: Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Vergleichende Beurteilung der Standorte Boid de la Glaive, Oberbauenstock, Piz Pian Gran und Wellenberg: Text- und Beilagenband; Nagra Technische Berichte NTB 93-02, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz

NIREX 1997: Nirex 97 – An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield. Nirex Report S/97/012, United Kingdom Nirex Ltd, Harwell, U.K.

PAGIS 1988: Performance Assessment of Geological Isolation Systems, Commission of the European Communities, Directorate General for Science, Research and Development, EUR 11775 EN, 1988.

PNC 1992: H3 – Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste. First Progress Report (H3). PNC TN1410 93-059, PNC (now JNC), Tokyo, Japan.

POSIVA 1999: TILA 99 – Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. Posiva 99-07, Posiva, Helsinki, Finland.

SKB 1992: SKB 91 – Final disposal of spent nuclear fuel: Importance of the bedrock for safety. SKB Technical Report 92-20, SKB, Stockholm, Sweden.

SKB 1999: SR 97 – Deep repository for spent fuel: post-closure safety; Main Report, Volume 1+2 & Summary Report, SKB Technical Report TR-99-06, SKB, Stockholm, Sweden.

SKI 1991: SKI Project-90 – SKI Technical Report 91:23, Volume 1&2, SKI, Stockholm, Schweden, August 1991

SKI 1996: SITE 94 – Deep Repository Performance Assessment Project. SKI Report 96-36, SKI, Stockholm, Sweden.

US DOE 1986: A multiattribute utility analysis of sites nominated for characterization for the first radioactive waste repository - A decision-aiding methodology, DOE/RW-0074, U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, May 1986.

YJT 1992: TVO-92 – Safety analysis of spent fuel disposal. YJT Technical Report YJT-92-33E (English edition), YJT, Helsinki, Finland.

Sedimentgesteine

- BfS 1990: Plan Endlager für radioaktiver Abfälle, Schachtanlage Konrad Salzgitter, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Stand: September 1986 in der Fassung vom April 1990.
- EC 1988: PAGIS: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for radioactive Waste: Summary, EC Nuclear Science and Technology Report EUR 11775 EN.
- EC 1996: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project: Summary report, EC Nuclear Science and Technology Report EUR 17122 EN.
- ENRESA 1999: Evaluación del comportamiento y de la seguridad de un almacenamiento profundo en arcilla, Enresa Report 03/99, ENRESA, Madrid.
- JNC 2000a: Progress Report on Disposal Concept for TRU Waste in Japan, JNC and the Federation of Electric Power Companies, JNC TY1400 2000-002 & TRU TR-2000-02, Tokyo, Japan.
- JNC 2000b: The Second Progress Report: H12 Project for Assessment of Feasibility of HLW Disposal in Japan, JNC TN1410 2000-001 (Project Overview Report), Tokyo, Japan.
- MARIVOET, J. & ZEEVAERT, Th. 1990: PACOMA – Performance Assessment of the Geological Disposal of Medium-level and Alpha Waste in a Clay Formation in Belgium, EUR 13042 EN.
- MARIVOET, J. 1991: UPDATING 1990 – Updating of the Performance Assessments of the Geological Disposal of High-level Waste in the Boom Clay, SCK – ONDRAF/NIRAS Report BLG 634.
- MARIVOET, J., VOLCKAERT, G., SNYERS, A. & WIBIN, J. 1996: First Performance Assessment of the Disposal of Spent Fuel in a Clay Layer, EUR 16752 EN.
- NAGRA 1985: Projekt Gewähr 1985; Vol. 8: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbericht, Nagra Gewähr Bericht NGB 85-08, Nagra, Wettingen, Schweiz.
- NAGRA 1989: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988, Nagra Technischer Bericht NTB 88-25E, Nagra, Wettingen, Schweiz.
- NAGRA 1993: Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers SMA an Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW), Nagra Technischer Bericht NTB 93-26, Nagra, Wettingen, Schweiz.
- NAGRA 1994: Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg, Nagra Technischer Bericht NTB 94-06, Nagra, Wettingen, Schweiz.

NEA 1999: Geological Disposal of Radioactive Waste, Review of Developments in the Last Decade, OECD/NEA, Paris, France.

ONDRAF-NIRAS 1989: SAFIR - safety assessment and feasibility interim report: summary report, ONDRAF-NIRAS, Brussels, Belgium.

