

# KONZEPTIONELLE UND SICHERHEITSTECHNISCHE FRAGEN DER ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE

Wirtsgesteine im Vergleich

Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz

Salzgitter, 04.11.2005

# KURZFASSUNG

Titel: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle

Wirtsgesteine im Vergleich  
Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz

Stichworte: Endlager für radioaktive Abfälle, konzeptionelle und sicherheitstechnische Einzelfragen, Chemotoxische Stoffe, Gasbildung, Generisch, Geochemische Prozesse, Isolationspotenzial, Kritikalität, Mehrbarrierenkonzept, Menschliche Einwirkungen, Modellrechnungen, Nachweiszeitraum, Naturaloga, Rückholbarkeit, Safeguards, Sicherheitsindikatoren, Standortvergleich.

Vor dem Hintergrund der Vereinbarung zwischen Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.6.2000 wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) nach Diskussionen mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) sowie nach Beratungsaufträgen an die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) 12 zu bearbeitende Fragestellungen definiert. Das BfS wurde beauftragt, die grundsätzlich für alle in Deutschland möglichen Wirtsgesteine geltenden konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragestellungen in Auftrag zu geben und unter dem Gesichtspunkt eines Vergleichs der Wirtsgesteine auszuwerten.

Die 12 Fragestellungen wurden nach Ausschreibung und Auftragsvergabe zwischen 2002 und 2005 bearbeitet. Eine Ausnahme bildet das Thema Safeguards, das zuständigkeitshalber vom BMWA in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ) und dem BfS bearbeitet wurde.

Um sicherzustellen, dass die erzielten Ergebnisse den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dokumentieren, wurden die Berichte der Auftragnehmer einem Peer-Review-Verfahren durch jeweils 2 externe Sachverständige unterzogen. Auf einem Workshop wurden die Ergebnisse der Berichte zu den 12 Einzelfragen durch die Auftragnehmer vorgestellt und mit einem rund 80 Wissenschaftler umfassenden, pluralistisch zusammengesetzten Expertenkreis diskutiert. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen, der Peer Reviews und des Workshops hat das Bundesamt für Strahlenschutz seine Bewertung vorgenommen.

Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist festzuhalten, dass die Möglichkeiten und Grenzen eines generischen Vergleichs von Wirtsgesteinen aufgezeigt und eine Beantwortung der 12 Fragestellungen erreicht wurde. Danach gibt es kein Wirtsgestein, das grundsätzlich immer eine größte Endlagersicherheit gewährleistet. Für alle in Deutschland relevanten Wirtsgesteine können angepasste Endlagerkonzepte entwickelt werden. Ein Vergleich verschiedener Optionen ist nur im Vergleich konkreter Standorte und Endlagerkonzepte möglich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit eines Standortvergleichs.

Die Einzelvorhaben haben die gegenseitigen Abhängigkeiten und zum Teil gegenläufigen Anforderungen verschiedener sicherheitstechnischer Aspekte verdeutlicht. Daher kann jetzt ein Nachweiskonzept für die Langzeitsicherheit festgelegt werden, das alle Aspekte integriert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die Punkte auf, für die Regelungs- bzw. Entscheidungsbedarf besteht. Weitere wissenschaftlich-technische Arbeiten liefern hierzu keine zusätzlich relevanten Informationen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, ergibt sich aus generischen Fragestellungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle kein grundsätzlicher Forschungsbedarf mehr. Die noch denkbaren Wissenslücken müssen endlagerspezifisch beantwortet werden. Ihre Relevanz für die Sicherheit des Endlagers kann nur mit standort- und anlagenspezifischen Sicherheitsanalysen ermittelt werden.

# ABSTRACT

Title: Conceptual and safety-related issues regarding the disposal of radioactive wastes

A comparison of different host rocks

Synthesis Report issued by the Federal Office for Radiation Protection

Keywords: Repository for radioactive wastes, conceptual and safety-related issues, chemotoxic material, gas formation, generic, geochemical processes, potential of isolation, criticality, multibarrier concept, human intrusion, model calculations, period of proof, natural analogues, retrievability, safeguards, safety indicators, comparison of sites.

Against the background of the agreement between the German Federal Government and the energy supply companies as of June 14, 2000 a total of 12 issues, which needed to be solved, were defined by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) following discussions with the Federal Office for Radiation Protection (BfS) and consulting assignments to the Reactor Safety Commission (RSK). BfS was assigned the task of having the fundamental conceptual and safety-related issues valid for all potential host rocks in Germany investigated with respect to the disposal of radioactive wastes. BfS was instructed to evaluate the investigation results and prepare a synthesis report focussing on a comparison of these host rocks.

After the call for tenders and award of contracts said 12 issues were dealt with in the years 2002 to 2005. Only the topic Safeguards was assigned to the Federal Ministry of Economics and Labour (BMWA) due to the Ministry's particular area of responsibility, who worked in cooperation with the Research Centre Jülich (FZJ) and BfS.

In order to ensure that the results achieved would document the current state-of-the-art of science and technology, the contractors' reports were subject to a peer review process carried out by two external experts for each report. The contractors presented the results of their reports on said 12 issues in a workshop and a pluralistic expert group of around 80 scientists discussed the results. The investigation results, the peer reviews, and the workshop formed the basis for BfS' evaluation of the results.

The investigations have essentially come to the result that the possibilities and limits of a generic comparison of host rocks were identified and the 12 issues were solved. There is no host rock which always strictly ensures the highest level of repository safety. Repository concepts can be elaborated and adopted to all relevant types of host rock in Germany. Different options can only be compared if the comparison is made between specific sites and repository concepts. This leads to the conclusion that a comparison of sites is necessary.

The single projects have illustrated the interdependencies and sometimes conflicting requirements of different safety-related aspects. Thus it is now possible to define a proof concept for the long-term safety which will include all aspects.

The investigation results have made clear what points still need to be regulated or decided on. Further scientific-technical works will not deliver any additional relevant information on this topic.

With the exception of a small number of questions, generic issues regarding the disposal of radioactive wastes essentially do not require further fundamental research. Conceivable gaps of knowledge which might arise will have to be answered with respect to a particular repository. Their relevance for the safety of such repository can only be determined in site-specific and plant-specific safety analyses.

# INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung.....	3
ABSTRACT.....	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Anhangverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
1 Einleitung.....	14
1.1 Anlass und Vorgehensweise.....	14
1.2 Zielsetzung.....	16
1.2.1 Zielsetzung und Aufbau dieses Berichts.....	16
1.2.2 Konkretisierung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragestellungen.....	16
2 Kurzdarstellung der Einzelvorhaben.....	23
2.1 Naturbeobachtungen.....	23
2.1.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	23
2.1.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	24
2.1.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	28
2.2 Modellrechnungen.....	32
2.2.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	32
2.2.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	33
2.2.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	34
2.3 Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum.....	38
2.3.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	38
2.3.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	39
2.3.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	48
2.4 Sicherheitsindikatoren.....	51
2.4.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	51
2.4.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	52
2.4.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	55
2.5 Geochemische Prozesse.....	58
2.5.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	58
2.5.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	58
2.5.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	60
2.6 Chemotoxische Stoffe.....	63
2.6.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	63
2.6.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	63
2.6.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	65
2.7 Gasbildung.....	69
2.7.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	69
2.7.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	70
2.7.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	71
2.8 Kritikalität.....	78
2.8.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	78
2.8.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	78
2.8.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	80
2.9 Menschliche Einwirkungen.....	87
2.9.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	87
2.9.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	88
2.9.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	90
2.10 Mehrbarrierenkonzept.....	96
2.10.1 Grundlagen und Aufgabenstellung.....	96
2.10.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen.....	96
2.10.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens.....	99

2.11	Rückholbarkeit .....	104
2.11.1	Grundlagen und Aufgabenstellung.....	104
2.11.2	Methodischer Ansatz und Randbedingungen .....	104
2.11.3	Ergebnisse des Einzelvorhabens .....	105
2.12	Safeguards.....	112
3	Ergebnisse der Peer-Reviews und des Workshops.....	114
3.1	Ergebnisse der Arbeitsgruppe 1 Nachweisfragen .....	114
3.1.1	Naturbeobachtungen.....	114
3.1.2	Modellrechnungen.....	116
3.1.3	Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum .....	118
3.1.4	Sicherheitsindikatoren .....	120
3.2	Ergebnisse der Arbeitsgruppe 2 Einzelaspekte.....	122
3.2.1	Geochemische Prozesse .....	122
3.2.2	Chemotoxische Stoffe .....	123
3.2.3	Gasbildung .....	125
3.2.4	Kritikalität.....	127
3.3	Ergebnisse der Arbeitsgruppe 3 Konzeptionelle Grundsatzfragen .....	128
3.3.1	Menschliche Einwirkungen.....	128
3.3.2	Mehrbarrierenkonzept .....	130
3.3.3	Rückholbarkeit.....	133
3.3.4	Safeguards .....	134
4	Bewertung .....	136
4.1	Naturbeobachtungen .....	136
4.2	Modellrechnungen .....	137
4.3	Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum.....	138
4.4	Sicherheitsindikatoren .....	140
4.5	Geochemische Prozesse.....	141
4.6	Chemotoxische Stoffe.....	141
4.7	Gasbildung.....	143
4.8	Kritikalität .....	144
4.9	Menschliche Einwirkungen .....	145
4.10	Mehrbarrierenkonzept.....	146
4.11	Rückholbarkeit .....	147
4.12	Safeguards.....	148
4.13	Zusammenfassende Schlussfolgerungen .....	149
5	Literaturverzeichnis .....	152
6	Glossar .....	158
Anhang	.....	165

Gesamtseitenzahl: 189

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Prozesssystem für die Endlagerung von hochaktivem Abfall in Kristallingestein. (GRUNDFELT & SMELLIE 2004).....	26
Abb. 2: Prozesssystem für die Endlagerung von schwach- und mittelaktivem Abfall in kristallinem Gestein. (GRUNDFELT & SMELLIE 2004) .....	27
Abb. 3: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystem-Subtyp Steinsalz, flache Lagerung, überhöht (GRUNDFELT et al. 2005).....	42
Abb. 4: Schematischer Querschnitt durch den Geosystem-Subtyp Steinsalz, Salzdiapir (Mächtigkeit der Schichten, insbesondere im Salzgesteinskörper, nicht maßstabsgerecht; GRUNDFELT et al. 2005). .....	42
Abb. 5: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystemtyp kristalline Gesteine (überhöht, GRUNDFELT et al. 2005). .....	43
Abb. 6: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystemtyp Tonstein (überhöht; GRUNDFELT et al. 2005). .....	43
Abb. 7: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystem-Subtyp Tonstein + WG,- WG vollständig von Tonstein umschlossen (oben) und nicht vollständig von Tonstein umschlossen (unten) (überhöht; GRUNDFELT et al. 2005).....	44
Abb. 8: Wichtigste Massenanteile der Materialien (ohne Versatzmaterial).....	66
Abb. 9: Wichtigste Massenanteile zum Punkt „andere“ Materialien. ....	66
Abb. 10: Nachweiskonzepte und Nachweisziele für die Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung...	73
Abb. 11: Darstellung der Vorgehensweise bei der integrierten Bewertung der Geosystemtypen (aus GRUNDFELT et al. (2005)). .....	98
Abb. 12: Modellhafte Anordnung der Barrieren des Mehrbarrierensystems (GRUNDFELT et al. 2005).....	99
Abb. 13: Klassifizierung von Geosystemen - Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich (AKEND 2002). .....	100
Abb. 14: Schematisches Layout eines generischen Endlagers mit Rückholbarkeitsoption in Salz (aus ZIEGENHAGEN et al. 2005, VWA entspricht LILW, HAW entspricht HLW). .....	108

# TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Datenbanken und Sicherheitsanalysen, die zur Identifikation der relevanten Prozesse ausgewertet wurden (nach GRUNDFELT & SMELLIE 2004).	25
Tab. 2:	Ausgewählte prozessrelevante Analoga für die Stabilität von Metallbehältern (GRUNDFELT & SMELLIE 2004).	27
Tab. 3:	Auswertung der Analoga für Prozesse in verschiedenen Wirtsgesteinen (GRUNDFELT & SMELLIE 2004).	29
Tab. 4:	Übersicht der Szenarienzuordnungen für einen Betrachtungszeitraum von einer Mio. Jahre (aus BRUNS et al. 2004).	36
Tab. 5:	Zusammenfassende Darstellung der vier Kernbegriffe (ALBRECHT et al. 2004).	40
Tab. 6:	Systematisierung und Merkmale von Geosystemtypen in Deutschland (ALBRECHT et al. 2004).	41
Tab. 7:	Kriterien für die Merkmale Rückhaltevermögen und Beständigkeit des Isolationspotenzials (ALBRECHT et al. 2004).	46
Tab. 8:	Kriterien für die Stabilität des Rückhaltevermögens (ALBRECHT et al. 2004).	47
Tab. 9:	Ausgewertete Sicherheitsanalysen. (nach JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004)	53
Tab. 10:	Liste der identifizierten Indikatoren (JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004).	56
Tab. 11:	Gesamtbeurteilung der Anwendbarkeit von Sicherheitsindikatoren (JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004).	57
Tab. 12:	Grundzüge des geochemischen Milieus der unterschiedlichen Wirtsgesteine (nach ALTMAIER et al. 2004).	59
Tab. 13:	Betrachtete Datenbanken (nach ALTMAIER et al. 2004, dort Originalzitate).	61
Tab. 14:	Betrachtete Mineralphasen und gelöste Spezies (nach ALTMAIER et al. 2004).	62
Tab. 15:	Verursacherspezifische Massenbeiträge (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).	65
Tab. 16:	Aufteilung des stofflichen Inventars (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).	65
Tab. 17:	Häufigste Verbindungen/Elemente des stofflichen Inventars ohne Versatzmaterial (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).	67
Tab. 18:	Anzahl Überschreitungen der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser bei einem Verdünnungsfaktor von 5.000 (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).	67
Tab. 19:	Mengengerüst für ausgewählte Wasserinhaltsstoffe mit und ohne Versatzmaterialien (Lösungs- und Resthohlraumvolumen von 1 Million m <sup>3</sup> ) (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).	68
Tab. 20:	Sicherheitsrelevante Prozesse und Nachweisziele der verschiedenen Endlagerprojekte bzw. Sicherheitsanalysen in Hinblick auf die Gasbildung (nach SKRZYPPEK et al. 2005a).	70
Tab. 21:	Wirtsgesteinspezifische Einflussfaktoren für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung (nach SKRZYPPEK et al. 2005a).	77
Tab. 22:	Endlagerszenarien der Nachbetriebsphase als Basis für Kritikalitätsanalysen (GMAL et al. 2004).	82
Tab. 23:	Kritikalitätsrelevante Langzeitszenarien für ein Endlager in Ton- und Kristallinformationen (GMAL et al. 2004).	84
Tab. 24:	Vergleich der berechneten $k_{\text{eff}}$ -Werte von Endlagerbehältern in verschiedenen Wirtsgesteinen nach 1.000 Jahren Abklingzeit (GMAL et al. 2004).	85
Tab. 25:	Vergleichende Gegenüberstellung der Konsequenzen für die unterschiedlichen Szenarien und Geosysteme (nach SKRZYPPEK et al. 2005b).	92
Tab. 26:	Vergleichende Bewertung der Relevanz für die unterschiedlichen Szenarien und Geosysteme (nach SKRZYPPEK et al. 2005b).	93
Tab. 27:	Nationale Regelungen bezüglich einer Rückholbarkeit und deren Umsetzung (nach ZIEGENHAGEN et al. 2005).	106

# ANHANGVERZEICHNIS

Anhang 1: Programm des Workshops.....	165
Anhang 2: Teilnehmerliste des Workshops.....	168
Anhang 3: Folien der Ergebnispräsentation der einzelnen Arbeitsgruppen.....	169

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>a</b>	Jahre
<b>AA</b>	Anfangsanreicherung
<b>AECB</b>	Atomic Energy Control Board
<b>AkEnd</b>	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
<b>BE</b>	Brennelemente
<b>BfR</b>	Bundesinstitut für Risikobewertung
<b>BfS</b>	Bundesamt für Strahlenschutz
<b>BGR</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
<b>BMWA</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft (alte Bezeichnung für BMWA)
<b>BS</b>	Brennstab
<b>BSK</b>	Brennstabkockille
<b>BW</b>	Bayesscher Wahrscheinlichkeitsbegriff
<b>CASTOR MTR 2</b>	cask for storage and transport of radioactive material, Behälter für Lagerung und Transport Lager- und Transportbehälter für Brennelemente des Material- und Testreaktors
<b>CASTOR THTR</b>	cask for storage and transport of radioactive material, Behälter für Lagerung und Transport Lager- und Transportbehälter für Brennelemente des Thorium Hochtemperatur-Reaktors
<b>CORA</b>	Commissie Opberging Radioactief Afval
<b>CPE</b>	Colenco Power Engeneering
<b>DBE</b>	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
<b>DBE Tec</b>	DBE Technology GmbH
<b>DIV</b>	design information verification
<b>DVGW</b>	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches
<b>DWR</b>	Druckwasserreaktor
<b>EBS</b>	Engineered Barrier System
<b>EG</b>	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
<b>EKRA</b>	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
<b>ENRESA</b>	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos SA (Spanien)

<b>ERAM</b>	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
<b>ETH</b>	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>FAST</b>	Fourier Amplitude Sensitivity Test
<b>FEP</b>	features, events und processes, (ZEP Zustände, Ereignisse und Prozesse)
<b>FR</b>	Forschungsreaktor
<b>FRM-II</b>	Forschungsreaktor München II
<b>FZJ</b>	Forschungszentrum Jülich
<b>FZK INE</b>	Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung
<b>GK</b>	Grenzkonzentrationen
<b>GRS</b>	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
<b>GS</b>	Geosystem
<b>GWVO</b>	Grundwasserverordnung
<b>HAA</b>	Lager für hochaktive Abfälle
<b>HAW</b>	High Aktive Waste
<b>HES</b>	Institute for Human-Environment Systems (Institut für Mensch-Umwelt-Systeme)
<b>HEU</b>	Hoch angereichertes Uran
<b>HLW</b>	High Level Waste, Hochaktiver Abfall
<b>HTR</b>	Hoch Temperatur Reaktor
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency (IAEO, Internationale Atomenergie-Organisation)
<b>IGB</b>	Institut für Grundbau und Bodenmechanik (TU Braunschweig)
<b>ILW</b>	Intermediate Level Waste
<b>ITAS</b>	Institut für Technikfolgenabschätzung (im Forschungszentrum Karlsruhe)
<b>KASAM</b>	Statens Rad För Kärnavallsfrågor / Staatlicher Rat für Fragen des radioaktiven Abfalls / Swedish National Council for Nuclear Waste
<b>LAW</b>	Low Active Waste
<b>LAWA</b>	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
<b>LILW</b>	low and intermediate level waste / schwach- und mittelradioaktiver Abfall
<b>LWR</b>	Leichtwasserreaktor
<b>Mio.</b>	Million, Millionen
<b>NAGRA</b>	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

<b>NEA-FEP</b>	Nuclear Energy Agency – Features, Events, Processes
<b>NIREX</b>	Nuclear Industry Radioactive Waste Executive (Großbritannien)
<b>NSC</b>	Nuclear Safety Commission of Japan
<b>OECD/NEA</b>	Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung / Kernenergieagentur)
<b>ONDRAF/ NIRAS</b>	Organisme Nationale des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies / Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen (Belgien)
<b>PTKA-WTE</b>	Projekträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich für Wassertechnologie und Entsorgung
<b>PW</b>	Prüfwerte
<b>RI</b>	Radiologischer Indikator
<b>RSK</b>	Reaktor-Sicherheitskommission
<b>RWMAC</b>	Radioactive Waste Management Advisory Committee
<b>SAFIR</b>	Safety Assessment and Feasibility Interim Report (Belgien)
<b>SFL</b>	Swedish Deep Repository for Spent Fuel
<b>SFR</b>	Swedish Final Repository
<b>SIT</b>	Specific Ion Interaction Theory
<b>SKB</b>	Svensk Kärnbränslehantering AB (Schweden), (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company)
<b>SKI</b>	Statens Kärnkraftinspektion (Schweden), (Swedish Nuclear Power Inspectorate)
<b>SM</b>	Schwermetall
<b>SMA</b>	Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle
<b>SNR</b>	Schneller Natriumgekühlter Reaktor
<b>SPD</b>	Sozialdemokratische Partei Deutschlands
<b>SSK</b>	Strahlenschutzkommission
<b>StrISchV</b>	Strahlenschutzverordnung
<b>STUK</b>	Säteilyturvakeskus, Stralsäkerhetscentralen (Finnland) Amt für Strahlung und Nuklearsicherheit
<b>SWR</b>	Siedewasserreaktor
<b>TDB</b>	Thermodynamische Datenbank
<b>THTR</b>	Thorium-Hochtemperaturreaktor
<b>TU</b>	Technische Universität
<b>US DOE</b>	US Department of Energy

<b>VLJ</b>	Voimalaitosjäte (Finnland), (Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle in Olkiluoto)
<b>VWA</b>	vernachlässigbar wärmeerzeugende Abfälle
<b>WA</b>	wärmeerzeugende Abfälle
<b>WG</b>	Wirtsgestein
<b>WHG</b>	Wasserhaushaltsgesetz
<b>WHO</b>	World Health Organisation

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 ANLASS UND VORGEHENSWEISE

Am 14. Juni 2000 einigten sich Bundesregierung und Energieversorgungsunternehmen auf ein Moratorium der Erkundung des Salzstocks in Gorleben, da die weitere Erkundung nicht zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen beitragen kann. In der Anlage IV zu dieser Vereinbarung werden u.a. die folgenden fünf Fragestellungen aufgeführt:

„Die Beherrschbarkeit von Gasbildung in dichtem Salzgestein in Folge von Korrosion und Zersetzung der Abfälle stellt ein besonderes Problem dar.“

„International wird verstärkt die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle gefordert. Dagegen zielt die bisherige Konzeption auf den dichten Einschluss im Salz.“

„Die Geeignetheit von Salz als Wirtsgestein im Vergleich zu anderen, wie Ton oder Granit, ist vor dem Hintergrund der Erkenntnisse in anderen Ländern zu untersuchen.“

„Bei der direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente müssen voraussichtlich zusätzliche Anforderungen erfüllt werden, um langfristig die Kritikalität (kritische Ansammlung spaltbarer Stoffe) auszuschließen.“

„Die Strahlenschutzkommission wird voraussichtlich bald Empfehlungen veröffentlichen, die erstmalig ein radiologisches Schutzziel für unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in ein Endlager beinhalten.“

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) nach Diskussionen mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) sowie nach Beratungsaufträgen an die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) 12 Fragestellungen erarbeitet, die grundsätzlich für alle in Deutschland möglichen Wirtsgesteine gelten und geklärt werden müssen. Die Zielsetzung wurde im November 2001 wie folgt definiert (BMU 2001):

*„Zunächst sind konzeptionelle Grundsatzfragen zu klären und die Sicherheitskriterien sowie das Auswahlverfahren mit den zugehörigen Kriterien zu entwickeln und festzulegen.... Eine gorlebenspezifische Bearbeitung der Fragen ist erst anschließend sinnvoll.“*

Das BfS wurde durch das BMU beauftragt, die Fragestellungen so zu bearbeiten, dass deren Ergebnisse zur Basis für Entscheidungen über die Zukunft des Projekts Gorleben beitragen können. Dabei sind Wechselwirkungen zwischen diesen Arbeiten und u. a. denen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) sowie zur Fortschreibung der Sicherheitskriterien von 1983 zu berücksichtigen.

Bis auf ein Thema sind die 12 Fragestellungen nach Ausschreibung und Auftragsvergabe durch das BfS in den Jahren 2002 bis 2005 bearbeitet worden. Für Fragen zur internationalen Kernmaterialüberwachung (Safeguards) von Endlagern ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) zuständig. In Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ) und dem BfS hat das BMWA im Jahr 2002 einen Bericht erstellt.

Die 12 Vorhaben lauten im Einzelnen:

1. Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Naturbeobachtungen**)
2. Behandlung von Unsicherheiten, systematische Entwicklung von Szenarien und Rechenverfahren bei der Anwendung probabilistischer Methoden im Langzeitsicherheitsnachweis (**Modellrechnungen**)

3. Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum**)
4. Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle (**Sicherheitsindikatoren**)
5. Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle (**Geochemische Prozesse**)
6. Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes (**Chemotoxische Stoffe**)
7. Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**Gasbildung**)
8. Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgelebte Brennelemente und radioaktive Abfälle (**Kritikalität**)
9. Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**Menschliche Einwirkungen**)
10. Bedeutung des Mehrbarrierenkonzeptes für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen (**Mehrbarrierenkonzept**)
11. Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager (**Rückholbarkeit**)
12. Internationale Kernmaterialüberwachung (**Safeguards**) bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in relevanten geologischen Formationen in Deutschland

Das BfS hat die Aufgabe, aufbauend auf den Ergebnissen der 12 Vorhaben einen Vergleich der Wirtsgesteine vorzunehmen. Zu beantworten sind die Fragen:

Sind die sicherheitstechnischen Einzelfragen für unterschiedliche Wirtsgesteine verschieden zu beantworten?

und

Resultieren hieraus Vorgaben an ein Endlagerkonzept?

Um sicherzustellen, dass die erzielten Ergebnisse umfassend den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dokumentieren, wurden die Einzelberichte einem in der Wissenschaft üblichen Peer-Review-Verfahren durch jeweils zwei externe Sachverständige unterzogen. Am 28./29. September 2005 wurde in Hannover ein Workshop (siehe Anhang 1) über die Sicherheitstechnischen Einzelfragen der Endlagerung durchgeführt. Hierin wurden die Ergebnisse der Berichte zu den 12 Einzelfragen durch die Auftragnehmer und die Reviews vorgestellt und mit einem 79 Wissenschaftler umfassenden, pluralistisch zusammengesetzten Expertenkreis (siehe Anhang 2) intensiv diskutiert. In drei Arbeitsgruppen zu den Themenblöcken:

- Nachweisführung
- Einzelaspekte
- Grundsatzfragen

wurden die Reviews vorgetragen und unter Leitung externer Experten die zu diskutierenden Fragestellungen formuliert. Das BfS hat bei dieser Diskussion lediglich eine vorbereitende und begleitende Rolle eingenommen. Mit dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der 12 Einzelvorhaben, der Peer-Reviews und der Diskussion auf dem Workshop dargestellt. Auf dieser Grundlage wird eine Bewertung des Sachstandes wirtsgesteinsübergreifend vorgenommen und verbliebene offene Fragen identifiziert. Das BfS liefert mit diesem Bericht eine umfassende fachliche und wissenschaftlich begründete Basis für weitergehende Entscheidungen zur Endlagerung.

## 1.2 ZIELSETZUNG

### 1.2.1 Zielsetzung und Aufbau dieses Berichts

Das BfS ist sich bewusst, dass die Bearbeitung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen im Blickpunkt der Öffentlichkeit und verschiedener Interessengruppen steht. Die vom BfS gewählte Vorgehensweise bei der Erstellung des vorliegenden Berichts soll deshalb die Rolle des BfS als die wissenschaftliche Bundesoberbehörde und fachliche Beratungsinstitution des BMU herausstellen.

Zu jeder der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen hat das BfS eine Reihe von Fragen entwickelt, die aufzeigen sollen, welches Ziel mit der Bearbeitung jeder dieser Fragestellungen erreicht werden sollte. Diese Fragen werden im Kap. 1.2.2 aufgeführt und im Kap. 4 dieses Berichts wieder aufgegriffen, wo sie das BfS darin unterstützen, eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse aller Einzelvorhaben vorzunehmen.

Der Bericht konzentriert sich in Kap. 0 auf eine fachliche Sachverhaltsdarstellung auf der Basis der Ergebnisse aller Einzelvorhaben.

Kap. 3 umfasst die Ergebnisse des Workshops. Bezogen auf die 12 Fragestellungen werden die wesentlichen Aussagen der Reviews und in den Arbeitsgruppen erarbeitete und diskutierte Fazit (siehe Anhang 3) dargestellt. Sofern bei einzelnen Punkten kein Konsens erzielt werden konnte, wird gesondert darauf hingewiesen.

Die Bewertung des BfS erfolgt in Kap. 4 auf der Grundlage der Ergebnisse der 12 Einzelvorhaben, der Peer-Reviews und des Workshops.

### 1.2.2 Konkretisierung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragestellungen

Für die Bearbeitung hat das BfS die konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen konkretisiert.

Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Naturbeobachtungen**):

Die Entwicklung eines Endlagersystems wird von einer Vielzahl von Prozessen bestimmt, die eine mögliche Schadstoffausbreitung im Nah- und Fernfeld sowie in der Biosphäre beeinflussen. Durch Einbeziehung natürlicher und anthropogener Analoga können Schlussfolgerungen auf analog ablaufende Prozesse im Endlagersystem möglich sein, die insbesondere so lange Zeiträume umspannen, welche nicht durch Experimente abgedeckt werden können. Mit der Frage

*Welche Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher und/oder anthropogener Analoga für die Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung eines Endlagers sind gegeben?*

sollen Zulässigkeit und Voraussetzungen für eine Verwendung von Beobachtungen analog ablaufender Prozesse in der Sicherheitsbewertung eines Endlagers aufgezeigt werden.

Behandlung von Unsicherheiten, systematische Entwicklung von Szenarien und Rechenverfahren bei der Anwendung probabilistischer Methoden im Langzeitsicherheitsnachweis (**Modellrechnungen**):

Der Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers für radioaktive Abfälle wird standort- und konzeptspezifisch u. a. mit Hilfe von Modellrechnungen geführt. Er erfolgt auf der Basis der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und der Langzeitsicherheitsanalysen. Langzeitsicherheitsanalysen für ein Endlager beinhalten Szenarien- und Konsequenzenanalysen. Nicht auszuräumende Unsicherheiten in den Daten, den Modellen sowie den Szenarien müssen in die Bewertung einbezogen werden. Die Szenarien werden mit Hilfe von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (FEP) definiert. Zunächst muss daher die Frage

*Welche Zustände, Ereignisse und Prozesse zur Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems kommen für deutsche Verhältnisse in Frage?*

geklärt werden. Anschließend können Szenarien definiert und die entsprechenden Berechnungen durchgeführt werden.

Analysen auf statistisch-stochastischer Grundlage bieten vielfach den Vorteil eines systematisierten, mathematisch begründeten Umgangs mit den auch durch eine weitere Erkundung nicht ausräumbaren, geologischen Daten- und Modellunsicherheiten. Sie sind dann besonders hilfreich, wenn zahlreiche Schwankungsgrößen gleichzeitig zu betrachten sind, deren gemeinsamer Einfluss auf Zielvariablen nicht ohne weiteres überblickt werden kann. Schon aufgrund der sich ständig verbessernden Rechnerleistung wird die probabilistische Sicherheitsanalyse zukünftig breiteren Raum einnehmen als heute. Zur Festlegung des Stellenwerts probabilistischer Sicherheitsnachweise soll die Frage

*Wann (zeitlich und inhaltlich) sollen probabilistische Sicherheitsnachweise geführt werden?*

geklärt werden. Mit den Fragen

*Wie soll eine probabilistische Sicherheitsanalyse durchgeführt werden?*

und

*Welche Vorgaben sind für probabilistische Sicherheitsnachweise zu geben?*

sollen Festlegungen hinsichtlich Methode und Randbedingungen geklärt werden.

Vor dem Hintergrund der diskutierten Prognose- und Nachweiszeiträume von einer Million Jahren (AKEND 2002, BALTES et al. 2002) ist die Angabe begründeter Eintrittswahrscheinlichkeiten für geophysikalisch-geologisch-geotechnische Szenarien problematisch. Im Falle unsicherer geometrischer Formationsparameter und geophysikalischer Messwerte/Gesteinsparameter soll durch die Frage

*Welche geostatistische Methode kann im Falle unsicherer geometrischer Formationsparameter und geophysikalischer Messwerte/Gesteinsparameter zur Vorhersage von Eigenschaften der geologischen Barrieren herangezogen werden?*

geklärt werden, welche statistischen Prognoseverfahren zur Beschreibung unaufgefahrener Bereiche des jeweiligen Wirtsgesteins besonders geeignet sind, mit dem Ziel, die spätere Erkundung eines Endlagers in Teilen zu optimieren.

Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum**):

Aufgrund ihres hohen und lang anhaltenden Gefährdungspotenzials müssen insbesondere die hochradioaktiven Abfälle dauerhaft von der Biosphäre ferngehalten werden. Mit der Endlagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen wird das wegen der im Allgemeinen dort vorherrschenden extrem langsamen Stoffkreisläufe anerkannt hohe Isolationsvermögen der Geosphäre genutzt. Mit der Beantwortung der Frage:

*Welche Isolationspotenziale haben die in Deutschland vorkommenden geologischen Strukturen und potenziellen Wirtsgesteine für die Endlagerung?*

soll aufgezeigt werden, wie sich die in Deutschland für die Endlagerung in Frage kommenden geologischen Strukturen und potenziellen Wirtsgesteine hinsichtlich ihres Isolationspotenzials unterscheiden. International üblich ist es, die Sicherheit eines Endlagers basierend auf dem Isolationspotenzial der Geosphäre und zusätzlich herangezogener technischer Barrieren mit Hilfe einer Langzeitsicherheitsanalyse aufzuzeigen. Da aber das Isolationspotenzial der Geosphäre zwangsläufig zeitlichen Veränderungen unterworfen ist, müssen zunächst die Fragen nach der Definition der Begriffe Isolations- und Nachweiszeitraum

*Wie sind Isolations- und Nachweiszeitraum definiert?*

und der Festlegung von Zahlenwerten für diese Zeiträume

*Welche Zahlenwerte sollen für beide Zeiträume festgelegt werden?*

geklärt werden, bevor die Frage

*Für welche Zeiträume kann ein Langzeitsicherheitsnachweis sinnvoll geführt werden?*

beantwortet werden kann.

Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern radioaktiver Abfälle (**Sicherheitsindikatoren**):

Die Anwendbarkeit der Modelle, die in Langzeitsicherheitsanalysen zur rechnerischen Simulation einer potenziellen Schadstoffausbreitung aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre und der resultierenden Strahlenexposition der Bevölkerung verwendet werden, ist mit Unsicherheiten behaftet. Die sind um so größer, je länger der Vorhersagezeitraum ist. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, die mit Langzeitsicherheitsanalysen berechneten Dosen bzw. Risiken nicht als Prognosewerte anzusehen, sondern als Indikatoren. Die International Atomic Energy Agency (IAEA) hat u. a. zur Erhöhung des Vertrauens in die Sicherheitsbewertung empfohlen, die gängigen Indikatoren Risiko bzw. Dosis durch weitere Sicherheitsindikatoren zu ergänzen, die von weniger Annahmen abhängen (IAEA 2001a). Damit stellt sich die Frage:

*Welche Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle können herangezogen werden?*

Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle (**geochemische Prozesse**):

Die Notwendigkeit, geochemische Prozesse zu beschreiben und in Langzeitsicherheitsanalysen modellhaft zu berücksichtigen, gewinnt immer mehr an Bedeutung. Im Rahmen von Untersuchungen zu potenziellen

Endlagerstandorten ist die Kenntnis und das Verständnis der relevanten geochemischen Prozesse eine Voraussetzung für die Bewertung der Langzeitsicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle und somit zur Beurteilung der Eignung der jeweiligen Formation bzw. des jeweiligen Standortes. Eine einheitliche thermodynamische Standarddatenbasis ist die Grundlage, um geochemische Prozesse mit leistungsfähigen Modellierungscodes bei der Beurteilung der Standorteignung mit der erforderlichen Genauigkeit berücksichtigen zu können. Dabei stellt sich zunächst die Frage

*Sind die verfügbaren Daten für die geochemische Nah- und Fernfeldmodellierung in den verschiedenen geochemischen Milieus übertragbar auf in Deutschland relevante Verhältnisse; sind sie vollständig und ausreichend genau?*

Lässt sich diese Frage nicht in allen drei Aspekten positiv beantworten, sollen anschließend durch die Beantwortung der Frage

*Welche Arbeiten müssen zur Vervollständigung der Datenbasis für die geochemische Modellierung und zur Festlegung von Modellierungscodes durchgeführt werden?*

die noch notwendigen Arbeiten zur Vervollständigung der Datenbasis für die geochemische Modellierung und zur Festlegung von Modellierungscodes definiert werden.

Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes (**chemotoxische Stoffe**):

Nach § 34 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Daher müssen im Hinblick auf die Sicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen etwaige Freisetzungen über den Wasserpfad untersucht und bewertet werden. Diese Freisetzungen können aus den radiologischen Langzeitauswirkungen sowie möglichen Belastungen des Grundwassers durch organische und anorganische Schadstoffe, also den nicht radioaktiven Bestandteilen der zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle, resultieren. Für eine Analyse und Bewertung sind hinreichend detaillierte quantitative Angaben über Art und Menge der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen nichtradioaktiven organischen und anorganischen Stoffe erforderlich. Zur Ermittlung dieses Inventars muss die Frage

*Welches chemotoxische Inventar organischer und anorganischer Stoffe befindet sich in den Abfällen?*

beantwortet werden. Die aus dem Endlager möglicherweise austretenden Stoffe unterliegen auf ihrem Weg bis zum Eintritt in die Biosphäre einer Verdünnung. Die Beantwortung der Frage

*Welches Verdünnungspotenzial ist erforderlich um die Schutzziele des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und anderer einschlägiger Vorschriften einzuhalten?*

liefert die Grundlage für einen Vergleich dieses notwendigen mit dem an einem Endlagerstandort vorhandenen Verdünnungspotenzial. Damit kann die Frage einer Gefährdung des Grundwassers

*Ist eine Gefährdung des Grundwassers durch das chemotoxische Inventar eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu besorgen?*

beantwortet werden.

Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**Gasbildung**):

Grundsätzlich sicherheitsrelevante Wirkungen der Gasbildung sind zum einen die Bildung explosiver Wasserstoff-Luft-Gemische und zum anderen stetig ansteigende Gasdrücke in dicht abgeschlossenen Einlagerungsstrukturen. In den letzten Jahren wurden im nationalen und internationalen Rahmen eine Vielzahl von Forschungsarbeiten zu den Bildungsmechanismen von Gasen unter Endlagerbedingungen und den daraus möglicherweise resultierenden (Wechsel-)Wirkungen durchgeführt, die der Klärung der Frage

*Wie sehen die Gasbildungsmechanismen in einem Endlager aus?*

dienen. Im Mittelpunkt der bisherigen Arbeiten standen meistens Untersuchungen von Einzelphänomenen unter ausgewählten Randbedingungen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen mit Beantwortung der Frage

*Wie muss der Nachweis zur Beherrschung der Gasbildung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geführt werden – welche Einzelnachweise sind zu erbringen und wie ist hierzu der Stand von Wissenschaft und Technik?*

mögliche Nachweiskonzepte zur Beherrschbarkeit der Gasbildung aufgezeigt werden. Der wesentliche Aspekt bei einem Nachweiskonzept für ein dichtes Wirtsgestein soll durch die Frage

*Darf ein Aufreißen des Gebirges durch die Gasbildung zugelassen werden?*

aufgezeigt werden. Den Konsequenzen bei der Standortauswahl, der Entwicklung des Einlagerungskonzepts sowie der Abfallbehandlung und -konditionierung wird mit der Frage

*Welche Anforderungen ergeben sich aus den Nachweiskonzepten an das Endlagerkonzept (Standortauswahl, Einlagerungskonzept, Abfallbehandlung und -konditionierung)?*

nachgegangen.

#### Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle (**Kritikalität**):

Mit der Konzentration von abgebrannten Brennelementen und anderem spaltstoffhaltigen Abfall in einem Endlager ergibt sich zwangsläufig die Frage:

*Unter welchen Randbedingungen sind kritische Spaltstoffansammlungen in einem Endlager ausgeschlossen?*

Da sich die Abfallgebinde bei der Einlagerung a priori in einem unterkritischen Zustand befinden, muss mit Beantwortung der Frage

*Muss eine Mobilisierung und der Transport von Spaltstoffen sowie eine anschließende Anreicherung zu einer kritischen Masse in der Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden?*

geklärt werden, unter welchen Bedingungen eine Anreicherung kritischer Massen erfolgen kann. Dem Aspekt der Auswahl geeigneter Bewertungsgrößen wird mit der Frage

*Welche Kriterien zur sicherheitstechnischen Bewertung und zum Vergleich verschiedener Standorte und Wirtsgesteine unter dem Gesichtspunkt der Langzeit-Kritikalitätssicherheit können herangezogen werden?*

nachgegangen. Nur für den Fall, dass eine kritische Anordnung spaltstoffhaltigen Materials nicht ausgeschlossen werden kann, muss der Frage

*Wie können die Folgen einer Kritikalität im Endlager, insbesondere im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die Biosphäre, abgeschätzt werden?*

nachgegangen werden.

Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**menschliche Einwirkungen**):

Mit der Entscheidung, radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen dauerhaft zu lagern und damit dort zu konzentrieren und zu isolieren, ist auch die Entscheidung gefallen, dass dieses Vorgehen besser ist, als sie den für längere Zeiträume nicht vorhersehbaren gesellschaftlichen Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Lagerung/Entsorgung an der Erdoberfläche auszusetzen. Dennoch können menschliche Aktivitäten auch im tiefen Untergrund zu einer Schwächung bzw. Zerstörung der Barrieren eines Endlagers führen. Es muss Teil einer verantwortungsbewussten Endlagerplanung sein, die Frage

*Welche Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. der radiologischen Konsequenzen eines menschlichen Eindringens in ein Endlager in tiefen geologischen Formationen können ergriffen werden?*

zu klären. Um diese Frage zu beantworten, müssen Vorstellungen über mögliche zukünftige menschliche Aktivitäten entwickelt und im Hinblick auf die Ableitung sinnvoller Maßnahmen die folgende Frage beantwortet werden:

*Welche Szenarien, die zu unbeabsichtigten Einwirkungen auf das Endlager durch den Menschen führen, sind bei der Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. der radiologischen Konsequenzen zu berücksichtigen?*

Für die Beantwortung ist entscheidend, wie die aus den Szenarien resultierenden Risiken zu bewerten sind. Damit muss die Frage

*Welche Eintrittswahrscheinlichkeiten haben die zugrunde gelegten Szenarien und welche Auswirkungen resultieren aus ihnen?*

geklärt werden.

Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele (**Mehrbarrierenkonzept**):

Das Mehrbarrierenkonzept ist ein international anerkanntes Konzept bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, das die Isolation der Abfälle und die Einhaltung der Schutzziele über sehr lange Zeiträume gewährleisten soll. Es unterscheidet zwischen technischen Barrieren wie Abfallmatrix, Abfallbehälter, Versatz, Abschlussbauwerken von Kammern, Strecken, Bohrlöchern und Schächten sowie natürlichen (geologischen) Barrieren wie Wirtsgestein und seine Umgebung (Deck- und Nebengebirge, Liegendes des Wirtsgesteins). Mit der Beantwortung der zentralen Frage

*Welche Anforderungen hinsichtlich Unabhängigkeit der verschiedenen Barrieren, Redundanz und Diversität sind an ein Mehrbarrierenkonzept für ein Endlager zu stellen?*

sollen die Möglichkeiten und Grenzen eines solchen Mehrbarrierenkonzepts aufgezeigt werden. Zur Veranschaulichung des Zusammenspiels der einzelnen Barrieren müssen zuvor die beiden Fragen

*Welche Wirkung haben die einzelnen Barrieren des Mehrbarrierensystems eines Endlagers für den Einschluss der radioaktiven Stoffe?*

und

*Für welche Zeiträume wirken die verschiedenen Barrieren?*

geklärt sein.

Untersuchung der Möglichkeit und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager (**Rückholbarkeit**):

Die Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus Endlagern nimmt gegenwärtig in den internationalen Debatten über die Entsorgung radioaktiver Abfälle einen breiten Raum ein. Auch im Forschungsbereich der Europäischen Union (EU) und in der Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) wird diese Thematik aktuell bearbeitet. Die Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle wird aus Gründen der Förderung der gesellschaftlichen Akzeptanz, der Schaffung der Möglichkeit zu eigenem verantwortlichem Handeln für zukünftige Generationen, der Nachbesserung im Fall der Revision der Sicherheitsbewertungen oder zur Nutzung der in den Brennelementen enthaltenen Ressourcen diskutiert. Demgegenüber ist in Deutschland bislang eine Rückholbarkeit der Abfälle nicht geplant. Deshalb sollen zunächst mit Beantwortung der Frage

*Welche technischen Möglichkeiten gibt es, die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle aus einem Endlager zu gewährleisten?*

die technischen Möglichkeiten aufgezeigt und anschließend die Frage nach den damit verbundenen Konsequenzen

*Welche Konsequenzen – insbesondere sicherheitstechnische Vor- und Nachteile – hat die Gewährleistung der Rückholbarkeit?*

beantwortet werden. Erst dann kann mit Beantwortung der Frage

*Welche planerischen Vorgaben sollen für die Rückholbarkeit gesetzt werden?*

aufgezeigt werden, ob es sinnvoll ist, für die Planung eines Endlagers hinsichtlich der Rückholbarkeit der Abfälle Rahmenbedingungen festzulegen.

Internationale Kernmaterialüberwachung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in relevanten geologischen Formationen in Deutschland (**Safeguards**):

Aufgrund internationaler Vereinbarungen unterliegt das zur Waffenherstellung verwendbare Kernmaterial einer Überwachung durch die IAEA. Für eine Endlagerung im Steinsalz hat die Bundesrepublik ein Referenzkonzept erarbeitet. Bei einer Endlagerung in einem anderen Wirtsgestein muss die Frage

*Ist das für das Wirtsgestein Steinsalz entwickelte Safeguards-Referenzkonzept auch uneingeschränkt für ein Endlager in anderen potenziellen Wirtsgesteinen einsetzbar?*

geprüft werden. Bisher ist in Deutschland eine Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Endlager nicht vorgesehen gewesen. Bei einer möglichen Änderung dieser Strategie stellt sich die folgende Frage:

*Wie sieht das Safeguards-Referenzkonzept für eine rückholbare Einlagerung aus?*

## 2 KURZDARSTELLUNG DER EINZELVORHABEN

### 2.1 NATURBEOBACHTUNGEN

**Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle**

*Auftragnehmer:* Kemakta Konsult AB  
Conterra AB

*Zitat:* GRUNDFELT & SMELLIE 2004

#### 2.1.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Die Endlagerung in geeigneten tiefen geologischen Formationen ist international eine anerkannte Option zur Verwahrung langlebiger radioaktiver Abfallstoffe. Um diese Option zu rechtfertigen, ist es u. a. erforderlich, die Langzeitsicherheit eines projektierten Endlagersystems nachzuweisen. Mit den großen Nachweiszeiträumen und der erheblichen räumlichen Ausdehnung der zu betrachtenden Systeme werden an Langzeitsicherheitsanalysen hohe Anforderungen gestellt. In einer Langzeitsicherheitsanalyse müssen Prozesse (z. B. Entwicklung von Auflockerungszonen, Umbildung von Mineralphasen, die Korrosion und/oder mikrobielle Zersetzung von Abfallprodukten in Anwesenheit von Wasser, die Radionuklidrückhaltung durch Sorption, die Speziation von Radionukliden in Lösungen, Ausfällungen beim Erreichen von Löslichkeitsgrenzen, Gasbildung usw.) modelliert werden, um die Schadstoffausbreitung im Nah- und Fernfeld sowie in der Biosphäre für den Fall der ungestörten Entwicklung des Endlagersystems und bei Ablauf von Störfallszenarien durch Rechnungen zu quantifizieren. Die Komplexität dieser einzelnen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen machen es erforderlich, vereinfachende Modellvorstellungen mit konservativen Annahmen zu entwickeln. Diese vereinfachenden Modellvorstellungen müssen an der Fähigkeit gemessen werden, das zukünftige Verhalten des Endlagersystems darzustellen. Für die mathematische Beschreibung der Prozesse im Nah- und Fernfeld werden verschiedenartige Modelle eingesetzt, für die jeweils der Nachweis zu führen ist, dass die Prozesse in zulässigen Grenzen korrekt beschrieben werden. Diese als Validierung bezeichnete Überprüfung der Modelle ist insbesondere bei den die Langzeitsicherheit betreffenden Modellvorstellungen im strengen Sinne nicht möglich, da sich komplexe natürliche Systeme in den zu betrachtenden Zeiträumen nur eingeschränkt in Labor- und Feldexperimenten abbilden lassen. Für die zu betrachtenden Zeiträume müssen daher die Ergebnisse dieser Experimente zeitlich extrapoliert werden. Dabei gehen Unsicherheiten bei der Festlegung von Variablen der Experimente in die Extrapolation ein.

Die Untersuchung von geologischen und geochemischen Gegebenheiten in der Natur (natürliche Analoga), die vergleichbar sind mit den projektierten Endlagersystemen, liefert Informationen über die bisherige Entwicklung der geologischen Situation am Ort des Analogons und trägt damit zum Verständnis der in der Natur ablaufenden Prozesse bei. Durch Einbeziehung natürlicher Analoga in Langzeitsicherheitsanalysen sollten Schlussfolgerungen auf vergleichbar ablaufende Prozesse im Endlagersystem möglich sein, die insbesondere so lange Zeiträume umspannen, welche nicht durch Experimente abgedeckt werden können. Somit wird die Möglichkeit eröffnet, natürliche Experimente auszuwerten, die weit über den möglichen zeitlichen und räumlichen Rahmen von Feld- und Laborexperimenten hinausgehen.

Bei der Bearbeitung dieser sicherheitstechnischen Einzelfrage sollte der Frage nachgegangen werden, inwieweit natürliche Analoga zum Nachweis der Langzeitsicherheit herangezogen werden können. Zu klären war, ob und in welchem Umfang natürliche Analoga für die Vertrauensbildung in Modellvorstellungen geeignet sind, die in Langzeitsicherheitsanalysen für ein Ein-Endlager-Konzept in den Gesteinstypen Salz, Ton/Tonstein, sonstige Gesteine unter Tonbedeckung sowie kristalline Gesteine eingehen können. Geeignete natürliche Analoga waren darzustellen und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die Prozesse im Nah-

und Fernfeld des Endlager zu diskutieren und zu bewerten. Ziel der Untersuchungen war nicht die Zusammenstellung einer Sammlung natürlicher Analoga, sondern eine auf die genannten Gesteinstypen ausgerichtete, prozessorientierte Analyse und Bewertung von natürlichen Analoga. Diese Analyse soll geeignet sein, im Rahmen einer Sicherheitsbewertung eines Endlagerstandortes Verwendung zu finden. Neben den natürlichen waren auch anthropogene (menschlich erzeugte) Analoga zu berücksichtigen, die generell kürzere Zeiträume in der Größenordnung von Hunderten bis Tausenden von Jahren abdecken und im Wesentlichen Aussagen über die Stabilität von bei der Endlagerung eingesetzter Materialien, wie z. B. Zement, Kupfer oder Eisen liefern.

Die Auswertung muss die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher und anthropogener Analoga für die Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung eines Endlagers aufzeigen. Darüber hinaus sollen die Untersuchungen den Wert von natürlichen Analoga als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle herausstellen.

## 2.1.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

### Methodischer Ansatz

Mit der Zielsetzung einer prozessorientierten Bewertung von natürlichen und anthropogenen Analoga war in einem ersten Schritt der Bearbeitung eine Erfassung und Systematisierung der relevanten Prozesse in einem Endlager für sämtliche Arten von Abfällen erforderlich. Als relevant wurden Prozesse betrachtet, wenn sie für die Endlagerung sämtlicher Arten radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen der vier zu betrachtenden Gesteinstypen in Frage kommen und wenn Analoga für diese Prozesse denkbar sind. Zur Inventarisierung und Beschreibung der relevanten Prozesse wurde ein Screening verschiedener Unterlagen durchgeführt. Eine wesentliche Datenquelle, die zu diesem Zweck analysiert wurde, ist die NEA FEP-Datenbank (NEA 1999). Es handelt sich dabei um eine Zusammenstellung von 1.418 FEPs, die aus acht verschiedenen Sicherheits- und Szenarienanalysen extrahiert wurden. Eingang in die NEA FEP-Datenbank fanden Daten der folgenden Projekte:

SKB/SKI Datenbasis, bezogen auf das schwedische Endlagerkonzept in kristallinem Gestein (ANDERSSON et al. 1989)

Zusammenstellung von FEPs mit Relevanz für Endlagerung in tiefen geologischen Formationen (NEA 1992)

FEPs mit Relevanz für die Endlagerung von schwach- und mittelaktiven Abfällen in geklüftetem Festgestein (MILLER & CHAPMAN 1993)

FEPs mit Bezug auf das kanadische Endlagerkonzept in kristallinem Gestein (GOODWIN 1994)

NAGRA-Datenbank mit FEPs, bezogen auf die Kristallin-I-Studie im kristallinen Gestein der Nordschweiz (NAGRA 1994a)

SKI-Datenbank bezogen auf die SITE 94-Studie im kristallinen Gestein (SKI 1996)

Datenbank des US DOE bezogen auf Transuran-Abfälle in Lagersalz (US DOE 1996)

Datenbank für die oberflächennahe Lagerung radioaktiver Abfallstoffe (STEPHENS et al. 1997)

Darüber hinaus wurden zahlreiche internationale Sicherheitsanalysen ausgewertet (Tab. 1), um die Vollständigkeit der zu berücksichtigenden Prozesse sicherzustellen.

Tab. 1: Datenbanken und Sicherheitsanalysen, die zur Identifikation der relevanten Prozesse ausgewertet wurden (nach GRUNDFELT & SMELLIE 2004).

<b>Informationsquelle</b>	<b>Wirtsgestein</b>	<b>Verantwortliche Organisation</b>
NEA FEP-Datenbank (NEA 1992)	Verschiedene	OECD/NEA
SR-97 (PERS et al. 1999)	Kristallingestein	SKB
SITE-94 (SKI 1996)	Kristallingestein	SKI
Safety assessment of long-lived intermediate-level waste (SKB 1999b)	Kristallingestein	SKB
FSAR for SFR (schwach- und mittelaktiver Abfall) (SKB 2001)	Kristallingestein	SKB
TILA-99 (VIENO & NORDMAN 1999)	Kristallingestein	Posiva Oy
FSAR for VLJ (schwach- und mittelaktiver Abfall) (VIENO & NORDMAN 1998)	Kristallingestein	Posiva Oy
Nirex-97 (NORRIS et al. 1997)	Tuffgestein	UK Nirex Ltd
Sicherheitsanalyse Schacht Konrad (BfS 1990)	Sedimentgestein	BfS
Szenarienanalyse Morsleben (KÄBEL, GERADI & KELLER 1999)	Salzstruktur	BfS
Szenarienanalyse Gorleben (KELLER 2001a,b)	Salzstruktur	BfS
H12 (JNC 1999)	Sedimentgestein und Deckgebirge	PNC
Kristallin-I (NAGRA 1994b)	Kristallingestein	Nagra
Wellenberg (NAGRA 1994a)	Mergel	Nagra
AECL/EIS & 'Alternative Case Study' (BECKER et al. 2002; STEPHENS et al. 1997)	Kristallingestein	AECL
WIPP (US DOE 1996)	Salz, flache Lagerung	US DOE
Yucca Mountain Project (FREEZE, BRODSKY & SWIFT 2001)	wasserungesättigter verfestigter Tuff	US DOE
SAFIR-1 (ONDRAF/NIRAS 2001)	Ton	ONDRAF/NIRAS

Die extrahierten Prozesse bilden einen umfassenden Datensatz, der potenziell durch Informationen aus Studien über natürliche und anthropogene Analoga untermauert werden kann. Studien an kristallinem Gestein sind in der o. g. Zusammenstellung und in der NEA FEP-Datenbank überrepräsentiert, gleichwohl sind zahlreiche Prozesse in kristallinem Gestein auch für andere Gesteinstypen anwendbar.

Die identifizierten Prozesse wurden in Prozesssysteme gefasst, in denen die Prozesse für das Nah- und Fernfeld für die jeweiligen Wirtsgesteinstypen verkettet sind. Nachfolgend werden die Prozesssysteme an den Beispielen für hochradioaktiver Abfall (HLW) und schwach- und mittelradioaktive Abfälle (LILW) in kristallinem Gestein aufgezeigt.

Abb. 1 zeigt das normale Prozesssystem für HLW im Kristallin als Wirtsgestein. Der Abfallbehälter ist in einer Pufferschicht aus Ton eingebettet, entweder in vertikalen Einlagerungsbohrungen oder horizontal in Einlagerungskammern. Für die Freisetzung und das Eindringen von radioaktiven Substanzen in die Biosphäre müssten vor dem Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld zuerst die Behälterwände überwunden werden, was z. B. durch Korrosion geschehen kann. Der Abfall müsste gelöst und die mobilisierten Radionuklide transportiert werden. Die Behälter sind von einer bentonitischen Tonschicht umgeben, die die Behälter vor mechanischen Beanspruchungen durch Gesteinsbewegungen und vor chemischen Angriffen des Grundwassers schützt. Die Bentonitbarriere dient außerdem der Retardation von Radionukliden, die aus defekten Behältern frei gesetzt werden könnten.

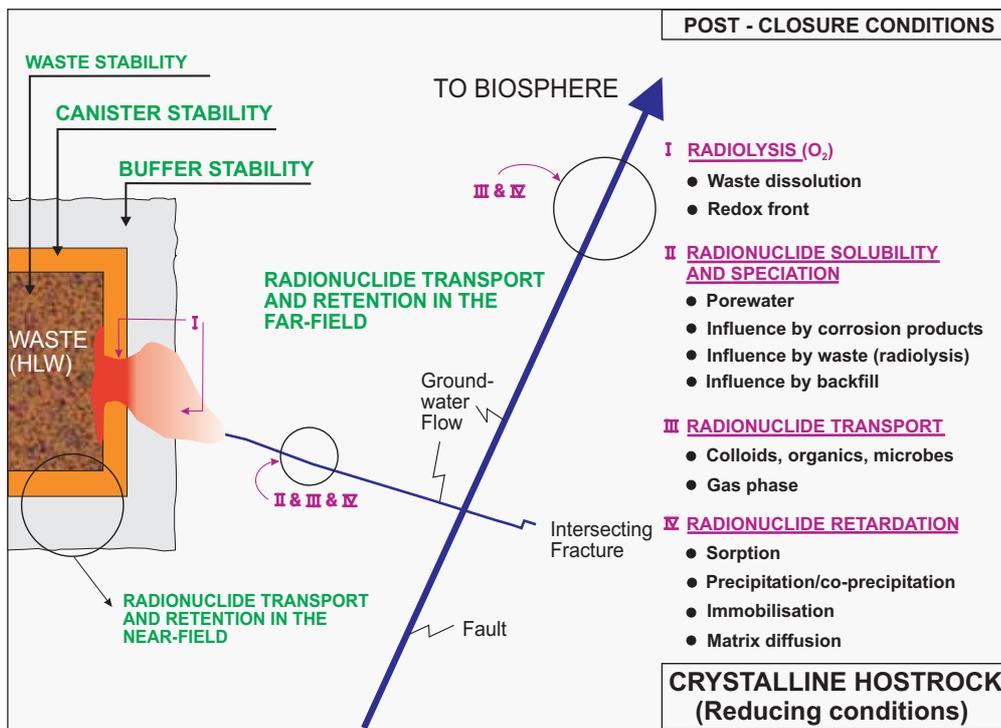


Abb. 1: Prozesssystem für die Endlagerung von hochaktivem Abfall in Kristallingestein. (GRUNDFELT & SMELLIE 2004)

In Abb. 2 ist das Prozesssystem von LILW in kristallinem Gestein dargestellt. In bereits existierenden Endlagern für LILW in kristallinem Gestein (z. B. in Schweden und in Finnland) wird der Abfall in horizontale oder vertikale Auffahrungen verbracht. In Abhängigkeit von der Konzentration und Langlebigkeit der Radioaktivität wird der Abfall nach Bedarf mit Beton umhüllt. Der Raum zwischen Betonbarriere und dem anstehenden Gestein wird mit Bentonit oder Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt. Während die Einlagerungsräume für mittelradioaktiven Abfall normalerweise rückverfüllt werden, z. B. mit Beton, bleibt bei schwachradioaktivem Abfall der Raum zwischen den Verpackungen offen.

Im Gegensatz zum HLW wird beim LILW oft angenommen, dass die Behälter in der Nachverschlussphase nicht mehr dicht umschließend sind. Es wurde daher angenommen, dass unmittelbar nach der Wiedersättigung des Lagerraums mit einsickerndem Grundwasser der Transport von Radionukliden durch die Barrieren des Nahfelds und über das Fernfeld hinaus, in die Biosphäre beginnen kann. Die Transportrate durch das Nahfeld hängt hierbei stark vom Zustand der Abfallmatrix, der Betonbarrieren und des Versatzmaterials ab. Deshalb ist es wichtig die Degradationsprozesse dieser Materialien zu untersuchen.

Mit erfolgter Systematisierung der relevanten Prozesse für HLW und LILW-Abfälle in den vier unterschiedlichen Gesteinstypen wurden im nächsten Bearbeitungsschritt natürliche und anthropogene Analoga, welche die jeweiligen Prozesse abbilden, zugeordnet und erläutert. Die Prozesssysteme gliedern sich in verschiedene Prozessgruppen (violett in der Abbildung), wie z. B. Radionuklidtransport oder -retardation. Die relevanten Untersuchungsergebnisse natürlicher und anthropogener Analoga wurden durch Vergleich mit den charakteristischen Bausteinen der Prozesssysteme diskutiert und bewertet. Die Auswertung erfolgte separat

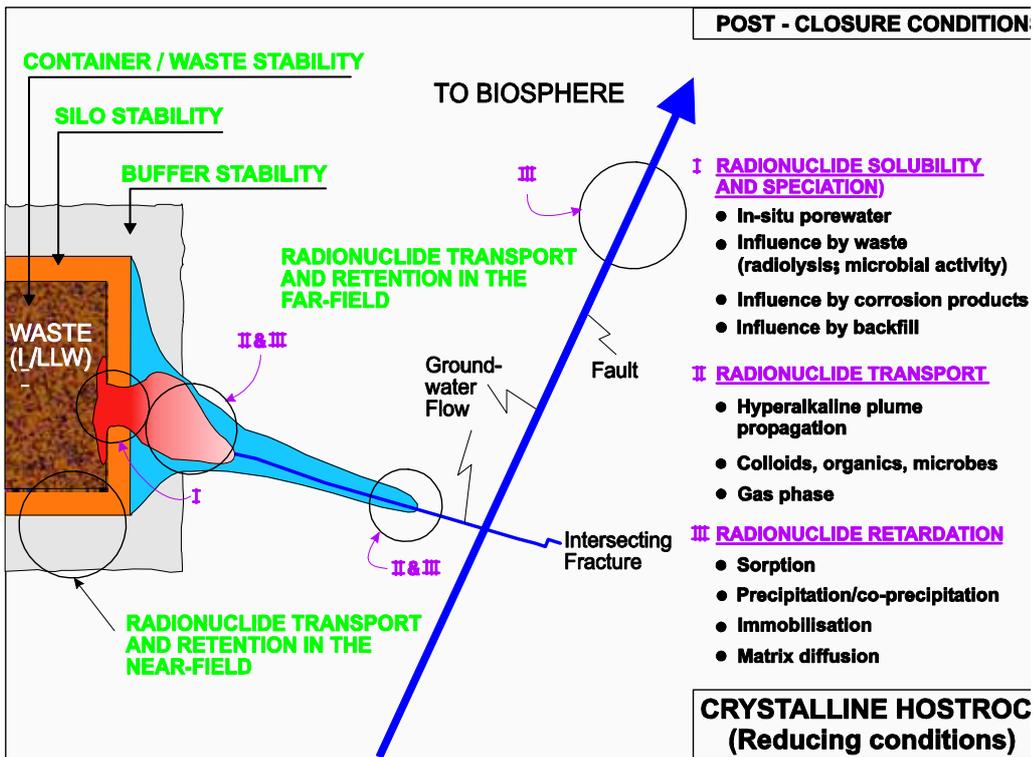


Abb. 2: Prozesssystem für die Endlagerung von schwach- und mittelaktivem Abfall in kristallinem Gestein. (GRUNDFELT & SMELLIE 2004)

für jedes Prozesssystem, wobei neben der verbalen Bewertung der Analoga die Verknüpfung von Prozessen mit Analoga in Form einer Tabelle zusammengefasst wurde. Tab. 2 zeigt als Beispiel Analoga, die als prozessrelevant für die Stabilität von Abfallbehältern aus Metall angesehen werden.

Tab. 2: Ausgewählte prozessrelevante Analoga für die Stabilität von Metallbehältern (GRUNDFELT & SMELLIE 2004).

Systemkomponente	Wichtige FEPs	Natürliche Analoga
Kupfer/Stahlbehälter	Korrosion Reaktion mit dem Porenwasser Korrosions-/Kerbungsrate Korrosionsprodukte	Geologische Vorkommen (z. B. Michigan; Hyrkkölä; Devon; Disko Island; Bühl) Archäologische Hinweise (z. B. Kronan Canon; römische Nägel von Inchtuthil) Anthropogene Hinweise (z. B. Hauswasserleitungen)
	Radiolyse	Alteration und Oxydation von Fe-führenden (und anderen) Mineralen von uranhaltigen Konkretionen.

Die Auflistung und Beschreibung aller relevanten FEPs und natürlichen Analogbeispiele würde über den Rahmen dieser Kurzfassung hinausgehen.

## Randbedingungen

Die Arbeiten sollten sich auf die potenziellen Wirtsgesteine für radioaktiven Abfall beziehen, die in Deutschland in Betracht gezogen werden, d. h. Steinsalz, Ton/Tonstein, kristallines Gestein und sonstige Gesteine unter Tonbedeckung. Dazu waren die wichtigen Prozessabläufe einzubeziehen, die in einem Endlager für sämtliche Arten von radioaktiven Abfällen stattfinden könnten, d. h. radioaktiver Abfall aus der Kernenergieerzeugung und radioaktive Abfälle aus der Industrie, Medizin und Forschung.

Der Aspekt der Rückholbarkeit der Abfälle ist bei der Bearbeitung der Aufgabe nicht berücksichtigt worden. Es ist davon ausgegangen worden, dass die Behälter bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorsorgemaßnahmen für eine mögliche Rückholung eingelagert werden.

Für die Bearbeitung der Aufgabe waren keine Felduntersuchungen vorgesehen. In dem gegebenen Zeitrahmen konnte lediglich auf bereits dokumentierte Analogstudien zurückgegriffen werden. Die Tätigkeiten im Rahmen der Bearbeitung dieser sicherheitstechnischen Einzelfrage beschränkte sich auf die Identifizierung, Beschreibung und Systematisierung der Prozesse in Nah- und Fernfeld eines Endlagers sowie die Identifizierung, Diskussion und Bewertung der natürlichen Analoga, die diese Prozesse abbilden.

Es war nicht der Sinn der Bearbeitung, systematisch und detailliert auf die große Anzahl an Veröffentlichungen über Analoga einzugehen, die für jeden Aspekt der Leistungsfähigkeit eines Endlagers für radioaktiven Abfall verfügbar ist. Reine Dokumentationen über bekannte Analoga wurden bereits hinreichend in den letzten 20 Jahren veröffentlicht (z. B. CHAPMAN, MCKINLEY & SMELLIE 1984; MILLER et al. 1994, 2000) und darin enthaltene Literaturhinweise). Die Arbeiten beschränkten sich daher auf eine Beschreibung der hauptsächlich, auf internationaler Ebene durchgeführten oder in der Durchführung begriffenen Analogstudien und auf eine Auswahl von kleinmaßstäblichen prozessorientierten Untersuchungen orientiert an Prozessen spezifischer Einlagerungskonzepte in den verschiedenen Wirtsgesteinstypen. Als Grundlage für die Strukturierung diente vor allem die Bestandsaufnahme und Beschreibung von FEPs aus GRUNDFELT et al. (2003).

### 2.1.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Natürliche und anthropogene Analoga werden als besonders zweckdienlich für den Nachweis angesehen, dass die entwickelten Modelle zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers die analysierten Prozesse richtig beschreiben und die relevanten Parameterwerte verwendet werden. Der Hauptvorteil von Analoga liegt in der Möglichkeit, die Auswirkungen von langsamen Langzeitprozessen zu untersuchen, die normalerweise nicht im Labor simuliert werden können. Die vorliegende Studie konzentrierte sich daher vor allem auf das Ausmaß, bis zu dem Analoga benutzt wurden oder benutzt werden können, um diejenigen Prozessabläufe zu identifizieren, zu modellieren und zu quantifizieren, die für Sicherheitsbewertungen wichtig sind.

Der Nutzen von Analoga ist bei den meisten Prozessen qualitativer Art. Analoga können der Entwicklung modellhafter Konzepte und Szenarien dienen. Der quantitative Nutzen für den Abgleich mit Daten und Modellparametern von Sicherheitsanalysen stammt hauptsächlich aus Analoga zur Stabilität von Behältermaterialien, Verfestigungsmaterialien für den radioaktiven Abfall sowie Puffer- und Barrierenmaterial. Außerdem ergibt sich ein quantitativer Nutzen für spezielle Probleme wie den Einfluss von hochalkalischen Bedingungen auf die Retardation von Radionukliden sowie den Einfluss der Matrixdiffusion auf die Retardation von Radionukliden im Fernfeld. Für Modelltests bzw. Validierungen eignen sich Daten von Analoga vor allem für geochemische Modelle zur Löslichkeit und Speziation von Radionukliden.

Inwieweit die Analoga zur Unterstützung des Verständnisses und des Vertrauens der Beschreibung und Quantifizierung von Prozessen in Endlagern in den vier ermittelten Gesteinsarten herangezogen werden können, ist zusammenfassend der Tab. 3 zu entnehmen. Sie spiegelt die identifizierten relevanten Prozesse in den zu betrachtenden Endlagersystemen wider. In der Tabelle ist der Beitrag von Analoga zu der Bildung des Vertrauens- bzw. des Verständnis der verschiedenen Prozesse mit Ziffern von 0 bis 3 bezeichnet worden:

- 0 = keine dokumentierter Beitrag,  
 1 = qualitativer Beitrag für Modell- bzw. Szenarioentwicklung,  
 2 = quantitativer Beitrag für Daten für leistungs- und sicherheitsbezogen Bewertungen,  
 3 = Beitrag für die Überprüfung und Validierung von Modellen.

Außerdem werden folgende Symbole in der Tabelle benutzt:

n.z. = nicht zutreffend,

? obwohl es keine dokumentierten Untersuchungen direkter natürlicher Analoga zu Auflockerungszonen gibt, können einige Beispiele des Nahfeldes als Analoga dienen.

Tab. 3: Auswertung der Analoga für Prozesse in verschiedenen Wirtsgesteinen (GRUNDFELT & SMELLIE 2004).

Systemkomponente	Wichtige FEPs	Kristallin-gestein	Ton-/Ton-gestein	Stein-salz	Sonstige Gesteine unter Ton-bedeckung
<b>Stabilität von metallischen Abfallbehälter</b>					
<i>Kupfer/Stahlbehälter</i>	Korrosion Reaktion mit dem Porenwasser Korrosions-/Kerbungsrate Korrosionsprodukte	2	2	0	0
	Radiolyse	0	1	0	0
<b>Stabilität von Abfallprodukten</b>					
<i>Stabilität von abgebrannten Brennelementen</i>	Interaktion von Porenwasser Auflösungsraten	1	1/3	0	0
	Radiolyse	0	1	0	1
<i>Stabilität von Silikatglas</i>	Interaktion von Porenwasser Entglasung Lösungs-/Korrosionsraten Löslichkeitshemmende feste Phasen	1/2	1/2	1	0
	Strahlungsschäden	1	1	1	1
	Interaktion von Porenwasser	1	1	1	1
<i>Stabilität von LILW</i>	Aktivität von Mikroorganismen	0	1	0	0
	<b>Stabilität von Puffern und Barrieren</b>				
<i>Versatzton (oder -Ton/Sand) und/oder Ton als Wirtsgestein</i>	Thermaleffekte	1/2	1/2	n.z.	1/2
	Druckeffekte	0	0	n.z.	0
	Hydrochemische Effekte	1	1	n.z.	1
	Effekte der Behälterkorrosion	1	1	n.z.	1
	Hydraulische Versiegelung und chemische Isolierung	1	1	n.z.	1
<i>Beton/Zement als Versatzmaterial</i>	Zement/Beton-Dauerhaftigkeit (LILW)	1/2	1/2	0	1/2
<i>Salzgestein als Versatzmaterial und/oder Wirtsgestein</i>	Druck/Konvergenzeffekte	n.z.	n.z.	1	n.z.
	Thermaleffekte	n.z.	n.z.	1	n.z.
	Gasaufbaueffekte	n.z.	n.z.	0	n.z.
	Zutritt von Solen	n.z.	n.z.	1	n.z.
<b>Transport und Retardation von Radionukliden im Nahfeld</b>					
<i>Löslichkeit und Speziation von Radionukliden (Testen von geochemischen Codes und Datenbasen)</i>	Freisetzung von Radionukliden Einfluss des Barrierensystems	3	3	0	3
	<i>Transport von Radionukliden</i>	Einfluss von Radiolyse (HLW)	0	1	0
Beeinflussung durch Kolloide/organische Substanzen/Mikroorganismen (HLW; LILW)		1	1	0	1
Beeinflussung durch Gasphasen (spontane Energiefreisetzung; induzierte Crackprozesse und Kluffbildungen; HLW; LILW)		0	0	0	0
<i>Retardation von Radionukliden (Sorption; Ausfällung; Copräzipitation; Immobilisierung)</i>	Beeinflussung durch Korrosionsprodukte metallischer Abfallbehälter (HLW, LILW)	1	1	0	1
	Beeinflussung durch Versatzmaterial aus Ton (HLW; LILW)	1/3	1/3	n.z.	1
	Beeinflussung durch Versatzmaterial aus Steinsalz (HLW; LILW)	n.z.	n.z.	0	n.z.
	Beeinflussung durch Versatzmaterial aus Zement/Beton (HLW, LILW)	1/2	1/2	n.z.	1/2
<b>Transport und Retardation von Radionukliden in der EDZ</b>					
<i>Löslichkeit und Speziation der Radionuklide</i>	Hydrochemische Interaktion Einfluss des Abfallprodukts Einfluss von Korrosionsprodukten Einfluss der Versatzmaterial	?	?	?	?

