

2. Zwischenbericht

– Stand der Diskussion –

August 2001



2. Zwischenbericht

– Stand der Diskussion –

August 2001

Vorwort

1	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte	8
1.1	Einrichtung	8
1.2	Auftrag	8
1.3	Arbeitsweise und Organisation	9
1.4	Öffentlichkeitsarbeit	10
2	Auswahlverfahren.....	11
2.1	Ziele und Anforderungen	11
2.2	Phasengliederung	13
2.3	Abgrenzung.....	14
3	Rahmenbedingungen	16
3.1	Vorbemerkung	16
3.2	Schutzziele und Sicherheitsprinzipien.....	16
3.3	Menge und Eigenschaften der Abfälle	19
3.4	Isolationszeitraum	21
3.5	Endlagerkonzept.....	22
3.5.1	Endlagerung in geologischen Formationen und ihre Alternativen	22
3.5.2	Mögliche Endlagerkonzepte in geologischen Formationen	28
3.5.3	Ein-Endlager-Konzept.....	31
3.5.4	Rückholbarkeit	37

3.5.5	Relative Bedeutung geologischer und technischer Barrieren.....	39
3.6	Umgang mit Unsicherheiten.....	44
4	Entwicklung der Verfahrensstruktur	46
4.1	Einbindung der Verfahrensstruktur in das Gesamtverfahren	46
4.2	Allgemeine Verfahrensmerkmale	46
4.3	Die Verfahrensschritte.....	48
5	Entwicklung von Kriterien.....	54
5.1	Günstige geologische Gesamtsituation und geowissenschaftliche Kriterien....	54
5.1.1	Grundlagen und Definitionen.....	55
5.1.2	Kriterien für ungünstige geologische Verhältnisse	55
5.1.2.1	Großräumige Vertikalbewegungen	57
5.1.2.2	Aktive Störungszonen.....	58
5.1.2.3	Seismische Aktivität.....	60
5.1.2.4	Vulkanische Aktivität.....	61
5.1.3	Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation	63
5.1.3.1	Grundwasserbewegung.....	66
5.1.3.1.1	Durchlässigkeit von Gesteinstypen im Gebirge.....	66
5.1.3.1.2	Temperaturverteilung im tiefen Untergrund.....	72
5.1.3.1.3	Teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte	74
5.1.3.1.4	Grundwasseralter	75

5.1.3.2	Hydrochemische Verhältnisse	77
5.1.3.3	Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden	81
5.1.3.4	Gasverträglichkeit.....	84
5.1.3.5	Temperaturverträglichkeit.....	87
5.1.3.6	Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten.....	88
5.1.3.7	Konfiguration der Gesteinskörper.....	92
5.1.3.7.1	Konfigurationstypen und ihre Bewertung	92
5.1.3.7.2	Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	102
5.1.3.8	Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit.....	104
5.1.3.9	Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse.....	108
5.1.3.10	Gebirgsmechanische Verhältnisse	108
5.1.3.11	Natürliche Analoga als Hilfe bei der Kriterienentwicklung.....	111
5.1.3.12	Zusammenfassung zu den Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation	114
5.2	Sozialwissenschaftliche Kriterien und infrastrukturelle Kriterien	127
5.2.1	Begriffsbestimmungen	127
5.2.2	Funktion und Wertigkeit der sozialwissenschaftlichen Kriterien	128
5.2.3	Einbindung der sozialwissenschaftlichen Kriterien in das Verfahren	130
6	Internationale Erfahrungen	131
6.1	Vorgehensweise bei der Auswahl.....	132
6.2	Kriterien	134

6.3	Öffentlichkeitsbeteiligung	136
6.4	Langzeitsicherheitsnachweis.....	138
6.5	Schlussfolgerungen für die Arbeit des Arbeitskreises	140
7	Zur Festlegung des Auswahlverfahrens (Phase II)	142
7.1	Institutionelle Verankerung für die Festlegung von Verfahren und Kriterien ..	144
7.2	Die Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Festlegung des Verfahrens und der Kriterien	147
8	Partizipation bei der Durchführung des Auswahlverfahrens	152
8.1	Stufe 1: Verfahrensschritte 1 bis 4	153
8.2	Stufe 2: Verfahrensschritte 5 bis 7	153
9	Literaturverzeichnis	155

Anhang

- A Workshop
- B Ansprechpartner
- C Poster für den Workshop

Vorwort

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte dokumentiert im vorliegenden zweiten Zwischenbericht den aktuellen Stand seiner Arbeiten. Der Bericht enthält eine Darstellung der Zwischenergebnisse mit Stand August 2001. Der erste Zwischenbericht (AKEND 2000) wird durch den vorliegenden Bericht ersetzt.

Die Zwischenergebnisse haben vorläufigen Charakter. Sie geben den Stand der Überlegungen in Vorbereitung des zweiten öffentlichen Workshops wieder, den der Arbeitskreis am 28. und 29. September 2001 durchführt (Anhang A). Die Diskussionen im Arbeitskreis sind noch keineswegs abgeschlossen; in einigen Bereichen stehen sie erst am Anfang. Dies gilt insbesondere für den Bereich der sozialwissenschaftlichen und infrastrukturellen Kriterien (Kap. 5.2) sowie die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der späteren Festlegung und Durchführung des Auswahlverfahrens (Kap. 7 und 8), während beispielsweise die Arbeiten zu den geowissenschaftlichen Kriterien (Kap. 5.1) schon weiter fortgeschritten sind und deshalb einen breiteren Raum in diesem Zwischenbericht einnehmen. Die in diesem Zwischenbericht dargestellten Vorschläge können sich vor diesem Hintergrund entsprechend den weiteren Überlegungen im Arbeitskreis ändern.

Anregungen aus der Öffentlichkeit, wie sie insbesondere auf dem Workshop erwartet werden, sollen in die Arbeit einfließen und können zu weiteren Änderungen an den bisherigen Zwischenergebnissen führen. Insbesondere zu den Themen Öffentlichkeitsbeteiligung und Verfahrensstruktur erhofft sich der Arbeitskreis eine intensive öffentliche Debatte.

Die Abschlussergebnisse des Arbeitskreises sollen auf einem dritten Workshop Ende 2002 der Öffentlichkeit präsentiert werden.

Eine Kontaktaufnahme mit dem Arbeitskreis ist jederzeit über die Homepage des Arbeitskreises (www.akend.de) oder direkt persönlich mit einzelnen Arbeitskreismitgliedern möglich; im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ist das Referat RS III 4 (A) für den Arbeitskreis zuständig (Anhang B).

1 Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

1.1 Einrichtung

Weltweit gibt es bis heute kein Endlager für abgebrannte Brennelemente aus Kernkraftwerken und für hochradioaktiven Abfall aus der Wiederaufarbeitung. In Deutschland ist seit 1979 der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle erkundet worden. Der Bund hat allerdings Zweifel an der Eignung von Gorleben. Im Einvernehmen mit den wesentlichen Abfallverursachern wurde die Erkundung am 1. Oktober 2000 zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen unterbrochen (Moratorium).

Deshalb sollen weitere Standorte in unterschiedlichen Gesteinsformationen untersucht werden. Damit stellt sich die Frage, wie Standorte identifiziert werden können, die für eine sichere Endlagerung geeignet sind und gleichzeitig Akzeptanz in der Öffentlichkeit finden. Aus diesem Grund hat das BMU im Februar 1999 den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd (im Folgenden: der Arbeitskreis) eingerichtet. Die Empfehlungen des Arbeitskreises dienen der Unterstützung des Bundes im Rahmen der Wahrnehmung seiner Aufgabe, gemäß § 9 a Abs. 3 Atomgesetz (ATG) Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten.

1.2 Auftrag

Der Arbeitskreis hat den Auftrag, ein nachvollziehbares Verfahren für die Auswahl von Standorten zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in Deutschland zu entwickeln. Das Verfahren soll die Beteiligung der Öffentlichkeit in geeigneter Form vorsehen und fundierte Kriterien beinhalten. Die Entwicklung soll auf wissenschaftlicher Basis sachorientiert, unvoreingenommen und ohne Ausschluss relevanter Aspekte erfolgen. Dabei sollen die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern berücksichtigt werden. Der Arbeitskreis soll seine Überlegun

gen schon während ihrer Entwicklung mit der nationalen und internationalen Fachwelt und mit der interessierten Öffentlichkeit erörtern.

Als Randbedingung für die Verfahrensentwicklung hat das BMU die folgenden zwei politischen Zielsetzungen vorgegeben:

- Alle radioaktiven Abfälle sollen in tiefen geologischen Formationen in Deutschland endgelagert werden.
- Für die Endlagerung aller Arten und Mengen radioaktiver Abfälle reicht ein Endlager aus, das ab 2030 betriebsbereit sein soll.

Es ist nicht die Aufgabe des Arbeitskreises, das Auswahlverfahren durchzuführen, das Verfahren bzw. die Kriterien auf die Auswahl oder Eignungsbeurteilung von Gorleben oder Konrad anzuwenden oder andere Standorte auszuwählen oder zu bewerten.

1.3 Arbeitsweise und Organisation

Der Arbeitskreis ist ein fachlich-wissenschaftliches Gremium, das im Rahmen der gesteckten Ziele unabhängig und frei von Vorgaben und Weisungen arbeitet. Das BMU hat bei der Berufung in den Arbeitskreis auf Ausgewogenheit hinsichtlich Personen und Institutionen geachtet, damit im Arbeitskreis ein weites Spektrum der in der Fachwelt zum Thema Endlagerung vertretenen Auffassungen repräsentiert ist. Mitglieder des Arbeitskreises sind Fachleute aus den Bereichen Geowissenschaften, Chemie, Physik, Mathematik, Bergbau, Deponietechnik, Ingenieurwesen und Öffentlichkeitsarbeit, die ausweislich ihrer bisherigen Arbeiten über einschlägige Kenntnisse auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle verfügen. Auch auf Anregung der Öffentlichkeit auf dem ersten Workshop und Gesprächsrunden des Arbeitskreises wurde zusätzlich ein Sozialwissenschaftler in den Arbeitskreis berufen. Der Arbeitskreis hat nun insgesamt 16 Mitglieder. Im Arbeitskreis werden Entscheidungen im Konsens angestrebt. Wissenschaftlich differierende Meinungen werden nicht überstimmt, sondern dokumentiert.

Der Arbeitskreis sucht von Anfang an den intensiven Austausch mit der interessierten Öffentlichkeit, um alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen und zugleich die Transparenz seiner Arbeiten sicherzustellen. Hierzu informiert sich der Arbeitskreis auch vor Ort über Aktivitäten im Ausland. Der Arbeitskreis legt dabei Wert darauf, direkte Informationen von verschiedenen Interessensvertretern zu bekommen.

Entsprechend den Schwerpunkten seiner Arbeit hat der Arbeitskreis zwei Arbeitsgruppen gebildet, die Arbeitsgruppe Kriterien und die Arbeitsgruppe Öffentlichkeit. Diese bestehen aus fünf bzw. sieben Mitgliedern, die der Arbeitskreis aus seinen Reihen nominiert hat. Den übrigen Mitgliedern des Arbeitskreises steht die Teilnahme offen.

Darüber hinaus wird der Arbeitskreis durch Forschungs- und Beratungsleistungen unterstützt. Die Vergabe dieser Aufträge und die fachliche Begleitung der Arbeiten erfolgen durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und das BMU. Zur organisatorischen Unterstützung des Arbeitskreises ist die Firma CCM Köln Corporate Communication Management GmbH beauftragt worden.

Das BMU unterstützt den Arbeitskreis bei der organisatorischen und wissenschaftlichen Arbeit und sorgt für eine ausreichende Finanzierung.

1.4 Öffentlichkeitsarbeit

Die Auswahl von Endlagerstandorten wird vom Arbeitskreis als eine Aufgabe in gesamtgesellschaftlicher Verantwortung angesehen. Deshalb bietet der Arbeitskreis jedem die Möglichkeit, sich zu informieren und Anregungen bzw. Rückmeldungen an den Arbeitskreis zu geben.

Mit seiner Öffentlichkeitsarbeit möchte der Arbeitskreis über seine Arbeit informieren, zur Mitwirkung anregen und damit die Voraussetzungen für die spätere Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Festlegung und Durchführung des Auswahlverfahrens verbessern.

Um diese Ziele zu erreichen,

- veranstaltet der Arbeitskreis öffentliche Workshops,
- führt der Arbeitskreis Gespräche, z.B. mit Bundes- und Landtagsabgeordneten, Verbänden, Kirchen, Gewerkschaften, Bürgerinitiativen und anderen „Stakeholdern“,
- informiert der Arbeitskreis auf seiner Homepage (www.akend.de) im Internet über seine Arbeitsfortschritte und nimmt über eine dort eingerichtete E-Mail-Adresse Anregungen auf,
- halten Arbeitskreismitglieder Vorträge und
- führen Arbeitskreismitglieder persönliche Gespräche mit Interessierten.

Der Arbeitskreis hat sich für seine Öffentlichkeitsarbeit ein Konzept erstellen lassen. Darin wird ihm empfohlen, seine Presse- und Medienarbeit zu intensivieren, um den Kreis der Interessierten zu erweitern.

Der Arbeitskreis lässt seine öffentlichkeitsgerichteten Aktivitäten evaluieren, um seine Öffentlichkeitsarbeit zu verbessern. Bisherige Ergebnisse der Evaluation sind u.a., dass der Arbeitskreis deutlicher machen sollte, wie er Anregungen aufnimmt, im Rahmen seines Auftrages klar Position zu den gegebenen Rahmenbedingungen bezieht, und wie und an welcher Stelle im Verfahren sozialwissenschaftliche Kriterien einbezogen werden.

2 Auswahlverfahren

2.1 Ziele und Anforderungen

Ziel des zu entwickelnden Auswahlverfahrens ist es, unter Beteiligung der Öffentlichkeit in nachvollziehbarer und verlässlicher Weise mögliche Endlagerstandorte zu finden. Anhand vorher festzulegender Kriterien sollen Schritt für Schritt diejeni

gen Gebiete, Standortregionen und schließlich Standorte ermittelt werden, die besonders günstige Voraussetzungen für den späteren Eignungsnachweis und seine Bestätigung in einem Genehmigungsverfahren bieten.

Das vom Arbeitskreis zu entwickelnde Auswahlverfahren beinhaltet zwei wesentliche Elemente. Erstes Element sind die Auswahlkriterien, die dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik genügen und, bezogen auf die Gesamtfläche Deutschlands, die Auffindung und Auswahl geeigneter Standorte zulassen müssen. Zweites Element ist das Konzept für eine breite Öffentlichkeitsbeteiligung in allen wesentlichen Schritten des Such- und Auswahlverfahrens.

Grundvoraussetzung für beide Elemente ist, dass die Verfahrensstruktur klar gegliedert und transparent gestaltet ist, so dass auch Außenstehende Gang und Sachgerechtigkeit des Verfahrens verfolgen sowie die Entscheidungen nachvollziehen können. Die Verfahrensgrundlagen sind zu Beginn festzulegen, um sachfremden oder willkürlichen Änderungen in der Vorgehensweise vorzubeugen. Die Entscheidungen beim Übergang von einem zum nächsten Verfahrensschritt sind zu begründen. Das Verfahren soll Neubewertungen von Entscheidungen vorhergehender Verfahrensschritte erlauben, sofern neu gewonnene Erkenntnisse dies erforderlich machen. Dieses iterative Vorgehen, das den Rücksprung zu vorhergehenden Verfahrensschritten ermöglicht, soll neben der Erhöhung der Transparenz die notwendige Flexibilität im Umgang mit Untersuchungsbefunden gewährleisten.

Die Kriterien dienen der Bewertung von Befunden und sind damit die Grundlage für Entscheidungen in den einzelnen Verfahrensschritten. Mit zunehmendem Verfahrensforgang können weiterführende Anforderungen notwendig werden. Die Kriterien müssen einerseits hinreichend konkret sein, um glaubwürdige Auswahlentscheidungen begründen zu können, andererseits müssen die Kriterien auch einen Ermessensspielraum eröffnen, damit nicht ein bei näherer Prüfung geeigneter Standort vorschnell wegen Nichterfüllung eines Kriteriums aufgegeben werden muss. Auch muss das Verfahren so strukturiert sein, dass nachvollziehbar bleibt, welche Datenbasis dem jeweiligen Verfahrensschritt zu Grunde liegen

hat. Deutlich ist dabei zwischen den Mindestanforderungen an einen Standort und den Kriterien für den Standortvergleich zu unterscheiden.

Die Auswahl geeigneter Standorte für die Endlagerung bedarf nicht nur einer fachlich fundierten Planungsgrundlage. Sie soll auch in einem transparenten Prozess erfolgen, in den die Öffentlichkeit von Anfang an einbezogen wird. Im Verlauf des Verfahrens sollen Interessen und Vorschläge von Betroffenen aufgegriffen und so Glaubwürdigkeit und Vertrauen aufgebaut werden.

2.2 Phasengliederung

Der Arbeitskreis ist der Auffassung, dass eine klare Strukturierung des gesamten Verfahrens erforderlich ist, um die Nachvollziehbarkeit späterer Entscheidungen über Endlagerstandorte zu gewährleisten. Akzeptanz lässt sich nur erreichen, wenn die Öffentlichkeit von Anfang an informiert und in geeigneter Form beteiligt ist.

Daher hat der Arbeitskreis neben der Entwicklung von geeigneten Standortauswahlkriterien die Aufgabe übernommen, Vorschläge für ein praxistaugliches Verfahren zur Beteiligung der Öffentlichkeit zu erarbeiten. Dieses soll nach dem Abschluss der Arbeiten des Arbeitskreises (Phase I) in den folgenden Phasen II (Aushandlung und Festlegung des Verfahrens) und III (konkrete Standortsuche und -festlegung) Anwendung finden.

Phase I: Verfahrensentwicklung (Mandat des Arbeitskreises)

In dieser Phase, die derzeit durchlaufen wird, entwickelt der Arbeitskreis ein Auswahlverfahren für die Standortsuche. Das Verfahren wird in dieser Phase noch nicht festgelegt. Die interessierte Öffentlichkeit wird über Internet (www.akend.de) informiert und an der Diskussion beteiligt. Der Diskurs mit der Fachöffentlichkeit wird in Gesprächen, Vorträgen und Publikationen geführt. In jährlichen Workshops tritt der Arbeitskreis an eine breite Öffentlichkeit. Der Arbeitskreis wird seine Aufgabe in Phase I bis zum Jahresende 2002 abschließen.

Phase II: Verfahrensfestlegung

Ziel dieser Phase ist die politische / rechtliche Verankerung des Auswahlverfahrens. In dieser Phase werden die vom Arbeitskreis entwickelten Kriterien und Verfahrensvorschläge in der Fachöffentlichkeit und mit den Akteuren des weiteren Prozesses der Standortsuche (u.a. Umweltorganisationen, Energiewirtschaft, Behörden und Politik) in einem Rahmen erörtert, der Kriterien fachlicher, gesellschaftlicher und politischer Repräsentativität und Legitimität genügt. Ein notwendiges Ergebnis dieser Phase muss ein breiter gesellschaftlicher und politischer Konsens über das weitere Vorgehen bei der Standortauswahl sein. Während der Phase II findet auch eine internationale Überprüfung der Ergebnisse aus Phase I statt. Für die Phase II wird ein Zeitraum von ca. zwei Jahren veranschlagt.

Phase III: Verfahrensdurchführung

In dieser Phase wird das Auswahlverfahren unter repräsentativer Beteiligung der gesellschaftlichen und politischen Kräfte, verstärkt mit Regional- und Standortbezug, durchgeführt. Die Dauer der Phase III ist in starkem Maß von der Anzahl der vorauszuwählenden Standorte und dem Tiefgang des Standortvergleichs abhängig.

Der erarbeitete Zwischenstand zur Durchführung der Phase II wird in Kapitel 7 dieses Zwischenberichtes beschrieben, der Zwischenstand zur Beteiligung der Öffentlichkeit in Phase III in Kapitel 8.

2.3 Abgrenzung

Der Entscheidungsprozess bis zur Errichtung eines Endlagers gliedert sich in die Abschnitte

- Standortauswahl
- Eignungsaussage zu Standort und Anlagenkonzept
- Genehmigung in einem Planfeststellungsverfahren.

Der Arbeitskreis ist nur im ersten Teil des Abschnittes "Standortauswahl" tätig, in dem das Verfahren für die spätere Standortauswahl entwickelt wird.

Es wäre ein Auswahlverfahren denkbar, das von der Ausweisung günstiger Standortregionen bis hin zur Eignungsaussage für einen konkreten Standort alle Verfahrensschritte erfasst. Die Festlegung eines solchen Auswahlverfahrens vor seiner Durchführung stößt aber an Grenzen, weil spätestens für die Eignungsaussage zu Standort und Anlagenkonzept Erkenntnisse aus einer Standortcharakterisierung durch Übertage- und Untertage-Erkundung benötigt werden. Somit stellt sich die Alternative, entweder das Auswahlverfahren zumindest teilweise gleichzeitig mit seiner Durchführung zu entwickeln oder im Auswahlverfahren auf eine abschließende Eignungsaussage für konkrete Standorte zu verzichten. Der Arbeitskreis hat sich zunächst für die zweite Alternative mit folgendem Verständnis entschieden:

1. Das Auswahlverfahren führt schrittweise zu Standortvorschlägen mit besonders günstigen Voraussetzungen für das Gelingen des späteren Eignungsnachweises. Es bietet folglich zwar gute Aussicht, aber letztlich keine Gewähr dafür, dass für einen der ausgewählten Standorte der Eignungsnachweis erfolgreich geführt werden kann.
2. Das Zurückstellen von Gebieten anhand von Kriterien muss bei der Verfahrensdurchführung nicht bedeuten, dass diese Gebiete ungeeignet sind. Es bedeutet nur, dass diese Gebiete im weiteren Auswahlverfahren zunächst nicht betrachtet werden, aber im Bedarfsfall später wieder in die Betrachtung einbezogen werden können. Es muss daher jeweils deutlich gemacht werden, aus welchem Grund Gebiete (zunächst) zurückgestellt werden.
3. Die Verfahrensstruktur muss und kann vor diesem Hintergrund die Möglichkeit des Rücksprungs in vorhergehende Verfahrensschritte vorsehen.
4. Das Auswahlverfahren erhebt nicht den Anspruch, alle günstigen Gebiete zu erfassen.

3 Rahmenbedingungen

3.1 Vorbemerkung

Ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte kann nur entwickelt werden, wenn zuvor die Rahmenbedingungen für das Verfahren und das Endlager festgelegt worden sind. Das BMU hat dem Arbeitskreis hier große Handlungsspielräume gelassen. Zum einen, damit der Arbeitskreis nicht in seiner fachlichen Arbeit zu stark vorgeprägt wird, zum anderen aber auch, damit für die Auseinandersetzung des Arbeitskreises mit der Öffentlichkeit Gestaltungsfreiräume bleiben.

In den folgenden Kapiteln werden diejenigen Rahmenbedingungen, die der Arbeitskreis bei der Entwicklung des Verfahrens und der zugehörigen Kriterien zugrunde gelegt hat, dargestellt und die dazu getroffenen Festlegungen erläutert. Sie betreffen die Schutzziele und Sicherheitsprinzipien der Endlagerung, Menge und Eigenschaften der endzulagernden Abfälle, den Isolationszeitraum, die Endlagerkonzeption und den Umgang mit Unsicherheiten.

Es ist vorgesehen, dass bei der Festlegung des Auswahlverfahrens in Phase II auch über die nachfolgend geschilderten Rahmenbedingungen diskutiert wird. Daraus können sich Veränderungen ergeben. Dann muss eventuell als Folge auch das Auswahlverfahren modifiziert werden.

Eine Modifikation der Rahmenbedingungen während der Durchführung des Auswahlverfahrens hält der Arbeitskreis für problematisch, weil Stringenz und Nachvollziehbarkeit des Verfahrens dadurch beeinträchtigt werden können.

3.2 Schutzziele und Sicherheitsprinzipien

Mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle werden zwei wesentliche Schutzziele verfolgt:

- Langzeitiger Schutz von Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen von Schadstofffreisetzungen aus den Abfallgebinden
- Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen (Nachsorgefreiheit).

Die Schutzziele bedürfen der weiteren Konkretisierung, um bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens einbezogen werden zu können. Hierzu werden die Sicherheitsprinzipien herangezogen, wie sie von der Internationalen Atomenergie - Organisation (IAEA) 1995 formuliert wurden (IAEA 1995), in dem „Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ festgelegt wurden (IAEA 1997), von der Europäischen Gemeinschaft übernommen wurden und seit 2001 in Deutschland Gesetzeskraft haben (ÜBEREINKOMMEN 1997):

- (P1) Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Mensch und Umwelt angemessen vor radiologischer und sonstiger Gefährdung geschützt werden.
- (P2) Die aus der Endlagerung resultierenden potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt sollen das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen. Künftigen Generationen sollen keine unangemessenen Belastungen aufgebürdet werden.
- (P3) Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Stoffe dürfen außerhalb der Grenzen nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.

Über diese international festgelegten Sicherheitsprinzipien hinaus wird vom Arbeitskreis zusätzlich gefordert:

- (P4) Entweder muss die Endlagerung unverzüglich vorangebracht werden, oder es müssen ausreichend Finanzmittel für ihre spätere Realisierung vorgehalten werden.

Die Normierungen im deutschen Recht tragen den vorstehend genannten Schutzzielen und Sicherheitsprinzipien Rechnung. Der Risikogedanke ist im Atomgesetz verankert (ATG). Weitere Sicherheitsprinzipien ergeben sich insbesondere

aus der Strahlenschutzverordnung (STRLSCHV 2001) für die Betriebsphase eines Endlagers dadurch, dass

(P5) jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden ist und

(P6) jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten sind,

aus dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG 1996) dadurch, dass

(P7) nachteilige Veränderungen des Grundwassers nicht zu besorgen sein dürfen

sowie aus den Sicherheitskriterien (BMI 1983) dadurch, dass

(P8) auch nach der Stilllegung Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen dürfen, die die Werte des § 47 der Strahlenschutzverordnung (STRLSCHV 2001) (0,3 mSv/a effektive Dosis) überschreiten.

Die zitierten Sicherheitskriterien werden derzeit überarbeitet.

Um den Schutzzielen Rechnung zu tragen, empfiehlt die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) zur Begrenzung potenzieller Freisetzungen in der Nachbetriebsphase die Optimierung des Strahlenschutzes in allen Phasen der Endlagergestaltung, insbesondere auch bei der Standortauswahl (ICRP 1998). Dies bedeutet die Anwendung eines qualifizierten Standortauswahlverfahrens un

ter Zugrundelegung eines gestuften Sicherheitskonzeptes (Mehrbarrierensystem) und die Auswahl eines robusten Standorts.

3.3 Menge und Eigenschaften der Abfälle

Der größte Teil der radioaktiven Abfälle fällt bei der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung an. Es handelt sich hierbei in erster Linie um Abfälle aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente, um direkt endzulagernde abgebrannte Brennelemente sowie um Betriebs- und Stilllegungsabfälle von Kernkraftwerken oder sonstigen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Aufgrund der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000 über die zukünftige Nutzung der Kernenergie ist die Menge dieser Abfälle begrenzt.

Radioaktive Abfälle fallen darüber hinaus in der Forschung, in der Medizin sowie bei der Nutzung von Strahlenquellen in der Industrie an, allerdings in einem sehr viel geringeren Umfang als bei der Stromerzeugung aus Kernenergie. Für diese Abfälle müssen auch nach Beendigung der Kernenergienutzung langfristig Entsorgungsmöglichkeiten bereitgestellt werden.

Neben der Einteilung in hochradioaktive (HAW), mittelradioaktive (MAW) und schwachradioaktive (LAW) Abfälle teilt man in Deutschland die radioaktiven Abfälle für die Endlagerung in wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ein. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten etwa 99 % der gesamten Radioaktivität, bestehen zu einem großen Teil aus langlebigen Radionukliden und machen in Abhängigkeit von der Art des Endlagergebundes ca. 10 % des gesamten Abfallvolumens aus. Vor allem die stark wärmeentwickelnden Abfälle, wie z.B. verglaste hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle (HAW) oder direkt endzulagernde abgebrannte Brennelemente, werden vor ihrer Endlagerung aus sicherheitstechnischen und ökonomischen Gründen für einige Jahrzehnte zum Abklingen der Wärmeleistung oberirdisch zwischengelagert. Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung tragen zu etwa 90 % zum gesamten Abfallvolumen bei und enthalten lediglich ca. 1 % der Radio

aktivität. Sie können – sofern ein Endlager vorhanden ist – sofort nach ihrer endlagergerechten Konditionierung ohne oberirdische Zwischenlagerung endgelagert werden.

Der voraussichtliche zeitliche Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen und an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist in den beiden folgenden Tabellen zusammengestellt, wobei der in der Vereinbarung vom 14. Juni 2000 festgelegte Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung berücksichtigt wurde.