PNC 1992: Research and Development on Geological Disposal of High-level radioactive Waste: First Progress Report, PNC TN1410 93-059, PNC, Tokyo, Japan.

SUMERLING T. 1992: Dry Run 3: A Trial Assessment of Underground Disposal of Radioactive Waste Based on Probabilistic Risk Analysis: Overview; UK Department of the Environment Report DoE/HMIP/RR/92.039.

Salzgesteine

COLENCO 2000: Endlager Morsleben – Untersuchungen zur Entwicklung von Stilllegungskonzepten – Konzept der weitgehenden Vollverfüllung. Oswald, S., Resele, G., Lützenkirchen, F., Niemeyer, M; Bericht im Auftrag des BfS. Colenco Power Engineering AG, Colenco Bericht 4651/11, Baden, April 2000.

GSF 1991: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig 1991.

GRS 2000: Endlager Morsleben – Untersuchungen zur Entwicklung von Stilllegungskonzepten: Porenspeicherkonzept und Abdichtungskonzept. Storck, R.; Boese, B.; Brenner, J.; Herbert, H.-J.; Kühle, T.: Bericht im Auftrag des BfS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2779, Braunschweig 2000.

NRC 1957: National Research Council (NRC): The disposal of radioactive waste on land; National Academy of Sciences, Washington D.C., 1957

OPLA 1993: PROSA: Probabilistic Safety Assessment: Final report. Prij, J. (editor); Blok, B.M.; Laheij, G.M.H. et al.: OPLA-1A. Netherlands Research Foundation, Petten 1993.

US DOE 1986: A multiattribute utility analysis of sites nominated for characterization for the first radioactive waste repository - A decision-aiding methodology, DOE/RW-0074, U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, May 1986.

US DOE 1996: WIPP – Title 40 CFR Part 191 Compliance certification application for the Waste Isolation Pilot Plant. DOE/CAO-1996-2184, Carlsbad, NM: United States Department of Energy, Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad Area Office, NM, U.S.

11.4 Kapitel 9 – Kriterien für die Standortauswahl

EC, 2000: Rodwell W.R. (ed.): Research into gas generation and migration in radioactive waste repository systems (PROGRESS Project). EUR 19133 EN. European Commission, Brussels, 2000.

EPA, 2001: Environmental Protection Agency 40 CFR 197 (Part IV) – Public health and environmental radiation protection standards for Yucca Mountain, Nevada – Final Rule; Federal Register 66 / 144, 32073-32135.

NIREX, 1998: Nirex Safety Assessment Research Programme : Evidence of natural gas migration in the geosphere. Nirex Science Report S/98/006. Nirex, Harwell, 1998.

OECD/NEA, 2001: Gas generation and migration in radioactive waste disposal: Safety-relevant issues: Workshop proceedings, Reims, France, 26-28 June 2000. OECD/NEA, Paris, 2001.

PRESS, F. & SIEVER, R. 1995: Allgemeine Geologie, Spektrum Akademischer Verlag, 1995

SMITH, G.M., APTED, M.J. & CHAPMAN, N.A., 1999: Human Intrusion and Effects on Multi-Barrier Disposal Systems. In: Health and Environmental Criteria and Standards. Stockholm Environment Institute, 285-288.

UKEA, 1999: A Review of the Treatment of Criticality in Post-Closure Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal; T.W. Hicks (Galson Sciences Ltd.) and T.H. Green (AEA Technology Ltd); R & D Technical Report P222; UK Environment Agency, Bristol (UK), 1999

12 VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Volltext	Land
AECL	Atomic Energy of Canada Limited	Kanada
AECB	Atomic Energy Control Board (heute Canadian Nuclear Safety Commission CNSC)	Kanada
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	Frankreich
AtG	Atomgesetz	Deutschland
BbergG	Bundesberggesetz	Deutschland
BE	(Abgebrannte) Brennelemente	
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz	Deutschland
BMI	Bundesministerium des Innern	Deutschland
BNFL	British Nuclear Fuels PLC	Grossbritannien
CANDU	Schwerwassermoderierter Druckröhren-Natururan-Reaktor	
CASCADE	Comparative Assessment of Concepts and Areas for Deep Emplacement	Grossbritannien
CCA	Compliance Certification Application	
CEC	Commission of the European Communities	
CH-TRU	Contact-handled Transuranic Waste	
CSH	Calziumoxid-Siliziumoxid-Wasser (Zementchemie)	
DSIN	Direction de la sûreté des installations nucléaires	Frankreich
EC	European Community	
ECN	Netherlands Energy Research Foundation	Holland
EIS	Environmental Impact Statement	
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos	Spanien
EPA	Environmental Protection Agency	USA
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben	Deutschland
EVEREST	Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste	
F&E	Forschung und Entwicklung	
GOK	Geländeoberkante	
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH	Deutschland
GSF	Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GmbH)	Deutschland
H (12)	Machbarkeitsstudie für die sichere Endlagerung von HAA in Japan (im 12. Amtsjahr von Kaiser Akihito)	Japan
HAA	(Verglaste) hochaktive Abfälle	