Systemkomponente	Wichtige FEPs	Kristallin-gestein	Ton-/Ton-gestein	Stein-salz	Sonstige Gesteine unter Ton-bedeckung
<i>Transport von Radionukliden</i>	Einfluss von Radiolyse Einfluss von Kolloiden/organischen Substanzen/Bakterien hochalkalische Interaktion Einfluss von Gasphasen (spontane Freisetzung von Energie; induzierte/s Klüftbildung/Cracken) Freisetzung von Solen durch Konvergenz/Quetschung und Thermalgradienten	?	?	?	?
<i>Retardation von Radionukliden (Sorption, Fällung, Copräzipitation, Immobilisierung)</i>	Sorption	?	?	?	?
	Fällung/Copräzipitation	?	?	?	?
	Immobilisierung	?	?	?	?
	Matrixdiffusion	?	?	?	?
<b>Transport und Retardation von Radionukliden im Fernfeld</b>					
<i>Löslichkeit und Speziation der Radionuklide (Testen von geochemischen Codes und Datenbasen)</i>	Freisetzung aus dem Nahfeld Einfluss des Wirtsgesteins	3	3	0	3
<i>Transport von Radionukliden</i>	Einfluss von Kolloiden/Mikroorganismen (HLW; LILW)	1	1	0	0
	Einfluss von Gasphasen (spontane Energiefreisetzung; induzierte/s Klüftbildung/Cracken (HLW; LILW))	0	1	0	1
	Einfluss von hochalkalischen Grundwasserfahnen (LILW)	1/2	1/2	0	1/2
<i>Retardation von Radionukliden (Sorption; Fällung; Copräzipitation; Immobilisierung)</i>	Sorption Fällung/Copräzipitation Immobilisierung	1	1	1	1
	Matrixdiffusion	2	2	0	0
<b>Einflüsse einer Glaziation</b>					
<i>Permafrost</i>	Ausbreitung der Enteisungsfront (z. B. Bildung von salinen Wässern) Hydraulische Stagnation Gasanreicherung (z. B. Bildung von Clathraten)	1	0	0	0
<i>Tiefeindringende glaziale Schmelzwässer</i>	Redoxpufferkapazität des Grundgebirges	1	1	1	1
<i>Subglaziale Erosion</i>	Entfernung oder Durchdringung von sedimentärem Deckgestein Überflutung Salzauflösung Diapirbildung	0	1	1	1
<i>Isostatischer Ausgleich</i>	Neotektonische Aktivität	1	0	0	1
	Hydrochemische Instabilität	1	1	1	1
<b>Einfluss tektonischer Szenarios</b>					
<i>Störungen</i>	Behälterdefekte Puffer/Verfülldefekte Auflösung der Abfallverpackung Radionuklidtransport	Nicht behandelt			
<i>Diapirbildung</i>					
<i>Geothermale Aktivität</i>					
<b>Einfluss geothermischer Szenarios</b>					
<i>Geothermale Aktivität</i>	Behälterdefekte Puffer/Verfülldefekte Auflösung der Abfallverpackung Radionuklidtransport	Nicht behandelt			

Untersuchungen natürlicher und anthropogener Analoga waren in der Vergangenheit üblicherweise geochemisch orientiert und mit Mineralisationen oder sonstigen geologischen Anomalien verbunden oder befassten sich mit der Stabilität von Fixierungsmittel für radioaktiven Abfall, Behältermaterial sowie Puffer- und Barrierenmaterial. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, bestehen die Materialanaloga aus archäologischen oder sonstigen anthropogenen Analoga. Die Ausnahmen bestehen aus Untersuchungen des natürlichen Vorkommens von metallischem Kupfer sowie aus Untersuchungen natürlichen, zementähnlichen Materials. Auch die Verwendung von Daten der in situ stattfindenden Zersetzung von Rohöl könnte als ein natürliches Analogon für die langfristige Stabilität von Bitumen als Fixierungsmittel für radioaktiven Abfall oder Abdichtmaterial (Schachtverfüllung) dienen.

Analoga für die technischen Barrieren eines Endlagersystems, d. h. Behälter, Fixierungsmittel für radioaktiven Abfall sowie die Tonbarriere, die den eingelagerten Abfall umgibt, sind im Allgemeinen nicht für die Wirtsgesteinsart spezifisch und somit auf die meisten Endlagerkonzepte anwendbar. Das Konzept eines Salzgestein-Endlagers kann in dieser Hinsicht als eine Ausnahme betrachtet werden, da es auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle statt auf einer kontrollierten Freisetzung basiert. Auch chemisch und geologisch / hydrogeologisch unterscheidet sich das Salzgestein-System von anderen Wirtsgesteinsarten.

Die meisten geochemischen Untersuchungen fanden in kristallinen oder sedimentären Festgesteinen statt. Einige Studien untersuchten – wenn auch in geringerem Umfang – Phänomene in salinaren Gesteinsfolgen

(siehe Tab. 3). Sonstige Gesteine unter Tonbedeckung, deren besonderes Merkmal geringer Grundwasserfluss durch eine relativ leitfähige geologische Formation ist, welche durch eine darüber liegende, gering grundwasserleitende Schicht geschützt ist, waren nicht Gegenstand von Untersuchungen natürlicher Analoga. Allerdings werden viele Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Studien von Analoga in anderen geologischen Systemen auch für dieses Geosystem als brauchbar eingeschätzt.

Verschiedene Szenarien zur Klimaentwicklung sind von zentraler Bedeutung für die Einschätzung der langfristigen Sicherheit jeden Endlagers. Untersuchungen der Auswirkungen einer Vergletscherung wurden aus nahe liegenden Gründen in den skandinavischen Ländern durchgeführt. Daher beziehen sich die meisten zur Verfügung stehenden Informationen auf die Auswirkung von Inlandsvereisungen auf kristalline Wirtsgesteine. Dies ist im Besonderen der Fall für Studien von Folgen des Permafrosts und der Neotektonik, die in der Folge von isostatischer Hebung entstehen. Relevante Angaben zu den Wirkungen des tiefen Eindringens des Schmelzwassers stehen für sämtliche geologische Formationen zur Verfügung, während die Folgen subglazialer Erosion vor allem in Verbindung mit Wirtsgesteinen aus Ton bzw. Salz von Interesse waren. Im Allgemeinen weisen die Ergebnisse der Untersuchungen darauf hin, dass die geologischen und geochemischen Systeme gegen schädliche Auswirkungen von Inlandsvereisungen verhältnismäßig widerstandsfähig und stabil sind.

Während einige Analoga zu ihrem genauen Verständnis beträchtliche wissenschaftliche Kenntnisse erfordern, können andere Analoga auch bei Laien Verständnis für die untersuchten Prozesse wecken. Als Beispiel der ersteren Untersuchungen seien hier die Studien zur Löslichkeit und Speziation von Radionukliden genannt, als Beispiel der letzteren das Vorkommen gediegenen Kupfers in der Natur.

Die Verwendung von Daten von Analoga für Erprobung und Validierung dynamischer Transportmodelle hat sich als wesentlich schwieriger erwiesen. Das liegt daran, dass diese Modelle Angaben zu den Anfangsbedingungen wie auch zur langfristigen Entwicklung von Materialeigenschaften und Randbedingungen erfordern. Das zu testende Modell wird sehr häufig auch zur Interpretation der zeitlichen Entwicklung des untersuchten Systems benutzt.

Nur wenige Studien behandeln größere geologische Prozesse wie tektonische Verschiebungen oder geothermale Aktivitäten. Solche Angaben sind meist in nationalen Programmen zu finden, die wegen eines besonderen regionalen Bedarfs diese Fragen in Betracht ziehen müssen (z. B. in Japan).

## 2.2 MODELLRECHNUNGEN

### Behandlung von Unsicherheiten, systematische Entwicklung von Szenarien und Rechenverfahren bei der Anwendung probabilistischer Methoden im Langzeitsicherheitsnachweis

Auftragnehmer: *Golder Associates GmbH*

Zitat: BRUNS et al. (2004)

### 2.2.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Das menschliche Wissen über den Ablauf zukünftiger, ggf. sicherheitsrelevanter Ereignisse und Ereignisabläufe ist umso weniger vollständig, je länger der Betrachtungszeitraum ist. Hinzu kommt, dass die Eigenschaften des geologischen Barrierensystems niemals lückenlos erkundet werden können. Dies hat zur Folge, dass mit deterministischen Berechnungen das sicherheitsrelevante Verhalten nicht vollständig dargestellt werden kann. Man kann aber in Felduntersuchungen und in anschließenden Rechenmodellen die Streueigenschaften beurteilungsrelevanter Größen für Nachweiszwecke nutzen. Solche probabilistischen Langzeitsicherheitsanalysen wurden in Deutschland für bestehende Endlagerstandorte seit längerem durchgeführt.

Probabilistische Langzeitsicherheitsanalysen setzen sich mit drei Typen von Unsicherheiten auseinander (diese Trennung ist nicht eindeutig und kann etwa durch eine Klassifikation nach Zufallseigenschaften ersetzt werden):

- Unsicherheiten in den Eigenschaften bzw. bei der Bestimmung/Erkennung physikalischer und geometrischer Modellparameter des Wirtsgesteins/seiner Umgebung sowie der geotechnischen bzw. technischen Barrieren,
- Unsicherheiten über den Ablauf von Naturvorgängen,
- Unsicherheiten infolge der Formulierung und Durchrechnung mathematischer Modelle, mit denen die Vorgänge innerhalb und außerhalb des Endlagers beschrieben werden.

Im Rahmen einer künftigen Standortsuche und Sicherheitsbewertung hängt der Stellenwert probabilistischer Sicherheitsnachweise u. a. von der Klärung mehrerer Aspekte ab. So sind Zustände, Ereignisse und Prozesse zu benennen, die zur Charakterisierung der langzeitlichen Entwicklung eines deutschen Endlagerstandorts in Frage kommen. Die Erkundungsmethodik ist auf geeignete Mess- und Auswerteverfahren abzustimmen, mit denen streuende Kenngrößen der geologischen Barrieren statistisch erfasst werden können. Vorgaben müssen bereitstehen, die Art, Umfang, Zeitpunkt und Inhalt probabilistischer Sicherheitsnachweise verdeutlichen.

Im Vorhaben wurden drei fachliche Komplexe zur Erkundungsmethodik, Szenarienanalyse und Modellierung bearbeitet:

- Vorhandene Untersuchungsmethoden (oder Methodenkombinationen) zur Erkundung von Störungen bzw. lösungsführenden Zonen waren zu beschreiben mit dem Ziel, ihre Leistungsfähigkeit bei der Ermittlung geometrischer und hydraulischer Barriereigenschaften zu beurteilen. Es sollte erläutert werden, wie sich Unsicherheiten im Gefolge der Erkundung möglichst verkleinern lassen. Weiterhin waren allein auf der Basis vorliegender Daten vertrauenswürdige Wahrscheinlichkeitsdichten für die hydraulische Durchlässigkeit der nunmehr in Betracht zu ziehenden Wirtsgesteine zu bestimmen.
- Es waren auf systematische Weise Szenarien (z. B. Eiszeitszenarien) zu entwickeln, die für die Langzeiteigenschaften der geologischen Barrieren von Bedeutung sind und nach denen langfristig ein Flüssigkeitszutritt an die Abfälle möglich ist. Weiterhin sollte eine erste Zuweisung von Szenarieneintrittswahrscheinlichkeiten erfolgen.

- Es sollte der Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) zur Berechnung von Parametersensitivitäten mit dem Monte-Carlo-Verfahren im Hinblick auf die Anwendbarkeit in Langzeitsicherheitsanalysen verglichen werden.

## 2.2.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

Die in Deutschland in Frage kommenden Wirtsgesteine waren unter Zugrundelegung des Ein-Endlager-Konzepts zu betrachten. Bei der Vorhabensbearbeitung wurde die nationale und internationale Literatur ausgewertet. In- und ausländische Experten wurden gehört. Laboruntersuchungen erfolgten nicht. Die Beantwortung der unter Kap. 2.2.1 genannten Fragestellungen im Rahmen künftiger Endlager-Sicherheitsanalysen wurde auch anderweitig als sinnvoll erachtet (NOSECK et al. 2000).

Bei der Charakterisierung der Wirtsgesteine Salz, kristallines Festgestein, Ton/Tonstein und sonstige Festgesteine unter Tonbedeckung hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften und des Auftretens von Diskontinuitäten wurde auf Erkenntnisse zurückgegriffen, die bei Endlager-Untersuchungsprogrammen in Europa, Nordamerika und Asien angefallen waren. Das Hauptaugenmerk lag auf der Abschätzung von Unsicherheiten und Heterogenitäten von Diskontinuitäten und Durchlässigkeitseigenschaften der jeweiligen Wirtsgesteine.

Die verfügbaren geowissenschaftlichen Untersuchungsmethoden wurden auf ihre Eignung zur Erkennung derartiger Strukturen während einer Standorterkundung bewertet. Dafür war u. a. die Zusammenstellung generischer Datensätze für Parameter deutscher Wirtsgesteine erforderlich. Um die Bayessche Methode zur Reduktion von Unsicherheiten einsetzen zu können, werden vor der Erkundung zunächst Informationen gesammelt, mit denen die unbedingte Auftretenswahrscheinlichkeit von Diskontinuitätsmerkmalen quantifiziert wird. Die Erkundung liefert – unter Einführung einer Modellvorstellung für das Merkmal – nach Feststellung der Diskontinuitätseigenschaft die bedingte Wahrscheinlichkeit des Modells, womit man wiederum die Wahrscheinlichkeit des Merkmalseintritts aufdatieren bzw. die Merkmalsunsicherheit verbessern kann. Auf diese Weise lassen sich Untersuchungsprogramme optimieren, indem der Geldwert des jeweiligen Informationsgewinns mit den Kosten, die bei der Sammlung dieser Information anfallen, verglichen wird. Ein Vorschlag zur künftigen Anwendung der Bayesschen Methode für die Standorterkundung wurde unterbreitet.

Das Aufstellen von FEP ist fester Bestandteil der Szenarienanalyse für ein Endlager. FEP sind nach Möglichkeit mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zu belegen. Im Vorhaben wurden geologische Szenarien für die einzelnen Wirtsgesteine entwickelt, die z. B. während einer Eiszeit zum Flüssigkeitszutritt an die Abfälle führen können. Eventuell vorhandene Kopplungen zwischen szenarienrelevanten FEP wurden dabei betrachtet.

Die Langzeitsicherheitsanalyse betrachtet die Sensitivität der Zielgrößen von Transportrechnungen bezüglich der Modellparameter. Sie bedient sich dazu simulativer Rechenverfahren wie der Monte-Carlo-Methode. Die neuere FAST-Methode basiert auf der Varianzanalyse. Sie verwendet spezielle Suchkurven im Parameterraum, um eine Stichprobe von Eingangsdaten zu definieren. Diese wird zur Erzeugung einer Ausgangsdatenstichprobe verwendet. Die Ausgangsdaten werden auf Empfindlichkeit gegenüber Störungen einzelner Eingangsparameter untersucht. Die Effektivität von FAST wurde mit der Monte-Carlo-Methode verglichen. Dazu wurden generische, stark vereinfachte Endlagermodelle aufgestellt und Freisetzungsberechnungen durchgeführt. Dies erforderte Programmierarbeiten und den Einsatz des Rechenprogramms GoldSIM.

Im Vorhaben nicht zu untersuchen waren die für vollständige probabilistische Sicherheitsanalysen ebenfalls zu berücksichtigenden Modellierungsunsicherheiten. Bedeutsame Unsicherheiten innerhalb einer sicherheitlichen Endlagerbewertung lassen sich aber bereits aus der Behandlung der Daten-/Parameterunsicherheiten ermitteln. Es war ebenfalls nicht zu beantworten, ob bzw. auf welche Weise der Einsatz probabilistischer Rechenverfahren künftig vorgeschrieben werden soll.

## 2.2.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

### Erkundung von Störungen und wasserführenden Zonen:

Während der Standorterkundung sind Unsicherheiten über das wasserführende Strukturinventar eines Wirtsgesteins auszuräumen oder zu minimieren. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit gebräuchlicher Verfahren zur über- und untertägigen Erkundung eines Standorts auf Störungen im Gestein bzw. auf lösungsführende Zonen wurde im Bericht tabellarisch zusammengefasst. Bei der Betrachtung des geochemischen, geophysikalischen und geologisch-hydrogeologischen Methodenspektrums sowie der Möglichkeiten einer Fernerkundung wurde eine wirtsgesteinsspezifische Verfahrensrangfolge abgeleitet, die auf der Eindeutigkeit, dem Auflösungsvermögen und der Reichweite der jeweiligen Messmethode basierte. Invasive, d. h., partiell materialzerstörende Verfahren weisen vor Ort und im Labor i. A. den höheren Nutzen auf. Sicherheitsrelevante Wirtsgesteinsdiskontinuitäten lassen sich nur über die detaillierte untertägige Standorterkundung erkennen.

Stehen mehrere Standorte für ein Endlager zur Auswahl, so kann in einer vorlaufenden und orientierenden Sicherheitsanalyse die Nuklidfreisetzung über den Wasserpfad abgeschätzt werden. Dafür sind die Gesteinsdurchlässigkeiten aus der Erkundung in Ansatz zu bringen. Die Erkundungsverfahren sind auf die zu erwartenden hydraulischen Wirtsgesteinseigenschaften auszurichten.

Die Bestimmung der meistens geringen hydraulischen Leitfähigkeit von Tonsteinen hängt von der mineralogischen Zusammensetzung, der Porosität, der Korngrößenverteilung, dem Spannungs- bzw. Temperaturzustand, der Spannungs- bzw. Temperaturgeschichte, der Grundwassergeochemie, der Zementierung sowie dem Gefüge ab. Die wirksame hydraulische Leitfähigkeit von Tonsteinen wird insbesondere auch von Brüchen, Störungen und Zwischenschichten beeinflusst. Bei den existierenden Vorkenntnissen ist für typische Tonsteine in Deutschland eine logarithmische Normalverteilung mit definierbaren Parametern anzusetzen.

Die hydraulische Leitfähigkeit bzw. Transmissivität der Kristallingesteine hängt im Feld aufgrund der Wirkung von Störungen bzw. Brüchen sehr stark vom Betrachtungsmaßstab ab und unterliegt erheblichen Streuungen. Im Labormaßstab beobachtete Kristallin-Permeabilitäten entsprechen - ohne die Wirkung von Brüchen bzw. Störungen - zum Beispiel einer logarithmischen Normalverteilung.

Die hydraulische Permeabilität von Steinsalz wird a priori ebenfalls gut über eine logarithmische Normalverteilung mit definierbaren Parametern angenähert.

Zur Ermittlung der Verteilungsfunktionen wurde eine iterative Vorgehensweise vorgeschlagen, mit der sich die A-priori-Dichtefunktionen hydraulischer Leitfähigkeiten für gestörten und ungestörten Ton, Kristallin und Salzgestein mithilfe eines mehrphasigen Bayesschen Ansatzes unter Verwendung von Erkundungsergebnissen aktualisieren lassen.

### Entwicklung sicherheitsrelevanter Szenarien:

Die Aufstellung von Freisetzungsszenarien für die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers ist Standard. Soweit Einzelszenarien verschiedene Entwicklungen der Nuklidfreisetzung aus dem Endlagersystem erfassen, müssen sie in Berechnungen und Bewertungen eingebunden werden. Szenarienauslösende Faktoren weisen unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten auf. Deshalb besitzt jedes Szenario eine spezifische Eintrittswahrscheinlichkeit, die in der Gesamtbewertung des Endlagers zu berücksichtigen ist.

Für die betrachteten Wirtsgesteine Salz, kristallines Festgestein, Ton/Tonstein und sonstige Festgesteine unter Tonbedeckung wurde eine erste geologische Szenarienentwicklung (Fernfeld) durchgeführt. Eventuelle Kopplungen zwischen den szenarienrelevanten Zuständen, Ereignissen und Prozessen (FEP) wurden skizziert. Ein vorläufiges Eiszeitszenario wurde für die obigen Wirtsgesteine entwickelt.

Zur Betrachtung von Langzeiteigenschaften deutscher Wirtsgesteine wurde die FEP-Liste der NEA (NEA 1999) angepasst. Verformungsszenarien, Vulkanismus, Erdbeben, Klima, Meteoriteneinschlag und zusätzlich menschliche Einwirkungen in Gestalt von Bergbau und Wasserbewirtschaftung wurden untersucht und wirtsgesteinsabhängig einander gegenübergestellt, indem eine Einteilung nach wahrscheinlichen, weniger wahrscheinlichen und nicht weiter zu betrachtenden Szenarien vorgenommen wurde.

Als Besonderheit für norddeutsche Verhältnisse wurde ein Eiszeitszenario für die betrachteten Geosysteme entwickelt, da dies als wahrscheinliches Szenario mit großen Auswirkungen auf das Barrierensystem einzu-  
stufen ist und damit die Langzeitsicherheit maßgeblich beeinflussen kann.

Die Diskussion des Eiszeitszenarios ergab z. B. für Steinsalz, dass dessen verhältnismäßig große Wärmeleitfähigkeit im Falle einer Kaltperiode ohne Eisbedeckung zu einer im Vergleich mit den Nachbargesteinen ausgeprägten Abkühlung des Salzstocks führt. Eine denkbare Konsequenz dieses unterschiedlichen Abkühlverhaltens wäre das Entstehen von Zugspannungen mit eventuell auch steil stehenden Schrumpfrissen. Mit der Bedeckung der Salzstruktur durch eine Eisschicht würden die Gebirgsspannungen sowohl durch Temperaturerhöhung als auch durch die direkte Eisbelastung wieder steigen. In Abhängigkeit von Dauer und Höhe der Eislast bilden sich im Salinar horizontal gerichtete Zusatzspannungen. Der in verschiedenen Beobachtungen nachgewiesene schnelle Anstieg der Temperatur am Ende einer Kaltzeit führt zu einem eher raschen Abschmelzen des Eises. Ob die nach dem Abschmelzen verbleibenden Gebirgsspannungen für die Auslösung von Rissvorgängen im Salz ausreichen, lässt sich über Modellierungen untersuchen.

Als Folge einer Eisbedeckung können im kristallinen Festgestein be- und entlastungsbedingte Änderungen von Fließpfadeigenschaften stattfinden, die für das Endlagerverhalten unwesentlich sein dürften. Es kommt aber wahrscheinlich zu einem tief reichenden Austausch des besonders in den Diskontinuitäten enthaltenen Grundwassers. Mit dem Grundwasseraustausch ergeben sich vorübergehend andere geochemische und eventuell auch biologische Bedingungen im Wirtsgestein bzw. in den geotechnischen Barrieren. Die denkbare Konsequenz besteht in der Erhöhung der Korrosions- bzw. Ablagerungsrate sowohl für die Behälter als auch für bereits exponierte Abfälle. Ein Zusammenwirken von Korrosion und dem o. a. mechanischen Belastungsanstieg führt möglicherweise zu einer weiteren Verringerung der Behälterbeständigkeit.

Das Vorrücken einer Eisschicht oberhalb einer Tonsteinformation leitet entwässernde Fließvorgänge ein. Ein wesentlicher Porenwasseraustausch findet vermutlich nur bei Anwesenheit markanter Diskontinuitäten statt. Tonschichten können im Gefolge von Rinnenvertiefungen erodiert werden. Vorhandene Diskontinuitäten würden den Erosionsvorgang begünstigen. Änderungen der Eislast können zum Abbau des Porenwasserdrucks führen. Damit ist eine Bewegung des im Ton/Tonstein enthaltenen Poren- bzw. Kluftwassers verbunden, die zum advektiven Transport evtl. freigesetzter Radionuklide führen kann. Es sind komplexe Poren-druckverteilungen bzw. advektive Fluidbewegungen zu erwarten. Für die standortspezifische Prognose derartiger Eiszeitauswirkungen müssen hinreichende Informationen über die Konsolidierung des Wirtsgesteins und seiner Umgebung vorliegen.

Bei der Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zu Szenarien ist der Betrachtungszeitraum zu berücksichtigen. Für die Mehrzahl an Ereignissen und Prozessen wurden zeitbezogene Informationen z. B. über jährliche Raten (Erosionsrate) oder Wiederkehrperioden (Erdbeben) beschrieben. So steigt mit der Länge des Betrachtungszeitraumes die absolute Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Szenario eintritt. Für manche Szenarien reicht die Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit aber nicht aus. Zur Durchführung der Langzeitsicherheitsanalyse muss zusätzlich zur Eintrittswahrscheinlichkeit der Kaltzeit, ihr Eintrittszeitpunkt und eine Schätzung des Ablaufs der damit verbundenen Prozesse (z. B. Bildung von Permafrost bzw. Eisbedeckung) vorliegen.

Eintrittswahrscheinlichkeiten für ausgewählte geologische FEP wurden unter Angabe von Bandbreiten vorsichtig geschätzt und in BRUNS et al. (2004) ausführlich diskutiert. Es erwies sich, dass dabei fast immer standortspezifische Aspekte zu beachten sind und somit die eintrittswahrscheinlichkeitsbedingte Zuordnung von Szenarien für langzeitsicherheitsliche Analysen und Bewertungen nicht ausreichend belastbar ist. Aus diesem Grunde wurden die geowissenschaftlich-geotechnisch zu beschreibenden Szenarien für diesen Zweck klassifiziert und in drei Gruppen eingeteilt (Tab. 4):

1 = wahrscheinliche Szenarien

2 = weniger wahrscheinliche Szenarien

3 = Szenarien, die nicht weiter zu betrachten sind.

Tab. 4: Übersicht der Szenarienzuordnungen für einen Betrachtungszeitraum von einer Mio. Jahre (aus BRUNS et al. 2004).

Szenario	Salz	Kristallines Festgestein	Ton/Tonstein	Festgestein unter Tonbedeckung
Verformung	1	1	1	1
Erdbeben	1	1	1	1
Überdeckungsänderung	1	1	1	1
Gestalt eines Salzstockes	1	-	1	1
Periglazialer Zustand	1	1	1	1
Eisbedeckung	1	1	1	1
Warmklima	3	3	3	3
Menschliche Einwirkung - Bohrung	2	keine Informationen vorhanden	2	2
Menschliche Einwirkung - Bergbau	2	3	3	1 *
Wasserbewirtschaftung	3	2 *	3	3
Meteoriteneinschlag	3	3	3	3
Änderung des Abdichtungsverhaltens	1	1	1	1
Gasvorkommen	1	keine Informationen vorhanden	keine Informationen vorhanden	1

1 wahrscheinlich

2 weniger wahrscheinlich

3 nicht weiter zu betrachten

\* standortspezifische Aspekte sind wesentlich

### Prüfung simulativer Rechenverfahren für Sensitivitätsstudien:

Zur Systemanalyse ist es erforderlich, nicht nur die Gesamtergebnisse einer Modellierung, sondern auch deren Sensitivität bezüglich der Modellmerkmale bzw. hinsichtlich der Parameteränderungen zu betrachten. Eine Sensitivitätsanalyse dient deshalb sowohl der Vertrauensbildung als auch zur Entscheidung über eventuell benötigte, weitere Untersuchungen bzw. Abänderungen der Endlagerplanung. Dazu werden üblicherweise Monte-Carlo-Verfahren angewendet.

Diese wurden in der Untersuchung mit FAST verglichen. FAST basiert auf der Varianzanalyse und gestattet die Untersuchung von Koeffizientensensitivitäten in bestimmten Gleichungssystemen. Zum Vergleich wur-

den vereinfachte Endlagermodelle mit wenigen Parametern aufgestellt und Freisetzungsberechnungen durchgeführt.

Bei diesen Untersuchungen ergaben sich folgende Vorteile des Monte-Carlo-Verfahrens gegenüber FAST: Korrelationen zwischen Eingabeparametern können in einer Monte-Carlo-Analyse explizit bei der Bewertung der Unsicherheit der berechneten Zielgröße berücksichtigt werden. Die Richtung der von einem Parameter verursachten Änderung der berechneten Zielgröße ist am Vorzeichen des entsprechenden Korrelationskoeffizienten direkt ablesbar. Dies ist bei den FAST-Sensitivitätskoeffizienten nicht der Fall.

Als Vorteile von FAST gegenüber dem Monte-Carlo-Verfahren sind zu nennen: Unter bestimmten Umständen ist mit FAST die Bedeutung von Parametern erkennbar, die in nichtlinearem Zusammenhang mit der berechneten Zielgröße stehen. Die Bedeutung von Wechselwirkungen zwischen Parametergruppen lässt sich grundsätzlich untersuchen.

## Empfehlungen:

BRUNS et al. (2004) kommen zu folgenden zentralen Aussagen:

- Die FEP-Liste der OECD/NEA ist eine ausreichende Basis einer Szenarienentwicklung für ein Endlager in Deutschland. Die Liste muss aber auf deutsche Verhältnisse zugeschnitten werden, bevor sie zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers angewendet werden kann. Damit würde nicht nur eine einfachere Vergleichbarkeit des nationalen und internationalen Vorgehens gewährleistet, sondern möglicherweise auch die Akzeptanz des Langzeitsicherheitsnachweises erhöht.
- Kaltzeiten kehren in der Größenordnung von etwa 100.000 Jahren wieder. Für potenzielle Endlagerstandorte in Deutschland, die im Randbereich einer großflächigen Eisbedeckung liegen, könnte eine verhältnismäßig geringe Änderung der Eisausbreitung wichtig sein. Dagegen ist für ein im deutschen Binnenland gelegenes tiefes Endlager mit mehreren hundert Metern Überdeckung die eventuelle Änderung des Meeresspiegels während einer Eiszeit als nicht relevant einzustufen. Die Auswirkungen des Grundwassers, die mit einer großflächigen Eisbedeckung verbunden sind, können bedeutend sein (hiermit verknüpfte Phänomene gehen auf die Entwässerung unter dem Eis in Richtung der Eiskante zurück). Die geochemische Grundwasserbeschaffenheit kann sich ändern (z. B. von reduzierenden zu oxidierenden Bedingungen), außerdem kann es unter Umständen lokal zu sehr ausgeprägter Erosion kommen. Die Betrachtung der leichten Löslichkeit des für die Endlagerung vorgesehenen Salzes mit den im Zusammenhang mit einer Eisschicht vermuteten Fließvorgängen sowie die eventuell entstandenen Schrumpfrisse im Salz deuten auf die Möglichkeit einer Ablaugung von größeren Anteilen der Salzstruktur hin. Vorhandene niedrigdurchlässige, erosionsbeständige Schutzschichten des Deckgebirges bzw. eventuell auch die Anwesenheit eines gipshaltigen Hutgesteins dürften diese Möglichkeit abmildern. Die Bewertung der Wirksamkeit solcher Schutzschichten erfordert sowohl entsprechende fallspezifische Untersuchungen als auch ein detailliertes Verständnis der für die Erosion bzw. Ablaugung wesentlichen Vorgänge. Auch im Tonstein ist die Freilegung von Teilen des Inventars als Folge der Rinnenbildung eine denkbare Endlagerentwicklung während oder nach einer Eiszeit.
- Für Betrachtungs-/Nachweiszeiträume von größenordnungsmäßig 1 Mio. Jahren ist die Zuordnung von FEP-Eintrittswahrscheinlichkeiten ein wesentlicher Teil der Endlager-Szenarienanalyse.
- Beim Vergleich simulativer Rechenverfahren erwies sich FAST gegenüber der Monte-Carlo-Methode als arbeitsaufwendiger. Die sonstigen Vorteile des Monte-Carlo-Verfahrens sind so offensichtlich, dass eine Erweiterung des Methodenspektrums für Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalysen derzeit nicht erforderlich ist.

## 2.3 ISOLATIONSPOTENZIAL UND NACHWEISZEITRAUM

### Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle

Auftragnehmer:	Gruppe Ökologie e. V.
Unterauftragnehmer:	PanGeo - geowissenschaftliches Büro W. Habler geoservice
Zitat:	ALBRECHT et al. (2004)

### 2.3.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Eine grundsätzliche Frage des in der Bundesrepublik Deutschland verfolgten Konzepts der Lagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen ist die Frage nach der Prognostizierbarkeit der die Sicherheit bestimmenden geologischen Verhältnisse (BMU 2001, 2003). Abhängig von den Prognoseunsicherheiten ist jedoch der mögliche Nachweiszeitraum, für den Langzeitsicherheitsanalysen durchzuführen sind.

Die Prognoseunsicherheit steigt mit zunehmendem Bewertungszeitraum (AKEND 2002). Bei Zeiträumen im Bereich von mehreren zehntausend bis mehreren hunderttausend Jahren (je nach Geosystem) und länger sind die geologischen Veränderungen der Erdkruste nicht mehr sicher prognostizierbar, so dass ein ingenieurmäßig-deterministischer Nachweis des langfristig sicheren Abschlusses der eingelagerten Abfälle von der Biosphäre nicht mehr erbracht werden kann. Daraus ergibt sich die besondere Bedeutung dieser Fragestellung für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfallstoffe mit langen Halbwertszeiten (Uran, Plutonium). Bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen ist selbst nach geologischen Zeiträumen (> 1 Mio. Jahre) das Gefährdungspotenzial durch die langlebigen Radionuklide (insbesondere U-238) wegen der hohen Konzentration im Mittel noch höher als in natürlichen Lagerstätten. Auch nach  $10^6$  Jahren liegt die von abgebrannten Brennelementen ausgehende Dosisleistung in 1 m Abstand von der Brennelementoberfläche noch im Bereich von  $10^{-3}$  Sv/h bis  $10^{-4}$  Sv/h Brennelemente oder Teile von ihnen stellen somit auch nach langen Zeiträumen ein nicht unerhebliches Gefahrenpotenzial dar, sofern diese aus dem tieferen Untergrund ganz oder teilweise wieder in die Biosphäre gelangen.

Gleichzeitig steigt die Prognoseunsicherheit aber auch mit der Komplexität der zu bewertenden geologischen Verhältnisse. Dabei kann die Komplexität sowohl aus der schwer einschätzbaren Veränderlichkeit der Eigenschaften oder Randbedingungen resultieren, zum anderen aber auch aus der Kompliziertheit der geologischen Verhältnisse an sich und der Schwierigkeit, diese zu erfassen und zu beschreiben. Aufgrund dieser Abhängigkeit der Prognoseunsicherheiten von den geologischen Verhältnissen ist zu erwarten, dass die Zeiträume, für welche eine aussagekräftige Prognose über die zukünftige geologische Entwicklung eines Geosystems möglich ist, für unterschiedliche, für die Einlagerung grundsätzlich geeignete geologische Systeme (Geosysteme, bzw. nach AKEND (2002) günstige geologische Gesamtsituation), unterschiedlich sind.

Die Untersuchung zu möglichen Nachweiszeiträumen soll die fachliche Grundlage verbreitern um regulatorische Nachweiszeiträume, d. h. den Zeitraum, für den im Rahmen des formalen Genehmigungsverfahrens die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden muss, festzulegen. Bisher enthalten die deutschen gesetzlichen Regelungen und Sicherheitskriterien - abgesehen von einer gemeinsamen Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission aus dem Jahr 1988 (RSK 1988) - für die Endlagerung radioaktiver Abfälle keine allgemein gültigen Festlegungen über zulässige Beschränkungen von Nachweiszeiträumen. Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) hat sich jedoch für seine Arbeit auf einen Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Mio. Jahre festgelegt (AKEND 2002). Die im Auftrag des Bundesumweltministeriums überarbeitete Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicher-

heitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (BALTES et al. 2002) schlägt den gleichen Isolationszeitraum vor.

Das materielle Vermögen eines geologischen Systems, die geforderte Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre sicherzustellen, hängt von der Prognostizierbarkeit der geologischen Verhältnisse ab. Es ist zu erwarten, dass es für unterschiedliche geologische Gegebenheiten (Wirtsgesteine) unterschiedlich ist. Unter dem Aspekt einer umfassenden Standortauswahl mit dem Ziel, den bestmöglichen Standort zu finden (AKEND 2002) hat auch diese Fragestellung an Bedeutung gewonnen. In Hinblick auf die Prüfung von Standortalternativen ist, ausgehend vom o. g. Fakt des sehr langzeitigen Gefahrenpotenzials, die Fragestellung zu untersuchen, ob und in welchem Maße sich das grundsätzliche erwartete Vermögen von verschiedenen, für die Endlagerung in Frage kommenden Geosystemen unterscheidet. Als methodischer Ansatz zur Untersuchung der o. a. Fragestellung wurde der Begriff des Isolationspotenzials definiert. Er ist zu verstehen als das spezifische materielle Vermögen von Geosystemen, Schadstoffe für einen möglichst langen Zeitraum von der Biosphäre fernzuhalten. Beim Isolationspotenzial handelt es sich um ein übergeordnetes materielles Merkmal von Geosystemen. Seine beiden Hauptelemente sind das Rückhaltevermögen und die Beständigkeit des Geosystems, insbesondere seines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Das Rückhaltevermögen ist dabei durch diejenigen materiellen Eigenschaften des Geosystems gegeben, die das Isolationsvermögen bestimmen (z. B. Durchlässigkeit, Sorption, Mächtigkeit). Beständigkeit hingegen bedeutet, dass die das Rückhaltevermögen bedingenden materiellen Eigenschaften über möglichst lange Zeiträume erhalten bleiben bzw. sogar nachteilige Veränderungen dieser Eigenschaften rückgebildet werden können. Beständigkeit bezieht sich also auf das Potenzial von Geosystemen, auf künftige Einflüsse so zu reagieren, dass sich keine für das Rückhaltevermögen kritischen Auswirkungen ergeben.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten war eine Methodik zu entwickeln und anzuwenden, die den Vergleich der zu erwartenden Prognoseunsicherheiten anhand der charakteristischen Eigenschaften Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum für verschiedene Geosysteme ermöglicht. Das Abstraktionsniveau sollte dabei so hoch sein, dass ein Vergleich von verschiedenen Wirtsgesteinen bzw. dafür typischen geologischen Konfigurationen möglich ist.

## 2.3.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

### Randbedingungen

Bei der Bearbeitung wurde von folgenden Randbedingungen ausgegangen, deren Zweck darin besteht, die Aufgabenstellung inhaltlich sinnvoll ab- bzw. einzugrenzen:

- Ausgangspunkt der Betrachtungen war das gesamte Spektrum der in Deutschland anfallenden und endzulagernden radioaktiven Abfälle.
- In Anlehnung an Anforderungen des AKEND (2002) sowie der Sicherheitskriterien (BALTES et al. 2002) wurde von einem notwendigen Isolationszeitraum, d. h. der Zeitraum für den die Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten werden müssen, in der Größenordnung von 1 Mio. Jahre ausgegangen.
- Das geforderte Isolationsvermögen der Geosysteme bezieht sich im wesentlichen auf das radiologische Schutzziel der Endlagerung und den Menschen als Schutzgut. Andere Schutzzielvorgaben, etwa des Wasserhaushaltsgesetzes oder des Bergrechtes, wurden in diesem Einzelvorhaben nur dann berücksichtigt, wenn ein Geosystem hinsichtlich ihrer Einhaltung auffällige Besonderheiten aufweist.
- Es wurde von der zu erwartenden geologischen Entwicklung der betrachteten Geosysteme ausgegangen. Dem Restrisiko zuzuordnende natürliche Ereignisse oder Entwicklungen mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, aber möglicherweise erheblichen Auswirkungen (z. B. Meteoriteneinschlag), wurden nicht berücksichtigt.

- Technische Maßnahmen zur Erhöhung des Isolationsvermögens der Geosysteme wurden nicht berücksichtigt. Dadurch wurde gewährleistet, dass tatsächlich nur Isolationspotenziale von natürlichen Geosystemen bewertet und miteinander verglichen werden. Die bestimmungsgemäße Funktion technischer Barrieren bzw. technischer Bauwerke zur Wiederherstellung der Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere (z. B. Schachtverschluss) wurde also als gegeben vorausgesetzt.
- Die Folgen künftiger menschlicher Aktivitäten, insbesondere das Eindringen von Menschen in ein Endlager, wurden nicht betrachtet.

## Methodischer Ansatz

Die Arbeiten basieren zunächst auf einer Analyse der zugrunde liegenden Kernbegriffe Geosystem, Isolationszeitraum, Isolationspotenzial, Nachweiszeitraum. Es existieren unterschiedliche Definitionen für diese Begriffe, was bisher eine einheitliche Anwendung in der Literatur erschwert hat. Die in diesem Vorhaben erarbeiteten Definitionen werden in Tab. 5 genannt und erläutert. Die Definitionen für Isolationszeitraum und Nachweiszeitraum weichen von der üblichen Definition (siehe Glossar) ab und werden nur in diesem Kapitel verwendet.

Tab. 5: Zusammenfassende Darstellung der vier Kernbegriffe (ALBRECHT et al. 2004).

Begriff	Definition	Funktion	Merkmale / Erläuterung
Geosystem	Derjenige Bereich der Geosphäre um ein Endlager, von dem aufgrund charakteristischer Merkmale erwartet wird, dass er den Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation genügt und damit das erforderliche langzeitige Isolationsvermögens des Endlagersystems gewährleistet wird.		- Bei den charakteristischen Merkmalen handelt es sich um die geosystemspezifische Konfiguration der Gesteinskörper von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie deren funktionale Eigenschaften. -3 Hierarchieebenen: Geosystemtyp-Gruppe, Geosystemtyp, Geosystem-Subtyp
Isolationspotenzial	Spezifisches materielles Vermögen von Geosystemen, Schadstoffe für einen möglichst langen Zeitraum von der Biosphäre fernzuhalten	notwendige allgemeine Zielvorstellung: möglichst hohes Isolationspotenzial	- die materiellen Eigenschaften des Geosystems bestimmen die Wirksamkeit der Hauptelemente des Isolationspotenzials, - Hauptelemente Rückhaltewirkung u. Beständigkeit, zusätzlich Stabilität des Rückhaltevermögens, - Nachweise differenziert je nach Element.
Isolationszeitraum	Zeitraum, in dem die Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten werden müssen.	Bewertungsmaßstab	- muss als Zielgröße von Standort bzw. Geosystem erreicht werden, da ansonsten keine Langzeitsicherheit, - abgeleitet aus geowiss. Prognosemöglichkeiten und geowissenschaftlichen Plausibilitätsüberlegungen, - der Zeitraum liegt in der Größenordnung von 1 Mio. Jahre.
Nachweiszeitraum	Zeitraum, für den eine aussagekräftige Prognose über die zukünftige geologische Entwicklung eines Geosystems möglich ist.	Bewertungsgröße, zu messen an Isolationszeitraum	- der Nachweiszeitraum ist standortabhängig und kann nur für Geosysteme an konkreten Standorten ermittelt werden (Ermittlung mittels geowiss. Prognose der zukünftigen Entwicklung des Standortes bzw. des Geosystems), - der Nachweiszeitraum muss dem Isolationszeitraum entsprechen, wenn die Langzeitsicherheit gewährleistet werden soll. - die Länge des Nachweiszeitraums liegt in der Größenordnung von 1 Mio. Jahre.

Im nächsten Schritt erfolgte die Systematisierung und Charakterisierung der in Deutschland für die Endlagerung in Frage kommenden Geosysteme (Tab. 6). Der Abstraktionsgrad wurde dabei so gewählt, dass verallgemeinernde Aussagen möglich sind. Anhand des Vorhandenseins bzw. Fehlens der funktionalen

Differenzierung zwischen einschlusswirksamen Gebirgsbereich und Wirtsgestein erfolgte zunächst die Einteilung in 2 Geosystemtyp-Gruppen. Anhand des Gesteinstyps als Indikator für sicherheitsrelevante Eigenschaften erfolgte die weitere Gliederung in Geosystemtypen. Diese wurden schließlich anhand spezifischer Merkmale des Gesteinskörpers (z. B. strukturelle / petrographische) in Geosystem-Subtypen gegliedert.

Tab. 6: Systematisierung und Merkmale von Geosystemtypen in Deutschland (ALBRECHT et al. 2004).

	<b>übergeordnetes Merkmal</b>	<b>Bezeichnung / Beispiele</b>	<b>Bezeichnung / Beispiele</b>
Geosystemtyp-Gruppe	Vorhandensein bzw. Fehlen der funktionalen Differenzierung EG / WG	WG = EG (keine funktionale Differenzierung)	EG + WG (funktionale Differenzierung)
Geosystemtyp	Gesteinstyp EG (als Indikator für sicherheitsrelevante Gesteinseigenschaften)	kristalline Gesteine Ton / Tonstein (inklusive weiterer feinkörniger Sedimente / Sedimentgesteine) Steinsalz	in Deutschland nur: Ton/Tonstein (inklusive weiterer feinkörniger Sedimente / Sedimentgesteine)
Geosystem-Subtyp	spezifische (z. B. strukturelle / petrographische) Merkmale des Gesteinskörpers EG bzw. der Gesteinskörper EG und WG (Bedeutung für die Auffindung eines Geosystems und seines Isolationsvermögens)	Steinsalz - flache Lagerung - Salzkissen - Diapir  kristalline Gesteine - ohne / mit Sedimentüberdeckung - Gesteinstyp (Granit / Gneis)  Tonstein - Gebiete erhöhter Primärmächtigkeit (Sedimentbecken, Salzstock-Randsenken, synsedimentäre Grabenzonen) - Gebiete erhöhter Sekundärmächtigkeit (Kerne großräumiger Faltenstrukturen)	Grad der Umschließung des WG durch EG: - vollständig - unvollständig
weitere Untergliederungsmöglichkeiten	- Entstehungsbedingungen - Entstehungsort - Diageneseegrad - Spannungszustand - Formationszugehörigkeit - Begleitgesteine	kristalline Gesteine: z. B. alte Schilde, Varistikum Ton/Tonstein: Diageneseegrad (z. B. Ton oder Tonstein) Steinsalz: Formation (Zechstein, Oberer Buntsandstein usw.)	Diageneseegrad (z. B. Ton oder Tonstein) Gesteinstyp WG (z. B. Mergelstein, Kalkstein, Sandstein, Sonderfazies) Entstehung geol. Strukturen
EG: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich		WG: Wirtsgestein	

Einen Eindruck von den schematischen Lagerungsverhältnissen der Geosystem-Subtypen vermitteln die Abb. 3 bis Abb. 7.

Folgende Geosystem-Subtypen werden im Folgenden weiter untersucht:

- Steinsalz, flache Lagerung (Abb. 3)
- Steinsalz, Salzkissen (nicht dargestellt)
- Steinsalz, Salzdiapir (Abb. 4)
- kristalline Gesteine (Abb. 5)
- Tonstein (Abb. 6)

- Tonstein + WG,- WG vollständig von Tonstein umschlossen (Abb. 7, oben)
- Tonstein + WG,- WG nicht vollständig von Tonstein umschlossen (Abb. 7, unten)

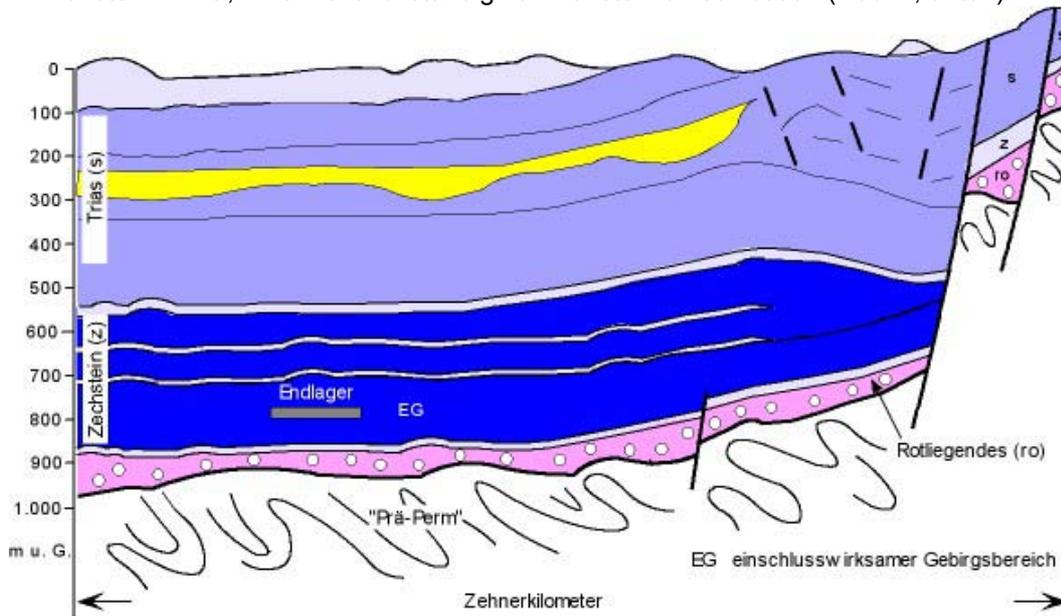


Abb. 3: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystem-Subtyp Steinsalz, flache Lagerung, überhöht (GRUNDFELT et al. 2005)

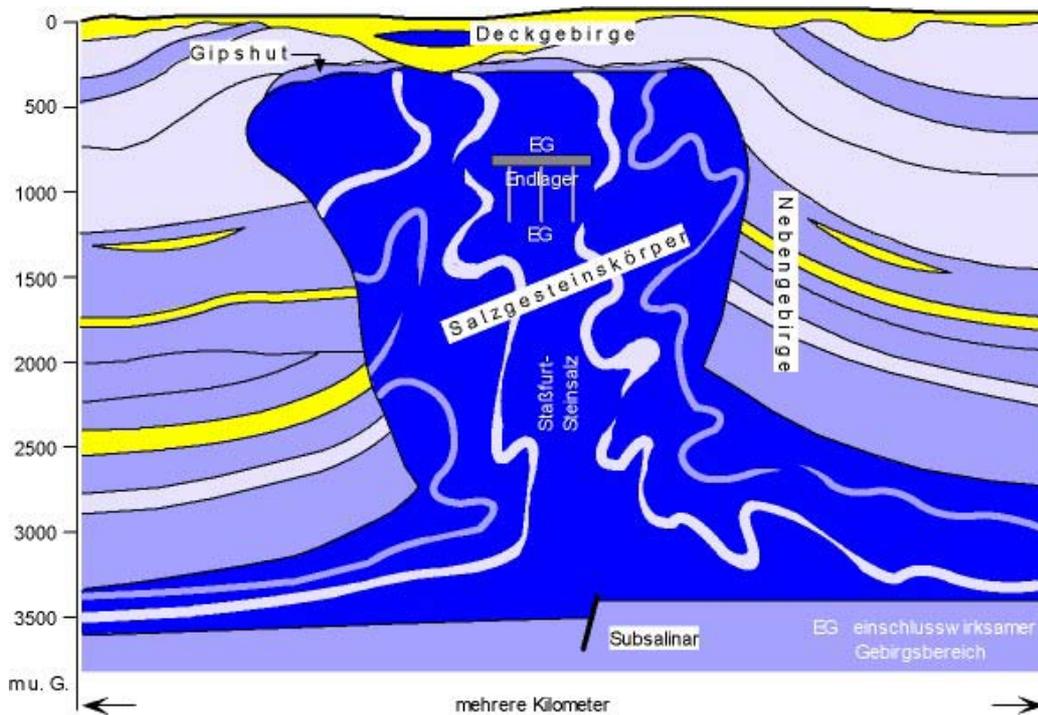


Abb. 4: Schematischer Querschnitt durch den Geosystem-Subtyp Steinsalz, Salzdiapir (Mächtigkeit der Schichten, insbesondere im Salzgesteinskörper, nicht maßstabsgerecht; GRUNDFELT et al. 2005).

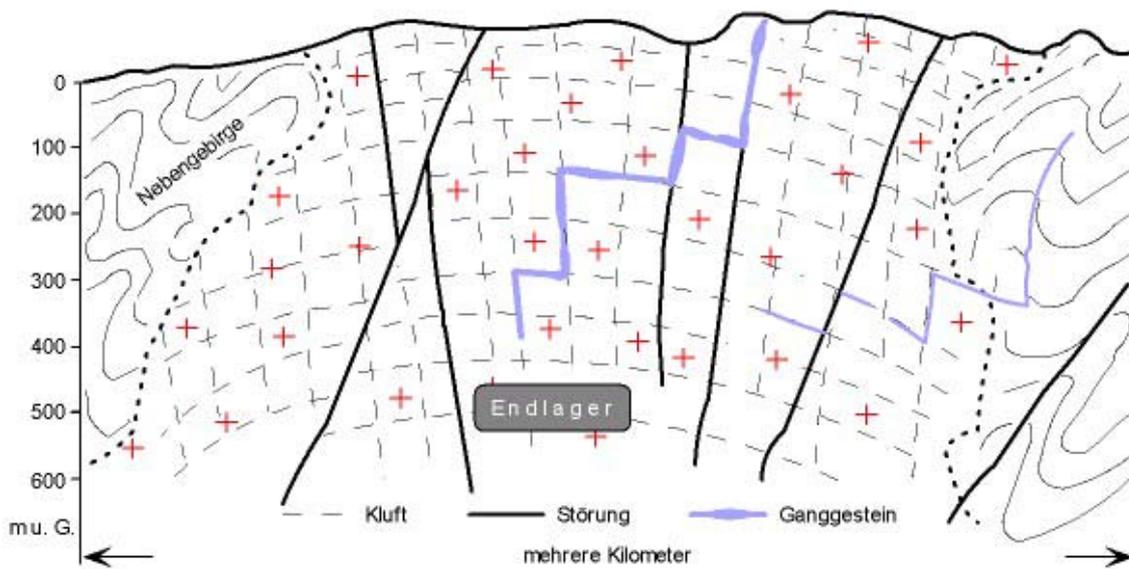


Abb. 5: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystemtyp kristalline Gesteine (überhöht, GRUNDFELT et al. 2005).

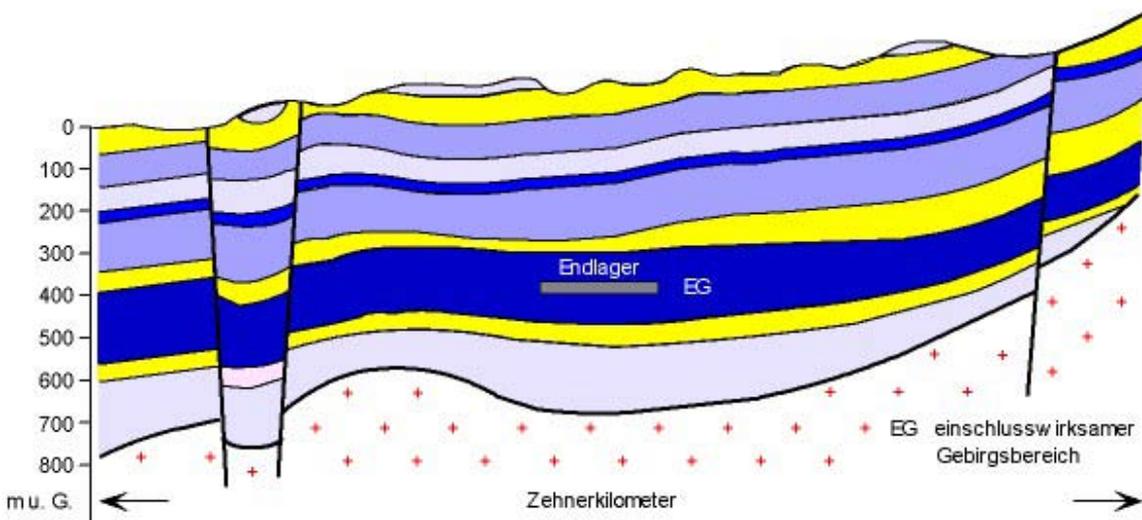


Abb. 6: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystemtyp Tonstein (überhöht; GRUNDFELT et al. 2005).

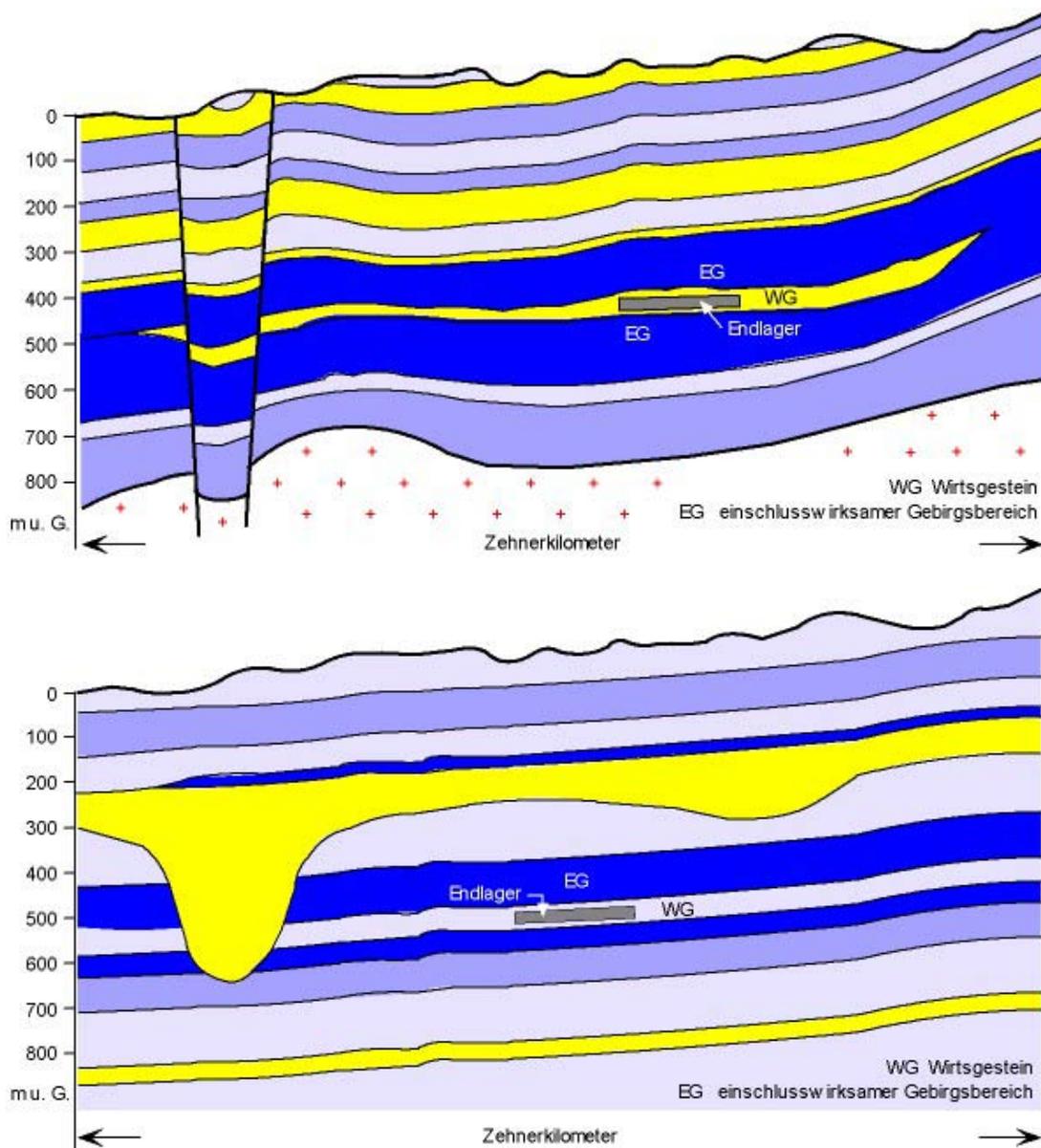


Abb. 7: Schematischer Vertikalschnitt durch den Geosystem-Subtyp Tonstein + WG,- WG vollständig von Tonstein umschlossen (oben) und nicht vollständig von Tonstein umschlossen (unten) (überhöht; GRUNDFELT et al. 2005).

Der nächste Schritt umfasste die Analyse der das Isolationspotenzial und den Nachweiszeitraum bestimmenden geologischen Faktoren. Dabei wurde auf das international im Rahmen von Szenarienanalysen eingeführte Konzept der FEP zurückgegriffen. Einflüsse können kurzzeitige Ereignisse (events) oder lange dauernde Prozesse (processes) sein. Durch ihr Auftreten bzw. die Intensität ihres Ablaufs können sie zur Veränderung sicherheitsrelevanter Merkmale (features) von Geosystemen führen. Folgende Gruppen von Einflussfaktoren wurden ermittelt:

- Geo- und hydrogeologische Prozesse und Effekte (z. B. Erosion, Sedimentation, Diapirismus, Tektonik)
- Klimatische Prozesse und Effekte (z. B. Extraterrestrische Wärmeenergie, Vereisung, Trockenklima)
- Sonstiges (Meteoriteneinschlag)

Aufbauend auf diesen methodischen Vorarbeiten war ein Bewertungssystem für die Beurteilung von Isolationspotenzialen und Nachweiszeiträumen zu entwickeln.

## Isolationspotenzial

Das Isolationspotenzial beinhaltet gemäß Definition eine materielle und eine zeitbezogene Komponente. Die Beurteilung beider Komponenten betrifft den an den äußeren Eigenschaften bzw. Merkmalen ablesbaren Zustand bzw. Entwicklungsstand von Geosystemen zum Zeitpunkt der Beurteilung bzw. der in die Beurteilung einfließenden Informationserhebung. Zeitliche Aussagen über die Dauer der Funktionstüchtigkeit von Geosystemen ergeben sich daraus nicht.

Das materielle Isolationsvermögen setzt sich aus den Elementen Rückhaltevermögen und Beständigkeit zusammen, für deren Beurteilung unterschiedliche Kriterien abgeleitet wurden. Die Kriterien zum Rückhaltevermögen beziehen sich dabei auf die barrierewirksamen Merkmale von Geosystemtypen, einschließlich deren Beschreibbarkeit. Die Kriterien zur Beständigkeit beziehen sich auf das ebenfalls aus bestimmten materiellen Merkmalen ableitbare Potenzial von Geosystemtypen, auf künftige Einflüsse so zu reagieren, dass sich keine für das Rückhaltevermögen kritischen Auswirkungen ergeben. Zur Beständigkeit gehört zudem die Prognostizierbarkeit der künftigen Entwicklung eines Geosystems. Die Prognose künftiger Ereignisse und Prozesse und die Beurteilung ihrer Auswirkungen auf das Rückhaltevermögen von Geosystemtypen wurden von den Autoren jedoch nicht als Teil der Bestimmung der Beständigkeit gesehen. Da jedoch nicht davon auszugehen ist, dass die Auswirkungen künftiger Ereignisse und Prozesse auf das Isolationspotenzial bei allen für die vergleichende Beurteilung ausgewählten Geosystemtypen übereinstimmen, können sich bewertungs- oder auswahlrelevante Unterschiede ergeben. Daher wurde für die Beurteilung der zeitbezogenen Komponente des Isolationspotenzials verschiedener Geosysteme ein zusätzliches Merkmal eingeführt und dafür Kriterien definiert. Zur Vermeidung von Verwechslungen mit dem auf den Status quo bezogenen Rückhaltevermögen wurde dazu der Begriff Stabilität des Rückhaltevermögens (gegenüber künftigen Ereignissen und Prozessen) geprägt.

Die (vergleichende) Beurteilung von Geosystemtypen im Hinblick auf ihre materiellen Eigenschaften mit Bedeutung für das Isolationspotenzial setzt sich somit aus folgenden Bewertungssträngen zusammen:

- Beurteilung des Isolationspotenzials auf Basis des gegenwärtigen Zustands der Geosystemtypen differenziert nach Rückhaltevermögen und Beständigkeit,
- Beurteilung der Stabilität des Rückhaltevermögens gegenüber den Auswirkungen künftiger Ereignisse und Prozesse.

Diese Beurteilungen erfolgen mit Hilfe von gewichteten Kriterien (siehe Tab. 7 und Tab. 8). Die Ergebnisse der Einzelbeurteilungen wurden schrittweise zu einer Gesamtaussage zusammengeführt.

Die Stabilität des Rückhaltevermögens von Geosystemtypen gegenüber den Auswirkungen künftiger Ereignisse und Prozesse ist nicht nur von den unterschiedlichen sicherheitsbezogenen Merkmalen der Geosystemtypen und ihrer standortbezogenen Ausprägung abhängig, sondern in erster Linie von den Auswirkungen der innerhalb des Isolationszeitraums von etwa einer Mio. Jahre auf sie einwirkenden Ereignisse und Prozesse. Deren Auftreten und Intensität ist von den Eigenschaften etwa betroffener Geosystemtypen unabhängig. Art und Grad der Auswirkungen sind sowohl von Art und Intensität der Ereignisse und Prozesse als auch von den charakteristischen Merkmalen der Geosystemtypen und insbesondere ihrer standortspezifischen Ausprägung abhängig.

Eine vergleichende Beurteilung verschiedener Geosystemtypen im Hinblick auf die Stabilität ist demnach nur möglich, wenn vorab bestimmte Festlegungen zu den Rahmenbedingungen der Beurteilung getroffen werden und zwar im Hinblick auf

- die in die Beurteilung einfließenden künftigen Ereignisse und Prozesse und deren Auswirkungen,
- die der vergleichenden Beurteilung zugrunde liegende standardisierte standortbezogene Ausprägung der betrachteten Geosystemtypen.

Zur Ableitung von Kriterien für die vergleichende Beurteilung der Stabilität des Rückhaltevermögens von Geosystemtypen waren daher zunächst folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Auswahl der (vergleichenden) Bewertung zugrunde zu legenden Ereignisse und Prozesse,
- Bestimmung von Art und Intensität ihrer Einwirkung auf die Geosystemtypen,
- Festlegung von standardisierten Rahmenbedingungen für alle Geosystemtypen durch ein bestimmtes Sicherheitsniveau.

Mit Hilfe der Kriterien (siehe Tab. 7) war zu prüfen, ob bzw. wie weit das geforderte Sicherheitsniveau von den standardisierten Geosystemtypen bei Einwirkung der festgelegten Ereignisse und Prozesse erhalten bleibt.

Für die vergleichende Beurteilung der Stabilität des Rückhaltevermögens von Geosystemtypen sind nur diejenigen Ereignisse und Prozesse bedeutsam,

- mit deren Auftreten in Deutschland innerhalb des Isolationszeitraums überhaupt zu rechnen ist,
- die eine für das Rückhaltevermögen kritische Intensität bzw. ein kritisches Ausmaß erreichen können und
- die nicht bereits durch Standortauswahl vermieden werden.

Danach sind beispielsweise die Konsequenzen starker Erdbeben oder von Vulkanismus nicht zu betrachten. Allerdings bleibt für solche Ereignisse und Prozesse zu prüfen, ob etwaige Fernauswirkungen die Funktionalität eines Geosystems bzw. Geosystemtyps beeinträchtigen können.

Tab. 7: Kriterien für die Merkmale Rückhaltevermögen und Beständigkeit des Isolationspotenzials (ALBRECHT et al. 2004).

<b>Kriterien Rückhaltevermögen</b>	<b>Gewichtungsgruppe</b>
<b><i>günstige hydraulische Eigenschaften EG</i></b>	
geringe Gebirgsdurchlässigkeit	1
geringe Diffusionsgeschwindigkeit	1
<b><i>günstige Konfiguration</i></b>	
große Mächtigkeit EG	1
große flächenhafte Ausdehnung EG	1
günstige Anordnung EG / WG	1
<b><i>gute räumliche Charakterisierbarkeit EG</i></b>	
Eigenschaften gleichmäßig verteilt	1
einfacher Bauplan	1
<b><i>hohes Sorptionsvermögen EG</i></b>	
günstiger Mineralbestand	2
<b><i>günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen WG</i></b>	2
<b><i>gute Gasverträglichkeit des Geosystems</i></b>	
geringes Wasserangebot	3
Verhinderung Druckaufbau	3
<b>Kriterien Beständigkeit</b>	
<b><i>gute Prognostizierbarkeit GS</i></b>	
System ohne Eigendynamik	1
geringe Empfindlichkeit gegenüber exogenen Prozessen	1
<b><i>geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten EG</i></b>	2
<b><i>gute Temperaturverträglichkeit WG</i></b>	
<b><i>gute Temperaturstabilität</i></b>	3
geringe thermisch induzierte Sekundärpermeabilität	3
EG = einchlusswirksamer Gebirgsbereich; WG = Wirtsgestein; GS = Geosystem	

Tab. 8: Kriterien für die Stabilität des Rückhaltevermögens (ALBRECHT et al. 2004).

Kriterien Stabilität des Rückhaltevermögens (auf Grundlage des Standard-Sicherheitsniveaus)	Gewichtungsgruppe
Es sollte keine über die mit dem definierten Sicherheitsniveau verbundene Erosion von Deckschichten hinausgehende materielle Gefährdung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eintreten.	1
Die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte sich als Folge erosionsbedingter Entlastung nicht erhöhen.	1
Die Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte durch Änderungen des Spannungsfeldes der Erdkruste, die auf der Fernwirkung tektonischer Vorgänge beruhen, nicht beeinträchtigt werden.	2

Für die Erfüllung der Kriterien Rückhaltevermögen, Beständigkeit und Stabilität des Rückhaltevermögens erfolgte jeweils ein relativer Vergleich in drei Bewertungsgruppen (a relativ günstiger als b, b relativ günstiger als c). Bei der anschließenden Aggregation der Einzelbewertungen zu einer Gesamtbewertung des Isolationspotenzials fanden in erster Linie die Kategorien der Gewichtungsgruppe 1 Anwendung.

#### Nachweiszeitraum

Bei der Bestimmung von Nachweiszeiträumen ist mittels der Methode der geowissenschaftlichen Prognose der Zeitraum zu bestimmen, für den begründete Aussagen zur Entwicklung eines Geosystems möglich sind. Da dieser Zeitraum nicht direkt ermittelt oder abgelesen werden kann, muss er indirekt aus zeitabhängigen Merkmalen oder Eigenschaften des Geosystems erschlossen werden. Dazu wurden folgende Merkmale gewählt:

- materielle Existenz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als umfassendes Merkmal,
- die Konfiguration (zu klären ist, für welche Zeiträume die Konfiguration des betrachteten Geosystems, soweit sie Bedeutung für das Isolationspotenzial hat, bestehen bleibt),
- funktionsbezogene Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit, effektive Porosität, Sorptionsvermögen usw.). Es ist zu prognostizieren, für welche Zeiträume die günstigen isolationsbedingenden Eigenschaften bestehen bleiben.

Aus den Merkmalen lassen sich direkt keine Prognosen zur künftigen Entwicklung dieser Merkmale ableiten. Den zukünftigen Veränderungen der Merkmale liegen vielmehr langfristig wirkende Prozesse und kurzfristige Ereignisse zugrunde. Auftreten, Stärke und Dauer der Einwirkungszeit der Ereignisse und Prozesse bestimmen das Ausmaß der Änderungen. Die Prozesse entsprechen jenen, die auch als Einflussfaktoren bei der Beurteilung des Isolationspotenzials zugrunde gelegt wurden.

Im dargestellten Sinne bilden Nachweiszeitraum und Isolationszeitraum ein eigenständiges Bewertungssystem zur Beurteilung von Geosystemen. Dabei bildet nach ALBRECHT et al. (2004) im Gegensatz zu der im Glossar verwendeten Definition der Isolationszeitraum den Bewertungsmaßstab (normative Vorgabe), an dem der jeweilige Nachweiszeitraum als Bewertungsgröße zu messen ist. Dieses Bewertungssystem ermöglicht nach Meinung der Autoren sowohl die relative Bewertung von Geosystemen als auch ihre absolute Bewertung:

- Die relative Bewertung besteht darin, für jedes Geosystem die Länge des spezifischen Nachweiszeitraumes zu ermitteln. Damit können verschiedene Geosysteme in verschiedenen standortspezifischen Aus-

prägungen einem Ranking unterworfen werden. Es schneiden die Geosysteme besser ab, deren Nachweiszeiträume relativ länger sind.

- Die absolute Bewertung besteht darin, die ermittelten Nachweiszeiträume am Isolationszeitraum zu messen. Geosysteme, deren Nachweiszeiträume kleiner sind als der Isolationszeitraum, weisen keine ausreichende Langzeitsicherheit auf.

### 2.3.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Voraussetzung für die Bestimmung von Nachweiszeiträumen und Isolationspotenzialen der in Deutschland für die Endlagerung in Frage kommenden Geosysteme sind aussagekräftige geowissenschaftliche Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Geosysteme. Diese Prognosen müssen wissenschaftlichen Ansprüchen genügen und die sachgerechte Umsetzung des Aktualismusprinzips gewährleisten.

#### Ableitung von Nachweiszeiträumen

Bei der Ableitung von Nachweiszeiträumen für Geosysteme beziehen sich die Prognosen vorrangig auf die Ermittlung der Zeiträume, für die belastbare Aussagen zur Entwicklung der Geosysteme möglich sind. Die Aussagekraft von Prognosen und die Zeiträume hängen entscheidend von den für das jeweilige Geosystem gültigen standortspezifischen Verhältnissen ab. Deshalb sind für gleiche Geosysteme unterschiedlich lange Nachweiszeiträume möglich. Seine Länge kann weder im strengen Sinne nachgewiesen werden, noch ist die zeitliche Begrenzung methodisch exakt begründbar. Allerdings sprechen geowissenschaftliche Kenntnisse und Plausibilitätsüberlegungen für die festgelegte Größenordnung.

Im Rahmen dieses Vorhabens hat sich gezeigt, dass die Ableitung von Nachweiszeiträumen für Geosysteme wegen ihrer Abhängigkeit von standortspezifischen Bedingungen, insbesondere auch von den Auswirkungen der auf die Geosysteme einwirkenden Ereignisse und Prozesse, auf der abstrakten Ebene der Geosystemtypen nicht möglich ist. Auch ein generischer Ansatz auf Grundlage standardisierter Standortbedingungen führte nicht zu verwertbaren Ergebnissen.

Es wurde eine Vorgehensweise zur Ableitung von Nachweiszeiträumen für konkrete Geosysteme unter Berücksichtigung ihrer standortspezifischen und regionalgeologischen Verhältnisse erarbeitet. Mit den danach ermittelten Nachweiszeiträumen sollen einzelne Geosysteme mit Blick auf die Langzeitsicherheit untereinander und absolut bewertet werden können. Ein entsprechendes Bewertungssystem wurde vorgeschlagen.

#### Ableitung von Isolationspotenzialen

Im Ergebnis der Bewertung der sieben in Deutschland für die Endlagerung in Frage kommenden Geosystem-Subtypen zeigte sich, dass der Geosystemtyp kristalline Gesteine eine wichtige Mindestanforderung nicht erfüllt. Er wurde zu Vergleichszwecken trotzdem in die Bewertung der Isolationspotenziale der Geosysteme anhand von Abwägungskriterien einbezogen. Bei diesem Vergleich schneiden die Geosystem-Subtypen Tonstein und Tonstein + WG (vollständig umschlossen) von allen betrachteten Geosystemen am besten ab. Sie weisen bei den wichtigen Kriterien der Gewichtungsgruppe 1 jeweils sechs bzw. fünf günstige Bewertungen und keine ungünstige Bewertung auf. Es folgt der Geosystem-Subtyp Steinsalz (flache Lagerung) mit sieben günstigen, aber auch zwei ungünstigen Bewertungen. Etwas ungünstiger bewertet wurde der Geosystem-Subtyp Steinsalz (Salzkissen) mit sechs günstigen Bewertungen, denen aber auch drei un-

günstige Bewertungen gegenüber stehen. Ähnlich bewertet wurde der Geosystem-Subtyp Steinsalz (Salzdiapir). Er weist zwar sechs günstige Bewertungen auf, ihnen stehen aber vier ungünstige Bewertungen gegenüber. Am schlechtesten bewertet wurden die Geosystem-Subtypen Tonstein + WG (unvollständig umschlossen) und - außer Konkurrenz - kristalline Gesteine. Sie weisen jeweils vier günstige bei gleichzeitig zwei bzw. drei ungünstigen Bewertungen auf.

Aus den Ergebnissen des Vorhabens, insbesondere der vergleichenden Beurteilung des Isolationspotenzials der Geosystem-Subtypen und zu den Möglichkeiten der geowissenschaftlichen Prognose, leiten die Autoren folgende weitergehende Aussagen ab:

Das ideale Geosystem, das alle Anforderungen am besten erfüllt und bei allen zugehörigen Kriterien am besten abschneidet, gibt es nicht. Dasselbe gilt im Hinblick auf das Gegenteil, also die durchgängig schlechteste Erfüllung von Anforderungen. Alle betrachteten Geosystem-Subtypen weisen vielmehr gegenüber den jeweils anderen Typen bei einzelnen Eigenschaften gewisse Vorteile und Nachteile auf. Aus der Häufung bzw. dem Fehlen von Vor- und Nachteilen ergeben sich allerdings auf der Basis des angewandten Bewertungssystems deutliche Unterschiede im Hinblick auf das Isolationspotenzial der einzelnen Geosystem-Subtypen und die Stabilität ihres Rückhaltevermögens. Die Auseinanderersetzung mit der charakteristischen Ausprägung bestimmter Eigenschaften erlaubt zusätzlich Aussagen dazu, ob die Geosystem-Subtypen im Hinblick auf ihre Aufsuchung und Erkundung eher Vorteile oder Nachteile aufweisen.