Tab. 3-1: Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen bis 2040

	Bestand Ende 2000	Prognose 2001 – 2010	Prognose 2011 – 2020	Prognose 2021 – 2030	Prognose 2031 – 2040	Summe	Gesamt- volumen *
	Anzahl						m ³
HAW-Kokillen	84	4.582	112	0	0	4.778	908
Gebinde MAW (Q)	0	840	7.576	2.400	0	10.816	2.814
Kugeln AVR + THTR	908.705	0	0	0	0	908.705	1.890
	10 ³ kg						
Brennelemente LWR	3.142	3.962	1.819	24	0	8.947	18.258
Brennelemente VKTA	2,3	0	0	0	0	2,3	49
Brennelemente FRM-II	0	0,35	0,35	0,35	0,35	1,4	108
							ca. 24.000

* Randbedingungen:

Erläuterungen:

HAW: 4.778 Kokillen x 0,19 m³

Verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle

MAW (Q): 8.764 Kokillen x 0,19 m³

Konditionierte mittelradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle

2.052 Fässer x 0,56 m³

AVR+THTR: 450 Castor THTR x 4,2 m³

Brennelemente der Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR

LWR: 1.790 POLLUX x 10,2 m³

Brennelemente von Leichtwasserreaktoren

VKTA: 18 Castor MTR2 x 2,7 m³

Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors

FRM-II: 40 Castor MTR2 x 2,7 m³

Brennelemente des Forschungsreaktors München II

Tab. 3-2: Anfall an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bis 2040 [m³]

	Bestand Ende 2000	Prognose 2001 – 2010	Prognose 2011 – 2020	Prognose 2021 – 2030	Prognose 2031 – 2040	Summe
EVU	23.000	31.000	46.000	73.000	22.000	195.000
Öffentliche Hand	53.000	27.000	8.000	3.000	11.000	102.000
Summe	76.000	58.000	54.000	76.000	33.000	297.000

Wärmeentwickelnde Abfälle stellen aufgrund ihrer Strahlung und ihrer Wärmeentwicklung erhöhte Anforderungen an das zur Endlagerung vorgesehene Wirtsgestein. Möglicherweise negative Auswirkungen durch die Strahlung lassen sich durch eine Abschirmung kompensieren. Auslegungsbestimmend für ein Endlager mit wärmeentwickelnden Abfällen ist vor allem der Wärmeeintrag durch die direkt endzulagernden LWR-Brennelemente, gefolgt von den HAW-Kokillen. Alle anderen wärmeentwickelnden Abfälle spielen hinsichtlich des Wärmeeintrags in das Endlager, aber auch hinsichtlich der Radioaktivität der vor allem langlebigen Radionuklide eine untergeordnete Rolle.

Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sind in der Regel weniger qualifiziert konditioniert und heterogener in der Zusammensetzung als wärmeentwickelnde Abfälle. Bei ihnen ist aufgrund interner Prozesse grundsätzlich von einer Freisetzung von Gasen im Endlager auszugehen. Obwohl das Volumen der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bedeutend größer ist als das der wärmeentwickelnden Abfälle, ist das für die Endlagerung benötigte Gesteinsvolumen wesentlich kleiner.

Bei Zutritt von Feuchte in das Endlager ist sowohl bei wärmeentwickelnden Abfällen als auch bei Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit einer Gasbildung durch Korrosion der Abfallbehälter zu rechnen.

3.4 Isolationszeitraum

Ziel der Endlagerung ist es, die Abfälle sicher von der Umwelt zu isolieren. Die Güte der Isolierung hängt entscheidend vom Zeitraum ab, über den die radioaktiven Stoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers zurückgehalten

werden. Die Standortauswahl soll so erfolgen, dass ein möglichst langer Isolationszeitraum erreicht wird. Dabei sind sowohl das Abfallspektrum als auch die geologischen Zeiträume, für die nach wissenschaftlichen Erkenntnissen noch praktisch vernünftige Prognosen getroffen werden können, zu beachten.

Mit dem Auswahlverfahren sollen Standorte gefunden werden können, die günstige geologische Gesamtsituationen für die Errichtung eines Endlagers für alle radioaktiven Abfälle haben. Die radioaktiven Abfälle enthalten auch Radionuklide mit Halbwertszeiten, die bei weitem größer sind als die Zeiträume, für die praktisch vernünftige Prognosen von geologischen Entwicklungen möglich sind. Dies trifft insbesondere auf das in den abgebrannten Brennelementen enthaltene Uran zu. Uranerzvorkommen in der Natur zeigen aber auch, dass geologische Barrieren in der Lage sind, nachteilige Auswirkungen dieser Lagerstätten auf die Biosphäre langfristig zu vermeiden.

Nach wissenschaftlichen Erkenntnissen können praktisch vernünftige Prognosen über die geologische Standortentwicklung in günstigen Gebieten, wie sie auch in Deutschland existieren, über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre erstellt werden. Praktisch vernünftige geologische Prognosen sind Voraussetzung für den Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers, wie er im späteren Genehmigungsverfahren geführt werden muss.

Zur Entwicklung von quantitativen Kriterien für die Suche nach Endlagerstandorten mit günstigen geologischen Gesamtsituationen hat der Arbeitskreis festgelegt, dass der Isolationszeitraum der gesuchten Endlagerstandorte in der Größenordnung von einer Million Jahre liegen soll.

3.5 Endlagerkonzept

3.5.1 Endlagerung in geologischen Formationen und ihre Alternativen

Als wichtige Vorgabe für die Arbeit des Arbeitskreises wurde vom BMU festgelegt, dass in Deutschland alle Arten von radioaktiven Abfällen in einer tiefen geologi

schen Formation endgelagert werden sollen. In verschiedenen Ländern, die ebenfalls die Endlagerung insbesondere der hochradioaktiven Abfälle verfolgen, sind entsprechende politische Vorentscheidungen getroffen worden. Es werden aufwändige Forschungs- und Entwicklungsverfahren durchgeführt. Einige Länder haben bereits eine Standortvorauswahl eingeleitet. Mit dem Ziel, die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die konkrete Planung solcher Endlager zu schaffen, werden weltweit mehrere Untertagelabors betrieben. Darüber hinaus bestehen bereits geologische Endlager in Schweden und Finnland für schwach- und mittelradioaktive Abfälle und in den USA für langlebige transuranhaltige Abfälle. IAEA und OECD/NEA haben auf der Grundlage internationalen Expertenwissens Grundsätze für Planung und Sicherheit dieses Entsorgungsweges erarbeitet. Dieses Wissen steht dem Arbeitskreis für seine Aufgabe zur Verfügung. Des Weiteren erörtert er mit einschlägigen Organisationen im Ausland wesentliche Fragen der Endlagerkonzepte und Standortauswahlverfahren.

Als grundsätzlichen Vorteil der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sieht der Arbeitskreis, dass bestimmte Gesteinsformationen aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften und des Gebirgsbaus nur geringe Durchlässigkeiten gegenüber fluiden Phasen aufweisen oder im technischen Sinne sogar dicht sind. Sie sind z.T. über geologische Zeiträume hinweg in diesen Eigenschaften unverändert geblieben, so dass sie mit ihrem Isolationspotenzial Schadstoffe über Zeiten in der Größenordnung von einer Million Jahre von der Biosphäre fernhalten können. Voraussetzung ist allerdings die Identifizierung entsprechend geeigneter Gebirgsbereiche, z.B. mittels eines kriteriengesteuerten Standortauswahlverfahrens.

Dem Konzept der Isolation in tiefen geologischen Formationen der kontinentalen Erdkruste stehen verschiedene andere Entsorgungsalternativen gegenüber, die in der Vergangenheit diskutiert bzw. z.T. auch praktiziert wurden und werden. Dazu zählen:

- Transport in den Weltraum,

- Einlagerung im antarktischen Eis,
- Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer,
- Einlagerung im Meeresboden,
- oberflächennahe Endlagerung und
- oberflächennahe Zwischenlagerung.

Der **Transport in den Weltraum** ist ein Vorschlag, der in der frühen Konzeptfindungsphase vor allem in den USA für die Entsorgung langlebiger radioaktiver Abfälle diskutiert wurde. Diese Idee hat den Vorteil, dass die radioaktiven Abfälle endgültig aus dem menschlichen Lebensraum entfernt werden. Aus Kostengründen ist sie jedoch nur für sehr kleine Abfallmengen anwendbar. Zudem besteht ein erhebliches Risiko mit nicht kalkulierbaren Konsequenzen. Wenn eine weltweite Akzeptanz für diesen Entsorgungsweg überhaupt erreichbar wäre, so bliebe er doch wegen seiner anspruchsvollen Technik auf nur wenige Länder beschränkt.

Ein Konzept der Abfallisolierung stellt die **Einlagerung im antarktischen Eis** dar. Das antarktische Eis besteht ununterbrochen seit etwa 15 Millionen Jahren und ist großflächig bis zu 4 km mächtig. Es bestehen keine Zweifel daran, dass sich an dieser Situation in absehbarer Zukunft nichts Grundlegendes ändert. Dennoch bleiben wichtige Fragen hinsichtlich der geophysikalischen und geochemischen Eigenschaften der Eismassen und ihres Einflusses auf das globale Klima offen. Auch wären Änderungen der international geltenden gesetzlichen Bestimmungen und politischen Vereinbarungen erforderlich. Von keinem Land wird heute ein derartiges Konzept verfolgt.

Die **Versenkung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen im Meer**, wie sie nach klar festgelegten Bedingungen der IAEA erlaubt war, findet seit 1983 auf der Grundlage eines freiwilligen Moratoriums und ab 1993 nach einem Verbot der Vertragsstaaten der Londoner Konvention nicht mehr statt. Das Konzept zielte auf die Verbringung kurzlebiger Abfälle in Meerestiefen, in denen wegen geringer Strömung und hoher Wasserdichte eine Durchmischung - mit den entsprechenden

Konsequenzen für eine mögliche Radionuklidausbreitung - nur begrenzt stattfindet. Eine Versenkung hochradioaktiver Abfälle ins Meer mit langfristiger Anwendung des Verdünnungsprinzips wurde bisher von keiner Seite ernsthaft in Erwägung gezogen.

Eine andere, von einigen Mitgliedsstaaten der OECD/NEA Anfang der 80er Jahre untersuchte Endlageroption ist die **Einlagerung hochradioaktiver Abfälle im Meeresboden**. Die Tiefseeböden großer Ozeane besitzen in weiten Bereichen günstige Eigenschaften, und ihre mächtigen Sedimente haben ein hohes Rückhaltepotenzial. Die Wahrscheinlichkeit eines Störfalles ist relativ gering, vor allem wegen des oben angeführten eingeschränkten Radionuklidtransports durch sehr langsame Diffusion. Allerdings stehen keine erprobten Techniken für die Erschließung eines solchen Endlagers und die Abfalleinlagerung zur Verfügung. Eine solche Option würde allerdings eine Änderung der genannten internationalen Konvention erfordern. Diese Option wird nirgendwo aktiv verfolgt.

Die **oberflächennahe Endlagerung** von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen ist heute Stand von Wissenschaft und Technik. Viele Länder, auch in Europa, betreiben derartige Endlager. Dabei wird durch die Auswahl eines geeigneten Untergrundes mit einer geologischen Barriere und durch den Bau technischer und geotechnischer Barrieren die Isolation der Abfälle für die erforderlichen, relativ kurzen Zeiträume (in der Regel weniger als 1000 Jahre) sicher gestellt. Zudem werden die Anlagen überwacht. Danach sollen derartige Endlager frei gemessen und in den Status einer normalen Deponie überführt werden. Für hochradioaktive Abfälle scheidet ein derartiges Konzept aus Gründen der langen Abklingzeiten a priori aus.

Die **oberflächennahe Zwischenlagerung** radioaktiver Abfälle wird in verschiedenen Ländern mit der erklärten Absicht praktiziert, diese nach Entscheidung für ein Konzept und einen Standort endgültig zu beseitigen und endzulagern. Teilweise gibt es konkrete gesetzliche Vorgaben, nach denen die Zwischenlagerung nur für einen festgelegten Zeitrahmen (einige Jahrzehnte) zulässig ist, und die Bereitstellung eines Endlagers gefordert wird. In diesem Fall stellt die Zwischenlagerung

eine technische und administrative Vorstufe zur späteren Endlagerung dar. Sie unterliegt dabei einer strengen institutionellen Kontrolle. Dies gilt auch für die Zwischenlager in Deutschland.

In einigen Ländern, in denen die endgültige Beseitigung der Abfälle noch nicht abschließend konzipiert ist, stellt die langzeitige Zwischenlagerung der abgebrannten Brennelemente, zumindest auf absehbare Zeit, die Alternative zur Endlagerung dar. Hier stellen sich Fragen nach der Lebensdauer der technischen Komponenten und nach dem Wesen zukünftiger Gesellschaftsformen. Da der Zugang zu Zwischenlagern grundsätzlich zu jeder Zeit und mit relativ einfachen Mitteln möglich ist, erhebt sich die Forderung nach dauernder Überwachung, um eine Gewinnung der Kernbrennstoffe zu militärischen Zwecken zu unterbinden. Das impliziert die wesentlich weit reichende Forderung nach anhaltender Stabilität der heutigen Gesellschaftsform mit ihren Werten und Normen über entsprechend lange Zeiten. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass darüber eine sichere Prognose nicht möglich ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bei richtiger Standortwahl, d.h. bei Vorliegen einer günstigen geologischen Gesamtsituation am vorgesehenen Standort (einfacher geologisch-tektonischer Bau, Fehlen tief reichender Grundwasserleiter mit meteorischem Wasser, Fehlen rezenter Tektonik, Vorkommen gering permeabler Gesteine mit guten Rückhalteeigenschaften für Radionuklide, günstige gebirgsmechanische Eigenschaften der Endlagerformation), gegenüber den anderen Beseitigungsoptionen auf der Erde entscheidende Vorteile hat. Diese sind vornehmlich

- ein großer Abstand zwischen Abfällen und Biosphäre,
- eine in der Endlagertiefe geringe Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers, sofern vorhanden,
- ein gutes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber freigesetzten Radionukliden
- eine lange Stabilität des Gebirgskörpers und damit

- eine gute räumliche und zeitliche Charakterisierbarkeit des Standortes und gute zeitliche Prognostizierbarkeit seiner künftigen Entwicklung.

Damit kann eine Strahlenbelastung für Mensch und Umwelt ausgeschlossen werden. Menschliches Eindringen in ein verschlossenes geologisches Endlager im Kriegsfall oder durch Terrorismus ist nicht möglich. Eine geplante Rückholung der Abfälle ist nur mit erheblichen technischen und finanziellen Aufwendungen realisierbar.

Reparatur und langzeitige Überwachung des Endlagers sind bei einer derartigen auf Nachsorgefreiheit angelegten Konzeption prinzipiell nicht erforderlich. Das langfristige Verhalten tiefer geologischer Formationen lässt sich grundsätzlich besser prognostizieren als z.B. die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft. Besondere Überlegungen ergeben sich bezüglich der Überprüfung von Aussagen zur Langzeitsicherheit aus

- der Länge des Isolationszeitraums und
- der Unzugänglichkeit des verfüllten Endlagerbergwerks.

Grundsätzlich gilt, dass – gemessen an der Langlebigkeit der Abfälle – eine Beobachtung der im Endlager ablaufenden Prozesse, wie z.B. der geochemischen Wechselwirkungen, nur relativ kurzzeitig und dann nur eingeschränkt möglich ist. Etwaige Fehleinschätzungen werden womöglich erst nach sehr viel längerer Zeit erkennbar. Auch eine falsche Standortentscheidung wäre dann nicht korrigierbar, und Reparaturmaßnahmen im Endlager selbst wären nicht mehr möglich.

Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an das Verfahren zur Standortauswahl, zum Eignungsnachweis für Endlager und insbesondere auch an das Verfahren für den Langzeitsicherheitsnachweis. Dabei ist zu berücksichtigen, dass wesentliche Grundlagen für den Langzeitsicherheitsnachweis und die erreichbare Prognose-sicherheit bereits mit der Standortfestlegung geschaffen werden. Die Verfahren müssen daher methodisch richtig und in sich schlüssig sein, die rechtlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen in angemessener Weise und verbindlich erfüllen sowie für fachlich Außenstehende nachvollziehbar sein. Dazu gehört auch

die Vermittlung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen und des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik.

3.5.2 Mögliche Endlagerkonzepte in geologischen Formationen

In Europa und in den USA, in Kanada, Korea, Japan, Argentinien und China werden z.T. sehr unterschiedliche geologische Formationen auf ihre Eignung als Endlager für radioaktive, insbesondere hochradioaktive Abfälle hin untersucht. Zum Beispiel sind in Deutschland bereits Erfahrungen mit der Endlagerung schwach- und mittelfradioaktiver Abfälle im Salzgestein gemacht worden, liegt für die Schachtanlage Konrad im Tonstein ein Planfeststellungsantrag vor und ist der Salzstock Gorleben bis zum Moratorium im Jahr 2000 auf seine Eignung für die Endlagerung hochaktiver Abfälle geprüft worden. In Frankreich, der Schweiz und Belgien haben Tonsteine bzw. Tone hohe Priorität, während in Schweden und Finnland Granit als Endlagergestein vorgesehen ist.

Die technischen Anforderungen an die Endlagerkonzepte leiten sich aus der Toxizität und aus der Langlebigkeit der zu beseitigenden Abfälle und z.T. aus deren Wärmeleistung ab. Einen gewissen Einfluss auf die Langzeitsicherheit haben auch die Konditionierung und Verpackung der Abfälle. Entscheidend für die Langzeitsicherheit eines Endlagers sind aber das Isolationspotenzial der jeweiligen Endlagerformation sowie die darauf abgestimmten technischen und geotechnischen Konzepte zum langfristig wirksamen Verschluss von Einlagerungshohlräumen und Schächten. Darüber hinaus sind für die Endlagerplanungen die Erfahrungen, die im Bergbau, Tunnelbau und bei der Untergrundspeicherung von Kohlenwasserstoffen gesammelt wurden, wesentlich. Das gilt insbesondere auch für salinare Formationen, in denen seit Mitte des 19. Jahrhunderts intensiv Bergbau auf Steinsalz und Kalisalze stattfindet. Dazu kommt, dass in Deutschland mehrere Untertagedeponien für gefährliche chemisch-toxische Abfälle im Salzgestein betrieben werden. Anders ist die Sachlage bei Tonsteinen, die nur selten Gegenstand bergbaulicher Aktivitäten sind. Hier gilt es vor allem, die Erfahrungen aus dem Tunnelbau zu nutzen und, was besonders wichtig ist, die Erfahrungen mit Dichtkörpern

auf Tonbasis, die zum Verschluss von Bergwerken oder Untertagespeichern entwickelt werden.

Wichtige Voraussetzungen für ein sicheres Endlager ist das Vorhandensein einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Dazu gehören eine hinreichend große Tiefenlage von mehreren 100 Metern (langer Transportweg für möglicherweise freigesetzte Radionuklide) und das weitgehende Fehlen von Grundwasserzuflüssen im Einlagerungsbereich. Darüber hinaus sollen geotektonische Veränderungen, die die Integrität eines Endlagers gefährden könnten, langfristig nicht zu besorgen sein. Die sicherheitsrelevanten Vorgänge im Endlager und seiner Umgebung müssen auch langfristig mit hinreichender Verlässlichkeit prognostiziert werden können. Derartige Verhältnisse können letztendlich nur durch geeignete Untersuchungen an den in Frage kommenden Standorten festgestellt werden. Darum gliedern sich die verschiedenen nationalen Programme sehr häufig in die Stufen Konzeptfindung, standortunabhängige Forschung und Entwicklung, Standortauswahl, Standortbenennung und Standortuntersuchung, bevor es zu einer konkreten Endlagerplanung mit Genehmigungsverfahren kommt.

Die Endlagerkonzepte werden darüber hinaus auch von Strahlenschutzaspekten und technischen Überlegungen bestimmt. Für konditionierte, feste Abfälle kommen als konkrete Optionen nur die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, in Salzkaavernen und in Bergwerken in Betracht. Der Nachteil von tiefen Bohrlöchern und Kavernen ist, dass sie nicht zugänglich sind und nur von übertage mit Abfällen befüllt werden können. Dadurch wird die Einlagerung unter kontrollierten Bedingungen erheblich erschwert, wenn nicht praktisch unmöglich.

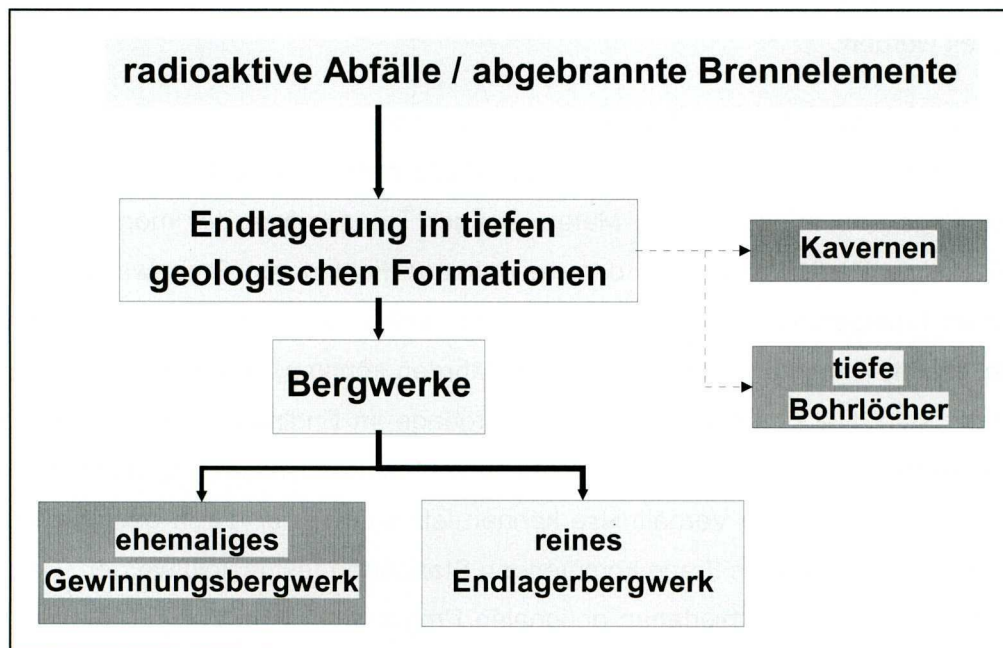


Abb.1: Bergtechnische Möglichkeiten und Konzepte der Endlagerung in tiefen Gesteinsformationen

Das Bergwerkskonzept wird derzeit von allen auf diesem Gebiet arbeitenden Ländern favorisiert. Vorteil ist die bedarfsgerechte Bergwerksplanung mit der Möglichkeit einer genauen Erkundung aller wichtigen geologischen Parameter und des Einsatzes zusätzlicher geotechnischer Barrieren, wo erforderlich. Für den Fall, dass eine längere Überwachung und Kontrolle der Abfälle angestrebt oder sogar eine Rückholung der Abfälle für die Zukunft nicht ausgeschlossen wird, ist unter sicherheitstechnischen Aspekten nur das Bergwerkskonzept geeignet. Zu seiner Realisierung sind geeignete Einlagerungs- und Handhabungstechniken, ein umfassendes Systemverständnis für das Endlager einschließlich der resultierenden Konsequenzen für Mensch und Umwelt sowie die Führung eines Langzeit-Sicherheitsnachweises notwendig. Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden in Ergänzung zu den bereits erreichten technischen und wissenschaftlichen Kenntnissen weiterführende Forschung und Entwicklung betrieben. In Deutschland haben entsprechende Arbeiten für die Endlagerung im Salzgestein bereits einen hohen Stand erreicht. Die Entwicklung von Endlagertechniken für Granit und Tonsteine sowie für Tuffgestein (in den USA) wird kontinuierlich vorangetrieben.

3.5.3 Ein-Endlager-Konzept

Vom BMU wurde für die Arbeiten des Arbeitskreises das Ein-Endlager-Konzept vorgegeben (vgl. Kap. 1.2). Es zeichnet sich dadurch aus, dass alle Arten radioaktiver Abfälle (einschließlich abgebrannter Brennelemente) gemeinsam in nur einem Endlager im tiefen geologischen Untergrund endgelagert werden sollen. Im Gegensatz dazu steht das Mehr-Endlager-Konzept, in dem die Abfälle nach bestimmten Zuordnungsmerkmalen auf mehrere Endlager aufgeteilt werden. Zuordnungsmerkmale können z.B. sein, ob die Abfälle Wärme erzeugen oder nicht oder ob sie vor allem langlebige oder kurzlebige Radionuklide enthalten. Die Endlager befinden sich an verschiedenen Standorten und wahrscheinlich in unterschiedlichen Gesteinskörpern.

Der Arbeitskreis prüft, ob und ggf. welche Auswirkungen die Vorgabe des Ein-Endlager-Konzeptes auf die Entwicklung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte und das spätere Auswahlverfahren selbst haben könnte. Auswirkungen wären u.U. dann zu erwarten, wenn sich aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Abfälle differenzierte Anforderungen an das Endlager bzw. Endlagergestein ergäben. Die Aufteilung der radioaktiven Abfälle auf mehrere Endlager könnte vor allem dann Sinn machen, wenn sich gegenüber dem Ein-Endlager-Konzept sicherheitstechnische Vorteile ergäben, wenn der Nachweis der Langzeitsicherheit der Endlagerung leichter zu führen wäre oder wenn ohne diese Aufteilung die Auswahl eines Standortes mit günstigen Voraussetzungen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle durch die zusätzliche Einlagerung der übrigen Abfälle erschwert bzw. eingeschränkt würde.

Der Arbeitskreis hat sich bisher vor allem mit den folgenden für seine Arbeiten wichtigen Einflussgrößen befasst, die Auswirkungen auf das Auswahlverfahren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit haben können:

- Wärmeeintrag,
- Gasentwicklung der Abfälle und
- chemische Wechselwirkungen unterschiedlicher Abfallarten.

Im Folgenden wird der bisherige Stand der Diskussion zu diesen Themenkomplexen dargestellt.

Auswirkungen des Wärmeeintrags

Durch die gemeinsame Einlagerung von wärmeerzeugenden Abfällen und Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in einem Endlager besteht im Prinzip die Möglichkeit, dass die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch die wärmeerzeugenden Abfälle thermisch beeinflusst und erhöhten Temperaturen ausgesetzt werden. Unter diesen Randbedingungen wären folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Erhöhte Gasbildung aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch erhöhte Temperaturen.
- Komplexere Geochemie der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch erhöhte und sich zeitlich verändernde Temperaturen. Die hydrochemischen Verhältnisse (Kap. 5.1.3.2) und das Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden (Kap. 5.1.3.3) lassen sich schwerer beurteilen. Die Beschreibung des Freisetzungs- und Mobilitätsverhaltens von Radionukliden aus dieser Abfallart wäre dadurch erschwert.
- Möglicherweise erhöhte Mobilität der aus den wärmeerzeugenden Abfällen freigesetzten Radionuklide aufgrund der erhöhten Gasbildung aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Zur Verhinderung einer nachteiligen thermischen Beeinflussung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen den Einlagerungsfeldern der einzelnen Abfallarten erforderlich. Es ist zu erwarten, dass der Sicherheitsabstand in verschiedenen Wirtsgesteinen unterschiedlich ist. Insofern sind Aussagen über das tatsächlich benötigte Endlagervolumen wirtsgesteinsabhängig.

Auswirkungen der Gasbildung

Abfälle können in einem Endlager durch Korrosion, Radiolyse oder mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile Gase entwickeln. Schwach- und mittlerradioaktive Abfälle (LAW/MAW) setzen auch ohne äußere Einflüsse aufgrund des Wassergehaltes im Gebinde und der mikrobiellen Zersetzung Gas frei. Bei Kontakt mit externen Wässern oder Laugen wird die Gasentwicklung erhöht. Hochradioaktive Abfälle (HAW/abgebrannte Brennelemente (BE)) hingegen produzieren Gase im Wesentlichen bei Kontakt mit externen Wässern und Laugen. Die gesamte Gasentwicklung von HAW/BE liegt deutlich niedriger als die von LAW/MAW.

Bei der Standortauswahl für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle muss also darauf geachtet werden, dass keine Wässer oder Laugen an die Abfälle herantreten, um die Gasproblematik zu vermeiden. Bei der Standortwahl für die Endlagerung von LAW/MAW müssen dagegen die Auswirkungen der Gasentwicklung immer beachtet werden. Bei Umsetzung des Ein-Endlager-Konzeptes ergeben sich daher zusätzliche Anforderungen an die Standortauswahl.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Gasbildungsrate der Abfallströme sind die Temperatur, die Feuchte und das chemische Milieu. Die sicherheitstechnische Bedeutung der Gasbildung in der Nachbetriebsphase liegt im Druckaufbau am Einlagerungsort und damit in der Gefährdung der Integrität der Barrieren. Auch eine Beschleunigung des Radionuklidtransports durch Gase ist nicht auszuschließen.

Bei der Beurteilung der Gasbildung unter dem Aspekt der Standortauswahl eines Endlagers muss man zwischen permeablen und niedrig permeablen Wirtsgesteinen unterscheiden.

Wirtsgesteine mit ausreichend großer Permeabilität sind in der Lage, die entstehenden Gase in ihren Porenräumen oder Kluftsystemen aufzunehmen und den Druckaufbau zu begrenzen. Ein permeables Wirtsgestein verfügt aber per Definition über mögliche Flüssigkeitszutritts- und -abflusswege, d.h. es ist bei Einlagerung von Abfällen in solche Gesteine von einer zusätzlichen externen Gasentwicklung aufgrund von Korrosion und/oder Radiolyse auszugehen. Diese Gas

menge muss zusammen mit der intern freigesetzten Gasmenge aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bei der Abschätzung des notwendigen Speichervolumens ebenso berücksichtigt werden wie der schnellere Druckaufbau durch den Wärmeeintrag der wärmeerzeugenden Abfälle. Eine Endlagerung in permeablem Wirtsgestein stellt dann für alle Arten von Abfällen eine günstige Situation zur Beherrschung der Gasproblematik dar, wenn die Permeabilität und die räumlichen Abmessungen des Wirtsgesteins so groß sind, dass keine nachteiligen Veränderungen des Isolationsvermögens der geologischen Gesamtsituation durch die Gasentwicklung induziert werden. Allerdings erleichtert die erhöhte Permeabilität zugleich den Radionuklidtransport mit dem Grundwasser.