Abkürzung	Volltext	Land
HADES	High Activity Disposal Experimental Site	Belgien
HMIP	Her Majesty's Inspectorate of Pollution	Grossbritannien
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen	Schweiz
IAEA	International Atomic Energy Agency	International
IVO	Imatran Voima Oy	Finnland
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute	Japan
KBS	Swedish Nuclear Fuel Supply Co, Kärnbränslesäkerhet (neu SKB)	Schweden
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle	
LWR	Leichtwasserreaktor	
MADA	Multi-Attribute Decision Analysis	
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	Schweiz
NEA	Nuclear Energy Agency (OECD)	International
Nirex	United Kingdom Nirex Limited (Nuclear Industry Radioactive Waste Executive)	Grossbritannien
NRC	United States National Regulatory Commission	USA
NRPB	National Radiological Protection Board	Grossbritannien
NRVB	Nirex Reference Vault Backfill	
NSC	Nuclear Safety Council (Consejo de seguridad nuclear)	Spanien
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan	Japan
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	International
ONDRAF / NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles / Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen	Belgien
OPLA	Kommission / Forschungsprogramm "Opberging te Land"	Niederlande
PACOMA	Performance assessment of the confinement of medium-active and alpha-bearing wastes	International
PAGIS	Performance Assessment of Geological Isolation Systems	International
PASS	Project on Alternative Systems Study	Schweden
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (siehe JNC)	Japan
Posiva	Posiva Oy	Finnland
PRA	Probabilistic Risk Assessment	
PROSA	Probabilistic Safety Assessment of Geologically Disposed Radioactive Waste	Holland
PSE	Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung	Deutschland

Abkürzung	Volltext	Land
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Deutschland
RCF	Rock Characterisation Facility	
RGD	Geological Survey of the Netherlands; Rijks Geologische Dienst	Holland
RH-TRU	Remote-handled Transuranic Waste	
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene	Holland
SAFIR	Safety Assessment and Feasibility Interim Report	Belgien
SAM	Systemanalyse Mischkonzept (gemeinsame Einlagerung von HAA und BE)	Deutschland
SCK•CEN	Stuadiocentrum voor Kernenergie / Centre d'étude de l'énergie nucléaire	Belgien
SFR	Final repository for radioactive operational waste	Schweden
SITE (94)	Deep repository performance assessment project (1994)	Schweden
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management, Co., Svensk Kärnbränslehantering AB	Schweden
SKI	Swedish Nuclear Power Inspectorate; Statens Kärnkraftinspektion	Schweden
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle	
SR (-97)	Safety Report (1997); deep repository for spent fuel	Schweden
StriSchV	Strahlenschutzverordnung	Deutschland
STUK	Säteilyturvakeskus (Radiation and Nuclear Safety Authority)	Finnland
SYVAC	Systems Variability Analysis Code	Kanada
THMC	Thermo-hydro-mechanisch-chemische (Kopplung)	
TILA (-99)	Repository Status, Loppusijoitustila (1999)	Finnland
TRU	(Transuranic) Long-lived intermediate level waste	
tSM	Tonnen-Schwermetall	
TSPA	Total System Performance Assessment	
TVO	Teollisuuden Voima Oy	Finnland
UKEA	United Kingdom Environment Agency	Grossbritannien
URL	Underground Rock Laboratory	Schweiz
US DOE	United States Department of Energy	USA
VEOS	Safety evaluation of disposal concepts in rock salts	Holland
VTT	Technical Research Centre of Finland; Valtion teknillinen tutkimuskeskus	Finnland
WHG	Wasserhaushaltsgesetz	Deutschland
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant	USA
YJT	Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies	Finnland