Geht man von dem in Deutschland verfolgten Endlagerkonzept aus, bei dem die Langzeitsicherheit hauptsächlich auf dem Sicherheitsbeitrag der geologischen Barrieren beruht, so scheidet der Geosystemtyp kristalline Gesteine als Option für die Endlagerung wahrscheinlich aus. Hintergrund dieser Einschätzung sind letztlich die charakteristischen mechanischen Eigenschaften der kristallinen Gesteine, die sich insbesondere in den ungünstigen hydraulischen Eigenschaften äußern. Die Mindestanforderung des AkEnd zur Gebirgsdurchlässigkeit wird nicht eingehalten. Nach den über die Kristallinvorkommen in Deutschland vorliegenden Informationen ist es zwar nicht ausgeschlossen, jedoch sehr unwahrscheinlich, dass ein Gesteinskörper gefunden werden kann, der günstige hydraulische Eigenschaften oder ersatzweise die wegen der hohen Durchlässigkeit unerlässliche große Ausdehnung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aufweist. Die Verfolgung der Endlagerung in kristallinen Gesteinen würde eine gravierende Veränderung des deutschen Endlagerkonzeptes voraussetzen, indem das Gewicht erheblich stärker auf den Sicherheitsbeitrag technischer und geotechnischer Barrieren als den der geologischen Barrieren gelegt würde.

Die beiden Geosystem-Subtypen Tonstein und Tonstein + WG (vollständig umschlossen) schneiden am relativ besten von allen betrachteten Geosystem-Subtypen ab. Diese Beurteilung beruht auf der Kombination aus überwiegend günstigen Bewertungen und dem Fehlen ungünstiger Beurteilungen. Die positiven Bewertungen betreffen sowohl die barrierewirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches als auch konfigurative Eigenschaften, die Prognostizierbarkeit und die Beständigkeit. Im Hinblick auf die Auffindung geeigneter Geosysteme bestehen allerdings zwischen beiden deutliche Unterschiede:

Die Funktionstüchtigkeit individueller Geosysteme des Geosystem-Subtyps Tonstein wird weitgehend von den barrierewirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aufbauenden Gesteinskörpers bestimmt. Konfigurative Fragen beziehen sich im Wesentlichen auf dessen, mit bewährten Erkundungsmethoden zuverlässig erhebbare Mächtigkeit. Die Unsicherheiten in der Beurteilung der konfigurativen Eigenschaften einzelner Geosysteme sind daher gering. Bewertungsunsicherheiten oder gar Fehleinschätzungen können daher am ehesten aus unzureichender Kenntnis der barrierewirksamen Eigenschaften des Geosystem-Subtyps Tonstein oder der Gesteinsausbildung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches an einem bestimmten Standort resultieren. Sie müssen sorgfältig erhoben werden.

Der Geosystem-Subtyp Tonstein + WG (vollständig umschlossen) entspricht dem konfigurativen Optimum; denn im Idealfall können sowohl Wirtsgestein als auch einschlusswirksamer Gebirgsbereich ihre funktionalen Aufgaben besonders gut erfüllen. Allerdings ist bei diesem Geosystem-Subtyp aufgrund des komplexeren Bauplans mit Problemen beim Nachweis zu rechnen, da der Wirtsgesteinskörper eines Geosystems tatsächlich vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen ist. Mindestens dürfte der Aufwand erheblich sein. Es ist zudem offen, ob Geosysteme dieses positiv bewerteten Typs überhaupt gezielt aufgesucht werden können. Über diese Punkte hinaus sind bei den Geosystem-Subtypen Tonstein

und Tonstein + WG (vollständig umschlossen) keine günstigen Standortverhältnisse – etwa zum Ausgleich ungünstiger Eigenschaften des Geosystem-Subtyps – erforderlich. Günstige Standortverhältnisse tragen bei diesen Geosystem-Subtypen vielmehr zur Erhöhung des charakteristischen Isolationsvermögens und zur Robustheit des Endlagersystems bei.

Die relativ ungünstige Beurteilung des Geosystem-Subtyps Tonstein + Wirtsgestein (unvollständig umschlossen) beruht u. a. auf den konfigurationsbezogenen Merkmalen, dem tendenziell eher kompliziertem Bauplan und der unvollständigen Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Bei diesem Geosystem-Subtyp ist deshalb - ähnlich wie beim Typ Tonstein + Wirtsgestein (vollständig umschlossen) der Nachweis der genauen konfigurativen Verhältnisse aufwendig. Wegen der funktional unterschiedlichen Eigenschaften von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich bei nur unvollständiger Umschließung kann eine günstige geologische Gesamtsituation allein aus den Eigenschaften der beteiligten Gesteinskörper und ihre Konfiguration nicht abgeleitet werden. Vielmehr müssen zusätzlich günstige hydraulische und hydrochemische Standortverhältnisse gegeben sein.

Die Beurteilung des Isolationspotenzials der drei Geosystem-Subtypen mit Steinsalz wird dadurch geprägt, dass Steinsalz im Hinblick auf die langzeitige Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowohl positive und negative Eigenschaften aufweist. Charakteristisch für Steinsalz ist dabei, dass die Eigenschaften jeweils im extremen Bereich liegen, d. h. sie sind sehr positiv wie die sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit oder sehr negativ wie die Wasserlöslichkeit. Diese extreme Differenzierung führt auf der Basis des angewendeten Bewertungssystems letztlich dazu, dass Geosysteme mit Steinsalz – anders als Tonstein und Tonstein + WG (vollständig umschlossen) - nicht per se einer günstigen geologischen Gesamtsituation entsprechen. Vielmehr müssen Eigenschaften hinzukommen, die den Steinsalzkörper gegen seine (teilweise) Auflösung schützen und damit verbundene direkte und indirekte Sicherheitseinbußen vermeiden. In dieser Hinsicht weisen die Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung Vorteile gegenüber Salzstöcken auf. Salzgesteinsvorkommen mit diesen Eigenschaften kommen in Deutschland vor und können mit geeigneten Verfahren gezielt aufgesucht und erkundet werden.

Bei den Geosystem-Subtypen Steinsalz (Salzkissen) und insbesondere Steinsalz (Salzdiapir) sind im Gegensatz zum Typ Steinsalz in flacher Lagerung konfigurative Gesichtspunkte zu berücksichtigen, da Steinsalz in halokinetisch oder halotektonisch beanspruchten Salzstrukturen gemeinsam mit Gesteinstypen vorkommt, die im Hinblick auf die sichere Endlagerung ungünstige Eigenschaften aufweisen (Salzton, Anhydrit, Kalisalze). Im Laufe eines Standortauswahlverfahrens und der Eignungsprüfung kann dieser konfigurative Aspekt allerdings erst sehr spät im Zuge der untertägigen Erkundung abschließend beurteilt werden.

Die geowissenschaftliche Prognose ist unverzichtbares Werkzeug zur Beurteilung der Langzeitsicherheit von Geosystemen bzw. Endlagern. Deshalb müssen die Prognosen mit großer Sorgfalt sowie unter Einhaltung der methodischen Anforderungen und unter Beachtung ihrer Möglichkeiten und Grenzen erarbeitet werden.

Die Länge des Isolationszeitraumes wird durch die methodischen Grenzen der Prognose eingeschränkt. Rein methodisch sind auch Isolationszeiträume von 1 Mio. Jahren möglich. Allerdings müssen dazu günstige Voraussetzungen vorliegen. Die Neotektonik bzw. das Konzept des dynamischen Gleichgewichts bieten zusätzliche Ansatzpunkte zur Begründung des Zeitraums, für den aussagekräftige geowissenschaftliche Prognosen möglich sind. Sie liefern auch Hinweise auf das Verhältnis zwischen dem Zeitraum in der Vergangenheit für den aufgrund gesicherter Belege die geologische Entwicklung sehr genau bekannt ist (Belegzeitraum) und dem zu prognostizierendem Zeitraum. Unter konkreten mitteleuropäischen Bedingungen ergeben sich danach Belegzeiträume von ca. 10 Mio. Jahre. Auf dieser Grundlage wird ein maximal prognostizierbarer Zeitraum in der Größenordnung von ca. 1 Mio. Jahre als möglich angesehen. Eine rechnerische Abschätzung auf Grundlage realer mitteleuropäischer Hebungs- bzw. Abtragungsraten stützt den Zeitraum von 1 Mio. Jahren. Allerdings gilt allgemein, dass mit wachsendem Prognosezeitraum die Aussagesicherheit abnimmt.

## 2.4 SICHERHEITSINDIKATOREN

### Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern radioaktiver Abfälle

Auftragnehmer: *Kemakta Konsult AB*  
*JA Streamflow AB*

Zitat: JONES, WIBORGH & ANDERSSON (2004)

### 2.4.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Wesentlicher Bestandteil einer Sicherheitsanalyse für ein Endlager für radioaktive Abfälle ist der Nachweis seiner Langzeitsicherheit. Wesentlicher Bestandteil dieses Nachweises, der nach BALTES et al. (2002) als das Zusammenführen von Argumenten und Analysen des Endlagersystems zum Nachweis seiner Sicherheit und zum Vertrauen in den Nachweis zu verstehen ist (safety case), ist die Langzeitsicherheitsanalyse. Zur Beurteilung der Analyse ist die Aufstellung eines Bewertungssystems erforderlich. Dieses Bewertungssystem setzt sich zusammen aus den Schutzziele als Bewertungskriterium und den Sicherheitsindikatoren als Bewertungsgröße. Angewendet wird dieses Bewertungssystem auf das Schutzgut (Mensch, Umwelt). Das allgemein für die Endlagerung formulierte Schutzziel ist:

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle muss den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt heute und in der Zukunft sicherstellen (HERRMANN & RÖTHEMEIER 1998).

Neben dem radiologischen Schutzziel ist auch ein ethisches Erfordernis für eine langfristig sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle einzuhalten:

Sorge dafür zu tragen, dass zukünftigen Generationen keine unzumutbaren Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden.

Die Langzeitsicherheitsanalyse anhand des oben genannten Bewertungssystems erfolgt national wie international üblicherweise mit der Methodik der rechnerischen Simulation einer potenziellen Schadstoffausbreitung aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre und der daraus resultierenden Strahlenexposition der Bevölkerung. Diese Modellrechnungen basieren auf einer Beschreibung der möglichen zukünftigen Entwicklungszustände des Endlagersystems. Dabei werden sowohl die natürlichen, wie auch die durch das Endlager hervorgerufenen FEP und ggf. ihre Kopplung berücksichtigt (Szenarienanalyse). Es werden verschiedene Szenarien (Fälle) u. a. auch mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten (erwartete Entwicklungen, außergewöhnliche Entwicklungen, What-If-Fälle) berücksichtigt.

Während die o. a. Schutzziele allgemein formuliert werden können, stellt die Auswahl der Bewertungsgrößen ein methodisches Problem dar. Aufgrund der mit dem Prognosezeitraum wachsenden Unsicherheit der berechneten Ergebnisse sind diese nicht als Prognosewerte anzusehen, sondern als Indikatoren. Insbesondere die Berechnung von potenziellen Strahlenexpositionen, die aus der Freisetzung radioaktiver Stoffe an die Umgebung in tausenden von Jahren oder in noch fernerer Zukunft resultieren können, bei der in der Regel von den derzeitigen Lebensgewohnheiten der Menschen ausgegangen wird, weist große Unsicherheiten auf. Jegliche Prognose über die Lebensgewohnheiten in ferner Zukunft hätte spekulativen Charakter. Derartige Berechnungen werden daher lediglich zur Veranschaulichung der Dosen angestellt, die bei den heutigen Randbedingungen zu erwarten wären. Somit werden die durch die Berechnungen ermittelten langfristigen radiologischen Auswirkungen von Endlagern normalerweise als Sicherheitsindikatoren angesehen, die mit den geltenden Sicherheitsstandards verglichen werden können (NEA 1991). Grundsätzlich können verschiedene Indikatoren zur Beurteilung der Einhaltung des Schutzzieles herangezogen werden. Bestimmte Indikatoren (z. B. Konzentrationen) können vergleichsweise sicher berechnet werden, wohingegen andere Indikatoren (z. B. die Kollektivdosis) großen, methodisch bedingten Unsicherheiten unterliegen. Die IAEA hat u. a. zur Erhöhung des Vertrauens in die Sicherheitsbewertung empfohlen, die gängigen Indi-

katoren Risiko bzw. Dosis durch weitere Sicherheitsindikatoren zu ergänzen, die von weniger Annahmen abhängen (IAEA 2001a).

Sicherheitsindikatoren können auch auf Naturbeobachtungen beruhen, die im Rahmen der Vertrauensbildung in die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsbewertungen einfließen. Hier bestehen Verknüpfungen zu Naturbeobachtungen, die als natürliche Analoga in den Langzeitsicherheitsnachweis (safety case) einfließen.

Ziel der Untersuchungen in dieser sicherheitstechnischen Einzelfrage war es daher, die geläufigen Sicherheitsindikatoren Individualdosis und Individualrisiko durch weitere und ggf. neue Indikatoren zu ergänzen. Diese komplementären Sicherheitsindikatoren waren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für verschiedene Nachweiszeiträume zu beurteilen. Besonderes Augenmerk gilt dabei jener Zeitspanne, jenseits derer die Modellannahmen unsicher werden und somit keine verlässlichen Ergebnisse mehr liefern. Die identifizierten Sicherheitsindikatoren waren zu beschreiben und dahingehend zu bewerten, wie weit diese zur Anhebung des Vertrauensniveaus in Aussagen zur Sicherheit für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle geeignet sind.

## 2.4.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

### Randbedingungen

Bei der Bearbeitung wurde von folgenden Randbedingungen ausgegangen, deren Zweck darin bestand, die Aufgabenstellung inhaltlich sinnvoll ab- bzw. einzugrenzen:

- Die Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgte unter Berücksichtigung der in Deutschland für die Endlagerung grundsätzlich in Frage kommenden Geosysteme (Salz in steiler und flacher Lagerung, kristalline Gesteine, Ton- Tonstein, sonstiges standfestes Wirtsgestein unter Tonbedeckung).
- Die untersuchten Sicherheitsindikatoren sollen für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle gelten (Ein-Endlager-Konzept).
- Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung war die in Deutschland für die Endlagerung festgelegte Prämisse der Priorität von geologischen Barrieren (vor technischen) zu berücksichtigen.
- In Rahmen der Aufgabenstellung waren Indikatoren für verschiedene zeitliche und räumliche (Nah-, Fernfeld) Geltungsbereiche abzuleiten.
- In Anlehnung an Anforderungen des AkEnd sowie der Sicherheitskriterien wurde von einem notwendigen Isolationszeitraum, d. h. der Zeitraum für den die Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten werden müssen, in der Größenordnung von 1 Mio. Jahre ausgegangen.
- Die abzuleitenden Sicherheitsindikatoren sollen sich schwerpunktmäßig auf das radiologische Schutzziel der Endlagerung und den Menschen als Schutzgut beziehen. Andere Schutzzielvorgaben, etwa des Wasserhaushaltsgesetzes (s. Kap. 2.6) oder des Bergrechtes (z. B. Senkungen an der Tagesoberfläche), waren nachrangig zu berücksichtigen.
- Die Folgen künftiger menschlicher Aktivitäten, insbesondere das Eindringen von Menschen in ein Endlager, wurden nicht betrachtet. Sie sollten in einer gesonderten Einzelfrage untersucht werden (s. Kap. 2.9)

## Methodischer Ansatz

Der Aufgabenstellung lag eine umfassende Recherche in verschiedenen Sicherheitsanalysen für verschiedene Endlager radioaktiven Abfalls zu Grunde. Das Ergebnis der Recherche ergab eine Zusammenstellung von Angaben zur Herleitung, Präsentation und Anwendung von Sicherheitsindikatoren in Sicherheitsstudien zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Diese Angaben wurden hauptsächlich siebzehn Sicherheitsstudien für Entsorgungskonzepte in neun Ländern entnommen (Tab. 9). Des Weiteren erfolgte die Auswertung des international zum Thema Sicherheitsindikatoren verfügbaren Materials. Der Schwerpunkt der Auswertung lag dabei auf Angaben bezüglich Herleitung, Darstellung und Anwendung der Sicherheitsindikatoren und umfasste folgende Punkte:

- Unterlagen / Literatur: Die Studien können allgemein gehalten sein, oder ein spezifisches technisches Konzept, einen spezifischen Standort oder eine spezifische Anlage betreffen. Sie können auch vorläufig sein oder detailliert z. B. auf Standort- bzw. Genehmigungsfragen sowie die Entwicklung von Kriterien usw. eingehen.
- Gesetzliche Auflagen: Es wurden die in der betreffenden Studie genannten Auflagen erfasst. Eine Prüfung der gesetzlichen Auflagen, die zur Zeit der Durchführung der Analyse in den verschiedenen Ländern gültig waren, erfolgte nicht.
- Abfallart: Es wurden Transuranabfall, abgebrannte Kernbrennstoffe, hoch-, mittel- und schwachradioaktive Abfälle, gemischte Abfälle und Sonderabfälle betrachtet.
- Endlagerkonzept: Es wurden alle Arten der geologischen Endlagerung berücksichtigt, sowohl Tiefen- wie oberflächennahe Lagerung.
- Geologie: Die berücksichtigten Geosysteme umfassen kristallines Gestein, Ton, Salz und sonstige standfeste Gesteine unter Tonbedeckung.
- Technische Barrieren: Berücksichtigt wurden Abfallmatrix, Abfalleinschluss (durch langfristig haltbare Behälter wie Kupferbehälter bzw. weniger korrosionsbeständige Behälter), Abfallverpackung, Betonbarrieren, Versatzmaterialien usw.
- Natürliche Barrieren: Dies ist normalerweise die Geosphäre; natürliche Barrieren können sich jedoch je nach Endlagerkonzept unterscheiden.
- Grundwasser und Oberflächenwasser: Normalerweise erfolgt ein durch Grundwasser vermittelter Transport, jedoch können auch Oberflächengewässer am Expositionspfad beteiligt sein.

Tab. 9: Ausgewertete Sicherheitsanalysen. (nach JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004)

Sicherheitsanalyse	Organisation	Referenz (vollständige Zitate siehe Literaturverzeichnis)
Konrad	BfS	BFS (1990): Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachanlage KONRAD
Morsleben	BfS	PREUSS et al. (2002): Post closure safety of the Morsleben repository BALTES et al. (2002): Unterstützung des BMU im Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM),
H12	JNC	JNC (2000): H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report,
Wellenberg	Nagra	NAGRA (1994a): Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg.
Kristallin-I	Nagra	NAGRA (1994b): Kristallin-I – Safety assessment report NTB 93-22E
SAFIR-2	ONDRAF/ NIRAS,	ONDRAF/NIRAS (2001): Technical overview of the SAFIR 2 report. Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS,
TILA-99	Posiva Oy	VIENO & NORDMAN (1999): TILA-99, Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. POSIVA (1999) The final disposal facility for spent nuclear fuel. Environmental impact assessment report
VLJ	Posiva Oy	VIENO & NORDMAN (1998): VLJ Repository Safety Analysis.

Sicherheits-analyse	Organisation	Referenz (vollständige Zitate siehe Literaturverzeichnis)
SR-97	SKB	SKB (1999a): SR 97 Post-closure safety. Main report, Volumes I and II; SKB Technical Report, TR-99-06.
SFR 1	SKB	SKB (2001): Final repository for radioactive operational waste SFR 1. Final safety assessment report
SFL3-5	SKB	SKB (1999b): Deep repository for long-lived low- and intermediate level waste – Preliminary safety assessment, SKB Technical Report 99-28
Site-94	SKI	SKI (1996): The SKI deep repository performance assessment research project SITE-94
NIREX-97	NIREX	NORRIS et al. (1997): An assessment of the post closure performance of a deep waste repository at Sellafield.
WIPP	DOE	US DOE (1995): Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Draft Title 40 CFR 191, March 31 1995.
Yucca Mountain	DOE	US DOE (2002): Final 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.
IRUS	AECL	DOLIMAR et al. (1996): Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for the Intrusion Resistant Underground Structure.
CNFW	AECL	GOODWIN et al. (1994): The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Post-closure assessment of a reference system.

Für jeden in den o. a. Studien identifizierten Indikator wurden im nächsten Arbeitsschritt folgende Informationen erfasst und ausgewertet:

- Beschreibung, des Indikators
- Ableitung der Indikatorquantität,
- Zeitrahmen für die Verwendung des Indikators sowie gesetzliche Vorschriften,
- räumlicher Geltungsbereich,
- Verwendungsart des Indikators; Vergleichskriterien; Verwendungszweck,
- hauptsächliche Unsicherheiten des Indikators und seiner Ableitung,
- sonstige relevante Informationen.

Berichte, welche den Themenkomplex Sicherheitsindikatoren allgemein behandeln, jedoch keine konkrete Anwendung von Sicherheitsindikatoren beinhalten (z. B. SPIN (BECKER ET AL. 2002), PAAG sowie die IAEA-Projekte INWAC (IAEA 1994, 2001a,b), WAC (IAEA 1999) und FACTS), wurden bei dieser Zusammenstellung nicht berücksichtigt, gingen jedoch in die Auswertung während der späteren Projektphase ein.

Die Indikatoren wurden entsprechend IAEA (2001a) in Sicherheitsindikatoren und Leistungsindikatoren (performance indicators) gegliedert. Während Sicherheitsindikatoren die integrale Bewertung der Langzeitsicherheit des Endlagersystems insgesamt ermöglichen, dienen Leistungsindikatoren der Bewertung der Eigenschaften von Teilsystemen und Komponenten des Endlagersystems (z. B. einzelner Barrieren). Leistungsindikatoren eignen sich vor allem für das Verständnis der Leistung von Komponenten eines sich entwickelnden Systems (z. B. beim Vergleich verschiedener Standorte oder Endlagerkonzepte). Die Sicherheits- und Leistungsindikatoren wurden dann systematisch bezüglich folgender Aspekte ausgewertet:

- Anwendbarkeit für unterschiedliche zeitliche Bereiche,
- Anwendbarkeit für unterschiedliche räumliche Bereiche,
- Eignung für das Aufzeigen der Einhaltung der Schutzziele,
- die mit den verschiedenen Sicherheitsindikatoren verknüpften Unsicherheiten,
- Relevanz für verschiedene natürliche Barrieren und geologische Medien,

- Relevanz für verschiedene Arten radioaktiven Abfalls,
- Anwendbarkeit auf generische und spezifische Fälle,
- Eignung für verschiedene Zwecke wie Planung, Standortwahl, Optimierung, Vergleiche (z. B. zwischen Konzept und Wirtsgestein) sowie Analyse der Leistungsfähigkeit,
- Vermittelbarkeit und Verständlichkeit für die Öffentlichkeit.

Schließlich erfolgte eine Bewertung der Eignung jedes Indikators für verschiedene Einsatzbereiche (z. B. zeitlich und räumlich) und verschiedene Teile des Endlagersystems. Die Vor- und Nachteile verschiedener Indikatoren für ihre Verwendung bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit verschiedener Geosysteme wurden analysiert.

### 2.4.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Der Bericht enthält eine Zusammenstellung von Angaben zur Herleitung, Präsentation und Anwendung von Sicherheitsindikatoren in Sicherheitsstudien zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Somit wurden auf der Basis des verfügbaren internationalen Kenntnisstandes entsprechend der Aufgabenstellung ergänzend zu den gebräuchlichen Sicherheitsindikatoren Dosis und Risiko komplementäre Sicherheitsindikatoren abgeleitet (s. Tab. 10) und mit diesen Indikatoren verglichen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Keiner der untersuchten Indikatoren kann als ein vollständiger Sicherheitsindikator betrachtet werden. Indikatoren sind stets mit Unsicherheiten sowie mit verschiedenen Schwierigkeitsgraden der verständlichen Vermittlung verbunden (vgl. Tab. 11). Die umfassendsten Indikatoren haben die größte Komplexität und somit auch die größten Unsicherheiten.
- Individualdosis und Individualrisiko werden als gute Sicherheitsindikatoren eingeschätzt. Sie vereinigen sämtliche Sicherheitsaspekte des Endlagers und sind direkt auf den Schutz des Menschen bezogen. Keiner der sonstigen untersuchten Indikatoren wurde von den Autoren als ein guter Sicherheitsindikator eingeschätzt.
- Der Fluss der freigesetzten Toxizität und die Toxizitäts-Freisetzungsraten sind gute komplementäre Leistungsindikatoren. Ihr Wert liegt in der deutlich geringeren Sensitivität gegenüber Unsicherheiten resultierend aus Biosphärenmodellen und der Schnittstelle Geosphäre/Biosphäre.
- Einige Indikatoren wurden als unbrauchbar eingeschätzt. Dies resultiert vor allem aus der Schwierigkeit, sie verständlich zu vermitteln, sowie aus Schwierigkeiten bei der Auswertung der Indikatorwerte. Zu dieser Gruppe gehören kollektive Dosis (Unsicherheit bei ihrer Berechnung), Radionuklidfluss (Toxizität und Auswirkung divergieren beträchtlich bei unterschiedlichen Nukliden), Freisetzungsdauer (lange Freisetzungsdauer ist nicht unbedingt positiv), Verdünnung (entspricht nicht dem Isolationsziel) und Gesamtaktivität (auch hier divergieren Toxizität und Auswirkung beträchtlich bei unterschiedlichen Radionukliden).
- Sämtliche sonstigen Indikatoren besitzen zumindest einen Wert als Hinweis auf die Leistungsfähigkeit von Komponenten des Endlagersystems.
- Sämtliche Indikatoren sind gleichermaßen auf jede Wirtsgesteinsart anwendbar. Es bestehen jedoch Unterschiede, wie sie beim Vergleich von Standorten, Wirtsgesteinen und Endlagerkonzepten anzuwenden sind.
- Alle untersuchten Indikatoren können auf sämtliche Zeiträume angewendet werden. Allen gemein ist die zunehmende Unsicherheit des (qualitativen) Indikatorwertes mit zunehmenden Zeiträumen. Tendenziell sind damit natürlich Indikatoren, in welche weniger zeitveränderliche Parameter eingehen (aus Deckgebirgsmodellen, Biosphärenmodellen), die auch in der Zukunft mit geringeren Unsicherheiten behaftet sind. Andererseits ist der Aussagewert dieser Indikatoren generell geringer.

Tab. 10: Liste der identifizierten Indikatoren (JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004).

Indikator	Definition/Einheit
Individualdosis	Ausgedrückt als Individualdosisleistung (Sievert/Jahr) einer Person.
Kollektivdosis	Die integrale Dosis der betroffenen Population und deren Dosis (manSv) in einem bestimmten Zeitraum.
Individualrisiko	Das individuelle Gesundheitsrisiko (hauptsächlich die durch Strahlung verursachte Krebsgefahr). Normalerweise definiert als Produkt der Wahrscheinlichkeit, einer bestimmten Dosis ausgesetzt zu werden, und der Wahrscheinlichkeit von Gesundheitsrisiken durch diese Dosis.
Radionuklidfreisetzungsrates	Die Freisetzung von Radionukliden oder –elementen pro Zeiteinheit. Normalerweise als Bq/Jahr dargestellt.
Radionukliddurchfluss	Freisetzung von Radioaktivität pro Zeit- und Flächeneinheit (Bq/Jahr/m <sup>2</sup> ).
Radionuklidkonzentration	Konzentration von Elementen (mg/l oder mg/kg Trockengewicht), Radionukliden oder Gesamtaktivität (Bq/l oder Bq/kg Trockengewicht).
Spezifische Aktivität	Spezifische Aktivität in Umweltmedien (Bq Radioisotop / g Element).
Quellterm (Gesamtaktivität)	Ausgedrückt als Aktivität in radioaktivem Abfall (Bq) oder als Masse eines Elements im Abfall (kg) oder als Aktivitätskonzentration im Abfall (Bq/kg).
Radiotoxizität	Aktivität jedes Radionuklids multipliziert mit einem Toxizitätsfaktor; normalerweise ein radionuklidspezifischer Dosisumrechnungsfaktor für den Verzehr Maßeinheit in Sievert.
Radiotoxizitätsfreisetzungsrates und -durchfluss	Sv/Jahr sowie Sv/Jahr und Flächenmaßeinheit.
Chemotoxizität	Geschätzte Beträge (z. B. kg im Inventar) oder Konzentrationen in Umweltmedien dividiert durch Toxizität-Referenzwerte. Maßeinheit hängt vom Referenzwert ab. Häufig dimensionslos (d. h. Anzahl der Referenzdosen).
Chemotoxizitätsfreisetzungsrates und -durchfluss	Freisetzungsrates der Toxizität-Referenzeinheiten (pro Jahr bzw. pro Jahr und Flächenmaßeinheit).
Freisetzungsdauer	Zeitdauer, in der eine Freisetzung erfolgt.
Radionuklidtransportzeit	Zeit, die für Grundwasser oder Radionuklide benötigt wird, um sich zwischen zwei bestimmten Stellen zu bewegen, z. B. von einem Abfallbehälter bis zum Empfänger in der Biosphäre. Zeiteinheit in Jahren. Radionuklidtransportzeit kann auch als Verzögerung im Verhältnis zum Grundwassertransport ausgedrückt werden.
Isolationsfaktor	Verhältnis von momentanem zum Anfangsinventar (dimensionslos).
Isolationszeit	Zeit ab Schließung eines Endlagers bis zur Freisetzung von Radionukliden / Aktivität
Verdünnung	Potenzielle Verdünnungsfaktoren zwischen Grundwasser in Endlagertiefe und oberflächennahem Grundwasser/Oberflächenwasser.
Inkrement (als Untergruppe der Konzentration betrachtet)	Aktivitätskonzentration/Elementkonzentration in Umweltmedien durch Endlagerleckage verglichen mit natürlich auftretenden Konzentrationen.
Dosisleistung in Flora und Fauna eines Gebiets	Dosisleistung, der Flora und Fauna eines Gebiets ausgesetzt sind (mit spezifizierten Organismen oder Spezies) (Gy/Jahr).
Physikalisch-chemische Parameter	Zeitliche Veränderung von Parametern, welche die Leistungsfähigkeit eines Endlagers beeinflussen (z. B. pH, Eh, Umwandlung des Bentonits in Illit, hydraulischer Gradient).

Tab. 11: Gesamtbeurteilung der Anwendbarkeit von Sicherheitsindikatoren (JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004).

Indikator	Vollständiger Sicherheitsindikator	Gut geeigneter Sicherheitsindikator	Weniger brauchbarer Sicherheitsindikator und brauchbarer Leistungsindikator	Nur Leistungsindikator	Schlechter Indikator
Individualrisiko		X			
Individualdosis		X			
Kollektivdosis					X
Dosisleistung von Fauna/Flora			X		
Durchfluss der freigesetzten Toxizität			X		
Toxizitäts-freisetzungsraten			X		
Radionuklid-freisetzungsraten				X	
Radionukliddurchfluss					X
Schadstoffkonzentration				X	
Isolationsfaktor				X	
Isolationszeit				X	
Freisetzungsdauer					X
Radionuklidtransportzeit				X	
Verdünnung					X
Toxizität				X	
Quellterm (Gesamtaktivität)					X

## 2.5 GEOCHEMISCHE PROZESSE

### Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle

*Auftragnehmer:* Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

*Unterauftragnehmer:* Forschungszentrum Rossendorf - Institut für Radiochemie

*Zitat:* ALTMAIER et al.(2004)

### 2.5.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Im Rahmen von Untersuchungen zu Endlagerstandorten ist die Kenntnis und das Verständnis der relevanten geochemischen Prozesse eine Voraussetzung für die Bewertung der Langzeitsicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle und somit zur Beurteilung der Eignung der jeweiligen Formation bzw. des jeweiligen Standortes. Durch eine geochemische Analyse der Zustände zwischen den in einem Endlagersystem vorhandenen Lösungen und Festphasen lassen sich Radionuklidkonzentrationen und das Rückhaltepotenzial der Festphasen im Hinblick auf die primären Sicherheitsindikatoren quantifizieren. Die Verträglichkeit der technischen und geotechnischen Barrieren mit dem natürlichen System kann als sekundärer Sicherheitsindikator herangezogen werden. Die Notwendigkeit, geochemische Prozesse zu beschreiben und in Langzeitsicherheitsanalysen modellhaft zu berücksichtigen, gewinnt immer mehr an Bedeutung und ist Gegenstand intensiver nationaler und internationaler Forschungsarbeiten.

Ziel der Arbeiten war es, zunächst die verfügbaren Daten für die geochemische Nah- und Fernfeldmodellierung in den verschiedenen geochemischen Milieus der potenziellen Wirtsgesteine zu sichten, zusammenzustellen und im Hinblick auf Übertragbarkeit, Vollständigkeit, Genauigkeit und Relevanz für die Radionuklid-ausbreitung zu bewerten. Anschließend sollen die noch notwendigen Arbeiten zur Vervollständigung der Datenbasis für die geochemische Modellierung und zur Festlegung von Modellierungscodes definiert werden. Somit war auch die Frage zu beantworten, inwieweit geochemische Modellierungen auf Basis des vorhandenen Datensatzes möglich sind.

### 2.5.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

#### Randbedingungen

Die Definition des geochemischen Milieus ergibt sich aus den Festlegungen der verschiedenen Wirtsgesteine Steinsalz, Ton (Tongestein), sonstige Gesteine mit Tonabdeckung, Kristalline Gesteine. Hierzu werden Untersuchungsergebnisse zu Gorleben (Salz), Konrad (Ton), Bure (Ton), Zürcher Weinland (Opalinuston) und Äspö (Granit) herangezogen. Die genannten Untersuchungsergebnisse wurden als potenziell relevant für deutsche Verhältnisse erachtet und liefern eine ausreichende Informationsdichte zur Definierung des geochemischen Milieus. Für Salz werden die Lösungen 1, 2 und 3 nach der Definition des Arbeitskreises HAW-Produkte als Standardlösung übernommen.

Die Grundzüge der unterschiedlichen geochemischen Milieus sind in Tab. 12 dargestellt.

Tab. 12: Grundzüge des geochemischen Milieus der unterschiedlichen Wirtsgesteine (nach ALTMAIER et al. 2004).

Steinsalz	Ton bzw. sonstige Gesteine mit Tonüberdeckung	Kristalline Gesteine (Granit)
pH: nicht gepuffert Eh: nicht gepuffert Hohe Ionenstärken (I bis 6 molal in NaCl bzw. 15 molal in MgCl <sub>2</sub> )	pH: 6,9 – 8,2 Eh: ~ -185 mV Ton: I = 0,1 – 0,5 molal, sonstige z. T. bis 3,9 molal	pH: 5,5 – 11,5 Eh: +50 bis –580 mV I = 0,01 – 0,4 molal
Hohe Ionenstärken: Pitzer-Modellparameter für aquatische Spezies erforderlich	Relativ niedrige Ionenstärken: Modellierung aquatischer Spezies mit einfachem SIT-Ansatz möglich (I < 0,5 molal: Modellparameter ohne signifikante Bedeutung).	

Es werden folgende Elemente berücksichtigt:

1. Die Elemente des hexären Systems der ozeanischen Salze, erweitert um zusätzliche, für die Grundwasserzusammensetzung relevante Elemente: Al, C, Ca, Cl, K, Mg, Na, S, Si, O. Damit sind die wesentlichen in einem Endlagersystem zu erwartenden Wasserinhaltsstoffe abgedeckt.
2. Als wesentliche Actiniden: Th, U, Np, Pu, Am, Cm.
3. Als wesentliche Spaltprodukte: Cs, I, Eu (Vertreter für REE), Sr, Tc, und Ra.
4. Als wesentliche Metalle: Fe, Mn.

Die Auswahl der thermodynamischen Standarddaten richtet sich nach den Anforderungen bisheriger geochemischer Modelle, bei denen zumeist mit Gleichgewichtskonstanten gearbeitet wird. Diese kann von den übrigen ausgewählten Parametern abgeleitet werden, was eine Konsistenzprüfung ermöglicht. Die Gleichgewichtskonstante  $\log K^\circ$  wird als Standardwert für Konsistenzrechnungen der anderen Parameter fixiert. Temperaturabhängigkeiten werden, soweit verfügbar, angegeben.

Von den bekannten Festphasen werden ausschließlich solche bewertet, die als Matrixkomponenten des natürlichen Systems oder Radionuklidphasen entweder Löslichkeitsbestimmend oder für die Sorption verantwortlich sind. Sollten metastabile Phasen die Sorption oder Elementlöslichkeit bestimmen, fließen diesbezügliche Daten in die Datenbank ein.

Zur Berechnung von Aktivitätskoeffizienten in Lösungen, wie sie für Wirtsgesteine in Deutschland zu erwarten sind, werden derzeit als relevant erachtete Modellansätze die Specific Ion Interaction Theory (SIT) (für Ionenstärken gegen 0 vergleichbar mit der Davies-Gleichung) und das Pitzer-Modell diskutiert. Entsprechend wurden die hierfür zur Verfügung stehenden Daten in dieser Arbeit bewertet. Für hochsalinare Lösungen – also für das Wirtsgestein Salz – wird in dieser Arbeit das Pitzer-Modell zugrundegelegt. Für die übrigen Wirtsgesteinstypen werden die vorhandenen SIT-Datensätze bewertet.

Die höchste zu betrachtende Temperatur ist auf 150°C festgelegt. Höhere Temperaturbereiche sind nur kurzzeitig im direkten Umfeld von in Salz eingelagerten HLW-Abfällen zu erwarten und mit dem derzeit vorliegenden Datensatz schwer bzw. gar nicht abzudecken. Die Diskussion der Temperaturabhängigkeiten erfolgt zusammen mit der Bewertung der entsprechenden thermodynamischen Größen.

Die Sorption wird betrachtet auf Basis von Oberflächenkomplexierungsmodellen. Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Festphasen- $K_d$ -Werten (Sorptionkoeffizienten) ist nicht Gegenstand dieses Auftrages, da  $K_d$ -Werte nur für das ermittelte Szenario Gültigkeit haben und nicht auf andere Szenarien übertragbar sind.

Zur Zeit gibt es keine thermodynamischen Daten, die das Verhalten von Kolloiden in den betrachteten Systemen beschreiben können. Die Frage nach der prinzipiellen Notwendigkeit, Kolloideffekte im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen zu berücksichtigen, wird im Bericht allerdings diskutiert.

## Methodischer Ansatz

Zur Beantwortung der zugrundeliegenden Fragestellung wurden zunächst die unterschiedlichen geochemischen Milieus definiert, die für eine Modellierung relevant sind. Darauf aufbauend wurden die für eine geochemische Modellierung notwendigen thermodynamischen Daten festgelegt. Daraufhin wurden die vorhandenen Daten gesichtet und bewertet.

Die Bewertung erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Relevanz der Daten für Langzeitsicherheitsanalysen
- Darstellung des Konzepts der Datenermittlung
- Vollständigkeit der Informationen
- Gültigkeit bzw. Eignung des Konzepts der Datenermittlung (Methode)
- Konsistenz der Daten, Kompatibilität der Einzeldaten
- Alternative Konzepte
- Genauigkeit, Grenzen und Unsicherheiten in den Daten
- Übertragbarkeit des Konzepts für die Anwendung
- Übertragbarkeit der Daten für die Anwendung
- Gültigkeit der aus diesen Daten gewonnenen Schlussfolgerungen

Aufbauend auf dieser Bewertung konnte dann entschieden werden, inwieweit derzeit eine Modellierung geochemischer Prozesse möglich ist und welche weiteren Arbeiten nötig sind, um eine auf thermodynamischen Standarddaten basierende Modellierung geochemischer Prozesse durchführen zu können. So konnten auch Unterschiede zwischen einzelnen Wirtsgesteinen herausgearbeitet werden.

### 2.5.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Geochemische Prozesse können grundsätzlich für alle in Frage kommenden Wirtsgesteine modelliert werden. Wesentliche Defizite sind wirtsgesteins- und radionuklid-spezifisch (komplexe Chemie, Spurenkonzentrationen). Es bestehen deutliche Unterschiede in den Datenbasen für unterschiedliche Wirtsgesteine. Die verfügbaren thermodynamischen Daten spiegeln dabei unterschiedliche Prioritäten der Endlager-Konzepte wieder.

Die durchzuführende Bewertung vorhandener Datensätze umfasste thermodynamische Standarddaten zu Nukliden und relevanten Wirtsgesteinskomponenten, zu Zement als dominierendem mineralischen Material technischer Barrieren sowie zur Kinetik relevanter Prozesse. Darüber hinaus wurden die vorhandenen Sorptionsdatenbanken gesichtet und bewertet.

Im Einzelnen wurden im Rahmen dieses Einzelvorhabens in der Tab. 13 dargestellten Datenbanken als potenziell relevant ermittelt, gesichtet und bewertet:

Tab. 13: Betrachtete Datenbanken (nach ALTMAIER et al. 2004, dort Originalzitate).

Thermodynamische Standarddaten	Sorptionsdaten	Sonstige
CODATA	NEA Sorptionsdatenbank	Voigt (Salz-System)
OECD/NEA-TDB	SDGM-BfS-Sorptionsdatenbank	Supcrt92
Nagra/PSI-Datenbank	US EPA Sorptionsdatenbank	Glasser, Berner (Zement)
WIPP-Datenbank	GRS-SODA-Sorptionsdatenbank	NIST, HARKIN (Kinetik)
SOTERM	Weitere Einzelarbeiten	

Es existieren insgesamt thermodynamische Standarddaten für die relevanten Minerale, die wässrigen Spezies der Hauptkomponenten sowie für feste und gelöste Radionuklidspezies.

In einer Reihe von Punkten sind die bestehenden Datenbanken unabhängig vom gewählten Wirtsgestein lückenhaft. Dies gilt besonders für:

- Chemisches Verhalten und thermodynamische Daten für Plutonium
- Redoxprozesse in Lösungen bzw. an Oberflächen
- Beitrag der Kolloide zur Gesamtkonzentration in Lösungen (Erhöhung der Löslichkeit)
- Bildung von Sekundärphasen, Solid Solutions, Oberflächenreaktionen (Erniedrigung der Löslichkeit)
- Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten
- Kinetische Daten der stattfindenden Reaktionen bezüglich der Auflösung und Bildung fester Phasen und der Sorptionsphänomene

Diese Punkte sowie die Tatsache, dass es aufgrund geringer Datenmengen oft nicht möglich ist, die jeweiligen Daten statistisch zu bewerten, schränken die Belastbarkeit derzeitiger geochemischer Modellierungen empfindlich ein.

Daten zu Sorptionsvorgängen liegen meist nur in Form von  $K_d$ -Werten vor, die aber nicht auf andere Standorte und Szenarien übertragen werden können. Nur in wenigen Fällen liegen Daten zu Oberflächenkomplexierungsmodellen vor. Damit ist eine thermodynamische Beschreibung von Sorptionsvorgängen nur eingeschränkt möglich.

Zur Beschreibung der Löslichkeit und von Transportprozessen wird Kolloiden allgemein potenziell eine hohe Relevanz zugesprochen. Eine thermodynamische Beschreibung kolloidal beeinflusster Prozesse ist zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht möglich.

Die vorhandenen Daten zu Zementphasen sind in Qualität und Konsistenz nicht abgesichert. Die Untersuchung kommt zur Schlussfolgerung, dass nur die temperaturabhängigen thermodynamischen Daten von Gips hinreichend vollständig sind. Thermodynamische Daten für die meisten Hydratphasen des abgebundenen Zements sowie der hydratisierten und nichthydratisierten festen Lösungen fehlen weitgehend.

Daten für Eisenphasen sind nur bedingt verfügbar und mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Neben diesen für alle Wirtsgesteine gültigen Aussagen werden im Bericht zu den potenziellen Wirtsgesteinen Steinsalz, Ton, sonstige Gesteine mit Tonüberdeckung und als Beispiel für kristalline Wirtsgesteine Granit im Einzelnen folgende Ergebnisse festgehalten:

Für das Wirtsgestein Steinsalz ist die Anzahl der relevanten Mineralphasen und gelösten Spezies relativ gering; die thermodynamischen Standarddaten und Modellparameter sind vollständig und konsistent. Modellrechnungen können mit diesen Daten für beliebige Standorte im Salzgestein durchgeführt werden. Das Wirtsgestein Steinsalz lässt sich am zuverlässigsten geochemisch modellieren.

Für Ton bzw. sonstige Gesteine mit Tonüberdeckung fehlen Daten zu wichtigen Festphasen, insbesondere Tonphasen. Standarddaten für kristalline Wirtsgesteine umfassen feste Silikate, Feldspäte und Glimmer. Diese Daten wurden jedoch aus unterschiedlichen Datenbasen gewonnen und ihre Konsistenz und Vollständigkeit sind nicht überprüft. Mit den thermodynamischen Standarddaten sind Modellrechnungen für verschiedene Standorte im Ton und Kristallin sehr eingeschränkt möglich.

Die unterschiedlichen betrachteten Mineralphasen und gelösten Spezies sind in Tab. 14 dargestellt (nach ALTMAIER et al. 2004).

Tab. 14: Betrachtete Mineralphasen und gelöste Spezies (nach ALTMAIER et al. 2004).

Nichtradioaktive Abfall- und Matrixkomponenten	Wirtsgestein-Komponenten	Radionuklide
Zement: Ca-Al-Si-S-O-H: Ca-Silikat-Hydrate, Al-haltige Hydrate, Ca-Al-haltige Hydrate CaOH, Portlandit, Gips, Calcit,  Eisen: Oxide, Hydroxide, Carbonate, Silikate, Sulfate, Sulfide	Salz: Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO <sub>4</sub> -OH-HCO <sub>3</sub> -CO <sub>3</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O  Ton, sonstige Gesteine mit Tonüberdeckung, Granit: Oxide, Hydroxide, Carbonate, Sulfate, Silikate für Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Sr, Tonphasen	Actiniden: Th, U, Np, Pu, Am, Cm  Spaltprodukte: Cs, Sr, Ra, Eu (Nd), I, Tc

Für die Modellierung der Löslichkeiten relevanter Radionuklide existiert ein umfangreicher und belastbarer Satz thermodynamischer Standarddaten (25°C). Mangelndes Verständnis existiert hinsichtlich der Beschreibung des Redoxverhaltens von Plutonium, des Einflusses von Kolloiden sowie der Bildung von Mischphasen (Solid Solutions). Abgesehen von diesen Ausnahmen ist das Verhalten der Radionuklide in Lösungen niedriger Ionenstärke gut modellierbar. Für das NaCl-System (Natrium-Chlorid) sind über den gesamten Konzentrationsbereich die erforderlichen Modellparameter für den Pitzer-Formalismus verfügbar. Die Anwendung dieser Modellparameter für hochkonzentrierte MgCl<sub>2</sub>-Lösungen (Magnesium-Chlorid) ist mit Unsicherheiten behaftet.

An Salzmineralien findet kaum Sorption statt. Für einige Tone, Silikate, Feldspäte, Glimmer und Eisenphasen existieren zuverlässige Oberflächenkomplexierungsdaten. Die Anwendung dieser Daten auf konkrete Standorte setzt jedoch voraus, dass spezifische Parameter zur reaktiven Oberfläche dieser Mineralphasen experimentell bestimmt werden. Darüber hinaus fehlen Sorptionsdaten für zahlreiche Phasen natürlicher Systeme, die auch als Nebenbestandteile stark sorbieren können.

Daten für höhere Temperaturen sind teilweise vorhanden (z. B. hexäres System der ozeanischen Salze sowie einige Wirtsgestein- und Mineralphasen). Zur Radionuklidlöslichkeit und -sorption sind nur vereinzelte Untersuchungen bei höheren Temperaturen bekannt.

Kinetische Reaktionsdaten zur Auflösung von Mineralphasen sind für Silikate, Feldspäte, Glimmer und einige Verwitterungsprodukte verfügbar. Bei Ton bzw. kristallinen Systemen laufen langsame Prozesse ab, für die metastabile Phasen und die Verfügbarkeit von Oberflächen relevant sind. Diese Größen sind standortspezifisch.

## 2.6 CHEMOTOXISCHE STOFFE

### Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>Fa. Buchheim Engineering</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>Prof. Dr. H. Günthard Dr. H. von Fellenberg, Dipl.-Phys. D. Rohr, Dr. W. Blaser Dr. G. Hauser</i>
Zitat:	BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR (2005)

### 2.6.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Es muss gezeigt werden, dass durch das betriebene und verschlossene Endlager keine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften gemäß § 34 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG, WHG 1996) zu besorgen ist. Dies setzt detaillierte Kenntnisse der stofflichen Zusammensetzung der zur Einlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle voraus.

Deshalb wurde das Inventar chemotoxischer organischer und anorganischer Stoffe in den Abfällen und Versatzstoffen eines Endlagers quantitativ ermittelt sowie eine potenzielle Freisetzung dieser Stoffe in das Grundwasser aus wasserrechtlicher Sicht bewertet.

### 2.6.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

Der Gesetzgeber hat mit dem Wasserhaushaltsgesetz zwar das Schutzziel festgelegt, es existiert aber kein Regelwerk, das Grenzwerte und Berechnungsvorschriften für den Austrag von chemischen Stoffen aus einem Endlager in das Grundwasser enthält. Es wurde daher im Rahmen dieses Einzelvorhabens hilfsweise auf andere bestehende Regelungen zurückgegriffen.

Es wurden die in der Anlage zur Grundwasserverordnung (GWVO, GWVO 1997) in der Liste I und II genannten Stoffe herangezogen, um die Einhaltung des Schutzziels aus dem WHG prüfen zu können. Darüber hinaus wurden auch weitere Stoffe in die Erfassung chemischer und chemotoxischer anorganischer und organischer Stoffe im Gesamtinventar einbezogen, für die in den einschlägigen nationalen Verordnungen (Trinkwasserverordnung, TWVO 2001), Regelwerken (DVGW, DVGW 1996) und Empfehlungen (LAWA) eine Grenzkonzentration bzw. ein Prüfwert genannt wird. Ergänzend werden auch internationale Empfehlungen (WHO, WHO 1998) und Regelwerke herangezogen.

Falls für einen Stoff unterschiedliche Begrenzungen zu finden waren, wurde der niedrigste Wert angenommen.

Das Gesamtinventar wurde zunächst durch Literaturrecherchen und teilweise durch Anfragen bei den Verursachern – aufgeschlüsselt bis zu einzelnen Verbindungen und Elementen - ermittelt.

Aufbauend auf diesem Gesamtinventar der eingelagerten radioaktiven Abfälle und des Versatzmaterials (Salzgrus/Salzbeton/Bentonit/Zementmörtel) wurden potenzielle Konzentrationen anorganischer und organischer Schadstoffen im Grundwasser mit einfachen Modellen berechnet und diese mit der zulässigen Grenzkonzentration bzw. dem Prüfwert verglichen.

Die genauen geologischen und hydrologischen Randbedingungen eines zukünftigen Endlagers sind nicht bekannt. Das Modell zur Berechnung der Konzentrationen im Grundwasser unterstellt daher, dass die Stoffe im Endlager in einem Lösungsvolumen von 100.000 m<sup>3</sup>, 500.000 m<sup>3</sup> oder 1.000.000 m<sup>3</sup> gelöst werden. Anschließend wird unterstellt, dass dieses Lösungsvolumen langsam aus dem Endlager freigesetzt wird und auf dem Weg bis in das oberflächennahe Grundwasser, das zur Trinkwassernutzung genutzt werden kann, eine Verdünnung um den Faktor 500, 5.000 oder 50.000 erfährt. Weitere Prozesse, die zu einer Herabsetzung der Konzentration auf dem Weg bis in das Grundwasser führen können, wurden nicht unterstellt.

Die Berechnung der Konzentration von chemischen Stoffen im Endlager erfolgte mit unterschiedlichen Annahmen, die in drei aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt wurden:

Schritt 1: Es wurde hypothetisch angenommen, dass die Stoffe im Endlager vollständig in reinem Wasser gelöst werden.

Dieses Vorgehen zeigt mit Sicherheit die wasserrechtlich relevanten Stoffe an, die aufgrund ihres zu geringen Inventars bei der o. g. Verdünnung gar nicht in der Lage sind, Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerte zu überschreiten. Stoffe, bei denen keine Überschreitung feststellbar war, wurden im Weiteren nicht mehr betrachtet.

Schritt 2: Für die verbliebenen Stoffe wurde die Löslichkeitsgrenze in reinem Wasser berücksichtigt und angenommen, dass nur der einzelne betrachtete Stoff bzw. die chemische Verbindung im Wasser vorliegt:

Es wurden die Löslichkeitsgrenzen der Stoffe bei einem pH-Wert von 8 – mittlerer pH-Wert von Trinkwasser – unterstellt. Die Annahme, dass jeder Stoff für sich alleine in reinem Wasser neben allen anderen Stoffen gelöst wird, führt zu einer Überschätzung der Konzentration und stellt damit eine konservative Annahme dar. In der Praxis konkurrieren alle in Wasser leicht löslichen bzw. schwerlöslichen Stoffe mit dem zur Verfügung stehenden Wasseranteil, der nicht gleichzeitig allen Stoffen zur Verfügung steht. Diejenigen Stoffe, die aufgrund ihrer stoffspezifischen Eigenschaften mit dem Wasser schwerlösliche Verbindungen bilden oder deren Löslichkeitsgrenze (Sättigung) erreicht wird, wurden erkannt.

Die Ausfällung schwerlöslicher Verbindungen und deren Wiederauflösung in salinaren Lösungen (hier Bildung von Chlorokomplexen) ist möglich. Doch muss deren Wiederausfällung bei einsetzender Verdünnung ebenfalls berücksichtigt werden, was zur Annahme in Schritt 3 überleitet.

Schritt 3: Es wurde das Löslichkeitsverhalten der Stoffe in salinaren Lösungen berücksichtigt.

Diese Annahme gilt für Verhältnisse, bei denen gesättigte salinare Lösungen im Endlager vorliegen. Für Lösungsvorgänge steht hier nur der reine Wasseranteil von z. B. 72,5 Masse-% der gesättigten NaCl-Lösung zur Verfügung. Die Bildung von Chlorokomplexen ist konzentrationsabhängig, d. h. reversibel bei einsetzender Verdünnung. Die Löslichkeit gewisser Stoffe wird aufgrund des Löslichkeitsproduktes bei gleichionigem Zusatz (gelöste Bestandteile der gesättigten NaCl-Lösung) vermindert, sofern keine (reversible) Komplexbildung eintritt. Löslichkeitserhöhungen aufgrund der Anwesenheit von Chloriden wurden berücksichtigt.

Auf Basis der Konzentrationsberechnungen für die Annahmen in den Schritten 1 bis 3 erfolgte dann eine zusammenfassende wasserrechtliche Bewertung.

Die in diesem Projekt erfassten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Endlagerstandorten beschränken sich damit auf folgende Punkte:

1. Unterschiede im Versatzmaterial
2. Betrachtung salinärer bzw. nichtsalinärer Lösungen

In einem Endlager in Salz wurde als Versatzmaterial Salzgrus und Salzbeton sowie in den nichtsalinaren Wirtsgesteinen Bentonit und Zementmörtel unterstellt. Zusätzlich wurde in salinaren Endlagern ein Auffüllen der Hohlräume mit NaCl-Lösung zugrunde gelegt.

### 2.6.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Als wesentlicher und umfangreichster Teil der Arbeiten wurde das potenziell zu erwartende stoffliche Inventar in einem Endlager gemäß dem Ein-Endlager-Konzept ermittelt. Der Umfang des ermittelten Inventars endzulagernder Abfallgebinde sowie seine Aufteilung auf die einzelnen Verursachergruppen sind in Tab. 15 dargestellt.

Tab. 15: Verursacherspezifische Massenbeiträge (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).

Herkunftskategorie	Masse in Mg	Massenanteil in %
Brennelemente (BE)	177.479	12,4
Forschungseinrichtungen (F)	148.281	10,3
Kerntechnische Industrie (I)	20.695	1,5
Kernkraftwerke (K)	467.538	32,6
Landessammelstellen (L)	47.293	3,3
Stilllegung (S)	550.984	38,4
Sonstige (U)	1.500	0,1
Wiederaufarbeitung (W)	19.998	1,4
<b>Summe</b>	<b>1.433.768</b>	<b>100,0</b>

Ein erheblicher Teil des zu erwartenden Inventars geht dabei nicht auf die Abfälle selber, sondern auf Abfallbehälter, Fixierungsmittel und Verfüllmaterial zurück. Dabei wurde davon ausgegangen, dass sämtliche Hohlräume in einem Gebinde mit Verfüllmaterial aufgefüllt werden. Die Aufteilung zwischen den Komponenten wird in Tab. 16 dargestellt:

Tab. 16: Aufteilung des stofflichen Inventars (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).

Beitrag	Masse in Mg	Masseanteil in %
Abfall	221.758	15,5
Abfallbehälter	868.302	60,6
Fixierungsmittel	175.379	12,2
Verfüllmaterial	168.329	11,7
<b>Summe</b>	<b>1.433.768</b>	<b>100,0</b>

Die hier verdeutlichte Aufteilung des Inventars schlägt sich in sehr großen Massenbeiträgen von Stahl und Beton/Zement nieder. Die Abb. 8 und Abb. 9 verdeutlichen, welche Materialien des Basisinventars die größten Masseanteile darstellen.

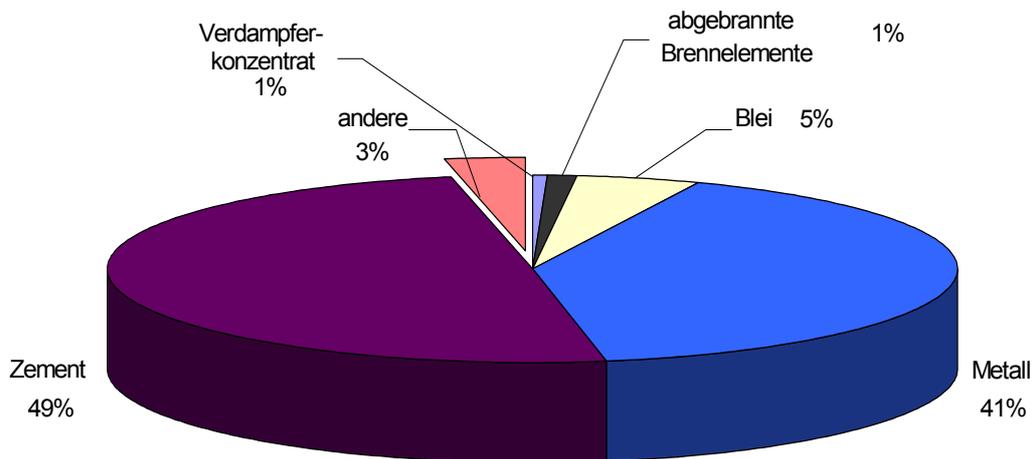


Abb. 8: Wichtigste Massenanteile der Materialien (ohne Versatzmaterial).

In der Abb. 9 wird der Punkt „andere“ aus Abb. 8 weiter differenziert.

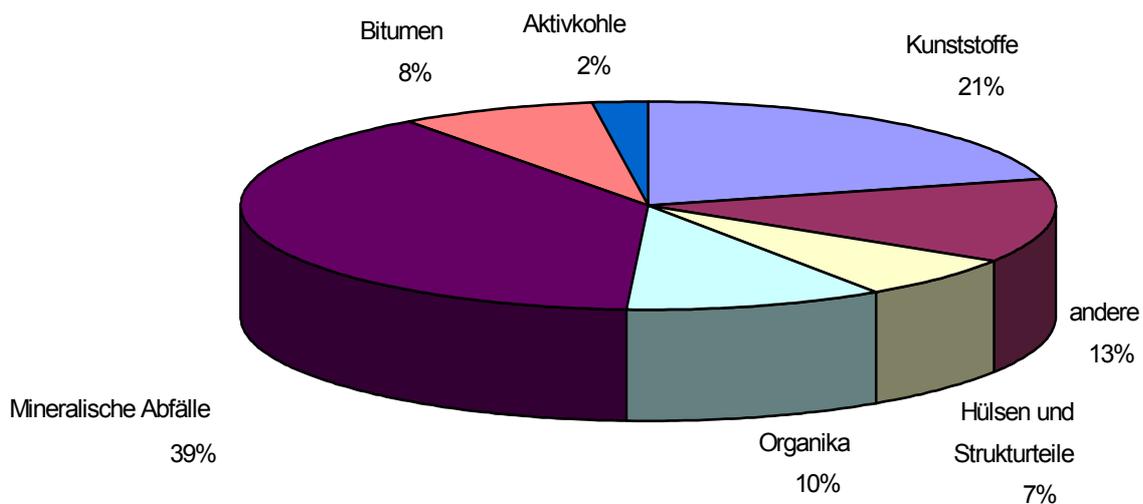


Abb. 9: Wichtigste Massenanteile zum Punkt „andere“ Materialien.

Einen weiteren erheblichen Teil des stofflichen Inventars machen die Versatzmaterialien in einem Endlager aus. Diese und die Inhaltsstoffe einer möglicherweise eindringenden NaCl-Lösung wurden im Inventar mit berücksichtigt. Daher ist das Inventar abhängig von dem unterstellten Resthohlraumvolumen und Lösungsvolumen im Endlager.

Zur wasserrechtlichen Bewertung wurde das Inventar bis hinunter auf die Ebene von Verbindungen und Elementen aufgeschlüsselt. Die so ermittelten Konzentrationen der Verbindungen/Elemente wurden dann mit Grenzwerten/Prüfwerten verglichen. Die häufigsten ermittelten Verbindungen/Elemente sind in Tab. 17 dargestellt.

Tab. 17: Häufigste Verbindungen/Elemente des stofflichen Inventars ohne Versatzmaterial (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).

Stoff	Menge in Mg	Stoff	Menge in Mg	Stoff	Menge in Mg
Fe	640.873	Zr	5.750	ANT+NIT	280
SiO <sub>2</sub>	344.077	K	5.283	NO <sub>3</sub>	260
Ca	74.161	Mn	4.658	Co	243
Pb	65.775	Cu	3.472	W	199
Al	24.442	Mg	3.318	NIT	161
SOS G	21.011	Cl	1.685	Sn	135
DOC G	14.504	B	955	F	134
Ni	11.033	Ba	741	ANT	119
U	10.418	Mo	635	Ag	102
Na	8.824	PO <sub>4</sub>	612	Nb	101
Cr	8.270	V	518	Cd	89
SO <sub>4</sub>	6.507	Sr	317	Nd	87
Ti	5.862	Zn	310	Mineralöl-KW	82

Bei einer angenommenen vollständigen Lösung der betrachteten 120 Einzelstoffe zeigte sich, dass weniger als die Hälfte der Stoffe von ihrem Inventar her das Potenzial haben, einen der zugrundegelegten Grenz-, bzw. Prüfwerte zu überschreiten.

Bei einem Verdünnungsfaktor von 500 wurden unter Berücksichtigung der Annahmen in Schritt 2 für die unterschiedlichen Resthohlraumvolumina zahlreiche Überschreitungen der zugrundegelegten Prüfwerte (PW) und Grenzwerte (GW) berechnet. Bei einem Verdünnungsfaktor von 5.000 wurde nur für eine sehr begrenzte Zahl von Stoffen eine Überschreitung der PW/GW festgestellt. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Tab. 18 dargestellt.

Tab. 18: Anzahl Überschreitungen der PW/GK im Grundwasser/Trinkwasser bei einem Verdünnungsfaktor von 5.000 (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).

Wirtsgestein/ Überschreitungen PW/GK:	Salinar	Kristallin	Ton	Unter Tonüber- deckg.	ohne Versatz- material und Lösung
Resthohlraumvol. 100 k m <sup>3</sup>	18	17	15	15	12
Resthohlraumvol. 500 k m <sup>3</sup>	4 (Cd, K, TI, Y)	4 (K, Li, Rb, Y)	2 (K, Y)	3 (K, Rb, Y)	1 (Y)
Resthohlraumvol. 1 Mio. m <sup>3</sup>	2 (Cd, Y)	3 (K, Rb, Y)	1 (Y)	1 (Y)	1 (Y)

Die Überschreitungen für verschiedene Wasserinhaltsstoffe resultieren bei einer Verdünnung um den Faktor 5.000 aus folgenden Gründen:

- a.) Das Inventar von Cadmium im Abfall (kerntechnische Industrie, Metallschrott) und seine Löslichkeitsgrenze sowie seiner Verbindungen in gesättigter NaCl-Lösung (hohe Chloridgehalte) sind relativ hoch.
- b.) Yttrium ist im Versatzmaterial (Bentonit) aber auch schon im Abfallinventar (aufgrund der Massen an Sr-Y in Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen) enthalten.

- c.) Das Inventar von Kalium im Versatzmaterial (Bentonit+PZ-Mörtel) für nicht-salinare Wirtsgesteine bzw. im Salzgrus für Salinar-Wirtsgestein ist relativ groß. Zudem haben Kaliumsalze eine hohe Löslichkeit.
- d.) Lithium und Rubidium sind im Versatzmaterial (Bentonit+PZ-Mörtel) enthalten und haben eine hohe Löslichkeit.
- e.) Thallium ist ebenfalls im Versatzmaterial (Salzgrus Salinar) enthalten und hat eine hohe Löslichkeit.

Bemerkenswert ist, dass die Beiträge der Massen von leichtlöslichen Wasserinhaltsstoffen K, Na, Li, Rb, Tl, Cl aus dem Versatzmaterial dazu führen, dass zur Einhaltung der entsprechenden Prüfwerte im oberflächennahen Grundwasser und Grenzkonzentrationen im Trinkwasser bedeutende Verdünnungswasservolumina notwendig werden. Die Beiträge dieser Stoffe aus dem Abfall sind dagegen unbedeutend.

Die Herkunft der Wasserinhaltsstoffe, die zu Überschreitungen der Prüfwerte (PW) im oberflächennahen Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen (GK) im Trinkwasser geführt haben ist in Tab. 19 verdeutlicht.

Tab. 19: Mengengerüst für ausgewählte Wasserinhaltsstoffe mit und ohne Versatzmaterialien (Lösungs- und Resthohlraumvolumen von 1 Million m<sup>3</sup>) (nach BUCHHEIM, FELLEBERG & ROHR 2005).

Wasserinhaltsstoff	Inventar ohne Versatzmaterial in Mg	Inventar mit Versatzmaterial			
		Salinar 1 Mio. m <sup>3</sup> in Mg	Ton in Mg	Unter Tonüberdeckung in Mg	Kristallin in Mg
B	955,898	983,783	957,865	957,448	957,849
Cd	89,913	90,244	90,046	90,040	90,203
K	5.283,166	41.798,703	40.580,408	41.673,282	100.963,986
Li	55,279	89,285	155,341	167,058	387,545
Rb	33,673	53,701	233,798	257,231	698,205
Tl	0,038	3,054	0,077	0,069	0,077
Y	8,957	8,957	55,297	64,928	192,610

Bei einer Verdünnung um den Faktor 50.000 und einem Hohlraumvolumen von 100.000 m<sup>3</sup> resultierte nur noch eine Überschreitung für Rubidium (Rb) aus dem Versatzmaterial Bentonit (Beitrag zu Rb ca. 93%) beim Wirtsgestein Kristallin. Die Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen werden bei diesem Verdünnungsfaktor für alle anderen Wirtsgestein- und Versatzmaterialkombinationen eingehalten.

## 2.7 GASBILDUNG

### Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>Colenco Power Engineering AG</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>Kavernen Bau- und Betriebs GmbH Science Solutions Dr. D. Suter</i>
<i>Zitat:</i>	<i>SKRZYPPEK et al. (2005a)</i>

#### 2.7.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Radioaktive Abfälle können in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen Gase bilden. Dies kann für die Langzeitsicherheit, aber auch für die Betriebssicherheit relevante Auswirkungen haben. Grundsätzlich sicherheitsrelevante Wirkungen der Gasbildung sind zum einen die Bildung explosiver Wasserstoff-Luft-Gemische und zum anderen Gasdrücke in dichten Einlagerungsstrukturen. Die nationalen und internationalen Arbeiten zu den Bildungsmechanismen von Gasen unter Endlagerbedingungen und den daraus möglicherweise resultierenden (Wechsel-)Wirkungen wurden ausgewertet, um für typische Geosysteme (unterschiedliche geologische Gesamtsituationen) den Stand von Wissenschaft und Technik zum Nachweis der Beherrschung der Gasbildung darzustellen und sich daraus ergebende Anforderungen an das Nachweis- und Endlagerkonzept zu ermitteln.

#### Grundlagen der Nachweisführung zur Beherrschung der Gasbildung

Grundlage für die Arbeiten waren durchgeführte Sicherheitsanalysen und die dahinter stehenden Nachweisführungen/Nachweisziele sowie die Art der dabei zu Grunde gelegten Eingangsdaten für die betrachteten Wirtsgesteine. Für die Darstellung typischer Unterschiede für verschiedene Geosysteme wurden jene Endlagerprojekte ausgewählt, welche als repräsentativ betrachtet werden können und für die ausreichend Informationen zur Verfügung stehen. In der Tab. 20 werden die in den jeweiligen Sicherheitsanalysen identifizierten relevanten Prozesse und Nachweisführungen in Hinblick auf die Gasbildung dargestellt. Für das Salinar wurden die Sicherheitsanalyse für das Endlager WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, USA), für Tongesteine das Projekt Opalinuston (Entsorgungsnachweis) und für das Kristallin die Endlagerprojekte Swedish Final Repository (SFR) und Swedish Deep Repository for Spent Fuel (SFL) zugrunde gelegt.

Tab. 20: Sicherheitsrelevante Prozesse und Nachweisziele der verschiedenen Endlagerprojekte bzw. Sicherheitsanalysen in Hinblick auf die Gasbildung (nach SKRZYPPEK et al. 2005a).

Endlagerprojekt	Wirtsgestein	Abfallart	Korrosion <sup>1)</sup>	Mikrobieller Abbau <sup>1)</sup>	Radioanalyse <sup>1)</sup>	Wasserherkunft		Druckaufbau <sup>2)</sup>	Auspressung von kontaminierter Lösung <sup>2)</sup>	Nachweisziel
						intern	extern			
WIPP	Salz, geschichtet	Transuranabfall	X	X	(X)	X	(X)	X	X	kein unzulässiger Radionuklidtransport
Opalinuston	Tonstein	LILW	X	X	-	X	X	-	X	kein unzulässiger Radionuklidtransport
Opalinuston	Tonstein	HLW, BE	X	-	(X)	-	X	-	X	kein unzulässiger Radionuklidtransport
KBS-3/SFL	Granit	BE	-	-	-	-	-	-	-	Gasbildung findet nicht statt
SFR	Granit	LILW	X	X	-	X	X	-	- / (X)	Entweichen von Gas ohne Lösungszutritt

X betrachtet;

(X) als Alternativszenario betrachtet

1) Mechanismus aufgrund des Abfallinventars, Gasbildung je nach Wasserangebot

2) Modellannahme gemäß Sicherheitsanalyse

## 2.7.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

### Verwendeter methodischer Ansatz

Es wurden drei unterschiedliche Nachweisziele definiert, von denen die ersten beiden von den Besonderheiten dichter Wirtsgesteine (Salz, Ton) ausgehen:

- Gasspeicherung im Endlager: Es sollen keine Wegsamkeiten für Flüssigkeiten aus dem Endlager (Einlagerungsbereich) entstehen. Damit müssen die Gase (und Flüssigkeiten) in den Hohlräumen des Endlagers gespeichert werden.
- Gasspeicherung im Wirtsgestein: Gase und Flüssigkeiten werden zusätzlich im Wirtsgestein gespeichert. Es dürfen keine durchgängigen Wegsamkeiten für Flüssigkeiten bis an die Grenze des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entstehen.
- Entweichen von Gas: Gase und Flüssigkeiten dürfen entweichen, aber es darf kein wesentlicher Antrieb für einen Radionuklidtransport in den Wirtsgesteinen Tonstein, Kristallin und sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung entstehen.

Aufgrund der langen Betrachtungszeiträume stützen sich Nachweise üblicherweise auf Modellrechnungen ab. Die dabei verwendeten Modellansätze und Parameter sind darüber hinaus wissenschaftlich abzuleiten bzw. zu belegen. Um die Frage zu beantworten, ob die formulierten Nachweisziele erreicht werden können bzw. welche Parameter und Prozesse besonders relevant sind, wurden für jedes Geosystem die Anwendbarkeit der Nachweisführung, die Parameter und die Sensitivität der relevanten Parameter auf die Ergebnisse überprüft sowie möglicher Untersuchungsbedarf im Hinblick auf die Nachweisführung identifiziert.

Die Gasbildung wurde differenziert nach der Herkunft des Wassers bezeichnet. Interne Gasbildung wird verursacht durch das Wasser aus den Abfällen, den Versatzmaterialien und bei Salz aus dem Wassergehalt des Wirtsgesteins. Externe Gasbildung resultiert aus Lösungszutritten durch das Wirtsgestein.

## Randbedingungen

Für die Überprüfung der Nachweisziele beschränkten sich die durchgeführten Untersuchungen auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Im Gegensatz zu den Konzepten im Granit wurde zugrunde gelegt, dass die geologische Barriere und die Schachtverschlüsse die Langzeitsicherheit in erster Linie gewährleisten (vgl. auch AKEND 2002). Die in diesen Konzepten vorgesehenen Maßnahmen z. B. Gasdrainage, Kupferbehälter wurden nicht unterstellt. Aus grundsätzlichen Überlegungen und unabhängig von dem Aspekt der Gasbildung wurde davon ausgegangen, dass auf der Basis einer sorgfältigen vorlaufenden Erkundung bei der Anlegung eines Endlagers im Salinar ein Wasserzutritt von außerhalb und im größeren Umfang auch aus eingeschlossenen salinaren Lösungen innerhalb der Salzformation ausgeschlossen werden kann. Dieser Nachweis ist durch über- und untertägige Exploration zu führen. Es war jedoch nicht Gegenstand dieses Projektes zu bewerten, wie dieser Nachweis zu führen ist.

## Abfallinventar

Die Modellberechnungen der Gasbildung stützen sich auf das prognostizierte Modellinventar der radioaktiven Abfälle, welches die wärmeentwickelnden Abfälle und die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung umfasst. Für die Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass die zukünftigen Abfälle mit denselben Verfahren wie bisher konditioniert werden und dass für die Verpackung dieselben Behältertypen eingesetzt werden. Material aus bergbautechnischen Einbauten wurde nicht berücksichtigt, da Umfang und Art des Materials nur standort- und konzeptspezifisch festgelegt werden können.

## 2.7.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

### Gasbildende Prozesse

#### Anaerobe Metallkorrosion

Uedle Metalle wie Eisen, Aluminium und Zink werden unter anaeroben Bedingungen durch Wasser oxidiert. Dabei entsteht als Produkt gasförmiger Wasserstoff. Die Korrosionsrate hängt von der Art des Metalls und der Zusammensetzung der Lösung ab. Die für die Modellrechnungen eingesetzten Korrosionsraten wurden aus experimentellen Laborstudien und aus publizierten Sicherheitsanalysen für verschiedene Endlagerprojekte abgeleitet.

Da die Korrosion überwiegend nur an der Oberfläche der Metalle stattfindet, muss bei der Modellierung neben der Masse und der Zusammensetzung der einzelnen metallischen Abfallkomponenten auch deren spezifische Oberfläche berücksichtigt werden. Für Verpackungen wie Fässer oder Container konnte diese aus den Spezifikationen errechnet werden, während sie für die heterogenen Rohabfälle geschätzt werden musste.

Das maximale Gasvolumen aus der anaeroben Metallkorrosion ergibt sich aus der Stöchiometrie der Korrosionsreaktionen. Dabei wurde vorausgesetzt, dass das gesamte korrodierbare Metall (v. a. Eisen) umgesetzt wird. Wenn im Endlager nur eine begrenzte Wassermenge vorhanden ist, limitiert dies die Gasbildung und die theoretisch mögliche maximale Wasserstoffmenge wird nicht erreicht.