Bei **Wirtsgesteinen mit geringer Permeabilität** kann es durch Gasbildung zu einem Druckaufbau kommen, der zur Schädigung des Gebirges führen kann. Ein niedrig permeables Wirtsgestein ist unter dem Gesichtspunkt der Gasentwicklung für LAW/MAW daher weniger günstig. Hingegen ist die Endlagerung von HAW/BE in niedrig permeablen und insbesondere trockenen Wirtsgesteinen unter dem Aspekt der Gasproblematik unkritisch, da nur bei Wasserzutritt mit einer relevanten Gasproduktion zu rechnen ist. Der Gasproblematik bei LAW/MAW kann durch Konditionierungsmaßnahmen bzw. technische Gegenmaßnahmen im Endlager (z.B. Gassammelräume) entgegengewirkt werden. Allerdings können Gassammelräume mit sicherheitstechnischen Nachteilen im Hinblick auf den angestrebten langfristigen Einschluss der Abfälle verbunden sein.

Hinsichtlich der Gasproblematik im Endlager ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass nach gegenwärtiger Einschätzung für Abfälle mit unterschiedlicher Gasentwicklung jeweils verschiedene geologische Voraussetzungen als vorteilhaft zu bezeichnen sind. Sie lassen sich am einfachsten und effektivsten bei einem Mehr-Endlager-Konzept realisieren. Im Hinblick auf die Wirtsgesteinspermeabilität resultiert dabei allerdings für die LAW/MAW-Abfälle mit interner und externer Gasentwicklung ein Zielkonflikt zwischen der Vermeidung kritischer Gasdrücke im Endlager und der Verzögerung des Radionuklidtransports mit dem Grundwasser. Mögliche Lösungsansätze für das Ein-Endlager-Konzept liegen in der Reduzierung der Gasentwicklung durch Abfallbehandlungsmaßnahmen oder in technischen Maß

nahmen im Endlager zur Vermeidung zu hoher Gasdrücke, wie z.B. Gassammelräumen.

Auswirkungen von chemischen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Abfallprodukten

Treten bei einem Endlager nach dem Ein-Endlager-Konzept Fluide in Kontakt mit den eingelagerten Abfällen, sind chemische Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallprodukten im Prinzip möglich. Durch geochemische Wechselwirkungen können die Korrosion der Abfallstoffe sowie die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Lösungen beeinflusst werden. Die veränderten Lösungen wirken sich auf das Korrosionsverhalten der Abfälle und die Mobilität der freigesetzten Nuklide aus. Die wichtigsten Einflussgrößen hierbei sind:

Komplexbildner: Einige LAW/MAW-Abfälle enthalten Dekontaminationsmittel. Bestandteile dieser Dekontaminationsmittel sind u.a. Komplexbildner wie Oxalate und EDTA. Durch diese Komplexbildner kann die Mobilität von Radionukliden wesentlich erhöht werden.

Organische Bestandteile: Ein Teil der LAW/MAW-Abfälle enthält organische Bestandteile. Bei der mikrobiellen Degradation dieser Bestandteile entsteht CO_2 . Eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration führt zur Erhöhung der Carbonatkonzentration im Fluid. Diese wirkt sich direkt auf die Löslichkeit der langlebigen Aktiniden aus. Die Mobilität der Radionuklide ist damit erheblich höher, die Konzentration kann um mehrere Größenordnungen steigen. Einige Bestandteile der Abfälle können als Kolloide in Lösung gehen und somit die Mobilität der Radionuklide erhöhen.

pH-Wert: Der pH-Wert bestimmt vor allem die Löslichkeit der Radionuklide, d.h. die Konzentration der in Lösung befindlichen und damit transportfähigen Radionuklide. Die Abhängigkeit der Löslichkeit vom pH-Wert ist sehr stark ausgeprägt. Vermischungen zwischen Lösungen aus dem HAW/BE- und dem LAW/MAW-Bereich resultieren in schwer oder nicht prognostizierbaren pH-Werten. Damit fehlen belastbare Löslichkeitsdaten für Langzeitsicherheitsanalysen.

Redoxbedingungen: In tiefen Endlagern werden i.a. reduzierende geochemische Bedingungen erwartet. Unter diesen Randbedingungen liegen die meisten im HAW/BE vorhandenen langlebigen Radionuklide, z.B. der Elemente Np, U, Pu, Tc im schwerlöslichen vierwertigen Zustand vor. Oxidierende Abfallkomponenten aus dem LAW/MAW-Bereich können die günstigen Redoxbedingungen verschlechtern mit der Folge, dass dann mit höheren Löslichkeiten und damit höherer Mobilität langlebiger Radionuklide gerechnet werden muss.

Falls geochemische Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Abfallarten im Grubengebäude nicht ausgeschlossen werden können, ist die Komplexität des geochemisch geführten Langzeitsicherheitsnachweises signifikant höher als bei strikter Trennung der verschiedenen Abfallarten. Die Mindestanforderung an eine strikte Trennung ist die Forderung, dass die verschiedenen Einlagerungsbereiche im Endlagerniveau nicht mit Strecken verbunden sein dürfen. Es ist gegenwärtig nicht auszuschließen, dass eine mögliche Vermischung von Radionuklidströmen aus unterschiedlichen Endlagerbereichen auch im Fernbereich des Endlagers verhindert werden muss.

Zusammenfassung

Der Arbeitskreis hat die Auswirkungen des vom BMU vorgegebenen Ein-Endlager-Konzeptes auf die Entwicklung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte unter den Aspekten Wärmeeintrag, Gasentwicklung der Abfälle und chemische Wechselwirkungen unterschiedlicher Abfallarten geprüft.

Aufgrund der bisherigen Überlegungen zum Wärmeeintrag und zu den chemischen Wechselwirkungen ist der Arbeitskreis der Auffassung, dass die strikt getrennte Ablagerung verschiedener Abfallarten geboten ist. Dies lässt sich bei einem Ein-Endlager-Konzept durch konsequente räumliche Trennung der Endlagerbereiche für HAW/BE einerseits und gering wärmeentwickelnde Abfälle andererseits realisieren. Allerdings ist hierbei der Langzeitsicherheitsnachweis u.U. schwieriger zu führen als bei einem Mehr-Endlager-Konzept.

Im Hinblick auf die Gasentwicklung kann der Arbeitskreis Konsequenzen auf das Auswahlverfahren nicht ausschließen. In Abhängigkeit vom Ausmaß der Gasent-

wicklung können für unterschiedliche Abfälle Wirtsgesteine mit unterschiedlichen Permeabilitäten erforderlich sein. In diesem Fall würde eine Trennung der Abfälle in einem Endlager allein nicht ausreichen, sondern die Abfälle müssten auf zwei oder mehr Endlager in unterschiedlichen Formationen aufgeteilt werden.

Insgesamt wird die Auswahl an Standorten, die alle Anforderungen optimal erfüllen, bei einem Ein-Endlager-Konzept wahrscheinlich eingeschränkt sein.

3.5.4 Rückholbarkeit

Das Thema "Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus dem Endlager" wird seit einigen Jahren international verstärkt diskutiert. Darunter wird die Möglichkeit verstanden, eingelagerte Abfälle im Bedarfsfall ohne großen technischen Aufwand aus einem Endlager zurückzuholen. Für diese Option werden vor allem ethische, ökonomische und sicherheitsbezogene Argumente genannt. Insbesondere die sicherheitsbezogenen Argumente sind umstritten. Im Vordergrund der Diskussion steht die Rückholung abgebrannter Brennelemente. Die Rückholung (anderer) hochradioaktiver Abfälle und insbesondere schwach- und mittelfradioaktiver Abfälle wird nur in einzelnen Ländern erwogen.

Bei allen heute diskutierten Plänen zur Rückholbarkeit wird letztlich die Endlagerung angestrebt. Auf dem Weg dorthin werden mehrere Phasen mit fortschreitender Verfüllung von Einlagerungsbereichen, Zugangsstrecken und Schächten durchlaufen. Der Zugang zu den Abfällen wird von Phase zu Phase schwieriger, der technische Aufwand für die Rückholung nimmt zu. Nach Verschluss des Endlagers ist die Rückholung nur noch mit bergmännischen Verfahren möglich. Über die genaue Ausgestaltung und Dauer der Phasen existieren keine einheitlichen Vorstellungen. Für den Zeitraum mit technisch relativ einfacher Rückholbarkeit werden international mehrere Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte diskutiert.

Die technische Umsetzung von Rückholbarkeitskonzepten ist u.a. vom Wirtsgestein abhängig. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Gesteine erfordern unterschiedliche technische Lösungen und unterschiedlichen Aufwand für die Aufrechterhaltung der Zugangsmöglichkeit an die Abfälle. Deshalb kann die

Absicht der Rückholbarkeit sowohl die Entscheidung für oder gegen bestimmte Wirtsgesteine als auch die Standortauswahl beeinflussen. Allerdings ist Rückholbarkeit bisher bei keinem Auswahlverfahren für Endlagerstandorte berücksichtigt worden.

Vor diesem Hintergrund musste der Arbeitskreis klären, ob und gegebenenfalls in welcher Form Rückholbarkeit bei der Verfahrensentwicklung für die Standortauswahl zu berücksichtigen ist. Eine solche Berücksichtigung setzt voraus, dass Rückholbarkeit mit folgenden sicherheitsbezogenen Grundsätzen der Verfahrensentwicklung in Einklang steht:

- Bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens steht die geologische Barriere im Vordergrund (s. Kap. 3.5.5).
- Mit dem Auswahlverfahren sollen Gebiete, Regionen und Standorte mit im Hinblick auf die Langzeitsicherheit besonders günstigen geologischen Gesamtsituationen identifiziert werden (s. Kap. 4 u. 5).

Mit diesen Grundsätzen wird erreicht, dass die Langzeitsicherheit des Endlagers auf einem sorgfältig ausgewählten passiven und damit wartungsfreien Sicherheitssystem beruht. Ohne Phase der Rückholbarkeit mit erleichtertem Zugang zu den Abfällen wird der passiv sichere Endlagerzustand rasch erreicht.

Soll die einfache Rückholbarkeit der Abfälle möglich sein, wird der passiv sichere Zustand später erreicht. Bis dahin sind aktive Sicherheitsbeiträge in Form von Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen erforderlich, deren Durchführung kaum mit der erforderlichen Zuverlässigkeit garantiert werden kann. Da die im Hinblick auf Langzeitsicherheit bzw. Rückholbarkeit günstigen Gesteinseigenschaften nicht identisch sind, kann die frühe Berücksichtigung von Rückholbarkeit bei der Standortauswahl zudem zur Konzentration auf Gebiete, Regionen oder Standorte mit weniger günstigen geologischen Gesamtsituationen führen.

Aus diesem Grund sieht der Arbeitskreis keinen Anlass, die Rückholbarkeit von Abfällen aus dem Endlager bei der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen. Er wird vielmehr seinen konsequent sicherheitsbezogenen Ansatz durch Konzentration

on auf ein Endlagersystem mit allein passiver Sicherheit und Betonung der Langzeitsicherheit bei der Standortwahl weiter verfolgen.

Der Verzicht auf die Berücksichtigung der Rückholbarkeit bei der Verfahrensentwicklung und -anwendung für die Standortauswahl schließt allerdings keineswegs aus, dass dieser Aspekt in die abschließende Standortentscheidung mit einfließt. Am Ende des Auswahlverfahrens kann nämlich aus der dann noch verbliebenen Gruppe mehrerer Standorte mit im Hinblick auf die passive Sicherheit übereinstimmend günstigen Verhältnissen derjenige mit Vorteilen für die Rückholbarkeit ausgewählt werden.

3.5.5 Relative Bedeutung geologischer und technischer Barrieren

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit weltweit das Mehrbarrierenprinzip angewandt. Ziel der Abstützung auf mehrere Barrieren ist die Verhinderung eines Schadstoffaustrages im geforderten Isolationszeitraum, wobei die Leistung der Barrieren in ihrer Wirkung als Gesamtsystem liegt. Die einzelnen Komponenten des Systems müssen dabei aufeinander abgestimmt sein und sollen sich in ihrer zeitabhängigen Wirksamkeit ergänzen.

Dies gilt insbesondere für die beiden Hauptgruppen der geologischen und technischen Barrieren. Die Wirksamkeit technischer Barrieren ist nämlich von den geologischen Verhältnissen abhängig, und auch umgekehrt beeinflusst die Endlagerkonzeption mit den technischen Barrieren den Charakter einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Beispiel dafür ist das Konzept der Endlagerung abgebrannter Brennelemente im klüftigen Festgestein (z.B. Kristallin). Hier kompensieren die sehr aufwendigen technischen Barrieren, z.B. Kupferbehälter und Bentonit-Versatz, den Nachteil des flüssigkeitsdurchströmten Gebirges. Auf der anderen Seite setzen das Funktionieren und die Wirksamkeit dieser technischen Barrieren ein geologisches Umfeld voraus, das die notwendigen stabilen hydrochemischen Bedingungen gewährleistet. In Kontakt mit Salzlösung beispielsweise wäre ein Kupferbehälter keine langfristig wirksame Barriere.

Für die Entwicklung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte ist es also notwendig festzulegen, ob ausgehend von einer technisch ausgerichteten Endlagerkonzeption eine dazu passende geologische Umgebung gesucht werden soll, oder ob umgekehrt zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation gesucht werden soll, deren Barrierewirkung durch an sie angepasste technische Barrieren ergänzt wird. Bei der Entscheidung zwischen diesen Alternativen hat der Arbeitskreis für die Einschätzung der Bedeutung der Barrieren dem Aspekt der Langzeitsicherheit ein besonderes Gewicht zugemessen. Die in die Abwägung einfließenden Vor- und Nachteile der Alternativen sind im Folgenden zusammengestellt (vgl. auch Tab.3-3).

Alternative 1 (Schwerpunkt geologische Barrieren):

Das geologische Umfeld übernimmt die Hauptlast der Barrierewirkung. Die technischen Barrieren fungieren als Ergänzung.

Vorteile:

Geologische Strukturen haben sich überwiegend über sehr lange Zeiträume entwickelt, und auch der Stofftransport in flüssiger Phase im tiefen Untergrund laufen nur sehr langsam ab, so dass Veränderungen im geologischen Barriersystem durch eine für die Langzeitsicherheit erforderliche Trägheit gekennzeichnet sind. Diese Prozesse füllen Zeitskalen von Millionen Jahren und können für ähnlich lange Zeiträume in der Zukunft abgeleitet werden.

Geologische Barrieren zeichnen sich zudem durch große Mächtigkeiten aus. Sie stellen ein robustes System dar, welches infolge seiner Isolationswirkung über eine lange Zeitskala Sicherheitsreserven besitzt und sich unempfindlich gegenüber wechselnden Einflüssen in der Vergangenheit gezeigt hat.

Begründet sich der Sicherheitsnachweis eines Endlagers auf einen langzeitigen dichten Einschluss der Abfälle, so ist dies im Wesentlichen an das plastisch/viskoplastische Verhalten einer geologischen Formation (Ton/Salz) gebunden. Das heißt, die Hauptlast im Barriersystem liegt unter Kreditnahme dieser vorteilhaften Eigenschaften auf den geologischen Barrieren.

Bei der Betrachtung der Langzeitsicherheit ist die Einschätzung des zukünftigen Verhaltens geologischer Strukturen und Formationen anhand nachvollziehbarer geologischer Abläufe in der Vergangenheit möglich. Die gute Prognostizierbarkeit der Verhältnisse in der Endlagerregion kann sich somit direkt auf eine gut bekannte oder ermittelbare geologische Geschichte stützen. Dabei liefern natürliche Analoga als Indikatoren wichtige Erkenntnisse über unterschiedliche geologische Prozesse (siehe Kap. 5.1.3.11).

Der Verweis auf anschauliche natürliche Analoga trägt zur Nachvollziehbarkeit von daraus abgeleiteten Empfehlungen bei und ist als integrativer Bestandteil der Sicherheitsbetrachtung und des fortlaufenden Prozesses der Vertrauensbildung in der Öffentlichkeit zu sehen. Gerade die langdauernden Zeiträume, in denen Prozesse in der Natur ablaufen und die für die Prognose einer sicheren Zukunft eines Endlagers herangezogen werden, sind für die allgemeine Öffentlichkeit schwer vorstellbar. Unter Zuhilfenahme von natürlichen Analoga als „geowissenschaftlichen Demonstrationsobjekten“ können Unsicherheiten bezüglich der Vorstellung eines sicheren Endlagers abgebaut und das Verständnis in der Öffentlichkeit gesteigert werden.

Nachteile:

Geologische Formationen und Strukturen können sehr heterogen aufgebaut sein. Ihre Einschätzung verlangt ein Verständnis um die Komplexität der Qualität als Barriere. Dies bedeutet hinsichtlich der Standorterkundung und der gewinnbaren Datengrundlage für den Nachweis der Langzeitsicherheit aufwendige und detaillierte Verfahren zur Erfassung der geologischen Situation.

Die geologischen Verhältnisse und die langfristigen geologischen Entwicklungen sind nicht veränderbar. Es ist es nicht möglich, die Geologie zu verbessern. Aufgezeigte Defizite müssen in Kauf genommen werden oder zur Wahl eines anderen Standortes führen. Ein Barriersystem, dessen Sicherheitswirkung im Wesentlichen auf einer geologischen Barriere mit dichtem Einschluss beruht, würde zum Beispiel das Messen und Kontrollieren bei der Überwachung von Teilsystemen des Endlagers erschweren.

Ein Endlager in einem Bergwerk, dessen Sicherheitsnachweis im Wesentlichen auf der Leistung der geologischen Barrieren aufbaut, muss trotzdem immer mit einem geotechnischen Bauwerk, dem Schachtverschluss, verschlossen werden.

Alternative 2 (Schwerpunkt technische Barrieren):

Die technischen Barrieren übernehmen die Hauptlast. Das geologische Umfeld bietet nur die Rahmenbedingungen für die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren.

Vorteile:

Technische Materialien (wie z.B. Kupfer für die Abfallbehälter) sind in sehr reiner Form herstellbar. Die Zusammensetzung von technischem Material (z.B. Industriebentonit als Versatzmaterial) ist mit geringen Schwankungsgrenzen einstellbar. Ihr Materialverhalten kann daher rechnerisch einfacher dargestellt werden als das von natürlichen Materialien.

Nachteile:

Technische Barrieren weisen, ausgenommen der Schachtverschluss, eine relativ geringe wirksame Dicke auf. Für den Nachweis der Robustheit sind erhebliche Untersuchungen erforderlich.

Die Einschätzung der Leistungsfähigkeit technischer Barrieren ist an den Stand der Wissenschaft in der Materialforschung gebunden und beruht auf weniger Erfahrungen aus der Vergangenheit bezüglich einer langzeitigen Materialsicherheit. Der Sicherheitsnachweis für technische Barrieren füllt daher eine nur relativ kleine Zeitskala.

Zusammenfassung

Generell gilt, dass nur ein vollständiges und abgestimmtes Barriersystem den Einschluss der Schadstoffe im Endlager gewährleisten kann. Unter Abwägung der dargestellten Vor- und Nachteile kommt der Arbeitskreis zu der Einschätzung, dass die geologischen Barrieren (inklusive Schachtverschluss) im Hinblick auf die

Langzeitsicherheit die Hauptlast tragen sollen. Technische Barrieren können ergänzende Funktionen übernehmen und zusätzliche Sicherheit bieten.

Der Arbeitskreis entscheidet sich deshalb im Hinblick auf das zu entwickelnde Auswahlverfahren für die Alternative, zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation zu suchen, in welcher die Barrierewirkung angepasster technischer Barrieren als Ergänzung dient.

Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind vielfältig und zum Teil gut erforscht. Dadurch bieten sie nach Auffassung des Arbeitskreises die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Auswahl von Regionen mit günstigen geologischen Gesamtsituationen.

<p>Der Arbeitskreis entscheidet sich deshalb im Hinblick auf das zu entwickelnde Auswahlverfahren für die Alternative, zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation zu suchen, in welcher die Barrierewirkung angepasster technischer Barrieren als Ergänzung dient.</p> <p>Die geologischen Verhältnisse in Deutschland sind vielfältig und zum Teil gut erforscht. Dadurch bieten sie nach Auffassung des Arbeitskreises die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Auswahl von Regionen mit günstigen geologischen Gesamtsituationen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung geologischer • Gute Prognostizierbarkeit bei • Vergleich mit natürlichen • Analogie als • Demonstrationsobjekten 	
<ul style="list-style-type: none"> • Technische Materialien sind in • geringer Form (Kugelfür • Adalbedürftig) und nach • definierter Rezeptur her- • stellbar (z. B. Industrie-Ber- • tonit) • Verhalten von technischem • Material ist aufgrund bekannter • Zusammensetzung • technisch leicht darstellbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Materialdicke • Geringe Robustheit ge- • geringer äußerer Einflüssen • Sicherheitsnachweis schwer • da keine langstetigen Erfahr- • ungen, Erproben nur für • begrenzten Zeitraum • möglich 	<p>Technische Barrieren</p>

3.6 Umgang mit Unsicherheiten

In jedem Verfahrensschritt eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte treten Unsicherheiten auf, die bei den Entscheidungsprozessen dargestellt und berück-

Bei der Anwendung des Standortbewertungsverfahrens ergeben sich Unsicherheiten

schritten nach sich ziehen. Diese Neubewertung ist mittels iterativer Vorgehensweise vorzunehmen.

Verbleibende Unsicherheiten können akzeptiert werden, wenn sie die Bewertung, ob ein Standort die geforderten Eigenschaften erfüllt, nicht beeinflussen.

4 Entwicklung der Verfahrensstruktur

4.1 Einbindung der Verfahrensstruktur in das Gesamtverfahren

Im folgenden wird der gegenwärtige Stand der Entwicklung der Struktur des Auswahlverfahrens vorgestellt. Dieses in der jetzigen Phase I des Gesamtverfahrens durch den Arbeitskreis zu entwickelnde Verfahren wird als Vorschlag in Phase II eingebracht, dort unter Beteiligung der Öffentlichkeit endgültig festgelegt (gegebenfalls mit Änderungen des Verfahrens) und anschließend in Phase III gleichfalls mit Öffentlichkeitsbeteiligung in der konkreten Standortsuche umgesetzt. Die hier vorgestellte Verfahrensstruktur ist also ein konzeptioneller Vorschlag für die Umsetzung des Auswahlverfahrens in Phase III.

4.2 Allgemeine Verfahrensmerkmale

Das Auswahlverfahren gliedert sich in verschiedene **Verfahrensschritte**, die logisch aufeinander aufbauen. Damit wird die Forderung nach Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Verfahrens erfüllt. Jedem Verfahrensschritt sind bestimmte **Kriterien** zugeordnet, mit deren Hilfe entschieden wird, welche Gebiete im weiteren Suchverfahren verbleiben, zurückgestellt bzw. ausgeschlossen werden (siehe Abb. 4-1).

In dem Verfahren werden sowohl Ausschluss- als auch Abwägungskriterien benutzt. Die **Ausschlusskriterien** dienen dem Ausschluss nicht geeigneter Flächen. Sie sind während des gesamten Verfahrensablaufs zu beachten. Damit ist sicher

gestellt, dass die im Verfahren verbleibenden Flächen gewisse Mindestanforderungen erfüllen.

Die **Abwägungskriterien** dienen der vergleichenden Bewertung von Flächen. Sie ermöglichen die Identifizierung von Flächen mit günstigen Voraussetzungen für die Endlagerung und führen darüber hinaus zur Erfüllung des bei der Standortauswahl zu beachtenden Abwägungsgebotes. Diese günstig erscheinenden Flächen werden weiterverfolgt, die übrigen werden zurückgestellt. Die Zurückstellung bedeutet nicht, dass diese Flächen tatsächlich weniger geeignet sein müssen.

Die Struktur des Verfahrens bietet die **Möglichkeit des Rücksprungs**, und zwar nach Schritt 3, in dem untersuchungswürdige Flächen erreicht sind. D.h. von einem Verfahrensschritt kann in einen früheren Verfahrensschritt zurückgegangen werden, wenn dies notwendig ist. Das wäre dann der Fall, wenn ein Verfahrensschritt in eine Sackgasse geführt hat (z.B. Wegfall aller Flächen durch neue Erkenntnisse, die die Erfüllung von Ausschlusskriterien bedeuten würden). Dann können vorher zurückgestellte Flächen wieder in das weitere Verfahren einbezogen werden. Dies ist gerechtfertigt, weil diese Flächen die Mindestanforderungen erfüllen und nicht weniger geeignet sein müssen als diejenigen, die zunächst aussichtsreicher erschienen, was sich aber bei näherer Untersuchung nicht bestätigte.

Die Rücksprungmöglichkeit im Verfahren ist nicht zu verwechseln mit „Beliebigkeit“ des Verfahrens, denn die vor Verfahrensdurchführung in Kriterienform gegossenen Anforderungen an Flächen bleiben bestehen.

Bei dem Suchverfahren findet **keine Vorfestlegung** auf ein bestimmtes **Wirtsgestein** statt, weil ein geeigneter Endlagerstandort nicht allein durch das Wirtsgestein, sondern durch eine günstige geologische Gesamtsituation am Standort bestimmt wird. Ausgangspunkt des Suchverfahrens ist die gesamte Fläche Deutschlands, d.h. es findet auch **keinerlei räumliche Vorfestlegung** statt.

Der gegenwärtige Stand der Entwicklung der Verfahrensstruktur ist der Abb. 4-1 zu entnehmen. Im folgenden werden die einzelnen Verfahrensschritte kurz erläutert.

4.3 Die Verfahrensschritte

Ausgehend von einer „weißen“ Deutschlandkarte werden im **ersten Verfahrensschritt** die Gebiete identifiziert, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle offensichtlich ungünstig sind. Die dazu erforderlichen Kriterien hat der Arbeitskreis erarbeitet (Vulkanismus, großräumige Hebungen/Senkungen, Störungszonen, seismisch aktive Gebiete, siehe Kap. 5.1.2). Diese Gebiete, die aus geowissenschaftlicher Sicht die Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden vom Verfahren ausgeschlossen.

Die aus dem ersten Verfahrensschritt resultierenden Gebiete werden im **zweiten Verfahrensschritt** weiter betrachtet. Dabei werden diejenigen Gebiete identifiziert, die günstige geologische Voraussetzungen für die Endlagerung aufweisen. Dies geschieht mittels eines umfassenden Katalogs geowissenschaftlicher Kriterien. Diese sind vom Arbeitskreis teilweise schon erarbeitet worden. Gebiete, die aus geowissenschaftlicher Sicht die Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden vom Verfahren ausgeschlossen.

Im **dritten Verfahrensschritt** werden nur die Gebiete mit günstigen geologischen Voraussetzungen weiter betrachtet. Bei diesem Schritt werden Ausschlusskriterien aus dem Bereich der sozialwissenschaftlichen Kriterien (s. Kap: 5.2) angewandt. Gebiete, die diese Kriterien nicht erfüllen, werden gleichfalls ausgeschlossen. Da die planungswissenschaftlichen Kriterien von der Entwicklung des Planungsrechts und anderer Rechtsgebiete abhängen, kann der Arbeitskreis diese Kriterien nicht endgültig festlegen, sondern er kann nur Hinweise darauf geben, was zu regeln ist und wie bei der konkreten Standortsuche mit entsprechenden Kriterien umgegangen werden muss. Als Ergebnis dieses Verfahrensschrittes bleiben diejenigen Gebiete übrig, die günstige geologische Voraussetzungen aufweisen und nicht aus planungsrechtlichen oder sozioökonomischen Gründen ausgeschlossen sind.

Damit ist ein erster wichtiger Meilenstein der Standortsuche erreicht, da jetzt die Gebiete identifiziert sind, welche die **Mindestanforderungen** bezüglich einer günstigen geologischen Gesamtsituation und darüber hinaus auch die sozialwissenschaftlichen Mindestanforderungen für die Einrichtung eines Endlagers erfüllen.

Wie groß die verbleibenden untersuchungswürdigen Gebiete sein werden, ist derzeit unklar. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass diese Gebiete große Flächen umfassen.

Der **vierte Verfahrensschritt** hat das Ziel, die nach dem dritten Schritt verbliebenen Gebiete auf flächenmäßig kleinere Regionen einzuengen. Dazu müssen innerhalb der Gebiete diejenigen Regionen identifiziert werden, die günstigere Voraussetzungen für ein Endlager bieten als andere Regionen. Dies geschieht durch Anwendung eines umfassenden Kriteriensatzes (geowissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Kriterien), wobei den Kriterien jetzt die Funktion von Abwägungskriterien zukommt.

Die Einengung der Gebiete auf kleinere Regionen kann vorgenommen werden, indem die nach ihrer Bedeutung gewichteten Abwägungskriterien angewandt werden. Es werden also zunächst Regionen identifiziert, die am aussichtsreichsten erscheinen, günstige Voraussetzungen für die Endlagerung zu haben. Die Anwendung gewichteter Kriterien führt im Ergebnis zu einer Rangfolge der untersuchungswürdigen Flächen innerhalb der identifizierten Regionen.

In diesem Verfahrensschritt sind sicherheitsanalytische Modellrechnungen heranzuziehen, um z.B. Datenunsicherheiten im Hinblick auf das Isolationsvermögen der geologischen Situation bewerten zu können. Dies setzt konkrete Vorstellungen über das Anlagenkonzept voraus.

Als Ergebnis des vierten Verfahrensschrittes ergibt sich eine Auflistung der Regionen, die als besonders aussichtsreich für weitere Untersuchungen erscheinen. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist auch bekannt, welche Wirtsgesteine bzw. welche geologische Strukturen für ein mögliches Endlager in Frage kommen. Damit ist ein weiterer wichtiger Meilenstein des Verfahrens erreicht.

Der **fünfte Verfahrensschritt** hat zum Ziel, innerhalb der aussichtsreichen Regionen besonders aussichtsreiche Standorte auszuweisen. Es wird also jetzt von der Region auf einzelne Standorte übergegangen. Gegenwärtig werden hierfür zwei Verfahrensmöglichkeiten diskutiert.

Die erste Möglichkeit besteht darin, diesen Schritt mittels des Kriteriums „**Freiwilligkeit**“ oder „Bereitschaft“ in Frage kommender kommunaler Gebietskörperschaften umzusetzen. Dabei werden innerhalb der Regionen mit aussichtsreichen Voraussetzungen Kommunen gesucht, die geowissenschaftliche Standortuntersuchungen auf ihrem Gebiet zulassen wollen.

Die zweite Möglichkeit besteht in der Durchführung regionaler Mediationsverfahren. Denkbar ist auch eine Kombination beider Ansätze. Sachlich sind beide Vorgehensweisen gerechtfertigt, weil alle Regionen für die Auswahl eines Endlagerstandortes aussichtsreiche Voraussetzungen haben. Wie der fünfte Verfahrensschritt genau beschaffen sein wird, ist derzeit noch in Bearbeitung. Dies gilt insbesondere auch für die Beantwortung der Frage, was geschieht, wenn sich keine Gebietskörperschaft anbietet oder wenn alle Gebietskörperschaften ihre Zustimmung zu Standortuntersuchungen zurückziehen.

Für den Fall, dass sich innerhalb der bislang betrachteten Regionen keine Gebietskörperschaft anbietet, ist ein Rücksprung in den Verfahrensschritt 4 vorgesehen, um aus den Gebieten, welche die Mindestanforderungen erfüllen, weitere Regionen auszuwählen, in denen Standorte gesucht werden können.

Im Ergebnis des fünften Verfahrensschrittes verbleiben einige (wenige) Standorte für die nähere Untersuchung.

Im **sechsten Verfahrensschritt** werden erste geowissenschaftliche Untersuchungen an den Standorten durchgeführt (übertägige Erkundung). Damit soll geklärt werden, ob die erwarteten positiven Standorteigenschaften bestätigt wurden. Zudem dienen die neu gewonnenen Daten der abschließenden vergleichenden Bewertung der Standorte. Hierzu werden wiederum Vergleichskriterien aus allen Kriteriengruppen herangezogen. Im Ergebnis werden Standorte identifiziert, welche die höchste potenzielle Eignung aufweisen (es kann auch nur ein Standort höchster potenzieller Eignung übrig bleiben). Es findet also eine nochmalige Abwägung auf der Ebene der Standorte statt. Diese Standorte sind dann - außerhalb des Suchverfahrens und an dieses anschließend - auf ihre tatsächliche Eignung

hin zu untersuchen. Hierzu gehören dann vor allem die untertägige Erkundung und standortspezifische Sicherheitsanalysen.

Für den Fall, dass die erwarteten positiven Standorteigenschaften nicht bestätigt werden, ist ein Rücksprung in den Verfahrensschritt 5 oder sogar 4 notwendig und zulässig, falls alle im Verfahrensschritt 5 ermittelten Standorte untersucht wurden und ein negatives Ergebnis brachten,.

Auf der Basis der Untersuchungsbefunde wird im **siebten Verfahrensschritt** in den betroffenen Gemeinden die Bereitschaft für weitere Schritte (z.B. untertägige Erkundung) mit Blick auf die Errichtung eines Endlagers abgefragt. Damit könnte zugleich die Aufstellung von standortspezifischen Prüfkriterien für die spätere Eignungsuntersuchung einhergehen. Sie würden die Bewertung der Untersuchungsbefunde, die bei den Eignungsuntersuchungen anfallen, transparenter machen. Dies beträfe insbesondere die Kernfrage, bei welchen Befunden ein Standort nicht geeignet wäre.

Für den Fall, dass sich keine Gemeinde zu einer Eignungsprüfung bereit erklärt, ist ein Rücksprung in den Verfahrensschritt 6 vorgesehen.

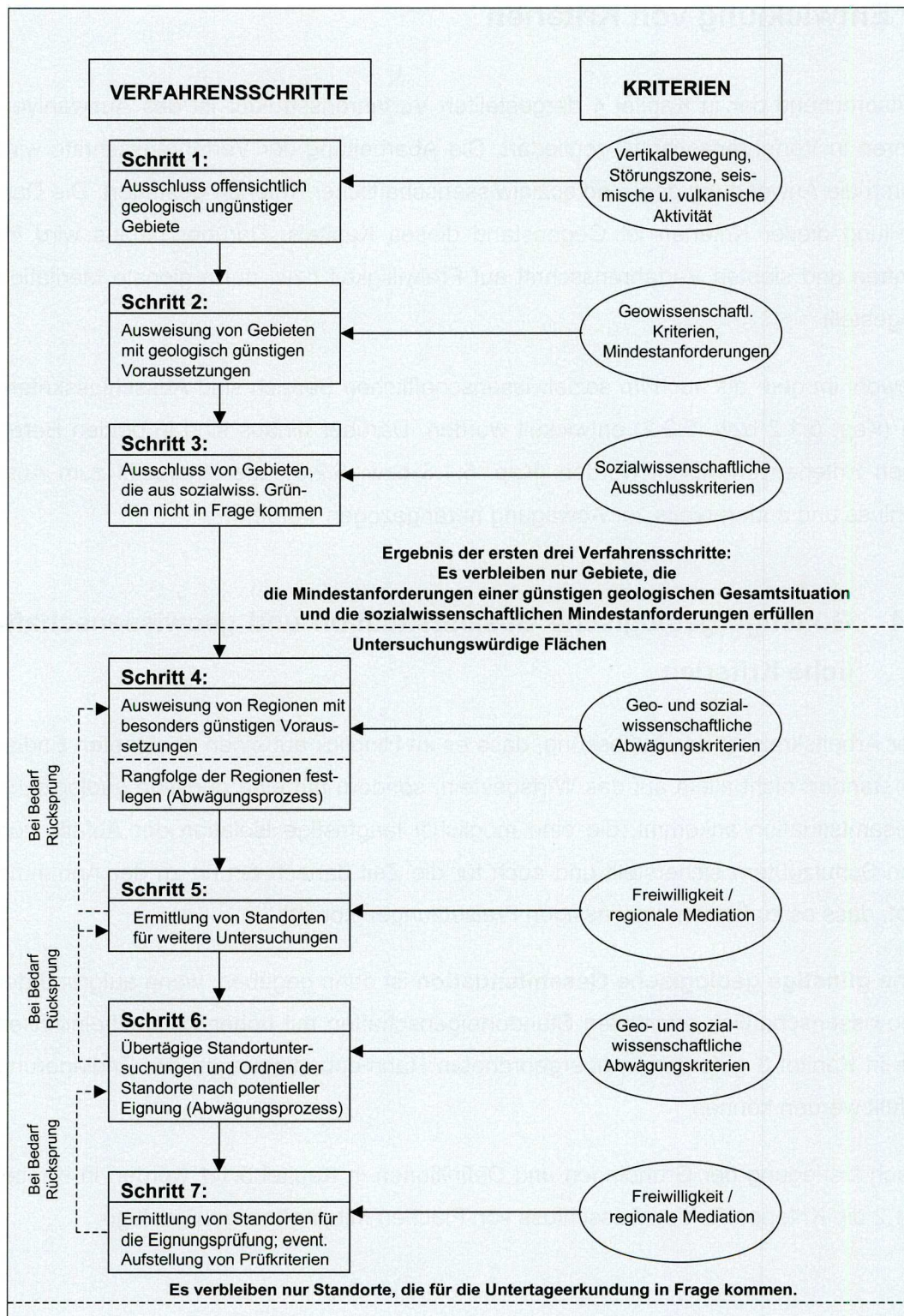


Abb. 4-1: Übersicht über die Verfahrensschritte

5 Entwicklung von Kriterien

Entsprechend der in Kapitel 4 dargestellten Verfahrensstruktur ist das Auswahlverfahren in Verfahrensschritte gegliedert. Die Abarbeitung der Verfahrensschritte wird durch die Anwendung geo- und sozialwissenschaftlicher Kriterien gesteuert. Die Darstellung dieser Kriterien ist Gegenstand dieses Kapitels. Darüber hinaus wird im fünften und siebten Verfahrensschritt auf Freiwilligkeit bzw. auf regionale Mediation abgestellt.

Sowohl im geo- als auch im sozialwissenschaftlichen Bereich sind Ausschlusskriterien (Kap. 5.1.2 bzw. 5.2.2) entwickelt worden. Darüber hinaus sind in beiden Bereichen Kriterien entwickelt worden (Kap. 5.1.3 bzw. 5.2.3), die einerseits zum Ausschluss und andererseits zur Abwägung herangezogen werden.

5.1 Günstige geologische Gesamtsituation und geowissenschaftliche Kriterien

Der Arbeitskreis ist der Auffassung, dass es im Hinblick auf einen geeigneten Endlagerstandort nicht allein auf das Wirtsgestein, sondern auf eine günstige geologische Gesamtsituation ankommt, die eine möglichst langfristige Isolation der Abfälle von den Schutzgütern sicherstellt und auch für die Zeit danach Grund zu der Annahme gibt, dass es zu keinen unzulässigen Freisetzungen kommt.

Eine **günstige geologische Gesamtsituation** ist dann gegeben, wenn aufgrund der geowissenschaftlich ermittelten Standorteigenschaften mit hoher Wahrscheinlichkeit die in Kapitel 3 geforderten übergeordneten Rahmenbedingungen der Endlagerung erfüllt werden können.

Nach Darlegung der Grundlagen und Definitionen in Kapitel 5.1.1 werden in Kapitel 5.1.2 die Kriterien für den Ausschluss von Flächen mit ungünstigen geologi-

schen Verhältnissen dargestellt, und in Kapitel 5.1.3 die Kriterien, mit denen günstige geologische Gesamtsituationen identifiziert und beurteilt werden können.

5.1.1 Grundlagen und Definitionen

Für die Darlegung der geowissenschaftlichen Kriterien werden folgende Begriffe definiert:

Geologische Barrieren: Geologische Einheiten zwischen Einlagerungsbereich und Biosphäre, die eine Schadstoffausbreitung be- oder verhindern.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss.

Wirtsgestein: Das Gestein, in das die Abfälle eingelagert werden.

Endlagerbereich: Gebirgsbereich eines Endlagerbergwerkes, der von der geometrisch einhüllenden Fläche um das Endlagerbergwerk umschlossen wird.

Einlagerungsbereich: Bereich eines Endlagerbergwerkes, in dem Abfälle eingelagert werden und der anschließend gegen das übrige Grubengebäude abgeschlossen wird.

5.1.2 Kriterien für ungünstige geologische Verhältnisse

Der Arbeitskreis kam überein, dass vor der Auswahl von Standorten mit besonders günstigen Voraussetzungen für die Eignung als Endlagerstandort mit Hilfe von Kriterien die Gebiete ausgewiesen werden sollen, die offensichtlich besonders ungünstige Voraussetzungen aufweisen (Ausschlusskriterien).

Damit sind Gebiete gemeint, in denen das Barriersystem eines in einer Tiefe von etwa 1000 m befindlichen Endlagers über Millionen von Jahren wesentlich beeinträchtigt oder dessen Entwicklung nach Maßstäben der praktischen Vernunft nicht prognostiziert werden kann.

Für die Ausweisung dieser Gebiete war es zunächst notwendig, Auswirkungen von geologischen und geophysikalischen Vorgängen auf ein Endlager mit seinem Barriersystem zu betrachten. Dazu wurden Szenarien über Vorgänge identifiziert, die zur Beeinträchtigung der Sicherheit eines Endlagers führen können:

- Freilegung des Endlagers
- Reduzierung der geologischen Barriere
- Veränderung der Grundwasserverhältnisse
- Schaffung von Wegsamkeiten durch Störungen und Klüfte
- Änderung der Deckgebirgsmächtigkeit
- Gas-/Lösungszutritte im Endlager
- Magmenzutritt ins Endlager
- Vergrößerung der Auflockerungszonen im Nahbereich der Hohlräume
- Überdeckung durch Oberflächengewässer
- Erhöhung der Gebirgs-/Endlagertemperatur.

Die Beurteilbarkeit aller Szenarien ist abhängig vom vorliegenden Kenntnisstand. Für die Ableitung von Kriterien war es daher notwendig, die vorliegende Informationsbasis zu prüfen und vorhandene Indikatoren zu berücksichtigen. Nach Klärung dieser Voraussetzung hat der Arbeitskreis folgende vier Kriterien, deren Nichterfüllung zum Ausschluss von Gebieten im Standortauswahlverfahren führt, identifiziert:

- "Keine Hebung/Senkung von mehreren Millimetern pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum" (Kriterium "Großräumige Vertikalbewegungen")
- "Keine aktiven Störungszonen im Endlagerbereich" (Kriterium "Aktive Störungszonen")
- "Kein quartärer oder zu erwartender Vulkanismus in der Endlagerregion" (Kriterium "Vulkanische Aktivität")
- "Keine seismische Aktivität größer als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 im Endlagerbereich" (Kriterium "Seismische Aktivität").

Bei der Herleitung dieser Kriterien wurde die Abhängigkeit vom jeweiligen Kenntnisstand und der Datenbasis deutlich. Zusätzlich zeigte sich, dass die mit den Kriterien verbundenen Szenarien in engem Zusammenhang untereinander stehen und eine getrennte Betrachtung der beteiligten geologischen Vorgänge nicht immer möglich ist.

Auch die Problematik der Begrenzung der betroffenen Gebiete wurde offensichtlich (BRÄUER & JENTZSCH 2001). Für eine Ausweisung von Gebieten, die aus dem Auswahlverfahren ausscheiden sollen, war es daher notwendig, für jedes der vier genannten Kriterien eine Überprüfung der Anwendbarkeit in Bezug auf die Abgrenzung einzelner Gebiete durchzuführen.

5.1.2.1 Großräumige Vertikalbewegungen

Basis für eine Benennung von Gebieten mit Vertikalbewegungen von mehreren Millimetern pro Jahr in Deutschland bilden die Karten des Bundesamtes für Geodäsie und Kartografie (BGK) bzw. Karten der geologischen Landesämter sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen zu speziellen Gebieten (z.B. Rheinischer Schild, Küstenländer).

Vertikalbewegungen sind ein Ausdruck geodynamischer Aktivität und damit potenzieller Gefährdung für ein Endlager. Im kleinräumigen Bereich können sie auch im

Zusammenhang mit Grundwasser-Absenkungen bzw. untertägigen Flutungen (zumeist durch bergbauliche Aktivitäten) auftreten.

Bei der Abgrenzung des für die Anlage eines Endlagers offensichtlich ungünstigen Gebietes mit erhöhten Vertikalbewegungen müssen natürliche und anthropogene, also durch menschliche Aktivitäten hervorgerufene Bewegungen unterschieden werden. Für die Ausweisung der Gebiete, die für die Anlage eines Endlagerstandortes auszuschließen sind, werden zunächst im wesentlichen die großräumigen natürlichen und nicht reversiblen Vertikalbewegungen herangezogen.

Tektonische Hebungen von über einem Millimeter pro Jahr würden - bei Annahme der Konstanz und bei gleichzeitiger Erosion - ein in 1000 m Tiefe errichtetes Endlager in einer Million Jahre freilegen. Für den Arbeitskreis gelten daher Gebiete mit großräumigen natürlichen Vertikalbewegungen in der Größenordnung von über einem Millimeter pro Jahr als ungünstig für die Auswahl eines Endlagerstandortes. Diese Gebiete sollten für die Standortsuche ausgeschlossen werden.

Probleme können sich bei der exakten und anwendbaren Abgrenzung der ungünstigen Gebiete ergeben. Dies gilt speziell im Zusammenhang mit anthropogenen Bewegungen. Vertikalbewegungen eines Gebietes sind eng verknüpft mit dem Auftreten geodynamischer Aktivitäten und sollten im Zusammenhang mit Erdbeben und der Verteilung von Störungszonen interpretiert werden. Randgebiete und kleinräumigere Senkungsgebiete (z.B. Subrosionszonen) sollten einer Einzelprüfung unterzogen werden.

5.1.2.2 Aktive Störungszonen

Der Begriff "Aktive Störungszone" steht sowohl für den Prozess als auch für das Ergebnis des Prozesses. Eine Störung ist in der breitesten Definition ein tektonischer oder atektonischer Vorgang, der die primäre, d.h. bei der Bildung eines Gesteinsverbandes entstandene, Lagerungsform verändert. Damit umfasst dieser Begriff sowohl die plastische als auch die mit Bruch verbundene Verformung. Bei der mit Bruch verbundenen Verformung des Gesteinsverbandes kann es einer

seits zu Verwerfungen (mit Gesteinsversatz) und andererseits zu Zerrüttungszonen kommen.

Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz werden bei der herkömmlichen Geländekartierung oder mit der Seismik erkannt und dokumentiert. Zerrüttungszonen werden mit den traditionellen Kartierungsmethoden in der Regel nicht erkannt. Zu ihrer Lokalisierung sind spezielle Methoden erforderlich, wie z.B. die Fernerkundung oder die Geoelektrik, die Feuchtigkeitsanomalien registriert, oder weitere geophysikalische Verfahren.

Die Genese der Störungen oder Störungszonen in Raum und Zeit ist in vielen Gebieten im Detail nicht befriedigend aufgeklärt. Das geologische Faktenmaterial reicht in der Regel nur für eine sehr grobe Rekonstruktion der Bewegungsereignisse aus.

Als "aktive Störungen" werden im allgemeinen Störungen mit Bewegungen im neotektonischen Zeitabschnitt bezeichnet. Dieser Zeitabschnitt reicht bis in die Gegenwart und beginnt mit der Basis des Neogen (Miozän bis Pliozän) bzw. mit der Basis des Rupel (Unteroligozän), dessen marine Referenzfläche ein absolutes Alter von 34 Millionen Jahren hat. Diese geologische Formation ist z.B. in Norddeutschland über ausgedehnte Flächen nachweisbar. Die jüngeren, quartären (pleistozänen) bruchtektonischen Bewegungen sind dagegen schwerer fassbar, da deren Basis keine eindeutige Zeitmarke darstellt, an der sich Bewegungen ablesen lassen. Bei fehlendem Neogen bzw. Rupel - wie in weiten Teilen Süddeutschlands - wird versucht, mit Hilfe geomorphologischer Angaben jüngste vertikale Bewegungen zu rekonstruieren (z.B. Kartierung von Flussterrassen).

Der Arbeitskreis kam überein, dass als neotektonisch "aktive Störungen" mit Sicherheitsrelevanz für ein Endlager alle Verwerfungen anzusehen sind,

- an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute Bewegungen stattgefunden haben,
- die eindeutig mit seismischen Ereignissen im Zusammenhang stehen und

Das Wiederaufleben des Vulkanismus in der Eifel im Prognosezeitraum von einer Million Jahre ist sicher anzunehmen. Anzeichen einer bevorstehenden Eruption sollten sich in einem Zeitraum von ca. ein bis zwei Jahren zuvor ankündigen.

Im Bereich des Vogtlands und in der angrenzenden Region Nordwestböhmens besteht nach dem vorliegenden Kenntnisstand für den Prognosezeitraum eine Wahrscheinlichkeit von etwa 50% für das Wiederaufleben des Vulkanismus im westlichen Teil des Eger Rifts.

Als Auswirkungen der vulkanischen Aktivität werden an der Oberfläche angenommen: Hebungen (mögliche Beeinflussung von Talsperren), vulkanische Beben, Waldbrände (durch Eruption), Bildung von Maaren (explosiv). Von Hebungsvorgängen wären an Fläche ca. 500 km² bis 1.500 km² betroffen, Waldbrände könnten eine Fläche von ca. 50 km² bis 200 km² einnehmen, Maare könnten sich in einer Region von ca. 50 km² bis 200 km² entwickeln. Die nähere Umgebung, bis ca. 5 Kilometer von einem Eruptionszentrum entfernt, ist durch hochexplosive Magma-Wasser-Eruptionen und dabei entstehende Druckwellen gefährdet. Lavaströme und Lahare können Täler über viele Kilometer (in der Eifel bis ca. 10 km) auffüllen.

Auch wenn ein Magmenzutritt im Endlager sehr unwahrscheinlich ist, müssen doch untertägige Auswirkungen benannt werden: Temperaturspannungen, vulkanische Beben und induzierte Bewegungen an Störungen können die Integrität des Endlagers beeinträchtigen und über den Zutritt von Grundwasser die Barriere-Wirkung verringern.

Hinsichtlich der untertägigen Auswirkungen vulkanischer Aktivitäten zeigen Modelluntersuchungen, dass nur in unmittelbarer Nähe eines aktiven Vulkanschlotes (bis ca. 1 km Entfernung) Temperaturspannungen auftreten, die nach einigen tausend Jahren zu Rissbildungen führen können.

In den USA werden in den NRC-Richtlinien (10 CFR 60; NRC 2000) unter den ungünstigen Bedingungen vulkanische Aktivitäten genannt, die u.U. das Grundwassersystem so nachhaltig verändern können, dass es sich nachteilig auf die Barrierewirkung der geologischen Umgebung des Endlagers auswirkt.

Der Arbeitskreis legte fest, dass eine Berücksichtigung von zukünftiger vulkanischer Aktivität bei der Endlagerstandortauswahl in Deutschland ebenfalls vorgenommen werden sollte und dass beim Ausschluss von Gebieten mit vulkanischer Aktivität zusätzlich ein Sicherheitssaum von 10 km um potenziell gefährdete Bereiche zu berücksichtigen ist.

5.1.3 Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation

Der Arbeitskreis ist der Auffassung, dass es im Hinblick auf einen geeigneten Endlagerstandort nicht allein auf die Wirtsgesteine, sondern auf eine **günstige geologische Gesamtsituation** ankommt, die für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre die Isolation der Abfälle von den Schutzgütern sicherstellt und auch für die Zeit danach Grund zu der Annahme gibt, dass es nicht zu unzulässigen Freisetzungen kommt.

Eine **günstige geologische Gesamtsituation** ist dann gegeben, wenn aufgrund der geowissenschaftlich ermittelten Standorteigenschaften mit hoher Wahrscheinlichkeit die in Kapitel 3 geforderten übergeordneten Rahmenbedingungen der Endlagerung erfüllt werden können.

Eine günstige geologische Gesamtsituation zeichnet sich durch die Erfüllung der nachstehend aufgeführten allgemeinen Anforderungen an Endlagerstandorte aus; dabei muss nicht jede Anforderung für sich allein betrachtet vollständig erfüllt werden, vielmehr ergibt sich die Güte der geologischen Gesamtsituation aus dem Erfüllungsgrad der Gesamtheit der Anforderungen:

- **Keine oder nur langsame Grundwasserbewegung im Endlagerniveau:** sie bewirkt eine geringe Migration von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich, lange Grundwasserlaufzeiten und Radionuklidtransportzeiten
- **Günstige hydrochemische Verhältnisse:** sie führen zu einer geringen Korrosion von Gebinden und Versatzstoffen sowie zu einer Löslichkeitsbegrenzung der Schadstoffe im Grundwasser

- **Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Schadstoffen:** es bewirkt eine Konzentrierung der Schadstoffe im Nahbereich des Endlagers und eine Retardation im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- **Gute Gasverträglichkeit:** sie gewährleistet die Beherrschung der Gasentwicklung derart, dass keine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu besorgen ist
- **Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten:** der einschlusswirksame Gebirgsbereich zeigt ein robustes Verhalten der Barrierengesteine bei Beanspruchung, d.h. sie weisen eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Wegsamkeiten auf oder/und zeichnen sich durch ein hohes Selbstheilungsvermögen aus
- **Günstige Konfiguration der Gesteinskörper:** große Volumina des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sind vorteilhaft; sie gestatten eine flexible Endlagergestaltung und Endlagerauslegung, große Sicherheitsabstände zu wasserführenden Formationen und Sicherheit bei Versagen einzelner Barrierenbereiche
- **Gute räumliche Charakterisierbarkeit hinsichtlich der gesuchten Eigenschaften:** sie gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung, eine große Planungssicherheit für das Endlagerbergwerk, geringeren Erkundungsaufwand sowie eine Reduzierung der Unsicherheiten bei der Sicherheitsbewertung
- **Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse:** sie gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit der Sicherheitsbewertung für lange Zeiträume, eine gute Begründbarkeit der Szenarien zur Schadstofffreisetzung und -ausbreitung, eine Reduzierung der Unsicherheiten
- **Gute Temperaturverträglichkeit der Gesteine:** sie reduziert die Auswirkungen des Wärmeeintrages auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und verhindert die Beeinträchtigung der Barrierewirksamkeit durch thermische Belastungen

- **Gute gebirgsmechanische Verhältnisse:** sie gewährleisten gute geomechanische Voraussetzungen zur Minimierung von Störungen der Barrierensysteme aufgrund des Baus eines Endlagerbergwerkes

Entwicklung von Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation

Den allgemeinen Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation werden Eigenschaften, d.h. charakteristische Standort-/Grundwasser-/Gesteinsmerkmale, zugeordnet, zu deren Beurteilung Kriterien entwickelt werden. Wenn die zur Bewertung einer Eigenschaft eigentlich heranzuziehende Messgröße nicht erhoben werden kann bzw. solange sie noch nicht erhoben worden ist, werden Indikatoren zur Bewertung herangezogen. Die Kriterien stellen die logische bzw. mathematische Beziehung zwischen Bewertungsmaßstab und zugehöriger Beurteilungsgröße sowie die Vorgehensweise bei der Kriterienanwendung her. Für die Ableitung von Kriterien gelten folgende Bedingungen:

- Die zu prüfenden Eigenschaften müssen für die Standorteignung erheblich sein.
- Die zur Anwendung eines Kriteriums erforderlichen Informationen müssen für alle Standorte verfügbar bzw. im Rahmen des Verfahrens erhebbar und zuverlässig interpretierbar sein.

Die Kriterien lassen die Formulierung von Mindestanforderungen an die Bewertungsgrößen und die Ableitung von Schwellenwerten zu, deren Erfüllung für den Verbleib der zu bewertenden Flächen im Verfahren unabdingbar ist. Die Mindestanforderungen stellen somit bei Nichterfüllung Ausschlusskriterien dar. Zur vergleichenden Bewertung der wegen Erfüllung der Mindestanforderungen im Verfahren verbleibenden Flächen werden Abwägungskriterien entwickelt, die eine Bewertung des Erfüllungsgrades der Anforderung über die Mindestanforderung hinaus durch eine Skalierung ermöglichen. Weiterhin erfordert die Beurteilung der Güte einer günstigen geologischen Gesamtsituation eine Gewichtung der allgemeinen Anforderungen (mit ihren zugehörigen Kriterien).

Im Folgenden wird für die einzelnen Anforderungen der Stand der Entwicklung von Kriterien dargestellt. Die Formulierung von Mindestanforderungen sowie die Gewichtung und Skalierung der Anforderungen und Kriterien ist Gegenstand zukünftiger Arbeiten des Arbeitskreises.

Die endgültige Ausformung der Skalierung und die Gewichtung der Kriterien relativ zueinander ist spätestens in Phase II festzulegen.

5.1.3.1 Grundwasserbewegung

Eine günstige geologische Gesamtsituation sollte sich insbesondere zur Erfüllung der Randbedingung eines Isolationszeitraumes in der Größenordnung von einer Million Jahre durch fehlende oder langsame Grundwasserbewegung auszeichnen. Insbesondere sind Situationen ohne Grundwasser oder Grundwasserströmung vorteilhaft. Die charakteristischen hydraulischen Grundwasser- und Gesteinsmerkmale für die Anforderung sind ein geringer hydraulischer Gradient sowie eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit des geologischen Systems. Indikator für das Fehlen einer Grundwasserbewegung ist ein auf Dauer trockenes Gestein. Für wasserführende Gesteine werden im Folgenden mehrere Indikatoren für die langsame Grundwasserbewegung im Hinblick auf die Kriterienentwicklung untersucht.

5.1.3.1.1 Durchlässigkeit von Gesteinstypen im Gebirge

Eine für Grundwasserbewegung und advektiven Radionuklidtransport mit dem Grundwasser besonders wichtige Eigenschaft der Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist die Gebirgsdurchlässigkeit, also die Wasserdurchlässigkeit des natürlichen Gesteinsverbandes. Zugehörige Messgröße ist der Durchlässigkeitsbeiwert oder k_f -Wert. Gesucht werden Gesteinskörper mit geringer, die Grundwasserbewegung und damit den Radionuklidtransport hemmender Gebirgsdurchlässigkeit. Diese Forderung steht in einem Zielkonflikt damit, dass es bei Endlagern in solchen Gesteinskörpern durch Gasentwicklung der Abfälle zu kritischer Erhöhung des Gasdrucks in Endlagerhohlräumen und sogar zur

Beeinträchtigung der Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches kommen kann (s. dazu 5.1.3.4).

Die Gebirgsdurchlässigkeit kann nur vor Ort durch gezielte Untersuchungen in situ erhoben werden. Üblicherweise werden dazu sogenannte Packertests in Bohrlöchern durchgeführt. Im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens ist das vorab nicht für alle zu betrachtenden Gesteinskörper möglich. Demgegenüber ist in der Regel bereits früh im Verfahrensablauf bekannt, welche Gesteinstypen am Aufbau der zu betrachtenden günstigen geologischen Gesamtsituationen beteiligt sind. Wenn also bestimmten Gesteinstypen charakteristische Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit zuzuordnen sind, kann der Gesteinstyp eines Gesteinskörpers als Indikator für dessen Gebirgsdurchlässigkeit dienen und ein Kriterium "Gesteinstyp" abgeleitet werden.