## Mikrobielle Prozesse

Organische Stoffe können unter anaeroben Bedingungen durch Bakterien abgebaut werden. Die wichtigsten Abbauprodukte sind Methan und Kohlendioxid. Im Gegensatz zu den Korrosionsreaktionen, die nur einen bis zwei Reaktionsschritte umfassen, verläuft der Abbau von organischen Stoffen über eine größere Anzahl von Schritten. Die Abbaugeschwindigkeiten hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Ein Mangel an Wasser führt zur Verringerung bzw. Einstellung der mikrobiellen Aktivitäten. Die Abbauraten von organischen Stoffen konnten für genau definierte Systeme (homogenes oder heterogenes Substrat) experimentell bestimmt werden. Weitere Messwerte zur mikrobiellen Gasbildung wurden aus Hausmülldeponien gewonnen. Die Bandbreite der Abbauraten für die Modellrechnungen berücksichtigt die Heterogenität der Abfälle und der lokalen Porenwässer in einem Endlager über einen langen Zeitraum.

## Radiolyse

Die radioaktive Strahlung führt zur Bildung von angeregten und ionisierten Spezies. Diese gehen mit den vorhandenen Stoffen verschiedene Reaktionen ein, die unter anderem zur Bildung von gasförmigen Produkten wie Wasserstoff führen können. Als ein mobiler Stoff mit hohem Wasserstoffanteil ist das Wasser der wichtigste Ausgangsstoff für die radiolytische Wasserstoffbildung. Die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten ein geringes Radionuklidinventar, und das dadurch erzeugte Volumen an Radiolysegas ist im Vergleich zu den Gasmengen aus den anderen Gasbildungsreaktionen vernachlässigbar. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten ein größeres Radionuklidinventar mit einem hohen Anteil an  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlern. Sie enthalten jedoch sehr wenig internes Wasser und organische Stoffe. Ein externer Wasserzutritt wird durch technische Maßnahmen wie Behälter und Versatz während langer Zeit verhindert. Unter diesen Voraussetzungen ist die radiolytische Gasbildung vernachlässigbar. Das Radionuklidinventar der Abfälle und die aus den Radiolysereaktionen resultierende Gasbildung sind bekannt. Das Angebot von Wasser im Endlager hängt von den Standorteigenschaften ab.

## Gasbindende Prozesse

Neben den gasbildenden Prozessen können in einem Endlager auch gasbindende Prozesse auftreten, die zur Verringerung des Gasvolumens führen. Der wichtigste dieser Prozesse ist die Bindung von Kohlendioxid durch die Carbonatisierung von Zement. Dabei wird das Kohlendioxid in der Form von festem Calciumcarbonat gebunden. Dieser Prozess wird durch wenige chemische Reaktionen bestimmt, so dass die Modellunsicherheiten vergleichsweise gering sind. Im Endlager WIPP (USA) wird Magnesiumoxid zur Bindung von Kohlendioxid eingesetzt.

## Geosystem spezifische Diskussion der die Gasbildung beeinflussenden Parameter

Beim Szenario der erwarteten Entwicklung im Salinar stellt das Wasserangebot für die Gasbildung den limitierenden Faktor dar. Eine Verringerung des Inventars der gasbildenden Stoffe (Metalle und organische Stoffe) führt nur für den Fall außergewöhnlicher Entwicklung zu einer Verringerung des Gasvolumens, weil dann nicht mehr das Wasserangebot, sondern das Angebot der gasbildenden Stoffe den limitierenden Faktor darstellen kann. Die Untersuchungen zeigten, dass bei den wärmeentwickelnden Abfällen das Eiseninventar (je nach Modellfall) um mindestens 90 % verringert werden muss, um eine Verringerung der Gasmenge zu bewirken. Bei den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung kann die erforderliche Reduzierung der Menge der gasbildenden Stoffe aufgrund von verschiedenen mikrobiellen Gasbildungs-

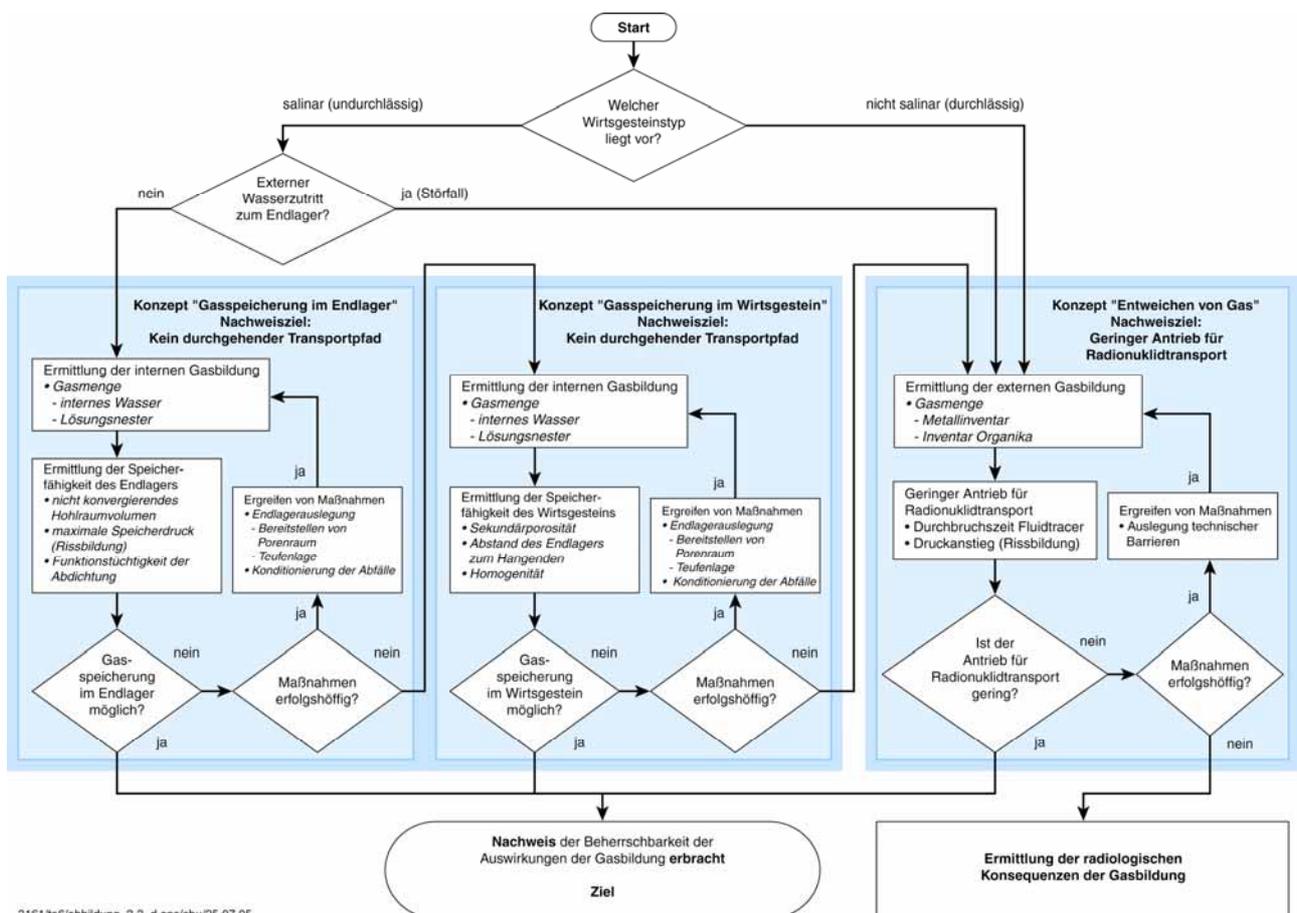
reaktionen und ihren Wechselwirkungen nicht direkt abgeschätzt werden. Das wegen der Limitierung durch das Wasserangebot auf 26 % des theoretisch möglichen Wertes begrenzte Gasvolumen zeigte jedoch, dass die Menge der gasbildenden Stoffe ebenfalls massiv reduziert werden muss, um eine Reduzierung des Gasvolumens zu erreichen.

Die Gasbildung in einem Endlager im salinaren Gestein hängt somit wesentlich vom Wassergehalt der konditionierten Abfälle, des Versatzes und des Wirtsgesteins ab. Unter den genannten Voraussetzungen ist das gasbildende Stoffinventar (außer Wasser) nicht wesentlich für die Gasbildung.

Da bei den Geosystemen Tonstein, Kristallin und Sediment unter Tonüberdeckung ein Wasserzutritt von außen anzunehmen ist, ist im Modell das Wasserangebot für die Gasbildung nicht limitierend. Hier hat die Zusammensetzung der Abfälle einen entscheidenden Einfluss auf die gebildete Gasmenge und Gasbildungsrate.

## Nachweiskonzepte

In der Abb. 10 sind die Nachweiskonzepte und die einzelnen Nachweisziele für die Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung dargestellt.



3161/ta6/abbildung\_2-3\_d.eps/shu/25.07.05

Abb. 10: Nachweiskonzepte und Nachweisziele für die Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung.

## Salinar bzw. hydraulisch dichte Wirtsgesteine

Im Salinar kann das Nachweiskonzept Gasspeicherung im Endlager verfolgt werden. Hier ist nachzuweisen, dass keine durchgehenden Transportpfade für Gas durch das Wirtsgestein und Abdichtungen zur Biosphäre vorhanden sind bzw. gebildet werden. Die Grundvoraussetzung hierfür ist, durch eine Erkundung des Standortes nachzuweisen, dass keine externen Wasserzutritte zum Endlager vorhanden sind.

Weiterhin sind die interne Gasbildung sowie die Speicherefähigkeit des Endlagers für Gas nachzuweisen. Die durch interne Gasbildung entstehende Gasmenge hängt maßgeblich von der im Endlager vorhandenen Wassermenge ab. Während bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen Wasser in den Abfällen und aus dem Versatz zu betrachten sind, ist bei den wärmeentwickelnden Abfällen die Feuchtigkeit des Versatzes sowie die Möglichkeit von Lösungszutritten in die Einlagerungsstrecken aus Lösungsnestern im Wirtsgestein zu beachten. Hierfür müssen belastbare Aussagen aus der Erkundung abgeleitet werden können. Gleiches gilt für die Bohrlochlagerung, wobei die zulässige Lösungsmenge von der geometrischen Auslegung der Bohrlöcher abhängt. Demgegenüber kann der im Wirtsgestein Salz enthaltene Gesamtwassergehalt von ca. 0,02 Masse-% im Vergleich zu demjenigen im Versatz vernachlässigt werden.

Zur Ermittlung der Speicherefähigkeit des Endlagers für Gas sind das langfristig zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen im Endlager sowie der maximale Speicherdruck zu bestimmen. Um der Abnahme des Speichervolumens mit der Zeit entgegenzuwirken, ist die Verwendung von stützendem Versatz vorzusehen. Das langfristig zur Verfügung stehende Porenvolumen der Versatzmaterialien ist nachzuweisen.

Der maximale Speicherdruck im Endlager richtet sich nach den geomechanischen Spannungsverhältnissen am Standort, die somit Untersuchungsziele von über- und untertägigen Erkundungsmaßnahmen sind. Generell sollte der maximale Speicherdruck so gewählt werden, dass die Entstehung von durchgehenden Rissen im Wirtsgestein ausgeschlossen werden kann. Ferner ist die Funktionstüchtigkeit der Abdichtungen in Abhängigkeit der zu erwartenden Gasdrücke nachzuweisen. Kann diese nicht gewährleistet werden, ist ein Einschluss des Gases und somit ein Nachweis nach dem Konzept der Gasspeicherung nicht möglich.

Der Nachweis der Gasspeicherung im Endlager ist darüber hinaus durch die Berücksichtigung technischer Einzelmaßnahmen oder eine Kombination von Maßnahmen führbar. Im Rahmen einer veränderten Endlagerauslegung sind die Bereitstellung von zusätzlichem Porenraum und/oder ein höherer Speicherdruck durch eine tiefere Teufenlage des Endlagers realisierbar. Ferner besteht die Möglichkeit, durch eine veränderte Konditionierung der Abfälle den Wassergehalt zu verringern. Solche Änderungen benötigen eine längere Vorlaufzeit (Entwicklungsarbeiten, Genehmigungsverfahren), und das Ausmaß der dadurch ermöglichten Verringerung der Gasmenge im Endlager wäre darum erst zu einem späteren Zeitpunkt bestimmbar.

Für das Salinar oder hydraulisch dichte Wirtsgesteine könnte auch das Konzept der Gasspeicherung im Wirtsgestein verfolgt werden. Hierzu gibt es Erfahrungen aus dem Bau und Betrieb von Speicherkavernen. Für die Ermittlung der internen Gasbildung ist wie im Konzept Gasspeicherung im Endlager vorzugehen.

Zusätzlich muss der Effekt der Bildung von Zonen erhöhter Permeabilität und Porosität nachgewiesen werden, der eintritt, wenn der Gasdruck im Endlager langsam bis in den Bereich des Gebirgsdruckes ansteigt (ROKAHR 2002, ROKAHR, STAUDTMEISTER & ZANDER-SCHIEBENHÖFER 2003). Das bisher entwickelte ingenieurmäßige Konzept für die Beurteilung von endverschlossenen Kavernen basiert auf theoretischen Untersuchungen, Laborversuchen und einem großtechnischen Demonstrationsversuch und wird für die bergbaulichen Abschlussbetriebspläne eingesetzt. Zur weiteren Validierung der aus Modellrechnungen abgeleiteten Werte der Sekundärporosität ist es daher erforderlich, geeignete Verfahren zur experimentellen Bestimmung der sekundären Porosität sowie der Art der Ausbildung zu entwickeln. Ferner sind wissenschaftlich akzeptierte theoretische Modellvorstellungen zu entwickeln, welche eine realistische Modellierung der Ausbildung solcher Zonen erlauben.

Auch Tonsteine können so gering durchlässig für Flüssigkeiten und Gase sein, dass sie praktisch hydraulisch dicht sind. Deshalb kann im Tonstein auch die Gasbildungsrate durch den Wasserzufluss limitiert sein. Die NAGRA (2002a) hat hierzu für den Opalinuston Experimente durchgeführt. Aufgrund der ermittelten

Daten und des gewonnenen Prozessverständnisses wurde für den Opalinuston ein konzeptionelles Modell zur Ausbreitung des Gases aus dem Endlager aufgestellt. Demnach stellen die miteinander gekoppelte Ausbreitung von Gasen und Flüssigkeiten (Zweiphasenfluss) und eine durch die Aufweitung (Dilatanz) des Gesteins ermöglichte Gasausbreitung die wichtigsten Ausbreitungsmechanismen dar.

Wie bei dem undurchlässigen Wirtsgestein Salinar ist die Entstehung von makroskopischen Rissen durch einen Druckaufbau im Endlager auszuschließen. Sofern einfache Abschätzungen oder Zweiphasenfluss-Modellrechnungen einen Druckanstieg bis in den Bereich des Gebirgsdruckes erwarten lassen, sind somit die Auswirkungen des Druckes auf die Integrität des Wirtsgesteins zu prüfen.

### Hydraulisch durchlässige Wirtsgesteine

In allen durchlässigen Gesteinen muss das Nachweisziel verfolgt werden, dass die Gasbildung einen geringen Antrieb für den Radionuklidtransport darstellt. In dem Nachweiskonzept wird davon ausgegangen, dass die langfristig ins Endlager zutretende Wassermenge unbegrenzt ist. Dies hat zur Folge, dass langfristig das gesamte gasbildende Stoffinventar umgesetzt werden kann.

Unabhängig vom Prozess der Gasbildung und Gasausbreitung sind für einen Endlagerstandort in einem durchlässigen Wirtsgestein die radiologischen Konsequenzen einer Radionuklid Ausbreitung mit dem Grundwasser vom Endlager zur Biosphäre basierend auf einem hydrogeologischen Modell und einer Ausbreitungsrechnung zu ermitteln. Dieses Modell wird ebenfalls für den Nachweis zur Beherrschung der Gasbildung benötigt.

Als Indikator für einen geringen Antrieb des Radionuklidtransports durch Gasbildung können Durchbruchzeiten für Fluidtracer sowie der erwartete Druckanstieg mittels Modellrechnungen herangezogen werden. Die dazu durchgeführten Modellrechnungen beruhen auf einer gekoppelten Betrachtung der Gas- und Wasserströmung im Wirtsgestein.

Ähnlich wie beim Nachweiskonzept der Gasspeicherung im Wirtsgestein sind gekoppelte hydraulisch-mechanische Prozesse wie die Bildung von Sekundärporosität und -permeabilität (pathway dilatation) zu untersuchen.

Modellrechnungen zeigen, dass die Durchbruchzeiten des Gastracers in nicht-salinaren Wirtsgesteinen von den hydraulischen Gradienten (Kristallin, Gesteine unter Tonüberdeckung) bzw. von der Diffusion (Tongestein) sowie von der Gasbildungsrate abhängen. Da sich letztere jedoch nur ungenau prognostizieren lässt, sind Modellrechnungen mit entsprechenden Sensitivitätsuntersuchen durchzuführen. Die Gasbildung hat allerdings für Gesteine unter Tonüberdeckung und Kristallin einen vergleichsweise geringen Einfluss, während für die geringer durchlässigen Wirtsgesteine mit zunehmender Gasbildungsrate und Menge die Durchbruchzeit des Flüssigkeitstracers signifikant abnimmt. Aus denselben Gründen wie für den Flüssigkeitstracer ist auch für den Gastracer die Durchbruchzeit für Gesteine unter Tonüberdeckung am größten. Generell zeigen alle Geosysteme eine Abnahme der Durchbruchzeit mit zunehmender Gasbildungsrate.

In den Geosystemen Sediment unter Tonüberdeckung und Kristallin liegt der maximale Druck im Endlager in etwa beim hydrostatischen Druck. Beim Tonstein ist aufgrund der vergleichsweise geringen Permeabilität mit einem signifikanten Druckanstieg infolge Gasbildung zu rechnen. In diesem System hängt der maximale relative Druck wesentlich stärker von den hydraulischen Eigenschaften und geometrischen Abmessungen ab als in den anderen Geosystemen.

Für die Einhaltung der radiologischen Konsequenzen, die aus einer Zweiphasenflussmodellierung der Gasausbreitung resultieren, müssen das Deckgebirge und die Biosphäre auf Basis standortspezifischer Daten berücksichtigt werden.

## Faktoren, die die Nachweisführung erleichtern oder erschweren

Aufgrund der zunehmenden Einzelnachweise und den damit verbundenen Annahmen und Bandbreiten der verwendeten Parameter bzw. des angesprochenen Entwicklungsbedarfes ist die Nachweisführung für die Speicherung im Wirtsgestein grundsätzlich komplexer einzuschätzen als für die Gasspeicherung im Endlager. Die Komplexität der Nachweisführung erhöht sich weiterhin, wenn für den Nachweis Entweichen von Gas die radiologischen Konsequenzen einer möglichen Radionuklidenausbreitung vom Endlager bis in die Biosphäre zu betrachten sind.

Für die Nachweiskonzepte Gasspeicherung im Endlager und Gasspeicherung im Wirtsgestein, die nur für Salinar bzw. hydraulisch dichte Wirtsgesteine in Frage kommen, ist es vorteilhaft, wenn bei der Standortauswahl und der Auslegung des Endlagers darauf geachtet wird, dass

- das Wasserangebot aus den Abfällen, dem Versatz sowie dem Wirtsgestein möglichst klein ist,
- der Abstand Einlagerungsbereich – Deckgebirge bzw. die Mächtigkeit des Wirtsgesteines möglichst groß ist,
- das Porenvolumen und die Grundfläche der Einlagerungsbereiche möglichst groß sind,
- die Teufe des Endlagers möglichst groß ist und
- die Konvergenzrate im Einlagerungsbereich möglichst klein ist.

Für das Konzept Entweichen von Gas sollte beim Standortauswahlverfahren zunächst die Suche nach einer günstigen geologischen Gesamtsituation am Standort im Vordergrund stehen, um die langfristig zu erwartenden radiologischen Konsequenzen durch den Transport gelöster radioaktiver Substanzen zu minimieren. Im Grundwasser transportierte Radionuklide bestimmen in der Regel die zu erwartenden radiologischen Konsequenzen, flüchtige Radionuklide spielen meist eine untergeordnete Rolle.

Im Falle von Tonstein kann die Gasbildung zur Überschreitung des lithostatischen Drucks führen. Wegen der sehr geringen Permeabilität dieses Wirtsgesteins können Gas und Flüssigkeit häufig nur langsamer ausgepresst werden, als das Gas gebildet wird. Dann ist es von Vorteil, wenn sich bei Innendrücken in der Nähe des Gebirgsdrucks statt großer Fracs viele Mikrorisse bilden.

Beim Wirtsgestein Kristallin ist davon auszugehen, dass es von Anfang an geklüftet ist. Daraus ergeben sich vergleichsweise hohe Permeabilitätswerte und große Abstandsgeschwindigkeiten für das Grundwasser selbst bei kleinen hydraulischen Gradienten. Für ein Endlager im Kristallin muss daher entweder ein vermehrtes Gewicht auf die Beständigkeit der technischen Barrieren gelegt werden (z. B. Vermeidung von Rissbildung im Bentonit-Versatz) oder das Wirtsgestein muss dennoch ein gutes Rückhaltevermögen aufweisen (z. B. durch Sorption und Matrixdiffusion). Die Gasbildung stellt eine zusätzliche treibende Kraft für den Transport gelöster Radionuklide durch die Klüfte in einem Endlager im Kristallin dar. Dies macht sich besonders bemerkbar, wenn der großräumige hydraulische Gradient gering ist. Im Referenzfall der hier durchgeführten Modellrechnungen wird die Durchbruchzeit auf ca. 30 % des Wertes ohne Gasbildung verkürzt. Das Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins muss dann groß genug sein, um diesen Effekt auszugleichen. Auswirkungen der Gasbildung auf das Wirtsgestein selber sind aber wegen dessen hoher Permeabilität nicht zu erwarten.

Beim Geosystem sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung hat die Gasbildung nur eine geringe Auswirkung auf den Schadstofftransport. Der Grund dafür ist das relativ hoch permeable Wirtsgestein, welches die gebildeten Gasmengen und parallel dazu ausgepresste Flüssigkeit aufnehmen kann, ohne dass der Fluiddruck nennenswert ansteigt. Aufgrund der Gasbildung sind keine zusätzlichen Anforderungen für eine günstige geologische Gesamtsituation zu stellen. Vorteilhaft ist, was allgemein im Hinblick auf den Transport gelöster Radionuklide gilt: Eine ausreichende Mächtigkeit der – ungestörten – Tonschicht und eine genügend große Transportdauer in lateraler Richtung, d. h. kleine hydraulische Gradienten im Wirtsgestein und eine große Ausdehnung des Gesamtsystems. Alternativ müssen strukturelle Fallen, z. B. antiklinale Strukturen der Tonüberdeckung, den horizontalen Schadstofftransport weitgehend unterbinden.

Ist aufgrund des Radionuklidinventars im geplanten Endlager mit signifikanten radiologischen Konsequenzen durch flüchtige Radionuklide zu rechnen, kommt dem Aspekt der Gasbildung bei der Standortauswahl eine erhöhte Bedeutung zu. Generell nimmt die Durchbruchzeit des Gastracers mit zunehmender Gasbildungsrate signifikant ab. Im Vergleich zur Durchbruchzeit des Flüssigkeitstracers kann diese beim Gastracer um mehr als eine Größenordnung niedriger sein. Günstig sind in solchen Fällen insbesondere Standorte mit Transportwegen vom Endlager zur Biosphäre, die sowohl lang sind und als auch ein großes Speichervolumen aufweisen.

In der Tab. 21 sind die wirtsgesteinsspezifischen Faktoren/Parameter, die die Führung eines Nachweises beeinflussen, zusammengefasst.

Tab. 21: Wirtsgesteinspezifische Einflussfaktoren für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung (nach SKRZYPPEK et al. 2005a).

Wirtsgestein	Nachweiskonzept	Kriterium	Anforderung/Bewertung
Salinar	Gasspeicherung im Endlager oder Wirtsgestein	Wasserzutritt	Ist auszuschließen
		Abstand Einlagerungsbereich – Deckgebirge	Große Mächtigkeit ist günstig
		Grundfläche des Einlagerungsbereiches	Große Grundfläche ist günstig
		Porenvolumen des Versatzmaterial	Großes Porenvolumen ist günstig
		Konvergenz	Geringe Konvergenzrate ist günstig
		Teufe	Große Teufen sind - günstig bezüglich Gasvolumen, - ungünstig bezüglich Konvergenzraten. Insgesamt überwiegen die günstigen Effekte.
Tonstein	Entweichen von Gas	Mechanisches Verhalten des Wirtsgesteins bei hohem Gasdruck im Endlager	Bildung von vielen Mikrorissen statt weniger Klüfte ist günstig; Freisetzung gelöster Radionuklide ist dann diffusionskontrolliert, weitgehend unabhängig von Gasbildung
Sonstige Wirtsgesteine unter Tonüberdeckung		günstige geologische Gesamtsituation	keine besonderen Anforderungen aufgrund Gasbildung Strukturelle Fallen, wie z. B. antiklinale Strukturen, sind günstig
Kristallin		Rückhaltevermögen des geklüfteten Wirtsgesteins	Gasbildung beschleunigt die Flüssigkeitsbewegung im Wirtsgestein; daher gutes Rückhaltevermögen in den Klüften erforderlich (Sorptions, Matrixdiffusion)

## 2.8 KRITIKALITÄT

### Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung</i>
<i>Zitat:</i>	<i>GMAL et al. (2004)</i>

#### 2.8.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund einer künftig nahezu ausschließlichen direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente sowie ggf. nicht verwerteten Plutoniums (z. B. des SNR-Kerns) und bestrahlter Brennelemente mit hoch angereichertem Uran aus Forschungsreaktoren (z. B. des FRM-II) wurden Fragen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers in geologischen Formationen aufgeworfen, die einer Klärung bedürfen. Darüber hinaus wurden durch die in der internationalen Fachliteratur diskutierten Szenarien einer autokatalytischen Kritikalität, die zu explosionsartigen Abläufen im Endlager führen können, Zweifel an der langfristigen Kritikalitätssicherheit in einem geologischen Endlager geweckt (BMU 2001).

In diesem Einzelvorhaben sollte daher untersucht werden, ob unter dem Einfluss geochemischer und geomechanischer Prozesse über lange Zeiträume aus den endgelagerten Kernbrennstoffen eine kritische Spaltstoffanordnung entstehen kann. Des Weiteren sollten Randbedingungen angegeben und ggf. technische Maßnahmen aufgezeigt werden, die eine dauerhafte Unterkritikalität gewährleisten. Die Untersuchungen sollten Kriterien zur sicherheitstechnischen Bewertung und zum Vergleich der potenziellen Wirtsgesteine Salz, Ton/Tonstein, sonstige Gesteine unter Tonbedeckung und kristalline Gesteine hinsichtlich ihrer Eignung aus Sicht der Langzeit-Kritikalitätssicherheit liefern. Das Vorhaben umfasste im Einzelnen folgende Aufgaben:

- Analyse und Bewertung von Langzeitszenarien aus geochemischer Sicht im Hinblick auf die Kritikalitätssicherheit von endgelagerten Kernbrennstoffen.
- Durchführung von deterministischen Kritikalitätsanalysen auf der Basis geochemisch begründeter Eingangsparameter.
- Ansatz für ergänzende probabilistische Kritikalitätsanalysen.
- Untersuchungen zum Verlauf und zu den Auswirkungen einer Kritikalität in der Nachbetriebsphase eines Endlagers im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die Biosphäre.
- Auswertung der zu dieser Thematik verfügbaren Literatur.

#### 2.8.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

Da eine Entscheidung über einen Endlagerstandort noch nicht getroffen wurde und damit auch die wirtsgesteins- und konzeptspezifischen Randbedingungen für die Kritikalitätssicherheit heute noch nicht bekannt sind, können zur Festlegung relevanter Langzeitszenarien nur Analysen auf der Basis eines generischen Endlagers durchgeführt werden. Für die einzelnen Wirtsgesteinsformationen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Ton/Tonstein: Es wurde ein Endlagerkonzept zugrunde gelegt, das sich bzgl. Geometrie, Art der Lagerung (vertikal/horizontal), Lagerdichte (Wärmeleistung) und Charakterisierung der Versatzstoffe an dem

Endlagerkonzept in Bure (Frankreich) orientiert. Als Endlagerformation wird Ton angenommen, wie er in der Schweiz in Form des Opalinuston vorliegt.

- Kristallines Gestein: Das Endlagerkonzept und die Endlagerformation orientiert sich an Daten aus dem Äspö Hard Rock Laboratory in Schweden.
- Salinar: Es wird auf Daten zurückgegriffen, die bei der Erkundung des Salzstocks Gorleben und dem Betrieb des Versuchsendlagers Asse gewonnen wurden.

Den Kritikalitätsanalysen lagen folgende Daten für die endzulagernden Kernbrennstoffe zugrunde:

- LWR-Kernbrennstoff:  
UO<sub>2</sub> aus DWR mit Anfangsanreicherung (AA) von 3,6 und 4,4 % U-235,  
MOX aus DWR mit 3,7 und 4,6 % spaltbarem Plutonium (Pu<sub>fiss</sub>),  
Abbrandwerte 20, 40 und 55 % GWd/tSM,  
Abklingzeiten bis 1 Mio. Jahren.
- MOX-Lagerstäbe mit 3,5 und 5 % Pu<sub>fiss</sub>, ohne Abbrand (MOX-Lagerstäbe sollen zur Endlagerung des nicht verwerteten Plutoniums eingesetzt werden).
- Kernbrennstoff aus Hochtemperaturreaktoren (HTR), ca. 8 t Schwermetall (SM), davon 0,8 t U-235 und U-233.
- Brennstoff aus Forschungsreaktoren (FR) mit hoch angereichertem Uran (HEU), 40 – 50 kg/a.

Für die Endlagerung der Kernbrennstoffe wurde von folgendem Behälterkonzept ausgegangen:

- Endlagerbehälter POLLUX mit Brennstäben (BS) von bis zu 10 DWR- oder 30 SWR-Brennelementen (Kapazität: 5,4 t SM).
- Brennstabkockille BSK-3 mit BS von bis zu 3 DWR- oder 9 SWR-Brennelementen (Kapazität: 1,6 t SM).
- CASTOR THTR mit 2.100 kugelförmigen Brennelementen (Kapazität: 23 kg SM).
- CASTOR MTR 2 mit 5 Brennelementen vom Typ FRM-II (Kapazität: 40 kg SM).

Zur möglichen Entwicklung eines Endlagers unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesteinsformation wurden folgende grundlegenden für die Kritikalitätssicherheit relevanten Langzeitszenarien betrachtet:

- Mechanische Verformung von Abfallgebinden.
- Leckage von Behältern, Eindringen von Wasser bzw. Lösung.
- Korrosion und Auflösung der Behälterstruktur, Vermischen von Kernbrennstoff mit dem umgebendem Wirtsgestein und Wasser bzw. Lösung.
- Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern, durch Fließbewegung im Wirtsgestein.
- Auflösung, Migration und Ablagerung von Kernbrennstoff nach dem Beispiel einer geologischen Lagerstättenbildung.
- Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg.

Die Auswahl der in den Kritikalitätsanalysen weiter untersuchten Szenarien erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse des RSK-Ausschusses VER- und ENTSORGUNG (RSK 2003). Gemäß Vorschlag des AkEnd (2002) wird für die Langzeitszenarien ein Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren festgelegt.

## Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung einer Kritikalität

Kritikalität ist der Zustand einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion, d. h. die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate. Das Maß für die Zu- und Abnahme von Spaltungsneutro-

nen ist der Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$ . Ein endliches Spaltstoffsystem wird als kritisch bezeichnet, wenn  $k_{\text{eff}} = 1$  ist;  $k_{\text{eff}} < 1$ , bedeutet, dass ein Spaltstoffsystem unterkritisch ist und  $k_{\text{eff}} > 1$ , dass es überkritisch ist. Neben dem effektiven Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$  werden in Tab. 23 auch der infinite Multiplikationsfaktor  $k_{\text{inf}}$ , die kleinste kritische Masse  $M_{\text{krit}}$  und der kritische Zylinderdurchmesser  $\text{krit. Zyl.}\varnothing$  als Parameter zur Beurteilung der Kritikalität aufgeführt.

Für das Entstehen einer kritischen Spaltstoffanordnung sind folgende Einflussgrößen wesentlich:

- Kernbrennstoffmasse (Uran, Plutonium),
- räumliche Verteilung der Spaltstoffe,
- Uran-Anreicherung (Bereits niedrig angereichertes Uran mit 3,7 % U-235 kann kritisch werden.),
- Pu-Isotopenzusammensetzung,
- Moderationsverhältnis,
- Homogenität – Heterogenität der Mischung Kernbrennstoff/Moderator,
- Reflexionsverhältnisse für Neutronen,
- Neutronen absorbierende Stoffe in der Kernbrennstoffmatrix, im Abfallgebäude, im Moderator und Reflektor.

## 2.8.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

### Szenarienanalyse

Als Ergebnis der Untersuchungen zum Einfluss geologischer und geochemischer Prozesse auf die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers sind nach KIENZLER et al. (2003a, 2003b) folgende Szenarien in Betracht zu ziehen und in Tab. 22 zusammenfassend dargestellt.

Während des betrachteten Zeitraums von 1 Mio. Jahren ist eine fortschreitende Korrosion von Behältermaterial und eingelagertem Kernbrennstoff sehr wahrscheinlich. Der erwartete Zeitpunkt des Eintretens bestimmter Szenarien ist stets zu beachten, da sich die Zusammensetzung des Nuklidinventars über den Betrachtungszeitraum durch die radioaktiven Zerfallsketten verändert.

Direkt nach der Einlagerung des Behälters werden die verbliebenen Hohlräume der Einlagerungsstrecke mit einem Versatzmaterial verfüllt. Bei spezifikationsgerechter Verfüllung ist jeder Behälter vollständig von Versatzmaterial umschlossen. Für Endlagerformationen in Ton und kristallinem Gestein wird Bentonit als Versatzmaterial angenommen. Bentonit sättigt sich über die Umgebungsfeuchte mit Wasser auf. Verbleiben bei nicht spezifikationsgerechter Verfüllung noch Spalten im Bentonit, so werden diese bei Wasserzutritt durch das Aufquellen des Bentonits oder der Wirtsfornation verschlossen. Ein plötzlicher Zutritt einer größeren Lösungsmenge bis an den Behälter wird dabei nicht erwartet. In beiden Fällen dringt die Feuchtigkeit der Umgebung an die Außenhülle des Behälters, worauf dieser langsam zu korrodieren beginnt. Für die Dauer des Aufsättigungsprozesses werden 10 bis 50 Jahre veranschlagt.

Werden im Laufe der Zeit (500 bis 1.000 Jahre nach Einlagerung) keine bestimmten Stellen des Behälters, z. B. Schweißnähte, bevorzugt korrodiert, so schreitet die langsame Korrosion flächenhaft fort, bis sie entweder durch einen Mangel an oxidierenden Substanzen zum Erliegen kommt oder der stark korrodierte Behälter durch den Gebirgsdruck kollabiert. Dieses Kollabieren, angesetzt nach frühestens 1000 ( $10^3$ ) Jahren, kann unter Erhaltung der Brennstabstruktur ablaufen oder zur Fraktionierung von Hüllrohren oder ganzen Stäben führen. Bleiben die Hüllrohre intakt, so ist durch deren Korrosionsbeständigkeit der Brennstoff vor Korrosion weitgehend geschützt. Werden sie beschädigt, kann es zu einer Partikel- oder Pellettschüttung im Behälter kommen, und es setzt Brennstoffkorrosion durch Lösungskontakt ein. Die Korrosionsprodukte

sowohl des Behältermaterials als auch des Brennstoffes haben eine geringere spezifische Dichte als die Ausgangsmaterialien, so dass die Korrosionsvorgänge in jedem Fall mit einer Volumenvergrößerung und einem Ausfüllen von Hohlräumen im Behälter einhergehen.

Im Falle einer bevorzugten Korrosion an bestimmten Stellen des intakten Behälters kann Lösung in den Behälter eindringen, und er korrodiert fortan von innen und außen. Kommt es zu einer gleichzeitigen Korrosion des Brennstoffes, so muss unterschieden werden, ob das Behältermaterial oder der Brennstoff schneller korrodiert. Korrodiert der Behälterstahl schneller, so werden dessen Korrosionsprodukte, vor allem Eisenhydroxid  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  und Magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , die Zwischenräume zwischen den Brennstäben ausfüllen. Die Brennstäbe selbst bleiben erhalten. Für diesen Vorgang wird die Zeit von etwa  $10^4$  bis  $10^5$  Jahre nach der Einlagerung angesetzt. Darüber hinaus wird der Fall betrachtet, dass die eindringenden Korrosionsprodukte die Brennstäbe auseinander schieben und so den Stababstand vergrößern können. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der die Brennstäbe umgebende Behälter bereits korrodiert ist. Außerdem darf der äußere Gebirgsdruck, der diesem Prozess entgegen wirkt, nicht zu stark sein. Korrodieren Behältermaterial und Brennstoff in etwa gleich schnell, so kommt es zu einer mehr oder weniger homogenen Durchmischung von Brennstoff und Eisenkorrosionsprodukten. Korrodiert hingegen der Brennstoff bevorzugt, so kommt es zur Auflösung und Mobilisierung von Brennstoff.

Bei dem weiteren Fortschreiten der Korrosion ( $10^5$  bis  $10^6$  Jahre) sind unterschiedliche Situationen vorstellbar. Es kann zu einer homogenen Durchmischung von Brennstoff- und Behälterkorrosionsprodukten kommen. Im Falle einer Brennstoffauflösung ist dessen Ablagerung oder Sorption auf den Korrosionsprodukten oder dem Versatzmaterial denkbar. Dies gilt auch für die Ausfällung von Brennstoff als reines Mineral (Schoepit  $\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  oder andere) sowohl innerhalb als auch außerhalb der Behälterstruktur. Bei den Migrations- und Ablagerungsvorgängen können Uran und – je nach Zeitpunkt des Eintretens – noch vorhandenes Plutonium gemeinsam transportiert oder auf geochemischem Wege getrennt werden, so dass selektive Ablagerung denkbar ist. Wegen der hohen Sorptionsfähigkeit des Bentonits und der geringen Grundwasserbewegung in Tonformationen ist im Betrachtungszeitraum eine nennenswerte Wanderung von Brennstoff durch den Versatz hindurch jedoch nicht möglich. Auch ein Ansammeln und Ablagern von Kernbrennstoff aus mehreren unterschiedlichen Behältern ist nicht vorstellbar, wenn diese, wie angenommen, durch eine Ton- oder Bentonitschicht von einigen Metern getrennt sind. Eine Migration und Ablagerung von Kernbrennstoff nach dem Beispiel einer geologischen Lagerstättenbildung ist im Betrachtungszeitraum nur in sehr geringem Abstand zum endgelagerten Abfall denkbar. Als Substrat für die Abscheidung von Kernbrennstoffen aus der Lösung kommt korrodierter Stahl oder das Versatzmaterial in Frage.

Für ein Endlager in einer kristallinen Wirtsumgebung gelten durch den Einsatz des Bentonitversatzes prinzipiell identische Szenarien wie in Tongestein, weshalb hier nicht gesondert darauf eingegangen wird, mit einer Ausnahme: Durch im Kristallingestein vorhandene, wasserführende Klüfte könnte bei nicht spezifikationsgerechter Verfüllung kurz nach der Einlagerung ( $\sim 50$  Jahre) Lösung direkt zu einem Behälter vordringen, bevor der Bentonit aufgesättigt ist. Dies könnte zu frühzeitiger lokaler Korrosion bis hin zu Leckage und Lösungseintritt in den Behälter führen. Dadurch wiederum kommt es zu innerer Behälterkorrosion. Deren Folgen entsprechen den oben beschriebenen Szenarien, jedoch könnte der Eintrittszeitpunkt früher als bei Tongestein liegen, was u. U. Einfluss auf die zu betrachtende Nuklidzusammensetzung des Kernbrennstoffs hat. Auch eine Migration und Ablagerung von Uran oder Plutonium in Klüften des Wirtsgesteins kann bei einem solchen Szenario nicht prinzipiell ausgeschlossen werden.

Für ein Endlager in Salz wurde in diesem Vorhaben keine entsprechende geochemische Szenarienanalyse durchgeführt, da in diesem Fall auf die Ergebnisse in KIENZLER et al. (2003c) zurückgegriffen werden kann. Die prinzipielle Entwicklung, soweit sie für Kritikalitätsbetrachtungen von Bedeutung ist, weicht dabei nicht wesentlich von den beiden anderen betrachteten Gesteinstypen ab. Insbesondere gilt in Salzgestein wegen der Abwesenheit von Grundwasser ein Akkumulieren mehrerer Behälterinventare ebenfalls als ausgeschlossen. Die Einlagerung in Salz sieht eine Verfüllung der Stecken und Bohrlöcher mit Salzgrus vor, so dass Versatz und Wirtsgestein die gleiche Zusammensetzung aufweisen und in den Kritikalitätsrechnungen nicht unterschieden werden müssen. Bereits in einem vorangegangenen Vorhaben waren Kritikalitätsstudien zur Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe in Steinsalz durchgeführt worden (GMAL & MOSER 2001), wobei jedoch die Randbedingungen zu den Szenarienanalysen weitgehend auf hypothetischen Annahmen beruh-

ten. In dieser Arbeit wurden bereits umfangreiche Parameterstudien zur Endlagerung von abgebrannten Kernbrennstoffen in Steinsalz zusammengestellt. Die dabei verwendete geochemische Zusammensetzung des Wirtsgesteins basierte auf Analysen von Materialproben aus dem Versuchsendlager Asse und wurde für dieses Vorhaben übernommen. Die Zusammensetzung der gesättigten Steinsalzlösung wurde ebenfalls gemäß GMAL & MOSER (2001) gewählt.

Tab. 22: Endlagerszenarien der Nachbetriebsphase als Basis für Kritikalitätsanalysen (GMAL et al. 2004).

Nr.	Charakteristik	Zeitraumen
1	Intakte Endlagerbehälter POLLUX, BSK-3 mit Brennstäben, Wasserflutung und Reflexion (Auslegungsanforderung)	bis $10^3$ a
2	Behälterverformung durch Gebirgsdruck	ab $10^3$ a
3.1	Behälter in Tonumgebungen unterschiedlicher Spezifikation, Eindringen von Lösung	innerhalb von $10^3$ a
3.2	Behälter in Beton-Versatz	
4	Behälterkorrosion von innen und außen	$10^3$ bis $10^5$ a
4.1	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ wächst nach innen und füllt freies Volumen aus, Brennstäbe bleiben erhalten	
4.2	Aufweitung der BS-Anordnung durch Korrosionsprodukte $\text{Fe}(\text{OH})_3$	
4.3	Auflösung der BS, Vermischen mit $\text{Fe}(\text{OH})_3$	
4.4	Behälterkorrosion nur von außen, Wandstärke und Stabilität nehmen ab. Gebirgsdruck führt zu Fraktionierung der BS	
5.1	Umwandlung des Brennstoffes in Schoepit	bis $10^6$ a
5.2	Teilweises Vermischen von U-Mineralphasen und Korrosionsprodukten	bis $10^6$ a
6	Vollständige Mischung von U- und Fe-Phasen	
<b>Szenarien, die zu einer Akkumulation von Spaltprodukten im Nahfeld führen können</b>		
7.1	Sorption von U/Pu an Korrosionsprodukten, bis max. 4,3 g Pu pro kg $\text{Fe}_3\text{O}_4$	$10^5$ bis $10^6$ a
7.2	U/Pu-Ablagerung durch Oberflächenausfällung / Redoxphänomene an $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bis 62 g Pu/L	$10^5$ bis $10^6$ a
8	Bildung fester Uran-Mineralphasen durch Diffusionsprozesse aus gelöstem Brennstoff	ca. $10^6$ a

## Kritikalitätsanalysen auf der Basis geochemisch begründeter Eingangsparameter

Für alle betrachteten Fälle und Szenarien erbringen die durchgeführten Kritikalitätsrechnungen höhere Werte für den effektiven Multiplikationsfaktor  $k_{\text{eff}}$ , wenn man vom Spaltstoff der unbestrahlten MOX-Lagerstäbe mit 5 %  $\text{Pu}_{\text{fiss}}$  gegenüber abgebranntem  $\text{UO}_2$ - oder MOX-Brennstoff ausgeht. Deshalb wurde in vielen Betrachtungen Lagerstab-MOX als abdeckendes Brennstoffinventar angesetzt. Zeigt sich hier Unterkritikalität, so kann man auch bei abgebranntem  $\text{UO}_2$ - oder MOX-Brennstoff von Unterkritikalität in der jeweiligen Situation ausgehen.

Geht man von einem Behälterkollabieren infolge des Gebirgsdrucks als Störfallszenario aus, so würde dies zu einer Kompaktierung der Brennstabanordnung und damit zu einer Reaktivitätsverminderung des eingelagerten Brennstoffs im Fall der Flutung führen. Das plötzliche Entstehen eines überkritischen Spaltstoffsystems ist durch ein solches Ereignis nicht möglich.

Die Korrosion von Behältermaterial zu Eisenhydroxid oder Magnetit führt zu einer Erhöhung des spezifischen Volumens des Materials und damit zu einer Verringerung des freien Hohlraums, der bei einem

Lösungszutritt ausgefüllt werden könnte. Geht man von der vollständigen Ausfüllung des Behälterinnenraumes mit Lösung oder Korrosionsprodukten unter Beibehaltung der Stabanordnung aus, so ergibt sich ein maximaler  $k_{\text{eff}}$ -Wert von 0,66 für Lagerstab-MOX als Brennstoff. Unterstellt man, dass die nach innen wachsenden Korrosionsprodukte des Behälters die Brennstäbe auseinander drücken und zu einer Aufweitung des mittleren Stababstandes führen, so ergibt sich wegen der besseren Moderation ein Anstieg des  $k_{\text{eff}}$ -Wertes. Dabei bleibt die BSK-3-Kokille auch für den reaktivsten Abstand der Brennstäbe noch unterkritisch, während sich für den POLLUX-Behälter  $k_{\text{eff}}$ -Werte bis etwa 1,2 ergeben. Wegen des starken äußeren Gebirgsdrucks ist jedoch fraglich, ob ein solches Szenario überhaupt möglich ist. Die Aufweitung eines Brennstoffbündels in der hier unterstellten Größenordnung dürfte eher hypothetisch sein. Auch wurden die höchsten  $k_{\text{eff}}$ -Werte bei einer unterstellten vollständigen Beladung eines Behälters ausschließlich mit MOX-Lagerstäben erhalten. Weitere Kritikalitätsrechnungen für eine gemischte Beladung aus Lagerstäben und abgebrannten  $\text{UO}_2$ -Brennstäben haben gezeigt, dass bei geeigneter Mischbeladung auch für den POLLUX-Behälter Unterkritikalität gewährleistet werden kann.

Wird in der weiteren Analyse der Nachbetriebsphase auch eine Korrosion der Brennstäbe mit zunehmender Vermischung von Brennstoffen und Korrosionsprodukten des Behälters unterstellt, so führt dies wieder zu einer Abnahme der Reaktivität. Für ein homogenes Gemisch aus Brennstoff und Korrosionsprodukten des Behälters liegen die berechneten  $k_{\text{eff}}$ -Werte niedriger als 0,5. Dabei ist der POLLUX-Behälter wegen des größeren Eisenanteils weniger reaktiv als eine korrodierte BSK-3 Kokille. Eine mechanische Zerstörung der Stabanordnung mit anschließender Pellet- oder Partikelschüttung und Flutung durch Lösung zeigt mit einem  $k_{\text{eff}}$ -Wert von maximal 0,49 ebenfalls einen geringeren Wert als die intakte geflutete Anordnung.

Aus geochemischer Sicht wird eine lokal begrenzte Umlagerung von Kernbrennstoff innerhalb eines Behälters als denkbarer kritikalitätsrelevanter Langzeitprozess angesehen. Dabei kommt es innerhalb eines Behälters aufgrund von chemischen Potenzialunterschieden zu diffusionsgetriebenen Prozessen mit Auflösung und anschließender Ausfällung von Uran als neue feste Mineralphase. In einer vergleichenden Kritikalitätsuntersuchung verschiedener Uranminerale erwies sich Metaschoepit  $\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  als die reaktivste Verbindung dieser Art. Nimmt man die Mineralphase als Schwermetall-Schoepit  $(\text{SM})\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  mit dem kompletten Aktinidenvektor aus Abbrand- und Abklingrechnungen bis  $10^6$  Jahre an und unterstellt die Bildung reiner Phasen ohne Vermischung mit sonstigen Korrosionsprodukten, so ist eine kritische Anordnung mit dem Inventar eines einzelnen Behälters theoretisch erreichbar. Es ist aber anzumerken, dass eine weitgehende Umwandlung des Behälterinventars zu Schoepit aus mehreren Gründen unwahrscheinlich erscheint. Zum einen verbraucht die Bildung von Schoepit aus  $\text{UO}_2$  Sauerstoff und Wasser und steht damit in direkter Konkurrenz zur Korrosion des Behälters selbst. Zum zweiten bringt die Umwandlung in Schoepit eine Volumenverdopplung gegenüber dem  $\text{UO}_2$ -Brennstoff mit sich, so dass sich der Behälterinnenraum entgegen dem äußeren Gebirgsdruck vergrößern müsste. Alternativ kommt eine Verdichtung in Frage, wobei offen bleibt, inwieweit dies möglich ist. Die Dichte von Eisen ist mit  $7,85 \text{ g/cm}^3$  gleichfalls höher als die seiner Korrosionsprodukte, so dass die Behälterkorrosion auch in dieser Hinsicht mit der Entstehung einer Mineralphase aus dem Kernbrennstoff konkurriert. Durch quantitative Abschätzungen könnten hier die Randbedingungen für weitere Kritikalitätsrechnungen eingegrenzt werden.

Durch selektive Sorption oder Ablagerung von Plutonium aus abgebranntem MOX-Brennstoff oder aus MOX-Lagerstäben an Eisenkorrosionsprodukten sind kritische Konfigurationen denkbar. Aus geochemischer Sicht sind jedoch Transportprozesse, die zu derartigen Konfigurationen führen können, aufgrund der geologisch gesehen kurzen Halbwertszeit von Pu-239 sowie des guten Rückhaltevermögens und der geringen Fließgeschwindigkeit von Lösung im Versatzmaterial auszuschließen.

Die Ergebnisse der Kritikalitätsanalysen sind in Tab. 23 und Tab. 24 zusammengefasst:

Tab. 23: Kritikalitätsrelevante Langzeitszenarien für ein Endlager in Ton- und Kristallinformationen (GMAL et al. 2004).

Nr	Szenarien	Zeiträumen	Durchgeführte Rechnungen/Kommentar	Ergebnisse [ $k_{eff}$ ]
1	Intakter Endlagerbehälter POLLUX, BSK-3 mit Brennstäben, Wasserflutung und Reflexion (Auslegungsanforderung)	bis $10^3$ a	UO <sub>2</sub> 3,6 % AA, 40 GWd, $10^3$ a POLLUX, BSK-3 MOX 3,7 % Pu <sub>fiss</sub> , 40 GWd, $10^3$ a, POLLUX BSK-3 MOX-Lagerstäbe 5 % Pu <sub>fiss</sub> , $10^3$ a, POLLUX BSK-3	$k_{eff} < 0,48$ $k_{eff} < 0,5$ $k_{eff} < 0,45$ $k_{eff} < 0,75$ $k_{eff} < 0,65$
2	Behälterverformung durch Gebirgsdruck	ab $10^3$ a	nur Kompaktierung möglich, durch (1) abgedeckt	
3.1	Behälter in Tonumgebungen unterschiedlicher Spezifikation, Eindringen von Lösung	ab $10^3$ a	System A bis F <sup>3)</sup> UO <sub>2</sub> 3,6 % AA, 40 GWd, $10^3$ a, POLLUX, BSK-3 MOX 3,7 % Pu <sub>fiss</sub> , 40 GWd, $10^3$ a, POLLUX, BSK-3 MOX-Lagerst. 5 % Pu <sub>fiss</sub> , $10^3$ a, POLLUX, BSK-3	$k_{eff} \leq 0,50$ $k_{eff} \leq 0,45$ $k_{eff} < 0,66$
3.2	Behälter in Beton-Versatz	innerhalb von $10^3$ a	System H bis J <sup>3)</sup>	wie 3.1
4	Behälterkorrosion von innen und außen	$10^3$ bis $10^5$ a		
4.1	Fe(OH) <sub>3</sub> wächst nach innen und füllt freies Volumen aus, Brennstäbe bleiben erhalten		System G <sup>3)</sup> , Brennstoff Lagerstab MOX	$k_{eff} < 0,66$
4.2	Aufweitung der Brennstab (BS)-Anordnung durch Korrosionsprodukte Fe(OH) <sub>3</sub>		System G <sup>3)</sup> , Brennstoff Lagerstab MOX	$k_{eff} < 0,92$ BSK-3 $\approx 0,7-1,12$ POLLUX
4.3	Auflösung der BS, Vermischen mit Fe(OH) <sub>3</sub>		durch 4.1 abgedeckt	$k_{eff} < 0,5$
4.4	Behälterkorrosion nur von außen, Wandstärke und Stabilität nehmen ab, Gebirgsdruck führt zu Fraktionierung der BS		Innenraum homogen mit Brennstoffpartikeln und Zirkalloy, Porenvolumen mit Lösung ausgefüllt, außen Fe(OH) <sub>3</sub> oder Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	durch 3.1 und 5.1 abgedeckt $k_{eff} \leq 0,77$
5.1	Umwandlung des Brennstoffes in Schoepit	bis $10^6$ a	innen reine U-Phase, außen Fe(OH) <sub>3</sub> oder Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	krit. Zyl.Ø 28 – 80 cm
5.2	Teilweises Vermischen von U-Mineralphasen und Korrosionsprodukten	bis $10^6$ a	3-Zonen-Modell, Vermischen von U- und Fe-Phasen innen und in zweiter Ringzone	durch 5.1 und 6 abgedeckt
6	Vollständige Mischung von U- und Fe-Phasen	ab $10^6$ a		$k_{inf} < 1,0$
<b>Alternative Szenarien zur Akkumulation von Spaltnukliden im Nahfeld</b>				
7.1	Sorption von U/Pu an Korrosionsprodukten, bis max. 4,3 g Pu pro kg Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$10^5$ bis $10^6$ a	$k_{inf}$ für homogenes Gemisch	$k_{inf} < 1,0$
7.2	U/Pu-Ablagerung durch Oberflächenausfällung / Redoxphänomene an Fe(OH) <sub>3</sub> bis 62 g Pu/L	$10^5$ bis $10^6$ a	$k_{inf}$ für homogenes Gemisch krit. Kugelmassen für MOX-Pu und LS-Pu, $5 \cdot 10^4$ a <sup>1)</sup>	$k_{inf} > 1,0$ 12,5 kg, 1,5 kg
8	Bildung fester Uran-Mineralphasen durch Diffusionsprozesse aus gelöstem Brennstoff	ca. $10^6$ a	$k_{inf}$ und kritische Massen für feste Phasen von Uran: Schoepit Kugel Schoepit, Reflektor Fe(OH) <sub>3</sub> Zylinder Schoepit, Reflektor Magnetit oder Fe(OH) <sub>3</sub>	$k_{inf} \approx 0,9-1,2$ <sup>2)</sup> $M_{krit} \approx 230-2.100$ kg $k_{eff} = 0,96 - 1,003$

<sup>1)</sup> Zeitraum zu kurz für eine Akkumulation von Pu in makroskopischen Mengen

<sup>2)</sup> Kugelgeometrie aus Nuklidinventar einer BSK-3-Kokille für Lagerstab(LS)-MOX 5% Pu<sub>fiss</sub>,  $10^6$  a

<sup>3)</sup> nach KIENZLER et al. (2003a)

Tab. 24: Vergleich der berechneten  $k_{\text{eff}}$ -Werte von Endlagerbehältern in verschiedenen Wirtsgesteinen nach 1.000 Jahren Abklingzeit (GMAL et al. 2004).

Behälter	Wirtsgestein	UO <sub>2</sub> , 3,6 %, 40 GWd $k_{\text{eff}}$	MOX, 3,7 % Pu <sub>fiss</sub> , 40 GWd $k_{\text{eff}}$	Lagerstab-MOX, 5 % Pu <sub>fiss</sub> $k_{\text{eff}}$
BSK-3 Kokille	Ton	0,4898	0,4489	0,6537
BSK-3 Kokille	Kristallin	0,4898	0,4483	0,6519
BSK-3 Kokille	Salz	0,4361	0,4204	0,6285
POLLUX	Ton	0,4752	0,4650	0,6931
POLLUX	Kristallin	0,4754	0,4665	0,6933
POLLUX	Salz	0,4289	0,4369	0,6638

## Endlagerung von Sonderbrennstoffen

In dem Vorhaben wurden auch spezielle Brennstoffarten, die zur direkten Endlagerung vorgesehen sind, unter Gesichtspunkten der Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase untersucht. Demnach ergibt sich für HTR-Brennstoff, wie er z. B. in den kugelförmigen Brennelementen des Thorium-Hochtemperaturreaktors (THTR-300) enthalten ist, kein höheres Kritikalitätsrisiko als für LWR-Brennstoff. Für hochangereicherten Brennstoff aus Forschungsreaktoren sind hingegen Konditionierungsmaßnahmen erforderlich, um den Anreicherungsgrad des Brennstoffs so zu senken, dass Kritikalität nicht eintreten kann. Dies kann z. B. durch Vermischen des Brennstoffs mit abgereichertem Uran erreicht werden.

## Exemplarische probabilistische Kritikalitätsanalyse

In Ergänzung der deterministischen Kritikalitätsanalysen wurde auch eine probabilistische Untersuchung zur Möglichkeit des Entstehens kritischer Spaltstoffansammlungen durchgeführt. Die angewandte Analysemethodik beruht auf der Erstellung von Ereignisbäumen mit Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungspunkten für alle relevanten Szenarien. Daraus werden Referenzwerte für die Eintrittswahrscheinlichkeit des Zielerignisses Kritikalität ermittelt. Die Methodik wurde am Beispiel eines als sehr unwahrscheinlich eingestuften Szenarios in kristallinem Gestein, das zur Separation von Plutonium führen könnte, demonstriert. Wegen der Unsicherheit der Eingangsgrößen können die Ergebnisse jedoch zurzeit noch nicht als belastbare Wahrscheinlichkeitsaussagen gewertet werden.

## Abschätzungen der Auswirkungen einer Kritikalität

Auch wenn eine Kritikalitätsexkursion in der Nachbetriebsphase eines Endlagers als sehr unwahrscheinlich gilt, kann sie allein mit physikalischen Argumenten nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Existenz der vor 2 Milliarden Jahren aktiven Naturreaktoren in Oklo (Gabun) (GAUTHIER-LAFAYE, WEBER & OHMOTO 1989) zeigt, dass kritische Spaltstoffsysteme unter geologischen Bedingungen grundsätzlich möglich sind. Daher wurden in diesem Vorhaben auch Untersuchungen zum Verlauf und zu den Auswirkungen einer unterstellten Kritikalität durchgeführt.

Unter der Annahme, dass ein überkritisches Spaltstoffsystem durch Rückkopplungseffekte in einen stationären kritischen Zustand ( $k_{\text{eff}} = 1$ ) übergeht, wurden Abschätzungen zur Leistung und Dauer einer Kritikalitätsexkursion vorgenommen. Ein wirksamer Rückkopplungseffekt ist z. B. ein Temperaturanstieg im Spaltstoffsystem, der zu einer Reaktivitätsabnahme und zu einer Begrenzung des Leistungsanstiegs führt. Auf der Basis eines solchen vereinfachten quasistationären Modells ergibt sich für das Spaltstoffsystem eine Leistungsdichte von ca.  $28 \text{ W/dm}^3$  und eine Grenztemperatur von  $476 \text{ K}$ . (Das Volumen des betrachteten Spaltstoffsystems lag bei  $91 \text{ dm}^3$ ). Abbrandrechnungen zeigen, dass das Spaltstoffsystem auf diesem Leistungsniveau über einige tausend Jahre kritisch bleiben könnte.

Des Weiteren wurden die in der Literatur diskutierten Szenarien einer autokatalytischen Kritikalität, die zu explosionsartigen Abläufen im Endlager führen können, hinsichtlich ihrer Relevanz für ein Endlager in Deutschland geprüft. Eine Grundvoraussetzung für diese Szenarien ist die Einlagerung von größeren Mengen an reinem, waffengrädigem Plutonium (95 % Pu-239, 5 % Pu-240), was für ein Endlager in Deutschland nicht zutrifft. In zahlreichen, vor allem amerikanischen Arbeiten wurde mehrfach gezeigt, dass eine Kritikalität durch die Endlagerung von waffengrädigem Plutonium zwar vorstellbar, jedoch unter geologischen Bedingungen nicht mit explosiver Energiefreisetzung verbunden ist. In einer realistischen Endlagerumgebung würden stets negative Rückkopplungseffekte eine derartige Leistungsexkursion begrenzen.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann festgestellt werden, dass für den unwahrscheinlichen Fall des Auftretens einer Kritikalität in der Nachbetriebsphase eines Endlagers in Deutschland nicht mit einer Beeinträchtigung der Rückhaltebarrieren und einer nennenswerten Freisetzung von dabei neu entstehenden Radionukliden zu rechnen ist.

## Bewertung der Wirtsgesteine im Vergleich

Aus Sicht der Kritikalitätssicherheit kann bei spezifikationsgerechtem Einsatz von entsprechend geeignetem Versatzmaterial keine eindeutige Entscheidung zugunsten eines der betrachteten Wirtsgesteine getroffen werden. Prinzipiell kann durch geeignete Auslegung und Standortwahl sowohl in Salz als auch in Ton- oder Kristallingestein die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase auf annähernd gleichem Niveau gewährleistet werden. Durch die Absorptionsfähigkeit von Cl-35 weist Salzgestein jedoch leichte Vorteile gegenüber Ton und Kristallingestein auf.

## 2.9 MENSCHLICHE EINWIRKUNGEN

### Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>Colenco Power Engineering AG</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>Kavernen Bau- und Betriebs GmbH</i> <i>Prof. Dr. Neil A. Chapmann</i> <i>Dr. Charles McCombie</i>
<i>Zitat:</i>	<i>SKRZYPPEK et al. (2005b)</i>

### 2.9.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Menschliche Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle in dessen Nachbetriebsphase können das Barrierensystem verletzen, das den langfristigen Einschluss der Abfälle gewährleisten soll. Dadurch stellen solche Einwirkungen eine direkte Gefahr für den Verursacher der Einwirkungen oder dessen Vorhaben dar und gefährden außerdem die Bevölkerung indirekt durch dabei in die Biosphäre freigesetzte Schadstoffe. Daneben können auch die Gegebenheiten für die langzeitsichere Verwahrung der endgelagerten radioaktiven Abfälle derart verändert werden, dass eine unzulässige Kontamination der Biosphäre zu befürchten ist. Bei der Auswahl und der Sicherheitsbewertung eines Endlagerstandorts ist daher der Fragenkomplex der potenziellen menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager in dessen Nachbetriebsphase und ihrer daraus resultierenden radiologischen Konsequenzen einzubeziehen. Daneben können bereits bei der Konzeptentwicklung für ein Endlager Maßnahmen zur Verringerung von Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Konsequenzen solcher Einwirkungen vorgesehen werden.

Die Aussagen über mögliche zukünftige menschliche Einwirkungen sind sehr spekulativ, so dass sie mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Es sollten Grundlagen für die weitere Behandlung dieses Themas bei der Standortauswahl, Anlagenplanung und beim Sicherheitsnachweis ermittelt werden.

Im Hinblick auf die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf das Barrierensystem des Endlagers ist zwischen Aktivitäten zu unterscheiden, durch welche die Wirksamkeit des Barrierensystems oder die Standorteigenschaften verändert werden und solchen, bei denen das Barrierensystem durchdrungen wird, d. h. die einen direkten Eingriff in das Endlager darstellen. Menschliche Aktivitäten, die zu einer Veränderung der Barrierenwirkung führen können, wie beispielsweise der Bau einer Talsperre mit den dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Grundwassersituation, beeinflussen das langfristige Isolationsverhalten des Endlagersystems. Sie sind bei ihrer Behandlung den ungestörten Entwicklungen vergleichbar und wurden in dieser Untersuchung deshalb nicht betrachtet. Szenarien, bei denen ein beabsichtigtes Eindringen in ein stillgelegtes Endlager unterstellt wird, bleiben ebenfalls unberücksichtigt, weil diese grundsätzlich nicht verhindert werden können und deren Folgen vom Verursacher zu verantworten sind.

Bei Endlagern für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist es naturgemäß nicht auszuschließen, dass bei einem späteren menschlichen Eindringen, bei dem es zum direkten Kontakt einzelner Personen mit Abfällen bzw. Abfallbestandteilen oder stark kontaminiertem Gestein kommt, bei der betroffenen Personengruppe erhebliche gesundheitliche Schäden auftreten. Dies trifft im Besonderen für Bohrmannschaften zu, die Abfälle oder kontaminiertes Gestein zutage fördern oder für Bergleute, welche unbeabsichtigt ein Endlager oder einen Bereich mit kontaminiertem Wirtsgestein anfahren. Das Risiko für diese Personengruppen wird dem allgemeinen Berufsrisiko zugerechnet und im Folgenden nicht weiter betrachtet. Für den Vergleich der Geosysteme im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen wurden hier somit nur die Szenarien berücksichtigt, die zu einer potenziellen Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung infolge eines unbeabsichtigten Eindringens in ein Endlager führen.

Für die ersten Jahrhunderte nach Verschluss eines Endlagers ist mit dem Fortbestand der Kenntnis über seine Existenz zu rechnen. Daher kann für diese Zeit ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen ausgeschlossen werden. Für die Folgezeit ist dagegen ein solches Eindringen nicht auszuschließen. Die potenziellen radiologischen Konsequenzen solcher Eindringenszenarien müssen daher in die Sicherheitsbewertungen für Endlager einbezogen werden. Die Größe dieser radiologischen Konsequenzen ist unter anderem abhängig vom Wirtsgestein, dem Standort, der Auslegung des Endlagers, der Art und Menge der eingelagerten Abfälle sowie vom Eintrittszeitpunkt des Ereignisses.

Für die Szenarien zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen werden als aus heutiger Sicht plausible auslösende Ereignisse das Niederbringen von Prospektionsbohrungen, die Auffahrung von Bergwerken oder die Solung von Kavernen im Salinar betrachtet. Dabei werden die für die verschiedenen Abfallarten vorgesehenen Einlagerungsverfahren in Abhängigkeit von den geologischen Gegebenheiten am jeweiligen Standort und den daraus resultierenden geotechnischen Randbedingungen durch Referenz-Endlagerkonzepte repräsentiert.

Basierend auf diesen Grundlagen wurden in der Untersuchung folgende Ziele verfolgt:

- Identifikation und Beschreibung der möglichen Szenarien für unbeabsichtigte menschliche Einwirkungen in ein verschlossenes Endlager,
- Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der Szenarien in Abhängigkeit von den betrachteten Referenzendlagern in den unterschiedlichen Geosystemen,
- Ermittlung daraus resultierender radiologischer Auswirkungen für die allgemeine Bevölkerung,
- Ermittlung der aus den Szenarien resultierenden Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der im Endlager eingelagerten Abfälle,
- Vergleich und Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Relevanz der Szenarien in den betrachteten Geosystemen,
- Erarbeitung von Vorschlägen für Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. der radiologischen Konsequenzen dieser Szenarien.

## 2.9.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

Gegenstand der Untersuchungen waren sechs generische Referenz-Geosysteme in vier Wirtsgesteinen mit den spezifizierten Konfigurationen der zugehörigen generischen Referenz-Endlager und ein Referenz-Abfallinventar. Für diese sechs Geosysteme wurden Referenz-Szenarien betrachtet. Die Auswirkungen dieser Szenarien wurden modelliert und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit abgeschätzt. Für die in die Berechnungen eingehenden Parameter zu den Referenz-Endlagern und den Geosystemen wurden repräsentative Werte verwendet. Für alle Geosysteme wurde ein einheitliches Deckgebirge angenommen, d. h. die Bewertungsunterschiede zwischen den Geosystemen werden nicht von Deckgebirgseigenschaften hervorgerufen.

Die abdeckenden Referenzszenarien wurden gemäß international üblichem Vorgehen durch Identifizierung der relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEP) abgeleitet. Da belastbare quantitative Schätzwerte für absolute Eindringwahrscheinlichkeiten nicht nach wissenschaftlichen Kriterien abgeleitet werden können, sind lediglich Vergleiche der Geosysteme bzw. der Szenarien auf Grundlage von Plausibilitätsbetrachtungen möglich. Diese führen schließlich zu einer semi-quantitativen Klassifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten. Dabei wurden als wesentliche Einflussfaktoren die geosystemtypischen Endlagerkonfigurationen, die Permeabilität des Wirtsgesteins, die Wahrscheinlichkeit, ein Endlager mittels geophysikalischer Methoden zu entdecken (Abbildungsmöglichkeiten) und der Wert der gesuchten Rohstoffe einbezogen. Hieraus lassen sich wiederum Rangfolgen für die Bedeutung der Szenarien zum menschlichen Eindringen insgesamt für die betrachteten Geosysteme bestimmen.

Als Maß für die radiologische Konsequenz der Szenarien wurde ein so genannter Radiologischer Indikator (RI) eingeführt, der als Verhältnis der Strahlenexpositionen durch den Verzehr von kontaminiertem Trinkwasser und von natürlichem Trinkwasser ( $2,6 \cdot 10^{-6}$  Sv/a) definiert ist. Die RI-Werte wurden nach ihrer Auswirkung in fünf Gruppen klassifiziert:  $RI \leq 1$ : keine;  $1 < RI < 10$ : gering;  $10 \leq RI < 1.000$ : mäßig;  $1.000 \leq RI < 10^5$ : groß;  $10^5 \leq RI$ : sehr groß.

Für die Abschätzung der Radiologischen Indikatoren wurde von stark vereinfachenden Modellvorstellungen ausgegangen, die aber die typischen Charakteristiken der Geosysteme so weit einschließen, dass ihre wesentlichen Unterschiede deutlich werden. Bei den Abfallbehältern wurde unterstellt, dass diese während ihrer jeweiligen Standzeit intakt bleiben und danach eine Freisetzung und Verteilung der Radionuklide im Einlagerungsfeld erfolgt. Die Freisetzungsdauer im Modell ist radionuklidspezifisch und hängt von der Sorption und der Löslichkeitsgrenze der betrachteten Radionuklide im jeweiligen Nahfeld ab. Die Verzögerung des Transports, die sich aus der Kinetik des Auflösungsprozesses ergibt, wurde nicht berücksichtigt. Bei der ungestörten Entwicklung eines Endlagers in den Geosystemen mit nicht-salinarem Wirtsgestein beginnt danach die Freisetzung der Radionuklide aus dem Endlager in das Wirtsgestein und schließlich in das oberflächennahe Grundwasser. Die Dauer des Transports der Radionuklide durch die Wirtsgesteinsbarriere und das Deckgebirge in die Biosphäre hängt je nach Szenario entweder von den Wirtsgesteins- und Deckgebirgseigenschaften ab oder wird durch den Eintrittszeitpunkt der Szenarien bestimmt.

Allgemein gültige Aussagen über den Transport in das oberflächennahe Grundwasser sind für generische Endlagerstandorte wegen der Bandbreite der bestimmenden Parameter nicht möglich, da wesentliche Standorteigenschaften wegen der hier vorgenommenen Verwendung von Mittelwerten nicht immer angemessen repräsentiert werden können. Somit konnten Einflüsse des radioaktiven Zerfalls und der Sorption am Aquifergestein während des Transports nicht adäquat berücksichtigt werden. Die Vernachlässigung der Sorption im Deckgebirge führt zu konservativen Ergebnissen, die aber einen Vergleich der Szenarien untereinander zulassen. Bei der Mehrzahl der Eindringenszenarien wird nur ein Teil des Gesamtinventars betroffen. Die Größe dieses Anteils ist vom jeweiligen Szenario und dem Geosystem bzw. Wirtsgestein abhängig und wurde bei den Berechnungen mit einem entsprechenden Schätzwert berücksichtigt. Die radiologische Konsequenz wurde über ein Trinkwasserszenario berechnet, das die Verdünnung in einem Aquifer sowie die Entnahme des jährlichen Trinkwasserbedarfs einer Referenzperson aus diesem Aquifer beinhaltet.

Als qualitative Bewertungsgröße für die Bedeutung eines Szenarios wurde die Relevanz (anstelle der quantitativen Größe Risiko) als Ergebnis einer Verknüpfung aus Konsequenz und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios abgeschätzt. Die Schätzwerte wurden klassifiziert in keine, geringe, mäßige, große und sehr große Relevanz. Beispielsweise ergibt sich für eine Szenario/Geosystem-Kombination mit großer Konsequenz und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit eine mäßige Relevanz. Die so klassifizierten Relevanzen dienen primär dem Vergleich der Geosysteme im Hinblick auf die Szenarien und mit Einschränkungen auch dem Vergleich der Szenarien untereinander. Gleichwohl ermöglichen die Ergebnisse auch einen Vergleich der Relevanz der Szenarien für ein bestimmtes Geosystem, deren Allgemeingültigkeit durch die in der Realität vorkommenden Abweichungen von den zugrunde gelegten geologischen Randbedingungen und Auslegungsparametern der Referenzendlager indes eingeschränkt ist.

Abschließend wurde untersucht, welche Aspekte bereits bei der Standortauswahl und der Endlager-Auslegung für eine Verringerung der Relevanz in Betracht gezogen werden sollten und welche Maßnahmen hierfür zweckmäßig sind. Ausgehend von einem Katalog der grundsätzlich infrage kommenden Maßnahmen wurden diese im Hinblick auf ihre Wirksamkeit bewertet.

## 2.9.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

### Referenzszenarien zum menschlichen Eindringen

Die FEP mit der größten Bedeutung für die vorliegende Aufgabenstellung sind die der Kategorien Bohrtätigkeiten und Bergbau und andere untertägige Arbeiten der NEA-FEP-Liste (NEA 1999). Die Kombination dieser FEP mit menschlichem Eindringen liefert unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen den nachfolgend aufgeführten Satz von sechs Szenarien:

1. Bergbau in kontaminiertem Wirtsgestein: In der Umgebung des Endlagers findet Bergbau statt. Dabei wird bereits kontaminiertes Wirtsgestein gefördert und auf einer Halde deponiert. Die Radionuklide werden vom Regen ausgewaschen und gelangen in oberflächennahes Grundwasser, das von der Bevölkerung genutzt wird.
2. Bohrung in einen Abfallbehälter: Eine Explorationsbohrung im Bereich des Endlagers trifft direkt auf die Abfälle und durchbohrt diese. Die Grundwasserströmung im – mittlerweile wieder verfüllten – Bohrloch setzt an der Bohrlochwand haftende Radionuklide in das Grundwasser eines hydraulisch verbundenen oberflächennahen Aquifers frei, das von der Bevölkerung direkt genutzt wird.
3. Bohrung in das Endlager ohne Abfälle zu treffen: Eine Explorationsbohrung im Bereich des Endlagers erschließt Grundwasser oder Lösung im Endlagerbereich, ohne die Abfälle direkt zu treffen. Strömungen im anschließend verfüllten Bohrloch setzen kontaminiertes Grundwasser bzw. kontaminierte Lösung aus dem Nahbereich der Bohrung frei, das entlang der Bohrung in die Biosphäre transportiert und von der Bevölkerung genutzt wird.
4. Anbohren eines tiefer liegenden Reservoirs mit Überdruck: Eine Explorationsbohrung durchteuft das Endlager ohne die Abfälle direkt zu treffen und fährt ein tiefer liegendes Grundwasserreservoir mit Überdruck an. Das durch den Überdruck geförderte Grundwasser reißt kontaminierte Lösung aus dem Endlagerbereich mit, versickert an der Oberfläche und gelangt in einen oberflächennahen Aquifer, aus dem Wasser gefördert wird, das von der Bevölkerung genutzt wird.
5. Anbohren eines kontaminierten Grundwasserleiters: Eine Explorationsbohrung nach Trinkwasser wird in einen Aquifer in der Nähe des Endlagers niedergebracht, in den zuvor Radionuklide aus dem Endlager gelangt sind. Das kontaminierte Trinkwasser wird gefördert und von der Bevölkerung genutzt.
6. Abbau von Evaporiten durch Solung: Im Bereich des Endlagers wird Salz im Solverfahren gewonnen. Abfallbehälter gelangen in den Laugensumpf. Nach Korrosion der Behälter werden mit der Sole auch die Radionuklide gefördert. Aus der kontaminierten Sole wird Speisesalz produziert, das von der Bevölkerung verzehrt wird.