Sachstand

Aus den angewandten Geowissenschaften, insbesondere der Wasserwirtschaft und der Kohlenwasserstoffgewinnung, liegen umfangreiche Erfahrungen über den Zusammenhang zwischen Gesteinstyp und Gebirgsdurchlässigkeit vor. Sie betreffen allerdings überwiegend solche Gesteinstypen, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wegen relativ hoher Gebirgsdurchlässigkeit gerade nicht in Frage kommen. Daher wird für den Arbeitskreis gegenwärtig eine systematische Dokumentation und Auswertung der verfügbaren Ergebnisse von Untersuchungen in situ an Gesteinstypen mit relativ geringer Gebirgsdurchlässigkeit durchgeführt (APPEL & HABLER, 2001a und 2001b). Die dabei bislang erfassten und dokumentierten Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) stammen im wesentlichen aus der Endlagerung radioaktiver und konventioneller Abfälle.

Auf der Basis von bisher rund 2.600 ausgewerteten Daten ergeben sich für die mit Zahlenmaterial bereits relativ gut belegten Gesteinstypen Ton bzw. Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis, die auch in Deutschland in für die Endlagerung ausreichender Ausdehnung vorkommen, sowie für Steinsalz folgende vorläufige gesteinstyp-übergreifende Ergebnisse (Stand Juni 2001):

- Die Durchlässigkeitsbeiwerte aller Gesteinstypen weisen mit Ausnahme von Steinsalz sehr große Bandbreiten (bis zu rund zehn Größenordnungen) auf. Die Bandbreiten verschiedener Gesteinstypen überschneiden sich in weiten Bereichen (s. Tab. 5-1).
- Im für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenintervall von einigen hundert bis gut tausend Metern unter der Geländeoberfläche unterscheiden sich die Mittelwerte der Durchlässigkeitsbeiwerte für Steinsalz und Tonstein von denen anderer Gesteinstypen aber statistisch signifikant (s. Tab. 5-2).

Tab. 5-1 Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen
(Bearbeitungsstand Juni 2001)

Gesteinstyp	Tiefe unter Gelände- oberfläche (m)	Anzahl Mess- werte	Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Werte in m/s)	
			Bandbreite	Medianwert
Steinsalz	300 - 1000	13	$1,20 * 10^{-16} - 3,00 * 10^{-12}$	$1,20 * 10^{-13}$
Ton/Tonstein	0 - 1489	667	$5,50 * 10^{-15} - 1,04 * 10^{-04}$	$1,28 * 10^{-06}$
Mergelstein	7 - 1841	153	$5,00 * 10^{-14} - 5,94 * 10^{-04}$	$3,00 * 10^{-11}$
Granit	0 - 1980	764	$2,23 * 10^{-15} - 4,00 * 10^{-04}$	$5,05 * 10^{-08}$
Gneis	0 - 4000	459	$4,70 * 10^{-15} - 8,68 * 10^{-05}$	$4,00 * 10^{-09}$

Tab. 5–2 Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen im Tiefenbereich 300 bis 1.100 m unter Geländeoberfläche (Bearbeitungsstand Juni 2001)

Gesteinstyp	Tiefe unter Geländeoberfläche (m)	Anzahl Messwerte	Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Werte in m/s)	
			Bandbreite	Medianwert
Steinsalz	300 - 1100	13	$1,20 \cdot 10^{-16} - 3,00 \cdot 10^{-12}$	$1,20 \cdot 10^{-13}$
Ton/Tonstein	300 - 1100	24	$5,50 \cdot 10^{-15} - 3,30 \cdot 10^{-11}$	$1,68 \cdot 10^{-13}$
Mergelstein	300 - 1100	104	$5,00 \cdot 10^{-14} - 3,00 \cdot 10^{-05}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$
Granit	300 - 1100	521	$2,23 \cdot 10^{-15} - 4,00 \cdot 10^{-04}$	$6,43 \cdot 10^{-08}$
Gneis	300 - 1100	210	$1,00 \cdot 10^{-13} - 1,20 \cdot 10^{-05}$	$2,05 \cdot 10^{-09}$

Bei differenzierter standort- und tiefenabhängiger Betrachtung der Durchlässigkeitsbeiwerte zeichnen sich für die einzelnen Gesteinstypen folgende interessante Ergebnisse ab, die im weiteren Verlauf des Projektes abzusichern sind:

Die relativ geringe Größe und Bandbreite der Durchlässigkeitswerte für **Steinsalz** entsprechen den Erwartungen.

Bei **Ton bzw. Tonstein** ist eine deutliche Abhängigkeit der Durchlässigkeitsbeiwerte von der Tiefe des Testintervalls unter der Geländeoberfläche festzustellen: Oberhalb von etwa 150 bis 200 m Tiefe wird die gesamte Bandbreite mit Betonung hoher Werte angetroffen. Darunter treten nur Werte um 10^{-12} m/s (+/- ca. zwei Größenordnungen) auf.

Bei **Mergelstein** ist die Tiefenabhängigkeit undeutlich. Unabhängig davon zeichnet sich eine Differenzierung in zwei Wertegruppen mit überwiegend hohen Werten (ca. 10^{-9} m/s +/- mehrere Größenordnungen) bzw. überwiegend niedrigen Werten (ca. 10^{-12} m/s +/- mehrere Größenordnungen) ab.

Charakteristisches Merkmal der Durchlässigkeitsbeiwerte für **Granit** ist die über den gesamten durch Messwerte belegten Tiefenbereich durchgängig große Bandbreite. Allerdings können an einzelnen Standorten durchaus bevorzugt geringe Werte auftreten.

Bei **Gneis** ist eine generelle Abnahme der Durchlässigkeitsbeiwerte von der Testtiefe zu beobachten. Sie geht darauf zurück, dass der Anteil niedriger Messwerte mit der Tiefe zunimmt, wobei allerdings über den gesamten erfassten Tiefenbereich immer auch hohe Werte auftreten.

Interpretation

Nach dem gegenwärtigen Stand der Datenauswertung (Juni 2001) haben die großen Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte aller betrachteten Gesteinstypen außer Steinsalz und die weiten Überschneidungsbereiche zwischen den verschiedenen Gesteinstypen ihre Ursache vor allem darin, dass bei den Messungen sowohl weitgehend ungestörte, daher gering durchlässige Gesteinsmatrix als auch Bereiche mit Trennfugen und folglich erhöhter Durchlässigkeit erfasst worden sind. Trennfugen entstehen durch mechanische (tektonische) Beanspruchung des Gesteins. Im Einzelnen sind die Ursachen der Trennfugenentstehung und ihre Bedeutung für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinstyp zu Gesteinstyp jedoch unterschiedlich:

In der angestrebten Endlagertiefe von einigen hundert bis gut tausend Meter unter Geländeoberfläche weisen **Steinsalz** und **Tonsteine** grundsätzlich niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf. Dies ist Folge der charakteristischen geomechanischen Eigenschaften beider Gesteinstypen. Bei Tonstein führen sie oberflächennah zur Entstehung eines wassergängigen Trennfugennetzes, in größeren Tiefen dagegen zum Verschließen bzw. zur "Verheilung" etwaiger Trennfugen. Bei **Mergelstein** wirken sich insbesondere karbonatreiche Einschaltungen (Kalksteinbänke) mit Trennfugen differenzierend auf die Durchlässigkeit aus. Sie stellen einen eigenen Gesteinstyp mit erhöhter Durchlässigkeit innerhalb der Mergelsteinfolgen dar. Offene Trennfugen bleiben darin offenbar in allen betrachteten Tiefenbereichen bestehen. Die Eigenschaften von Mergelstein ohne solche Einschaltungen ähneln denen von Tonstein.

Bei den kristallinen Gesteinen **Granit** und **Gneis** ist erhöhte Durchlässigkeit ebenfalls an Trennfugen gebunden, jedoch nicht an Einschaltungen eines anderen

Gesteinstyps. Die Trennfugen können ebenfalls über den gesamten betrachteten Tiefenbereich offen sein.

Konsequenzen für die Ableitung eines Kriteriums zur Gebirgsdurchlässigkeit

Die vorliegenden Ergebnisse sind für die Ableitung eines Kriteriums "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern" noch nicht hinreichend abgesichert. Es zeichnet sich aber ab, dass Steinsalz und Tonstein gegenüber den anderen Gesteinstypen Vorteile aufweisen:

Die Durchlässigkeitswerte für **Steinsalz** sind generell gering. Mit Steinsalz vergesellschaftete Gesteinstypen mit höherer Wasserdurchlässigkeit müssen gemieden werden.

Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis können zwar offenkundig Bereiche mit der gesuchten geringen Wasserdurchlässigkeit aufweisen, doch nur bei Tonstein bestehen grundsätzlich günstige Voraussetzungen für Identifizierung und Ausweisung solcher Bereiche.

Bei Mergelstein sowie insbesondere bei Granit und Gneis ist dagegen über alle Tiefenbereiche mit der Existenz von Trennfugen und damit Zonen erhöhter Gebirgsdurchlässigkeit zu rechnen. Bei **Mergelstein** müssen kritische Einschaltungen kalkreicher Folgen, insbesondere von Kalksteinbänken, zuverlässig ausgeschlossen werden. Geeignete Nachweisverfahren stehen dafür zur Verfügung. Möglicherweise wird sich daher bei weiterer Bearbeitung auch der Gesteinstyp "Mergelstein" als ein Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit erweisen.

Bei **Granit und Gneis** ist der Nachweis eines für die Errichtung des Endlagers ausreichend großen Gesteinskörpers mit geringer Wasserdurchlässigkeit, also ohne störende Trennfugen, methodisch schwierig und aufwendig. Bei diesen beiden Gesteinstypen bestehen daher erhebliche Probleme hinsichtlich der geforderten guten Beschreibbarkeit der günstigen geologischen Gesamtsituation. Sie scheiden wahrscheinlich als Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit aus.

Zusammenfassend ist also festzustellen, dass beim gegenwärtigen Kenntnisstand von den betrachteten Alternativen zu Steinsalz nur der Gesteinstyp "Tonstein" als Indikator für eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit in der vorgesehenen Endlagertiefe angesehen werden kann.

5.1.3.1.2 Temperaturverteilung im tiefen Untergrund

Sachstand

Die Temperaturverteilung im tiefen Untergrund reagiert sehr empfindlich auf Grundwasserbewegungen, denn neben gelösten Stoffen wird auch Wärmeenergie durch Grundwasserströmungen transportiert. Unter entsprechenden Umständen können vorhandene Temperaturmessungen in Bohrlöchern zum Nachweis dieser Bewegungen benutzt werden. So können regionale thermische Anomalien identifiziert werden, die durch Wasserströmung im Untergrund verursacht sind. Temperaturmessungen in tiefen Bohrlöchern sind zumindest in den Sedimentbecken in großer Zahl, wenn auch nicht immer in der gewünschten Qualität, vorhanden.

Der Arbeitskreis lässt z.Zt. die Möglichkeiten und Grenzen einer Analyse der Temperaturverteilung des tieferen Untergrundes als Indikator für Grundwasserströmungen in einem Forschungsprojekt "Geothermische Rasteranalyse" prüfen.

Kriterium Temperaturverteilung

Im Idealfall sollte im Untergrund eine lineare Zunahme der Temperatur mit der Tiefe messbar sein, im Durchschnitt etwa $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Abweichungen von diesem Verlauf entstehen beispielsweise durch Inhomogenitäten der Gesteinseigenschaften und des Wärmeflusses aus der Tiefe. Hieraus kann ein idealisiertes Berechnungsmodell für die Temperaturverteilung im Untergrund erstellt werden, das einen Wärmetransport nur durch Wärmeleitung berücksichtigt. Ergeben sich Abweichungen der Ergebnisse des Modells von tatsächlich gemessenen Temperaturwerten, kann dies durch Grundwasserströmungen und zeitabhängige Effekte hervorgerufen worden sein. Zeitabhängige Effekte sind wiederum zusammengesetzt aus der Wirkung von zeitlich veränderlichen Oberflächentemperaturen (Kli

maänderungen) und zeitabhängigen Strömungsvorgängen. Änderungen des Klimas diffundieren als zeitabhängiges, jedoch großräumig korreliertes Signal in den Untergrund. Ein im Untergrund Deutschlands auffälliges Temperatursignal geht auf die letzte Eiszeit zurück. Wo es heute noch erkennbar ist, kann der Einfluss der Grundwasserströmung auf die heutige Temperaturverteilung allenfalls gering sein. Der Beitrag dieses Temperatursignals kann rechnerisch aus den gemessenen Temperaturen entfernt werden. Übrig bleiben dann die durch Grundwasserströmung bedingten Anteile im Temperaturfeld.

Das Ziel des Projektes ist es, Methoden zur Identifikation der einzelnen Prozesse zu entwickeln und ihre Anwendbarkeit als Indikator zur Erkennung von Grundwasserströmungen zu testen.

Auf Basis einer eingehenden Statistik und Qualitätsuntersuchung der vorhandenen Daten wurde das westliche Molassebecken in Süddeutschland als Pilotgebiet ausgewählt. Hier wird exemplarisch die oben skizzierte Identifikation der Prozesse durchgeführt. Zum Aufbau des Berechnungsmodells werden geologische und geophysikalische Strukturinformationen, geophysikalische Bohrlochmessungen sowie eigene direkte gesteinsphysikalische Labormessungen mit statistischen Methoden ausgewertet. Paläoklimauntersuchungen an den Temperaturdaten ermöglichen die Bestimmung eines einheitlichen Signals, um welches die Messdaten korrigiert werden.

Besonders wichtig für die Untersuchung der thermischen Auswirkung von Grundwasserströmung sind das Vorhandensein und die ausreichende Qualität der Temperatur- und petrophysikalischen Daten, die nur in bestimmten Regionen der deutschen Sedimentbecken vorliegen.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass im Rahmen des zukünftigen Auswahlverfahrens die Temperaturverteilung in Gebieten mit ausreichenden Kenntnissen über die Temperaturverteilung und petrophysikalischen Daten als eindeutiger Indikator für die Existenz von Grundwasserströmungen genutzt werden kann.

Aus fehlenden Signalen auf das Fehlen einer Grundwasserströmung zu schließen, ist jedoch nicht unmittelbar möglich. Nicht alle Strömungssysteme zeigen Wirkung

in einem entsprechenden Temperatursignal. Derartige Fließwege sind zwar unwahrscheinlich, aber letztlich nicht auszuschließen. Mit der Methode können somit im Hinblick auf die Grundwasserströmung mit Hilfe des Indikators Temperaturverteilung ungünstige Gebiete für die Endlagerung zuverlässig ausgewiesen werden. Günstige Gebiete allerdings sind allein durch eine Analyse der Temperaturverteilung nicht zuverlässig erkennbar.

5.1.3.1.3 Teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte

Sachstand:

Zur Beantwortung der Frage, ob bzw. für welche geologische Gegebenheiten eine großräumige, teufenabhängige Mineralisation bzw. entsprechende Salzgehaltsverteilung als Indikator für die Grundwasser-Geschwindigkeit dienen kann, ist eine Literaturrecherche zum Chemismus tiefer Grundwässer und zu den hydraulischen Eigenschaften der zugehörigen Aquifere in unterschiedlichen großräumigen Regionen Deutschlands durchgeführt worden (BREWITZ & BRASSER 2001).

Als Ergebnis der durchgeführten Recherchen wird nachfolgend der Sachstand wiedergegeben:

Zunehmende Mineralisation mit der Tiefe ist eine weitverbreitete Tatsache, die aber meist nur rein qualitativ beschrieben wird. Lediglich für einzelne Standorte bzw. Regionen sind quantifizierte lineare Gradienten ausgewiesen bzw. abgeleitet.

Es existieren meist nur generelle Aussagen über geringere Durchlässigkeiten im tiefen Untergrund, auch über eine generelle Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit zunehmender Teufe. Eine quantifizierbare direkte Kopplung zwischen zunehmender Grundwassermineralisation einerseits und abnehmender hydraulischer Leitfähigkeit andererseits konnte - mit Ausnahme der Untersuchungen im Bereich der Schachtanlage Konrad - bislang nicht recherchiert werden.

Ableitung eines Kriteriums

Nach den bisherigen Recherchen ist eine eindeutige Interpretation von Salinitäts-/Tiefen-Beziehungen nicht möglich. Deshalb kann kein Kriterium abgeleitet werden. Die noch offenen Fragen, die von der Definition von Linearität und Spezifizierung notwendiger Datendichte und Datenqualität bis zur nicht eindeutig geklärten Beziehung zwischen Tiefe, Salinität und hydraulischen Eigenschaften reichen, führen zu der Schlussfolgerung, dass der Indikator "teufenabhängige(r) Mineralisation / Salzgehalt" für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "keine oder langsame Grundwasserbewegung (in der Endlagerteufe)" nicht generell als einschlägig angesehen werden kann. Die Feststellung einer linearen Salinitätszunahme kann darüber hinaus - aufgrund der bis auf wenige Ausnahmen kleinen Datenbasis - nur im Rahmen standortspezifischer Untersuchungen getroffen werden und ist insofern als Indikator für ein bundesweites "Übersichts-Screening" weniger geeignet. Für den Fall, dass eine ausreichende Datendichte gegeben ist, kann "teufenabhängige(r) Mineralisation / Salzgehalt" ggf. als unterstützender Indikator herangezogen werden. Eine Anwendbarkeit ist auch dann nur im prätertiären und ungestörten Hangenden von Salinaren gegeben, die eine definierte Quelle für einen Diffusion-initiierten Konzentrationsunterschied darstellen können. Nicht anwendbar ist der Indikator in Gebieten mit schnellfließendem Grundwasser, vornehmlich durch offene Klüfte, Lösungshohlräume, Verformungszonen und hydrothermale Gänge.

5.1.3.1.4 Grundwasseralter

Sachstand

Grundwasser mit sehr hohem Alter muss eine lange Verweilzeit im Grundwasserleiter gehabt haben und nimmt demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht oder nur in geringem Ausmaß am aktiven hydrologischen Kreislauf teil. Grundwasser mit sehr hohem Alter ist also ein Indikator für langfristig langsame Grundwasserbewegung (und stabile hydrochemische Grundwasserverhältnisse).

Allerdings kann nur die umfassende Gesamtinterpretation der hydrochemischen und isotopehydrologischen Grundwasserverhältnisse an einem Standort (in einer Region) belastbare Aussagen zum Grundwasseralter liefern. Die dazu erforderli

chen Detailinformationen liegen während des Auswahlverfahrens allenfalls zufällig von einzelnen Standorten (Regionen) vor und können auch nicht für alle Standorte (Regionen) erhoben werden. Aus den einfacher erhebbaren und interpretierbaren Konzentrationen bzw. Konzentrationsverhältnissen bestimmter Umweltisotope kann jedoch auf eine im Hinblick auf das Grundwasseralter günstige bzw. ungünstige geologische Gesamtsituation geschlossen werden.

Zu den relativ häufig analysierten Umweltisotopen gehören Tritium, Deuterium, Kohlenstoff-14 und Sauerstoff-18. Davon kommen Deuterium und Sauerstoff-18 nur mit deutlichen Einschränkungen für Altersaussagen in Frage:

Ein der sogenannten "global meteoric water line" entsprechendes Verhältnis von $\delta(\text{Deuterium})$ zu $\delta(\text{Sauerstoff-18})$ ¹ charakterisiert die Isotopenzusammensetzung heutiger Niederschläge und damit möglicherweise auch junger, aus Niederschlägen gebildeter Grundwässer. Von der "global meteoric water line" deutlich abweichende Verhältnisse von $\delta(\text{Deuterium})$ zu $\delta(\text{Sauerstoff-18})$ deuten auf Entstehung des Grundwassers unter besonderen klimatischen Verhältnissen, auf Beeinflussung des Isotopenverhältnisses durch Austauschvorgänge im Grundwasserleiter oder grundsätzlich andere Bildungsbedingungen (z.B. marines Wasser) hin. Nur wenn die Einflussfaktoren bekannt sind, sind Rückschlüsse auf das Grundwasseralter aus dem Verhältnis von $\delta(\text{Deuterium})$ zu $\delta(\text{Sauerstoff-18})$ möglich.

Demgegenüber sind die Konzentrationen von Tritium und Kohlenstoff-14 recht zuverlässige Indikatoren für - gemessen am geforderten Isolationszeitraum von einer Million Jahren - zu junges Grundwasseralter: Das Vorhandensein von Tritium bzw. Kohlenstoff-14 kennzeichnet Grundwässer mit Altern von Jahrzehnten bzw. wenigen Jahrzehntausenden. Daraus folgt:

Kriterium Grundwasseralter

¹ $\delta(\text{Deuterium})$ und $\delta(\text{Sauerstoff-18})$ sind auf einen Standard bezogene Konzentrationsangaben.

Das Grundwasser in Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich eines Standortes (einer Region) sowie sicherheitsrelevanten Bereichen ihrer Umgebung darf kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 enthalten.

Die Erfüllung dieses Kriteriums allein ist allerdings kein hinreichender Beleg für ein ausreichend hohes Grundwasseralter und damit eine günstige geologische Gesamtsituation. Sie führt lediglich zum Verbleib der jeweiligen Standorte (Regionen) im Verfahren.

5.1.3.2 Hydrochemische Verhältnisse

Sachstand

Günstige hydrochemische Verhältnisse in einer geologischen Formation werden unter anderem durch ein reduzierendes geochemisches Milieu, geringe Konzentrationen an Komplexbildnern und Kolloiden, sowie neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen bei niedrigem CO_2 -Partialdruck charakterisiert. Unter solchen günstigen hydrochemischen Bedingungen sind geringe Löslichkeiten von Radionukliden zu erwarten. Als mögliche Indikatoren zur Überprüfung der Eigenschaften hat der Arbeitskreis (AKEND 2000) als Indikatoren den Eh-Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, den Gehalt an organischen Substanzen und das Fehlen freien Sauerstoffs im Grundwasser sowie darüber hinaus den pH-Wert und die Pufferung durch vorhandene carbonathaltige Gesteine genannt. Für eine Retardation von Radionukliden sind die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z.B. Carbonatkomplexe oder Huminstoffkolloide) im Tiefenwasser und das Vorhandensein von Sorptionsplätzen an Mineralphasen im Gestein entscheidend. Ein weiterer wichtiger Indikator für günstige hydrochemische Verhältnisse ist das Vorliegen eines geochemischen Gleichgewichtes zwischen dem Tiefenwasser und dem Gestein.

Es wurde geprüft, inwieweit sich auf der Basis heute zugänglicher Daten quantitative bzw. qualitative Kriterien für die o.g. Indikatoren ableiten lassen (BRASSER et al. 2001). Dabei wurden auch das schrittweise Vorgehen bei einer Standortaus

wahl und die beim jeweiligen Verfahrensschritt vorliegenden Kenntnisse und Daten berücksichtigt.

Eine wissenschaftlich nachvollziehbare geochemische Bewertung von potenziellen Endlagerformationen muss hauptsächlich den Einfluss der lokal/regional auftretenden Tiefenwässer sowie der festen Mineralphasen der Endlagerformation auf die Löslichkeit der Radionuklide sowie deren Rückhaltung z.B. durch Sorption und Immobilisierung berücksichtigen.

Um zu prüfen, ob auf der Basis vorliegender Kenntnisse Kriterien für die Indikatoren günstiger hydrochemischer Verhältnisse ableitbar sind, wurde eine Zusammenstellung des Kenntnisstandes zur Genese und Zusammensetzung von tiefen Grundwässern auf der Basis von Literaturrecherchen vorgenommen. Es erfolgte eine Identifizierung von Grundwassertypen in Deutschland zur Ableitung von Kenndaten tiefer Grundwässer in Abhängigkeit vom Mineralbestand relevanter Gesteinskomplexe. Weiterhin sind Untersuchungen zu geochemischen Gleichgewichtszuständen zwischen Tiefenwässer und Gesteinsmatrices zur Ermittlung der Pufferkapazität vorgenommen worden. Im Rahmen der Studie wurden die möglichen stabilen festen Radionuklidphasen aufgezeigt. Darüber hinaus wurden Aussagen zur Stabilität von Kolloiden sowie zur Mobilität von Radionukliden in den möglichen pH-Bereichen abgeleitet. Aus diesen Arbeiten wurden die Größen identifiziert, die auf günstige Bedingungen schließen lassen und die bei einer Standortauswahl berücksichtigt werden sollten.

Ableitung von Kriterien

Kriterien für die Auswahl von aus geochemischen Gesichtspunkten geeigneten Endlagerformationen, die erst später detailliert untersucht werden sollen, können in einem ersten Schritt nur an Hand vorhandener und leicht zugänglicher Kenntnisse über die Formation (Mineralbestand, Tiefenwasserzusammensetzung) und allgemeiner Kenntnisse zum Verhalten von Abfällen und Radionukliden abgeleitet werden.

Das vorliegende Datenmaterial zum Chemismus von Tiefenwässern in Deutschland und die heterogene Verbreitung verschiedener Wassertypen auf engem

Raum lässt keine flächendeckenden Aussagen zur Identifizierung von Gebieten, Regionen und Standorten auf der Basis hydrochemischer Kriterien zu. Bei tiefen Grundwässern ist das Wissen über deren Zusammensetzung zu lückenhaft, um eine Charakterisierung im Sinne der Aufgabenstellung vorzunehmen. Es fehlen i.d.R. wichtige Daten, z.B. zum Redox-Milieu und zur Konzentration von gelösten redoxsensitiven Komponenten. Angaben zu pH-Werten sind ebenfalls lückenhaft. Zuverlässige Aussagen sind daher erst nach genauerer regionaler bzw. standort-spezifischer Betrachtung möglich.

Ein wichtiges positives Kriterium für eine günstige geologische Gesamtsituation ist das Vorliegen eines chemischen Gleichgewichtes zwischen Tiefenwasser und dem anstehenden Gestein. Das geochemisch begründete Kriterium ist aber auf Grund der i.d.R. unzureichenden Datenbasis im ersten Verfahrensschritt nachrangig zum hydraulischen Kriterium "geringe Grundwasserbewegung" geworden. Bei günstigen hydraulischen Kennwerten (z.B. hydraulische Leitfähigkeit $< 10^{-12}$ m/s) des Wirtsgesteins und einer entsprechenden Mächtigkeit der Gesteinsformation kann von einem chemischen Gleichgewicht ausgegangen werden. Der Nachweis des thermodynamischen Gleichgewichts erfolgt mit Hilfe geochemischer Modellrechnungen.

Zur Ableitung weiterer quantifizierbarer Kriterien für die Indikatoren ist eine Analyse der Einflussgrößen erforderlich, die das Radionuklidverhalten in solchen Systemen bestimmen. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Identifizierung von geochemischen Randbedingungen, bei denen die Radionuklidlöslichkeit und Mobilisierung möglichst gering ist. Dieses Ziel ist aber aus geochemischer Sicht nur durch standortspezifische Untersuchungen/Daten zu erlangen.

Kriterien

Indikator: Chemisches Gleichgewicht

Ein wichtiges positives Kriterium für eine günstige geologische Gesamtsituation ist das Vorliegen eines chemischen Gleichgewichtes zwischen Tiefenwasser und dem anstehenden Gestein. Der Nachweis des thermodynamischen Gleichgewichts erfolgt mit Hilfe geochemischer Modellrechnungen.

Die hinsichtlich niedriger Radionuklidlöslichkeiten wünschenswerten Bereiche von Einflussgrößen (Indikatoren) ergeben sich wie folgt:

Indikator: pH-Wert

Aus den pH-Abhängigkeiten der Radionuklidlöslichkeit kann ein Tiefenwasser-pH-Wert zwischen 7 und 8 als positives Kriterium abgeleitet werden.

Liegen Carbonat-Spezies in Lösung vor, ist bei pH-Werten über 9 mit einem Anstieg der Actinidenkonzentrationen in Lösung aufgrund von Carbonatkomplexierung zu rechnen. Sind nur äußerst wenige Carbonat-Spezies in Lösung vorhanden, bewirkt ein höherer pH-Wert ($\text{pH} > 9$) geringere Actinidenkonzentrationen und ist somit als günstig einzustufen.

Indikator: Redoxbedingungen

Günstige Redoxbedingungen bieten anoxische-reduzierende Milieus. Als Indikator für günstige Redoxbedingungen ist u.a. die Anwesenheit von Eisen(II)-Mineralien im Wirtsgestein zu werten.

Indikator: Ionenstärke

Der Einfluss der Ionenstärke auf die Radionuklidlöslichkeit ist elementspezifisch und daher nicht allgemein quantifizierbar. Darüber hinaus wirkt die Ionenstärke im Sinne eines langsamen Transportes von Radionukliden gegenläufig auf die Sorptionseigenschaften und die Kolloidstabilität. Daher kann aus der Ionenstärke allein kein eindeutiges Kriterium hinsichtlich günstiger oder ungünstiger Bedingungen abgeleitet werden. Die Tiefenwässer in Deutschland weisen in den für die Endlagerung vorgesehenen Teufen generell hohe Ionenstärken auf.

Indikator: Kolloidbildung und Kolloidstabilität

Die Kolloidbildung bzw. der Anteil an natürlichen Kolloiden im Tiefenwasser soll möglichst gering sein. Das hydrochemische Milieu sollte möglichst nicht zur Stabilisierung der Kolloide beitragen. Hohe Ionenstärken destabilisieren im Allgemeinen Kolloide.

Indikator: Komplexbildung mit Grundwasserinhaltsstoffen

Der Anteil an Komplexbildnern im Tiefenwasser sollte möglichst gering sein. Da die Komplexbildung in vielfältiger Weise vom geochemischen Milieu des Tiefenwassers und der Interaktion mit den Abfällen abhängt, ist die Anwendung eines einfachen quantitativen Kriteriums für diese Einflussgröße nicht möglich. Die Carbonatkonzentration des Tiefenwassers sollte jedoch in jedem Fall gering sein.

Indikator: Sorption und Ausfällung

In der Regel sind Gesteine mit Mineralphasen, die eine hohe reaktive Oberfläche besitzen, z.B. Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxihydrate, wünschenswert. Da aber die Ladung der sorbierenden Feststoffoberflächen in komplexer Weise vom geochemischen Milieu abhängt (bes. pH-Wert, Ionenstärke), eignet sich diese Einflussgröße nicht als generell anwendbares quantitatives Kriterium.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zur Quantifizierung von Kriterien standortspezifische Kenntnisse sowohl hinsichtlich der Standortbedingungen und der Endlagerkonzeption vorliegen müssen, diese aber frühestens im Verfahrensschritt 6 vorliegen werden.

5.1.3.3 Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden

Sachstand

Für eine Retardation von Radionukliden in der Geosphäre sind die Ionenstärke bzw. die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z.B. Carbonat oder Huminstoffkolloide) im Tiefenwasser und der Mineralbestand des Gesteins entscheidend. Weitere retardierende Eigenschaften einer Formation sind eine hohe Matrixdiffusion (und Sorption an Matrixpartikeln) sowie die Filterwirkung gegenüber Kolloiden.

Sorption

Das Ausmaß der Sorption hängt sowohl von der mineralogischen Zusammensetzung der durchflossenen Gesteine als auch vom hydrochemischen Milieu des

Tiefenwassers ab. Während Tonminerale, Mangan-, Eisen- und Aluminium-Oxide, -Hydroxide und -Oxihydrate sowie organische Substanz (Kohle, Torf etc.) zumindest innerhalb bestimmter Milieubedingungen gute Sorbenten darstellen, zeichnen sich z.B. quarzreiche, tonarme Gesteine wie Sandstein, Granit oder Gneis durch ein generell schwaches Sorptionsvermögen aus. Die Sorptionsmechanismen der verschiedenen Mineralphasen sind unterschiedlich. So können z.B. Sorptionsreaktionen an Tonmineralen eher durch Ionenaustauschmodelle beschrieben werden, während die Anlagerung von Lösungsinhaltsstoffen an Mangan-, Eisen- und Aluminium-Oxide, -Hydroxide und -Oxihydrate eher durch Oberflächenkomplexierungsmodelle erklärt werden kann. Diese unterschiedlichen Mechanismen reagieren hinsichtlich ihrer Sorptionsintensität jedoch unterschiedlich auf Änderungen des hydrochemischen Milieus.

Hinsichtlich des hydrochemischen Milieus sind die Einflussgrößen pH-Wert, Eh-Wert, Auftreten von Konkurrenzionen, Ionenstärke, Speziation, Konzentration und Ladung der gelösten Ionen sowie Temperatur sorptionsbestimmend. Sorptionsbegünstigend sind im allgemeinen neutrale bis leicht alkalische pH-Werte sowie geringe Ionenstärke und geringe Konzentration an Konkurrenzionen. Komplexierungsvorgänge (z.B. die Bildung von Carbonat-Komplexen) führen dagegen zu einer Verminderung der Sorption.

Die Vielzahl der oben genannten Einflussgrößen zeigt, dass eine komplexe Verzahnung zwischen Nuklid-, Gesteins- und Milieu-spezifischen Faktoren besteht, die über die oben genannten allgemeinen Trends hinaus keine Ableitung eines pauschal anwendbaren quantitativen Kriteriums erlaubt (siehe Kap. 5.1.3.2). Vielmehr muss eine Beurteilung günstiger geochemischer Verhältnisse für Sorptionsvorgänge im Rahmen einer komplexen Gesteins-, Nuklid- und Milieu-spezifischen Fallunterscheidung vorgenommen werden.

Indikator: Sorption

Zwar ist ein pauschal anwendbares quantitatives Kriterium für günstige geochemische Verhältnisse im Hinblick auf Sorptionsprozesse nicht ohne weiteres ableitbar (siehe Kap. 5.1.3.2), dennoch lassen sich hinsichtlich günstiger Gesteinszusam

mensetzungen und hydrochemischer Milieubedingungen gewisse Trends aufzeigen. Gesteine, die Tonminerale oder Mangan-, Eisen- oder Aluminiumhydroxid- oder -oxidverbindungen enthalten und damit unter bestimmten Milieubedingungen gute Sorbenten darstellen, sind generell positiver zu werten als solche, die arm an diesen Mineralen sind (z.B. Sandsteine, Granite, Gneise) und daher den Nachteil einer generell geringen Sorptionsfähigkeit aufweisen. Es ist jedoch fraglich, ob die oben genannten Hydroxid- bzw. Oxid-Verbindungen in der Endlagerteufe angesichts der dort zu vermutenden reduzierenden Bedingungen in ausreichenden Mengen auftreten.

In den meisten Fällen wirken neutrale bis leicht alkalische pH-Werte, geringe Ionenstärken und geringe Konzentration an anorganischen oder organischen Komplexbildnern sorptionsfördernd. Höhere Temperaturen wirken meist nur bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff begünstigend (Bildung von Eisenhydroxiden).

Die vorhandenen Sorptionsdaten sind allerdings nur für die experimentellen Bedingungen gültig (z.B. bezüglich pH, Ionenstärke, allgemeine Lösungszusammensetzung), für die sie ermittelt wurden. Die Übertragung von Sorptionsdaten auf andere geochemische Bedingungen ist nicht möglich.

Filterung von Kolloiden

Die Kolloidgröße ist per definitionem: 1 μm bis 1 nm (10^{-6} bis 10^{-9} m). Für die durchflusswirksamen Porenradien (Kluftöffnungsweiten) für Gesteine gilt, dass ab $5 \cdot 10^{-7}$ m (0,5 μm) Entfernung von der Kornoberfläche das Wasser frei und dementsprechend advektiv wirksam ist. Unterhalb dieser Entfernung nimmt die Viskosität des Wassers infolge elektrostatischer Wechselwirkungen beständig zu bzw. die Mobilität ab. Theoretisch können dadurch Porenradien (Kluftöffnungsweiten) unterhalb der doppelten Entfernung, d.h. 1 μm (Obergrenze Kolloiddurchmesser), nicht mehr durchflossen werden.

Indikator: Filterung von Kolloiden

Porendurchmesser, bei denen Kolloide gefiltert werden, sind so klein, dass in ihnen auch gelöste Stoffe (ideale Tracer) nicht transportiert werden können. Solche Porenradien bzw. Kluftöffnungsweiten erlauben auch keinen Durchfluss von Grundwasser mehr, so dass lediglich diffusiver Transport stattfinden kann.

Eine gesonderte Filterung von Kolloiden gibt es nicht.

5.1.3.4 Gasverträglichkeit

Die sicherheitstechnische Bedeutung der Gasbildung in der Nachbetriebsphase eines Endlagers liegt im möglichen Druckaufbau am Einlagerungsort. Der Druckaufbau muss derart begrenzt bleiben, dass eine Gefährdung der Barrierenintegrität und der Barrierenwirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht zu besorgen ist.

Sachstand

Abfälle, die zur Endlagerung konditioniert sind, können durch Korrosion, Radiolyse oder mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile Gase entwickeln. HAW/BE Abfallströme produzieren Gase im wesentlichen bei Kontakt mit externen Wässern oder Laugen.

LAW/ILW Abfallströme produzieren Gase sowohl aufgrund interner Prozesse (Korrosion, mikrobielle Zersetzung) als auch bei Kontakt mit externen Wässern oder Laugen. Die zur Verfügung stehenden Volumina an Wasser bzw. Lauge im Endlager spielen eine wichtige Rolle für die Gasbildung.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Gasbildungsrate der Abfälle sind die verschiedenen Abfallströme selbst, die Temperatur, die Feuchte, das chemische Milieu sowie die Konditionierung.

Zur Bewertung der Auswirkung der Gasbildung in einem Endlager wurden Fallstudien für die beiden folgenden unterschiedlichen geologischen Situationen durchgeführt (JAVERI & BALTES 2001):

Das Endlager liegt in einem trockenen, d.h. dichten einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

Während für den HAW/BE Abfallstrom eine Gasentwicklung aufgrund fehlender externer Feuchtigkeit von untergeordneter Bedeutung ist, muss für den LAW/MAW Abfallstrom, der eine interne Gasentwicklung aufweist, einer Druckentwicklung entweder durch eine Abfallkonditionierung oder durch konzeptionelle Maßnahmen bei der Endlagerauslegung, z.B. durch Bereitstellung von Gassammelräumen (Porenräumen) oder Gaskonsumenten, begegnet werden.

Das Endlager liegt in einem wassergesättigten einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

Die Abschätzung der Auswirkungen der Gasentwicklung in einem porös feuchten Gebirgs-/Endlagerbereich erfolgte durch Analysen für ein vereinfachtes Endlagermodell. Die Gasbildungsrate, die hydraulische Leitfähigkeit und Porosität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wurden variiert.

Zur Verhinderung der Gefährdung der Integrität des barrierenwirksamen Gebirgsbereichs durch Entstehung gasdruckinduzierter dilatanten Bereiche muss der Gasdruck im Endlagerbereich begrenzt werden. Darüber hinaus soll der hydraulische Gradient im barrierenwirksamen Gebirgsbereich nicht wesentlich erhöht werden (Abschätzung der Barrierenmächtigkeit Kap. 5.1.3.7.2).

Arbeitshypothese

Zum sicheren Erhalt der Integrität und der Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches in wassergesättigten Gebirgssystemen soll die aufgrund der Gasentwicklung zu erwartende Druckerhöhung im Endlagerbereich 20% des hydrostatischen Druckes nicht überschreiten.

Ergebnisse der Fallstudien

Die Druckentwicklung im Endlagerbereich nimmt mit steigender Gasbildung und abnehmender hydraulischer Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu. Zur Einhaltung der Druckbegrenzung muss der einschlusswirksame Ge

birgsbereich eine hydraulische Leitfähigkeit größer 10^{-10} m/s aufweisen. Eine geringere hydraulische Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches erfordert eine Reduzierung der Gasbildungsrate.

Analysen, welche die Wiederauffüllphase des Endlagers in der Nachbetriebsphase berücksichtigen, zeigen ähnliche Verhältnisse.

Ableitung von Kriterien

Das übergeordnete Kriterium lautet:

Die geologische Gesamtsituation muss so beschaffen sein, dass ein Druckaufbau aufgrund von Gasentwicklung derart begrenzt bleibt, dass die Barrierenintegrität und die Barrierenwirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht gefährdet sind. Dabei sind Unterschiede zwischen einem trockenen und einem wassergesättigten Wirtsgestein sowie zwischen Abfällen mit und ohne interne Gasbildung zu berücksichtigen.

Eine wissenschaftlich belastbare Überprüfung des Kriteriums ist erst mit standort-spezifischen Daten in einem Anlagenkonzept möglich.

Endlager in einem trockenen, d.h. dichten einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

- Der HAW/BE Abfallstrom stellt hinsichtlich der Gasentwicklung keine wesentlichen Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.
- Für den LAW/MAW Abfallstrom, der eine interne Gasentwicklung aufweist, ist einer Druckentwicklung entweder durch eine Abfallkonditionierung oder durch konzeptionelle Maßnahmen bei der Endlagerauslegung, z.B. durch Bereitstellung von Gassammelräumen (Porenräumen), zu begegnen.

Endlager in einem wassergesättigten einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Zur Einhaltung der Druckbegrenzung müssen die Gasbildungsrate, der Endlager-hohlraum sowie die Formation, die Mächtigkeit und die hydraulische Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aufeinander abgestimmt werden.

- Zur Begrenzung des Grundwasserangebotes an den Abfall und somit zur Begrenzung der Gasbildungsrate des HAW/BE-Abfalls ist ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit einer hydraulischen Leitfähigkeit kleiner oder gleich 10^{-12} m/s als günstig einzuschätzen.
- Für den Abfallstrom nichtwärmeproduzierender Abfälle, für die interne und externe Gasentwicklung angenommen werden muss, sollte der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine hydraulische Leitfähigkeit größer 10^{-10} m/s aufweisen. Einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit kleineren hydraulischen Leitfähigkeiten erfordern für diese Abfallströme eine Reduzierung der Gasbildungsraten, z.B. durch Konditionierungsmaßnahmen.

5.1.3.5 Temperaturverträglichkeit

Die Beurteilung des Gesteins im Hinblick auf Temperaturspannungen ist eng verbunden mit der Frage nach der Bildung von Wasserwegsamkeiten im Barrieregestein und damit nach der Integrität des Endlagers. Obwohl hierüber bereits einige Erkenntnisse vorliegen (speziell zu Salz als Wirtsgestein) werden derzeit numerische Untersuchungen zur Wärme-Ausbreitung und damit zum Aufbau lokaler Temperaturspannungen durchgeführt. Diese Modellrechnungen sollen Auskunft geben über den räumlichen und zeitlichen Verlauf der Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnungen.

Eine hohe und isotrope Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, hohe Temperaturintensität der Gesteine sowie ein hohes Relaxationsvermögen und Zugfestigkeit der Gesteine haben sich in den für Endlagerprojekte bisher durchgeführten Modelluntersuchungen als positive Eigenschaften herausgestellt. Kriterien werden z.Zt. abgeleitet.

Die derzeitigen Modellrechnungen sollen dazu beitragen, auch für andere Gesteine als Salz quantitative Kriterien abzuleiten. Die Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

5.1.3.6 Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten

Begründung der Anforderung

Die Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten" beruht auf dem Ansatz, dass Schadstofffreisetzungen aus dem tiefen geologischen Untergrund in die Biosphäre über fluide Phasen erfolgen können, und zwar

- auf primär im Gebirge bereits vorhandenen Wegsamkeiten,
- auf sekundär durch den technogenen Eingriff (Bau und Betrieb des Endlagers) bedingten Wegsamkeiten oder
- auf durch zukünftige geogene Einwirkungen induzierten Wegsamkeiten.

Daher erscheint eine günstige geologische Gesamtsituation u.a. dann gegeben, wenn das barrierenrelevante Gebirge grundsätzlich eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweist. Zur weiteren Spezifizierung dieser Anforderung sind sowohl grundsätzliche Gesteinseigenschaften wie auch die Relation zwischen schädigungsfreier Gesteinsbeanspruchbarkeit und vorhandener bzw. zu erwartender Gesteinsbeanspruchung in Betracht zu ziehen. Hierzu wird gegenwärtig eine Studie erarbeitet (LUX 2001a).

Eine zentrale Voraussetzung für die Eignung einer Gebirgsformation als geologische Barriere ist die Impermeabilität bzw. hinreichend geringe Permeabilität des Gesteinsgefüges, d.h. anstehende Gesteine mit geringer bis verschwindender Matrixpermeabilität sind die Grundlage und der Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen. Diese beruhen auf dem Ansatz, dass auch in derzeit gefügedichten Gesteinen sekundäre Rissysteme entstehen können und zwar dann, wenn unter der Einwirkung zukünftiger geogener oder technogener Beanspruchungen

1. die Gesteine nicht hinreichend tragfähig sind, die aufgeprägten Beanspruchungen ohne Überschreitung der Zug- sowie Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit aufzunehmen oder

2. die Gesteine kein hinreichendes Spannungsrelaxationsvermögen aufweisen oder
3. die Gesteine mit deformationsabhängigem Spannungsabbau sich nicht hinreichend bruchlos plastisch-viskos verformen können oder
4. die Gesteine mit ausgeprägt viskosem Verhalten deformationsbedingt Gefügauflockerungen und Gefügeentfestigungen erfahren.

In allen diesen Fällen reagieren die Gesteine mit der Ausbildung von Mikro- oder Makrorissen auf die äußeren Lasten.

Das rupturale Verhalten nach 1. bzw. 2. wird als spröde bezeichnet, während Brüche nach 3. und 4. unter großen Verformungen den duktilen Brüchen zugeordnet werden. Folglich scheint die Fähigkeit zu inelastischer Deformation und damit ein duktiles Materialverhalten die Grundlage für Umlagerungen/Abbau von Spannungen zu sein, so dass bei entsprechender weitgehend dilatanzfreier und damit rissfreier Deformationsfähigkeit beanspruchungsinduzierte und zu vernetzten Sekundärwegsamkeiten führende Rissbildungen zumindest vermindert werden.

Eigenschaften

Da die Anforderung „geringe Neigung zur Rissbildung“ nicht unmittelbar in ein an Maß und Zahl orientiertes Kriterium umgesetzt werden kann, sind Eigenschaften abzuleiten, die jeweils einzelne Aspekte dieser zentralen Anforderung erfassen. Grundlegende Kenntnisse zu Gesteins- und Gebirgseigenschaften unter geotektonischer und endlagerrelevanter Beanspruchung legen zur näheren Ausformung der generellen Anforderung die Formulierung folgender Hypothesen als Eigenschaften nahe:

Hypothese (1): Gesteine mit ausgeprägter Duktilität weisen im Grundsatz eine nur geringe Neigung zur Rissbildung auf.

Hypothese (2): Gesteine mit nachgewiesener Verheilungsfähigkeit sind tendenziell als duktil anzusehen und besitzen dementsprechend eine nur geringe Neigung zur dauerhaften Ausbildung von Rissen.

Hypothese (3): Ausgeprägt spröde und hochfeste Gesteine neigen grundsätzlich zur Rissbildung und weisen eine nur geringe Verheilungsfähigkeit auf. Vernetzte Rissssysteme sind grundsätzlich zu erwarten. Bei entsprechend geringer bisheriger geogener Beanspruchung, die nicht zu einer Überbeanspruchung geführt hat, und entsprechend ruhiger tektonischer Lagerung, die auch zukünftig keine nachhaltige geogene Beanspruchung erwarten lässt, ist nicht auszuschließen, dass etwaige unvermeidbare technogen bedingte und konturnahe Risse/Rissssysteme durch (geo)technische Maßnahmen in dem erforderlichen Maße dauerhaft zu verheilen sind.

Hypothese (4): Tektonisch in unterschiedlicher Weise deviatorisch vorbeanspruchte Gebirgsformationen, die erfahrungsgemäß derzeit gering durchlässig sind, neigen auch in nur geringem Maße zur Ausbildung von Wegsamkeiten.

Hypothese (5): Sind tektonisch deviatorisch vorbeanspruchte und nicht ausgeprägt verheilungsfähige Formationen rezent gering permeabel und damit frei von vernetzten Rissystemen, liegt die bisherige Beanspruchung in situ unterhalb der Dilatanzgrenze des Gesteins bzw. sind keine die Zugfestigkeit überschreitende Zugspannungen aufgetreten.

Ableitung von Indikatoren

Zur Identifizierung der vorstehend zur Spezifizierung der Anforderung zunächst noch in Hypothesenform postulierten Eigenschaften werden Indikatoren abgeleitet. Diese Indikatoren sind so beschaffen, dass sie die formulierten Eigenschaften in qualitativ/ quantitativ fassbare und damit auch bewertbare Größen umsetzen.

Werden die vorstehenden in Hypothesenform formulierten Eigenschaften hinsichtlich der Ableitung von Indikatoren zur Identifizierung von Gebirgsformationen mit der generellen Eigenschaft einer nur geringen Neigung zur Rissbildung ausgewertet, so kann festgestellt werden:

Indikator 1: Plastische-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz unter Bedingungen in situ (Druck, Temperatur).

- Indikator 2: Reversible Sekundärpermeabilität bei Anhebung der isotropen Spannung und Verminderung der Deviatorspannung.
- Indikator 3: Verheilungsfähigkeit von Rissen durch geochemisch geprägte Rekristallisationsprozesse im Trennflächenbereich (Druck, Temperatur). Dabei kann die Verheilungsfähigkeit von Rissen in einer bestimmten Gesteinsfazies als Indikator für die Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten" nicht nur für geotektonisch gering beanspruchte Formationen, sondern auch für Gebirgsformationen angesehen werden, die zwar rezent rissfrei sind, in ihrer geologischen Vergangenheit aber geotektonisch (über)beansprucht worden sind.
- Indikator 4: Geringe Permeabilität in situ trotz geogen deviatorischer Beanspruchung.
- Indikator 5: Erfahrungsgemäß langfristig trockene Grubengebäude bei entsprechender Abbauführung. (Anordnung und Einhaltung hinreichend mächtiger hydrogeologischer Schutzschichten).
- Indikator 6: Rezente Existenz von wasserlöslichen Gesteinen und von leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe führenden Gebirgsformationen. Diese weisen als Indikatoren implizit auf die Existenz von über geologische Zeiträume wirksamen impermeablen und damit abdichtenden Gebirgsformationen im Umgebungsbereich dieser speziellen Formationen hin. Gebirgsformationen mit nachweislich abdichtender Funktion über Jahrtausende und geotektonischer Vorbeanspruchung dürften auch eine nur geringe Neigung zur Rissbildung aufweisen.

Sachverhalt

Für jeden dieser Indikatoren ist als Grundlage für die Ableitung eines zugeordneten Bewertungskriteriums der zugehörige Sachverhalt auszuführen. Hieran wird zur Zeit gearbeitet.

Ableitung von Kriterien

Die an den Indikatoren orientierte qualitative/quantitative Formulierung der jeweiligen Bewertungskriterien ist noch in Bearbeitung. Dabei ist zu bedenken, ob die Notwendigkeit besteht, bei einzelnen Kriterien auch Zahlenwerte anzugeben, die mindestens erfüllt sein müssen, d.h., ob eine kriterienbezogene Mindestanforderung formuliert werden muss.

5.1.3.7 Konfiguration der Gesteinskörper

Neben den die Radionuklid Ausbreitung beeinflussenden Eigenschaften der Gesteinskörper der geologischen Barriere sowie den hydraulischen und hydrochemischen Grundwasserverhältnissen trägt auch die Konfiguration der Gesteinskörper zu einer günstigen geologischen Gesamtsituation bei.

In den beiden folgenden Kapiteln werden zunächst die grundsätzlich möglichen Typen der Konfiguration von einschlusswirksamem Gebirgsbereich und Wirtsgestein beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für eine günstige geologische Gesamtsituation beurteilt. Daraus ergeben sich Konsequenzen für die Suche nach für die Endlagerung konfiguratив günstigen geologischen Verhältnissen (s. 5.1.3.7.1). Anschließend werden die zur Einhaltung des geforderten Isolationszeitraums in der Größenordnung von einer Million Jahre erforderliche Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches in Abhängigkeit von charakteristischen Eigenschaften einer geologischen Gesamtsituation bestimmt und ein Kriterium "Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches" abgeleitet (s. 5.1.3.7.2).

5.1.3.7.1 Konfigurationstypen und ihre Bewertung

Definition

Unter dem Begriff Konfiguration sind die Ausdehnung und Funktion des eine günstige geologische Gesamtsituation bestimmenden Gesteinskörpers oder - bei

mehreren Gesteinskörpern - die geometrische Anordnung der durch Ausdehnung und Funktion charakterisierten beteiligten Gesteinskörper zu verstehen.

Ausdehnung und Anordnung von Gesteinskörpern sind in der Regel einfacher erhebbar als bestimmte Gesteinseigenschaften oder die hydraulischen und hydrochemischen Standortverhältnisse. Daher kommt der Konfiguration sicherheitsrelevanter Gesteinskörper in der geologischen Barriere als früh erkennbares Merkmal einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" im Rahmen des Auswahlverfahrens besondere Bedeutung zu.

Funktionale Differenzierung Wirtsgestein / einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Definitionsgemäß muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb der geologischen Barriere des Mehrbarrierensystems Endlager den entscheidenden Beitrag zum Einschluss der Abfälle für den geforderten Isolationszeitraum leisten. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss demnach aus Gesteinen mit hoher Barrierewirksamkeit bestehen und möglichst große Ausdehnung aufweisen.

Auf Grund allgemeiner Kenntnis über die charakteristischen Eigenschaften bestimmter Gesteinstypen und ihre Verbreitung in Deutschland bzw. nach den vorläufigen Ergebnissen differenzierter Auswertungen von Daten zur Wasserdurchlässigkeit bestimmter Gesteinstypen (s. 5.1.3.1.1) kommen vornehmlich die Sedimentgesteine Steinsalz und Tonstein (bzw. verwandte Gesteinstypen) in Frage.

Die Hauptfunktion des Wirtsgesteins besteht demgegenüber in der Aufnahme der Abfälle. Es muss daher vor allem die Errichtung und den Betrieb des Endlagerbergwerks erlauben. Diese Funktion darf durch von den Abfällen ausgehende Auswirkungen, insbesondere Wärmeeintrag ins Gebirge und Gasentwicklung, nicht beeinträchtigt werden. Nach allgemeiner Kenntnis der (insbesondere) mechanischen Eigenschaften von Gesteinstypen kommen in Frage: Tiefengesteine (Beispiel Granit), regionalmetamorphe Gesteine (Gneis), Sedimentgesteine (Sandstein bzw. petrographisch verwandte Gesteinstypen, Karbonatgesteine, Steinsalz, möglicherweise Anhydrit, Gesteine in Sonderfazies mit günstigen Eigenschaften).

Konfigurationstypen

Unter Beachtung der funktionalen Differenzierung zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich lassen sich hinsichtlich deren Anordnung innerhalb der geologischen Barriere zwei konfigurative Haupttypen ableiten (s. Abb. 5 -1):

Typ A: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

In diesem Fall sind Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich Teil ein und desselben Gesteinskörpers (bzw. mehrerer Gesteinskörper mit übereinstimmenden barrierewirksamen Eigenschaften). Dieser Gesteinskörper muss in erster Linie die funktionalen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aufweisen, aber auch die Anlage eines Endlagers erlauben.

Typ B: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Bei Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich handelt es sich um verschiedene Gesteinskörper mit unterschiedlichen barrierewirksamen Eigenschaften: Der Wirtsgesteinskörper muss vor allem für die Standsicherheit von Endlagerhohlräumen günstige mechanische Eigenschaften aufweisen und gegenüber Abfallauswirkungen unempfindlich sein, während der umgebende einschlusswirksame Gebirgsbereich günstige barrierewirksame Eigenschaften und große Ausdehnung aufweisen muss.

Da an Konfigurationen dieses Typs mindestens zwei Gesteinstypen mit unterschiedlichen Eigenschaften beteiligt sind und entsprechende Konfigurationen auf unterschiedliche Weise entstanden sein können, ergibt sich für Typ B eine größere Anzahl grundsätzlich möglicher Konfigurationsvarianten. All diese Varianten können jedoch hinsichtlich des Lagebezugs von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamem Gebirgsbereich zwei Untertypen der Fallgruppe B zugeordnet werden:

Typ Ba: Der Wirtsgesteinskörper wird vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich vollständig umschlossen

Typ Bb: Die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist unvollständig

Beide Untertypen können - beispielsweise nach der Art ihrer Entstehung oder der geometrischen Anordnung der Gesteinskörper im Detail - in weitere Untertypen unterschieden werden. Innerhalb der Fallgruppe Bb lassen sich Untertypen insbesondere danach unterscheiden, wie weitgehend die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist bzw. welche Barrierewirksamkeit der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb einer solchen Konfiguration aufweist (s. Abb. 5 -2).

Vergleichende Bewertung der Konfigurationstypen

Allein unter dem Gesichtspunkt "günstige Konfiguration im Hinblick auf den Radionuklidtransport mit dem Grundwasser" können die genannten Konfigurationstypen im Hinblick auf ihre Bedeutung für eine "günstige geologische Gesamtsituation" in folgende Rangfolge gebracht werden:

1. Konfigurationstyp Ba

Konfigurationstyp Ba repräsentiert das konfigurative Optimum einer "günstigen geologischen Gesamtsituation"; denn es sind Konfigurationen vorstellbar, bei denen Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich die spezifischen funktionalen Anforderungen jeweils besonders gut erfüllen.

2. Konfigurationstyp A

Dieser Konfigurationstyp entspricht dem herkömmlichen Ansatz bei der Auswahl von Endlagerstandorten, bei dem ein ausreichend bzw. möglichst großer Gesteinskörper eines Gesteinstyps mit günstigen Barriereigenschaften gesucht wird. Hinsichtlich der Barrierewirksamkeit entspricht dieser Typ weitgehend dem Konfigurationstyp Ba.

Gesteinstypen mit günstigen Barriereigenschaften können allerdings für Errichtung und Betrieb des Endlagerbergwerks weniger gut geeignet sein und/oder empfindlich auf die Auswirkungen eingebrachter Abfälle reagieren. Die gegenüber Typ Ba mit dem Fehlen eines günstigen Wirtsgesteins verbundenen funktionalen Defizite müssen daher u.U. durch technische Maßnahmen ausgeglichen werden.

3. Konfigurationstyp Bb

Bei diesem Typ kann die Konfiguration allein keinen ausreichenden Beitrag zur "günstigen geologischen Gesamtsituation" leisten, zumindest ist die barrierewirksame Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Anordnung und Ausdehnung der beteiligten Gesteinskörper nicht ohne weiteres abzuleiten. Die "günstige geologische Gesamtsituation" muss sich vielmehr im wesentlichen aus **konfigurationsunabhängigen** zusätzlichen Eigenschaften eines Standortes ergeben. Hierzu gehören insbesondere günstige hydraulische Bedingungen (fehlendes/geringes hydraulisches Potenzial) und große Tiefe des Endlagers.