Die Szenarien 1 bis 5 betreffen alle Geosysteme, Szenario 6 nur die Geosysteme mit Salinar als Wirtsgestein.

### Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens

Die betrachteten Geosysteme wurden nach Flächenbedarf und geophysikalischer Abbildungsmöglichkeit des Referenzendlagers sowie nach dem Explorationsziel im Hinblick auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien bewertet. Wegen der unterschiedlichen Bedeutung dieser Bewertungsaspekte für die einzelnen Szenarien ergeben sich für diese bei den einzelnen Geosystemen jeweils unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten. Nach der sich daraus ergebenden Rangfolge der Eintrittswahrscheinlichkeiten erweisen sich die Geosysteme Tonstein, Salinar/steile Lagerung und Kristallin als die Günstigsten. Ausschlaggebend für diese Bewertung sind folgende Gründe:

Das Anfahren eines Endlagers im Tonstein durch ein Bergwerk bei der Suche nach Rohstoffen ist sehr unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist dagegen, dass das Wirtsgestein bei der Suche nach einem Grundwasserleiter, einer Öllagerstätte, einem Salzvorkommen oder ähnlichem vertikal durchörtert wird. Die geophysikalischen Abbildungsmöglichkeiten für ein Endlager sind beim Tonstein ähnlich wie beim Kristallin, da sich die Vor- und Nachteile der Verfahren jeweils weitgehend kompensieren. Die gegenüber den anderen nicht-salinaren Wirtsgesteinen kleinere Ausbreitzzone der kontaminierten Wässer infolge der geringen Permeabilität des Tonsteins trägt außerdem zur positiven Bewertung bei.

Für das Kristallin ist wegen seiner gegenüber dem Salinar und dem Tonstein höheren Permeabilität mit einer schnelleren Schadstoffausbreitung und damit einer größeren Ausbreitzzone der kontaminierten Wässer zu rechnen. Diese Auswirkung wird kompensiert von der geringeren Grundfläche eines mehrsöhligen Endlagers und dem geringen Rohstoffwert des Wirtsgesteins, der die Wahrscheinlichkeit des Anbohrens bzw. der Auffahrung eines Bergwerks verringert. Zudem sind die geophysikalischen Abbildungsmöglichkeiten für ein Endlager im Kristallin ähnlich wie beim Tonstein und besser als bei den übrigen Wirtsgesteinen.

Für die Geosysteme mit Wirtsgestein Salinar ist die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens geringfügig höher. Die Wahrscheinlichkeit, kontaminiertes Wirtsgestein oder kontaminierte Wässer anzutreffen ist zwar niedriger, wegen des Rohstoffwerts ist aber ein Anfahren des Endlagers durch Bohrungen, Auffahrung eines Bergwerks oder eine Solung relativ wahrscheinlicher. Die Abbildungsmöglichkeiten sind wegen des bündigen Formschlusses zwischen Abfallkörper und Versatz geringer als in den anderen Geosystemen. Wegen der größeren Flächenvariabilität bei der Anlage eines Bergwerks oder einer Kavernenlösung hat das Geosystem Salinar/steile Lagerung Vorteile gegenüber dem Geosystem Salinar/flache Lagerung.

Die größte Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens besteht für die sonstigen Gesteine unter Tonüberdeckung. Gründe für diese Einstufung sind die hohe Plausibilität der Szenarien und die aus der weit gefassten Spezifikation des Geosystems (es können Gesteine mit relativ hoher Wasserdurchlässigkeit sein) resultierende hohe Wahrscheinlichkeit, durch Bohrungen oder ein Bergwerk auf kontaminierte Wässer oder kontaminiertes Wirtsgestein zu stoßen.

## Radiologische Konsequenzen

Die Größe der radiologischen Konsequenzen der Szenarien wird maßgeblich durch Merkmale der jeweiligen Endlagerkonzepte bestimmt, wie z. B. dem vollständigen Einschluss der Abfälle (keine Ausbreitung in das Wirtsgestein), dem Versatz (Sorptions), der Art der Abfallbehälter (Korrosion, Bohrbarkeit, Quellterm) und der Anzahl der Abfallbehälter in einem Einlagerungsbereich (Quellterm). Die Ergebnisse der modellhaften Abschätzungen zu den radiologischen Konsequenzen sind in Tab. 25 zusammenfassend wiedergegeben.

Die Konsequenzen, die sich für die unterschiedlichen Szenarien in Verbindung mit den zugrunde gelegten Eingangsdaten und Randbedingungen ergeben, erstrecken sich über die gesamte Bandbreite des in Kap. 2.9.2 beschriebenen Bewertungsmaßstabs. Da die Untersuchungen z. T. große Unterschiede zwischen den Konsequenzen ergeben haben, die aus den wärmeentwickelnden Abfällen (WA) und denen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (VWA) resultieren, wurden die Ergebnisse in der Untersuchung nach beiden Abfallarten aufgeschlüsselt. Generell gilt, dass bei unterschiedlichen Konsequenzen die Konsequenzen bezüglich der WA wegen der dickwandigen Behälter stets geringer sind. Für die Geosysteme mit Wirtsgestein Salinar ist hier insbesondere festzuhalten, dass die WA nur bei den Szenarien 2 und 3 zu radiologischen Konsequenzen führen.

Bei den dichteren Wirtsgesteinen Salinar und Tonstein wurde zudem die Variante untersucht, dass sich im Wirtsgestein ein Bereich mit erhöhter Sekundärporosität und –permeabilität (aufgrund des möglichen Gasdruckaufbaus im verschlossenen Endlager, siehe Kap. 2.7) gebildet hat, der die Ausbreitung der Schadstoffe in das Wirtsgestein ermöglicht bzw. begünstigt. Dieser Effekt wirkt sich auf die Szenarien 1 und 5 aus und führt z. T. zu signifikanten radiologischen Konsequenzen.

Tab. 25: Vergleichende Gegenüberstellung der Konsequenzen für die unterschiedlichen Szenarien und Geosysteme (nach SKRZYPPEK et al. 2005b).

Die Werte in Klammern geben die Einstufung unter Berücksichtigung der durch Gasdruck erzeugten Sekundärpermeabilität wieder.

Szenario	Salinar steil	Salinar flach 800 m	Salinar flach 1.300 m	Tonstein	Kristallin	Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung
<b>Bergbau in kontaminiertem Wirtsgestein</b>						
Konsequenz WA	-	-	-	- (+)	+++	+++
Konsequenz VWA	- (+++)	- (+++)	- (+++)	- (+)	+++	+++
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>- (+++)</b>	<b>- (+++)</b>	<b>- (+++)</b>	<b>- (+)</b>	<b>+++</b>	<b>+++</b>
<b>Bohrung in einen Abfallbehälter</b>						
Konsequenz WA	++	++	++	+	++	++
Konsequenz VWA	++	++	++	++	++	++
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>
<b>Bohrung in das Endlager ohne Abfälle zu treffen</b>						
Konsequenz WA	++	++	++	+	++	++
Konsequenz VWA	++	++	++	++	++	++
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>
<b>Anbohren eines Reservoirs mit Überdruck</b>						
Konsequenz WA	-	-	-	+	++	+
Konsequenz VWA	++	++	++	++	++	+++
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>	<b>++</b>
<b>Bohrung in kontaminierten Grundwasserleiter</b>						
Konsequenz WA	-	-	-	-	++/+++	+++
Konsequenz VWA	-	- (++)	- (++)	-	++++	++++
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>-</b>	<b>- (++)</b>	<b>- (++)</b>	<b>-</b>	<b>++++</b>	<b>++++</b>
<b>Abbau von Evaporiten durch Solung</b>						
Konsequenz WA	-	-	-			
Konsequenz VWA	+++	+++	+++			
<b>Kons. Gesamt</b>	<b>+++</b>	<b>+++</b>	<b>+++</b>			

++++ sehr groß, +++ groß, ++ mäßig, + gering, - kein(e)

Bei den anderen Geosystemen (Kristallin und Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung) ergeben sich sowohl für die WA als auch die VWA jeweils für das Szenario 1 große und das Szenario 5 sehr große Konsequenzen.

Für die Szenarien 1 bis 5 ergeben sich bei den dichteren Wirtsgesteinen (Salinar ohne Sekundärpermeabilität, Tonstein) keine bis mäßige und für die durchlässigen Wirtsgesteine (Kristallin, Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung) mäßige bis sehr große Konsequenzen. Bei den Szenarien 2 und 3 wird durch das Bohrloch ein Kurzschluss zur Biosphäre hergestellt, der eine merkliche Schwächung der geologischen Barriere darstellt. Da die Eigenschaften der Geosysteme hierbei nur einen geringen Einfluss haben, werden die beiden Szenarien sowohl bezüglich ihrer Konsequenzen als auch der Geosysteme derselben Bewertungskategorie zugeordnet. Dabei schneidet Tonstein wegen seines hohen Sorptionsvermögens geringfügig besser ab. Für das Szenario 2 werden die größten Konsequenzen von den abgebrannten Brennelementen (BE) verursacht. Weil die BE auch noch nach 100.000 a eine hohe Radiotoxizität aufweisen, hat die schlechtere Durchbohrbarkeit der dickwandigen Behälter keinen Einfluss auf die Maximalwerte der Konsequenzen. Im Salinar können bei den dünnwandigen HLW-Kokillen signifikante Konsequenzen auch bereits früher eintreten.

## Relevanz der Szenarien für die Geosysteme

Die Ergebnisse der Bewertung der Szenarien nach ihrer Relevanz, d. h. nach der mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit gewichteten radiologischen Konsequenz, sind zusammenfassend in der Tab. 26 wiedergegeben. Der Vergleich der Geosysteme bezüglich der Relevanzen der Szenarien 1 bis 5 zeigt eine deutliche Abstufung in zwei Gruppen. Die Relevanzen der Szenarien sind für das Salinar und den Tonstein vergleichsweise niedriger (keine bis mäßig) als für die Geosysteme Kristallin und Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung (gering bis sehr groß). Innerhalb dieser beiden Gruppen sind die Unterschiede nur gering.

Tab. 26: Vergleichende Bewertung der Relevanz für die unterschiedlichen Szenarien und Geosysteme (nach SKRZYPPEK et al. 2005b).

Die Werte in Klammern geben die Einstufung unter Berücksichtigung der durch Gasdruck erzeugten Sekundärpermeabilität wieder.

Szenario	Salinar steil	Salinar flach 800 m	Salinar flach 1.300 m	Tonstein	Kristallin	Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung
<b>Bergbau in kontaminiertem Wirtsgestein</b>						
Konsequenz Gesamt	- (+++)	- (+++)	- (+++)	- (+)	+++	+++
Wahrscheinlichkeit	- (+)	- (+)	- (+)	+	+	+
<b>Relevanz</b>	- (++)	- (++)	- (++)	- (+)	++	++
<b>Bohrung in einen Abfallbehälter</b>						
Konsequenz Gesamt	++	++	++	++	++	++
Wahrscheinlichkeit	+	+	+	++	++	+++
<b>Relevanz</b>	+ / ++	+ / ++	+ / ++	++	++	++ / +++
<b>Bohrung in das Endlager ohne Abfälle zu treffen</b>						
Konsequenz Gesamt	++	++	++	++	++	++
Wahrscheinlichkeit	+	+	+	++	++	+++
<b>Relevanz</b>	+ / ++	+ / ++	+ / ++	++	++	++ / +++
<b>Anbohren eines Reservoirs mit Überdruck</b>						
Konsequenz Gesamt	++	++	++	++	+++	++
Wahrscheinlichkeit	+	+	+	++	++	+++
<b>Relevanz</b>	+ / ++	+ / ++	+ / ++	++	++	++ / +++
<b>Bohrung in kontaminierten Grundwasserleiter</b>						
Konsequenz Gesamt	-	- (++)	- (++)	-	++++	++++
Wahrscheinlichkeit	-	- (+)	- (+)	++	+++	+++
<b>Relevanz</b>	-	- (+ / ++)	- (+ / ++)	-	+++ / ++++	+++ / ++++
<b>Abbau von Evaporiten durch Solung</b>						
Konsequenz Gesamt	+++	+++	+++			
Wahrscheinlichkeit	++	+++	+++			
<b>Relevanz</b>	++ / +++	+++	+++			

++++ sehr groß, +++ groß, ++ mäßig, + gering, - kein(e)

Konsequenzen bestimmt durch: blau - VWA, violett - VWA und WA.

Das Szenario 1 hat für Salinar und Tonstein – solange sich im Wirtsgestein kein Bereich mit Sekundärporosität ausbildet – keine radiologischen Konsequenzen und besitzt daher auch keine Relevanz. Bei Existenz eines Bereichs mit Sekundärporosität ergibt sich entsprechend den veränderten radiologischen Konsequenzen

zen für das Salinar eine mäßige und für den Tonstein eine geringe Relevanz. Für die anderen beiden Geosysteme besitzt dieses Szenario hingegen eine mäßige Relevanz.

Entsprechendes ergibt sich auch für das Szenario 5: Aufgrund der Bewertung der radiologischen Konsequenzen ergeben sich für die Geosysteme im Salinar (ohne Sekundärpermeabilität) und Tonstein jeweils keine Relevanz. Die Ausbildung eines Bereiches mit Sekundärpermeabilität wirkt sich nur bei dem Geosystem Salinar (flache Lagerung) aus und führt zu geringen bis mäßigen Konsequenzen. Von allen Szenarien liefert dieses für die Geosysteme Kristallin und Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung mit großen bis sehr großen Relevanzen die höchsten Werte aller Kombinationen von Szenarien und Geosystemen.

Die Untersuchungen ergeben für die drei Bohrszenarien 2 bis 4 jeweils identische Bewertungen innerhalb der Geosysteme. Die günstigsten Bewertungen ergeben sich einheitlich für die Geosysteme mit Wirtsgestein Salinar mit gering bis mäßig, gefolgt von Tonstein und Kristallin mit mäßig und schließlich den sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung mit groß bis sehr groß.

Die Geosysteme mit Wirtsgestein Salinar schneiden insgesamt geringfügig günstiger ab als das Geosystem Tonstein, weil die Szenarien, die beim Tonstein niedrigere Konsequenzen haben, auch sehr niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten haben. Eine Ausnahme bildet das Szenario 6, das jedoch nur für die VWA im Salinar von Bedeutung ist und eine mäßige bis große Relevanz ergibt. Zwischen den Geosystemen Kristallin und Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung zeigen sich nur geringe Unterschiede für die verschiedenen Szenarien.

In Anbetracht der großen Bandbreiten bei den Parameterwerten, der Vereinfachungen bei der Modellierung und bezüglich der Einstufungen der Eintrittswahrscheinlichkeit, Konsequenz und Relevanz müssen vor Abschluss oder Auswahl eines der Geosysteme weitere Aspekte berücksichtigt werden, die nicht in diese Untersuchung einbezogen werden konnten. So können z. B. Eintrittswahrscheinlichkeit oder Konsequenz eines Szenarios durch gezielte Maßnahmen verringert werden, siehe Ausführungen zu Maßnahmen zur Verringerung der Relevanz der Szenarien. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass hier bei der Festlegung der Referenz-Eingangparameter Mittelwertbildungen über die Bandbreiten der in Deutschland existierenden potenziellen Endlagerstandorte erfolgen mussten. Insofern können die bei einer Erkundung der Standorte ermittelten individuellen Parameterwerte von den Referenzwerten abweichen und so zu einer Bewertung der Relevanz der Szenarien führen, die von der des entsprechenden Referenz-Geosystems abweicht.

## Maßnahmen zur Verringerung der Relevanz der Szenarien

Die Verringerung der Relevanz eines Szenarios ist grundsätzlich sowohl durch eine Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch seiner radiologischen Konsequenz möglich. Die Eintrittswahrscheinlichkeit kann durch die Standortauswahl, Endlagerauslegung, Kennzeichnung und Datenarchivierung beeinflusst werden. Zur Reduzierung der radiologischen Konsequenzen sind prinzipiell drei Gruppen von Maßnahmen denkbar, nämlich der Schutz durch (Bohr-) Hindernisse, die Reduktion des Quellterms und die Reduktion der Expositionszeit. Die Untersuchungen ergaben, dass die Wirksamkeit dieser Maßnahmen bezüglich der Referenz-Szenarien unterschiedlich, aber weitgehend unabhängig von den Eigenschaften der Referenz-Geosysteme ist.

Durch die Maßnahmen der Kategorie Schutz durch (Bohr-) Hindernisse können einzelne Szenarien ganz ausgeschlossen werden, bei anderen sind sie dagegen wirkungslos. Einen Einfluss auf die radiologischen Konsequenzen hat vor allem der Quellterm für die Radionuklidfreisetzung. Die Maßnahmen zur Reduzierung der Expositionszeit setzen voraus, dass eine Beeinträchtigung der Integrität des Endlagers oder zumindest eine Gefahr erkannt werden.

Die einzelnen Maßnahmen wirken sich zum Teil unterschiedlich auf die radiologischen Konsequenzen der untersuchten Szenarien aus. Sie können für unterschiedliche Szenarien auch gegensätzliche Wirkungen besitzen. Die differenzierte Wirkungsweise eines Szenarios bei unterschiedlichen Wirtsgesteinen spielt

hingegen kaum eine Rolle. Die Untersuchungen ergaben, dass die langfristig wohl wirksamste Maßnahme für alle betrachteten Szenarien in der Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten durch Kennzeichnung und insbesondere durch eine geeignete Form der Datenarchivierung besteht.

Alle Schlussfolgerungen und Bewertungen dieser Untersuchungen gelten für generische Geosysteme, für deren charakteristische Parameter vorab Referenzwerte festgelegt wurden, und unter Zugrundelegung eines einheitlichen Deckgebirges. Demnach schneiden die Geosysteme mit undurchlässigem Wirtsgestein (Salinar, Tonstein) insgesamt geringfügig günstiger ab. Wegen der großen Bandbreite der Parameterwerte der möglichen Endlagerstandorte ist diese Aussage nicht zu verallgemeinern, kann aber bei der Standortauswahl für ein Endlager als Kriterium einbezogen werden.

Die Bewertungen für die gering permeablen Wirtsgesteine fallen weniger günstig aus, wenn der Effekt der Ausbildung einer Zone mit Sekundärporosität einbezogen wird. Dieser im Hinblick auf die Gasproblematik für die Langzeitsicherheit positive Effekt führt hier zu einer Erhöhung der Relevanz der Szenarien zum menschlichen Eindringen.

## 2.10 MEHRBARRIERENKONZEPT

### Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>Kemakta Konsult AB</i> <i>JA Streamflow AB</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>Gruppe Ökologie e.V.</i>
Zitat:	GRUNDFELT et al. (2005)

### 2.10.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Zielsetzung dieser Untersuchung war es, die Wirkungen einzelner Barrieren des Mehrbarrierensystems eines Endlagers durch Auswertung von Sicherheitsanalysen darzustellen. Weiterhin waren die Zeiträume zu ermitteln, in denen die einzelnen Barrieren jeweils wirksam sind. Insbesondere war zu prüfen, ob die Forderung erfüllbar ist, dass jede der geologischen Barrieren für sich allein und nicht nur die Barrieren in ihrer Gesamtheit die volle Schutzfunktion gewährleisten. Die neueren Entwicklungen in Deutschland waren dabei zu berücksichtigen. Die Untersuchungen sollten sich auf Geosysteme mit den potenziellen Wirtsgesteinstypen Salz, Ton (Tonstein), kristalline Gesteine sowie sonstige Gesteine unter Tonbedeckung erstrecken und unter Zugrundelegung des Ein-Endlager-Konzepts erfolgen. Die Untersuchung umfasste daher im Einzelnen folgende Aufgaben:

- Identifizierung und Beschreibung derjenigen Typen von Geosystemen, die in Deutschland als Mehrbarrierensysteme für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage kommen. Dabei waren die charakteristischen Besonderheiten der einzelnen Barrieren hinsichtlich ihrer Funktion im Mehrbarrierensystem herauszuarbeiten.
- Zusammenstellung und Bewertung der Vorgehensweise in anderen Ländern bei der Anwendung des Mehrbarrierenkonzepts für die oben genannten potenziellen Wirtsgesteinsarten.
- Zusammenstellung und Bewertung von Größen, welche die Barriereigenschaften geologischer Barrieren charakterisieren.
- Bewertung der Unabhängigkeit dieser Größen voneinander.
- Bewertung der Forderung nach Einhaltung der vollen Schutzfunktion durch jede Barriere, zumindest aber durch zwei voneinander unabhängige geologische Barrieren.
- Herausarbeitung der für die einzelnen Typen der Geosysteme bzw. Mehrbarrierensysteme charakteristischen Besonderheiten im Hinblick auf die Funktion einzelner Barrieren.

### 2.10.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

#### Randbedingungen

Die Untersuchung basiert darauf, dass die Langzeitsicherheit des Endlagers Vorrang vor allen anderen Aspekten hat und vorrangig durch die geologischen Barrieren zu gewährleisten ist. Die erforderlichen geologischen Barrieren setzen eine günstige geologische Gesamtsituation (AKEND 2002) voraus bzw. sind Teil davon. Den entscheidenden Beitrag zur langfristigen Isolation der radioaktiven Abfälle muss demnach der einschlusswirksame Gebirgsbereich erbringen.

Bei den Betrachtungen zur Funktion des Mehrbarrierensystems wurde in dieser Untersuchung zunächst nur die erwartete Entwicklung des Endlagers betrachtet. Dabei wurden Einflüsse von Klimaänderungen, insbesondere von Eiszeiten, berücksichtigt. In bestimmtem Umfang wurden außergewöhnliche Entwicklungen, die die Integrität des Wirtsgesteins oder des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches beeinträchtigen können, zusätzlich berücksichtigt, wenn sie wesentlich für die Beurteilung der Barrieren der betrachteten Geosysteme sind.

## Methodischer Ansatz

Zunächst wurden die zur Aufnahme eines Endlagers in Deutschland in Frage kommenden Geosysteme anhand

- des geologischen Aufbaus und der barrierewirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,
- der zeitabhängigen Entwicklung und Bedeutung der Barrieren des Geosystems und
- der Funktion und Bedeutung der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich umgebenden geologischen Strukturen

beschrieben. Anschließend wurde die Rolle von geologischen und geotechnischen Barrieren in bereits durchgeführten Sicherheitsanalysen, die Endlager in verschiedenen Wirtsgesteinen betreffen, im Hinblick auf

- Prozesse und Schutzziele und damit verbundene Größen und Eigenschaften,
- verschiedene Zeitrahmen und
- Redundanz, funktionale Vielfalt und Unabhängigkeit der Barrieren

zusammengestellt und ausgewertet, um die Funktionen verschiedener Barrieren und die damit verbundenen geologischen Größen für die Wirtsgesteine zu ermitteln, die in Deutschland von potenziellem Interesse sind.

Entsprechend der deutschen Konzeption, dass die Langzeitsicherheit eines Endlagers vorrangig durch die geologischen Barrieren zu gewährleisten ist, lag der Schwerpunkt der in dieser Untersuchung durchgeführten Bewertungen auf den Beiträgen der geologischen Barrieren zum Mehrbarrierensystem.

Diese Bewertung erfolgte in zwei Teilen, die in zusammenfassende Schlussfolgerungen münden (siehe Abb. 11). Im ersten Teil stützt sich die Bewertung auf die Beschreibung der in Deutschland für die Endlagerung radioaktiver Abfälle grundsätzlich in Frage kommenden Geosystemtypen. Diese Bewertung kann vorrangig in der Frühphase für ein Standortauswahlverfahren angewendet werden. Der Bewertung im zweiten Teil liegt zu Grunde, wie das Mehrbarrierenkonzept in verschiedenen Sicherheitsanalysen entwickelt und angewendet worden ist. In diesen Teil fließen die Ergebnisse der Überprüfung von bisher auch in anderen Ländern durchgeführten Sicherheitsanalysen ein. In beiden Teilen wurde die Bewertung der einzelnen geologischen Systeme anhand von verschiedenen Parametern und Bewertungskriterien durchgeführt.

Der geosystemare Ansatz beruht auf den grundsätzlichen Anforderungen und Schutzzielen, die heute bei der Endlagerung in Deutschland erfüllt werden müssen. Es wurde dargestellt, ob bzw. wieweit diese Anforderungen und Ziele von den betrachteten Geosystemtypen bzw. den ihnen zuzuordnenden geosystemtypischen Mehrbarrierensystemen erfüllt werden und welche Unterschiede in dieser Hinsicht zwischen den betrachteten Geosystemtypen bestehen.

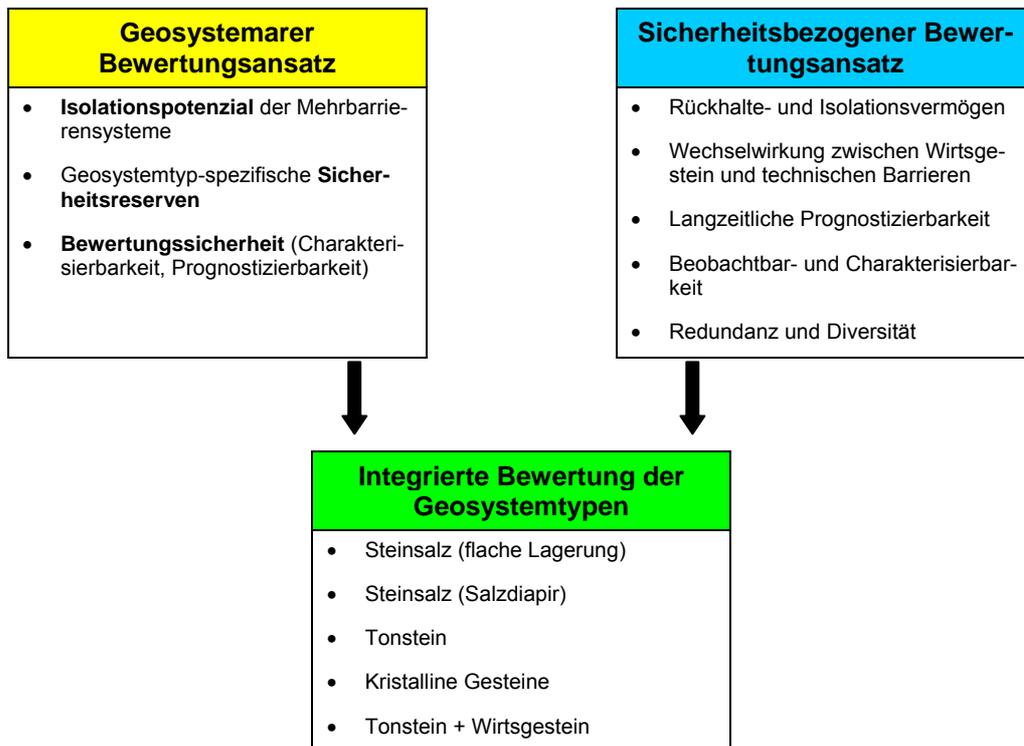


Abb. 11: Darstellung der Vorgehensweise bei der integrierten Bewertung der Geosystemtypen (aus GRUNDFELT et al. (2005)).

Die Beurteilung der Geosystemtypen im Hinblick auf die geosystemsspezifische Barrierenwirksamkeit erstreckte sich auf unterschiedliche Beurteilungsaspekte. Diese Beurteilungsaspekte wurden für die Bewertung der Geosysteme zu folgenden Bewertungsbereichen zusammengefasst:

- Bewertungsbereich Isolationspotenzial,
- Bewertungsbereich Sicherheitsreserve und
- Bewertungsbereich Bewertungssicherheit.

Soweit möglich wurden alle Bewertungsaspekte bei der Bewertung der verschiedenen Geosystemtypen angewendet. Die Einzelbewertungen wurden anschließend für die geosystemare Gesamtbewertung verbalargumentativ zusammengeführt.

Bei der Bewertung auf Grundlage der Sicherheitsanalysen wurden zur Strukturierung der Darstellung folgende wichtige Barrierefunktionen oder Barriereparameter verwendet:

- Rückhalte- und Einschlussvermögen,
- Wechselwirkung zwischen Wirtsgestein und technischem Barrierensystem,
- Langzeit-Voraussagbarkeit,
- Beobachtbarkeit und Charakterisierbarkeit sowie
- Redundanz und Diversität.

Für jede dieser Barrierefunktionen oder Barriereparameter wurden die relevanten Prozesse und Aspekte beurteilt. Bei der Identifizierung der Prozesse wurde soweit wie möglich dem THMC-Schema – thermal, hydrologisch, mechanisch und chemisch – gefolgt.

### 2.10.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens

Das Mehrbarrieren-System eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen umfasst

- die technischen Barrieren Abfallprodukt/Abfallbehälter,
- die (geo-)technischen Barrieren Versatz und Dichtungen (einschließlich Strecken- und Schachtverschlüsse) und
- die geologischen Barrieren.

Die Abb. 12 zeigt schematisch die generelle Anordnung der Barrieren im Rahmen eines modellhaften Mehrbarrierensystems.

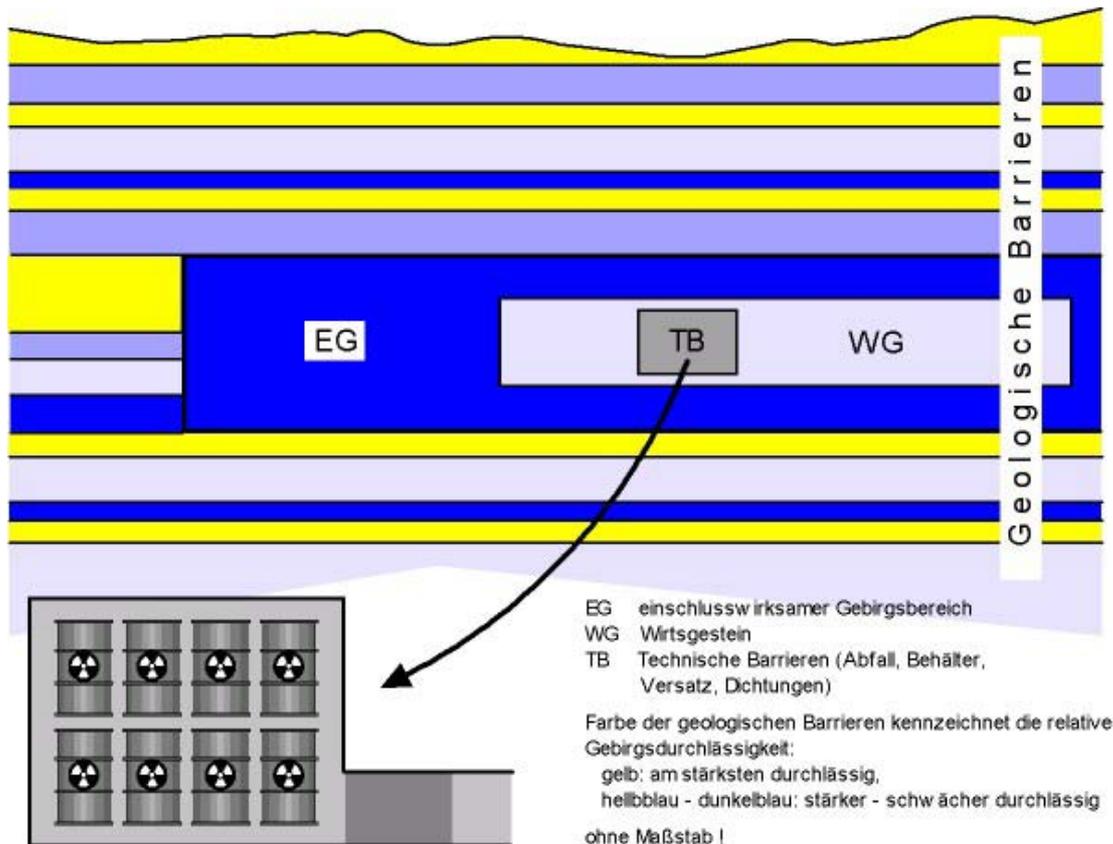


Abb. 12: Modellhafte Anordnung der Barrieren des Mehrbarrierensystems (GRUNDFELT et al. 2005).

Die den (geo-)technischen Barrieren zugeordneten Strecken- und Schachtverschlüsse stellen keine eigenständigen Barrieren innerhalb des Mehrbarrierensystems dar; sie dienen dazu, die durch die Errichtung des Endlagers beeinträchtigte Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. der geologischen Barriere wieder herzustellen.

Es ergaben sich unterschiedliche Schlussfolgerungen, je nachdem, ob die Geosystemtypen nur anhand ihrer charakteristischen Merkmale bewertet wurden oder ob die Bewertung nur allein auf Grundlage von Sicherheitsbewertungen erfolgte. Eine Ursache dafür liegt darin, dass sich der sicherheitsanalytische Bewertungsansatz im Allgemeinen auf bestimmte (hypothetische oder tatsächliche) Standorte bezieht und Informationen über das gesamte potenzielle Endlagersystem einbezieht – einschließlich des umgebenden Gesteins und der Anpassungen hinsichtlich des Endlagerdesigns, die sich aus den spezifischen Merkmalen des Geosystems ergeben. Demgegenüber konzentriert sich der geosystemare Bewertungsansatz auf die grundlegenden Merkmale der geologischen Barrieren der Geosystemtypen (siehe Abb. 13), insbesondere auf ihre materiellen barrierewirksamen Eigenschaften sowie ihre typischen Konfigurationen. Daraus lassen sich grundsätzli-

che Aussagen zu den sicherheitsrelevanten Eigenschaften derjenigen Geosystemtypen ableiten, die als Mehrbarrierensysteme in Frage kommen.

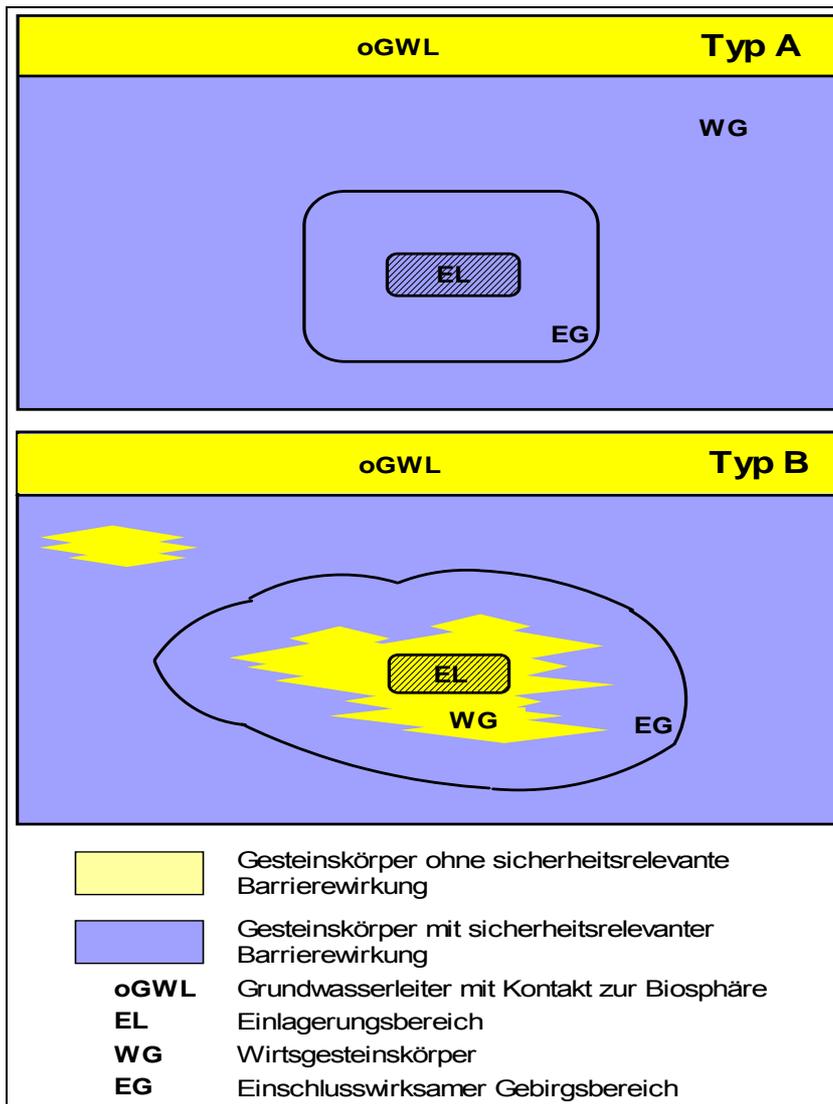


Abb. 13: Klassifizierung von Geosystemen - Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich (AkEND 2002).

Die Beurteilung der Geosystemtypen auf Grundlage der Bandbreiten ihrer charakteristischen Eigenschaften erlaubte die Identifizierung geosystemtyp-spezifischer Vor- und Nachteile. Da alle Geosystemtypen mehr oder weniger ausgeprägte Vor- und Nachteile aufweisen, ist die Angabe einer Rangfolge für Einzelaspekte mit übereinstimmender Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglich, vorausgesetzt die Unterschiede zwischen den charakteristischen Eigenschaften verschiedener Geosystemtypen sind größer als die Bandbreiten dieser Eigenschaften bei den einzelnen Geosystemtypen. Eine Beurteilung von Standorten allein auf Grundlage geosystemtyp-spezifischer Merkmale ist dagegen nicht möglich.

Es lassen sich jedoch Betrachtungen darüber anstellen, welche standortspezifischen Merkmale generischer Wirtsgesteine mehr oder weniger gut für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet sind. Diese standortspezifischen Merkmale müssen identifiziert werden, um Vergleiche zu erleichtern und um in frühen Verfahrensschritten überhaupt begründete Entscheidungen treffen zu können.

Aus der Auswertung von Sicherheitsbewertungen konnte geschlossen werden, dass in allen untersuchten Geosystemen sichere Endlager errichtet werden können. Die wichtigsten Faktoren für die Gesamtsicherheit des Endlagers sind standort- und auslegungsspezifisch und damit nicht an die generischen Eigenschaften des Wirtsgesteinstyps gebunden. Die Anforderungen an die Auslegung des Endlagers, insbesondere Aufbau und Ausgestaltung der technischen Barrieren (engineered barrier system - EBS), ergeben sich dabei sowohl aus den charakteristischen Eigenschaften eines Geosystems bzw. Wirtsgesteins, als auch aus deren standortspezifischer Ausprägung.

Zusammenfassend wurden aus der integrierten Bewertung der evaluierten Geosystemtypen folgende Schlüsse gezogen:

- Sowohl Geosysteme mit Steinsalz in flacher Lagerung als auch mit Steinsalz in Salzdiapiren haben das Potenzial für die sichere Endlagerung von radioaktiven Abfällen, da Steinsalz, unabhängig von den Eigenschaften des EBS, den vollständigen Einschluss des Abfalls gewährleisten kann. Nachteilig sind bei Steinsalz dessen Löslichkeit und damit verbundene mögliche Auswirkungen der daraus resultierenden Subrosion. Aus diesem Grunde darf die Barriere Steinsalz nicht unabhängig vom Deckgebirge beurteilt werden. Dies gilt insbesondere für Steinsalz in Salzdiapiren, weil der Salzgesteinskörper hier eher Kontakt mit Grundwasser haben kann. Bei Salzstöcken stellt deshalb die Bewertung der Subrosion im Hinblick auf ein das Isolationspotenzial möglicherweise gefährdendes Ausmaß eine entscheidende standortspezifische Aufgabe dar.
- Geosysteme mit Tonstein als Wirtsgestein haben wegen ihres guten Isolationsvermögens ein hohes Potenzial für die Aufnahme sicherer Endlager. Tonsteinformationen besitzen generell auch ohne die Barrierefunktion des EBS und anderer geologischer Einheiten genügend Barrierekapazität zur Isolation des Abfalls. Das tatsächliche Isolationsvermögen von tonigen Wirtsgesteinen ist aber standortabhängig und wird von der Ausdehnung, der Permeabilität und den Rückhalteeigenschaften des Tonsteinkörpers bestimmt.
- Die Geosysteme mit kristallinen Gesteinen in Deutschland erfüllen wahrscheinlich nicht die grundlegende hydraulische Mindestanforderung des AkEnd. Wenn jedoch technische und geotechnische Komponenten (EBS) des Endlagersystems mit berücksichtigt werden, sind auch in deutschen Kristallingesteinen sichere Endlagersysteme realisierbar.
- Geosysteme des Typs Tonstein + Wirtsgestein (sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung) weisen einige Vorteile hinsichtlich der Endlagerung von gasentwickelnden Abfällen auf, da das Rückhaltevermögen dieses Geosystems nicht vom Aufbau von Gasüberdrücken gefährdet wird. Die Weksamkeiten in solchen Systemen hängen jedoch von den standortspezifischen Merkmalen der tonigen Deckschicht ab. Um einen wirksamen Schutz vor der Migration von Radionukliden bieten zu können, muss das tonige Deckgestein eine durchgehende Schicht zwischen dem Wirtsgestein und der umgebenden Umwelt bilden.

Aus den Vorgehensweisen in anderen Ländern bei der Umsetzung des Mehrbarrierenkonzepts wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Bei Sicherheitsnachweisen für Endlager in Steinsalz stellt der Wirtsgesteinskörper selbst die Hauptbarriere dar. Zudem ist die Leistungsfähigkeit der Verschlussbauwerke bedeutsam für den Sicherheitsnachweis. Aufgrund der durch Kriechen induzierten Konvergenz des Steinsalzes sind die Eigenschaften des EBS nur für den verhältnismäßig kurzen Zeitraum wichtig, bis die vorhandenen Hohlräume geschlossen sind. Die Sicherheit von Endlagern in Salzgestein beruht danach auf dem vollständigen Einschluss des Abfalls als Folge der Wasserfreiheit und der geringen Permeabilität des Steinsalzes. Damit diese Vorteile von Steinsalz zum Tragen kommen, muss die Subrosion begrenzt und der Wasserzutritt zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich verhindert werden. Die Aufgabe des Deckgebirges besteht im Wesentlichen darin, den Salzgesteinskörper vor Lösungsangriffen zu schützen und gegebenenfalls die Ausbreitung von Radionukliden zu verzögern. Bei Steinsalz in flacher Lagerung ist dies wegen der spezifischen geologischen Verhältnisse entsprechender Steinsalzvorkommen in Deutschland überwiegend gegeben, bei Salzstöcken sind die dazu erforderlichen Eigenschaften ausgeprägt standortabhängig.
- Beim Sicherheitsnachweis für Endlagerkonzepte in tonigen Gesteinsformationen übernimmt die geologische Barriere eine wichtige Rolle. Diese Rolle erlangt sie aufgrund günstiger Rückhalte- und Schutzfunk-

tion. Aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit und hohen Rückhaltekapazität bieten Tonsteinformationen ein hohes Maß an Radionuklidrückhaltung. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Tonstein wird höchstwahrscheinlich eingebettet sein in einer Folge von Sedimentgesteinen mit verschiedenen gebirgsmechanischen Eigenschaften. Deshalb und weil Tonsteine nicht wasserlöslich sind, ist ihr Schutz durch überlagernde Gesteine weniger wichtig als bei Salzgesteinen. Das Rückhaltevermögen der umgebenden Gesteinseinheiten ist in hohem Maße standortabhängig. In Abhängigkeit von den tatsächlichen Standortverhältnissen können sie deswegen als Teil des Mehrbarrierensystems betrachtet werden oder auch nicht. Das Isolationspotenzial eines tonigen Wirtsgesteinskörpers ist hinreichend unabhängig vom EBS und tonige Gesteinsformationen bieten normalerweise stabile und günstige Eigenschaften für das EBS.

- Auch beim Sicherheitsnachweis für ein Endlagersystem in Kristallingestein spielt die geologische Barriere eine wichtige Rolle. Sie beruht hauptsächlich auf dem Schutz des EBS und in der Schaffung stabiler chemischer Verhältnisse, aber auch auf der Rückhaltefunktion des Gesteins. Aufgrund des sehr heterogenen Grundwasserströmungsfeldes in geklüftetem Kristallingestein sind die Rückhalteeigenschaften durch örtliche Variation gekennzeichnet, können aber örtlich durchaus signifikant sein. Im Allgemeinen erfordern Endlager in Kristallingesteinen einen höheren Beitrag des EBS zum Einschluss als plastische Gesteinstypen. Ein Vorteil des Kluftsystems liegt darin, dass sich im Endlager entstehende Gase leichter im Gestein verteilen als bei Steinsalz oder Tonstein, so dass hohe Gasdrücke nicht entstehen.
- Für Endlager in sonstigen Wirtsgesteinen unter Tonüberdeckung konnte für die deutschen Bedingungen nur eine Sicherheitsanalyse ausgewertet werden. Die Sicherheit eines solchen Endlagers hängt vom Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch Tonstein bzw. der Ausdehnung, den hydraulischen Eigenschaften und der Integrität der tonigen Deckschichten ab. Schutz und Stabilität des EBS sowie der Beitrag des EBS zur Gesamtsicherheit des Endlagers sind offenbar stark standortabhängig.

Entsprechend der unterschiedlichen Wirkungsweise der Barrieren der bewerteten Geosysteme sind auch die sicherheitsbestimmenden Eigenschaften der Barrieren unterschiedlich. Mit Bezug auf die wichtigsten Prozesse, die die Sicherheit des Endlagers betreffen, kann aus dieser Bewertung Folgendes geschlossen werden:

- Sicherheit eines Endlagers in Steinsalz wird in der Hauptsache durch die Abwesenheit von Wasser in Steinsalz, seine sehr geringe Permeabilität, mögliche große Ausdehnung und Homogenität sowie günstige Kriecheigenschaften bestimmt. Wegen der Wasserlöslichkeit von Steinsalz ist die Begrenzung der Subrosion und der Ausschluss eines Wasserzutritts zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich unerlässlich.
- Bei tonigen Gesteinsformationen beruht die Sicherheit eines Endlagers im Wesentlichen auf der geringen Wasserdurchlässigkeit und dem hohen Sorptionsvermögen von Tonstein, die dem Tonstein – bei Tonstein mit Trennfugen oder Rissen im Zusammenwirken mit Matrixdiffusion – eine hohe Rückhaltekapazität verleihen. Aufgrund des Verformungsverhaltens von Tongestein können offene Trennfugen und Risse wieder geschlossen werden.
- Bei kristallinen Wirtsgesteinen hängt die Sicherheit von Endlagern mehr von einem in geeigneter Weise ausgelegten EBS ab als bei Steinsalz oder Tonstein, da ihre Wasserführung normalerweise stärker ist. Kristallingesteine können aber aufgrund von Matrixdiffusion und Sorption durchaus deutliches Rückhaltevermögen aufweisen. Durch ihre hohe Festigkeit gewährleisten Kristallingesteine darüber hinaus einen guten Schutz des EBS vor mechanischen Beanspruchungen.
- Die Sicherheit von Endlagern in sonstigen Wirtsgesteinen unter Tonüberdeckung beruht in starkem Maße auf der Begrenzung des Grundwasserflusses durch die hydraulischen Eigenschaften der überlagernden Tonsteine und den globalen hydrogeologischen Verhältnissen in den Nebengesteinen. Zusätzliche Rückhaltekapazität ergibt sich aus dem Sorptionsvermögen von Wirtsgestein und tonigen Deckschichten.

Die Beurteilung der Unabhängigkeit der Barriereigenschaften der verschiedenen Geosystemtypen führte zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Existenz von Steinsalzvorkommen ist in humiden Klimazonen von der Begrenzung der Subrosion abhängig. Bei Endlagern in Steinsalz (flache Lagerung und Salzdiapir) stellt daher das Wirtsgestein Steinsalz unabhängig vom EBS eine ausreichende Barriere nur dann dar, wenn ein Lösungsangriff auf

den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgeschlossen werden kann. Andernfalls ist zusätzlich eine weitere Barriere notwendig, die einen ausreichenden Schutz gegen Lösungsangriff und die Begrenzung der Ausbreitung von Radionukliden gewährleisten muss. Wirksame Schacht- und Bohrlochverschlüsse sind unerlässlich.

- Tonige Gesteine weisen aufgrund ihrer geringen Permeabilität und ihres hohen Sorptionsvermögens ein hohes Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden auf. Bei Tonsteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit ist es auch ohne Berücksichtigung des Sorptionsvermögens beträchtlich. Es gewährleistet auch ohne wirksames EBS genügenden Einschluss der Abfälle. Zur Aufrechterhaltung ihres Rückhaltevermögens und ihrer Integrität benötigen tonige Wirtsgesteine außerdem weniger Schutz durch überlagernde Gesteinsschichten. Leistungsfähige Schacht- und Bohrlochverschlüsse sind unerlässlich.
- Bei kristallinen Gesteinen kann im Allgemeinen nicht vorausgesetzt werden, dass alle Bereiche des Gesteinskörpers den ausreichenden Einschluss der Abfälle sicherstellen. Außerhalb grundwassergängiger Trennfugen kann das Rückhaltevermögen des Gesteinskörpers aufgrund der kombinierten Wirkung von geringem Grundwasserfluss, Matrixdiffusion und Sorption allerdings erheblich sein. Auf jeden Fall muss aber der Sicherheitsnachweis bei kristallinen Wirtsgesteinen ein wirksames EBS einschließen, um ein ausreichendes Mehrbarrierensystem sicher zu stellen. Andererseits benötigen kristalline Wirtsgesteine jedoch geringeren Schutz durch umgebende Gesteinskörper als Steinsalz und Tonstein. Wirksame Schachtverschlüsse sind wegen der größeren Bedeutung des EBS weniger wichtig als bei Geosystemtypen mit anderen Wirtsgesteinen.
- Bei sonstigen Wirtsgesteinen unter toniger Überdeckung sind die tonigen Deckschichten und geeignete standortbezogene bzw. regionale hydrogeologische Verhältnisse entscheidend für das Rückhaltevermögen und seine Aufrechterhaltung. Wenn das tonige Deckgestein ausreichende Ausdehnung aufweist und unversehrt ist, kann es unabhängig vom EBS genügend hohes Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden aufweisen. Für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit ist die Wirksamkeit der Schachtverschlüsse wichtig.

Die Bewertung von bisher durchgeführten Sicherheitsanalysen zeigte, dass für alle untersuchten Wirtsgesteine bzw. Geosystemtypen Endlagerungskonzepte entwickelt werden können, die den Sicherheitsanforderungen in den einzelnen Ländern entsprechen. Sorgfältige Standortauswahl vorausgesetzt, können die Endlagerungskonzepte für bestimmte Wirtsgesteins- bzw. Geosystemtypen den besonderen Gegebenheiten des Standorts angepasst werden. Im Verlauf der vorliegenden Studie wurde deutlich, dass im Rahmen von Sicherheitsnachweisen die geologischen und technischen Barrieren eines Endlagers als integriertes System bewertet werden müssen und Wechselwirkungen zwischen Abfall und Wirtsgestein zu berücksichtigen sind. Wie gezeigt, können die sicherheitsrelevanten Beziehungen zwischen den verschiedenen Barrieren eines Mehrbarrierensystems unterschiedlich sein. Einzelne Barrieren können andere schützen bzw. sogar für deren langzeitige Funktion unerlässlich sein. Andererseits können Vorgänge in einzelnen Barrieren die Funktion anderer Barrieren gefährden, wie dies bei der möglichen Beeinträchtigung der geologischen Barriere durch Gasbildung aus Abfällen der Fall sein kann.

## 2.11 RÜCKHOLBARKEIT

### Untersuchung der Möglichkeit und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager

<i>Auftragnehmer:</i>	<i>DBE Technology GmbH</i>
<i>Unterauftragnehmer:</i>	<i>SKB International Consultants AB COLENCO Power Engineering AG</i>
<i>Zitat:</i>	<i>ZIEGENHAGEN et al. (2005)</i>

#### 2.11.1 Grundlagen und Aufgabenstellung

Die Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle wird aus Gründen der Förderung der Akzeptanz, der Schaffung der Möglichkeit zu eigenem verantwortlichem Handeln für zukünftige Generationen, der Nachbesserung im Fall der Revision der Sicherheitsbewertungen oder zur Nutzung der in den Brennelementen enthaltenen Ressourcen diskutiert.

Die technische Machbarkeit und die Konsequenzen einer Gewährleistung der Rückholbarkeit der Abfälle waren für ein zukünftiges Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland zu untersuchen. Dabei sollten zunächst internationale Empfehlungen und Konzepte anderer Länder zur Rückholbarkeit recherchiert werden.

Im Rahmen dieses Einzelvorhabens sollten auch die sicherheitstechnischen Vor- und Nachteile der Rückholbarkeit für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase dargestellt werden. In diesen Vergleich waren auch die Safeguardsaspekte einzubeziehen, die sich insbesondere aus der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente ergeben. Ergänzend war zu prüfen, ob dem Gesichtspunkt der Akzeptanz und der Verlässlichkeit der Sicherheitsbewertung (analog zu den schwedischen Planungen) nicht auch bzw. besser durch eine befristete Probetriebsphase Rechnung getragen werden kann, z. B. über 10 bis 20 Jahre mit etwa 10 % des geplanten Inventars, als mit der Gewährleistung einer Rückholbarkeit.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollten für die in Deutschland bestehenden Randbedingungen für die Endlagerung die Möglichkeit und alle maßgeblichen Konsequenzen der Berücksichtigung einer Rückholung der Abfälle umfassend beschreiben. Sie sollen als Grundlage für die Festlegung des deutschen Endlagerkonzepts und als Vergleichskriterium bei der Wahl eines Wirtsgesteins bzw. bei der Suche nach einem Endlagerstandort Verwendung finden.

#### 2.11.2 Methodischer Ansatz und Randbedingungen

Durch eine zielgerichtete Recherche zugänglicher Literatur wurden die einschlägigen regulativen Grundlagen, Anforderungen und Empfehlungen bezüglich der Rückholung von radioaktiven Abfällen in Deutschland, den übrigen europäischen Ländern, Russland, den USA, Kanada und Japan sowie die Empfehlungen internationaler Organisationen (IAEA, EU, OECD/NEA) zusammengestellt und analysiert. Mit der Recherche sollte insbesondere ermittelt werden, für welche Arten radioaktiver Abfälle bestehen gesetzliche Regelungen bzw. Anforderungen und Empfehlungen bezüglich einer Rückholbarkeit und welche Begründungen werden für eine solche Option gegeben.

Weiter erfolgte auf Basis dieser Recherche eine Zusammenstellung und Bewertung der in konkreten Endlagerplanungen enthaltenen konzeptionellen und technischen Vorkehrungen für eine Rückholung der eingelagerten Abfälle.

Die Bewertung ist dabei anhand der Kriterien erfolgt, die eine Rückholbarkeit bestimmen - Zugänglichkeit zu den Abfallgebänden, Einschluss der Abfälle in den Gebänden, technische Realisierbarkeit einer Rückholung. Dabei wurden auch die aus der Literatur ersichtlichen Methoden und technischen Mittel für eine Rückholung erfasst. In einem weiteren Teil der Recherche wurden die in der Literatur ausgewiesenen Konsequenzen der Rückholbarkeitsoption bezüglich der Betriebs- und Langzeitsicherheit sowie bezüglich der Kosten der Endlagerung dargestellt und bewertet.

Für die potenziellen Wirtsgesteine Salz, Ton/Tongestein, sonstige Gesteine unter Tonbedeckung und kristallines Gestein wurden die Möglichkeiten der Realisierung einer Rückholbarkeitsoption für ein Endlager für alle Kategorien radioaktiver Abfälle in Deutschland untersucht. Ergänzend wurden die Unterschiede einer Rückholbarkeitsoption bei Endlagerung von HLW und LILW in zwei getrennten Endlagern herausgearbeitet und bewertet. Zu diesem Zweck wurden für alle Wirtsgesteine generische Endlager mit Rückholbarkeitsoption entworfen.

Basierend auf diesen generischen Endlagerkonzepten mit Rückholbarkeitsoption wurde eine Bewertung der Vor- und Nachteile einer solchen Lösung vorgenommen. Schwerpunkt war dabei die Analyse möglicher Konsequenzen für das Barrieren- und Verschlusskonzept des Endlagers, die in eine Bewertung der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers mündete. Eine qualitative Bewertung der ökonomischen Auswirkungen der Berücksichtigung einer Rückholbarkeit erfolgte ebenfalls.

In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob dem Gesichtspunkt der Akzeptanz und der Verlässlichkeit der Sicherheitsbewertung eines Endlagers nicht auch bzw. besser durch alternative Lösungen als mit der Option Rückholbarkeit entsprochen werden kann. Dazu wurde die verfügbare Literatur zu Endlagerkonzepten zielgerichtet ausgewertet. Erkannte Alternativlösungen wurden hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit und Realisierbarkeit in Deutschland geprüft.

### **2.11.3 Ergebnisse des Einzelvorhabens**

Eine Analyse der zugänglichen Literatur über die einschlägigen regulativen Grundlagen, Anforderungen und Empfehlungen bezüglich der Rückholung von radioaktiven Abfällen hat im Wesentlichen folgendes gezeigt:

- Trotz langjähriger internationaler Diskussionen über die Aspekte einer Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle bestehen bis heute keine internationalen Empfehlungen oder Regelungen bezüglich der Berücksichtigung einer Rückholbarkeit in den Endlagerkonzepten. Nur in einer begrenzten Anzahl von Ländern bestehen gesetzliche Regelungen, die eine Berücksichtigung der Rückholbarkeit in den Endlagerkonzepten festlegen, ohne dass bestimmte Einzelheiten wie z. B. Zeitrahmen festgelegt sind.
- Übereinstimmend wird die Auffassung vertreten, dass eine im Endlagerkonzept berücksichtigte Rückholbarkeit nicht zu einer Beeinträchtigung der Sicherheit des Endlagers führen darf.

Tab. 27 zeigt eine Übersicht über die gesetzlichen Regelungen bzw. sonstige nationale Festlegungen und Empfehlungen zur Rückholbarkeit in den untersuchten Ländern sowie über deren Umsetzung in geologischen Endlagerkonzepten.

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Regelungen bezüglich einer Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle.

Für alle Endlagerkonzepte gilt, dass sich mit Fortschreiten der Einlagerung von Abfallgebänden, der Verfüllung und des Verschlusses die Zugänglichkeit der Abfallgebände verschlechtert. Deshalb wird in einer Reihe von Endlagerkonzepten eine zeitliche Verzögerung der Verfüllung und des Verschlusses des Endlagers bzw. von Teilen des Endlagers in einzelnen Etappen des Endlagerprozesses vorgesehen bzw. erwogen, um in diesen Etappen eine Rückholung zu erleichtern. Nach Verschluss eines Endlagers ist eine Rückholung zwar technisch möglich, erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand, da das Endlager neu aufgefahren werden muss, bzw. ein neues „Rückholbergwerk“ zu errichten ist.

Tab. 27: Nationale Regelungen bezüglich einer Rückholbarkeit und deren Umsetzung (nach ZIEGENHAGEN et al. 2005).

Land	Gesetz	Empfehlung/ Festlegung anderer Organe	Endlagerkonzept mit Rückholbarkeitsoption*)	Bemerkungen
Belgien	-	+/-	+	laut Regierungsbeschluss ist Rückholbarkeit für LLW-Endlager zu berücksichtigen.
Deutschland	-	-	-	
Finnland	-	+	-	Festlegung STUK Außer hoher Standfestigkeit der Behälter keine weiteren Maßnahmen
Frankreich	+		+	
Japan	-	+	-	Empfehlung NSC Variante mit Rückholbarkeitsoption entworfen
Kanada	-	+	+	Dokument AECB
Niederlande	-	+	+	Erklärung der Regierung
Russland	+		+	Gesetz legt Rückholbarkeit BE aus Langzeitlager fest
Schweden	-	+	-	Vorgabe KASAM für BE Außer hoher Standfestigkeit der Behälter keine weiteren Maßnahmen
Schweiz	+		+	
Spanien	-	+	-	Betriebsgenehmigung fordert Rückholbarkeit
GB	-	+	+	Empfehlung RWMAC
USA	+		+	

\*) Eine Rückholung ist grundsätzlich bei allen Endlagerkonzepten möglich, wobei Restriktionen durch die Temperaturen bestehen können. Unter Endlager mit Rückholbarkeitsoption ist hier zu verstehen, dass spezielle Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung in verschiedenen Etappen des Endlagerprozesses im Konzept vorgesehen sind.

In einigen Endlagerkonzepten sind konzeptionelle bzw. technische Lösungen enthalten, die den Zugang zu den Abfallgebinden zwecks einer Rückholung erleichtern können.

Solche Lösungen sind:

- Einlagerung von einem oder wenigen Gebinden in einer Einlagerungszelle. Dadurch kann auch eine selektive Rückholung vorgenommen werden.
- Einlagerung in Einlagerungsrohren ohne Verfüllung des Zwischenraumes zwischen Rohrwand und Gebinden bzw. zwischen den Gebinden.
- Einlagerung der Abfallgebinde in ausgebauten Endlagerkammern bzw. Abschnitten in Endlagerkammern ohne Verfüllung. Diese Lösung wird z. B. in Schweden für schwachradioaktive Abfälle angewendet, wobei jedoch keine Absichten für eine Rückholung dieser Abfälle bestehen.
- Spezielle Konstruktion der Verschlüsse der Einlagerungszellen, die den Rückbau der Verschlüsse erleichtert.

Ein wesentlicher Faktor, der den Zugang zu den Abfallgebinden erschweren bzw. unmöglich machen kann, ist die Temperatur der Abfallgebinde und des umgebenden Wirtsgesteins. Entsprechende Recherchen haben ergeben, dass mit dem heutigen Stand der Technik Wirtsgesteinstemperaturen bis 70 °C beherrschbar sind, wobei die Gebirgstemperatur 100 °C nicht überschreiten sollte, um keine unzulässigen Spannungen durch zu hohe Temperaturgradienten zwischen den Wänden der Grubenbaue und den Werten hervorgerufen (ENGELMANN et al. 1995). Dieser Faktor spielte nach den untersuchten Endlagerkonzepten nur für Endlagerkonzepte im Salz bei hohen Wärmeleistungen der endgelagerten Behälter eine Rolle. Für Endlagerkonzepte im Kristallingestein und Ton wird die maximale Temperatur am Kontakt zum Bentonit ohnehin auf 100 °C begrenzt, um die Entstehung einer Dampfphase auszuschließen und die Barrierenwirkung des Bentonits nicht zu beeinträchtigen.

Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung, die für die Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit der Endlager von Relevanz sind, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Verzögerung der Verfüllung und des Verschlusses von Teilen des Endlagers bzw. des Endlagers und

- technische Maßnahmen.

Verzögerungen der Verfüllung und des Verschlusses für einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten würden keine wesentlichen Fragen der Betriebs- und Langzeitsicherheit aufwerfen, da für die Endlager ohnehin eine Betriebszeit von etwa 50 Jahren vorgesehen ist. Falls sich diese Phase jedoch über größere Zeiträume erstreckt, wird in den entsprechenden Endlagerkonzepten auf Folgendes hingewiesen:

- Die Langzeitstabilität der Grubenbauten kann durch entsprechende Konstruktion und Instandhaltung gewährleistet werden. Es muss dabei beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der Dauer der Offenhaltungsphase sich das Risiko unsachgemäßer Instandhaltung vergrößert, wodurch das Risiko einer Instabilität der offenen Grubenräume erhöht wird.
- Bei Endlagern in Ton kann es durch Konvergenz der unverfüllten Grubenräume zur Beeinträchtigung der Stabilität der Grubenräume kommen, was bei nicht ausreichender Instandhaltung zum Einbrechen von Strecken und damit zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtsgesteins führen kann.
- Es kann zu einer Beeinflussung der chemischen und physikalischen Stabilität von Verfüllungen und Verschlüssen bei Kontakt mit der Grubenluft durch das Offenhalten einzelner Grubenabschnitte kommen.
- Bei einem Endlager in Ton ist zu berücksichtigen, dass durch chemische und hydraulische Prozesse, die durch Zutritt von Sauerstoff bzw. durch Trocknen des Wirtsgesteins aufgrund der lang anhaltenden Bewitterung eintreten können, der Ton versauern kann, was Veränderungen der Radionuklidmigratoreigenschaften verursachen kann.
- Es besteht erhöhte Korrosionsgefahr für Endlagerbehälter und metallische Konstruktionselemente der Endlagerräume durch Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit.
- Es kann zu möglichen Veränderungen der hydraulischen Bedingungen infolge der Entwicklung einer ungesättigten Zone im Wirtsgestein durch längere Drainage kommen.
- Es besteht die Möglichkeit der Karbonatisierung von Verfüllmaterial in Gebinden mit schwach – und mittelaktiven Abfällen sowie Ausfällung von Karbonaten an Mörtel-, Strecken – und Kammerausbauten sowie Mörtelverfüllungen.
- Mikrobielle Aktivität und Bildung von Biofilmen ist möglich.
- Das Risiko von Störfällen, wie Feuer, Eindringen von Grundwasser u. a. wird erhöht.
- Das Risiko von unbefugtem Eindringen in das Endlager und Missbrauch wird erhöht.
- Die Einhaltung der Safeguards-Anforderungen ist für den endgelagerten Kernbrennstoff zu gewährleisten.

Technische Maßnahmen wie die Erhöhung der Stabilität und Korrosionsfestigkeit von Endlagerbehältern tragen zur Erhöhung der Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers bei. Andere Maßnahmen, wie z. B. das Endlagern von Abfallgebinden in unverfüllten Röhren oder unverfüllten Kammern, erleichtern den Zutritt von Grundwasser zu den Abfallgebinden, was die Radionuklidmigration begünstigen kann.

Ein entscheidender Kostenfaktor einer Rückholbarkeitsoption wird durch ein verlängertes Offenhalten von Endlagerteilen oder des Endlagers insgesamt verursacht. Möglich sind erhöhte Aufwendungen für das Monitoring nach Verschluss des Endlagers, für die Gewährleistung des physischen Schutzes der eingelagerten Abfälle und die Einhaltung der Safeguardsanforderungen.

Die Ergebnisse der Betrachtung generischer Endlager in Deutschland werden im Folgenden für die unterschiedlichen Wirtsgesteine dargestellt. Dabei sind allgemein keine größeren Unterschiede zwischen dem Ein-Endlager-Konzept oder zwei getrennten Endlagern für wärmeentwickelnde und vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle festzustellen.

Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle erfolgt in allen Varianten in räumlich voneinander getrennten Bereichen des Grubengebäudes. Grundsätzlich sind keine signifikanten Unterschiede bei getrennten Endlagern zu den hier diskutierten Aspekten der Sicherheitsrelevanz einer Rückholbarkeit erkennbar.

Die wesentlichen Maßnahmen zur Berücksichtigung einer Rückholbarkeitsoption sind für Tongestein, Kristallin und für sonstige Gesteine unter Tonabdeckung die gleichen wie bei einem Endlager mit Rückholbarkeitsoption in Salz. Daher erfolgt die Bewertung der Sicherheitsrelevanz analog.

## Salz

Es wurde die Errichtung eines Endlagers für alle Abfallkategorien mit Rückholbarkeitsoption in einer Salzformation in einer Teufe von ca. 800 m vorgesehen. Der Zugang zum Endlager erfolgt über zwei Schächte. Ein Schacht dient für den Personal- und Materialtransport einschließlich der Haufwerksförderung sowie als einziehender Wetterschacht. Der zweite Schacht ist für den Transport der radioaktiven Abfälle nach Untertage sowie als ausziehender Wetterschacht vorgesehen. Die Abb. 14 illustriert am Beispiel des Wirtsgesteines Salz die für dieses Einzelvorhaben entwickelten generischen Endlager.

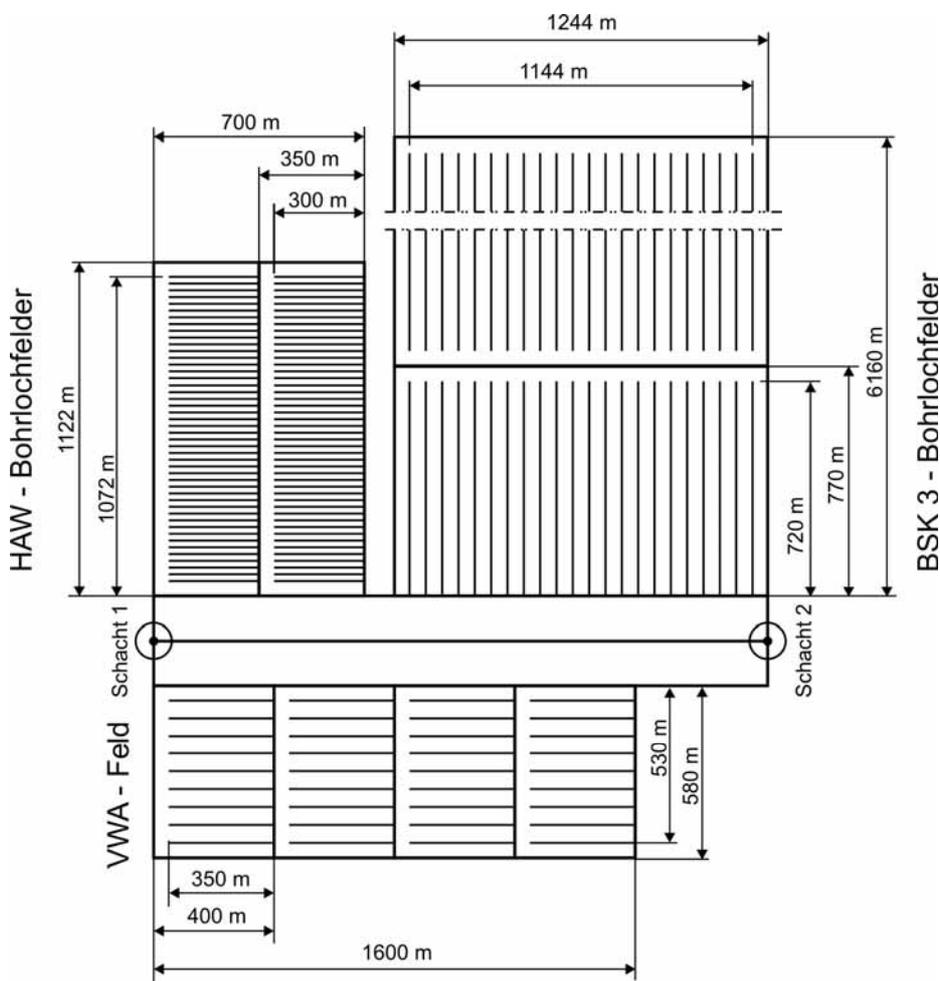


Abb. 14: Schematisches Layout eines generischen Endlagers mit Rückholbarkeitsoption in Salz (aus ZIEGENHAGEN et al. 2005, VWA entspricht LILW, HAW entspricht HLW).

Zur Gewährleistung einer Rückholbarkeit muss die Wärmeleistung der Behälter für ausgedienten Kernbrennstoff und HLW gegenüber dem Endlagerkonzept ohne Rückholbarkeitsoption stark reduziert werden. Auf Basis thermischer Berechnungen wird eine Lagerung in Form von BSK-3-Kokillen für ein Endlager mit Rückholbarkeitsoption angenommen. Außerdem muss die Zwischenlagerzeit erhöht bzw. die Beladung der Behälter verringert werden. Die nötige Zwischenlagerzeit einer BSK-3-Kokille erhöht sich so von 10 auf 30 Jahre. Darüber hinaus muss die Einlagerungsgeometrie verändert werden.

Aus der Rückholbarkeitsoption resultiert eine Erhöhung des Flächenbedarfes für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle etwa um den Faktor 8.

Weitere wesentliche Konsequenzen für das Endlagerkonzept bei Berücksichtigung einer Rückholbarkeitsoption sind die Nichtverfüllung mit Kokillen belegter Bohrlöcher, die Einführung eines Stahl liners in den Bohrlöchern sowie das Offenhalten der Einlagerungsstrecken und des Grubengebäudes und damit verbunden der temporäre Verschluss belegter Bohrlöcher.

Daraus erwachsen Faktoren, die für die Langzeitsicherheit von Relevanz sein können. Die möglichen sicherheitsrelevanten Faktoren einer Nichtverfüllung bzw. Verzögerung der Rückfüllung und Versiegelung des Endlagers bzw. von Teilen des Endlagers können wie folgt eingeteilt werden (GRUPA et al. 2000):

- Effekte aufgrund der verlängerten Bewetterung und des damit verbundenen verlängerten Einflusses von eindringender Feuchtigkeit,
- Effekte, die die Langzeitstabilität des Wirtsgesteins, des Grubenausbaus und der Endlagerkonstruktionselemente beeinflussen und
- erhöhtes Risiko des Eintretens von Störungssituationen.

## Tongestein

Es wurde die Errichtung eines Endlagers für alle Abfallkategorien mit Rückholbarkeitsoption in einer Tongesteinsformation in einer Teufe von ca. 500 m vorgesehen. Der Zugang zum Endlager erfolgt über zwei Schächte. Ein Schacht dient für den Personal- und Materialtransport, einschließlich der Haufwerksförderung sowie als einziehender Wetterschacht. Der zweite Schacht ist für den Transport der radioaktiven Abfälle nach Untertage sowie als ausziehender Wetterschacht vorgesehen.

Ausgehend von den Ergebnissen thermischer Berechnungen wurde für das generische Endlagerkonzept in Ton mit Rückholbarkeitsoption eine Bohrlochlagerung von Behältern beladen mit Brennstäben von zwei Brennelementen vorgesehen.

Die Zwischenlagerzeit der Brennelementkokillen steigt durch eine Rückholbarkeitsoption von 32 auf 50 Jahre. Die Zwischenlagerzeit von HLW-Kokillen steigt von 40 auf 50 Jahre.

Aus der Rückholbarkeitsoption resultiert eine Erhöhung des Flächenbedarfes für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle um den Faktor 1,4.

Die Errichtungskosten für den Endlagerteil BE- und HLW-Gebinde würden aufgrund des höheren Flächen- und Raumbedarfes bei der Option Rückholbarkeit um ca. 37 % ansteigen. Zusätzlich ist mit höheren Betriebskosten zu rechnen.

Aufgrund des Offenhaltens der Einlagerungsstrecken und Grubenräume ist bei einem Endlager in Ton zusätzlich zu berücksichtigen, dass durch chemische und hydraulische Prozesse, die durch Zutritt von Sauerstoff bzw. durch Trocknen des Wirtsgesteins durch eine lang anhaltende Bewetterung hervorgerufen werden können, der Ton versauern kann, was wiederum Veränderungen der Radionuklidmigration verursachen kann.

Infolge der Entwicklung einer ungesättigten Zone im Wirtsgestein durch längere Drainage können Veränderungen der hydraulischen Bedingungen eintreten, die ihrerseits Veränderungen der Radionuklidmigration verursachen können. Darüber hinaus könnte die Barrierenwirkung des Wirtsgesteins in der Nahzone beeinträchtigt werden. Damit könnten diese Faktoren die Langzeitsicherheit beeinflussen.

Für den Endlagerteil für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle ergeben sich darüber hinaus höhere Errichtungskosten durch den Ausbau der Einlagerungskammern. Außerdem ist mit höheren Betriebskosten zu rechnen.