Konfigurationstyp Bb weist daher gegenüber Typ Ba und Typ A zweifellos Nachteile auf. In erster Näherung dürfte die einschließende Wirkung einer solchen Konfiguration davon abhängig sein, wie weitgehend das Wirtsgestein vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen wird und in welcher hydraulischen Position sich die Öffnung(en) im einschlusswirksamen Gebirgsbereich befindet (befinden).

Werden andere Gesichtspunkte als allein Konfiguration und advektiver Radionuklidtransport in den Konfigurationsvergleich einbezogen, ergibt sich eine andere Beurteilung:

Für Konfigurationstyp Ba können insbesondere bei komplexer Anordnung der beteiligten Gesteinskörper Schwierigkeiten hinsichtlich der geforderten zuverlässigen räumlichen Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit der Konfiguration (s. 5.1.3.8) auftreten, während sich für Konfigurationstyp A in dieser Hinsicht - je nach Gesteinstyp - Vorteile ergeben können. Zudem schneidet Konfigurationstyp Ba unter dem Gesichtspunkt Gasentwicklung aus Abfällen umso ungünstiger ab, je geringer die Wasserdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist (s. 5.1.3.4), während in dieser Hinsicht gerade eine offene Konfiguration (Abb. 5-2) Vorteile aufweisen würde.

Ergebnisse und Konsequenzen

Die Überlegungen zur günstigen Konfiguration von Gesteinskörpern haben für Entwicklung und Anwendung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte folgende Konsequenzen:

- Aus den unterschiedlichen Funktionen von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ergeben sich spezifische Anforderungen an die am Aufbau einer Konfiguration bzw. der entsprechenden geologischen Struktur beteiligten Gesteinskörper. Die gesuchten funktionsbezogenen Gesteinseigenschaften müssen bei der Identifizierung günstiger geologischer Gesamtsituationen von Anfang an berücksichtigt werden. Im Vordergrund muss dabei immer der einschlusswirksame Gebirgsbereich stehen. Dafür kommen nur wenige Sedimentgesteinstypen mit geringer Wasserdurchlässigkeit in Frage (insbesondere Tonstein und verwandte Gesteinstypen, Steinsalz). Im Hinblick auf die Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich besteht ein Zielkonflikt zwischen der Verhinderung oder Behinderung des advektiven Radionuklidtransports mit dem Grundwasser und der Vermeidung von Beeinträchtigungen der Barrierewirksamkeit durch Gasentwicklung aus Abfällen.
- Auf Grund der möglichen geometrischen Anordnung von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich lassen sich zwei konfigurative Haupttypen und verschiedene Untertypen unterscheiden. Liegt bei deren vergleichender Bewertung die Betonung auf der Verhinderung bzw. Behinderung des advektiven Radionuklidtransports, schneidet Konfigurationstyp Ba besser ab als Typ A und deutlich besser als Typ Bb (es ist allerdings zu beachten, dass nach den Erfahrungen bei der Untersuchung geologischer Strukturen eine vollständige Exploration einer geologischen Konfiguration des Typs Ba mit größerem Aufwand verbunden ist bzw. die Aussicht, eine Konfiguration solchen Typs finden zu können, geringer sein wird). Werden dagegen nur die Folgen der Gasentwicklung aus Abfällen in den Vordergrund gestellt, schneiden geologische Strukturen gemäß Konfigurationstyp Bb am besten ab.
- Unabhängig vom Konfigurationstyp gehört zu jeder Konfiguration als einschlusswirksamer Gebirgsbereich immer ein Sedimentgesteinskörper, insbesondere Steinsalz oder Tonstein, mit hoher Barrierewirksamkeit und großer

Ausdehnung. Es ist daher auf jeden Fall geboten, besonders ausgedehnte und mächtige Vorkommen dieser Gesteinstypen zu identifizieren, auszuweisen und hinsichtlich ihrer barrierewirksamen Eigenschaften zu beschreiben. Sie entsprechen auf jeden Fall dem Konfigurationstyp A. Um gezielt mögliche konfigurative Vorteile der Konfigurationstypen Ba oder Bb zu nutzen, ist zu prüfen, ob die gefundenen Sedimentgesteinskörper so mit anderen Gesteinskörpern vergesellschaftet sind, dass sich konfigurative Vorteile im Hinblick auf den advektiven Radionuklidtransport mit dem Grundwasser bzw. die Beherrschung der Gasproblematik ergeben.

- Bei Steinsalz ist zu prüfen, ob Salzstöcke mit dem Ansatz "günstige geologische Gesamtsituation" in Einklang stehen bzw. ob neben Salzstöcken auch Salzkissen oder Steinsalzvorkommen in flacher Lagerung in Frage kommen.

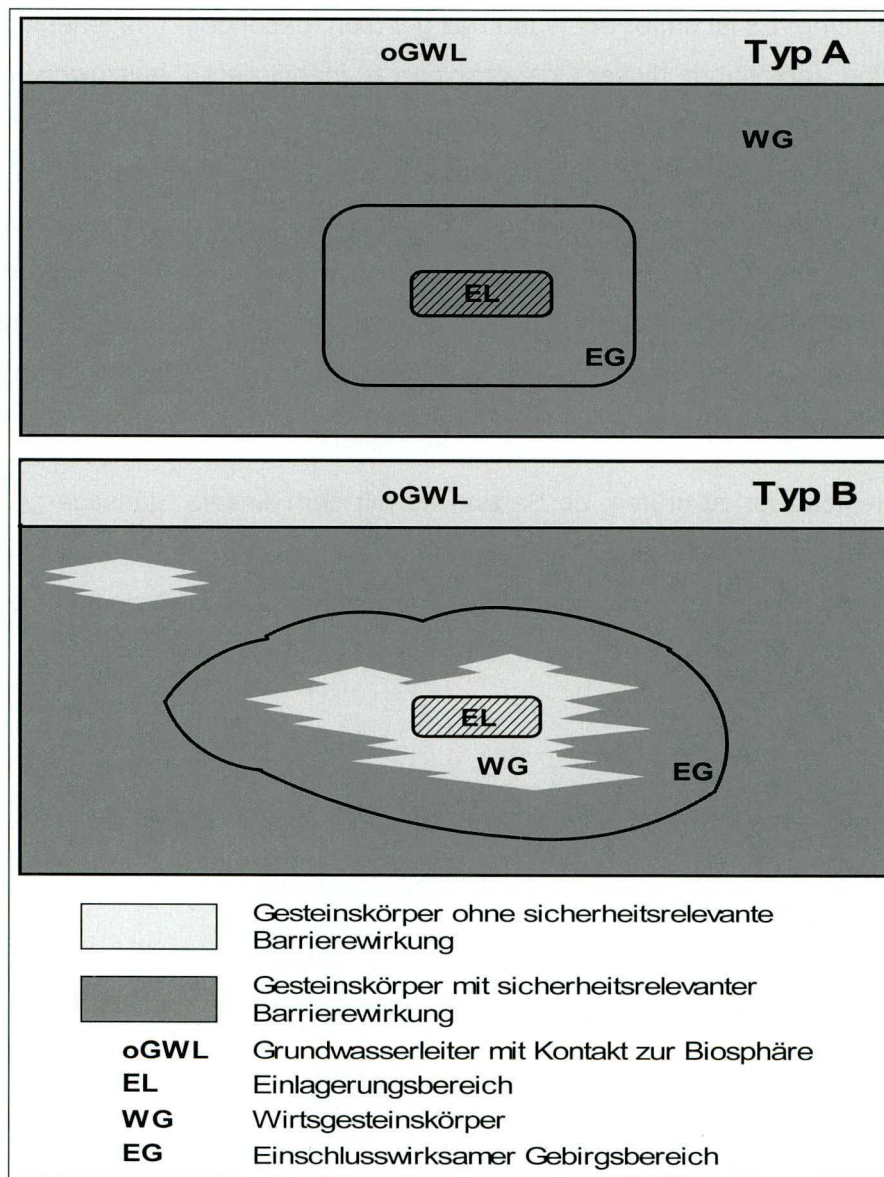


Abb. 5-1: Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Typ A: Wirtsgestein ist sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Typ B: Wirtsgestein ist kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

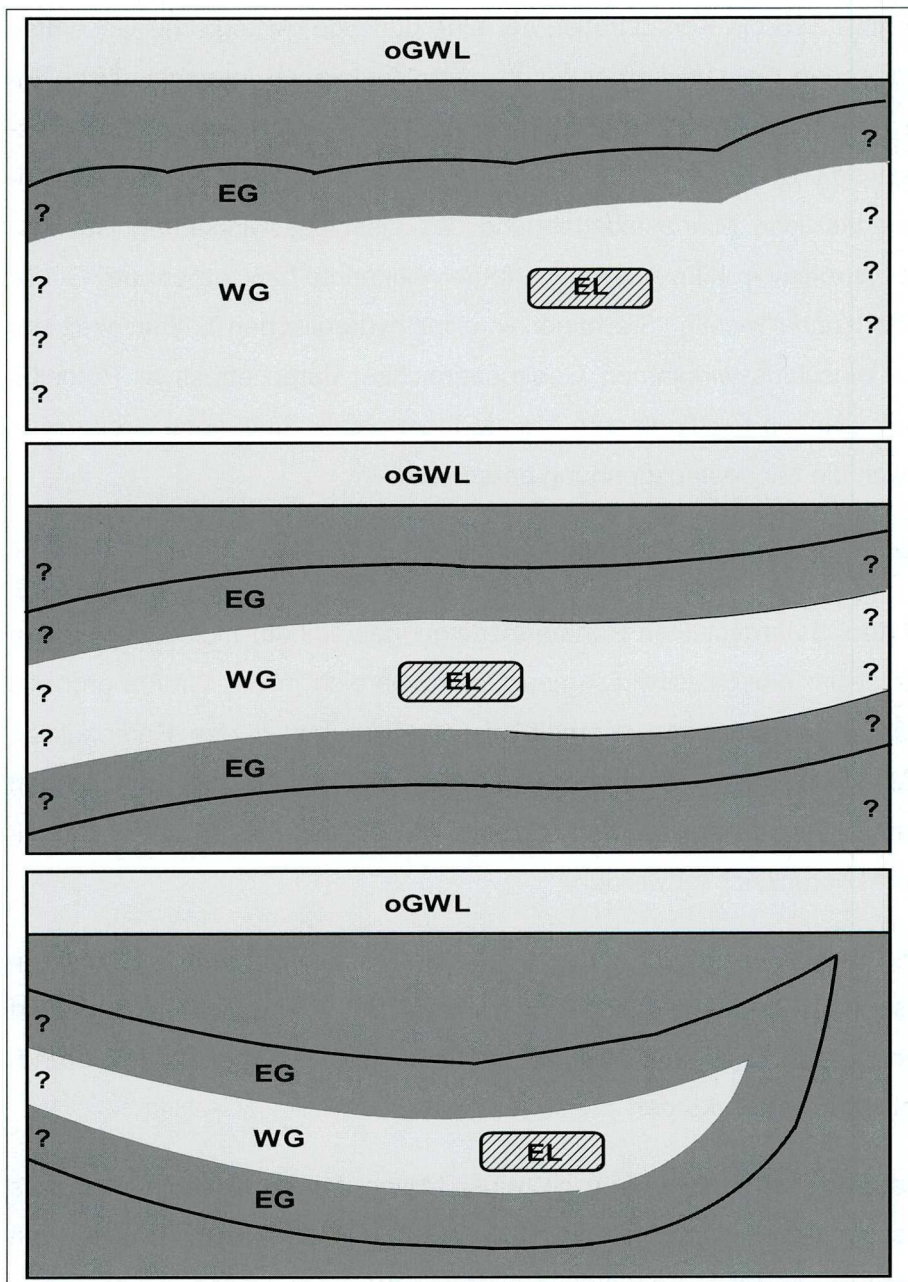


Abb. 5-2: Konfigurationstyp Bb: Geologische Strukturen mit unterschiedlichem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (schematisch, ohne Maßstab, Legende s. Abb. 5-1)

5.1.3.7.2 Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Definitionsgemäß wird die Konfiguration der eine günstige geologische Gesamtsituation aufbauenden Gesteinskörper durch deren funktional unterschiedliche Eigenschaften (einschlusswirksamer Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein) und Ausdehnung bestimmt (s. 5.1.3.7.1). Die zur Gewährleistung des Radionuklideinschlusses unerlässliche Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist als relativ früh im Auswahlverfahren bekannte bzw. erhebbare Größe für die Standortsuche wichtig. Sie hängt von der hydraulischen Leitfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, deren effektiver Porosität und dem hydraulischen Gradienten im Standortbereich ab. Sind diese Größen bekannt, lässt sich die Mindestausdehnung berechnen.

Mindestausdehnung idealer Gesteinsbarrieren:

Nach den in Kap. 3 dargestellten Rahmenbedingungen soll der Isolationszeitraum für Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Größenordnung von einer Million Jahre liegen. Innerhalb dieses Zeitraums dürfen Radionuklide also durch das Grundwasser nicht über den Außenrand des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hinaus transportiert werden. Wobei hier „theoretische“ Diffusionseffekte nicht berücksichtigt werden.

In sehr gering durchlässigen und daher trockenen Gesteinskörpern (z.B. mechanisch unversehrtes Steinsalz) steht Grundwasser für den Radionuklidtransport nicht zur Verfügung. Die folgende Betrachtung bezieht sich daher auf mit Grundwasser gesättigte Gesteinskörper:

Für Grundwassertransportzeiten von ca. einer Million Jahren lassen sich mittels charakteristischer Daten zur Wasserdurchlässigkeit und effektiven Porosität von Barrieregesteinen und für repräsentative hydraulische Verhältnisse in der Endlagerteufe Mindestausdehnungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich errechnen. Als Ausgangssituation der Betrachtung wird eine ideale Gesteinsbarriere mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s und einer effektiven Porosität von 5% angenommen. An ihr soll ein hydraulischer Gradient der Größe 0.05 wirken. Für die Berechnung von Grundwassergeschwindigkeiten wird vereinfachend an

102

genommen, dass das Gesetz von Darcy auch für sehr kleine hydraulische Gradienten und Durchlässigkeitsbeiwerte gilt. Diese Annahme führt zu einer Überschätzung der Grundwassergeschwindigkeit.

Der Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s kennzeichnet etwa die Grenze zwischen advektivem und diffusivem, also von der Grundwasserbewegung unabhängigen und daher unvermeidlichem Radionuklidtransport im Grundwasser. Reale Werte in diesem Größenbereich kommen bei verschiedenen international für die Endlagerung ins Auge gefassten Gesteinstypen vor (s. 5.1.3.1). Die für die effektive Porosität und den hydraulischen Gradienten angegebenen Werte basieren auf Erfahrungen über hydraulische Verhältnisse im tiefen Untergrund.

Werden die Durchlässigkeitsbeiwerte und der Gradient variiert, so errechnen sich für eine Grundwassertransportzeit durch die ideale Gesteinsbarriere von ca. einer Million Jahre beispielhaft folgende Werte der Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches:

Tab. 5-3: Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	Gradient [m/m]	Rechnerische Mindestausdehnung [m]
10^{-12}	0.05	33
5×10^{-12}	0.05	160
10^{-11}	0.005	33

Ableitung eines Kriteriums: Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Zur Gewährleistung der allgemeinen Anforderung zum Isolationsvermögen muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich ausreichend dicht sein. Die hydraulische Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss besser oder äquivalent sein einer 50 m (33 m zuzüglich eines Sicherheitsfaktors von z.B. 1,5) mächtigen idealen Gesteinsbarriere, deren Barrierewirkung sich aus einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s, einer effektive Porosität von 5% bei einem hydraulischen Gradienten von 0.05 m/m errechnet.

5.1.3.8 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit

Die Anforderung einer guten Charakterisierbarkeit eines geologischen Raumes verfolgt im wesentlichen zwei Ziele. Zum einen zielt sie auf die Aussagequalität der Sicherheitsbewertung eines Standortes ab. Zum anderen ist sie auf die Explorierbarkeit eines Gebietes und damit auf die Abschätzung des Erkundungsaufwands und die Sicherheit bei der Planung eines Endlagerbergwerkes gerichtet.

Vom Arbeitskreis wurden für die Aussage einer guten räumlichen Charakterisierbarkeit eines Gebietes die Indikatoren "eintönige Fazies", "Lagerungsverhältnisse" und "Dichte von Störungen" identifiziert, die im Folgenden im Hinblick auf die Ableitung von Kriterien überprüft werden.

Indikator "eintönige Fazies"

Sachstand

Der Begriff "Fazies" wird im wesentlichen zur Beschreibung des petrographischen Aufbaus und der paläontologischen Merkmale eines Sedimentgesteins verwendet und umfasst das Erscheinungsbild und die Beschaffenheit eines Gesteins. Unter dieser Beschreibung sind in erster Linie kleinmaßstäbliche, d.h. gesteinspezifische Parameter zu verstehen.

Für die Entwicklung von Kriterien erscheint es hier sinnvoll, den Begriff auch auf nichtsedimentäre Gesteine, wie z.B. kristalline Gesteine auszudehnen, denn deren spezifische Beschreibungsparameter, wie z.B. Petrographie, Mineralbestand und Textur, dienen ebenfalls der räumlichen Charakterisierung des Gesteins.

Die Fazieseigenschaften eines Gesteins sind von dessen Bildungsbedingungen abhängig. Der Begriff Fazies beschreibt also nicht nur einen Ist-Zustand, sondern ist zugleich ein Spiegel der Bedingungen, die bei der Entstehung des Gesteins geherrscht haben. D.h., die Fazies gibt auch Auskunft über vergangene, z.T. großräumige geologische Prozesse, die für eine Beurteilung eines Gebietes von großer Bedeutung sind.

Ableitung eines Kriteriums

Der Indikator "eintönige Fazies" weist auf eine geringe lithologische Variation eines Gesteins hin. Als notwendige Bedingung dafür gilt, dass großräumig gleichbleibende Ablagerungs- bzw. Bildungsverhältnisse geherrscht haben müssen. Betrachtet man die Anforderung "eintönige Fazies" nicht nur in der flächenmässigen, sondern auch in der räumlichen Dimension, so müssen gleichbleibende Bedingungen auch langfristig vorhanden gewesen sein, denn nur so ist eine genügende Mächtigkeit der Gesteinsformation zu erreichen. Es muss daher bei der Ableitung eines Kriteriums auch der Zeitfaktor im Sinne langfristig gleichbleibender Bedingungen hinzukommen. Im Falle von Sedimentgesteinen sind dies gleiche Ablagerungsbedingungen, bei kristallinen Gesteinen gleiche oder ähnliche Kristallisationsbedingungen über lange Zeiträume.

In Bezug auf die Anforderung einer guten Explorierbarkeit bietet eine "eintönige Fazies" die Möglichkeit einer vollumfänglichen Charakterisierung (Erkundung) der betreffenden Gebirgskörper ohne wesentliche Beeinträchtigung ihrer günstigen Eigenschaften. Bei Sedimentgesteinen kann dies durch zerstörungsfreie geophysikalische Untersuchungen und wenige Bohrungen erfolgen. Bei kristallinen Gesteinen kann zusätzlicher Aufwand notwendig sein und die Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse durch die Heterogenität des Kluftnetzwerks erschwert werden. Dadurch ist besonders die für die Einschätzung eines potenziellen Schadstoffaustrags notwendige Modellierung der Fliessgeschwindigkeiten sehr aufwendig und z.T. problematisch.

Abgeleitet aus den genannten geologischen Vorgängen und Befunden im Hinblick auf den Indikator "eintönige Fazies" kann für die Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit eines geologischen Raumes folgendes Kriterium formuliert werden:

"Eine gute Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit ist gegeben in Gebieten mit Gesteinen, die unter langfristig gleichbleibenden oder sehr ähnlichen Bedingungen gebildet wurden."

Dabei muss betont werden, dass eine gleichzeitige oder anschließende tektonische Überprägung hier nicht berücksichtigt wird (siehe Indikator "Lagerungsverhältnisse").

Als Beispiele für Gebiete, die dieses Kriterium erfüllen können, sind zunächst großräumige Beckenstrukturen zu nennen, die durch langsame, kontinuierliche Absenkung entstanden sind und somit die Voraussetzung für eine gleichmäßige Sedimentation lieferten. Hierzu gehören auch mächtige Salzformationen.

Bei kristallinen Gesteinen können große Intrusionskomplexe (z.B. Granit) in Frage kommen, die einen langsamen Aufstieg erfahren haben und ungestört aus einer homogenen Schmelze entstehen konnten.

Indikator "Lagerungsverhältnisse"

Sachstand

Die Lagerungsverhältnisse geologischer Strukturen werden durch die Form und Anordnung von Gesteinskörpern charakterisiert. Als bestimmende Faktoren gelten zum einen die Art der Gesteinsbildung bzw. des Entstehungsraumes und zum anderen die tektonischen Vorgänge, die während oder nach der Entstehung der Gesteine eingetreten sind. Entstehungsart und -ort führen bei Sedimentgesteinen zur Schichtung als charakteristischer Lagerungsform und bei Tiefengesteinen zu Intrusionskörpern, Gängen etc. mit charakteristischer Form und Ausdehnung.

Bei den Sedimentgesteinen stellt die konkordante Lagerung (gleichmäßige Schichtung) den einfachsten geologischen Bautyp dar. Hier haben sich während oder nach der Sedimentation keine Änderungen mit Auswirkungen auf die Schichtung im Ablagerungsraum ergeben. Damit verbunden sind oft relativ einfach zu charakterisierende Grundwasserverhältnisse.

Ändern sich die Sedimentationsbedingungen z.B. durch Verlagerung des Ablagerungsraumes, entsteht eine diskordante, ungleichmäßige Lagerung der Schichten zu ihrem Untergrund. In diesem Fall werden die Lagerungsverhältnisse und damit

auch die Grundwasserverhältnisse komplizierter und somit im Vergleich zur konkordanten Lagerung schwerer zu charakterisieren.

Werden zusätzlich geologische Formationen während oder nach ihrer Entstehung durch Tektonik überprägt, kann ein sehr komplexer geologischer Bau entstehen. Große Einheiten können geklüftet, zerblockt und verstellt oder verfaltet werden. Die dadurch entstehenden kleinräumigen Einheiten erschweren die Abgrenzung von Homogenbereichen. Damit wird auch die Charakterisierbarkeit des geologischen Raumes z.T. stark eingeschränkt. Ein Defizit, dass sich besonders auf die Einschätzung der Grundwasserverhältnisse auswirkt.

Ableitung eines Kriteriums

Hauptelement bei der Einschätzung des Indikators "Lagerungsverhältnisse" für die Formulierung eines Kriteriums ist die Tektonik. Durch tektonische Überprägung entstehen entscheidende Veränderungen, die aus einfach gebauten geologischen Formationen komplexere und damit schwerer zu charakterisierende Strukturen entstehen lassen.

Günstig für die gute Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit sind jedoch geologisch einfach gebaute Gebiete. Es kann daher bezüglich des Indikators "Lagerungsverhältnisse" folgendes Kriterium formuliert werden:

"Eine gute Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit ist gegeben in geologisch einfach gebauten Gebieten, die sich in einem seit langer Zeit stabilen und ruhigen tektonischen Stadium befinden."

Indikator "Dichte von Störungen"

Sachstand

Störungen sind dynamische oder abgeschlossene tektonische Vorgänge, die im Ergebnis zur Veränderung der ursprünglichen Lagerung geologischer Formationen führen. Aus großräumigen Einheiten entstehen dabei klein- oder kleinräumige Blöcke, die von Störungen begrenzt werden. Geologische Befunde aus tektonisch nicht überprägten Bereichen können nicht auf tektonisch überprägte Bereiche

übertragen werden. Außerdem können Befunde aus klein- oder kleinsträumigen Einheiten nicht ohne Weiteres auf weitere Einheiten übertragen werden. Durch die schlechtere Explorierbarkeit steigt dann der Aufwand bei der Erkundung eines Gebietes erheblich.

Ableitung eines Kriteriums

Aus den genannten Folgen einer tektonischen Überprägung geht hervor, dass die Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit eines Gebietes mit zunehmender Dichte tektonischer Erscheinungen, wie z.B. Störungen, abnimmt. Der Indikator "Dichte von Störungen", also die Intensität der Zerblockung, könnte daher ein direktes Maß für die Charakterisierbarkeit eines geologischen Raumes darstellen. Dies setzt allerdings voraus, dass erstens ein hinreichender Kenntnisstand über die Existenz von Störungen im betreffenden Gebiet vorliegt und zweitens, dass diese Störungen räumlich über weite Bereiche ein berechenbares, regelmäßiges Netz bilden.

Der erste Punkt trifft für manche Gebiete zu. Der zweite Punkt muss aber aufgrund der bekannten Heterogenitäten bei Störungszonen und Kluftnetzwerken als nicht erfüllbar gelten. Es gibt zwar statistisch gesehen Gruppen von Trennflächen oder Störungen, die eine bestimmte Hauptrichtung aufweisen. Sie sind jedoch im mathematischen Sinne nicht exakt verteilt und daher nicht hinreichend genug berechenbar. Die Ableitung eines Kriteriums ist für den Indikator "Dichte von Störungen" daher nicht zufriedenstellend möglich.

5.1.3.9 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse

Die Arbeiten des Arbeitskreises hierzu haben gerade erst begonnen.

5.1.3.10 Gebirgsmechanische Verhältnisse

Begründung der Anforderung

Die mit der Anforderung "günstige gebirgsmechanische Verhältnisse" verbundene Zielsetzung aus geotechnischer bzw. gebirgsmechanischer Sicht besteht darin, im

anstehenden Wirtsgebirge ein standsicheres Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauen und Abfallablagerungshohlräumen ohne nachhaltige Gebirgsschädigung sowie mit möglichst geringem Aufwand an technischen Sicherungsmitteln für die vorgesehene Betriebszeit auslegen zu können. Darüber hinaus sollten sowohl in der Betriebszeit wie auch in der Nachbetriebszeit keine für den Erhalt der Barrierenintegrität nachteiligen mechanischen, thermischen oder hydraulischen Prozesse induziert werden. Insbesondere sollte die spätere Errichtbarkeit und Funktionsfähigkeit geotechnischer Barrieren, wie z.B. Streckendammbauwerke und Schachtverschlussbauwerke, nicht beeinträchtigt werden. Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des technogenen Eingriffs in das Gebirge vermindert bzw. geheilt und schließlich bei kontinuierlichem Erhalt der Barrierenintegrität eliminiert werden. Zum grundsätzlichen Tragverhalten verschiedener Gebirgsarten bei endlagerrelevanten Einwirkungen wird eine Studie erarbeitet (LUX 2001b).

Zu einer ersten groben geomechanischen Charakterisierung der Trageigenschaften des anstehenden und unter Endlagerwirkung stehenden Gebirges werden zur Identifizierung von die Anforderung nach günstigen gebirgsmechanischen Verhältnissen präzisierenden Eigenschaften folgende Hypothesen formuliert:

Eigenschaften

Eine geotechnisch/gebirgsmechanisch günstige Situation liegt vor, wenn

- das Wirtsgebirge als Haupttragelement anzusehen ist,
- in den geologischen Barrieren keine die Langzeitsicherheit nachhaltig beeinträchtigenden Sekundärpermeabilitäten erzeugt werden und
- die Funktionstüchtigkeit von geotechnischen Barrieren (Querschnittsabdichtungen) durch Gebirgsentfestigung nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus herabgesetzt wird.

Damit können zunächst zwei Indikatoren für günstige geomechanische Verhältnisse formuliert werden.

Indikator "Gebirge als Haupttragelement"

Sachstand

Das Gebirge wird als Haupttragelement angesehen, wenn die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden kann.

Das Gebirge wird hier als hinreichend tragfähig angesehen, wenn die aus den Einwirkungen (Lasten und Temperaturänderungen aus Gebirge und Abfall) resultierenden Beanspruchungen nicht seine Tragfähigkeit überschreiten. Die Gebirgstragfähigkeit ist erreicht, wenn nachhaltige Konturbrüche zu besorgen sind.

Die im Felsbau im Rahmen von Tragwerksplanungen/Stand sicherheitsnachweisen an dieser Stelle üblichen und notwendigen Begriffe "Standfestigkeit" und "Stand sicherheit" werden hier absichtlich nicht benutzt, da hier keine Nachweise geführt werden und auch keine Sicherheitsmargen in diese grundsätzlichen Betrachtungen eingearbeitet sind.

Ableitung eines Kriteriums

In Bearbeitung

Indikator "keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnahen entfestigten Saumzone"

Sachstand

Sekundärpermeabilitäten sind auf dilatante Gebirgsdeformationen zurückzuführen infolge einer Beanspruchung, die die Dilatanzfestigkeit überschreitet bzw. die dazu führt, dass sich latente Trennflächen öffnen. (Makro)risshafte Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen Saumzone sind ohne erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht detektierbar und bedingen daher zusätzliche, aber bei anderer Planung grundsätzlich vermeidbare Unsicherheiten in Sicherheitsanalysen. Die Prognostizierbarkeit der hydraulischen Situation wird herabgesetzt.

Bei der planmäßigen Beschränkung der Gebirgsentfestigung auf konturnahe Bereiche ist die geologische Barriere in ihrer räumlichen Ausdehnung zumindest für den Ist-Zustand eindeutiger charakterisierbar (Berechnungen) und exemplarisch belegbar (Felduntersuchungen).

Weiterhin bedingt eine großräumige und nicht hinreichend quantifizierte Gebirgsentfestigung eine zusätzliche Minderung der ansetzbaren hydraulischen Leistungsfähigkeit von geotechnischen Barrieren, wie Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerken. Eine konturnahe Entfestigungs-/Auflockerungszone ist dann gegeben, wenn die Überschreitung der Dilatanzfestigkeit als moderat anzusehen ist und auf einige wenige Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt.