## Kristallin

Es wurde die Errichtung eines Endlagers für alle Abfallkategorien mit Rückholbarkeitsoption in einer kristallinen Gesteinsformation in einer Teufe von ca. 800 m vorgesehen. Der Zugang zum Endlager erfolgt über zwei Schächte. Ein Schacht dient für den Personal- und Materialtransport einschließlich der Haufwerksförderung sowie als einziehender Wetterschacht. Der zweite Schacht ist für den Transport der radioaktiven Abfälle nach Untertage sowie als ausziehender Wetterschacht vorgesehen.

In Anlehnung an thermische Berechnungen wurde für die Konzipierung der Einlagerung von ausgedientem Kernbrennstoff in Kristallin der Behälter BSK 3 bei einer Zwischenlagerung des Brennstoffes von ca. 40 Jahren und einer Wärmeentwicklung bei Einlagerung von ca. 1.620 Watt angenommen.

Zur Verringerung der erforderlichen Endlagerfläche sowie im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit der generischen Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen wurde für die Endlagerung in Kristallingestein eine Bohrlocheinlagerung vorgesehen.

Bei HLW-Abfällen wurde für die Einlagerung in Kristallingestein die Bohrlochlagerung von HLW-Kokillen bei einer Abklingzeit von ca. 40 Jahren zugrunde gelegt.

Aus der Rückholbarkeitsoption ergibt sich eine Erhöhung des Flächenbedarfes für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle um den Faktor 7.

Die Errichtungskosten für den Endlagerteil BE- und HLW-Gebinde würden aufgrund des höheren Flächen- und Raumbedarfes bei der Option Rückholbarkeit ca. um den Faktor 3 ansteigen.

Für den Endlagerteil für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle könnte von den etwa gleichen Errichtungskosten für die Varianten mit und ohne Rückholbarkeitsoption ausgegangen werden, da im schwedischen SFR-Konzept gleichfalls Betonkammern und eine Schicht gebrochenen Gesteins zwischen Wirtsgestein und Betonkammer vorgesehen ist.

Eine Erhöhung der Betriebskosten bei einem Endlager in Kristallin mit Rückholbarkeitsoption ist ebenfalls zu erwarten.

## Sonstige Gesteine mit Tonabdeckung

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Tonabdeckung von sonstigem Gestein keine Relevanz für eine Rückholbarkeit erkennen lässt, so dass für diese Formation das gleiche Endlagerkonzept mit Rückholbarkeitsoption wie für eine kristalline Wirtsgesteinsformation konzipiert werden kann.

## Alternative Lösungen zur Rückholbarkeit

Für eine Rückholbarkeit werden soziologische und ethische Aspekte, Sicherheitsaspekte, technische Aspekte sowie ökonomische Aspekte angeführt. Alternativlösungen zur Rückholbarkeit müssten inhaltlich den o. g. Aspekten genügen. Die Analyse dieser Aspekte hat gezeigt, dass es für eine Reihe von Aspekten keine Alternativlösung zur Rückholbarkeit gibt. Besonders deutlich ist dies bei folgenden Aspekten für die Rückholbarkeit:

- Neue Erkenntnisse von Wissenschaft und Technik könnten es ermöglichen, das Gefährdungspotenzial der langlebigen Radionuklide zu verringern oder das Management der radioaktiven Abfälle zu verbessern.

- Neue Informationen bezüglich des Standorts und der Endlagerplanung, die eine Rückholung bedingen könnten, könnten gewonnen werden. Es kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass in der Zukunft eine andere Nutzung des Standortes eine Rückholung erfordert.
- Durch fortgeschrittene Methoden könnten in der Zukunft die in den Abfällen enthaltenen Stoffe einer Verwertung zugeführt werden. Dazu gehören u. a. die ausgedienten Brennelemente, die als potenzielle Energiereserve betrachtet werden könnten.

Im Weiteren werden die möglichen Alternativen zur Rückholbarkeit einzeln bewertet:

#### Demonstrationsphase:

Als ein soziologisches Argument für eine Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle wird ein möglicher Akzeptanzgewinn für ein Endlager aufgeführt, da durch eine Rückholbarkeit eine laufende Kontrolle und zukünftige Handlungsmöglichkeiten erhalten werden. Eine gewisse Erhöhung der Betriebskosten durch Verlängerung der Betriebszeit des Endlagers durch die Demonstrationsphase ist dabei zu beachten. Sicherheitsrelevante Fragen einer solchen Lösung sind nicht erkennbar, wenn diese Phase nicht über Jahrzehnte und mehr ausgedehnt wird.

#### Pilotabschnitt:

In Anlehnung an das Schweizer Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (EKRA 2000) könnte die Errichtung eines Pilotabschnittes erfolgen. Dazu wird separat von den Einlagerungsfeldern ein Abschnitt errichtet, in dem eine begrenzte Anzahl von Abfallgebinden entsprechend dem Einlagerungskonzept eingelagert und verstärkt messtechnisch überwacht wird. Sicherheitsrelevante Fragen einer solchen Lösung könnten bei Offenhalten des Pilotabschnittes oder von Teilen dieses Abschnittes auftreten, die, wenn auch in wesentlich geringerem Maße, ähnlich wie bei Offenhaltung eines Endlagers sind. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Offenhaltung wird die Relevanz dieses Aspektes als gering eingeschätzt.

#### Monitoring:

Eine Alternative könnte in einem verstärkten Monitoring des Endlagers insgesamt gesehen werden. Zusätzlich könnten spezielle Kontroll- und Überwachungssysteme im Nah- und Fernfeld des Endlagers installiert werden, wie dies im Schweizer Konzept vorgesehen ist. Die Aufgaben und Ziele dieses verstärkten Monitoring wären die gleichen wie bei den o. g. Alternativlösungen. Entsprechende Monitoringsysteme für mehrere Jahrzehnte sind verfügbar. Sicherheitsrelevante Faktoren sind bei einer solchen Lösung nicht erkennbar.

## 2.12 SAFEGUARDS

### Internationale Kernmaterialüberwachung (Safeguards) bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in relevanten geologischen Formationen in Deutschland

*Bearbeiter:* BMWA in Zusammenarbeit mit FZJ und BfS

*Zitat:* REMAGEN et al. (2004)

Ziel der Kernmaterialüberwachung (Safeguards) durch die IAEA ist es, durch den Effekt rechtzeitiger Entdeckung zu verhindern, dass Kernbrennstoffe (Spaltmaterial) zur Herstellung von Kernwaffen missbräuchlich verwendet werden können. Hierbei wird ein staatlich initiiertes Missbrauch unterstellt und bei den Überwachungsmaßnahmen berücksichtigt.

Die Safeguards-Überwachung eines Endlagerbergwerkes beginnt, sobald der Planfeststellungsbeschluss zum Bau und Betrieb des Endlagers rechtskräftig vorliegt. Eine wesentliche Aufgabe dieser internationalen Überwachung ist es u. a. zu verifizieren, dass es in dem zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Endlagers bereits seit Jahren bestehenden Erkundungsbergwerk keine geheim gehaltenen Grubenbaue gibt, in denen Endlagergebäude geöffnet und das Kernmaterial missbräuchlich für ein Kernwaffenprogramm wiederverwendet werden kann. In diesem Zusammenhang hat die Dokumentation über das Bergwerk eine große Bedeutung sowie die Fähigkeit der IAEA, diese durch Begehung des Bergwerkes zu überprüfen.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde für ein Referenz-Endlagerkonzept ein Safeguards-Referenzkonzept (KLANZ 2001) entwickelt. Das Referenz-Endlagerkonzept sah die direkte Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe in einem Salzstock (d. h. Salzgestein in steiler Lagerung) mit sofortiger Verfüllung der Einlagerungsräume vor. Dieses Safeguards-Referenzkonzept hat folgende wesentliche Merkmale: Behälterkontrolle in den Tagesanlagen, Strahlungsdetektoren an beiden Schächten zur Kontrolle von möglichen Rückflüssen der Endlagergebäude nach über Tage und wiederholte Überprüfungen der grundlegenden technischen Merkmale sowohl der Tagesanlagen als auch des Grubengebäudes. Ein Vorteil der nicht rückholbaren Endlagerung radioaktiver Abfälle im Steinsalz ist es, dass die Konvergenzrate dieses Wirtsgesteins groß ist und bei der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle noch weiter vergrößert wird. Dadurch werden die Abfallgebäude bald so stark vom Wirtsgestein eingeschlossen, dass sie unzugänglich sind und nur mit großem bergbaulichem Aufwand wieder gewinnbar wären. Durch die Unzugänglichkeit der Gebäude kann sich der untertägige Überwachungsaufwand der Safeguards-Inspektoren auf die Überprüfung des Grubengebäudes beschränken.

Bei der Endlagerung in einem Salzstock wird aufgrund in der Regel ausgebildeter wasserführender Gesteinsschichten im Deck- und Nebengebirge davon ausgegangen, dass eine bergmännische Rückgewinnung der endgelagerten Abfälle von der Erdoberfläche aus nur mit großem Aufwand möglich ist. Die hierzu notwendigen Aktivitäten (z. B. Abteufen mindestens eines Schachtes) lassen sich durch Fernüberwachung (z. B. Luftbildauswertung) erkennen. In diesem Zusammenhang ist es von Vorteil, wenn der Bereich der Erdoberfläche über dem Endlager in der Nach-Stilllegungsphase des Endlagers nicht industriell, sondern möglichst als Grünfläche (z. B. Park) genutzt wird. Weitere Bergwerke in einem für die Endlagerung genutzten Salzstock würden ebenfalls der internationalen Safeguards-Überwachung unterliegen, da die IAEA ein Eindringen in den Endlagerbereich von einem benachbarten Bergwerk aus nicht ausschließen könnte.

Im Salzgestein ist grundsätzlich auch eine rückholbare Lagerung radioaktiver Abfälle möglich. Hierzu muss jedoch dem Konvergenzverhalten dieses Gesteins durch einen entsprechenden Ausbau entgegengewirkt werden. Ebenso ist für die wärmeentwickelnden Abfälle ein anderes Einlagerungskonzept zu erarbeiten, um die Konvergenzrate während der Offenhaltung der Einlagerungsräume zu verringern. Dieses Konzept erfordert eine größere Fläche bzw. ein größeres Volumen des für das Endlagerbergwerk benötigten Wirtsgesteins. Die Rückholbarkeit ermöglicht allerdings auch einen einfacheren Zugriff auf die kernmaterialhaltigen

Gebinde mit dem Ziel eine unzulässigen Abzweigung von spaltbarem Material. Deshalb sind bei einer rückholbaren Lagerung für den Zeitraum der Rückholbarkeit Safeguards-Maßnahmen mit erheblichem personellen und instrumentellen Aufwand erforderlich.

Die Ausführungen zum Safeguards-Referenzkonzept gelten sowohl für die Endlagerung in einem Salzstock (Salzgestein in steiler Lagerung), als auch für die Endlagerung in Salzgesteinen in flacher Lagerung.

Das deutsche Safeguards-Referenzkonzept ist grundsätzlich auch auf Ton/Tonstein, Kristallin und sonstige Gesteine unter Tonabdeckung als potenzielle Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle übertragbar.

Eine rückholbare Lagerung radioaktiver Abfälle in den Wirtsgesteinen Ton/Tonstein hat unter Offenhaltungs-Aspekten die gleichen Nachteile wie im Salzgestein, während es wegen der im Kristallin praktisch nicht vorhandenen Konvergenz zu keinem raschen Gebirgseinschluss der Abfälle kommt. In der Betriebsphase eines Endlagerbergwerks mit rückholbarer Lagerung wird ein Safeguards-Überwachungsaufwand erforderlich, der in etwa dem eines Zwischenlagers für ausgediente Kernbrennstoffe entspricht, und der damit wesentlich größer ist als bei der Endlagerung mit sofortiger Verfüllung.

Der Safeguards-Überwachungsaufwand verringert sich, wenn eine weitgehend räumliche und zeitliche Trennung der ausgedienten Brennelemente (des spaltbaren Materials) von den anderen radioaktiven Abfällen erfolgt. Im Idealfall sollte es unter Safeguards-Aspekten zwei Endlager geben, eines für ausgediente Brennelemente (mit Safeguards-Überwachung) und ein zweites für andere radioaktive Abfälle, die nur vernachlässigbare Mengen an spaltbaren Materialien enthalten. Es ist internationaler Konsens, dass die Safeguards-Überwachungsmaßnahmen so lange durchgeführt werden sollen, wie es diese Institution geben wird.

Solange nicht das endgültige Wirtsgestein und kein exakter Standort sowie das zur Anwendung gelangende Endlagerkonzept (z. B. Rückholbarkeit, Nichtrückholbarkeit, Eigenschaften des Deckgebirges) festgelegt sind, kann kein Safeguards-Konzeptvorschlag unterbreitet werden. Auch ein sinnvoller Vergleich von Safeguards-Konzepten für verschiedene Wirtsgesteine ist ohne diese Voraussetzungen nicht durchführbar. Jedoch ist grundsätzlich die rückholbare Endlagerung von ausgedienten Brennelementen mit größerem Safeguards-Überwachungsaufwand verbunden als deren Endlagerung mit sofortiger Verfüllung der Einlagerungsräume.

### 3 ERGEBNISSE DER PEER-REVIEWS UND DES WORKSHOPS

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Ergebnisse zu den Einzelfragen hat das BfS auf einem Workshop am 28. und 29. September 2005 in Hannover einem fachkundigen Expertenkreis zur Diskussion vorgestellt. Im Folgenden werden aus Sicht des BfS die Kernaussagen der Reviewer und die zentralen Diskussionsergebnisse der Arbeitsgruppen des Workshops dargestellt. Ein Abdruck der unveränderten Folien der Ergebnispräsentationen der Arbeitsgruppen in der abschließenden Plenarsitzung des Workshops befindet sich im Anhang 3.

#### 3.1 ERGEBNISSE DER ARBEITSGRUPPE 1 NACHWEISFRAGEN

In der von Prof. Dr. Wernt Brewitz (GRS Braunschweig) und Prof. Dr. Thomas Fanghänel (FZK/INE) geleiteten Arbeitsgruppe 1 wurden konzeptionelle Grundsatzfragen zu den folgenden Fragestellungen diskutiert:

- Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Naturbeobachtungen**)
- Behandlung von Unsicherheiten, systematische Entwicklung von Szenarien und Rechenverfahren bei der Anwendung probabilistischer Methoden im Langzeitsicherheitsnachweis (**Modellrechnungen**)
- Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (**Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum**)
- **Sicherheitsindikatoren** zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle

##### 3.1.1 Naturbeobachtungen

Kernaussagen der Reviewer

Review 1

Der Bericht ist übersichtlich gegliedert und gibt einen vollständigen Überblick über die bis 2003 vorliegende Literatur. Nutzen, Möglichkeiten und Grenzen anthropogener und natürlicher Analoga für vertrauensbildende Maßnahmen innerhalb einer vollständigen Sicherheitsanalyse werden deutlich herausgestellt. Die Schlussfolgerungen des Berichts befinden sich im Einklang mit international (z. B. Natural Analogue Working Group) erzielten Ergebnissen.

Positiv hervorzuheben ist die Einbeziehung der im Endlagerkontext noch nicht häufig angesprochenen industriellen Analoga. Ein Schlüsselergebnis des Berichtes ist der hauptsächlich qualitative Aspekt von natürlichen und anthropogenen Analoga. Der Hinweis auf die quantitative Nutzung eines Analogons (etwa bei der Metallkorrosion oder beim geochemischen Verhalten bestimmter Radionuklide) wird besonders begrüßt. Beobachtbare Folgen klimatischer Szenarien lassen sich gleichermaßen in Analogstudien behandeln. Hier hebt der Bericht auf eher skandinavische Verhältnisse ab, eine Übertragung auf das zukünftig erwartete Klima in Norddeutschland erscheint durchaus möglich. Nicht überraschend ist die geringe Anzahl deutscher

Analogstudien für das Wirtsgestein Salz, da dort viele der ansonsten in Tonbarrieren zu betrachtenden geochemischen Prozesse entfallen. Hier wären weitere Untersuchungen sinnvoll.

Insgesamt ist im vorliegenden Bericht die Nützlichkeit von natürlichen Analoga gezeigt worden. Der Gebrauch von Analoga als besonders öffentlichkeitswirksame Beispiele für die Funktionsweise endlagerrelevanter Naturvorgänge wird angesprochen, aber zu wenig diskutiert.

## Review 2

Der Berichtsaufbau ist logisch, übersichtlich und zweckmäßig. Das Schwergewicht liegt auf der Bewertung der FEP. Der Bericht orientiert sich stringent an natürlichen Prozessen. Besonders betont werden Probleme der Nachweisführung unter der Wirkung externer Einflüsse wie Klimaveränderungen. Die Möglichkeiten und Grenzen der Naturbeobachtungen hätten vollständiger behandelt werden können. Die Liste der eingehend behandelten natürlichen Analogstudien ist repräsentativ und für die Nachweisführung relevant.

Das Review beinhaltet zahlreiche Aussagen zu einzelnen Detailpunkten des Einzelvorhabens. Diese Einzelkommentare zur Vollständigkeit der Angaben in bestimmten Textstellen schmälern den Berichtswert nicht.

## Ergebnisse

Die vorliegende prozessorientierte Analyse von natürlichen Analoga zeigt an Hand von Beispielen die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von natürlichen Analoga auf. Ihr Wert liegt in der prozessorientierten Gliederung der bisher in der Literatur beschriebenen und in Endlagerprojekten angewendeten Analoga.

Aus Sicht der Arbeitsgruppe haben natürliche und anthropogene Analoga auf zwei Feldern Bedeutung. Sie haben

- eine große generische Bedeutung für grundsätzliche und konzeptionelle Fragen der Endlagerung. Sie können anhand natürlicher Systeme und Prozessabläufe die grundsätzliche Machbarkeit der Isolation und Retardation belegen.
- eine Bedeutung, zum Verständnis Endlagersystem-spezifischer Prozesse beizutragen und das Vertrauen in die eingesetzten Szenarien und Modelle zu rechtfertigen. Dies gilt insbesondere für Prozesse, deren Zeiträume durch Experimente nicht abgedeckt werden können.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit teilt die Arbeitsgruppe das Ergebnis der Studie, dass die quantitative Anwendung von Analoga im Vergleich zu qualitativen, beschreibenden, vertrauensbildenden Anwendungen eingeschränkt ist. Sie erstreckt sich zumeist auf chemische Prozesse im Nahfeld (z. B. Korrosionsprozesse), deren Randbedingungen genau definiert sind und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherstellen.

Diskutiert wurden in der Arbeitsgruppe weiterhin folgende Punkte:

- Es wurde bemängelt, dass international keine einheitliche Definition für den Begriff Naturbeobachtungen angewendet wird und der Begriff mittlerweile sowohl im ursprünglichen Sinn eines Analogons für endlagerspezifische Prozesse angewendet als auch auf nahezu alle geologischen Prozesse ausgedehnt wird.
- Es wurde festgestellt, dass weitere in der Studie nicht erwähnte natürliche Analoga existieren wie z. B. für den kolloidalen Transport von Radionukliden, Flüssigkeitseinschlüsse und gesteinsgebundene Gase.
- Die Arbeitsgruppe stellte fest, dass Analogstudien vor allem zur Endlagerung in kristallinen Gesteinen und Ton/Tonstein vorliegen. Vergleichbare zusammenfassende Analysen zu natürlichen Analoga liegen für das Wirtsgestein Salz nicht vor (siehe auch Tab. 3).
- In der abschließenden Plenarsitzung wurde auf ein Beispiel für die Implementierung von Analogstudien in das spanische Endlagerprogramm verwiesen (ENRESA 2004).

## 3.1.2 Modellrechnungen

### Kernaussagen der Reviewer

#### Review 1

Zur Angabe der Detektionswahrscheinlichkeiten hydraulischer Leitfähigkeiten werden verfügbare geowissenschaftliche Erkundungsmethoden klassifiziert, ihre Methodik aufgelistet und die ableitbaren Informationen kurz dargestellt. Die Aufzählung der Methoden zur Erkundung lösungsführender Strukturen kann bei den geologischen Verfahren noch ergänzt werden. Eine quantitative Detektionswahrscheinlichkeit und eine Möglichkeit, wie diese abzuschätzen wäre, werden nicht angegeben. Bei den geophysikalischen Verfahren werden zu knappe Ausführungen über das vertikale und laterale Auflösungsvermögen gemacht. Wesentlich ist der Hinweis, dass die Integration aller vorhandenen Resultate geowissenschaftlicher Untersuchungen der Schlüssel für die erfolgreiche Modellaktualisierung und Verbesserung der Modellverlässlichkeit ist. Für zusätzliche Informationen zur Ermittlung der räumlichen Variation der hydraulischen Leitfähigkeit wäre es wünschenswert, die Berücksichtigung geologischer Prozesse in die bisherige Betrachtungsweise einzubinden.

Die im Bericht durchgeführten Betrachtungen zur Modellaktualisierung basieren auf dem Bayesschen Ansatz. Die Idee des Bayesschen Ansatzes und die Vorgehensweise bei der Berechnung von bedingten Wahrscheinlichkeiten wirkt allerdings etwas abstrakt und die konkreten Anwendungen für die einzelnen Wirtsgesteine verbessern das methodische Verständnis nicht wesentlich, zumal die Vorgehensweise mit einer jeweils anderen Anzahl von Schritten eine Zuordnung erschwert.

Vorläufige generische Parameterverteilungen zur Angabe der notwendigen A-priori-Wahrscheinlichkeiten im Bayesschen Ansatz werden relativ umfassend angegeben. Den vorgestellten generischen Parameterdatensätzen für die verschiedenen Wirtsgesteine fehlen aber Angaben zur Herkunft und zur Grundgesamtheit der Daten.

Die Darstellung der FEP geschieht übersichtlich und ermöglicht eine einfache Zusammenstellung von relevanten FEP für eine systematische Szenarienentwicklung. Die vom Auftraggeber geforderten Betrachtungsklassen eignen sich für eine Vorauswahl von Szenarien, um notwendige Untersuchungen auszuwählen und Prioritäten zu setzen.

Auch wenn es sich bei den vom Auftragnehmer verwendeten Modellen für Simulationsrechnungen um stark vereinfachte und für die Bewertung des Standortes nicht geeignete Modelle handelt, so sind sie doch realistisch genug und gerade durch ihre Einfachheit für einen Methodenvergleich gut geeignet. Der Methodenvergleich bei der Parametersensitivitätsanalyse ist für Nichtfachleute wenig nachvollziehbar dargestellt.

Bezüglich der Schlussfolgerungen ist vor allem die Feststellung hervorzuheben, dass die Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers wesentlich ist.

#### Review 2

1. Untersuchungsmethoden und Zuverlässigkeit daraus resultierender geologisch/hydrogeologischer Parameter

Die Beschränkung im Bericht auf die geometrische und hydraulische Erkundung von Störungen unter Einschluss der Wahl von optimierten Untersuchungsprogrammen und die Ermittlung von Aussagen zur Zuverlässigkeit daraus resultierender geologisch/hydrogeologischer Modelle ist sinnvoll. Der Bericht gibt einen umfassenden Überblick über das methodische Vorgehen und enthält zahlreiche Literaturverweise.

Zentraler Gegenstand bei den Untersuchungsmethoden ist der Bayessche Ansatz zur geometrischen und hydraulischen Erkundung von Störungen. Der Bericht vermittelt den Bayesschen Ansatz in einer theoretisch abstrakten Weise und setzt ihn in abstrakten Konkretisierungen für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Permeabilität in Kristallin und Tonstein um. Der Bericht hätte nach Meinung des Reviewers ausführlicher die Grundidee des Bayesschen Ansatzes vermitteln können.

Die aufgelisteten Datensätze generischer Wirtsgesteinsparameter für Tonstein, Kristallin und Salz sind für Aufstellung erster Untersuchungsprogramme an einem neuen Standort hilfreich. Zweckmäßig dazu wäre, wenn die Herkunft bzw. Begründung der im Bericht angegebenen Daten bekannt wären und wenn der Datensatz die besonderen Eigenschaften von Salz stärker reflektierte. Die im Bericht aufgezeigte Beziehung zwischen hydraulischer Leitfähigkeit und Betrachtungsmaßstab im Kristallin ist für die Untersuchung und Bewertung dieses Gesteins wichtig.

## 2. FEP und Szenarienentwicklung

Der Bericht empfiehlt die Anwendung der FEP-Liste der OECD/NEA als Basis für deutsche Endlager-Szenarienanalysen. Diese Liste ist jedoch abzuschichten bzw. wirtsgesteinsspezifisch zu kürzen. Dafür könnten z. B. die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des AkEnd zugrunde gelegt werden. Vorgestellte Eiszeitszenarien werden nicht vollständig definiert. Die quantitative Abschätzung von Eintretenswahrscheinlichkeiten von Szenarien liefert nur sehr grobe Angaben. Insbesondere im Salz ist die Differenzierung nach dem Zeitpunkt eines postulierten szenarienbestimmenden Versagens unabdingbar.

## 3. Anwendung der FAST-Methode

Interessante und instruktive Ergebnisse liefert der Vergleich zweier Rechenmethoden zur Parametersensitivitätsanalyse anhand stark vereinfachter Freisetzungsmodelle. Im Ergebnis kann die Anwendung der FAST-Methode für probabilistische Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern ausgeschlossen werden.

Insgesamt enthält der Bericht zu ausgewählten Themen der angesprochenen Themenkreise sehr interessante und nützliche Informationen, geht in verschiedener Hinsicht in zweckmäßiger Weise über die Fragestellung im engeren Sinne hinaus (z. B. Bayesscher Ansatz) und vermittelt eine breite Übersicht mit zahlreichen Literaturverweisen.

## Ergebnisse

Dieses Vorhaben hatte die Modellierung verschiedener Arten von Unsicherheiten für probabilistische Langzeitsicherheitsanalysen vor dem Hintergrund des Ein-Endlager-Konzepts zum Inhalt. Schwerpunkte der Bearbeitung waren

- geowissenschaftliche Erkundungsmethoden und ihre Unsicherheiten,
- die den Modellrechnungen zugrunde liegenden Szenarien sowie
- Methoden zur Parametersensitivitätsanalyse.

Die Arbeitsgruppe empfiehlt eine Präzisierung des Vorhabentitels, insbesondere eine Formulierung, aus der die Ausrichtung auf die probabilistischen Fragestellungen hervorgeht.

Der in der Studie vorgestellte Bayessche Ansatz oder vergleichbare Methoden zur mathematischen Formalisierung der Informationsgewinnung bzw. –fortschreibung sollten aus Sicht der Arbeitsgruppe nach Möglichkeit bereits während der Endlagererkundung angewendet werden.

Die Nützlichkeit der in der vorliegenden Studie (BRUNS et al. 2004) für deutsche Verhältnisse aufgestellten generischen Sätze geowissenschaftlich/geotechnischer Daten wurde anerkannt. Die Herkunft einzelner Daten hätte besser dokumentiert werden sollen.

Bei der Anwendung probabilistischer Methoden für die Langzeitsicherheitsanalyse werden die möglichen künftigen Entwicklungen (Szenarien) eines Endlagersystems nicht getrennt betrachtet, sondern durch eine Serie von Simulationen (Monte-Carlo-Methode) abgedeckt. Dabei haben die Eintrittszeitpunkte von Szenarien eine wesentliche Bedeutung. Sie müssen daher eindeutiger als im vorliegenden Bericht (BRUNS et al. 2004) begründet werden. Die Eintrittszeitpunkte bestimmter Szenarien sind stets wirtsgesteinsspezifisch zu betrachten.

Die Arbeitsgruppe gelangte weiterhin zum Ergebnis, dass BRUNS et al. (2004) keine formationsspezifischen Einschränkungen und Erweiterungen der FEP-Liste der OECD/NEA (NEA 1999) für Endlagersysteme in Deutschland vorgenommen haben. Daher gibt die Studie keinen formationsspezifischen Überblick über die zur Beschreibung der Entwicklungen eines Endlagersystems in Deutschland zu berücksichtigenden FEP und die Möglichkeit, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit einzuschätzen. Über die grundsätzliche Anwendbarkeit der FEP-Liste der OECD/NEA auf generischer Ebene bestand Einigkeit. Sie bedarf jedoch für konkrete Anwendungen der formations- und standortspezifischen Anpassung.

Beim Vergleich von zwei simulativen Rechenverfahren für die Parametersensitivitätsanalyse erwies sich nach Ansicht der Arbeitsgruppe der Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) nicht als Alternative zu bestehenden Monte Carlo-Methoden.

Die Untersuchung liefert keine vollständige Grundlage für die Entscheidung, zu welchem Zweck und zu welchem Zeitpunkt probabilistische Langzeitsicherheitsanalysen künftig eingesetzt werden können. Ob und in welchem Umfang diese im Rahmen des Vorhabens nicht zu untersuchende Frage unabhängig von den Erfordernissen einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse zu beantworten ist, war im Rahmen des Workshops nicht zu klären.

Einigkeit bestand in der Arbeitsgruppe, dass ein konkreter Nutzen weiterer, generischer Studien zu den Anwendungsmöglichkeiten probabilistischer Sicherheitsanalysen nicht mehr besteht.

Es wurde die grundsätzliche Frage aufgeworfen, welche Erkenntnisse über Parameter natürlicher Größen vorhanden sein müssen, um sie als probabilistisch einstufen und entsprechend weiterbehandeln zu können. Hierzu entwickelte sich in der Diskussion keine abschließende Meinung.

### **3.1.3 Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum**

#### **Kernaussagen der Reviewer**

##### **Review 1**

Der im Vorhaben verwendete Geosystem-Begriff ist in dieser Form nicht eindeutig und steht zudem noch in einem allgemeinen geowissenschaftlichen Fachkontext. Im Sinne der Allgemeinverständlichkeit sollte hier ein neutraler Begriff gewählt werden (Endlagersystem).

Die Definition des Isolationspotenzials schließt in der Begründung an ihrem Anfang die Zeitkomponente aus, um sie dann am Ende doch wieder unter dem Blickwinkel der Stabilität des Rückhaltevermögens einzubringen. Dieses Vorgehen ist nicht schlüssig. Es fehlt der Bezug zum Prozessraum für geo- und hydrochemische Vorgänge.

Für welchen Zeitraum eine aussagekräftige Prognose über die zukünftige geologische Entwicklung eines Geosystems erstellt werden kann (Nachweiszeitraum), ist letztendlich standort- bzw. geosystemabhängig. Die Verknüpfung (Forderung) mit der normativen Zielgröße des Isolationszeitraums kann nur für konkrete standortabhängige Beurteilung erfolgen.

Es wird der Schluss gezogen, dass ein Vergleich von Isolationspotenzialen nur standortspezifisch möglich ist. Wie auch der Bericht zu den Sicherheitsindikatoren (JONES, WIBORGH & ANDERSSON 2004) belegt, ist der Versuch, das Isolationspotenzial, den Nachweiszeitraum und die Langzeitsicherheit mit einem universellen Algorithmus von Anfang an bewerten zu wollen, nicht zielführend. Aus entscheidungstheoretischer Sicht kann nur mit einem gestuften, hierarchisch-planungswissenschaftlichen und risikoorientierten Entscheidungsprozess vorgegangen werden, der Teilergebnisse aufgreift und bewertend weiterführt.

## Review 2

Die Begriffe Nachweiszeitraum und Isolationszeitraum werden im Bericht vermengt und nicht klar voneinander getrennt benutzt. Bei der Festlegung des Isolationszeitraums (Ziel 1 Mio. Jahre) werden bestimmte geowissenschaftliche Effekte nicht berücksichtigt. Insbesondere ist weder plausibel noch nachvollziehbar, dass bei Prognosen, aus denen der Isolations- und der Nachweiszeitraum abgeleitet werden und die sich auf eine Größenordnung von einer Mio. Jahren beziehen, der als kurzfristig beschriebene, nach ca. 10.000 Jahren zu erwartende Eintritt kaltzeitlicher Klimaverhältnisse nicht in die Begründung der Länge des Isolationszeitraums eingeht.

Die in ALBRECHT et. al. (2004) geäußerte Meinung, dass Modellrechnungen keinen Bezug zur geowissenschaftlichen Prognose und damit zur Festlegung des Nachweiszeitraumes haben, kann nicht geteilt werden.

Die Aussage, dass der Nachweiszeitraum generell – also auch standortunabhängig – in der Größenordnung von einer Million Jahren liegt, ist nicht plausibel. Es erscheint nicht angemessen, ihn ohne vertieftes Verständnis derjenigen geohydraulischen und hydrogeochemischen Prozesse im Geosystem anzugeben, die den Ist-Zustand des Systems etablieren und seine zukünftige Entwicklung zumindest wesentlich mit beeinflussen werden.

Die in ALBRECHT et. al. (2004) benutzte Begründung für die Länge des Isolationszeitraums ist nicht einsichtig, da hier die Begriffe Nachweiszeitraum und Isolationszeitraum inhaltlich nicht durchgängig klar voneinander getrennt benutzt werden. Das spezifische materielle Vermögen von Geosystemen, Schadstoffe für einen möglichst langen Zeitraum von der Biosphäre fernzuhalten (Isolationspotenzial), sollte schadstoffdifferenziert bewertet werden.

Die Berichtsaussage, dass zum Ausgleich ungünstiger Eigenschaften des Geosystems Tonstein keine günstigen Standortverhältnisse erforderlich seien, wird nicht mitgetragen. Der Einschätzung, dass es den idealen Geosystemtyp nicht gibt, ist zuzustimmen. Ebenso mitgetragen wird die Einschätzung, dass der Geosystemtyp kristalline Gesteine als Option für die Endlagerung wahrscheinlich ausscheidet.

Der Schlussfolgerung, dass die Geosystemtypen mit Steinsalz mit ihrer negativen Eigenschaft Wasserlöslichkeit nicht per se günstigen geologischen Gesamtsituationen zuzuordnen sind und dass dies durch – dann unerlässliche – positive standortspezifische Eigenschaften, wie u. a. der ausreichenden Tiefenlage, kompensiert werden muss, wird nur bei Anwendung der Bewertungsmatrix von ALBRECHT et al. (2004) zugestimmt.

Bezüglich der Vorgehensweise zur Ableitung dieser Aussagen ist kritisch festzustellen, dass in der Bewertungsmatrix sowohl für die Geosystemtypen Tonstein und Kristalline Gesteine als auch für die Geosystemtypen mit Steinsalz als einschlusswirksamen Gebirgsbereich die gleichen geosystemaren Kriterien (u. a. die geringe Gebirgsdurchlässigkeit) mit gleicher Gewichtung zum Ansatz gebracht werden. Es ist sachlich nicht angemessen, die hydraulischen Eigenschaften der Geosysteme zu vergleichen, zumindest nicht mit gleicher Gewichtung, da Tonstein und kristalline Gesteine wasserführend sind, einschlusswirksame Gebirgsbereiche im Steinsalz hingehen nicht.

Die Bewertungsmatrix, die lediglich zustandsbeschreibende Eigenschaften oder Merkmale berücksichtigt, hätte mit bewertungsrelevanten Kriterien des prozesshaften Geschehens verknüpft werden können.

## Ergebnisse

Die von den Autoren der Studie ALBRECHT et al. (2004) gewählten Definitionen für die Kernbegriffe Isolationspotenzial, Isolationszeitraum und Nachweiszeitraum boten Anlass zur Diskussion. Neben der grundsätzlichen Kritik, dass es auch in diesem Vorhaben nicht gelungen ist, einen einheitlichen und widerspruchsfreien Begriffskanon zu entwickeln, kritisierte die Arbeitsgruppe die fehlende begriffliche Klärung, was im Sinn der Endlagerung unter Isolation zu verstehen ist. Aus Sicht der Arbeitsgruppe ist zunächst eine Definition des Begriffs Isolation im Zusammenhang mit dem Begriff des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem Betrachtungszeitraum erforderlich. Die Isolation muss immer im Bezug auf den zeitlichen und räumlichen Prozessraum gesehen werden. Zwischen Auftragnehmer und der Arbeitsgruppe bestand zu diesem Punkt Dissens.

In der Arbeitsgruppe bestand Übereinstimmung, dass die von den Auftragnehmern entwickelte Methodik zum relativen Vergleich (Ranking) von generischen Geosystemen keine aussagekräftigen Schlussfolgerungen über das Isolationspotenzial verschiedener Wirtsgesteine zulässt. Ein Ranking ist nur auf der Basis standortspezifischer Befunde möglich. Zwischen Auftragnehmer und der Arbeitsgruppe bestanden zu diesem Punkt unterschiedliche Auffassungen.

Trotz der geäußerten Kritik an der auf der Anwendung von Abwägungskriterien basierenden relativen Einschätzung des Isolationspotenzials verschiedener Geosysteme teilte die Arbeitsgruppe die Auffassung der Autoren, dass kristalline Gesteine unter den in Deutschland gegebenen geologischen Gegebenheiten die Mindestanforderungen des AkEnd nicht erfüllen und daher für die Endlagerung nicht weiter verfolgt werden sollten. Diese Aussage gilt nur angesichts der für die Endlagerung in Deutschland geltenden Forderung, dass die geologische Barriere die Hauptlast der Isolation tragen soll.

### 3.1.4 Sicherheitsindikatoren

#### Kernaussagen der Reviewer

##### Review 1

Der Versuch, die in 17 Sicherheitsstudien verwendeten Indikatoren zu vereinheitlichen, hat zu nicht immer übereinstimmenden Definitionen bezüglich der ausgewerteten Berichte geführt. Eindeutigkeit der Begriffe ist aber erforderlich.

Es stellt sich die Frage, ob die ausgewählten Indikatoren geeignet sind, den Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und auch vor Schadstoffen unter den Prinzipien der Vorsorge anzuzeigen. Nach dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse sollte davon ausgegangen werden, dass die geltenden Dosisgrenzwerte der StrlSchV als erste Zielgrößen für eine sichere Endlagerung keine mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit zulässige Grenze der Schädlichkeit von Strahlendosen fixieren.

Es ist zu bedauern, dass eine kritische Würdigung, wieweit die untersuchten Indikatoren Minimierungsgebote im Sinne einer Unterschreitung der vorgegebenen Schutzziele erfüllen könnten, in der Untersuchung nicht erfolgt.

Mit der Vermittelbarkeit und Verständlichkeit für die Öffentlichkeit wird in JONES, WIBORGH & ANDERSON (2004) ein wichtiger Aspekt angesprochen, den es gilt, weiter zu entwickeln, um die oft in wissenschaftlichen Ausschüssen stattfindenden Entscheidungsfindungsprozesse transparenter zu gestalten und das Maß an Partizipation des Bürgers an den Risiko-Analysen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen zu verbessern.

## Review 2

Die Liste der betrachteten Indikatoren ist umfassend. Die Datenbasis wird als weitgehend vollständig eingeschätzt. Die bei der Auswertung in Bezug auf die Anwendbarkeit der Indikatoren betrachteten Aspekte sind vollständig und sinnvoll.

Die Definition der verwendeten Hauptbegriffe ist nicht eindeutig. Da auch in der wissenschaftlichen Literatur ein gewisser Wildwuchs bei der Bezeichnung von Indikatoren anzutreffen ist, hätte eine wichtige Aufgabe darin bestanden, eine Systematik zur Einordnung von Indikatoren zu entwickeln und zu beschreiben, dabei eindeutige Definitionen festzulegen und die Begrifflichkeiten im Bericht durchgehend einheitlich anzuwenden.

Die integrierende Bewertung und die Prüfung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen, welche weitgehend aus Sicherheitsstudien für Kristallingestein stammen, auf andere geologische Situationen, kommen zu kurz, da die Einsatzfähigkeit der Indikatoren in anderen Wirtsgesteinen oder geologischen Situationen sehr pauschal behandelt wird. Die im Bericht getroffene Aussage, dass sämtliche identifizierten Indikatoren auf sämtliche Wirtsformationen anwendbar sind, ist nicht haltbar.

Die Auswirkungen der für die Wirtsgesteine bei der Sicherheitsanalyse zu betrachtenden Szenarien (mit ihren Unterschieden hinsichtlich der normalen Entwicklung und den gestörten Entwicklungen der Endlager-systeme) auf die Anwendbarkeit der Indikatoren sind noch zu untersuchen.

Es soll geprüft werden, inwieweit die Individualdosis für einen Vergleich von Standorten mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen herangezogen werden kann.

## Ergebnisse

Die Arbeitsgruppe kam nach längerer Diskussion zu dem Ergebnis, dass der Auftragnehmer alle wesentlichen Indikatoren aufgeführt hat, die die vom Endlager ausgehenden Konsequenzen und das Eintreten dieser Konsequenzen betreffen. Kritisiert wurden die fehlende Definition und Systematik zur Einordnung der Indikatoren und die fehlende Stringenz bei der Anwendung der Begriffe.

Es wird empfohlen, die im Bericht auf der Basis der Auswertung von verschiedenen nationalen und internationalen Sicherheitsanalysen zusammengestellten Indikatoren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf das Wirtsgestein Salz zu überprüfen und ggf. zu ergänzen. Die vorliegenden üblichen Indikatoren beschreiben das Maß der Freisetzung von potenziell gefährlichen Stoffen (z. B. Radionuklidflüsse) und ihre Einwirkung auf das Schutzgut (Dosis, Risiko). Für die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers ohne Freisetzung im Szenario der erwarteten Entwicklung sind sie ungeeignet.

Indikatoren gliedern sich in performance und safety indicators (Sicherheitsindikatoren). Geeignete Sicherheitsindikatoren sind nach Auffassung der Arbeitsgruppe in Übereinstimmung mit JONES, WIBORGH & ANDERSSON (2004) vor allem Konzentrationen in den Umweltmedien, Dosis und Risiko.

Ausführlich wurde in der Arbeitsgruppe über die Frage der Vermittelbarkeit von Indikatoren als Kriterium für ihre Anwendbarkeit diskutiert. Festgestellt wurde, dass aus naturwissenschaftlicher Sicht jene Indikatoren verwendet werden müssen, die relevant und notwendig sind und nicht jene, die sich besonders gut kommunizieren lassen. Um die Vermittelbarkeit zu verbessern, müssen Formen für ihre Kommunikation gefunden werden.

Nicht abschließend geklärt wurde die Frage nach der Anwendbarkeit von Sicherheitsindikatoren für den Vergleich von spezifischen Standorten. Die Arbeitsgruppe einigte sich auf folgende Aussage:

Generell sind Sicherheitsindikatoren auch zum Vergleich von Endlagersystemen geeignet, jedoch bedürfen die Ergebnisse einer Bewertung. Ein reiner Vergleich von quantitativen Indikator-Werten ist nicht zulässig. Die Bewertung muss v. a. konzeptionelle, standortspezifische und ggf. modellspezifische Besonderheiten der zu vergleichenden Endlagersysteme berücksichtigen.

## 3.2 ERGEBNISSE DER ARBEITSGRUPPE 2 EINZELASPEKTE

In der von den Herren Dr. Wolfgang Wurtinger (ISTec) und Wolfgang Neumann (Gruppe Ökologie) geleiteten Arbeitsgruppe 2 wurden Einzelaspekte zu folgenden Themen diskutiert:

- **Geochemische Prozesse** bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle
- Ermittlung von Art und Menge **chemotoxischer Stoffe** in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes
- Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**Gasbildung**)
- Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle (**Kritikalität**)

### 3.2.1 Geochemische Prozesse

#### Kernaussagen der Reviewer

##### Review 1

Es fehlt ein eigenes Kapitel, in dem eine kritische und distanzierte Bewertung der großen Datenmenge des 2. Teils des Berichts gegeben wird. Im Kapitel „Methoden für die Bewertung der Daten“ wird nur auf Kriterien anderer Organisationen für deren Datenbanken relativ pauschal hingewiesen. Eine Darstellung der eigenen kritischen Bewertungsarbeit des Auftragnehmers findet sich hier nicht. Im Unterkapitel „Unsicherheiten“ wird lediglich ein sehr knapp gehaltenes Beispiel für Unsicherheiten bei Löslichkeitsmessungen gegeben.

Somit liegt keine abgesicherte und belastbare thermodynamische Datengrundlage zur geochemischen Modellierung vor. Die Ergebnisse von Modellrechnungen können ohne Angabe von Messunsicherheiten der verwendeten Daten nicht sinnvoll bewertet werden. Bei großer Unsicherheit der Daten sind nahezu keine Vorhersagen mehr möglich.

##### Review 2

Die Aussagen des Berichts zur geochemischen Modellierung und thermodynamischen Datenbasis sind umfassend und korrekt. Die wissenschaftliche Begründung des Auftragnehmers für weiterführende Arbeiten ist weitgehend nachvollziehbar. Die Einsetzbarkeit der geochemischen Datenbasis für den Langzeitsicherheitsnachweis ist jedoch aufgrund von Datenlücken und fehlender Quantifizierung der Daten beschränkt. Ein Bezug zur derzeitigen Praxis in den Sicherheitsanalysen fehlt im Abschlussbericht.

Detaillierte geochemische Informationen ermöglichen die realitätsnahe Modellierung von Migrationsprozessen, vor allem von retardierenden (verzögernden) Prozessen, und führen zu einem Abbau von Konservativitäten. Ihre Eignung als Basis grundlegender Entscheidungen (Formations- oder Standortauswahl) ist jedoch zweifelhaft.

Aussagen zur erreichbaren Verbesserung von Prognosegenauigkeit und –sicherheit fehlen. Eine Beurteilung der Aufwand-Nutzen-Relation ist nicht möglich.

Die Fragestellung ist keine sicherheitstechnische oder konzeptionelle Einzelfrage, sondern behandelt einen Aspekt der anwendungsbezogenen Grundlagenforschung zur Weiterentwicklung des Instrumentariums für Sicherheitsanalysen von Endlagersystemen in verschiedenen Wirtsgesteinen. Für Entscheidungen zu spezifischen Endlagerprojekten ist die Bearbeitung dieser Fragestellung nicht erforderlich.

## Ergebnisse

Die Arbeitsgruppe kam zu dem gemeinsam getragenen Ergebnis, dass die derzeit verfügbare thermodynamische Datenbasis für die Modellierung der chemisch-physikalischen Verhältnisse in einzelnen Teilsystemen eines Endlagers in verschiedenen geochemischen Milieus anwendbar ist. Aus Lücken, Inkonsistenzen und Datenunsicherheiten folgt eine unterschiedliche Belastbarkeit der Modellrechnungen. Der Auftragnehmer stellte dar, dass beispielsweise Löslichkeiten zurzeit selbst bei Vorliegen einer guten Datenbasis nur mit der Genauigkeit von etwa einer Größenordnung (Faktor 10) durch geochemische Modellierungen abgeschätzt werden können.

Die Arbeitsgruppe war sich allerdings auch darüber einig, dass eine zielgerichtete Arbeit zur Verbesserung der thermodynamischen Datenbasis notwendig ist und voraussetzt, dass der Stellenwert geochemischer Modellierungen, Genauigkeitsanforderungen sowie Priorität des Entwicklungsbedarfs an Hand von Sicherheitsanforderungen, konzeptionellen Vorgaben sowie Sensitivitätsanalysen festgelegt wird. Dies ist an Hand von generischen Vorstellungen zu einem Endlager nur sehr begrenzt möglich.

Für die Verwendung in Sicherheitsnachweisen ist es erforderlich, die Genauigkeit der geochemischen Daten zu quantifizieren. Dies muss mit anerkannten Methoden überprüfbar sein. Es konnte auf dem Workshop nicht ausdiskutiert werden, wie die Genauigkeitsanforderungen festgelegt werden sollen. Es kam der Hinweis, dass der Arbeitskreis Thermodynamische Standarddatenbank einen Vorschlag zur Weiterentwicklung der thermodynamischen Datenbasis unterbreitet hat.

Aus den aufgeführten Gründen konnte in der Arbeitsgruppe keine Einigung über die Zweckmäßigkeit der vom Auftragnehmer in seinem Gutachten aufgeführten Arbeiten zur Verbesserung der thermodynamischen Datenbasis erzielt werden.

## 3.2.2 Chemotoxische Stoffe

### Kernaussagen der Reviewer

#### Review 1

Die Untersuchung beantwortet die Frage insofern ausreichend, dass vermutlich alle anfallenden Abfallstoffe und -bestandteile Berücksichtigung fanden. Die extreme Genauigkeit der Angaben im Bericht ist aufgrund der keinesfalls genau bekannten Zusammensetzung der zukünftig anfallenden Abfälle äußerst fraglich. Die

Angaben von Bandbreiten und eine gewisse Empfindlichkeitsanalyse wären zielführender, als eine Betrachtungsweise mit scheinbarer Genauigkeit.

Die verallgemeinerte und übertrieben konservative Herangehensweise bei der Berechnung der entstehenden Konzentrationen im Grundwasser und bei der Verwendung von Prüfwerten lässt keine Bewertung zu, ob und welche Gesteinsformation als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle zu bevorzugen ist. Dies wurde auch im Bericht so dargelegt.

Um zu entsprechenden Schlussfolgerungen zu kommen, sind detailliertere Betrachtungen unter der Berücksichtigung realer Bedingungen erforderlich. So sind z. B. Sorptions-, Umlöse-, Abbauprozesse und reale Löslichkeiten (Löslichkeitsprodukte) in Abhängigkeit der zu erwartenden chemischen Verbindungen in den Basis- und Versatzmaterialien (Beton, Metalle im Vergleich zu leicht löslichen Salzen) stärker zu berücksichtigen. Wie in den Schlussfolgerungen des Berichts bereits angemerkt, sind die hydrogeologischen Randbedingungen konkreter Standorte von großer Bedeutung, z. B. sollte die reale Zusammensetzung der Tiefen-/Grundwässer in der Umgebung der betrachteten Wirtsgesteine einbezogen werden, wie auch die vorgesehene Endlagertiefe und mögliche Verbindungen zu Grundwasserleitern, die potenziell der Trinkwassergewinnung zur Verfügung stehen.

Bei der Bewertung der Grundwassergefährdung für ein Endlager in tiefen Schichten im Hinblick auf das Schutzziel des WHG sollten die konkreten Definitionen und Randbedingungen sowie vor allem auch die Gültigkeitsbereiche der relevanten Gesetze und Regelwerke nicht außer Acht gelassen werden. Eine spezielle Anwendbarkeit auf eine Endlagerung in tiefen geologischen Schichten ist national und auch international bisher nicht ableitbar. Hierbei spielt auch eine vergleichende Betrachtung mit Endlagerkriterien für Deponien chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Formationen eine besondere Rolle, um eine Angemessenheit der Konsequenzenabschätzung im Blickwinkel zu behalten.

Die Aspekte der chemotoxischen Problematik bei der tiefen Endlagerung radioaktiver Abfälle stellen nach wie vor ein Thema von hoher Relevanz dar. Ansatzpunkte zu der Beantwortung dieser Fragestellung sollten sich auch aus Erfahrungen anderer Länder ableiten lassen.

## Review 2

Vor dem Hintergrund, dass für zukünftige Endlager der Nachweis des sicheren Einschlusses als planmäßige Entwicklung geführt werden wird, wird in Frage gestellt, ob es für die Errichtung und den Betrieb eines zukünftigen Endlagers generell einer wasserrechtlichen Erlaubnis bedarf. Nur für den Fall, dass der Nachweis des sicheren Einschlusses durch standortspezifische Rahmenbedingungen nicht erbracht werden kann, ist eine Freisetzung von chemotoxischen Stoffen zu berücksichtigen. Erst dann ist zu prüfen, ob eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu besorgen ist.

Die Untersuchung unterstellt unabhängig von der o. g. Nachweisführung die sehr unwahrscheinliche Freisetzung der chemotoxischen Stoffe in die Biosphäre und bewertet diese hinsichtlich der Einhaltung auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes.

Der Auftragnehmer hat das chemotoxische Inventar für die Abfälle ermittelt und um die chemotoxischen Bestandteile der Versatzmaterialien ergänzt. Da für die jeweiligen Bestandteile von Abfall, Abfallbehälter, Fixierungsmitteln, Verfüllmaterialien und Versatzmaterialien keine Stoffvektoren bzw. chemischen Analysen vorliegen, können die vom Auftragnehmer ermittelten Massen der Materialien, Komponenten und Elemente nicht lückenlos nachvollzogen werden. Die Ergebnisse der Erfassung des Masseninventars scheinen aber plausibel.

Die der Untersuchung zugrunde liegenden Annahmen sind äußerst konservativ und nicht realistisch. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Konzentration der chemotoxischen Stoffe im oberflächennahen

Grundwasser unter realistischen Annahmen erheblich geringer sein wird und eine Gefährdung des Grundwassers nicht zu besorgen ist.

Eine generelle verbindliche Aussage hinsichtlich der erforderlichen Verdünnung lässt sich für ein generisches Endlager ohne Kenntnisse der standortspezifischen Eigenschaften nicht treffen.

## Ergebnisse

In der Arbeitsgruppe wurde Einigkeit darüber erreicht, dass das Inventar chemotoxischer Stoffe vom Auftragnehmer umfassend und ausreichend beschrieben wurde. Es konnte keine Einigung darüber erzielt werden, ob insbesondere für heterogen zusammengesetzte radioaktive Abfälle aus Forschungseinrichtungen und Landessammelstellen Bandbreiten für die Mengenangaben erforderlich sind. Zur Vermeidung von Unsicherheiten bei der Inventarsermittlung gilt dies speziell für diejenigen Schadstoffe, die wasserrechtlich bedeutsam sind und zu nachteiligen Auswirkungen auf das Grundwasser führen können. Hierüber muss an Hand der Möglichkeiten entschieden werden, derartige Stoffe zu erfassen.

Die Zweckmäßigkeit und Konservativität des gewählten Ansatzes zur Klärung der Frage, ob eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers durch das Endlager zu besorgen ist, wurde kontrovers diskutiert. Für eine Einlagerung in vom Konzept her dichten Wirtsgesteinen - z. B. Steinsalz - wurde die Methode nur dann als sinnvoll angesehen, wenn eine Freisetzung von Schadstoffen nicht ausgeschlossen ist. Kann der sichere Einschluss nachgewiesen werden, sind vertiefte Betrachtungen zur Gefährdung des Grundwasser und damit Rechnungen zur Ausbreitung von Schadstoffen aus dem Endlager nicht erforderlich. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss dann ausschließlich auf die Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgerichtet sein.

Es konnte keine Einigkeit erzielt werden, ob der gewählte Ansatz, die Anwesenheit der restlichen Stoffe im Lösungsvolumen bei der Berechnung der maximalen Konzentration eines chemotoxischen Stoffes zu vernachlässigen, in allen Fällen konservativ ist. Von einigen Teilnehmern wurde darauf hingewiesen, dass je nach betrachtetem Milieu löslichkeitserhöhende oder löslichkeitsmindernde Effekte zu berücksichtigen sind. In der Summe wurde der gewählte Ansatz jedoch als konservativ eingeschätzt.

Obwohl die Verwendung der gewählten Grenz- und Prüfwerte als Bewertungsmaßstab nicht unumstritten war, bestand Konsens darüber, dass derzeit keine besseren Maßstäbe vorliegen. Allerdings sind diese Maßstäbe nicht für die speziellen Verhältnisse eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen aufgestellt worden. Hier empfahlen die Teilnehmer der Arbeitsgruppe endlagerspezifische Regelungen zu schaffen.

### 3.2.3 Gasbildung

#### Kernaussagen der Reviewer

##### Gemeinsames Review 1 und 2

Der Bericht stellt die Mechanismen der Gasentwicklung in einem Endlager, ihrer wesentlichen Einflussgrößen sowie ihrer Auswirkungen im Nahfeld und im Wirtsgestein, wie sie in einer Sicherheitsanalyse ermittelt werden, umfassend zusammen. Der Vergleich der vier im Gutachten betrachteten Wirtsgesteinstypen ergibt keine prinzipiellen Vorteile hinsichtlich eines der drei genannten Nachweiskonzepte. Standortspezifische Eigenschaften und Einflussgrößen, die hier nicht berücksichtigt werden konnten, lassen allerdings eine Ver-

allgemeinerung der Ergebnisse nur in Grenzen zu. Sie ersetzen in keinem Fall eine Sicherheitsanalyse der Nachbetriebsphase mit der Gasthematik als integralem Bestandteil.

Die Modellierung der Gasbildung muss integraler Bestandteil der Sicherheitsanalysen sein. Hierfür muss die Gasbildung in möglichst realistischer Bandbreite berücksichtigt werden. Dabei sind galvanische Korrosion und die mikrobiell induzierte Korrosion zusätzlich zu den im Gutachten erwähnten Gasbildungsmechanismen zu berücksichtigen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein umfangreiches Instrumentarium zur Ermittlung und Bewertung der Gasbildung vorliegt. Ergänzungen und Verbesserungen sind möglich und zum Teil nötig.

Für alle Wirtsgesteine, die über einen messbaren, primären Porenraumanteil und eine durch den silikatischen Mineralaufbau geprägte Wasseraffinität verfügen (Ton/Tonstein, Kristallingestein und andere Sedimentgesteine unter Tonabdeckung), kann der Nachweis über eine Zweiphasenflussmodellierung, wie im Gutachten ausgeführt, als zutreffend und erprobt angesehen werden. Für die Bildung einer sekundären Porosität in dichten Wirtsgesteinen sind noch weitere Nachweise zu erbringen.

Die Modellierung des Geosystems des Endlagers sollte nach dem gleichen Kenntnisstand der geowissenschaftlichen Abbildungsgenauigkeit betrieben werden wie im Fall der Modellierung von Rohstofflagerstätten – d. h. unter Anwendung modernster geostatistischer Inter- und Extrapolationsmethoden.

Die Nachweisführung wird erleichtert, wenn die stark gasentwickelnden Abfälle von denen mit geringer Gasentwicklung so getrennt endgelagert werden, dass das vorzuhaltende Speichervolumen im Endlager an die Abfälle angepasst werden kann.

## Ergebnisse

Einigkeit bestand bei den Teilnehmern des Workshops, dass die wesentlichen Gasbildungsmechanismen vom Auftragnehmer dargestellt sind. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Annahme hoher Gasbildungsraten in Sicherheitsanalysen nicht konservativ sein muss. Gasbildungsraten sind deshalb standortspezifisch und systemspezifisch zu bestimmen und ihre mögliche Verteilungsfunktion ist zu berücksichtigen. Wie genau das erfolgen soll, hängt von der Sensitivität der Sicherheitsanalysen und den Nachweiszielen ab.

Das vom Auftragnehmer vorgeschlagene Nachweiskonzept wird generell für alle geologischen Verhältnisse als durchführbar angesehen. Allerdings ist die Bildung von sekundären Porositäten im Wirtsgestein des Endlagers durch den Gasdruck, insbesondere im Salz, noch Gegenstand der Forschung. Auch ist noch nicht abgesichert, wie Makrorisse, die den gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich durchschlagen, zuverlässig ausgeschlossen werden können. Es wurde darauf hingewiesen, dass die bislang vorliegenden Forschungsergebnisse aber sehr viel versprechend seien. Unter diesen Umständen wird auch der Nachweis für ein definiertes Abströmen von Gas aus einem Endlager im Salinar über Makrorisse als möglich angesehen.

Aufgrund der begrenzten Zeit konnten die folgenden Fragen der Arbeitsgruppe nicht mehr diskutiert werden:

Welche Sicherheitsrelevanz haben nach Verschluss des Endlagers explosionsfähige Gasgemische bei menschlichen Einwirkungen?

Sind alle Maßnahmen zur Optimierung des Einlagerungskonzeptes genannt?

Sind die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Behälterauswahl und für die Abfallkonditionierung realisierbar?

## 3.2.4 Kritikalität

### Kernaussagen der Reviewer

#### Review 1

Der Endbericht des Auftragnehmers wird insgesamt als fundierte Arbeit bewertet. Die Kommentare zielen auf die Vervollständigung der zugrunde gelegten Bedingungen für die Endlagerung der ausgedienten Brennstoffe sowie auf die Verbesserung der Nachvollziehbarkeit der Schlussfolgerungen. Insbesondere sollte die gesamte Bandbreite der zu erwartenden Brennstoffparameter berücksichtigt werden. Des Weiteren sollte auch die direkte Endlagerung von unzerlegten Brennelementen in den Analysen berücksichtigt werden.

Der Ausschluss von Szenarien wie gebirgsdruckbedingte Aufweitung der Abstände zwischen den Brennstäben, Akkumulation mehrerer Behälterinventare, korrosionsbedingter Abtransport des Hüllrohrmaterials ohne Brennstoff sowie selektive Sorption von Plutonium sollte unter Angabe der herangezogenen technisch-wissenschaftlichen Randbedingungen und deren Gültigkeitsbereich explizit begründet werden. Sofern Szenarien für ein Wirtsgestein (z. B. Salz) ganz entfallen können, sollte dies angegeben werden. Aussagen wie „es ist fraglich, ob ein Szenario überhaupt möglich ist“ oder „das Szenario dürfte hypothetisch sein“ sollten präzisiert werden. Die als Vorsorgemaßnahmen vorzusehenden Vorkehrungen gegen Kritikalität sollten explizit und gesondert zusammengestellt werden.

Der Ansatz, die Auswirkungen einer Kritikalität über das sich einstellende Temperaturniveau zu bewerten, wird als zielführend bewertet. Probabilistische Kritikalitätsanalysen sollten ggf. als Ergänzung, jedoch nicht als Alternative zu dem deterministischen Ansatz, herangezogen werden.

#### Review 2

Der Endbericht des Auftragnehmers stellt eine wertvolle und umfangreiche Grundlage dar, aus der ersichtlich wird, dass Unterschiede bzgl. der Endlagerung in Ton- und Granitgestein nicht signifikant sind. Die Endlagerung in Salzgestein bietet sicher einen Vorteil wegen des hohen Neutronen-Absorptionsquerschnittes von Chlor. Lagerstäbe können unter den vorgegebenen Randbedingungen nicht kritikalitätssicher endgelagert werden.

An offenen Punkten werden gesehen:

- Einbeziehung axialer und radialer Abbrandprofile der abgebrannten Brennelemente
- Betrachtung von Zwischenzuständen, wie Mischung von Brennstäben und Spaltstoffbruchstücken
- Betrachtung von Brennstab-Hohlräumen
- Untersuchungen zu den Auswirkungen des Brennstab-Innendrucks auf die Einhaltung der Zylindergeometrie
- Abdeckende Untersuchungen bzgl. der Entstehung von Uranmineralien
- Vertiefung der Analysen zur selektiven Plutonium-Adsorption.

## Ergebnisse

Einvernehmen bestand bei den Teilnehmern der Arbeitsgruppe, dass das Gutachten nachvollziehbar darstellt, unter welchen Bedingungen kritische Anordnungen ausgeschlossen werden können. Dies gilt für alle Wirtsgesteine. Qualitative Unterschiede zwischen den Wirtsgesteinen bestehen nicht. Unabhängig von den möglichen Auswirkungen sind Endlager so auszulegen, dass für alle zu unterstellenden Szenarien keine Kritikalität eintritt. Neben der deterministischen Analyse der Kritikalitätsszenarien ist flankierend die Entwicklung von probabilistischen Methoden zur Analyse sinnvoll. Dies kann auch dazu beitragen, dass die von den Teilnehmern geforderte bessere Nachvollziehbarkeit der Szenarien – insbesondere für den Ausschluss von Szenarien – erhöht wird. Hierzu laufen Untersuchungen.

Wenngleich nicht erwartet wird, dass hieraus für die Kritikalität relevante Szenarien folgen, sollten folgende Einflüsse zusätzlich betrachtet werden: Der Einfluss des hohen Gasdrucks in den Hüllrohren für eine Aufweitung der Lageranordnung, die Oxidation von Zirkaloy, die Bildung von Säuren und die Gasbildung im Endlager.

Obwohl eine kritische Anordnung mit hoher Zuverlässigkeit vermieden wird, wurde diskutiert, ob die Folgen einer Kritikalität als zusätzliche Absicherung untersucht werden sollen. Diese Diskussion sollte unter Berücksichtigung der Vorgehensweise bei Anlagen des Brennstoffkreislaufs entschieden werden. Konsens bestand darüber, dass ein hoher Aufwand für die Abschätzung der Folgen einer rein hypothetischen Kritikalität nicht gerechtfertigt ist.

### 3.3 ERGEBNISSE DER ARBEITSGRUPPE 3 KONZEPTIONELLE GRUNDSATZFRAGEN

In der von den Herren Michael Sailer (Vorsitzender RSK, Öko-Institut) und Dr. Manfred Wallner (BGR) geleiteten Arbeitsgruppe 3 wurden folgende Grundsatzaspekte diskutiert:

- Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit (**Menschliche Einwirkungen**),
- Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele (**Mehrbarrierenkonzept**),
- Untersuchung der Möglichkeit und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager (**Rückholbarkeit**),
- Internationale Kernmaterialüberwachung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in relevanten geologischen Formationen in Deutschland (**Safeguards**).

#### 3.3.1 Menschliche Einwirkungen

##### Kernaussagen der Reviewer

###### Review 1

Es wird der Einschätzung des Auftragnehmers gefolgt, dass die Bevölkerung am Endlagerstandort als entscheidende Referenzgruppe heranzuziehen ist. Die Untersuchung verlässt aber diesen Ansatz, weil sie nicht

alle Typen menschlichen Eindringens systematisch diskutiert. Die Auseinandersetzung mit technischen Unfällen und Katastrophen zeigt, dass neben absichtlichem und unbeabsichtigtem ein dritter Typ menschlichen Eindringens, das unabsichtlich-absichtliche Eindringen, insbesondere im Hinblick auf die Vertretung des Themas in der Öffentlichkeit, zu betrachten ist. Dieser Handlungstyp kommt zum Beispiel bei Akteuren vor, die meinen, alle Probleme zu kennen und mit ihnen umgehen zu können, sich dabei jedoch irren. Solche Handlungsweisen werden bei der Aufklärung der Schadensursachen häufig unter dem Begriff Menschliches Versagen geführt. Es wird vorgeschlagen, die mit dem menschlichen Eindringen verbundenen Aspekte systematisch in ihre Komponenten zu zerlegen, diese zu diskutieren und erst dann Wichtige von Unwichtigen zu scheiden.

Die Kennzeichnung des Endlagers und die Datenarchivierung über das Endlager sind notwendig. Allerdings bestehen Zweifel an der Argumentation des Auftragnehmers, dass die Sicherung von Wissen über extrem lange Zeiträume von mehreren tausend bis mehreren zehn- oder hunderttausend Jahren organisiert werden kann und dass dadurch Eintrittswahrscheinlichkeiten für möglichst zu vermeidende Ereignisse reduziert werden können. Die Rolle von Maßnahmen zur Reduzierung der Relevanz der Szenarien des menschlichen Eindringens kann nicht entscheidungstheoretisch vorbestimmt werden, sondern sollte das Ergebnis eines dialogischen und deliberativen Prozesses sein, in dem sich über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Maßnahmen zu verständigen ist.

## Review 2

Es wird angemerkt, dass vor dem Hintergrund der tatsächlichen Entwicklung und den möglichen Varianten Prognosen zu zukünftigen gesellschaftlichen Strukturen und technischen Entwicklungen mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sind. Die standortunabhängige Untersuchung der Fragestellungen macht es erforderlich, eine Reihe von Annahmen zu treffen. Im Fall der standortspezifischen Beurteilung kann dies zu anderen Ergebnissen führen, als die Bewertung der untersuchten Geosysteme und Referenzszenarien es erwarten lassen. Sollen Empfehlungen für die Standortauswahl unter dem Aspekt des menschlichen Eindringens abgeleitet werden, so sind sie aufgrund der hohen Unsicherheiten in der menschlichen bzw. gesellschaftlichen Entwicklung von wesentlich geringerer Wertigkeit als besser prognostizierbare geologische und klimatische Einwirkungen oder technische Abläufe.

Die getroffenen Annahmen für die Referenzszenarien sind nachvollziehbar, die Rahmenbedingungen jedoch beliebig veränderbar. Darüber hinaus ist auch die Betrachtung eines beabsichtigten kriminellen oder terroristischen Eindringens in das Endlager oder des Eindringens während chaotisch-gesellschaftlicher Zustände notwendig.

Die Einführung der Relevanz als Maß für die Kombination aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit wird für die Bewertung als hilfreich angesehen. Die im Bericht vorgenommene Bewertung verdeutlicht, dass Szenarien zum menschlichen Eindringen hinsichtlich der Bewertungskriterien für eine Standortauswahl keine ausschlaggebende Bedeutung haben. Insbesondere verlieren die häufig diskutierten Kriterien hinsichtlich Meidung von Ressourcen (z. B. Salzgewinnung, Nutzung der Erdwärme) an Bedeutung. Das Design des Endlagers und die Kennzeichnung des Endlagers sowie die Archivierung der Daten über das Endlager sind im Hinblick auf den Aspekt menschlichen Eindringens wichtiger.

## Ergebnisse

Die Arbeitsgruppe war sich einig, dass die Festlegung abdeckender Szenarien für alle denkbaren Möglichkeiten menschlicher Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle nicht möglich ist. Aus diesem Grunde sind regulatorische Vorgaben für die Definition und Auswahl von so genannten Schlüsselszenarien erforderlich. Ihre Auswahl muss durch ein systematisches, wissenschaftlich begleitetes Vorgehen begründet

sein und in einem transparenten Prozess mit Interessensvertretern erarbeitet werden. Nach Auffassung der Arbeitsgruppe liefert der Abschlussbericht eine ausreichende Basis, um in einem späteren Iterationsprozess die zu unterstellenden Szenarien festzulegen.

Absichtliches menschliches Eindringen und Terroranschläge können nicht verhindert werden. Nach internationaler Auffassung braucht beabsichtigtes menschliches Eindringen und Terrorismus derzeit nicht betrachtet zu werden. Dennoch stimmte die Arbeitsgruppe vor dem Hintergrund der Terroranschläge der letzten Zeit darin überein, dass hier ein Paradigmenwechsel notwendig sein könnte, der im weiteren Iterationsprozess noch zu diskutieren ist.

Ein Vergleich der Wirtsgesteine unter dem Gesichtspunkt menschlicher Einwirkungen ist nach Meinung der Arbeitsgruppe auf der Grundlage noch zu schaffender regulatorischer Vorgaben möglich. Die Abschätzung der Konsequenzen (Dosis, Risiko) ist jedoch von den Verhältnissen am Standort abhängig und daher generisch nicht möglich. Die Bedeutung der Szenarien des menschlichen Eindringens für den Vergleich der Wirtsgesteine untereinander hält die Arbeitsgruppe für nicht so hoch wie die Bedeutung anderer Szenarien. Die Bedeutung der Nutzung des Untergrundes zur Gewinnung von Rohstoffen oder für andere Zwecke ist jedoch zu beachten.

### **3.3.2 Mehrbarrierenkonzept**

#### **Kernaussagen der Reviewer**

##### **Review 1**

Das für die geowissenschaftliche Bewertung der Geosysteme entwickelte Bewertungsschema erscheint geeignet, die mit den einzelnen Gesteinsformationen und ihrer Aggregation zu den Geosystemen verbundenen komplexen geowissenschaftlichen Sachverhalte übersichtlich zu präsentieren und in plausible relative Zuordnungen zu bringen. Das integrale Bild, das sich aus der geowissenschaftlichen Bewertung und im relativen Umfeld für den Geosystemtyp Salzdiapir ergibt, überrascht nicht. Trotz aller äußerer Methodik und Konsistenz in der gewählten Verfahrensweise entstehen jedoch Zweifel an der Verallgemeinerungsfähigkeit der Bewertungsaussagen. Verdeutlicht wird diese Aussage durch die Beurteilung von Salzdiapiren mit hinreichendem Volumen im Zentralbereich ohne Kaliflöze und Anhydritschollen, bzw. die Bewertung eines Salzdiapirs, der kein halokinetisches und dessen Umfeld kein epigenetisches Potenzial aufweist.

Der Bericht hebt pointiert hervor, dass eine Salzlagerstätte als Wirts- und zugleich Barrieregestein ohne zusätzlichen materiellen Schutz durch eine Ton-/Tonsteinbarriere den Anforderungen einer langzeitigen Funktionstüchtigkeit nicht oder nur relativ schlecht genügt. Im Grundsatz ist diese Einordnung unter dem Aspekt der Wasserlöslichkeit chloridischer Salzgesteine richtig. Andererseits ist ebenso richtig, dass sich auch Salzdiapirstrukturen grundlegend voneinander unterscheiden (z. B. Teufenlage des Salzspiegels, Innentektonik, zukünftige Entwicklung). Daher sind im standortbezogenen Umfeld die aus grundsätzlichen Überlegungen abgeleiteten / identifizierten Negative nicht immer auch in der aus einer generell abstrahierten Sicht postulierten Wirkung relevant. Daher überrascht es auch nicht, dass im Bericht bei der Auswertung der Sicherheitsanalysen unter dem Aspekt Redundanz der Barrierefunktion / Diversität / Unabhängigkeit festgestellt wird, dass eine geologische Barriere ohne eine eigentliche technische Barriere ausreicht. Unausgesprochen bleibt dabei der Bezug zur planmäßigen Entwicklung. Außerplanmäßige Entwicklungen können weitere Barrieren über das Salzgebirge hinaus erfordern. Es stellt sich die Frage, ob der im Bericht gewählte Verzicht auf Differenzierung zwischen planmäßiger und außerplanmäßiger Entwicklung eine auch der Varianz der Standortbedingungen gerecht werdende Bewertung ermöglichen kann.

Die zentralen Ergebnisaussagen des Berichts, dass die geowissenschaftliche Bewertung generell mit der sicherheitstechnischen Bewertung übereinstimmt und dass die Bewertung der Sicherheitsanalysen zeigt,

dass für alle untersuchten Geosystemtypen Endlagerkonzepte entwickelt werden können, relativieren offensichtlich die Ergebnisse der nur geowissenschaftlichen Bewertung von Geosystemen in der vom Gutachter vorgeschlagenen Form. Grund hierfür ist der präzisere Ansatz der Bedeutung der Barrieren im Einzelfall im Rahmen der Sicherheitsanalysen, insbesondere, wenn sie sich auf konkrete Standorte beziehen.

Der Ansatz der methodischen Verknüpfung der verschiedenen barrierefunktions-relevanten Eigenschaften ist auf den ersten Blick plausibel und nachvollziehbar. Er darf aber nicht den zweiten Blick auf die Notwendigkeit einer die eigentliche Beurteilung erst liefernden standortbezogenen ausgerichtetem sowohl geowissenschaftlichen wie auch sicherheitsanalytischen Bewertung verstellen. In diese standortbezogene Analyse sind dann die Eintrittswahrscheinlichkeiten der verschiedenen planmäßigen und außerplanmäßigen Entwicklungen hinsichtlich der Einhaltung der Schutzziele einzubeziehen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Gutachten sehr deutlich zeigt, dass generalisierende Analysen mit der Identifizierung, Charakterisierung und Gegenüberstellung von multibarrierensystem-relevanten Sachverhalten zwar hilfreich sind, zur Schulung der Sensitivität, bei der Aggregation und Verdichtung zu Bewertungen aber nicht die standortgebundenen Einzelfallanalysen ersetzen können.

## Review 2

Der Bericht liefert nach Ansicht eine gute Synthese zu den konzeptionellen Überlegungen beim Mehrbarrierensystem, den zugrunde gelegten Kriterien und Bewertungsmethoden und dem Wissensstand über Mehrbarrierensysteme. Es wird auch eine gute Synthese der Konzeptionen anderer kernenergienutzender Länder vorgelegt. Er enthält eine saubere Ausarbeitung der Vorzüge und Schwächen der diversen betrachteten Optionen, eine Anwendung von relevanten Kriterien und die Wahl der richtigen Optionen sowie nachvollziehbare und plausible Ergebnisse. Die Unterscheidung zwischen geosystemarem und sicherheitsanalytischem Bewertungsansatz ist nachvollziehbar und richtig.

Der Bericht spricht die wichtigen Fragestellungen an und ist, was die Ausführungen des Endlagers nach dessen Verschluss angeht, somit im Wesentlichen vollständig. Leider wurden die Betriebsphase und die Übergangszeiträume bis zum vollständigen Einschluss der Abfälle nicht in diesen Auftrag integriert.

Obschon im Bericht an manchen Stellen richtig angesprochen, erfolgt keine systematische Ausleuchtung der Konsequenzen der Wechselwirkungen zwischen technischen Barrieren und Wirtsgestein auf die Umsetzung des Mehrbarrierensystems. Das Anlagendesign ist für die Sicherheit von ausschlaggebender Bedeutung und sollte viel stärker in die Überlegungen einfließen.

Die Struktur des Berichtes ist logisch und nachvollziehbar und über weite Strecken klar herausgearbeitet. Die einzelnen Bausteine werden gut aufgearbeitet und zusammengefasst. Der methodische Ansatz ist z. T. zu kompliziert (Abwägungskriterien mit Bewertung + Beurteilungsaspekte + Bewertungsstufen usw.). Der Wissensstand bezüglich Prozessen ist unterschiedlich, aber durch die Bewertungsmethode nicht erfasst. Die Bewertungen könnten etwas differenzierter erfolgen, z. B. mit Hilfe von hintereinander geschalteten Kriterien (Kaskaden: z. B. Löslichkeit des Wirtsgesteins, Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins).

Der Bericht ist eine gute Grundlage, auf der Entscheidungen gefällt werden können, welche Optionen weiter verfolgt werden sollen und welche nicht. Bisherige Programme sollten deswegen nicht aufgegeben werden, sofern sie hinreichende standortbezogene Sicherheiten nachweisen können. Es wird empfohlen, für hochaktiven Abfall die Optionen Salz, flache Lagerung, und Tonsteine weiter zu verfolgen und das Kristallin als Reserveoption beizubehalten; die Geosystem-Subtypen Tonstein + Wirtsgestein sollen aufgegeben werden. Weiterhin wird empfohlen, jene Gesteine auszuwählen, welche die Anforderungen an die Langzeitsicherheit am besten erfüllen und die technischen Systeme (EBS) erst danach zu definieren. Hier sind substantielle Sicherheitsgewinne zu erzielen.

Soll eine konkrete Umsetzung rasch erfolgen, wird empfohlen, ein klares Standortauswahlverfahren zu skizzieren, in dem auch bisher betrachtete Standorte evaluiert werden können.

## Ergebnisse

Zunächst wurde der Themenbereich Anforderungen an die Redundanz und Diversität geologischer Barrieren, Bedeutung (Definition) des Mehrbarrierensystems (einschlusswirksamer Gebirgsbereich) und Vorkommen geologischer Systeme/Standorte in Deutschland, die über zwei unabhängige geologische Barrieren verfügen, diskutiert. Als Ergebnis der Diskussion wurde von der Arbeitsgruppe folgendes festgestellt:

- Zu den Begrifflichkeiten (Definitionen) im Zusammenhang mit den Barriersystemen besteht Klärungsbedarf (z. B. Definition der Barriere als Sicherheitsfunktion).
- Die Aufgaben der Barrieren bestehen in dem Einschluss der Abfälle und in Beiträgen zur Einhaltung der Schutzziele. Dabei können den einzelnen Barrieren unterschiedliche Funktionen (Sicherheitsfunktionen) zugeordnet werden. Hierzu zählen Rückhaltung und Isolation z. B. durch hydraulische Widerstände oder Sorption, Schutz anderer Barrieren oder räumliche und zeitliche Dispersion bzw. Verdünnung. Zum letzten Punkt bestand keine einheitliche Auffassung der Arbeitsgruppe.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich, wie er vom AkEnd definiert wurde, ist Kernstück der geologischen Barriere, die in sich noch wie ein Zwiebelschalenmodell gegliedert sein kann.
- Ein weiteres wesentliches Element ist der Schachtverschluss als zur geologischen Barriere parallel geschaltete geotechnische Barriere.
- Zu untersuchen sind neben der Normalentwicklung der Endlagersysteme auch deren gestörte bzw. außergewöhnliche Entwicklungen bei unterschiedlicher Gewichtung. Entwicklungen außerhalb der Normalentwicklung sind standortabhängig.

Der zweite Schwerpunkt der Diskussion betraf die Anwendbarkeit von Bewertungen und Bewertungskriterien, die Bedeutung der Sicherheitskriterien gegenüber den Standortauswahlkriterien, die Auswahl der gestörten Entwicklungen und die vollständige Behandlung der in Deutschland vorhandenen typischen Geosystemtypen. Hierzu stellte die Arbeitsgruppe folgendes fest:

- Eine Bewertung von Geosystemen auf generischer Ebene kann nur qualitativ erfolgen, wobei der zeitlichen Entwicklung von Prozessen eine Schlüsselrolle zukommt.
- Auswahlkriterien können mögliche Standorte aufzeigen, haben aber einen Irrtumsvorbehalt und sind nicht geeignet, abschließend die Sicherheit eines Endlagers am ausgewählten Standort festzustellen. Sicherheitskriterien dagegen sind die Basis der Sicherheitsnachweisführung.
- Im Abschlussbericht zum o. a. Vorhaben ist die Subrosion (Auslaugung, unterirdische Verkarstung) von Salz bei flacher Lagerung nicht betrachtet worden, die Bewertung des Salztons (unlösliche Verunreinigung im Salz) ist zu überdenken. Zwischen Auftragnehmer und der Arbeitsgruppe bestanden unterschiedliche Auffassungen zur Behandlung von außergewöhnlichen Entwicklungen im Bericht im Hinblick auf ihre Gewichtung.

Den dritten Schwerpunkt der Diskussion bildeten die Fragen, ob die Notwendigkeit des Schutzes des Salzkörpers bei einem Endlager im Salz besteht und was aus den Ergebnissen des Berichtes für die konkrete Standortbewertung zu folgern ist. Hierzu kam die Arbeitsgruppe zu folgendem Ergebnis:

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss entsprechend der Definition des AkEnd nicht das gesamte Wirtsgestein umfassen. Die darüber hinaus vorhandenen Barrieren auch des Wirtsgesteins bieten zusätzlichen Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und werden positiv bewertet.
- Eine sicherheitliche Bewertung ist nur über eine standortspezifische Sicherheitsanalyse möglich.
- Kriterien zum Vergleich von Sicherheitsbewertungen für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sind nicht vorhanden und daher noch zu entwickeln.
- Der generische Vergleich von Geosystemen im Bericht zeigt die Möglichkeiten und Grenzen dieser Vorgehensweise auf und führt zu dem Schluss, dass ein belastbarer Vergleich nur für konkrete Standorte möglich ist.

### 3.3.3 Rückholbarkeit

#### Kernaussagen der Reviewer

##### Review 1

Rückholbarkeit ist die letzte Maßnahme, wenn ein Hinweis darauf vorliegt, dass das System gravierende Mängel hat und eine Sanierung notwendig ist. Zur Detektion eines Systemversagens ist eine Kontrollierbarkeit notwendige Voraussetzung und muss deshalb von vorn herein in das Endlagerdesign integriert werden. Eine Rückholung ist nur machbar und vertretbar, wenn die Position der Abfälle im Endlager bekannt ist, da nur dann die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigt werden. Die konzeptionellen und technischen Vorkehrungen für eine Rückholung von Abfällen werden im Bericht nur unvollständig zusammengestellt und sind zu sehr vom Konzept für das Wirtsgestein Salz geprägt.

In weiterer Verfolgung der Mehrbarrierenphilosophie ist eine Verfüllung nach Einlagerung zwingend. Daher ist ein Zugangsbergwerk für eine Rückholung immer erforderlich. Das Eingriffskonzept liefert dann die Entscheidungsgrundlage, ob und wo Rückholung erfolgen kann. Es wird ausführlich auf das in der Schweiz entwickelte Konzept (EKRA 2000) hingewiesen.

Die eigentliche Problematik ist die Kontrollierbarkeit der radioaktiven Abfälle unter Endlagerbedingungen und nicht ihre Rückholbarkeit.

Die Aussage im Bericht, dass alle konzipierten generischen Endlager mit Rückholbarkeitsoption zu jedem Zeitpunkt des Endlagerbetriebes eine Rückholung ermöglichen, wird für zu pauschal und zu optimistisch gehalten.

##### Review 2

Da eine zwingende Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Endlager in tiefen geologischen Formationen nicht begründet werden kann, bleibt die optionale Rückholbarkeit eine hinter dem Entsorgungsziel zurückstehende Zielsetzung. Daraus ergibt sich die Prämisse, dass die zur Rückholung der Abfälle erforderlichen technischen Maßnahmen keine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit nach sich ziehen dürfen.

Der vorgelegte Bericht beantwortet die grundsätzlichen Fragestellungen der optionalen Rückholbarkeit auf der Grundlage einer tiefgründigen Literaturrecherche. Obgleich mit dem Bericht noch keine vertiefenden Betrachtungen zu technologischen Konzepten der Rückholung und zu den Auslegungsgrundsätzen eines Endlagers mit Rückholbarkeitsoption vorliegen, gibt es auf Grundlage des Berichts keinen Zweifel daran, dass die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle zumindest für das Wirtsgestein Steinsalz in einem Zeitraum bis < 150 Jahre nach Abschluss der Einlagerung nach heutigem Stand der Technik möglich ist.

#### Ergebnisse

Hauptpunkte der Diskussion dieses Einzelvorhabens bildeten die Begründung für die Option Rückholbarkeit und der Zeitraum, für den eine Rückholung gewährleistet werden soll.

Auf der Basis der Diskussionen bewertete die Arbeitsgruppe den Sachstand in folgender Weise:

Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit und es muss unterschieden werden zwischen der Rückholung aus einem verschlossenen System (Endlager) und einem offenen System (Langzeitzwischenlager).

Als Gründe für die Rückholbarkeit sind die zwei Aspekte Ressourcengewinn und Rückholung aus Sicherheitsgründen angeführt worden. Die Rückholung zum Ressourcengewinn wird als plausibel angesehen. Die Rückholung aus Sicherheitsgründen ist in Frage zu stellen, da sie eine dauerhafte Überwachung des Endlagersystems voraussetzt.

Voraussetzung für eine zielgerichtete Rückholung ist eine umfassende Dokumentation über das Endlager (Was wurde wo und mit welcher Technik eingelagert usw.).

Oberster Grundsatz für die Planung der Rückholbarkeit ist, dass die Sicherheit des Endlagers an erster Stelle steht. Die Konzepte für die Rückholung müssen von den Endlagerkonzepten und -planungen ausgehen und hinsichtlich zeitlicher (z. B. Zeitfenster der Rückholung) und technologischer Aspekte definiert werden. Ob die Option der Rückholung ohne erheblichen Mehraufwand und ohne Verlust an Sicherheit möglich ist, blieb offen.

Der Bericht geht von einer Übertragung des Rückholbarkeitskonzeptes von Salz auf andere Wirtsgesteine aus. Dies hält die Arbeitsgruppe für fraglich. Weitere Rückholbarkeitskonzepte wurden nicht betrachtet.

### 3.3.4 Safeguards

#### Kernaussagen des Reviewer

##### Review

Dem deutschen Safeguards-Referenzkonzept liegt das deutsche Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Salz (steile Lagerung) zugrunde. Das Referenzkonzept stützt sich dabei auf spezifische Vorteile dieses Wirtsgesteins. So stellt z. B. mit 200 °C die Auslegungstemperatur eines Endlagers in Salz im Zusammenspiel mit der hohen Wärmeleitfähigkeit dieses Gesteins und seiner Kriechfähigkeit eine wesentliche Erschwernis für jegliche Abzweigung von eingelagertem Kernmaterial dar. Zwar ist eine Rückholung (und somit auch eine Abzweigung) des Materials technisch möglich, der maschinelle und zeitliche Aufwand ist aber sehr hoch. Hierdurch können solche Aktivitäten mit den vorgeschlagenen Maßnahmen der design information verification (DIV, Grubengebäudeverifikation) unter Tage sowie durch die Überwachung beider Schächte und ggf. der Abluft sicher entdeckt werden.

Eine Übertragung des Safeguards-Referenzkonzepts auf andere Wirtsgesteine ist prinzipiell möglich. Hierzu sind jedoch ausführlichere Überlegungen und Studien notwendig, die nur anhand von detaillierten, wirtsgesteinspezifischen Endlagerkonzepten möglich sind. Diese liegen für Deutschland noch nicht vor. Somit können Safeguards-Konzepte für andere Wirtsgesteine als Salz in steiler Lagerung gegenwärtig nicht erarbeitet werden. Die wesentlich niedrigere Auslegungstemperatur von 100 °C für Endlager im Kristallin oder in Tongesteinen, Eigenschaften dieser Wirtsgesteine sowie andere spezifische Gegebenheiten der Endlagerkonzepte, die andere Länder für diese Wirtsgesteine entwickelt haben, erleichtern eine Rückholung des Spaltmaterials, und somit eine potenzielle Abzweigung, erheblich. Dementsprechend ist bei diesen Wirtsgesteinen mit einem erheblich höheren technischen Aufwand für die Überwachung des Bergwerkes zu rechnen. Unabhängig vom Wirtsgestein geht eine rückholbare Endlagerung oder eine erleichterte Rückholbarkeit in jedem Falle mit einem deutlich höheren Aufwand an Safeguards-Maßnahmen einher.

## Ergebnisse

Bei den möglichen Safeguards-Konzepten war die Arbeitsgruppe der Auffassung, dass sich diese an jedes Endlagerkonzept anpassen lassen. Das Endlagerkonzept und ein eventuell zu berücksichtigendes Konzept zur Rückholbarkeit bestimmen jedoch den notwendigen Aufwand.

Die Grubengebäudeverifikation wird als Schlüsselaufgabe für die IAEA und den Betreiber des Endlagers angesehen.

Weiterhin kommt die Arbeitsgruppe zu dem Ergebnis, dass eine getrennte Lagerung von spaltbarem und nichtspaltbarem Material in einem Endlager die Safeguardsaufgabe vereinfacht.

## 4 BEWERTUNG

Um dem sich fortentwickelnden Stand von Wissenschaft und Technik bei der Endlagerplanung und Risikobewertung Rechnung zu tragen, wurde das BfS mit der Bearbeitung von 12 konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen vom BMU beauftragt. Basierend auf

- den durch die Auftragnehmer erarbeiteten Ergebnissen dieser vom BfS intensiv fachlich-wissenschaftlich begleiteten Einzelvorhaben (siehe Kap. 0),
- den zu jedem Einzelvorhaben durchgeführten Reviews (siehe Kap. 3) und

den Ergebnissen des vom BfS durchgeführten Workshops, auf dem die Ergebnisse der Einzelvorhaben einer fachkompetenten und pluralistisch zusammengesetzten Expertengruppe präsentiert und von ihr diskutiert wurden (siehe Kap. 3), sowie bisher vorliegenden Stellungnahmen von Teilnehmern des Workshops, hat das BfS eine Bewertung vorgenommen. Hierbei stand im Vordergrund, ob die Einzelfragen für unterschiedliche Wirtsgesteine verschieden zu beantworten sind und ob hieraus Vorgaben für ein Endlagerkonzept resultieren. Zusätzlich zu den Erfahrungen, die das BfS in Planfeststellungsverfahren für Endlager gewonnen hat, fließen die oben genannten Ergebnisse, mit denen das BfS aber nicht in jedem Fall übereinstimmt, in die Bewertung ein. Sonstige zugängliche Unterlagen, die nach der Fertigstellung der Einzelvorhaben erstellt wurden, werden hier nicht mehr berücksichtigt.

Zunächst erfolgt eine Darstellung der Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die im Kap. 1.2.2 dargestellten konkretisierenden Fragen und den erreichten und dokumentierten Stand von Wissenschaft und Technik. Es wird aus Sicht des BfS dargestellt, welche wesentlichen Antworten auf die Fragestellungen vorliegen, welche offenen Punkte verbleiben und welche Aspekte nicht technisch-wissenschaftlich, sondern nur regulatorisch gelöst werden können. Darüber hinaus werden in Kap. 4.13 Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen den Einzelfragen aufgezeigt und zusammenfassende Schlussfolgerungen aus der Bearbeitung der Einzelfragen gezogen.

### 4.1 NATURBEOBACHTUNGEN

Eine mögliche Schadstoffausbreitung aus einem Endlager wird von einer Vielzahl von Prozessen beeinflusst. Die Prozesse (z. B. Korrosion, Transport) laufen über Zeiträume ab, die durch Experimente nicht vollständig abgedeckt werden können. Hier kann die Einbeziehung natürlicher und anthropogener Analoga Schlussfolgerungen aus vergleichbaren in der Natur ablaufenden Prozessen erlauben und so das Vertrauen in die gewählte Vorgehensweise zur Abbildung der Prozesse im Endlager erhöhen. Für die sicherheitstechnische Bedeutung von natürlichen und/oder anthropogenen Analoga ergibt sich somit die Frage:

Welche Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher und/oder anthropogener Analoga für die Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung eines Endlagers sind gegeben?

Natürliche und anthropogene Analoga sind aus Sicht des BfS wesentlicher Teil der Validierung der in der Endlagerung verfolgten Konzepte und angewandten Modelle. Sie tragen zur Absicherung der Kenntnisse über Bedeutung und Wirkungsweise langzeitiger Prozesse bei. Ihre Anwendung ist notwendiger Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises, um das Vertrauen in die verfolgten Konzepte und angewandten Modelle zu rechtfertigen und zu erhöhen.

In der Vergangenheit wurden Analogstudien zu bestimmten Themenbereichen, wie z. B. geochemische Untersuchungen an Naturreaktoren, veröffentlicht. Mit dem Ansatz der prozessbezogenen Auswertung wird der Zugang zu Analogstudien vereinfacht, die im Rahmen der Bewertungen der Langzeitsicherheit von Endlagern zur Anwendung kommen können. Dieser Ansatz wird auch in anderen Ländern verfolgt, um eine benutzerfreundliche Datengrundlage für Analogstudien bereitzustellen.

Die Grenzen der Anwendung von Analoga liegen in den bei den meisten Prozessen nur qualitativen Aussagen und der oft eingeschränkten Übertragbarkeit auf die konkrete Anwendung. Die Anwendbarkeit von Analoga muss daher im Einzelfall geprüft werden. Obwohl der Nutzen von Analogstudien wegen der Komplexität der abzubildenden Vorgänge im Nah- und Fernfeld des Endlagers eingeschränkt ist, tragen Untersuchungen an Analoga zumindest zur Verbesserung des Prozessverständnisses bei.

Mit der Diskussion der Anwendungsmöglichkeiten von Analoga für die Entwicklung von Szenarien wird ein weiterer Nutzungsraum für Analoga eröffnet. In der Studie (GRUNDFELT & SMELLIE 2004) wird anschaulich gezeigt, wie Analogstudien zur Begründung detaillierter Annahmen bezüglich zu betrachtender Szenarien beitragen können.

Die vorliegende Studie (GRUNDFELT & SMELLIE 2004) liefert einen wesentlichen Beitrag zur anwendungsbezogenen Systematisierung der auf dem Gebiet der natürlichen/anthropogenen Analoga verfügbaren Grundlageninformationen. Es werden - ausgehend von den für die verschiedenen Wirtsgesteine charakteristischen Prozesssystemen - die bisher untersuchten Analoga einzelnen wirtsgesteinsspezifischen Prozessen zugeordnet. Somit bietet die vorliegende Studie eine wertvolle Grundlage um natürliche und anthropogene Analoga in weiteren standortspezifischen Verfahrensschritten zu integrieren.

Weitere generische, nicht standortspezifische Untersuchungen zu diesem Thema sind nicht zielführend, da über den grundsätzlichen Ablauf endlagerrelevanter Prozesse genügend Analog-Informationen vorliegen (CHAPMAN, MCKINLEY & SMELLIE 1984; MILLER et al., 1994, 2000). Diese umfassen zwar nur unvollständig Analoga für die im Wirtsgestein Steinsalz relevanten Prozesssysteme und Szenarien. Weitere Studien sollten aus Sicht des BfS erst auf der Basis konzeptioneller Vorgaben und standortspezifischer Sicherheitsanalysen initiiert werden.

Keinen Regelungsbedarf gibt es aus Sicht des BfS für die Anwendung von natürlichen und anthropogenen Analoga in Nachweisverfahren oder hinsichtlich genereller Anforderungen an die Übertragung von Analoga auf bestimmte Endlagerverhältnisse. Mit der allgemein üblichen Anforderung in Genehmigungsverfahren, dass die verwendeten Nachweismethoden und Berechnungsmodelle valide und vertrauenswürdig sein müssen, ergibt sich zwangsläufig, wann und in welchem Tiefgang natürliche/anthropogene Analoga zu untersuchen sind. Ein sinnvolles Schema für die spezielle Anwendung von Analoga im Rahmen der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers kann nur entwickelt werden, wenn die geowissenschaftlichen standortspezifischen Eigenschaften des Endlagerstandortes sowie das Endlagerkonzept bekannt sind. Deshalb und aufgrund der oftmals nicht bekannten physikalischen und chemischen Randbedingungen, den Problemen hinsichtlich der Übertragbarkeit eines Analogons auf einen speziellen Standort und den Schwierigkeiten in Bezug auf die Quantifizierung von Analoga erscheinen regulatorische Festlegungen nicht sinnvoll.

Neben dem o. a. Einsatz zur Modell- und Prozessvalidierung sieht das BfS mit Blick auf eine breite Öffentlichkeit die Notwendigkeit, Analoga als vertrauensbildende Maßnahme zur Verbesserung der Akzeptanz der Endlagerung in allgemeinen und speziellen Vorhaben einzusetzen.

## 4.2 MODELLRECHNUNGEN

Der Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers wird standort- und konzeptspezifisch u. a. mit Hilfe von Modellrechnungen geführt. Die Datenerhebung ist nicht fehlerfrei. Die Daten für den Langzeitsicherheitsnachweis weisen daher Unsicherheiten auf. Mit geostatistischen Methoden kann die Datenerhebung jedoch optimiert und die verbleibende Unsicherheit quantifiziert werden. Hierdurch werden die Voraussetzungen für die Angabe der Vertrauenswürdigkeit der Nachweise geschaffen.

Langzeitsicherheitsanalysen beinhalten Szenarien- und Konsequenzenanalysen. Die mit geostatistischen Methoden quantifizierten Unsicherheiten sind schließlich durch geeignete Verfahren bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Dabei können probabilistische Verfahren angepasster sein als

deterministische. Bevor die Szenarien definiert und Berechnungen durchgeführt werden können, muss zunächst die Frage geklärt werden:

Welche Zustände, Ereignisse und Prozesse zur Beschreibung der Entwicklung des Endlager-systems kommen für deutsche Verhältnisse in Frage?

Die FEP-Liste der OECD-NEA (NEA 1999) bildet auf generischer Ebene eine vollständige Basis dafür, welche Zustände, Ereignisse und Prozesse zu betrachten sind. Die in ihr enthaltenen FEP müssen jedoch formations- und konzeptspezifisch für die Verhältnisse eines Endlagers in Deutschland eingeschränkt bzw. erweitert werden. Einige Szenarien können bereits auf der Basis der Mindestanforderungen des AKEND (2002) ausgeschlossen werden. Von besonderer Bedeutung ist aus Sicht des BfS die Entwicklung eines Eiszeitszenariums für jene Standorte, für die im Betrachtungszeitraum der Langzeitsicherheitsanalyse eine hohe Wahrscheinlichkeit für glaziale Einwirkungen auf Teile des Geosystems zu unterstellen ist (z. B. Norddeutschland).

Hinsichtlich der Frage:

Wann (zeitlich und inhaltlich) und wie Analysen auf statistisch-stochastischer Grundlage angewendet werden sollen,

liefert die durchgeführte Studie (BRUNS et al. 2004) Beispiele, jedoch keine vollständige Entscheidungsgrundlage. Sowohl die Diskussion dieser Frage auf dem Workshop als auch die Erfahrungen des BfS in den bisher durchgeführten Erkundungs- und Genehmigungsverfahren zeigen, dass geostatistische Verfahren bereits planungs- und erkundungsbegleitend eingesetzt werden sollten. Der in BRUNS et al. (2004) untersuchte Bayessche Ansatz zur mathematischen Formalisierung der Informationsgewinnung und -fortschreibung ist dazu eine Möglichkeit.

Umfang und Vorteile des Einsatzes statistischer Verfahren in Sicherheitsanalysen für Genehmigungsverfahren sind von den jeweiligen Bedingungen (Endlagerkonzept, Parametersatz usw.) abhängig. Allgemeingültige Vorgaben für die Durchführung sind aus Sicht des BfS nicht sinnvoll. Die Arbeiten erfolgen nach § 9 Abs. 4 des Atomgesetzes nach Stand von Wissenschaft und Technik. Bereits heute stehen dafür erprobte und anerkannte Verfahren zu Verfügung. Ein Vergleich in BRUNS et al. (2004) zeigt, dass Monte-Carlo-Verfahren sinnvoll angewendet werden können, während die FAST-Methode für Endlager nicht praktikabel anwendbar ist.

Regulatorische Festlegungen (z. B. in Leitlinien), wie die Ergebnisse von probabilistischen Analysen zu bewerten sind, sollten jedoch getroffen werden. Dies betrifft Überschreitenswahrscheinlichkeiten und das geforderte Vertrauensintervall für die berechneten Sicherheitsindikatoren (z. B. Dosis, Risiko).

Auf der Basis der vorliegenden Studie und den Erfahrungen nationaler und internationaler Erkundungsprogramme und Genehmigungsverfahren vertritt das BfS übereinstimmend mit den Experten des durchgeführten Workshops die Auffassung, dass die Möglichkeiten der Anwendung von probabilistischen Sicherheitsanalysen vom generischen Standpunkt aus - so weit möglich - untersucht sind. Weitere generische Studien sind nicht zielführend.

### **4.3 ISOLATIONSPOTENZIAL UND NACHWEISZEITRAUM**

Die Untersuchung zu Zeiträumen, für die wirtsgesteinsübergreifend begründete geowissenschaftliche Prognosen erfolgen können, soll die fachliche Grundlage verbreitern, um den Isolationszeitraum, d. h. den Zeitraum, für den im Rahmen des formalen Genehmigungsverfahrens die Langzeitsicherheit nachgewiesen werden muss, festzulegen. Bisher enthalten die deutschen gesetzlichen Regelungen und Sicherheitskriterien - abgesehen von einer gemeinsamen Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission aus dem Jahr 1988 (RSK 1988) - für die Endlagerung radioaktiver Abfälle keine allgemein gültigen Festlegungen über zulässige Beschränkungen von Nachweiszeiträumen.

Sowohl für den Vergleich von Standorten (AKEND 2002) als auch für Genehmigungsverfahren (BALTES et al. 2002) stellt der Zeitraum, für den die geologische Entwicklung eines Endlagerstandortes und seiner Umgebung prognostizierbar ist, jedoch eine Bewertungsgröße dar. Heute (AKEND 2002, BALTES et al. 2002) werden im Gegensatz zu der gemeinsamen Stellungnahme der RSK und SSK (RSK 1988) nicht mehr Betrachtungszeiträume von 10.000 Jahren, sondern von 1 Mio. Jahren diskutiert. Daher ergibt sich die Frage:

Für welche Zeiträume kann ein Langzeitsicherheitsnachweis sinnvoll geführt werden?

Unter Langzeitsicherheitsnachweis versteht das BfS eine Sammlung von Argumenten und Beweismitteln zur Demonstration der Langzeitsicherheit. Er besteht aus der Langzeitsicherheitsanalyse und weiteren Informationen über die Robustheit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertung und der ihr zugrunde liegenden Annahmen. Dieser Nachweis beinhaltet auch qualitative Argumente, welche zum Vertrauen in ihn beitragen. Er stellt somit keinen strengen Nachweis im ingenieurwissenschaftlichen Sinn dar und geht über die reine Modellierung von Auswirkungen (Dosis, Risiko) auf das Schutzgut hinaus.

Im Rahmen dieses Vorhabens/Workshops hat sich gezeigt, dass die Ableitung von Nachweiszeiträumen für Geosysteme wegen ihrer Abhängigkeit von standortspezifischen Bedingungen, insbesondere auch von den Auswirkungen der auf die Geosysteme einwirkenden Ereignisse und Prozesse, auf der abstrakten Ebene der Geosystemtypen nicht möglich ist. Aus Sicht des BfS kann daher die Frage nur standortspezifisch beantwortet werden. Eine allgemeingültige Abhängigkeit von der Art des Geosystems besteht nicht.

Im Hinblick auf die über sinnvolle geowissenschaftliche Prognosezeiträume hinausgehende Gefährdung bei der Endlagerung von HLW ergibt sich die Frage, welche Wirtsgesteine bzw. für sie charakteristische Geosysteme das größte Isolationspotenzial erwarten lassen. Es stellt sich die Frage:

Welche Isolationspotenziale haben die in Deutschland vorkommenden geologischen Strukturen und potenziellen Wirtsgesteine für die Endlagerung?

Isolationspotenzial, definiert als das spezifische materielle Vermögen von Geosystemen, Schadstoffe für einen möglichst langen Zeitraum von der Biosphäre fernzuhalten, setzt sich aus den eigenschaftsbezogenen Elementen Rückhaltevermögen (z. B. Permeabilität, Sorptionsfähigkeit) und Beständigkeit (Dauerhaftigkeit der das Rückhaltevermögen bestimmenden Eigenschaften) zusammen. Die Bewertung der Ergebnisse der Untersuchungen zu diesem Punkt und die Ergebnisse des durchgeführten Workshops zeigen, dass eine zeitliche oder auch relative Angabe (besser, schlechter) auf der abstrakten Ebene von Geosystemen nicht möglich ist. Das Isolationspotenzial wird zu stark von standortspezifischen Eigenschaften geprägt.

Wie sind Isolations- und Nachweiszeitraum definiert?

Zu diesem Punkt ist es durch die Bearbeitung der Aufgabenstellung nicht zu einer allgemein akzeptierten Formulierung gekommen. Das BfS verwendet unter Berücksichtigung der Ausführungen in ALBRECHT et al. (2004) und der Diskussion im Workshop die folgenden Definitionen:

Isolationszeitraum:

Isolationszeitraum ist der Zeitraum, für den die Schadstoffe bei erwarteter Entwicklung des Endlagersystems im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden müssen. Isolation bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Schadstoffbelastung nach 1 Mio. Jahren an der Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aus rein konvektivem Transport bei 0 und aus diffusivem Transport bei < 1 % der Schadstoffkonzentrationen der Lösung im Endlager liegt.

Nachweiszeitraum:

Der Nachweiszeitraum ist der Zeitraum, für den der Schutz von Mensch und Umwelt im Sinne des Langzeitsicherheitsnachweises nachzuweisen ist.

Welche Zahlenwerte sollen für beide Zeiträume festgelegt werden?

Eine Festlegung hierzu erfordert eine Entscheidung über das Nachweiskonzept. Welche Bewertungsgrößen und Bewertungsmaßstäbe entscheidend sein sollen und welche Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Datengrundlage gestellt werden, hat einen erheblichen Einfluss darauf, für welche Zeiträume ein Nachweis möglich und sinnvoll ist. Insbesondere dann, wenn die Optimierung des Endlagersystems stärker im Vordergrund stehen soll als der Nachweis eines festgelegten Sicherheitsniveaus kann hinterfragt werden, ob überhaupt ein Nachweiszeitraum festgelegt werden muss. Je länger und vollständiger der Einschluss der Schadstoffe im Endlager nachgewiesen werden kann, desto besser ist das Endlager. Nur dann, wenn eine ausreichende Sicherheit definiert werden soll, muss auch regulatorisch festgelegt werden, was ein ausreichend langer Einschluss der Schadstoffe im Endlager bzw. ein ausreichender Schutz von Mensch und Umwelt ist. Einvernehmen besteht darüber, dass die radioaktiven Abfälle auch noch nach Zeiträumen, für die an keinem Standort mehr zuverlässige geowissenschaftliche Prognosen abgegeben werden können, eine Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen können. Hier ist die generelle Grenze der praktischen Vernunft in der Schadensvorsorge erreicht.

Rein methodisch sind Nachweiszeiträume bis zu einer Mio. Jahren ( $10^6$ ) möglich. Allerdings müssen dazu günstige Voraussetzungen vorliegen und Veränderungen im Deckgebirge (Eiszeiten) berücksichtigt werden.

## 4.4 SICHERHEITSINDIKATOREN

Die in Langzeitsicherheitsanalysen angewendeten Modelle zur Simulation einer potenziellen Schadstoffausbreitung und der resultierenden Strahlenexposition sind mit Unsicherheiten behaftet. Sie sind um so größer, je länger der Vorhersagezeitraum ist. Deshalb werden die mit diesen Analysen berechneten Werte zur Beurteilung der Einhaltung der Schutzziele nicht als Prognosewerte, sondern als Indikatoren angesehen. Die IAEA hat u. a. zur Erhöhung des Vertrauens in die Sicherheitsbewertung empfohlen, weitere Sicherheitsindikatoren zu ergänzen, die von weniger Annahmen abhängen. Damit stellt sich die Frage:

Welche Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle können herangezogen werden?

Die Indikatoren Individualdosis, Individualrisiko und Konzentration in den Umweltmedien sind dann vollständige Sicherheitsindikatoren, wenn für die berechneten Werte eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt und ein Vertrauensintervall angegeben wird. Auch wenn mit einer Analyse vollständige Sicherheitsindikatoren vorgelegt werden, sollten weitere Indikatoren als vertrauensbildende Elemente und zur Optimierung herangezogen werden (z. B. Naturbeobachtungen, Transportzeiten). Hierzu gehören Indikatoren, welche die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Teilsystemen und Einzelkomponenten des Endlagersystems belegen (performance indicators, bzw. Funktionsindikatoren im Sinne von Baltes et al. 2003) sowie natürliche Analoga. Diese können nur festgelegt werden, wenn konzeptionelle, standortspezifische und ggf. modellspezifische Besonderheiten bekannt sind.

Sowohl die vorliegende Studie als auch die Diskussion im Workshop zeigen, dass weitergehende Indikatoren, wie sie von der IAEA zur Erhöhung des Vertrauens in die Sicherheitsbewertung empfohlen werden (IAEA 2001a), nur standort- und konzeptspezifisch festgelegt werden können. Dies ist der Fall, weil sie sich auf die sicherheitstechnisch wesentlichen Komponenten des Endlagersystems beziehen müssen (z. B. Nachweis der Dichtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereich bei Salz oder Integrität von Behältern im Granit).

Liegen vollständige Sicherheitsindikatoren vor, können auch Standorte oder verschiedene (geologische und/oder konzeptionelle) Endlagersysteme auf ihrer Basis verglichen werden. Problematisch bei einem Vergleich wäre nur die Situation, wenn eine Alternative mit geringem Risiko, aber kleinem Vertrauensintervall mit einer Alternative mit noch geringerem Risiko, aber großem Vertrauensintervall verglichen werden soll. Zusätzlich sollte die vergleichende Bewertung konzeptionelle, standortspezifische und ggf. modellspezifische Besonderheiten der zu vergleichenden Endlagersysteme berücksichtigen.

Hinsichtlich der oft diskutierten Frage der Vermittelbarkeit von Indikatoren stimmt das BfS mit der auf dem Workshop erarbeiteten Auffassung überein, dass aus naturwissenschaftlicher Sicht jene Indikatoren verwendet werden, die relevant und notwendig sind. Wenn diese schlecht vermittelbar sind, müssen Formen für ihre Kommunikation gefunden werden.

## 4.5 GEOCHEMISCHE PROZESSE

Für die Beurteilung von Endlagerstandorten kann eine geochemische Modellierung ein wertvolles Werkzeug sein. International wurden bereits zahlreiche Arbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Daten für eine thermodynamische Modellierung. Im Hinblick auf den Einsatz geochemischer Modelle in Deutschland stellen sich damit die folgenden Fragen:

Sind die verfügbaren Daten für die geochemische Nah- und Fernfeldmodellierung in den verschiedenen geochemischen Milieus übertragbar auf in Deutschland relevante Verhältnisse? Sind sie vollständig und ausreichend genau?

Die derzeit verfügbare thermodynamische Datenbasis ist für die geochemische Modellierung der chemisch-physikalischen Verhältnisse in Teilsystemen des Endlagers anwendbar. Aus Lücken, Inkonsistenzen und Datenunsicherheiten folgt abhängig vom betrachteten Wirtsgestein und den ablaufenden Prozessen aber eine erheblich unterschiedliche Belastbarkeit der Modellrechnungen, so dass eine allgemeingültige Aussage über die untersuchten Datensätze nicht möglich ist. Die vorhandenen Datensätze reichen definitiv nicht aus, um die geochemischen Verhältnisse in einem Endlager für unterschiedliche Standorte und unterschiedliche Versatzkonzepte mit gleicher Belastbarkeit beschreiben bzw. prognostizieren zu können. Insgesamt lässt sich festhalten, dass derzeit Prozesse im Wirtsgestein Salz aufgrund des einfacheren Systems und der umfangreicheren Datenbasis am zuverlässigsten modelliert werden können.

Das BfS kommt unter Berücksichtigung der Reviews und des Workshops zu der Schlussfolgerung, dass es für eine belastbare geochemische Modellierung notwendig ist, weitere Arbeiten zu ihrer Validität und Genauigkeit durchzuführen. Was als ausreichend valide und genau angestrebt werden muss, kann allerdings nur über konzeptionelle Vorgaben (z. B. Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit von Behältern) sowie anlagen- und standortspezifische Sicherheitsanalysen mit entsprechenden Sensitivitätsanalysen ermittelt werden.

Welche Arbeiten müssen zur Vervollständigung der Datenbasis für die geochemische Modellierung und zur Festlegung von Modellierungscodes durchgeführt werden?

Die Arbeiten zu einer thermodynamischen Standarddatenbank mit dem Ziel einer geochemischen Nah- und Fernfeldmodellierung sind derzeit noch im Bereich der Grundlagenforschung anzusiedeln. Die Anwendbarkeit und der Anpassungsbedarf für ein potenzielles Endlager in Deutschland können erst an Hand konkreter anlagenkonzeptioneller Vorgaben sowie nach Vorliegen von Sicherheits- inkl. Sensitivitätsanalysen definiert werden. Endlagerspezifisch sind dann auch die Anforderungen an die Genauigkeit der geochemischen Modellierung festzulegen.

## 4.6 CHEMOTOXISCHE STOFFE

Nach § 34 Abs. 2 WHG dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Daher ist für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen eine solche Besorgnis zu überprüfen und zu bewerten, um die Frage nach der Einhaltung dieses Schutzzieles bei einer möglichen Freisetzung von nicht-radioaktiven, chemotoxischen Schadstoffen beantworten zu können.

Welches chemotoxisches Inventar organischer und anorganischer Stoffe befindet sich in den Abfällen?

Die stoffliche Zusammensetzung endzulagernder radioaktiver Abfälle kann für gleichartig anfallende Abfälle mit vergleichsweise guter Genauigkeit ermittelt werden. Bei Abfällen mit überwiegend heterogener Zusammensetzung, die insbesondere aus Forschungseinrichtungen und Landessammelstellen stammen, sollten diesbezügliche Angaben mit Bandbreiten erfolgen. Dies gilt speziell für Abfallgebindebestandteile, die nur in geringen Mengen vorhanden, von ihrer chemotoxischen Wirkung aber bedeutsam sind. Ihre Charakterisierung ist mit entsprechend hohem Aufwand durchzuführen, um Unsicherheiten bei der Inventarermittlung zu reduzieren.

Die vorliegende Untersuchung umfasste alle, nach heutigen Randbedingungen zur Endlagerung vorgesehenen radioaktiven Abfälle. Ihre stoffliche Zusammensetzung, insbesondere die in ihnen enthaltenen organischen und anorganischen nichtradioaktiven Schadstoffe, wurde umfangreich und für ein zukünftiges Genehmigungsverfahren ausreichend erfasst und beschrieben.

Ist eine Gefährdung des Grundwassers durch das chemotoxische Inventar eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu besorgen?

In der Untersuchung wurde eine Freisetzung unterstellt und im Einklang mit den Randbedingungen bzw. Vorgaben aus der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse die Prüfung und Bewertung einer möglichen Verschmutzung des oberflächennahen Grundwassers durchgeführt. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass unter den getroffenen, z. T. sehr weit auf der sicheren Seite liegenden Randbedingungen (z. B. keine Rückhaltung der freigesetzten Stoffe) und je nach unterstellten Resthohlraumvolumina und Verdünnungsfaktoren keine Gefährdung des oberflächennahen Grundwassers, mit Ausnahme einiger weniger Stoffe, zu erwarten ist. Bei Verwendung von realistischeren Annahmen kann davon ausgegangen werden, dass die Konzentration der chemotoxischen Stoffe im oberflächennahen Grundwasser erheblich geringer sein wird und damit seine Gefährdung bzw. nachteilige Beeinflussung nicht zu besorgen ist.

Mit der angewandten Methode von Konzentrationsvergleichen unter Berücksichtigung der Verdünnung können zwar Aussagen zur möglichen Grundwassergefährdung gemacht werden; für einen Vergleich von Standorten ist diese Vorgehensweise jedoch weniger aussagekräftig. Dies gilt insbesondere dann, wenn der sichere Einschluss der Abfallgebinde angestrebt wird. In diesem Falle ist die standortspezifische Sicherheitsanalyse neu auszurichten und muss auf den Nachweis der Wirksamkeit des sicheren Einschlusses (einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ausgerichtet werden. Unter der Voraussetzung, dass dieser Nachweis über sehr lange Zeiträume geführt werden kann, wird keine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich sein.

Für eine Bewertung von Standorten sollte die angewandte Methode weiterentwickelt werden. Insbesondere ist dann eine neue Vorgehensweise zu erarbeiten, wenn die gemeinsame Bewertung chemotoxischer und radiotoxischer Schadstoffe ermöglicht werden soll. In diesem Zusammenhang muss regulatorisch geklärt werden, wie mit Versatzstoffen umgegangen werden soll.

Welches Verdünnungspotenzial ist erforderlich, um die Schutzziele des WHG und anderer einschlägiger Vorschriften einzuhalten?

Konkrete Aussagen über das Verdünnungspotenzial sind nur standortspezifisch möglich, wenn die geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten in den hierzu durchzuführenden Untersuchungen berücksichtigt werden können.

Hinzu kommt, dass es für die Prüfung und Bewertung einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften weder diesbezügliche Ausführungsbestimmungen (z. B. Verwaltungsvorschriften oder Richtlinien) noch unmittelbar geltende, verbindliche Grenz- oder Richtwerte als Maßstab gibt. Daher konnten in der vorliegenden Untersuchung hilfsweise nur Maßstäbe wie z. B. die Trinkwasserverordnung oder die Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser herangezogen werden, deren Anwendbarkeit allerdings mit Einschränkungen verbunden ist.

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sollten aus Sicht des BfS regulatorische Festlegungen getroffen werden, die sich auf

- eine Konkretisierung des wasserrechtlichen Schutzzieles (hier: tiefe Grundwässer und/oder oberflächennahes Grundwasser),
- die Berücksichtigung von Versatzmaterialien,
- die anzuwendenden Bewertungsgrößen (Grenz- oder Richtwerte für zulässige Schadstoffkonzentrationen),
- die eventuell anzustrebende gemeinsame Prüfung und Bewertung von chemotoxischen und radioaktiven Schadstoffen

beziehen. Dabei ist zwischen zu erwartenden und außergewöhnlichen Entwicklungen eines Endlagersystems zu unterscheiden.

## 4.7 GASBILDUNG

Die im Endlager eingelagerten Abfälle bilden Gase. Die daraus resultierenden Gasdrücke können zu einer Beeinträchtigung der Endlagersicherheit führen. Wie der Nachweis zur Beherrschung der Gasbildung im Endlager für verschiedene Wirtsgesteine zu führen ist, ist Gegenstand vieler Untersuchungen und Forschungsvorhaben. Welche Nachweiskonzepte zu verfolgen sind, und welcher Untersuchungs- oder Forschungsbedarf hierfür noch existiert, war Hintergrund für die folgenden sicherheitstechnischen Fragestellungen:

Wie sehen die Gasbildungsmechanismen in einem Endlager aus?

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Gasbildungsmechanismen im Gutachten ausreichend beschreiben sind. Zusätzlich einbezogen werden sollten die galvanische Korrosion und die mikrobiell induzierte Korrosion.

Wie muss der Nachweis zur Beherrschung der Gasbildung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geführt werden? Welche Einzelnachweise sind zu erbringen und wie ist hierzu der Stand von Wissenschaft und Technik?

Hierzu wird durch das Gutachten und die Diskussionen belegt, dass für alle Wirtsgesteine Nachweiskonzepte zur Beherrschung der Gasbildung existieren und realisierbar sind. Die Modellierung der Gasbildung muss integraler Bestandteil der Sicherheitsanalysen sein. Hierfür muss die Gasbildung in bestmöglicher Bandbreite berücksichtigt werden.

Für alle Wirtsgesteine, die über einen messbaren primären Porenraumanteil und eine durch den silikatischen Mineralaufbau geprägte Wasseraffinität verfügen (Ton/Tonstein, Kristallingestein und andere Sedimentgesteine unter Tonabdeckung) kann der Nachweis über eine Zweiphasenflussmodellierung, wie im Gutachten ausgeführt, als zutreffend und erprobt angesehen werden. Für die Bildung einer sekundären Porosität in dichten Wirtsgesteinen sind noch weitere Nachweise zu erbringen. Dies gilt insbesondere für ein Nachweiskonzept in Salzgestein.

Darf ein Aufreißen des Gebirges durch die Gasbildung zugelassen werden?

Diese Frage kann nur nach Festlegung des verfolgten Nachweiskonzeptes – einschlusswirksamer Gebirgsbereich - und standortspezifisch beantwortet werden. Hierzu wäre nachzuweisen, ob nach Entweichen des Gases eine solche Wegsamkeit wieder geschlossen wird. Hierfür fehlen zurzeit noch die entsprechenden Nachweismethoden. Das vom BMU geförderte Ressortforschungsvorhaben Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlagerkonzept wird hierzu Erkenntnisse liefern.

Welche Anforderungen ergeben sich aus den Nachweiskonzepten an das Endlagerkonzept (Standortauswahl, Einlagerungskonzept, Abfallbehandlung und Konditionierung)?

Der Nachweis zur Beherrschung der Gasbildung ist für alle Geosysteme möglich, so dass sich keine Anforderungen an die Standortauswahl ergeben. Es erleichtert den Nachweis, wenn wenig bzw. kein Wasser im Endlager bzw. im Abfall vorhanden ist.

Die Ausführungen in den Gutachten und in den Diskussionen werden im Einklang stehend mit den Aussagen der RSK (RSK 2005) gesehen. Herausgehoben wird hier die Aussage:

*„Die Modellvorstellungen zum Abbau hoher Gasdrücke in Salz durch Entstehung von Mikrorissen und fortschreitende Gesteinsauflockerung haben für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salz erhebliche Bedeutung; denn die zur Verringerung hoher Gasdrücke alternativ durchzuführenden Maßnahmen sind mit gravierenden Eingriffen in die geologische Barriere verbunden. Die Modellvorstellungen bedürfen daher dringend der experimentellen und modellmäßigen Absicherung, um belastbare Aussagen über Ablauf und Ausmaß dieser druckreduzierenden Mechanismen treffen zu können. Dies gilt in ähnlicher, wenngleich weniger dringlicher Weise auch für Tonstein.“*

## 4.8 KRITIKALITÄT

Für die Genehmigung eines zukünftigen Endlagers ist u. a. der Nachweis zu erbringen, dass die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase gewährleistet ist (BALTES et al. 2002). Dies erfordert die Analyse von Szenarien, die standort- und konzeptspezifisch abgeleitet und interdisziplinär festgelegt werden müssen. Eine im Vorfeld durchgeführte generische Kritikalitätsanalyse kann jedoch bereits wertvolle Hinweise liefern, ob die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines zukünftigen Endlagers in Deutschland ein grundlegendes Problem darstellt oder durch geeignete Auswahl- und Auslegungsmaßnahmen gelöst werden kann. In diesem Zusammenhang ergeben sich folgende Fragen:

Unter welchen Randbedingungen sind kritische Spaltstoffansammlungen in einem Endlager ausgeschlossen?

Die für ein generisches Endlager durchgeführten Kritikalitätsanalysen zeigen, dass für Kernbrennstoffe aus ausgedienten LWR-Brennelementen die langfristige Kritikalitätssicherheit gewährleistet werden kann. Im Falle der optional einzulagernden Lagerstäbe mit unbestrahltem MOX-Brennstoff kann die Unterkritikalität in der Nachbetriebsphase durch technische Maßnahmen (Mischbeladung der Endlagerbehälter) sichergestellt werden. Bei der direkten Endlagerung von abgebrannten Brennelementen aus Forschungsreaktoren mit hochangereichertem Brennstoff sind Konditionierungsmaßnahmen erforderlich, um den Anreicherungsgrad des Brennstoffs so zu senken, dass Kritikalität nicht eintreten kann.

Muss eine Mobilisierung und der Transport von Spaltstoffen und eine anschließende Anreicherung zu einer kritischen Masse in der Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden?

Aufgrund der durchgeführten geochemischen Analysen ergibt sich, dass eine Mobilisierung und der Transport von Spaltstoffen und eine anschließende Anreicherung über geologisch lange Zeiträume möglich sind. Im betrachteten Zeitraum von 1 Mio. Jahren bleiben diese Vorgänge jedoch auf den Nahbereich der endgelagerten Abfälle beschränkt. Die Aussagen zur selektiven Sorption von Plutonium aus MOX-Brennstoff ist wegen der bestehenden Informationslücken zur Geochemie von Plutonium (s. Kap. 2.5) im Rahmen von standortspezifischen Analysen zu überprüfen.

Wie können die Folgen einer Kritikalität im Endlager, insbesondere im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die Biosphäre, abgeschätzt werden?

Hintergrund für die Fragestellung sind die in der internationalen Literatur diskutierten Szenarien einer autokatalytischen Kritikalität, die zu explosionsartigen Abläufen im Endlager führen können (BMU 2001). Eine

Grundvoraussetzung für diese Szenarien ist die Einlagerung von größeren Mengen an reinem, aus der Waffenproduktion stammendem Plutonium. Dies trifft für ein Endlager in Deutschland nicht zu. In zahlreichen amerikanischen Arbeiten wurde gezeigt, dass eine Kritikalität durch die Endlagerung von waffengrädigem Plutonium zwar vorstellbar, jedoch unter geologischen Bedingungen nicht mit explosiver Energiefreisetzung verbunden ist. In einer realistischen Endlagerumgebung würden stets negative Rückkopplungseffekte eine derartige Leistungsexkursion begrenzen.

Welche Kriterien zur sicherheitstechnischen Bewertung und zum Vergleich verschiedener Standorte und Wirtsgesteine unter dem Gesichtspunkt der Langzeit-Kritikalitätssicherheit können herangezogen werden?

Mit Blick auf die Kritikalitätssicherheit kann bei spezifikationsgerechtem Einsatz von entsprechend geeignetem Versatzmaterial keine eindeutige Entscheidung zugunsten eines der betrachteten Wirtsgesteine getroffen werden. Durch geeignete Auslegung und Standortwahl eines Endlagers kann sowohl in Salz- als auch in Ton- oder Kristallingestein die Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase auf annähernd gleichem Niveau gewährleistet werden. Wegen der vergleichsweise hohen Neutronenabsorption des Nuklids Cl-35 weist Salzgestein jedoch leichte Vorteile gegenüber Ton- und Kristallingestein auf.

## 4.9 MENSCHLICHE EINWIRKUNGEN

Die Entscheidung, radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen endzulagern und damit dort zu konzentrieren und zu isolieren, hat gegenüber einer Lagerung an der Erdoberfläche den Vorteil, dass die Abfälle nicht den über längere Zeiträume unvorhersehbaren gesellschaftlichen Entwicklungen ausgesetzt werden. Allerdings können menschliche Aktivitäten auch im tiefen Untergrund zu einer Schwächung bzw. Zerstörung der Barrieren eines Endlagers führen. Um die daraus möglicherweise resultierenden Konsequenzen gering zu halten, stellt sich die Frage:

Welche Szenarien, die zu unbeabsichtigten Einwirkungen auf das Endlager durch den Menschen führen, sind bei der Ableitung von Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. der radiologischen Konsequenzen zu berücksichtigen?

Eine wissenschaftlich begründete Festlegung abdeckender Szenarien zur Ermittlung des Risikos, das von menschlichen Einwirkungen ausgeht, ist nicht möglich. Ein Vergleich von Standorten und Geosystemen bzw. die Sicherheitsbewertung eines Standorts muss aber auf möglichst harten Fakten und nicht auf spekulativen Annahmen beruhen. Inwiefern mögliche Auswirkungen von menschlichen Aktivitäten bei der Beurteilung eines Endlagerstandortes berücksichtigt werden sollten, bedarf deshalb einer regulatorischen Festlegung. Eine regulatorische Festlegung von wirtsgesteinsspezifischen Schlüsselszenarien ist daher sinnvoll und aus Sicht des BfS erforderlich.

Die in der Untersuchung genannten sechs Szenarien reichen aus, um die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen und ggf. zu verbessern. Wenn Schlüsselszenarien zur Erhöhung der Endlagersicherheit herangezogen werden sollen, bedarf es geeigneter Bewertungsgrößen. Diese sollten möglichst direkten Bezug zu den Zielen der Verbesserung (z. B. geringere Aktivitätsfreisetzung, weniger beeinflusste Abfallbehälter) haben. Schutzgutbezogene radiologische Konsequenzen (z. B. Dosis oder Risiko) sind in diesem Fall keine geeigneten Bewertungsgrößen, weil sie in der Regel keinen unmittelbaren Bezug zu den Verbesserungszielen haben und auf einer Reihe spekulativer Annahmen (z. B. Biosphärenmodell) beruhen.

Die Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Standortauswahl und Endlagerauslegung sollen mit Beantwortung der folgenden Frage aufgezeigt werden.

Welche Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten bzw. der radiologischen Konsequenzen eines menschlichen Eindringens in ein Endlager in tiefen geologischen Formationen können ergriffen werden?

Die Eintrittswahrscheinlichkeit kann durch Standortauswahl, Endlagerauslegung, Kennzeichnung und Datenarchivierung beeinflusst werden. Dokumentation des Endlagers und Safeguards-Maßnahmen reduzieren die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Zeitraum von einigen hundert Jahren nach Endlagerverschluss unbeabsichtigte menschliche Einwirkungen vorkommen. Darüber hinaus kann eine Markierung des Endlagers langfristig wirksam sein und Menschen auf die Existenz eines Endlagers aufmerksam machen.

Zur Reduzierung der Konsequenzen durch unabsichtliches menschliches Eindringen sind drei Gruppen von Maßnahmen, nämlich Schutz durch Bohrhindernisse, Reduktion des Quellterms und Reduktion der Expositionszeit, geeignet. So können dickwandige Behälter für Abfälle mit einer hohen Radiotoxizität und geometrische Anordnungen von Abfallgebinden und Verschlussbauwerken im Endlager die Wahrscheinlichkeit und die Konsequenzen von menschlichen Einwirkungen reduzieren. Bevor solche Maßnahmen eingeplant werden, muss aber ihre Wirkung auf die Gesamtsicherheit des Endlagers an Hand einer vollständigen Sicherheitsanalyse ermittelt werden, damit erkannt wird, ob nicht hierdurch negative Effekte auf die Gesamtsicherheit des Endlagers ausgelöst werden.

Sofern an dem Endlagerstandort Rohstoffe vorhanden sind, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit menschlichen Eindringens in den tiefen Untergrund. Es ist aber nicht eindeutig ableitbar, ob diese Aktivitäten dann auch die Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigter Einwirkungen auf die Sicherheit des Endlagers erhöhen. Hierfür muss auch die Wahrscheinlichkeit einbezogen werden, dass das Endlager mit Erkundungsmaßnahmen entdeckt wird, bevor z. B. eine Bohrung geteuft wird.

Der Einordnung der Szenarien zu menschlichen Einwirkungen in die gesamte Sicherheitsbewertung eines Endlagers dient die Beantwortung der Frage

Welche Eintrittswahrscheinlichkeiten haben die zugrunde gelegten Szenarien und welche Auswirkungen resultieren aus ihnen?

Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten und Konsequenzen von Szenarien menschlicher Einwirkungen sind stark spekulativ. Im Gutachten wird deshalb bewusst auf eine nicht belastbare Quantifizierung dieser Bewertungsgrößen verzichtet. Aus Sicht des BfS sind die Unterschiede in den Ergebnissen der qualitativen und generischen Betrachtungen zwischen den verschiedenen Geosystemen nicht signifikant. Es kann somit nicht gefolgert werden, dass bestimmte Geosysteme als Endlagermedium unter dem Aspekt menschlicher Einwirkungen deutliche Vorteile aufweisen, insbesondere, wenn oben genannte Maßnahmen zur Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Konsequenzen umgesetzt werden.

## **4.10 MEHRBARRIERENKONZEPT**

Das Mehrbarrierenkonzept ist ein international anerkanntes Konzept bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, das die Isolation der Abfälle und die Einhaltung der Schutzziele über sehr lange Zeiträume gewährleisten soll. Es unterscheidet zwischen technischen Barrieren wie Abfallmatrix, Abfallbehälter, Versatz, Abschlussbauwerken von Kammern, Strecken, Bohrlöchern und Schächten sowie natürlichen (geologischen) Barrieren wie Wirtsgestein und seine Umgebung (Deck- und Nebengebirge, Liegendes des Wirtsgesteins). Der Veranschaulichung des Zusammenspiels der einzelnen Barrieren eines Mehrbarrierensystems dienen die Antworten zu den beiden ersten Fragen:

Welche Wirkung haben die einzelnen Barrieren des Mehrbarrierensystems eines Endlagers für den Einschluss der radioaktiven Stoffe?

Das Konzept des Mehrbarrierensystems fordert, die Sicherheit des Endlagers durch mehrere technische und natürliche (geologische) Barrieren zu gewährleisten. Diese Barrieren wirken zusammen, um die Abfälle zu isolieren und die Freisetzung von Radionukliden zu verzögern und zu reduzieren. Die Anwendung des Mehrbarrierensystems ist eines von verschiedenen Prinzipien, die robuste Endlagersysteme garantieren

sollen. Die Sicherheit der Endlagersysteme soll nicht übermäßig durch externe Einflüsse oder durch Unsicherheiten in Bezug auf die künftige Entwicklung beeinflusst werden.

Aufgrund des allgemein in Deutschland vorherrschenden Verständnisses, dass die geologischen Barrieren den Hauptbeitrag zur langfristigen Sicherheit eines Endlagers gewährleisten sollen, ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich das Kernstück des Barrierensystems. Dieser soll im Zusammenwirken mit den technischen Barrieren (insbesondere der Schachtverschluss als parallel geschaltete geotechnische Barriere) die Isolation der Abfälle sicherstellen.

Für die Bewertung der Barrieren muss definiert sein, welchen Stellenwert erwartete Entwicklungen, außergewöhnliche Entwicklungen und hypothetische Entwicklungen (z. B. what if-Fälle, menschliche Einwirkungen) im Nachweiskonzept für die Langzeitsicherheit haben. Hier schlägt das BfS eine abgestufte Vorgehensweise bei der Bewertung vor. Der Stellenwert ist in der Reihenfolge erwartete Entwicklungen, außergewöhnliche Entwicklungen, hypothetische Entwicklungen regulatorisch festzulegen.

Wegen des höchsten Stellenwertes der erwarteten Entwicklungen im Sicherheitsnachweis muss das Barrierensystem Eigenschaften haben, die den Zutritt von Wässern begrenzen und einen langsamen Transport eventuell freigesetzter Schadstoffe gewährleisten. Außerdem müssen Einflüsse, die durch Temperaturänderungen und Gasbildung entstehen, beherrscht werden. Um die Wirksamkeit der Barrieren nachweisen zu können, ist eine gute Charakterisierbarkeit erforderlich.

Für welche Zeiträume wirken die verschiedenen Barrieren?

Für die Gestaltung des Barrierensystems müssen der Zeitraum von ca. einigen tausend Jahren, in dem endlagerspezifische Prozesse (z. B. Gasbildung, Wärmeentwicklung, Konvergenz) wirken und der Zeitraum, für den Prognosen über geologische Entwicklungen immer weniger verlässlich werden, besondere Beachtung finden.

In der frühen Phase können technische und geotechnische Barrieren die wesentlichen Elemente des Mehrbarrierensystems sein, wohingegen in der späten Phase der Entwicklung eines Endlagersystems die Beständigkeit der geologischen Barrieren von besonderer Bedeutung ist.

Um die Möglichkeiten und Grenzen eines Mehrbarrierensystems beurteilen zu können, ist die folgende Frage zu beantworten:

Welche Anforderungen hinsichtlich Unabhängigkeit der verschiedenen Barrieren, Redundanz und Diversität sind an ein Mehrbarrierenkonzept zu stellen?

Aus Sicht des BfS muss ein Mehrbarrierensystem robust sein. Dies ist gegeben, wenn seine Wirksamkeit durch unterschiedliche physikalische und chemische Prozesse erzielt wird oder die einzelne Barriere erhebliche Sicherheitsreserven aufweist und damit unempfindlich gegenüber äußeren und inneren Einwirkungen ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine wichtige Barriere ihre Wirksamkeit verliert, muss sehr gering sein. Wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, kann nur mit Hilfe einer standortspezifischen, vollständigen Sicherheitsanalyse gezeigt werden.

Für die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Mehrbarrierensysteme an verschiedenen Standorten bzw. für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sind Kriterien zu entwickeln, die einen solchen Vergleich auch dann ermöglichen, wenn noch keine vollständigen Sicherheitsindikatoren verfügbar sind.

## 4.11 RÜCKHOLBARKEIT

International wird verstärkt eine rückholbare Endlagerung radioaktiver Abfälle diskutiert. Unter Rückholbarkeit wird hier die Rückholung aus einem verschlossenen Endlager verstanden. Dabei besteht Konsens darüber, dass dies keine Beeinträchtigung von Sicherheitsaspekten bewirken darf. Bei den bisherigen Endla-

gerplanungen in Deutschland sind Maßnahmen für eine vereinfachte Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Endlager nicht vorgesehen. Vor dem Hintergrund der internationalen Diskussion stellen sich die nachfolgend erörterten Fragen:

Welche technischen Möglichkeiten gibt es, die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle aus einem Endlager zu gewährleisten?

Aus den Ergebnissen des Vorhabens und des Workshops ist abzuleiten, dass für alle Geosysteme technische Konzepte mit unterschiedlichem Aufwand realisierbar sind, wobei der Aufwand zusätzlich vom Zeitpunkt der Rückholung abhängig ist.

Welche Konsequenzen – insbesondere sicherheitstechnische Vor- und Nachteile – hat die Gewährleistung der Rückholbarkeit?

Der ökonomische Aufwand für eine Rückholbarkeitsoption ist gegenüber dem Konzept der unbefristeten und wartungsfreien Endlagerung erheblich. Im Einzelvorhaben wurden der Beurteilung generische Endlager in den betrachteten Wirtsgesteinen zugrunde gelegt. Dabei geht der Bericht von einer Übertragung des technischen Rückholbarkeitskonzeptes für das Wirtsgestein Salz auf andere Wirtsgesteine aus. Unter dieser Randbedingung folgt, dass der ökonomische Aufwand für ein Endlager im Ton am höchsten ist, gefolgt von einem Endlager im Kristallin/sonstigen Gesteinen mit Tonüberdeckung. Ein Endlager im Salz schneidet unter diesem Gesichtspunkt am besten ab. Die Übertragbarkeit des Salzkonzeptes auf andere Geosysteme ist fraglich und bedarf einer Überprüfung.

Zwischen Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit besteht bezüglich sicherheitlicher Aspekte ein Zielkonflikt, da die Maßnahmen, die für die Gewährleistung der Rückholbarkeit erforderlich sind, z. B. zu nachteiligen Veränderungen der Gebirgseigenschaften führen können. Deshalb kann aus sicherheitstechnischer Sicht eine Rückholbarkeitsoption nicht empfohlen werden. Ein Vergleich der Geosysteme untereinander hinsichtlich sicherheitlicher Faktoren kann aus den Ergebnissen des Vorhabens nicht vorgenommen werden.

Welche planerischen Vorgaben sollen für die Rückholbarkeit gesetzt werden?

Die Informationen über die Geometrie des Grubengebäudes und die Lokationen und Inventare der eingelagerten Abfälle müssen erhalten bleiben. Mindestens die hochradioaktiven Abfälle müssen noch in einem Zustand sein, der eine sichere Handhabung für den regulatorisch festzulegenden Zeitraum erlaubt.

## 4.12 SAFEGUARDS

Für eine Endlagerung im Steinsalz hat die Bundesrepublik ein Referenzkonzept erarbeitet (KRANZ 2001). Bei einer Endlagerung in einem anderen Wirtsgestein muss die Frage geprüft werden:

Ist das für das Wirtsgestein Steinsalz entwickelte Safeguards-Referenzkonzept auch uneingeschränkt für ein Endlager in anderen potenziellen Wirtsgesteinen einsetzbar?

Ein Safeguardskonzept liegt bisher nur für die Endlagerung im Steinsalz der steilen Lagerung vor. Eine Anpassung an andere Geosysteme ist möglich. Dabei bestimmen das Endlagerkonzept und das Konzept zur Rückholbarkeit den notwendigen Aufwand. Für ein Rückholbarkeitskonzept gegenüber einer abschließenden Endlagerung ist der Aufwand höher einzuschätzen. Ein Vergleich von Wirtsgesteinen unter Safeguardsaspekten ist aus den Ergebnissen nicht ableitbar.

Die Arbeitsgruppe 3 des Workshops kommt zusätzlich zu dem Ergebnis, dass eine getrennte Lagerung von spaltbarem und nichtspaltbarem Material die Safeguardsmaßnahmen vereinfacht. Diesem Ergebnis schließt sich das BfS an.

Sollte künftig die in Deutschland bislang nicht geplante Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem Endlager vorgesehen werden, ist folgende Frage zu klären:

Wie sieht das Safeguards-Referenzkonzept für eine rückholbare Einlagerung aus?

Nach Vorliegen eines konkreten Endlagerkonzeptes kann das Safeguards-Referenzkonzept (Kranz 2001) an eine rückholbare Einlagerung angepasst werden.

## **4.13 ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSFOLGERUNGEN**

Die Untersuchungen zu den konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen haben eine Fülle von vorhandenen Informationen zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zur Planung und Errichtung von Endlagern zusammengetragen. Die Untersuchungen stellen in ihrer Gesamtheit somit ein Grundlagenwerk zur Bestimmung des Standes von Wissenschaft und Technik für die Endlagerung radioaktiver Abfälle dar. Hierdurch und durch die Diskussionen auf dem Workshop des BfS am 28. – 29. September 2005 ist deutlich geworden, wo die Grenzen und Möglichkeiten in der wissenschaftlichen Beantwortung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen liegen, welcher Forschungsbedarf besteht und welche regulatorischen Entscheidungen anstehen. Dies ist der wesentliche Erkenntnisgewinn. Zusätzlich lieferten die Vorhaben auch neue Erkenntnisse. So wurde z. B. erstmalig das chemotoxische Inventar für alle Abfälle inklusive Versatz zusammengestellt; natürliche und anthropogene Analoga wurden für verschiedene Wirtsgesteine endlagerrelevanten Prozessen zugeordnet.

Die Untersuchungen ergaben, dass keine wesentlichen Wissenslücken auf generischer Ebene identifiziert werden konnten. Die identifizierten offenen Fragen sind entweder regulatorisch zu klären oder werden als nicht so relevant angesehen, als dass sie vor weiteren Entscheidungen über die Vorgehensweise bei der Endlagerung grundlegend zu klären sind.

Als Ergebnis des Untersuchungsprogrammes können vier Kernaussagen getroffen werden.

### ***1. Keine eindeutigen Vorteile eines Wirtsgesteins aufgrund generischer Betrachtungen***

Als ein wesentliches Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen ist festzuhalten, dass die Möglichkeiten und Grenzen eines generischen - d. h. abstrakten - Vergleichs von Wirtsgesteinen aufgezeigt und eine Beantwortung der konzeptionellen und sicherheitstechnischen Einzelfragen erreicht wurden. Danach gibt es kein Wirtsgestein, das grundsätzlich immer eine größte Endlagersicherheit gewährleistet. Dies liegt darin begründet, dass generische Vergleiche von Modellannahmen ausgehen, die für konkrete Standorte nicht gelten müssen. Teilweise widersprechen sich die Anforderungen aus verschiedenen Einzelaspekten, so dass sich divergierende Vorteile bestimmter Wirtsgesteine ergeben. Die Aufstellung einer Rangfolge von Wirtsgesteinen ist daher auf generischer Basis nicht sinnvoll, sondern mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Zwar weist das Wirtsgestein Salz bei einigen Teilaspekten leichte Vorteile gegenüber anderen Wirtsgesteinen auf, so z. B. bei der Kritikalität und der Datengrundlage zur geochemischen Modellierung. Dem stehen jedoch leichte Vorteile der anderen Wirtsgesteine hinsichtlich der Beherrschung der Gasbildung und der Zusammenstellung der Datengrundlage für natürliche Analoga gegenüber. Die überwiegende Zahl der Bewertungsgrößen muss jedoch standortspezifisch ermittelt werden.

## **2. Vorteile von Wirtsgesteinen sind nur im Vergleich von Standorten zu ermitteln**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für alle in Deutschland relevanten Wirtsgesteinsformationen angepasste Endlagerkonzepte entwickelt werden können. Da die Verhältnisse auch innerhalb einer Wirtsgesteinsformation z. T. starken Schwankungen unterliegen, kann ein Vergleich nur standortspezifisch erfolgen und ist daher erforderlich. Insbesondere die Diskussionen zur Bewertung und zum Vergleich von Barrierensystemen und dem damit verbundenen Isolationszeitraum haben dies verdeutlicht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Barrieren unterschiedliche Funktionen übernehmen und daher ihre Wirkung nur mit standortspezifischen Sicherheitsanalysen dargestellt und vergleichend bewertet werden kann.

Hieraus ist auch abzuleiten, dass kein Wirtsgestein bereits auf dieser generischen Ebene von einem Standortauswahlverfahren ausgenommen werden sollte. Zwar erfüllen Kristallingesteine in Deutschland voraussichtlich nicht die geologischen Mindestkriterien des AkEnd. Ob aber dieser Wirtsgesteinstyp an einem bestimmten Standort nicht doch die Mindestkriterien erfüllt, kann erst in einem Standortauswahlverfahren an Hand konkreter Standortbefunde entschieden werden. Studien zur Endlagersicherheit von Standorten in Kristallingesteinen zeigen, dass bei Betrachtung des gesamten Barrierensystems inklusive der technischen Barrieren auch hier ein zuverlässiger Einschluss der radioaktiven Stoffe realisiert werden kann (siehe z. B. Schweden).

## **3. Es besteht Regelungsbedarf**

Die Ergebnisse der Untersuchungen und Diskussionen zeigen, dass insbesondere zu folgenden Punkten Regelungs- bzw. Entscheidungsbedarf besteht, für den weitere wissenschaftlich-technische Arbeiten keine zusätzlich relevanten Informationen liefern können.

Die Einzelvorhaben haben die gegenseitigen Abhängigkeiten und zum Teil gegenläufigen Anforderungen verschiedener sicherheitstechnischer Aspekte verdeutlicht (z. B. Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit; menschliche Einwirkungen und Gasbildung). Daher kann jetzt ein Nachweiskonzept für die Langzeitsicherheit festgelegt werden, das alle Aspekte integriert.

Zum Nachweiskonzept gehören insbesondere die Anforderungen an den sicheren Einschluss der Schadstoffe (einschlusswirksamer Gebirgsbereich) und damit an den Stellenwert der einzelnen Barrieren im Mehrbarrierenkonzept, die Definition des Nachweiszeitraumes und die Festlegung von Schutzziele für Mensch und Umwelt bei einer Freisetzung von chemotoxischen und radioaktiven Stoffen, und der Bewertung der Ergebnisse von probabilistischen Sicherheitsanalysen. Weiterhin müssen Festlegungen zum Stellenwert der Szenariengruppen für zu erwartende oder außergewöhnliche Entwicklungen sowie zu Schlüsselszenarien für unbeabsichtigtes menschliches Einwirken getroffen werden. Es muss entschieden werden, ob eine Rückholung von Abfällen vorgesehen werden soll.

## **4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich aus standortspezifischen Sicherheitsanalysen**

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, ergibt sich aus generischen Fragestellungen zur Endlagerung kein grundsätzlicher Forschungsbedarf mehr. Die noch erkennbaren Wissenslücken und ihre Relevanz für die Sicherheit des Endlagers können nur mit standort- und anlagenspezifischen Sicherheitsanalysen ermittelt werden. Dies trifft z. B. für die Weiterentwicklung von ergänzenden Sicherheitsindikatoren oder die Untersuchung weiterer natürlicher und anthropogener Analoga insbesondere für das Wirtsgestein Salz zu. Grundlegender Forschungsbedarf wurde bei der geochemischen Modellierung und der Entwicklung von Bewertungsgrößen und eines Bewertungsmaßstabes für eine gemeinsame Bewertung der Konsequenzen freigesetzter chemotoxischer und radiotoxischer Schadstoffe aus dem Endlager identifiziert.

Zukünftige Arbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle sollten sich aus Sicht des BfS somit auf standort-spezifische Sicherheitsanalysen konzentrieren, die Standorterkundung, den Standortvergleich sowie die Planung eines Endlagers parallel in iterativen Schritten begleiten sollten. Der standortspezifischen Sicherheitsanalyse kommt dabei eine Doppelfunktion zu, und zwar einerseits als Steuerungsinstrument zur Festlegung des notwendigen Umfangs und der Genauigkeit von Erkundungen bzw. Untersuchungen und andererseits als Mittel, um die Sicherheit des betriebenen und verschlossenen Endlagers im Genehmigungsverfahren darzustellen.

## 5 LITERATURVERZEICHNIS

- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Abschlussbericht, Langfassung, Dezember 2002, 260 S.
- ALBRECHT, I., APPEL, D., HABLER, W., & KREUSCH, J. (2004): Projekt Abarbeitung sicherheitstechnischer Einzelfragen PSP-Element WS –1007. - Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Gruppe Ökologie e. V., Bericht. (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 16.07.2005), 274 S., Hannover.
- ALTMAYER, M., BRENDLER, V., BOSBACH, B. KIENZLER, B., MARQUARDT, C., NECK, V., & RICHTER, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 20.09.2004), FZK-INE 002/04, 533 S., Karlsruhe.
- ANDERSSON, J., CARLSSON, T., ENG, T., KAUTSKY, F., SÖDERMAN, E. & WINGEFORS, S. (1989): The joint SKB/SKI scenario development project, SKB Technical Report 89-35 (and SKI Technical Report 89:14), Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm, Sweden.
- BALTES, B., HEUSER, H., KINDT, A. & THOMAS, W. (2002): Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – unveröff. Entwurf. - Gesellschaft für Reaktorsicherheit Köln, Stand 12.03.2002.
- BALTES, B (2002). Unterstützung des BMU im Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), BMU-2002-611.
- BECKER, D. A., BUHMANN, D., STORCK, R., ALONSO, J., CORMENZANA, J. L., HUGI, M., GEMERT, F. VAN, O'SULLIVAN, P., LACIOK, A., MARIVOET, J., SILLEN, X., NORDMAN, H., VIENO, T. & NIEMEYER, M. (2002): Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). Final Report, EUR 19965 EN.
- BfS 1990: Plan – Endlager für radioaktive Abfälle – Kurzfassung – Schachanlage Konrad, Salzgitter. Stand: September 1986 in der Fassung vom April 1990.
- BMU (2001): Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht (Stand November 2001). ([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/atomkraft\\_sicherheitst\\_einzelfragen.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/atomkraft_sicherheitst_einzelfragen.pdf)).
- BMU (2003): Untersuchung zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle nach ihrem Verschluss. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht, BMU-2003-618 ([http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe\\_rs618.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs618.pdf)).
- BRUNS, J., DERSHOWITZ, W., EMSLEY, S., & MIRA, J. (2004): Sicherheitstechnische Einzelfragen Modellrechnungen. Golder Associates GmbH, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 23.04.2004), 181 S, Celle.
- BUCHHEIM, B., FELLEBERG, H. VON, & ROHR, D. (2005): Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes. Buchheim Engineering, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 28.06.2005), 6 Anl. (679 S.), 86 S., Fällanden.
- CHAPMAN, N., MCKINLEY, I. & SMELLIE, J. A. T. (1984): The potential of natural analogues in assessing systems for deep disposal high-level of radioactive waste. SKB/KBS Technical Report (TR 84-16), Stockholm, and Nagra Technical Report (NTB 84-41), Baden.
- CORA (2001): Commissie Opberging Radioactief Afval, Terugneembare berging, een begaanbaar pad? Onderzoek naar de mogelijkheden van terugneembare berging van radioactief afval in Nederland, Ministerie van Economische Zaken, Den Hag, februari 2001.
- DBE (1998): Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ – Abschlussbericht. Dok.-Nr. 9G/211311/BB/BY/00300. Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, 1998.

- DOLIMAR, G. M., ROWAT, J. H., STEPHENS, M. E., LANGE, B. A., KILLEY, R. W. D., RATTAN, D. S., WILKINSON, S. R., WALKER, J. R., JATEGAONKAR, R. P., STEPHENSON, M., LANE, F. E., WICKWARE, S. L. & PHILIPOSE, K. E. (1996). Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for the Intrusion Resistant Underground Structure (IRUS), AECL-MISC-295 (Rev. 4), Oct 1996, Atomic Energy of Canada Limited, Ontario, Canada.
- DVGW (1996): Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn: „Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung“, DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung, Merkblatt W 251, Stand: August 1996
- EKRA (2000): Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA). Schlussbericht, im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, (UVEK), Bern, Schweiz.
- ENGELMANN, H.-J., LOMMERZHEIM, A., BIURRUN, E., HUBERT, R. & PÖHLER, M. (1995): Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers, DEAB T 57; DBE Februar 1995.
- ENRESA (2004): Analogue application to safety assessment and communication of radioactive waste geological disposal. – Illustrative synthesis. ENRESA, CSN, Coleccion Documentos I+D 11.2004.
- FREEZE, G. A., BRODSKY, N. S. & SWIFT, P. N. (2001): The development of information catalogued in REV00 of the YMP FEP database, TDR-WIS-MD-000003 REV 00 ICN 01, Las Vegas Nevada, Bechtel SAIC Company, ACC: MOL.20010301.0237.
- GAUTHIER-LAFAYE, F., WEBER, F. & OHMOTO, H. (1989): Natural fission reactors of Oklo. Econ. Geol., 84, 2286-2295.
- Gmal, B., Hesse, U., Hummelsheim, K., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann, B. & Moser, E. F. (2004): Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen, Bericht GRS-A-3240 (erstellt im Auftrag des BfS), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Dezember 2004.
- GMAL, B. & MOSER, E. F. (2001): Kritikalitätsanalysen zur Nachbetriebsphase eines Endlagers für abgebrannte Brennelemente, GRS-A-2880, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Januar 2001, 61 S.
- GOODWIN, B. W., STEPHENS, M. E., DAVIDSON, C. C., JOHNSON, L. H. & ZACH, R. (1994): Scenario analysis for the postclosure assessment of the Canadian concept for nuclear fuel waste disposal, Report No AECL-10969, COG-94-247.
- 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., BERA, P. C., COSGROVE, C. M., DOUGAN, K. D., KEELING, S. B., KITSON, C. I., KUMMEN, B. C., OLIVER, S. E., WITZKE, K., WOJCIECHOWSKI, L. & WIKJORD, A. G. (1994). The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Postclosure assessment of a reference system. AECL-10717, COG-93-7, Atomic Energy of Canada Limited, Manitoba, Canada.
- GRUNDFELT, B., SMELLIE, J., SKAGIUS, K. & PETTERSSON, M. (2003): working report Phase 2, Processes in safety assessments of radioactive waste repositories – inventory and screening with respect to the possibility to find natural and anthropogenic analogues, Bundesamt für Strahlenschutz, BfS, Salzgitter.
- GRUNDFELT, B. & SMELLIE, J. (2004): Prozessorientierte Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle., Kemakta Konsult AB, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 09.07.2004), Kemakta AR 2004-16, 191 S., Stockholm.
- GRUNDFELT, B., JONES, C., WIBORGH, M., ANDERSSON, J., KREUSCH, J. & APPEL, D. (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen – Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen – Abschlussbericht. Kemakta Konsult AB, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 07.10.2005), Kemakta AR 2005-28, 201 S., Stockholm.

- Grupa J B, Dodd D H, Hoorelbeke J-M, Mouroux B, Potier J M, Ziegenhagen J, Santiago J L, Alonso J, Fernández J J, Zuidema P, Crossland I G, McKirdy B, Vrijen J, Vira J, Volckaert G, Papp T, Svemar C, (2000): Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories. Final report. Nuclear Science and Technology, Euratom, European Commission EUR 19145 EN, ISBN 92-828-9466-5.
- GVO (1997): Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasser-Verordnung) vom 18. März 1997, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1997, Teil I, Nr. 18, S. 542-544
- HERRMANN, A. G. & RÖTHEMEYER, H. (1998): Langfristig sichere Deponien. Situation, Grundlagen, Realisierung.- 466 S., 54 Abb., 61 Tab.; Berlin (Springer).
- IAEA (1994): Safety Indicators in different time frames for the assessment of underground radioactive waste repositories. IAEA-TECDOC 767.
- IAEA (1999): Derivation of quantitative acceptance criteria for disposal of radioactive waste to near surface facilities. Reports on operational safety and development and implementation of an approach. 2 working documents, IAEA.
- IAEA (2001a): Safety indicators, complementary to dose and risk, for the assessment of radioactive waste disposal. Working Document. Draft IAEA-Tecdoc-XXXX, Dezember 2001.
- IAEA (2001b): Miller, B. (Hrg.). Use of selected safety indicators in the assessment of radioactive waste disposal. CRP report.
- IAEA (2004): Technical implications of retrievability on geological disposal of radioactive waste; Draft 2, IAEA-TECDOC-XXX, IAEA, Vienna, March 2004 (unveröff.).
- IAEA (2005): IAEA Safety Glossary. (<http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>)
- JNC (1999): H12 : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Japan Nuclear Cycle Development Institute (<http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/zh12/h12/index.html>).
- JNC (2000): H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, JNC TN-1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute.
- JONES, C., WIBORGH, M. & ANDERSSON, J. (2004): Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Kemakta Konsult AB, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, März 2004), 94 S., Stockholm.
- KÄBEL, H., GERARDI, J. & KELLER, S. (1999): Projekt ERA Morsleben – Szenarienanalyse, Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen, BGR Archiv-Nr. 0119098, Hannover, Germany.
- KELLER, S. (2001a): Ermittlung und Analyse von Szenarien für den Standort Gorleben – Auswahl (screening) von ZEP, BGR Archiv-Nr. 0121142, Hannover, Germany.
- KELLER, S. (2001b): Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (ZEP) als Basis für die Ermittlung von Szenarien (Standort Gorleben), BGR Auftragsnummer 9G 2612100, Hannover, Germany.
- KIENZLER, B., Loida, A., Maschek, W., Rineisk, A. (2003c): Is Criticality a Matter of Concern for Gorleben?, 10<sup>th</sup> Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference IHLRWM, 30 March – 2 April 2003, Las Vegas NV.
- KIENZLER, B., BOSBACH, D., BAUER, A., NIEMANN, L., SMAILOS, E. & ZIMMER, P. (2003a): Geochemisch begründete Eingangsparameter für Kritikalitätsanalysen, Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe, FZK-INE 002/03, November 2003.
- KIENZLER, B., BOSBACH, D., LOIDA, A., PIEPER, H. & NIEMANN, L. (2003b): Geochemisch begründete Eingangsparameter für Kritikalitätsanalysen in kristallinen Wirtsgesteinen, Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe, FZK-INE 010/03, November 2003.

- KRANZ, H. (2001): Überlegungen zum deutschen Konzept für die Spaltstoffflusskontrolle bei der direkten Endlagerung von ausgedienten Kernbrennstoffen in Endlagerbüchsen. BfS-interner Bericht (ET-IB-120, Juni 2001), Salzgitter.
- MILLER, W. M. & CHAPMAN, N. A. (1993): HMIP assessment of Nirex proposals performance assessment project (phase 1): Identification of relevant processes: system group report, Contractor report to Her Majesty's Inspectorate of Pollution, TR-ZI-11, available from the Environmental Agency, London.
- MILLER, W., ALEXANDER, W., CHAPMAN, N., MCKINLEY, I. & SMELLIE, J. (1994): Natural analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes. *Studies in Environmental Science* 57, Elsevier.
- MILLER, W., ALEXANDER, W., CHAPMAN, N., MCKINLEY, I. & SMELLIE, J. (2000): Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. *Lessons from Nature and Archaeology. Waste Management Series, Vol. 2.* Pergamon, Elsevier.
- NAGRA (1994a): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW), Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA), Nagra Technical Report NTB 94-06, Wetztingen, Schweiz.
- NAGRA (1994b): Kristallin-I safety analysis overview. Safety Assessment Report, Nagra Technical Report NTB 93-22, NTB 93-22E, Wetztingen, Schweiz.
- NAGRA (2002a): Project Opalinus Clay – Safety Report: demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). - Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wetztingen, Schweiz.
- NAGRA (2002b): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse.- NTB 02-03. Dezember 2002.
- NEA (1991): Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion of NEA, IAEA and EC Committees, NEA/OECD, Paris.
- NEA (1992): Safety assessment of radioactive waste repositories: Systematic approaches to scenario development. Report of the NEA Working Group on the identification and selection of scenarios for the safety assessment of radioactive waste disposal, Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (NEA/OECD), Paris.
- NEA (1999): Safety assessment of radioactive waste repositories – An international database of feature, events and processes. – Nuclear Energy Agency (NEA), a report of the NEA Working Group on the development of a database of features, events and processes relevant to the assessment of post-closure safety of radioactive waste repositories, Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (NEA/OECD), 85 S. incl. CD-Rom; Paris.
- NIREX (2001): Generic repository studies – Retrievability of radioactive waste from a deep repository. United Kingdom Nirex Limited N/024, Oxfordshire.
- NORRIS, S., BAILEY, L. E. F., ASKARIEH, M. M. & HICKFORD, G. E. (1997): Nirex 97: An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at Sellafield – Overview, Nirex Science Report S/97/012, Nirex Ltd, U K.
- NOSECK, U., BREWITZ, W., BECKER, D.-A., BOESE, B., BUHMANN, D., FEIN, E., HIRSEKORN, P., KRÖHN, K.-P., KÜHLE, T., MÜLLER-LYDA, I. & STORCK, R. (2000): Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern.-GRS-153, August 2000.
- ONDRAF/NIRAS (2001): Technical overview of the SAFIR 2 report. - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROND 2001-06 E, ONDRAF/NIRAS.
- PERS, K., SKAGIUS, K., SÖDERGREN, S., WIBORGH, M., HEDIN, A., MORÉN, L., SELLIN, P., STRÖM, A., PUSCH, R. & BRUNO, J. (1999): SR 97 - Identification and structuring of processes, SKB Technical Report 99-20, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm Sweden.
- POSIVA (1999). The final disposal facility for spent nuclear fuel. Environmental impact assessment report, Posiva Oy, Helsinki, Finland

- PREUSS, J., EILERS, G. ;MAUKE, R., MÜLLER-HOEPPE, N., ENGELHARDT, H.-J., KREIENMEYER, M., LERCH, C. & SCHRIMPF, C. (2002). Post closure safety of the Morsleben repository, WM'02 Conference, Feb 24-28 2002, Tucson, AZ.
- REMAGEN, H., RICHTER, B., KRANZ, H. & STIER-FRIEDLAND, G. (2004): Internationale Kernmaterialüberwachung („Safeguards“) bei der direkten Endlagerung in relevanten geologischen Formationen in Deutschland. 12 S.
- ROKAHR, R., HAUCK, R., STAUDTMEISTER, K., ZANDER-SCHIEBENHÖFER, D., CROTOGINO, F. & ROLFS, O. (2002): High Pressure Cavern Analysis. Final Report of SMRI Research Project No. 2002-2-SMRI.
- ROKAHR, R., STAUDTMEISTER, K. & ZANDER-SCHIEBENHÖFER, D. (2003): High Pressure Cavern Analysis. SMRI Meeting 2003. Houston, Tx.
- RSK (1988): Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Gemeinsame Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK). 233. Sitzung der RSK am 22. Juni 1988, 84. Sitzung der SSK am 30. Juni 1988.
- RSK (2003): Statusbericht des RSK-Ausschusses VER- UND ENTSORGUNG zur Kritikalitätssicherheit bei der Endlagerung von Plutonium, Stand: 13.11.2003. (Anlage 2 des Ergebnisprotokolls der 367. RSK-Sitzung am 13.11.2003), unveröff.
- SKB (1999a): SR 97 Post-closure safety. Main report, Volumes I and II; SKB Technical Report, TR-99-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm, Sweden
- SKB (1999b): Deep repository for long-lived low- and intermediate level waste – Preliminary safety assessment, SKB Technical Report 99-28, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm Sweden.
- SKB (2001). Final repository for radioactive operational waste SFR 1. Final safety assessment report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm, Sweden (auf Schwedisch)
- SKB (2001): Project SAFE - Scenario and system analysis, SKB Report 01-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Co, Stockholm Sweden.
- SKI (1996): SKI SITE-94. Deep repository performance assessment project, SKI Report 96:36, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm Sweden.
- SKRZYPPEK, J., MAYER, G., WILHELM, S., NIEMEYER, M., FOLLE, S., ROLFS, O. & SUTER, D. (2005a): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit. Colenco Power Engineering, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 31.05.2005), Colenco Bericht 3161/28, 102 S., Baden.
- SKRZYPPEK, J., WILHELM, S., NIEMEYER, M., FOLLE, S., ROLFS, O., MCCOMBIE, C. & CHAPMAN, N. (2005b): Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit – Abschlussbericht. Colenco Power Engineering AG, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 31.05.2005), Colenco Bericht 3184/11, 63 S., Baden, Schweiz.
- STEPHENS, M. E., ROWAT, J. H., DOLINAR, G. M., LANGE, B. A., KILLEY, R. W. D., STEPHENSON M., CHARLESWORTH, D. H., SELANDER, W. N., POWER, E. P. & LANE, F. E. (1997): Analysis of safety issues for the preliminary safety analysis report on the intrusion resistant underground structure, Document AECL-MISC-386, available from SDDO, AECL, Chalk River, Ontario, Canada K 0J 1J0.
- TVO (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001“, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2001, Teil I, Nr. 24, S. 959-980
- US DOE (1995). Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Draft Title 40 CFR 191, March 31 1995, US Department of Energy, Carlsbad Area Office, New Mexico.
- US DOE (1996): Title 40 CFR Part 191 compliance certification application for the Waste Isolation Pilot Plant, US Department of Energy, Carlsbad Area Office, New Mexico.
- US DOE (2002). Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioaktive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada.

- VIENO, T. & NORDMAN, H. (1998): VLJ Repository safety analysis, Teollisuuden Voima Oy, Report TVO 1/98, Rauma, Finland (an English translation of the original report in Finnish published in 1991).
- VIENO, T. & NORDMAN, H. (1999): Safety Assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara – TILA-99, Report Posiva 99-07, Helsinki, Finland.
- WHG (1996): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz, WHG), Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1996, Teil I, Nr. 58, S. 1696-1711
- WHO (1998): World Health Organization (WHO): Guidelines for Drinking-Water Quality, 2<sup>nd</sup> Edition, Volume 1 (1983 + 1993/96) and Addendum to Volume 1, Recommendations (1998)
- ZIEGENHAGEN, J., BOLLINGERFEHR, W., SKRZYPPEK, J., SCHLICKENRIEDER, L., CHAPMAN, N., NIRVIN, B., SJÖBLOM, R., & SVEMAR, C. (2005): Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager. DBE Technology GmbH, Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Mai 2005), Z2.2.7/WS 1006/8489-2, 1 Anl. (241 S.), 104 S., Peine.

## 6 GLOSSAR

Definitionen, wie sie vom BfS in diesem Bericht verwendet werden.

<b>Aktualismusprinzip Aktualismus</b>	Grundlegende Arbeitsmethode und wichtigstes Erklärungsprinzip der Geologie, nach dem die Kräfte und Vorgänge der geologischen Gegenwart der Schlüssel zum Verständnis der geologischen Vorgänge und Bildungen der Vergangenheit sind. Aus der Anwendung dieses Prinzips folgt für Prognosen, dass die heute ablaufenden geologischen Prozesse auch in die Zukunft extrapolierbar sind.
<b>Analoga, natürliche und anthropogene</b>	Geologische und geochemische Gegebenheiten in der Natur (z. B. Minerale, Anreicherungen, Alterungsprozesse von archäologischen Artefakten), die Gemeinsamkeiten mit im Endlagersystem ablaufenden Prozessen haben. Informationen über ihre bisherige Entwicklung und Entstehung können genutzt werden, um das mögliche Verhalten von Komponenten des (→) Endlagersystems in der Zukunft über lange Zeiträume zu prognostizieren.
<b>Antiklinale</b>	eine meist großräumige Aufwölbung geologischer Schichten.
<b>Aussage, probabi- listische</b>	Eine Aussage zur Endlagersicherheit, die unter Zuhilfenahme der (→) Probabilistik bzw. probabilistischer Verfahren zustande gekommen ist. Eine probabilistische Aussage ist nicht entweder falsch oder wahr, sondern sie ist mit einer spezifizierten Sicherheit wahr. Innerhalb von Langzeitsicherheitsanalysen bedeutet eine probabilistische Aussage z.B. die Bezifferung derjenigen Wahrscheinlichkeit, mit der in einem konkreten Modell ein radiologischer Grenzwert durch die Wirkung freigesetzter, transportierter und aufgenommener Nuklide über- oder unterschritten wird.
<b>Barriere</b>	Geologische Gegebenheit oder technische Maßnahme zur Be- oder Verhinderung der Freisetzung von Schadstoffen aus den Abfällen in die (→) Biosphäre.
<b>Bayesscher Ansatz</b>	Auch Satz von Bayes, Theorem von Bayes. Nicht zu verwechseln mit dem (→) Bayesschen Wahrscheinlichkeitsbegriff, aber in diesem Zusammenhang oft eingesetzt. Ein auf Thomas Bayes zurückgehender Satz über die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses A unter der Bedingung, dass ein bestimmtes anderes Ereignis B eingetreten ist. Dazu muss die unbedingte Wahrscheinlichkeit von A bekannt sein (A priori-Wahrscheinlichkeit). Weiterhin benötigt man die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass B wahr ist, wenn A eingetreten ist (Mutmaßlichkeit). Man kann den Satz von Bayes als Modellierung induktiver Lernprozesse deuten, wenn man die Mutmaßlichkeit als neue Information aus Messungen o.ä. auffasst. Dann kann man das als Wahrscheinlichkeit ausgedrückte Wissen über A aufdatieren zur neuen, bedingten A posteriori-Wahrscheinlichkeit von A.
<b>Bayesscher Wahr- scheinlichkeitsbegriff (B. W.)</b>	Dem B. W. liegen bestimmte mathematische Axiome zugrunde. Im Gegensatz zur herkömmlichen („frequentistischen“) Auffassung von Wahrscheinlichkeit fasst der B. W. die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses nicht als relative Häufigkeit oder deren Grenzwert auf, sondern interpretiert sie als „Ausmaß persönlicher Überzeugung“ bzw. als „Sicherheit in der persönlichen Einschätzung eines Sachverhalts“. Man verwendet den Begriff vorzugsweise dann, wenn man die Plausibilität einer Aussage nach Vorlage neuer Erkenntnisse bewerten möchte. Dazu benötigt man den Begriff der Zufallsgröße nicht. Statt dessen führt man die A priori-Wahrscheinlichkeit ein, die die gesamte vorliegende Information in einer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion zusammenfasst. Man kann mit dem B. W. auch Größen schätzen, die nach frequentistischer Auffassung keine zufälligen Veränderlichen darstellen.

<b>Biosphäre</b>	Biosphäre ist generell definiert als die Gesamtheit der mit lebenden Organismen besiedelten Bereiche der Erde. Für die Zwecke dieses Berichtes wird diese Definition eingeschränkt auf die Bereiche der Erde, in oder aus denen Radionuklide aus den Abfällen über Luft, Grundwasser und Boden durch Inhalation oder Ingestion in den menschlichen Organismus aufgenommen oder durch die Haut absorbiert werden können bzw. in denen der Mensch durch den Zerfall von Radionukliden einer direkten Strahlenexposition ausgesetzt ist (BALTES et al. 2002).
<b>Deckgebirge</b>	Unter dem Begriff Deckgebirge wird in der Endlagerung eine Abfolge geologischer Schichten verstanden, die sich in der Gesteinsausbildung, insbesondere hinsichtlich der petrophysikalischen und hydrogeologischen Parameter deutlich vom darunter liegenden Wirtsgestein unterscheiden.
<b>Diversität</b>	Vorhandensein mehrerer funktional verschiedenartiger Systeme (z. B. → Barrieren) mit gleicher Zielstellung.
<b>Endlagersystem</b>	Das Endlagersystem besteht aus dem (→) Geosystem und dem darin befindlichen Endlager.
<b>Entwicklung außergewöhnliche</b>	Entwicklung (→ Szenarien), deren Eintreten eine wesentlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist als der erwarteten Entwicklung.
<b>Entwicklung erwartete</b>	Entwicklung (→ Szenarien), deren Eintreten eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.
<b>Ereignisbaum</b>	Ein Ereignisbaum ist eine graphisch als „Baum mit Ästen“ veranschaulichte Abfolge wahrscheinlicher Ereignisse. Man stellt Ereignisbäume auf, um in einem komplexen technischen System aus vielen Komponenten dessen funktionale Zuverlässigkeit oder die Konsequenzen eines Versagens zu beschreiben. Zunächst definiert man den Baumstamm - ein initiales oder auslösendes Ereignis im System bzw. eine Ausgangshandlung. Danach beginnen die Äste eines binären Baums (zwei Abzweigungen). Der erste Ast stellt als Konsequenzen des auslösenden Ereignisses unter Normalbedingungen (d.h. kein Versagen) dar, der zweite Ast die Auswirkung im Versagensfall. Jeder der beiden Äste wird mit der zugeordneten Ereigniseintrittswahrscheinlichkeit belegt (an Verzweigungen ist die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten gleich 1). Alle nachfolgenden Ereignisse werden wiederum binär dargestellt. Hat man die Ereignisfolgen vollständig abgeschlossen, so kann man alle Pfade vom Stamm bis in die Baumspitzen durchlaufen und Sequenzen identifizieren, die beispielsweise zu Störfällen führen. Man berechnet dann die Eintrittswahrscheinlichkeit des Störfalles aus den Wahrscheinlichkeiten aller entsprechenden Pfade. Auf diese Weise bestimmt man die möglichen Folgen von Störeinflüssen auf ein insgesamt bekanntes, technisches System.
<b>Explorationsbohrung</b>	Bohrung, die der Suche nach und der Erkundung von Lagerstätten dient.
<b>Fernfeld</b>	Geologische Formationen außerhalb eines Endlagers, einschließlich der umgebenden geologischen Schichten, in einer solchen Entfernung vom Endlager, dass – für Modellierungszwecke – das Endlager als eine Einheit betrachtet und die Effekte der einzelnen Endlagerkomponenten nicht unterschieden werden (nach IAEA 2005).
<b>Gebirgsbereich, einschlusswirksamer</b>	Teil der geologischen Barrieren, der bei den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagers für den (→) Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - die (→) Isolation der Abfälle sicherstellen muss.
<b>Generisch</b>	Beschreibt den Grad der Allgemeingültigkeit eines Ansatzes oder einer Lösung. Gegensatz zu spezifisch. Ein Modell/System wird als generisch bezeichnet, wenn es zunächst möglichst allgemeingültig formuliert ist, aber an konkrete Situationen angepasst werden kann.

<b>Geosystem</b>	Umfasst die geologischen Einheiten sowie das geologisch-tektonische Umfeld des Standortes, soweit dieses Umfeld die wirkenden exogenen und endogenen Prozesse (z.B. Grundwasserfluss, Hebung, Senkung, Vulkanismus, Seismizität) bestimmt.
<b>Grubengebäudeverifikation</b>	In-situ-Kontrolle des Grubengebäudes eines Endlagerbergwerkes, um die Übereinstimmung des (markscheiderischen) Grubenrisses mit den tatsächlichen Gegebenheiten unter Tage zu überprüfen.
<b>Indikator</b>	Mess- oder Bewertungsgröße zur Beurteilung einer geforderten Eigenschaft:
<b>Individualdosis</b>	Die Individualdosis ist eine berechnete Größe, die zur Bewertung der Wirkung radioaktiver Strahlung auf den einzelnen Menschen herangezogen wird. Die Individualdosis bezieht sich auf den Menschen mit seinen heute geltenden Verhaltensweisen.
<b>Individualrisiko</b>	Im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle bezeichnet das Individualrisiko die Wahrscheinlichkeit, dass der betrachtete Mensch als Folge des Endlagers während seines Lebens einen schwerwiegenden Gesundheitsschaden erleidet.
<b>Isolation</b>	Isolation bedeutet bei der Endlagerung, den Transport von Schadstoffen in die Biosphäre zu verhindern bzw. zu begrenzen.
<b>Isolationspotential</b>	Isolationspotenzial ist das spezifische materielle Vermögen, Schadstoffe von der Biosphäre fernzuhalten. Es setzt sich zusammen aus der Rückhaltungswirkung und ihrer Beständigkeit.
<b>Isolationszeitraum</b>	Isolationszeitraum ist der Zeitraum, für den die Schadstoffe bei erwarteter Entwicklung des Endlagersystems im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden müssen. Isolation bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Schadstoffkonzentration nach 1 Mio. Jahren an der Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aus rein advektivem Transport bei 0 und aus diffusivem Transport bei < 1% der Schadstoffkonzentrationen der Lösung im Endlager liegt.
<b>Kolloid</b>	Kolloide sind Festkörper in Flüssigkeiten mit einer Größe zwischen 1 nm und 1.000 nm.
<b>Konservativ</b>	Bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle müssen Annahmen für Voraussetzungen, Randbedingungen oder Kennwerte getroffen werden. Solche Annahmen werden als konservativ bezeichnet, wenn sie dazu führen, dass die Auswirkungen auf das (→) Schutzgut überschätzt werden. Sie enthalten dann Sicherheitsreserven unbekannter Größe.
<b>Konvergenz</b>	Natürlicher Prozess der Volumenreduzierung von untertägigen Hohlräumen infolge von Verformungs- und Bruchvorgängen durch den Gebirgsdruck.
<b>Kritikalität</b>	Zustand eines Spaltstoffsystems, in dem eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft. Der kritische Zustand ist erreicht, wenn die Neutronenproduktionsrate gleich der Neutronenverlustrate ist.
<b>Kritikalität, autokatalytische</b>	Eine unter dem Einfluss katalytisch wirkender Materialien und Effekte sich selbst verstärkende Kritikalität.

<b>Kritikalitätsexkursion</b>	Erreichen eines kritischen bzw. überkritischen Zustands aufgrund einer unerwarteten und unbeabsichtigten Reaktivitätszufuhr infolge eines Versagens von Sicherheitsmaßnahmen. Verbunden damit ist ein unkontrollierter Leistungsanstieg, der zu einer Freisetzung von Energie und zur Emission energiereicher Neutronen- und Gammastrahlung in die Umgebung des Spaltstoffsystems führt.
<b>Langzeitsicherheit</b>	Langzeitsicherheit kennzeichnet den Sicherheitszustand des Endlagersystems nach Verschluss des Endlagers. Sie ist gegeben, wenn innerhalb des Nachweiszeitraumes nachsorgefrei keine Gefährdung von Mensch und Umwelt von den radioaktiven Abfällen ausgeht.
<b>Langzeitsicherheitsanalyse</b>	Unter Langzeitsicherheitsanalyse wird die (→) Sicherheitsanalyse für die Phase nach Verschluss des Endlagers verstanden. Die Langzeitsicherheitsanalyse besteht aus der Entwicklung eines konzeptionellen Modells (Systemverständnis), der (→) Szenarienanalyse und der Konsequenzenanalyse, wobei mit Hilfe der Konsequenzenanalyse die Auswirkungen auf die (→) Schutzgüter quantitativ ermittelt und mit den (→) Schutzziele verglichen werden.
<b>Langzeitsicherheitsnachweis</b>	Eine Sammlung von Argumenten und Beweismitteln zur Demonstration der (→) Langzeitsicherheit. Er besteht aus der (→) Langzeitsicherheitsanalyse und weiteren Informationen über die Robustheit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertung und der ihr zugrunde liegenden Annahmen.
<b>Leistungsexkursion</b>	Siehe → Kritikalitätsexkursion
<b>Leistungsindikatoren</b>	Siehe → performance indicator
<b>Lösung 1 HAW Arbeitskreis</b>	Vom Arbeitskreis HAW-Produkte für die Durchführung von Korrosionsexperimenten festgelegte typische Lösung in Salzformationen mit folgender Zusammensetzung:  NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O am Punkt Q
<b>Lösung 2 HAW Arbeitskreis</b>	Vom Arbeitskreis HAW-Produkte für die Durchführung von Korrosionsexperimenten festgelegte typische Lösung in Salzformationen mit folgender Zusammensetzung:  MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub> -(NaCl-KCl) – H <sub>2</sub> O
<b>Lösung 3 HAW Arbeitskreis</b>	Vom Arbeitskreis HAW-Produkte für die Durchführung von Korrosionsexperimenten festgelegte typische Lösung in Salzformationen mit folgender Zusammensetzung:  NaCl-CaSO <sub>4</sub> -(KCl-MgCl <sub>2</sub> ) - H <sub>2</sub> O
<b>Matrixdiffusion</b>	Prozess (Diffusion), durch den im Grundwasser gelöste Stoffe, die sich mit dem Grundwasser innerhalb von Klüften in einem porösen Gestein bewegen, in die Porenräume der Gesteinsmatrix mit stagnierendem Wasser in der Nachbarschaft der Klüfte transportiert werden.
<b>Mehrbarrierenkonzept</b>	Das Mehrbarrierenkonzept geht von mehreren ineinander greifenden, sich unterstützenden geologischen und technischen (→) Barrieren (gestaffelte Sicherheitsbarrieren) aus.
<b>Modellierung, Zweiphasenfluss</b>	Hiermit wird die Berechnung eines gemeinsamen und sich gegenseitig beeinflussenden Transports von Gasen und Flüssigkeiten bezeichnet.
<b>Moderator</b>	Material, mit dem die bei der Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen auf niedrige Energien abgebremst werden.

<b>MOX-Lagerstabverfahren</b>	Vom Öko-Institut vorgeschlagenes Verfahren, nicht verwertetes Plutonium zu unbestrahltem MOX-Brennstoff zu verarbeiten und daraus so genannte Lagerstäbe herzustellen, die später zusammen mit Stäben aus abgebrannten Brennelementen endgelagert werden können.
<b>Nachweiszeitraum</b>	Der Nachweiszeitraum ist der Zeitraum, für den der Schutz von Mensch und Umwelt im Sinne des Langzeitsicherheitsnachweises nachzuweisen ist.
<b>Nahfeld</b>	Der aufgefahrene Bereich eines Endlagers in der Nähe oder in Kontakt mit dem eingelagerten Abfall, einschließlich Versatz- und Abdichtmaterial, sowie solcher Bereiche des Wirtsgesteins, in denen die Eigenschaften des Gesteins durch das Endlager oder seinen Inhalt verändert wurden oder werden können (nach IAEA 2005).
<b>Nebengebirge</b>	Nebengebirge bezeichnet in der Endlagerung geologische Schichtfolgen, die sich in der Gesteinsausbildung, insbesondere hinsichtlich der petrophysikalischen und hydrogeologischen Parameter deutlich vom Wirtsgestein unterscheiden und etwa im gleichen Teufenniveau wie das Wirtsgestein anstehen.
<b>performance indicators</b>	dienen der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Systemen und Komponenten des Endlagers.
<b>Plutonium, waffengrädiges</b>	Hoch reines Plutonium (95 % Pu-239, 5 % Pu-240), das für den Einsatz in Kernwaffen, wie sie von den Kernwaffenstaaten erzeugt werden, geeignet ist.
<b>Probabilistik</b>	Die Probabilistik stellt eines von mehreren Verfahren zum Umgang mit ungesichertem Wissen dar. Sie ist Teil der Stochastik und legt fest, wie man Modelle von Vorgängen, die als zufällig aufgefasst werden, aufstellen kann, und wie sich aus solchen Modellen Vorhersagen ableiten lassen (im Gegensatz dazu beschreibt die Statistik diejenigen Verfahren, welche die Konstruktion von Modellen aus Beobachtungen gestatten).
<b>Prospektion, Prospektionsbohrung</b>	Unter Prospektion versteht man die Erfassung und Erkundung von Rohstoffen innerhalb eines bestimmten Gebietes. Die Prospektionsbohrung ist eine Methode hierzu.
<b>Redundanz</b>	Vorhandensein von mehreren funktional gleichen oder gleichartigen Systemen (z. B. → Barrieren) mit gleicher Zielstellung.
<b>Retardation</b>	zeitliche Verzögerung der Ausbreitung von Schadstoffen.
<b>Rückholbarkeit</b>	Option zur Rückholung radioaktiver Abfälle aus einem verschlossenen Endlager.
<b>Safeguards</b>	Überwachung durch die IAEA, damit verhindert wird, dass Spaltstoffe aus dem Endlager entwendet und zur Herstellung von Nuklearwaffen verwendet werden.
<b>safety case</b>	Siehe (→) Langzeitsicherheitsnachweis.
<b>Schutzgut</b>	Schutzgüter sind Sachen, Personen oder Lebewesen, auf die ein (→) Schutzziel Anwendung findet.
<b>Schutzziel</b>	Als Schutzziel wird dasjenige Ziel bezeichnet, das dem Schutz einer bestimmten Sache, einer Person oder eines Lebewesens (→ Schutzgut) dient. Wichtigstes Schutzziel bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist die Begrenzung des Risikos eines Individuums, einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition (→ Individualdosis) zu erleiden. Darüber hinaus gibt es weitere Schutzziele, wie den Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen oder sonstigen nachteiligen Veränderungen seiner Eigenschaften oder den Schutz der Erdoberfläche vor unzulässigen Verformungen.

<b>Sekundäre Porosität</b>	Hiermit werden Mikrorisse und Porenräume im Gestein bezeichnet, die durch eine Veränderung des primären Spannungszustandes entstehen. Ursache hierfür kann ein sich bildender Gasdruck im Endlager sein.
<b>Sensitivitätsanalyse</b>	Ein Berechnungsverfahren liefert bei festgelegten Eingabewerten ein bestimmtes Ergebnis. In einer Sensitivitätsanalyse wird die Abhängigkeit des Ergebnisses von einer Veränderung der Eingabewerte ermittelt. So können jene Eingabewerte ermittelt werden, auf die das Ergebnis am empfindlichsten reagiert.
<b>Sicherheitsanalyse</b>	Unter Sicherheitsanalyse eines Systems (z.B. → Endlagersystem) versteht man eine systematische, nachvollziehbare Überprüfung des Systems daraufhin, dass dieses System die vorgegebenen Sicherheitsanforderungen (z. B. → Schutzziele) erfüllt.
<b>Sicherheitsindikator</b>	Größe zur Bewertung der Auswirkungen auf das (→) Schutzgut.
<b>Sicherheitsindikator, vollständiger</b>	Sicherheitsindikatoren sind dann vollständig, wenn für die berechneten Werte eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt und ein Vertrauensintervall angegeben wird.
<b>Sicherheitskriterien</b>	Die Sicherheitskriterien umfassen diejenigen Kriterien, an denen der (→) Langzeitsicherheitsnachweis gemessen wird.
<b>Speziation</b>	Als chemische Spezies bezeichnet man die chemischen Formen, in denen die gelösten Stoffe vorliegen. Speziation ist die Verteilung eines oder mehrerer chemischer Elemente auf alle seine möglichen Verbindungen (Spezies) in einem gegebenen System
<b>Szenarien</b>	Ein Szenario beschreibt eine mögliche Entwicklung des (→) Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Die Entwicklung wird durch das Vorliegen von sicherheitsrelevanten Eigenschaften, das Eintreten von künftigen Ereignissen und den Ablauf von Prozessen bestimmt. Jedes Szenario ist durch eine Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet, wobei diese allerdings häufig nicht belastbar ermittelt, sondern höchstens in der Größenordnung abgeschätzt werden kann.
<b>Szenarienanalyse</b>	Die Szenarienanalyse ist die qualitative Analyse des (→) Endlagersystems zur Ermittlung aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen des Systems (→ Szenarien).
<b>Uran, angereichertes</b>	Uran, bei dem der Prozentsatz des spaltbaren Isotops U-235 über den Gehalt von 0,7205 % im Natururan hinaus gesteigert ist. Man unterscheidet hochangereichertes Uran-Brennstoff (HEU, <u>h</u> igh <u>e</u> nriched <u>u</u> ranium) und niedrig angereichertes Uran-Brennstoff (LEU, <u>l</u> ow <u>e</u> nriched <u>u</u> ranium). Die Grenze zwischen HEU und LEU wird gemäß einer internationalen Übereinkunft bei einer Anreicherung von 20 % gezogen.
<b>Validierung</b>	Als Validierung im Allgemeinen bezeichnet man die Prüfung, ob ein Lösungsansatz für ein bestimmtes reales Problem verwendungsfähig ist. Die spezielle Bedeutung variiert je nach Gebiet. Ein Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager ist die Langzeitsicherheitsanalyse. Diese Analyse erfolgt mit Hilfe von Berechnungsverfahren, die das Verhalten von Barrieren und den Transport von Schadstoffen abbilden. Basis für die Berechnungsverfahren sind modellhafte Vorstellungen über das Endlagersystem und sein Verhalten. Die Berechnungsverfahren müssen geeignet (verwendungsfähig sein), um z. B. die technischen Anforderungen an die Auslegung eines Schachtverschlusses abzuleiten. Nur dann, wenn die Berechnungsverfahren bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen – z. B. wenn Vergleichsberechnungen mit anderen Berechnungsverfahren durchgeführt wurden,

die Ergebnisse der Berechnungen mit den aus Experimenten verglichen wurden und sie Anerkennung in einem Expertenkreis finden -, werden sie als validiert im Sinne des Verwendungszweckes angesehen.

**Vertrauensintervall  
(Konfidenzintervall)** Bereich, in dem mit einer bestimmten vorgegebenen Wahrscheinlichkeit (z.B. 95 Perzentil) der wahre Wert einer Zufallsgröße liegt.

**Wirtsgestein** Gestein in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert sind.

**Wirtsgestein,  
hydraulisch dichtes** Gesteine, durch die sich im Grundwasser enthaltene Stoffe bei üblichen hydraulischen Druckgefällen im tiefen Untergrund allenfalls diffusiv ausbreiten können.

# ANHANG

Anhang 1: Programm des Workshops.



## SICHERHEITSTECHNISCHE EINZELFRAGEN DER ENDLAGERUNG

28. / 29. September 2005  
in Hannover / Loccumer Hof

## PROGRAMM



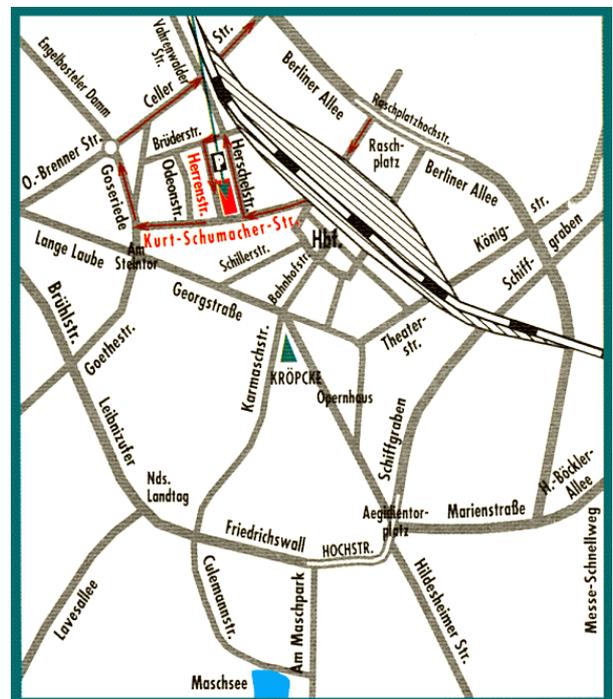
## TAGUNGSORT



Kurt-Schumacher-Straße 14/16  
30159 Hannover  
Telefon (0511) 1264-0  
Fax (0511) 13 11 92

Ein Zimmerkontingent ist reserviert bis 15.09.2005,  
Buchungscode: „BfS- Workshop“

E-Mail: [office@loccumerhof.de](mailto:office@loccumerhof.de)  
<http://www.loccumerhof.de>



Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 100149 • 38201 Salzgitter  
E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de) • Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)



## MITTWOCH, 28. SEPTEMBER 2005

9:00 Uhr: Einleitung und Begrüßung  
Dr. Ulrich Kleemann / BfS

9:15 Uhr: Präsentation der Arbeiten der Auftragnehmer  
Leitung: Dr. Peter Brennecke / BfS  
Präsentation 20 min + 5 Minuten Diskussion pro Thema

- Naturbeobachtungen
- Modellrechnungen
- Isolationspotential und Nachweiszeitraum
- Sicherheitsindikatoren

11:00 Uhr: Pause

11:30 Uhr: Präsentation der Arbeiten der Auftragnehmer  
Leitung: Dr. Peter Brennecke / BfS

- Geochemische Prozesse
- Chemotoxische Stoffe
- Gasentwicklung
- Kritikalität

13:15 Uhr: Mittagspause

14:30 Uhr: Präsentation der Arbeiten der Auftragnehmer  
Leitung: Dr. Jürgen Wollrath / BfS

- Menschliche Einwirkungen
- Mehrbarrierenkonzept
- Rückholbarkeit
- Safeguards

16:15 Uhr: Aufteilung auf Arbeitsgruppen  
Leitung: Dr. Peter Brennecke / BfS

- Erläuterung der Vorgehensweise in den Arbeitsgruppen
- Vorstellung der Moderatoren der Arbeitsgruppen
- Darstellung der Fragestellungen im Überblick
- Aufteilung in drei Arbeitsgruppen (Pro Gruppe ca. 20 Personen)

### Arbeitsgruppe 1: Nachweisführung

Chairmen: Prof. Wernt Brewitz / GRS  
Prof. Thomas Fanghänel FZK/INE

- Naturbeobachtungen
- Modellrechnungen
- Isolationspotential und Nachweiszeitraum
- Sicherheitsindikatoren

### Arbeitsgruppe 2: Einzelaspekte

Chairmen: Dr. Wolfgang Wurtinger / ISTec  
Wolfgang Neumann / Gruppe Ökologie

- Geochemische Prozesse
- Chemotoxische Stoffe
- Gasentwicklung
- Kritikalität

### Arbeitsgruppe 3: Konzeptionelle Grundsatzfragen

Chairmen: Michael Sailer / Öko-Institut  
Dr. Manfred Wallner / BGR

- Menschliche Einwirkungen
- Mehrbarrierenkonzept
- Rückholbarkeit
- Safeguards

16:45 Uhr: Pause

17:10 Uhr: Arbeitsgruppen

- Vertiefung der Fragestellungen und Stellungnahme zu den Arbeiten der Auftragnehmer durch die Reviewer
- Festlegung der Schwerpunktthemen und Fragestellungen in den Arbeitsgruppen
- Festlegung von Personen, die an der Zusammenfassung der Ergebnisse mitwirken möchten

18:30 Uhr: Ende des ersten Tages

19:00 Uhr: Gemeinsames Abendessen

## DONNERSTAG, 29. SEPTEMBER 2005

- 8:30 Uhr: Fortsetzung der Arbeitsgruppen-Sitzungen
- 11:00 Uhr: Pause
- 11:15 Uhr: Formulierung und Dokumentation der Ergebnisse in den Arbeitsgruppen
- 13:00 Uhr: Mittagspause
- 14:15 Uhr: Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Arbeitsgruppen im Plenum  
Leitung: Dr. Peter Brennecke / BfS
- 16:30 Uhr: Schlussworte  
Dr. Ulrich Kleemann / BfS
- 16:45 Uhr: Ende des Workshops

## ORGANISATORISCHES

Tagungsbüro:  
Tel: 01 888 333 1861  
am 27.09.05 ab 17: 00 Uhr und am 28/29.09. ab  
8:30 Uhr im Hotel Loccumer Hof

Organisation:  
Annegret Kriewald 01 888 333 1861  
[akriewald@bfs.de](mailto:akriewald@bfs.de)

Ansprechpartner bei fachlichen Fragen:  
Dr. Jürgen Wollrath 01 888 333 1964  
[jwollrath@bfs.de](mailto:jwollrath@bfs.de)

## THEMEN (AUFTRAGNEHMER\*)

**Naturbeobachtungen (Kemakta Konsult AB/Conterra AB):**  
Auswertung von natürlichen und anthropogenen Analoga und ihre Bewertung als vertrauensbildendes Element bei Sicherheitsbewertungen für Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

### **Modellrechnungen (Golder Associates GmbH)**

**Isolationspotential und Nachweiszeitraum (Gruppe Ökologie):**  
Bestimmung des natürlichen Isolationspotentials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle

### **Sicherheitsindikatoren (Kemakta Konsult AB/ JA Streamflow):**

Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle

### **Geochemische Prozesse (FZK INE):**

Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle

### **Chemotoxische Stoffe (Buchhelm Engineering):**

Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes

### **Gasentwicklung (Colenco Power Engineering AG):**

Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit

### **Kritikalität (GRS):**

Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente und radioaktive Abfälle

### **menschliche Einwirkungen (Colenco Power Engineering AG):**

Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit

### **Mehrbarrierenkonzept (Kemakta Konsult AB/ JA Streamflow):**

Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen

### **Rückholbarkeit (DBE Technology GmbH):**

Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager

### **Safeguards (BMWA)**

\* genannt sind Auftragnehmer bzw. Bietergemeinschaften  
Unterauftragnehmer sind nicht genannt

Anhang 2: Teilnehmerliste des Workshops; Chairmen **cyan**, Reviewer **gelb**.

	Teilnehmer	Vertretene Stelle
1	Alheid, Dr. Hans-Joachim	BGR, Hannover
2	Amannsberger, Karl	BfS, Präsidialbereich, Salzgitter
3	Arens, Georg	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
4	Bäuerle, Dr. Günther	BMWA, Berlin
5	Baites, Dr. Bruno	GRS, Köln
6	Biurrun, Dr. Enrique	DBETec, Peine
7	Bräuer, Dr. Volkmar	BGR, Hannover
8	Breckow, Prof. Dr. Joachim	FH Gießen-Friedberg, Gießen
9	Brennecke, Dr. Peter	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
10	Brewitz, Prof. Dr. Wernt	GRS, Braunschweig
11	Buchheim, Bernd	Buchheim Engineering, Schweiz
12	Buser, Marcos	Zürich, Schweiz
13	Chapman, Prof. Dr. Neil A.	ITC School of Underground Waste Storage and Disposal, Innertkirchen, Schweiz
14	Donderer, Richard	Physikerbüro, Bremen
15	Drotleff, Dr. Heinz-Walter	TÜV Nord, Hannover
16	Eilers, Dr. Gernot	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
17	Enachescu, Christian	Golder Associates, Celle
18	Fanghänel, Prof. Dr. Thomas	FZK, Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
19	Fischer-Appelt, Dr. Klaus	GRS, Köln
20	Flüeler, Dr. Thomas	ETH Zürich
21	Foerster, Dr. Bernd	GSF, Forschungsbergwerk Asse, Remlingen
22	Gmal, Dr. Bernhard	GRS, München
23	Goldsworthy, Martin	Golder Associates GmbH, Celle
24	Grundfelt, Bertil	Kemakta Konsult AB, Schweden
25	Gründler, Dr. Detlef	Institut für Sicherheitstechnologie GmbH (iSTec), Köln
26	Hellmuth, Dr. Karl-Heinz	STUK, Helsinki, Finnland
27	Herbert, Dr. Horst-Jürgen	GRS, Braunschweig
28	Herzog, Christel	Stoller GmbH, Dresden
29	Hocke-Bergler, Dr. Peter	FZK, Institut für Technikfolgenabschätzung (ITAS)
30	Hufschmied, Dr. Peter	Emch+Berger AG, Bern, Schweiz
31	Jung, Dr. Thomas	BfS, Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit, München
32	Kallenbach-Herbert, Beate	Öko-Institut, Darmstadt
33	Kienzler, Dr. Bernd	FZK, Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
34	Kirchner, Dr. Gerald	BfS, Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt, Berlin
35	Kisting, Stephan	Brenk Systemplanung, Aachen
36	Kleemann, Dr. Ulrich	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
37	Kreusch, Jürgen	Gruppe, Ökologie, Hannover
38	Kühn, Prof. Dr. Ing. Klaus	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
39	Larue, Dr. Jürgen	GRS, Köln
40	Ling, Dr. Wolfgang	BfR, Berlin
41	Lux, Prof. Dr. Karl-Heinz	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
42	Marquardt, Dr. Christian	FZK, Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
43	Martens, Dr. Berndt-Rainer	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
44	Mayer, Dr. Gerhard	Colenco AG, Baden-Dättwil, Schweiz
45	Meinrath, Dr. Günther	RER Consulting, Passau
46	Minkley, Dr. Ing. Wolfgang	IfG, Leipzig
47	Möller, Kai	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
48	Mönig, Dr. Jörg	GRS, Braunschweig
49	Müller, Wolfgang	ISTec, Köln
50	Neumann, Wolfgang	Gruppe Ökologie
51	Pitterich, Dr. Horst	Projekträger FZK, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)
52	Preuss, Dr. Jürgen	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
53	Pusch, Prof. Dr. Günter	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
54	Ranft, Matthias	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
55	Rath, Dr. Volker	RWTH Aachen
56	Rauche, Dr. Henry	Ercosplan GmbH, Erfurt
57	Resele, Dr. Georg	Colenco AG, Baden-Dättwil, Schweiz
58	Richter, Bernd	Forschungszentrum, Jülich
59	Rohr, Daniel	Buchheim Engineering, Schweiz
60	Rothfuchs, Dr. Tilmann	GRS, Braunschweig
61	Sailer, Michael	Öko-Institut e.V., Darmstadt
62	Schmidt, Prof. Dipl.-Ing. Reinhard	Sächsisches Oberbergamt, Freiberg
63	Schneider, Lutz	Stoller GmbH, Dresden
64	Schulze, Dr. Otto	BGR, Hannover
65	Seidel, Knut	GGL, Leipzig
66	Stahlmann, Prof. Dr.-Ing. Joachim	TU Braunschweig, Braunschweig
67	Stier-Friedland, Dr. Gerhard	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
68	Thiel, Dr. Jörg	BfS, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter
69	Tholen, Marion	DBETec, Peine
70	van Berk, Prof. Dr. Wolfgang	TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
71	Vogel, Dr. Gerhard	TÜV Nord, Hannover
72	Wallner, Dr. Manfred	BGR, Hannover
73	Wiborgh, Marie	Kemakta Konsult AB, Schweden
74	Wilhelm, Dr. Stefan	Colenco, Baden-Dättwil, Schweiz
75	Wollrath, Dr. Jürgen	BfS, Salzgitter
76	Wurtinger, Dr. Wolfgang	Institut für Sicherheitstechnologie GmbH (iSTec), Köln
77	Wycisk, Prof. Dr. Peter	Martin Luther Universität, Halle
78	Zech, Dr. Johann B.	TÜV Süd, München
79	Ziegenhagen, Dr. Jürgen	DBE, Peine

## ***Fragen / Themen zu „Naturbeobachtungen“***

Hat der AN die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung natürlicher und/oder anthropogener Analoga für die Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung eines Endlagers aufgezeigt?

Die vorliegende prozessorientierte Analyse von natürlichen Analoga zeigt an Hand von Beispielen, die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von natürlichen Analoga auf.

Nat. Analoga haben Bedeutung auf zwei Feldern. Sie haben:

1. eine große generische Bedeutung für grundsätzliche konzeptionelle Fragen
2. eine Bedeutung zum Verständnis Endlagersystem-spezifischer Prozesse beizutragen, und das Vertrauen in die eingesetzten Szenarien und Modelle zu rechtfertigen.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## ***offene Punkte / Hinweise „Naturbeobachtungen“***

Vollständigkeit (kolloidaler Transport von Radionukliden?,  
Flüssigkeitseinschlüsse, gesteinsgebundene Gase)

Definition des Begriffs (puristisch vs. umfassend)

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Fragen / Themen zu „Modellrechnungen“ 1**

Gibt die Studie einen formationsspezifischen Überblick über die zur Beschreibung der Entwicklungen eines Endlagersystems in Deutschland zu berücksichtigenden Zustände, Ereignisse und Prozesse (FEP) und die Möglichkeit ihre Eintrittswahrscheinlichkeit einzuschätzen?

Nein, es wurden keine formationsspezifischen Einschränkungen und Erweiterungen der FEP-Liste für Endlagersysteme in Deutschland vorgenommen.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Fragen / Themen zu „Modellrechnungen“ 2**

Liefert die Studie ausreichend Informationen um zu beantworten, zu welchem Zweck und welchem Zeitpunkt probabilistische (Langzeit)-sicherheitsanalysen eingesetzt werden können?

Dies Frage war nicht Teil des Auftrages.

Die Studie liefert keine vollständige Entscheidungsgrundlage zu welchem Zweck und welchem Zeitpunkt probabilistische (Langzeit)-sicherheitsanalysen eingesetzt werden können.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Fragen / Themen zu „Modellrechnungen“ 3**

Ist die Problematik vom generischen Standpunkt ausreichend untersucht oder bestehen offene Fragen, die durch weitere generische Studien untersucht werden sollen (Abgrenzung zu standortspezifischen Fragen?).

Die Möglichkeit der Anwendung von probabilistischen Sicherheitsanalysen sind vom generischen Standpunkt aus so weit möglich untersucht. Die Arbeitsgruppe ist überzeugt, dass weitere generische Studien nicht zielführend sind.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **offene Punkte / Hinweise „Modellrechnungen“**

*Präzisierung des Berichtstitels (Hinweis auf Probabilistik)*

*Herkunft der generischen Daten?*

*Eintrittszeitpunkte der Szenarien*

*Bayesscher Ansatz bzw. Einsatz von mathematische Formalisierung zu Informationsgewinnung und -fortschreibung?*

*FAST-Methode für Endlager nicht praktikabel anwendbar*

*Anforderungen an die Qualität von Parameter um sie probabilistisch behandeln zu können (kein Konsens in der AG)*

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## ***Fragen / Themen zu „Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum“***

Sind die Definitionen von Isolationszeitraum, Nachweiszeitraum und Isolationspotenzial nachvollziehbar und angemessen?

Aus Sicht der Arbeitsgruppe (Dissens mit AN) ist vor einer Definition von Begriffen, die den Teilbegriff „Isolation“ beinhalten, zunächst eine Definition des Begriffs „Isolation“ im technischen Sinne ( $>0$ ), und sein Zusammenwirken mit den Begriffen „einschlusswirksamer Gebirgsbereich“ und Betrachtungszeitraums erforderlich.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## ***Fragen / Themen zu „Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum“***

Ist die Vergleichbarkeit der Aussagen zu den verschiedenen Geosystemen (Endlagersystemen) gegeben?

Die AG kommt zu der Schlussfolgerung, dass ein generisches, sich auf abstrakte „Geosysteme“ beziehendes Ranking nicht aussagekräftig ist (Dissens mit AN). Ein Ranking ist nur auf der Basis standortspezifischer Befunde möglich.

Eine Auseinandersetzung mit den im Bericht im Einzelnen angewandten Kriterien des Bewertungssystems im Detail ist in der AG nicht erfolgt.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## ***Fragen / Themen zu „Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum“***

Können anhand dieses auf abstrakter Ebene von Geosystemen (Endlagersystemen) durchgeführten Vergleichs Wirtsgesteine oder zugeordnete Standorte a priori von einer weiteren vertieften Standortsuche / einem Standortvergleich ausgeschlossen bzw. in ihrer möglichen Eignung gewichtet werden?

Die AG teilt die Auffassung des AN, das kristalline Gesteine wie sie in Deutschland vorkommen die Mindestanforderungen des AkEnd nicht erfüllen. und somit unter Berücksichtigung des Primats der geologischen Barriere als Geosystem für die Endlagerung nicht weiter verfolgt werden sollten.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## ***Fragen / Themen zu „Sicherheitsindikatoren“***

Welche Indikatoren sind Sicherheitsindikatoren?

Sicherheitsindikatoren sind Konzentration in den Umweltmedien, Dosis, Risiko.

Inwieweit sind Sicherheitsindikatoren zum Vergleich von Standorten geeignet?

Generell sind Sicherheitsindikatoren auch zum Vergleich von Endlagersystemen geeignet, jedoch bedürfen die Ergebnisse einer spezifischen Bewertung.

### **AG 1**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Fragen / Themen zu „Sicherheitsindikatoren“**

Soll die Vermittelbarkeit eines Indikators ein Kriterium für seine Anwendung in der LZSA sein?

Aus naturwissenschaftlicher Sicht müssen jene Indikatoren verwendet werden die relevant und notwendig sind, wenn sie schlecht vermittelbar sind müssen Formen für ihre Kommunikation gefunden werden.

Hat der Auftragnehmer alle Indikatoren aufgeführt, die vom Endlager ausgehende Konsequenzen und das Eintreten dieser Konsequenzen betreffen?

Der Auftragnehmer hat alle wesentlichen Indikatoren aufgeführt, die vom Endlager ausgehende Konsequenzen und das Eintreten dieser Konsequenzen betreffen.

Es wird vorgeschlagen für das Wirtsgestein Salz den vorliegenden Satz an Indikatoren zu überprüfen und ggf. zu erweitern.

### **AG 1**

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



## **offene Punkte / Hinweise „Sicherheitsindikatoren“**

Definitionen für Sicherheitsindikatoren

Es bestehen offene Fragen hinsichtlich der Anwendbarkeit der Indikatoren bei verschiedenen Wirtsgesteinen.

### **AG 1**

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |



## AG 2 - Einzelaspekte

### **Geochemische Prozesse**

Reviews: Herr Dr. Pittrich Herr Dr. Meinrath

### **Chemotoxische Stoffe**

Reviews: Frau Herzog Frau Tholen

### **Gasentwicklung**

Reviews: Herr Dr. Müller Herr Prof. Dr. Pusch

### **Kritikalität**

Reviews: Herr Donderer Herr Dr. Vogel

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## Vorschlag Agenda

### **Geochemische Prozesse**

**Konsens:** *Existierende Datenbasis* anwendbar unter Berücksichtigung der begrenzten Belastbarkeit.

Muss nicht erst der Anspruch an die Datenbasis und Modellierung mit ihrem Bezug zur Sicherheitsanalyse definiert werden? Was ist ausreichend genau?

Ist nicht erst dann die Frage nach der Qualität der bestehenden Daten und des notwendigen FuE Bedarfs beantwortbar?

Die derzeit verfügbare geochemische Datenbasis ist für die Modellierung der chemisch-physikalischen Verhältnisse in Teilsystemen des Endlagers in verschiedenen geochemischen Milieus anwendbar. Aus Lücken, Inkonsistenzen und Datenunsicherheiten (Messunsicherheit) folgt eine unterschiedliche Belastbarkeit der Modellrechnungen.

Stellenwert geochemischer Modellierungen, Genauigkeitsanforderung sowie Priorität des Entwicklungsbedarfs müssen an Hand von Sicherheitsanforderungen, konzeptionellen Vorgaben sowie Sensitivitätsanalysen festgelegt werden!

Genauigkeit der geochemischen Daten muss quantifiziert werden und überprüfbar sein!

Nicht ausdiskutiert, wie Genauigkeitsanforderung festgelegt werden sollen!

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



Können mit existierenden Instrumentarium belastbare Aussagen zu sicherheitsrelevanten Prozessen gemacht werden (Sorption, Kritikalität, Gasbildung, Korrosion etc.)?

Für wohl definierte Bedingungen können für sicherheitsrelevante Aspekte belastbare Aussagen erbracht werden, wenn die o. aufgeführten Einschränkungen beachtet werden!

Sind unter diesen Gesichtspunkten die im Bericht genannten weiterführenden Arbeiten notwendig?

Kein Konsens erzielt. Ist in dem vorgegebenen Rahmen nicht ausdiskutierbar.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Vorschlag Agenda**

### **Chemotoxische Stoffe**

**Konsens:** Inventar ist umfassend und ausreichend beschrieben!

Sind die ermittelten Inventare realitätsnah (heutige Möglichkeiten)? Sind Bandbreiten erforderlich?

Ob Bandbreiten für kritische Stoffe, die die Sättigung im Lösungsvolumen nicht erreichen, erforderlich sind, muss an Hand der Möglichkeiten die Stoffe zu erfassen und zu begrenzen, entschieden werden.

Ist der Quellterm für die Chemotoxizität (Speziation und Konzentration im Endlager) konservativ abgeschätzt? Gibt es bessere Alternativen?

Es konnte keine Einigkeit erzielt werden, ob in einigen Fällen die Löslichkeiten nicht höher sein können. In der Summe ist der Ansatz konservativ.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



Ist der Ansatz, mit Verdünnungsrechnungen die mögliche nachteilige Veränderung des Grundwassers einzuschätzen, für jedes Wirtsgestein anwendbar, um insbesondere hieraus das relevante Inventar zu bestimmen?

Muss für Endlager, für die der sichere Einschluss nachgewiesen werden kann die Einhaltung des WHG gesondert geprüft werden?

Sind die verwendeten Prüfwerte die richtigen Bewertungsmaßstäbe? Gibt es Alternativen?

Nur dann wenn eine Freisetzung von Schadstoffen nicht ausgeschlossen ist, ist die Methode sinnvoll, anderenfalls ist der Nachweis des sicheren Einschlusses erforderlich!

Vernachlässigung der Sorption auf dem Transportpfad ist konservativ.

Es wird empfohlen endlagerspezifische Regelungen zu treffen.

Möglichst kleines Resthohlraumvolumen ist vorteilhaft für die Reduzierung des Quellterms!

## Vorschlag Agenda

### Gasentwicklung

**Konsens:** Die wesentlichen Gasbildungsmechanismen sind berücksichtigt!

Muss die Gasbildungsrate realistisch, abfallspezifisch und zeitabhängig abgebildet werden?

Hohe Gasbildungsrate muss nicht konservativ sein. Realistische Raten sind standortspezifisch und systemspezifisch zu bestimmen. Wie genau, hängt von der Sensitivität und den Nachweiszielen ab.

Kann das dargestellte Nachweiskonzept für alle Wirtsgesteine angewendet werden?

Konzept ist generell durchführbar.

Kann Bildung von sekundären Porositäten schon jetzt belastbar nachgewiesen werden, wenn nicht, welcher FuE Aufwand ist dafür zu leisten?

Noch ist die Bildung von sekundären Porositäten insbesondere im Salz Gegenstand der Forschung.

Kann das Auftreten von Makrorissen durch Gasdruck ausreichend zuverlässig ausgeschlossen werden?

Ob Makrorisse zuverlässig ausgeschlossen werden können ist nicht klar.

Definiertes Abströmen von Gas aus Salinar wird auch als mögliche Lösung angesehen.

Welche Sicherheitsrelevanz haben nach Verschluss des Endlagers explosionsfähige Gasgemische bei menschlichen Einwirkungen?

Sind alle Maßnahmen zur Optimierung des Einlagerungskonzeptes genannt?

Sind die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Behälterauswahl und für die Abfallkonditionierung realisierbar?

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



## **Vorschlag Agenda**

### **Kritikalität**

**Konsens:** Aus den Untersuchungen sind Randbedingungen ableitbar, bei denen eine Kritikalität ausgeschlossen werden kann!  
Endlager sind so auszulegen, dass Kritikalität für die als zu unterstellend eingestuft Szenarien nicht eintritt!  
Flankierende Entwicklung von probabilistischen Methoden zur Analyse von Kritikalität sinnvoll.  
Es gibt keine qualitativen Unterschiede für verschiedene Wirtsgesteine!

Ist die Einstufung von Szenarien als nicht zu unterstellend ausreichend nachvollziehbar?

Sind weitere Einflüsse zu betrachten, die dann zu relevanten Szenarien führen (Gasdruck in Hüllrohren, Zirkaloy Oxidation, Säureeinfluss, Gasbildung im Endlager)?

Nachvollziehbarkeit der Szenarien muss noch verbessert werden (Forschungen laufen).  
Dieser Maßstab muss auch für die genannten zusätzlichen Einflüsse gelten.

Es wird nicht erwartet, dass diese zu relevanten Szenarien führen.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Sicherheitstechnische Einzelfragen  
Workshop in Hannover  
28./29. September 2005**



Müssen die Folgen einer Kritikalität als zusätzliche Absicherung untersucht werden, obwohl die Kritikalität mit hoher Zuverlässigkeit vermieden werden soll?

Solche Betrachtungen zur Kritikalität können als flankierende Argumentationen sinnvoll sein. Ist für Brennstoffkreislaufanlagen Stand von Wissenschaft und Technik in Genehmigungsverfahren.

# Sicherheitstechnische Einzelfragen der Endlagerung

WORKSHOP des BfS  
28./29. September 2005  
in Hannover / Loccumer Hof

## Arbeitsgruppe 3: Konzeptionelle Grundsatzfragen

- Menschliches Einwirken
  - Mehrbarrierenkonzept
  - Rückholbarkeit
  - Safeguards
- Vorträge der Reviewer
  - Fragen des BfS
  - Gliederung der Diskussion
  - Diskussion
  - Zusammenfassende Bewertung des Sachstandes

Chairmen: Michael Sailer  
Manfred Wallner

## Menschliches Einwirken

Fragen des BfS

- Liefert die Studie hinreichend Grundlagen, um über den weiteren Umgang mit den durch menschliche Einwirkungen verursachten Szenarien und ihre Bewertung zu entscheiden?
- Ist die Relevanz der Szenarien für die verschiedenen Wirtsgesteine plausibel?

WORKSHOP des BfS, 28/29. September 2005, Hannover

Sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung

## Menschliches Einwirken

Gliederung der Diskussion

- Wissenschaftliche Szenarientwicklung oder/und regulatorische Szenarienfestlegung?
- Ist die zu erwartende Strahlenbelastung quantitativ abhängig vom Wirtsgesteinstyp zu ermitteln (unterschiedliches Nutzungspotenzial)?
- Frage des Zeitpunkts des Eintritts eines Szenariums - Archivierung von Informationen
- Ist m.E. ein Entscheidungskriterium für oder gegen ein bestimmtes Wirtsgestein?
- Kann irgend ein anderes Szenario (z.B. auch beabsichtigtes Eindringen, Terrorismus) zu anderen Entscheidungen führen?
- Ist das Thema m.E. auf dem gleichen Level zu diskutieren wie andere Themen (z.B. Kritikalität)? Ermittlung von Konsequenzen vs. qualitative Diskussion.

WORKSHOP des BfS, 28/29. September 2005, Hannover

Sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung

## Menschliches Einwirken

### Zusammenfassende Bewertung des Sachstandes

- Regulatorische Definition abdeckender Szenarien (Schlüsselszenarien) notwendig. Auswahl der Szenarien muss transparent sein. Begründung für Szenarien muss systematisch erarbeitet werden.
- Das Gutachten liefert eine ausreichende Grundlage, um in einem Iterationszyklus zu unterstellende Szenarien festzulegen.
- Internationaler Konsens: beabsichtigtes Eindringen, Terrorismus ist nicht zu betrachten <->Paradigmenwechsel notwendig (z.B. 11. Sept.)? - im weiteren Iterationsprozess noch auszudiskutieren.
- Ein Vergleich der Wirtsgesteine ist auf der Basis noch zu schaffender regulatorischer Vorgaben für m.E.- Szenarien möglich; Expositionsbewertung standortunabhängig nicht möglich

## Menschliches Einwirken

### Zusammenfassende Bewertung des Sachstandes

- Wissenschaftliche Szenarienuntersuchung ist Basis für regulatorische Festlegungen. Trotzdem viel Spekulation enthalten, z.B. Ermitteln von Eintrittswahrscheinlichkeiten, Continuity of Knowledge.
- M.E.-Szenarien sind für den Vergleich von Wirtsgesteinen von geringerer Bedeutung als mögliche andere Szenarien - aber Beachtung von Ressourcen (z.B. Rohstoffe, Nutzung des Untergrundes) für die verschiedenen Wirtsgesteinsoptionen.
- Fragen m.E. können relevant für Stakeholder sein. Deshalb müssen sie systematisch diskutiert werden.
- Spezielle Rolle von m.E.-Szenarien in den Sicherheitsanalysen.

## Mehrbarrierenkonzept

### Gliederung der Diskussion

- 1b Liefert der Bericht ausreichend Grundlagen, um zu entscheiden, welche Anforderungen an die Redundanz und Diversität geologischer Barrieren zu stellen sind?
- 1a Was bedeutet das **Mehr**barrierenkonzept? (einschlusswirksamer Gebirgsbereich)
- 1c Gibt es in Deutschland überhaupt geologische Systeme/Standorte, die über zwei unabhängige geologische Barrieren verfügen?

## Mehrbarrierenkonzept

### Gliederung der Diskussion

- 2 Sicherheitskriterien vs. Standortauswahlkriterien
- 2 Welche Bewertungen/Bewertungskriterien sind strittig?
- 2 Welche möglichen gestörten Entwicklungen (auch Übergang Betriebs- - Nachbetriebsphase) sollen für die verschiedenen Geosysteme berücksichtigt werden?
- 2 Sind bei der Bewertung die in Deutschland tatsächlich vorhandenen typischen Geosystemtypen betrachtet worden?

## Mehrbarrierenkonzept

Zusammenfassende  
Bewertung des Sachstandes

- 3 Ist ein Schutz des Salzkörpers durch zusätzliche geologische Barrieren erforderlich?
- 3 Was folgt aus den Ergebnissen des Gutachtens für die konkrete Standortbewertung? (s. auch Isolationspotenzial und Nachweiszeitraum)

WORKSHOP des BfS, 28/29. September 2005, Hannover

Sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung

## Mehrbarrierenkonzept

- Zu 1:
- Klärung der Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit Barrierensystem:  
Barriere als Element - Barriere als Sicherheitsfunktion
- Aufgabe der Barriere: Einschluss der Abfälle vs. Beitrag zum Einhalten von radiologischen und anderen Schutzzielen
- unterschiedliche Funktionen (Sicherheitsfunktionen) einer Barriere: z.B. Rückhaltung/Isolation, Schutz anderer Barrieren, räumliche/zeitliche Dispersion/Verdünnung (zu letzterem Dissens)
- Verschluss des Zugangs (Schacht) zum Endlager durch geotechnische Barriere(n) (notwendige Ergänzung; parallel geschaltete Barriere)

WORKSHOP des BfS, 28/29. September 2005, Hannover

Sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung

## Mehrbarrierenkonzept

- Zu 1:
- einschlusswirksamer Gebirgsbereich ist Kernstück der geologischen Barriere. Geologische Barriere kann in sich gegliedert sein (Zwiebelschalenmodell)
- Normalentwicklung vs. außergewöhnliche Entwicklungen (Gewichtung unterschiedlich) - Untersuchung beider Entwicklungen liefern wichtige Erkenntnisse, außergewöhnliche E. können nur standortabhängig definiert werden

## Mehrbarrierenkonzept

- Zu 2:
- auf generischer Ebene (geosystemare Bewertung) kann nur qualitativ bewertet werden
- Auswahlkriterien haben einen Irrtumsvorbehalt, Sicherheitskriterien müssen die Sicherheit gewährleisten, Auswahlkriterien können mögliche Standorteignung aufzeigen, aber nicht Sicherheit gewährleisten
- Zeit ist eine Schlüsselgröße zur Beschreibung von Prozessen
- Anmerkungen zum Bericht:
  - Dissens Auditorium - Auftragnehmer: ungleichgewichtige Behandlung von außergewöhnlichen Entwicklungen im Gutachten - (Frage der Notwendigkeit, Langfristaspekt, Relevanz für die Bewertung)
  - Bewertung Salzton zu überdenken
  - Beschreibung der Subrosion Salz flache Lagerung fehlt

---

## Mehrbarrierenkonzept

- Zu 3:
- Definition EG beachten: muss nicht gleich Wirtsgestein in Gänze sein sondern nur notwendige Schichtstärke
- Schutz des EG durch geologische Strukturen hilfreich und kann positiv bewertet werden
- Eine sicherheitliche Bewertung ist nur über eine standortspezifische Sicherheitsanalyse möglich.
- Kriterien zum Vergleich von Sicherheitsbewertungen für Endlagern in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sind noch zu entwickeln
- Generischer Vergleich im Gutachten zeigt Möglichkeiten und Grenzen dieser Vorgehensweise auf, ein belastbarer Vergleich ist nur für konkrete Standorte möglich

---

## Rückholbarkeit

Fragen des BfS

- Sind die Kernaussagen zu den technischen Möglichkeiten, eine Rückholbarkeit in den verschiedenen Wirtsgesteinen zu realisieren, und den sicherheitstechnischen Vor- und Nachteilen umfassend und plausibel?
- Siehe Gutachten Flüeler

## Rückholbarkeit

Gliederung der Diskussion

- Soll Rückholbarkeit als Option betrachtet werden (Begründung)?
- Zeitraum, für den eine Rückholung gewährleistet werden soll?

## Rückholbarkeit

Zusammenfassende  
Bewertung des Sachstandes

- Zielkonflikt Rückholbarkeit - Langzeitsicherheit
- Rückholbarkeit aus verschlossenem (Endlager) oder offengehaltenem System (Langzeitzwischenlagerung)
- mögliche Gründe für Rückholbarkeit: Ressourcengewinn plausibel, Rückholung aus Sicherheitsgründen fraglich, setzt Überwachung voraus
- ethische Aspekte beachten, aber Grundprinzip „safety first“ darf nicht verletzt werden
- Wichtig: umfassende Dokumentation zur zielgerichteten Rückholung

## Rückholbarkeit

Zusammenfassende  
Bewertung des Sachstandes

- Konzepte für Rückholbarkeit müssen von Konzepten zur Endlagerung ausgehen und müssen hinsichtlich zeitlicher und technologischer Aspekte definiert werden
- Ist Option der Rückholung ohne erheblichen Mehraufwand und ohne Verlust an Sicherheit möglich?
- Anmerkungen zum Bericht:
  - Übertragbarkeit von Salz auf andere Wirtsgesteine fraglich
  - andere Konzepte, andere Lagerdesigns nicht betrachtet

## Safeguards

Fragen des BfS

- Liefert die Studie hinreichend Informationen über die Konsequenzen von Festlegungen zur Rückholbarkeit für Anforderungen an ein Safeguard-Konzept?

---

## Safeguards

Gliederung der Diskussion

- Safeguards lässt sich an jede Situation anpassen, aber Aufwand hängt stark vom Endlagerkonzept und vorgesehendem Konzept zur Rückholbarkeit ab
- „Grubengebäudeverifikation“ ist die Schlüsselaufgabe für die IAEQ und den Betreiber
- getrennte Lagerung von spaltbarem Material und nicht-spaltbarem Material vereinfacht Safeguards

---

## Safeguards

Zusammenfassende  
Bewertung des Sachstandes