Ableitung eines Kriteriums

In Bearbeitung

5.1.3.11 Natürliche Analoga als Hilfe bei der Kriterienentwicklung

Natürliche Analoga können wichtige Erkenntnisse zum Ablauf langfristiger geologischer Prozesse liefern. In zahlreichen Forschungsprojekten wurde gezeigt, dass durch die charakteristischen Eigenschaften natürlicher Analoga Vorgänge, die Abläufen in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen ähneln, anschaulich dargestellt und besser verstanden werden können. Der Arbeitskreis ließ daher ausgewählte natürliche Analoga näher auswerten, um bereits in der Natur existierende Beispiele für das Verhalten geologischer Strukturen mit radioaktiven Stoffen zu betrachten (NIERSTE & BRÄUER 2001). Bei der Suche nach einer günstigen geologischen Konfiguration und bei der Kriterienentwicklung können diese Beispiele Hilfestellung leisten.

Als Definition des Begriffes "Natürliche Analoga" wird zum einheitlichen Verständnis der Empfehlung des "Expertenkreis Natürliche Analoga" gefolgt (Konstitution im Anschluss an den Workshop "Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle" am 4. und 5. November 1993, Forschungszentrum Karlsruhe):

"Natürliche Analoga sind Systeme in der Natur, in denen über historische oder geologische Zeiträume physikalische und chemische Prozesse ablaufen oder abgelaufen sind, wie sie ähnlich in Endlagersystemen oder deren Teilsystemen (Nahfeld, Fernfeld, Biosphäre) zu erwarten sind."

Die Experten waren sich allerdings darüber einig, dass ein perfektes Analogon mit Übereinstimmungen in allen wesentlichen Anforderungen an ein gesuchtes Endlagersystem in der Natur nicht zu finden ist. Vielmehr wird jeder Standort gleichsam genetisch bedingte phänomenologische Verschiedenheiten wie Entsprechungen aufweisen.

Als Betrachtungsbeispiele wurden folgende internationale Analog-Projekte ausgewertet:

Cigar-Lake, Kanada; Oklo, Gabun; Tono Mine, Japan; Alligator Rivers: Koongarra Lagerstätte, Australien; Poços de Caldas: Morro do Ferro, Brasilien; Palmottu, Finnland; Ruprechtov, Tschechien; Dunarobba, Italien; Ortiatico, Italien; Hyrkkölä, Finnland sowie Gebiete im Norddeutschen Becken und im kristallinen Grundgebirge Deutschlands.

Schlussfolgerungen

Die ausgewerteten Beispiele belegen, dass natürliche Analoga zur Charakterisierung günstiger geologischer Gesamtsituationen herangezogen werden können. Sie ermöglichen Aussagen bezüglich

- geologischer Systeme, die als natürliche Barrieren wirken,
- günstiger Gesteinseigenschaften innerhalb geologischer Systeme und
- hoher Grundwasseralter bzw. langer Grundwasserfließzeiten.

Als natürliche Analoga für die Einschätzung der Langzeitentwicklung **geologischer Systeme** mit hoher Barrierenwirksamkeit dienen insbesondere Uranerzlagertstätten, bei denen zum Teil Zeiträume von bis zu 2 Milliarden Jahre betrachtet werden können.

Als wesentliche Beiträge für die Ableitung von Kriterien können folgende Punkte genannt werden:

- Die betrachteten Analogstandorte der Uranerzlagerstätten weisen Merkmale einer günstigen geologischen Gesamtsituationen auf. Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit dabei kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Der Wirtsgesteinskörper ist bezüglich seiner hydraulischen Eigenschaften offen (vgl. Kap. 5.1.3.7).
- Die offene Gesteinskonfiguration zeigt sich allerdings als nicht nachteilig, wenn ein abdichtender toniger Verwitterungshorizont einer alten Kontinentaloberfläche oder ein Tonmantel (Alterationszone der Lagerstätte) oder abdichtende tonige Formationen im Deckgebirge entscheidender Bestandteil sind.
- Die betrachteten Salzstrukturen in Norddeutschland entsprechen einem Konfigurationstyp, bei dem das Wirtsgestein als Barriere selbst wichtiger Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist. Hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften handelt es sich um ein geschlossenes System.

In Bezug auf günstige **Gesteinseigenschaften** liefern Uranerzlagerstätten, Tonvorkommen und die genannte Kupfererzlagerstätte Beispiele.

Für viele Radionuklide muss das Rückhaltevermögen unterschiedlicher Tonminerale im Gesteinsverband (Poren, Mikrofissuren), in Kluftfüllungen oder in Verwitterungsdecken als besonders hoch und über lange Zeiträume stabil eingestuft werden (geochemische Randbedingungen: pH-Werte zwischen 6,5 bis 8,5; Eh-Werte von -300 bis -400 mV; niedrige Gebirgstemperaturen von ca. 70 Grad Celsius).

- Stabile Bindungen von Radionukliden an Tonminerale sind auch in wassergesättigtem Milieu und bei oxidierenden Bedingungen zu beobachten.
- Stabile Bindungen bestehen auch an organischem und glasreichem Material.
- Es wurde beobachtet, dass Tonsedimente und Tonsteine im Einzelfall bei hohen Temperaturen sowie beim Zutritt hydrothormaler Gase und Flüssigkeiten

stabil sind; d.h., auch nach thermischer Einwirkung ist die Durchlässigkeit immer noch gering.

Als Analoga für hohe **Grundwasseralter, lange Grundwasserlaufzeiten oder sehr langsame Grundwasserbewegungen** können Gebiete mit besonderen geologischen Strukturen herangezogen werden:

- Beobachtungen in norddeutschen Beckenstrukturen lassen auf Verweilzeiten des Grundwassers von Hunderttausenden bis Millionen von Jahren schließen.
- Salzreiche Lösungen im Kristallin (Grundgebirge), die chemisch nicht aus dem Mineralbestand des Wasserleiters abgeleitet werden können, deuten auf ein Eindringen aus dem Deckgebirge im Zuge von Hebungsprozessen und lange Verweilzeiten in der Geosphäre hin.
- Fluid-Einschlüsse in Salzstrukturen sind häufig bereits während der Entstehung der Salzlagerstätten entstanden und können damit auf eine lange Zeit unbeeinflusste Salzlagerstätte hindeuten.

Allgemein können natürliche Analoga dazu dienen, langfristige komplexe geologische Vorgänge anschaulich und nachvollziehbar darzustellen. Sie tragen damit zur Ableitung, zum leichteren Verständnis und besonders zur Nachvollziehbarkeit von Kriterien für günstige geologische Verhältnisse im Auswahlverfahren bei.

5.1.3.12 Zusammenfassung zu den Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation

Der Arbeitskreis hat Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation formuliert, ihnen charakteristische Eigenschaften zugeordnet und Indikatoren zu deren Bewertung identifiziert. Zur Beurteilung der Eigenschaften und Indikatoren wurde die Entwicklung von Kriterien auf der Basis geowissenschaftlicher Kenntnisse und Informationen aufgenommen. Der Stand der Bearbeitung zeigt, dass für eine Reihe von Indikatoren ausreichende Kenntnisse für die Erarbeitung von Kriterien vorliegen, wie beispielsweise für die Indikatoren "Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinstypen, Grundwasseralter, Gasverträglichkeit". Für andere Indikatoren,

z.B. "linearer Dichtegradient", reicht der derzeitige Kenntnisstand für die Ableitung von Kriterien nicht aus.

Darüber hinaus wurden Indikatoren identifiziert, für die zur Kriterienentwicklung über die allgemeinen geowissenschaftlichen Kenntnisse hinaus standortspezifische und endlagerkonzeptionelle Informationen erforderlich sind, z.B. für den Indikator "günstige hydrochemische Bedingungen". Sie werden erst in späteren Verfahrensschritten ableitbar sein.

Im weiteren Verlauf seiner Arbeiten wird der Arbeitskreis die Kriterienentwicklung vervollständigen. Er wird Mindestanforderungen an günstige geologische Gesamtsituationen formulieren und eine Wichtung und Skalierung der Anforderungen und Kriterien festlegen.

Der gegenwärtige Stand der Arbeiten ist in Tab. 5-4 zusammengefasst.

Tab. 5-4: Kriterien für die günstige geologische Gesamtsituation

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Keine oder nur langsame Grundwasserbewegung (in der Endlagertiefe)	Gesteinstyp	<p>Der bzw. die Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen geringe, die Grundwasserbewegung hemmende Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.</p> <p>Nach gegenwärtigem Bearbeitungsstand können mit hinreichender Zuverlässigkeit nur die Gesteinstypen Steinsalz und Tonstein (in einer Tiefe größer 300 m) als Indikatoren für eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit in der wahrscheinlichen Endlagertiefe angesehen werden kann.</p> <p>Mergelstein kann die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit ebenfalls aufweisen, wenn keine karbonatreichen Einschaltungen (Kalksteinbänke) mit Trennfugen vorhanden sind.</p>	<p>Die vorliegenden Ergebnisse müssen für die Ableitung eines zuverlässig anwendbaren Kriteriums</p> <p>"Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern" noch weiter abgesichert werden.</p>

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
	Temperaturverteilung im tiefen Untergrund	Die Temperaturverteilung im tiefen Untergrund darf nicht durch Grundwasserströmungen beeinflusst sein. Das durch die letzte Eiszeit verursachte Temperatursignal im tieferen Untergrund darf durch advektiven Wärmetransport mit dem Grundwasser nicht überprägt worden sein. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass im Rahmen des zukünftigen Auswahlverfahrens die Temperaturverteilung in Gebieten mit ausreichenden Kenntnissen über die Temperaturverteilung und petrophysikalischen Daten zur Berechnung der Anteile des Wärmetransports, der durch Grundwasserströmung verursacht ist, genutzt werden kann.	Mit der Methode können im Hinblick auf die Grundwasserströmung ungünstige Gebiete für die Endlagerung zuverlässig ausgewiesen werden. Günstige Gebiete sind allein durch eine Analyse der Temperaturverteilung nicht zuverlässig erkennbar.
	Grundwasseralter	Das Grundwasser in Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich darf kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 enthalten. Nur wenn die Einflussfaktoren bekannt sind, sind Rückschlüsse auf das Grundwasseralter aus dem Verhältnis $\delta(\text{Deuterium})$ zu $\delta(\text{Sauerstoff-18})$ möglich.	Die Erfüllung dieses Kriteriums allein ist kein Beleg für ein ausreichend hohes Grundwasseralter. Hiermit können aber ungünstige Verhältnisse zuverlässig ausgewiesen werden.
	Lineare Zunahme des Dichtegradienten	Der Indikator "teufenabhängige Mineralisation / teufenabhängiger Salzgehalt" kann für die Erfüllung der Anforderung "keine oder langsame Grundwasserbewegung (in der Endlagerteufe)" nicht generell als einschlägig angesehen werden.	Der Indikator ist für die Standortbewertung bei ausreichender Datendichte ableitbar

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Günstige hydrochemische Verhältnisse	Chemisches Gleichgewicht	Das tiefe Grundwasser in Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich soll sich mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht befinden. Der Nachweis hierfür erfolgt mit standortspezifischen geochemischen Modellrechnungen.	Quantitative Kriterien sind erst bei Kenntnis der Standortgegebenheiten und des Anlagenkonzepts ableitbar.
	pH-Wert	Ein günstiger pH-Bereich hängt vom Gehalt an Carbonat-Spezies im Tiefenwasser ab. Allgemein ist ein pH-Wert von 7-8 im Tiefenwasser als günstig einzustufen.	
	Redoxbedingungen	Günstige Redoxbedingungen bieten anoxische-reduzierende Milieus im tiefen Grundwasser. Die Anwesenheit von Eisen(II)-Mineralien im Wirtsgestein weist auf günstige Redoxbedingungen hin.	
	Kolloidbildung und Kolloidstabilität	Der Gehalt an Kolloiden im Tiefenwasser soll möglichst gering sein. Hohe Ionenstärken im Tiefenwasser destabilisieren im Allgemeinen Kolloide und sind deshalb als Indikator für günstige Verhältnisse einzustufen.	
	Komplexbildung mit Grundwasserinhaltsstoffen	Gehalt an Komplexbildnern im Tiefenwasser sollte möglichst gering sein. Die Carbonat-Konzentration im Tiefenwasser sollte gering sein. Die Ableitung eines allgemein gültigen quantitativen Kriteriums ist nicht möglich.	
	Sorption und Ausfällung	Gesteine mit Mineralphasen, die eine hohe reaktive Oberfläche aufweisen (z.B. Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxihydrate), sind wünschenswert. Sorptionsfähigkeit wird stark durch das geochemische Milieu beeinflusst.	

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden	Filterung von Kolloiden	Ein Kriterium ist nicht ableitbar	
	Sorption	<p>Ein pauschal anwendbares quantitatives Kriterium für günstige geochemische Verhältnisse im Hinblick auf Sorptionsprozesse ist nicht ohne weiteres ableitbar.</p> <p>Allerdings stellen Gesteine mit Tonmineralen oder Mangan-, Eisen- oder Aluminiumhydroxid oder -oxid unter bestimmten Milieubedingungen gute Sorbenten dar. Sie sind generell positiver zu werten als solche, die arm an diesen Mineralen sind (z.B. Sandsteine, Granite, Gneise) und daher generell geringe Sorptionsfähigkeit aufweisen.</p> <p>In den meisten Fällen wirken neutrale bis leicht alkalische pH-Werte, geringe Ionenstärken und geringe Konzentration an anorganischen oder organischen Komplexbildnern sorptionsfördernd. Höhere Temperaturen wirken meist nur bei gleichzeitiger O₂-Anwesenheit begünstigend (Bildung von Eisenhydroxiden).</p>	Kriterien erst nach Kenntnis der Standortgegebenheiten und der Anlagenkonzeption ableitbar

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Gute Gasverträglichkeit	Gasdruck im Endlagerbereich	<p>Die geologische Gesamtsituation muss so beschaffen sein, dass ein Druckaufbau aufgrund von Gasentwicklung derart begrenzt bleibt, dass eine Gefährdung der Barrierenintegrität und der Barrierenwirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht erfolgt. Unterschiede ergeben sich für trockene gegenüber wassergesättigten Wirtsgesteinen und gasentwickelnden Abfällen und Abfällen ohne interne Gasproduktion.</p> <p><u>Endlager in einem trockenen Wirtsgestein</u></p> <p>Für den LAW/MAW Abfallstrom, der eine interne Gasentwicklung aufweist, ist einer Druckentwicklung entweder durch Abfallkonditionierung oder durch konzeptionelle Maßnahmen bei der Endlagerauslegung, z.B. durch Bereitstellung von Gassammelräumen (Porenräumen), zu begegnen.</p> <p>Der HAW/BE Abfallstrom stellt hinsichtlich der Gasentwicklung keine wesentlichen Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.</p> <p><u>Endlager in einem wassergesättigten Wirtsgestein</u></p> <p>Zur Druckbegrenzung müssen die Gasbildungsrate, der Endlagerhohlraum und die hydraulische Leitfähigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aufeinander abgestimmt werden.</p> <p>Zur Begrenzung des Grundwasserangebotes und damit zur Begrenzung der Gasbildung ist bei den HAW/BE-Abfällen ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit einem Durchlässigkeitsbeiwert kleiner oder gleich 10^{-12} m/s günstig.</p> <p>Für LAW/MAW Abfallströme, für die aufgrund interner und externer Gasentwicklung eine Referenz-Gasbildungsrate angenommen werden muss, sollte der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine hydraulische Leitfähigkeit größer 10^{-10} m/s aufweisen. Kleinere hydraulische Leitfähigkeiten erfordern für diese Abfallströme eine Reduzierung der Gasbildungsraten, z.B. durch Konditionierungsmaßnahmen.</p>	<p>Überprüfung der Kriterien auf der Basis von Standortdaten und Anlagenkonzept erforderlich</p> <p>Arbeitshypothese</p> <p>Zum sicheren Erhalt der Integrität und der Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches in wassergesättigten Gebirgssystemen soll die aufgrund der Gasentwicklung zu erwartende Druck-erhöhung im End-lagerbereich 20% des hydrostatischen Druckes nicht überschreiten.</p>

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	Duktilität	Plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz unter Bedingungen in situ (Druck, Temperatur).	Die an den Indikatoren orientierte qualitative/quantitative Formulierung der jeweiligen Bewertungskriterien ist noch in Bearbeitung.
	Sekundär-permeabilität	Reversible Sekundärpermeabilität bei Anhebung der isotropen Spannung und Verminderung der Deviatorspannung.	
	Verheilungsfähigkeit	Verheilungsfähigkeit von Rissen durch geochemisch geprägte Rekristallisationsprozesse im Trennflächenbereich (Druck, Temperatur). Dabei kann die Verheilungsfähigkeit von Rissen in bestimmten Gesteinsfazies als Indikator für die Anforderung „geringe Neigung zur Rissbildung“ nicht nur für geotektonisch gering beanspruchte Formationen, sondern auch für Gebirgsformationen angesehen werden, die zwar rezent rissfrei sind, in ihrer geologischen Vergangenheit aber tektonisch (über)beansprucht worden sind.	
	Permeabilität in situ	Geringe Permeabilität in situ trotz geogen deviatorischer Beanspruchung.	
	Trockene Gruben	Erfahrungsgemäß langfristig trockene Grubengebäude bei entsprechender Abbauführung.	
	Wasserlösliche Gesteine und leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe	Existenz von wasserlöslichen Gesteinen und von Gebirgsformationen mit leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen.	

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Günstige Konfiguration der Gesteinskörper	<p>Große räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs</p> <p>Günstige Anordnung von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamen Gebirgsbereich</p> <p>Funktionsbezogene Gesteinseigenschaften von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich</p>	Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über die rechnerische Mindestausdehnung gemäß Kap. 5.1.3.7.2 hinausgehende räumliche Ausdehnung verfügen und aus einem Gesteinskörper mit hoher Barrierewirksamkeit (insbesondere geringe Gebirgsdurchlässigkeit, hohes Rückhaltevermögen) bzw. mehreren Gesteinskörpern mit übereinstimmenden Eigenschaften bestehen.	<p>Zielkonflikt:</p> <p>Hinsichtlich Radionuklidtransport mit dem Grundwasser oder Vermeidung zu hoher Gasdrücke in der Endlagerformation günstige Konfigurationen unterscheiden sich!</p>

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Gute räumliche Charakteri- sierbarkeit hinsichtlich der gesuchten Eigenschaf- ten	Eintönige Fazies	Gesucht werden ausgedehnte Gebiete mit Gesteinen, die unter langfristig gleichbleibenden oder sehr ähnlichen Bedingungen gebildet wurden.	Eine bei der Gesteinsbildung ablaufende oder anschließende tektonische Überprägung ist nicht berücksichtigt
	Lagerungsverhältnisse	Gesucht werden Gebiete, die geologisch einfach gebaut sind und die sich seit langer Zeit in einer stabilen und ruhigen tektonischen Situation befinden	Zeitraum größer als eine Million Jahre
	Dichte von Störungen	Ableitung eines Kriteriums ist nicht zufriedenstellend möglich	Heterogenität von Störungen ist nicht „normierbar“

Fortsetzung Tab. 5-4

Anforderung	Indikator	Kriterium	Bemerkung
Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse		Die Arbeiten des Arbeitskreises hierzu haben gerade erst begonnen.	
Gute Temperaturverträglichkeit der Gesteine	Physikalisch-chemische Eigenschaften des Stoffbestandes der Gesteine homogenes Korngefüge, Wassergehalt	Eine hohe und isotrope Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, hohe Temperaturintensität der Gesteine sowie ein hohes Relaxationsvermögen und Zugfestigkeit der Gesteine haben sich in den für Endlagerprojekte durchgeführten Sicherheitsanalysen als positive Eigenschaften herausgestellt.	Eine Ableitung von quantitativen Kriterien ist z. Zt. in Bearbeitung.
Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	Erforderlicher Ausbau im Bergwerk	Auffahrung und Betrieb des Bergwerks ohne planmäßigen Ausbau bei verträglichen Deformationen.	Kriterien sind noch in Bearbeitung
	Sekundärpermeabilitäten	Keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone.	Kriterien sind noch in Bearbeitung

5.2 Sozialwissenschaftliche Kriterien und infrastrukturelle Kriterien

Der Arbeitskreis arbeitet intensiv an der Entwicklung der sozialwissenschaftlichen Kriterien. Allerdings sind diese Arbeiten noch nicht so weit fortgeschritten und abgestimmt, dass detaillierte Ergebnisse vorgestellt werden können. Deshalb wird im Folgenden lediglich ein Überblick über Funktion und Wertigkeit dieser Kriterien sowie ihre mögliche Einbindung in das Suchverfahren gegeben.

5.2.1 Begriffsbestimmungen

In früheren Arbeitsphasen des Arbeitskreises wurden alle Kriterien, die sich auf andere als geowissenschaftliche Sachverhalte beziehen, generell als „nichtgeowissenschaftliche Kriterien“ bezeichnet. Mit dem Fortschreiten der Arbeiten kann nun eine Differenzierung und genauere Bestimmung dieser Kriterien vorgenommen werden.

Sozialwissenschaftliche Kriterien:

Oberbegriff für alle Kriterien, die sich im weitesten Sinne auf gesellschaftliche Sachverhalte bzw. soziale Zusammenhänge beziehen. Sie lassen sich in planungswissenschaftliche und sozioökonomische Kriterien unterteilen.

Die planungswissenschaftlichen Kriterien umfassen raumplanerische sowie nutzungs- und schutzgut- bzw. ressourcenbezogene Sachverhalte.

Die entsprechenden Sachverhalte beruhen weitgehend auf gesetzlichen Grundlagen und sind meist in Plänen (z.B. Raumordnungsprogrammen), Schutzgebietsausweisungen u.ä. festgelegt. Insofern sind die zu berücksichtigenden planungswissenschaftlichen Kriterien bekannt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die gesetzlichen Grundlagen im Laufe der Zeit verändern können. Deshalb kann der Arbeitskreis hier keine festen „Vorgaben“ machen, sondern er benennt beispielhaft zu regelnde Bereiche. Hierzu gehören beispielsweise besonders geschützte Bereiche (z.B. Wasserschutzgebiete, Naturschutzgebiete), vorrangige oder besonders empfindliche Flächennutzungen oder natürliche Ressourcen mit besonderer Bedeutung.

Die sozioökonomischen Kriterien umfassen soziale, kulturelle und ökonomische Aspekte, die von der Standortsuche und der späteren Existenz eines Endlagers beeinflusst werden können. Beispiele sind das ökonomische (Entwicklungs-)potenzial und die Lebensqualität einer Region, ihr kulturelles Potenzial und der innere Friede. Zu den sozioökonomischen Kriterien gehört auch der Aspekt der „Freiwilligkeit“, d.h. die Duldung von konkreten Standortuntersuchungen durch Kommunen.

Mit der Einbeziehung dieser Kriteriengruppe in das Suchverfahren wird Neuland beschritten. Der Arbeitskreis lässt sich deshalb beraten, wie entsprechende Aspekte sinnvoll in Kriterien umgesetzt werden können. Diese Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

Die infrastrukturellen Kriterien bilden eine eigene Kriteriengruppe und umfassen standortbezogene infrastrukturelle Aspekte (z.B. Möglichkeiten der anlagenbezogenen Ver- und Entsorgung am Standort, Transportanbindung des Standortes u.a.). Die infrastrukturellen Kriterien sind vom Arbeitskreis bisher noch nicht bearbeitet worden. Deshalb wird auf sie im Folgenden nicht im Detail eingegangen.

5.2.2 Funktion und Wertigkeit der sozialwissenschaftlichen Kriterien

Bei den sozialwissenschaftlichen Kriterien lassen sich – genau wie bei den geowissenschaftlichen Kriterien – zwei Hauptfunktionen unterscheiden. Sie dienen einerseits als Ausschlusskriterien, andererseits als Abwägungskriterien. Nur die Infrastrukturkriterien besitzen ausschließlich Abwägungsfunktion.

Ausschlusskriterien müssen gewährleisten, dass all die Gebiete im Suchverfahren ausgeschlossen werden, die nicht die sozialwissenschaftlichen Mindestanforderungen erfüllen. Auf Grund gesetzlicher u.ä. Festlegungen ist bei den planungswissenschaftlichen Kriterien bekannt, welche Aspekte als Ausschlusskriterien zu berücksichtigen sind (z.B. ausgewiesene Wasserschutzgebiete, Naturschutzgebiete). Ob sich bei den sozioökonomischen Kriterien Ausschlusskriterien formulieren lassen, wird derzeit noch untersucht. Obwohl die sozialwissenschaftlichen Ausschlusskriterien während eines bestimmten Verfahrensschrittes „konzentriert“ angewendet werden (s. 5.2.3), müssen sie während des gesamten Suchverfahrens „im Hintergrund“ wei

ter mitberücksichtigt werden, damit die Überprüfung der Einhaltung der Mindestanforderungen auch bei Vorliegen neuer Informationen gewährleistet ist.

Abwägungskriterien dienen der vergleichenden Bewertung von Regionen und Standorten zwecks Identifizierung der relativ bestgeeigneten Regionen bzw. Standorte mit Minimierung von (Nutzungs-)Konflikten. Mit ihrer Hilfe kann auch das Abwägungsgebot erfüllt werden. Innerhalb der Gruppe der planungswissenschaftlichen Kriterien sind die Abwägungskriterien bekannt. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Vorranggebiete für bestimmte Nutzungen (z.B. für Land- und Forstwirtschaft, Rohstoffgewinnung). Die Abwägungskriterien kommen erst in späteren Verfahrensschritten zur Anwendung (s. 5.2.3). Hinsichtlich der sozioökonomischen Kriterien wird versucht, solche Indikatoren zu finden, die sich unmittelbar an die regionale Entwicklung bzw. die Entwicklungsmöglichkeiten potenzieller Standortregionen anknüpfen. Hieran wird derzeit gearbeitet.

Wegen des vom Arbeitskreis als notwendig angesehenen umfassenden Anspruchs des Suchverfahrens sind die sozialwissenschaftlichen Kriterien generell von hoher Bedeutung. Ihnen kommt – jedenfalls soweit es ihre Funktion als Ausschlusskriterien betrifft – grundsätzlich die gleiche Wertigkeit zu wie den geowissenschaftlichen Kriterien. Praktisch bedeutet dies zum Beispiel, dass ein Bereich, der bei Anwendung sozialwissenschaftlicher Ausschlusskriterien ausgeschlossen werden muss, auch dann ausgeschlossen bleibt, wenn der Bereich unter geowissenschaftlichen Gesichtspunkten als „besonders günstig“ bewertet wird.

Bei der Wertigkeit der Ausschlusskriterien ist aber ein Aspekt zu beachten: Die geologischen Verhältnisse sind nicht veränderbar. Die zu beurteilenden planungswissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Sachverhalte sind im wesentlichen durch gesetzliche Festlegungen und gesellschaftliche Entwicklungen und Wertungen zustande gekommen. Insofern sind diese Festlegungen und Wertungen prinzipiell veränderbar, und sie werden in der Praxis auch verändert. Deshalb erscheint es sinnvoll, in begründeten Ausnahmefällen geowissenschaftlichen Aspekten (die ja gerade die erforderliche Langzeitsicherheit gewährleisten sollen) den Vorrang vor sozialwissenschaftlichen Aspekten einzuräumen. Eventuelle Ausnahmefälle müssen aber eindeutig bestimmt und begründet sein.

Die Wertigkeit der Abwägungskriterien muss noch festgelegt werden. Dies betrifft sowohl die Wertigkeit der beiden großen Kriteriengruppen (sozialwissenschaftliche und geowissenschaftliche Kriterien) zueinander als auch die Wertigkeit der einzelnen Kriterien zueinander. Ohne Festlegung der Wertigkeit (oder des „Gewichts“) der Kriterien kann im Verfahren keine begründete Abwägung bzw. vergleichende Bewertung vorgenommen werden. Der Arbeitskreis arbeitet derzeit an dieser Aufgabe.

5.2.3 Einbindung der sozialwissenschaftlichen Kriterien in das Verfahren

Sozialwissenschaftliche Kriterien werden in verschiedenen Verfahrensschritten angewandt. Nach derzeitigem Stand der Überlegungen sind dies die Schritte 3 bis 6 (vgl. auch Abb. 4-1).

In **Schritt 3** werden die sozialwissenschaftlichen Ausschlusskriterien „konzentriert“ angewandt. Ziel ist es, die Gebiete auszuschließen, die aus planerischen oder sozioökonomischen Gründen für ein Endlager nicht in Frage kommen. Damit ist sichergestellt, dass im weiteren Verfahren nur Gebiete verbleiben, die die Mindestanforderungen aus planerischer und sozioökonomischer Sicht erfüllen.

In **Schritt 4** werden zum ersten Mal sozialwissenschaftliche Abwägungskriterien eingesetzt. Sie dienen zusammen mit geowissenschaftlichen Kriterien dem Ziel, die im Verfahren befindlichen Gebiete auf kleinere Regionen mit besonders günstigen Voraussetzungen für ein Endlager einzugrenzen. Dabei müssen die Regionen identifiziert werden, die beispielsweise gegenüber anderen Flächen relativ geringere Nutzungskonflikte aufweisen, eine geringere „Empfindlichkeit“ gegenüber Eingriffen besitzen oder aber bei denen mögliche negative soziale, kulturelle oder ökonomische Folgewirkungen minimiert werden können (ggf. auch positive Folgen erzeugt werden können). Hier findet also eine vergleichende Bewertung bzw. Abwägung statt.

In **Schritt 5** werden Standorte für Felduntersuchungen ermittelt. Dies kann nach derzeitigen Überlegungen mittels des sozioökonomischen Kriteriums „Freiwilligkeit“ geschehen. Alternativ können auch regionale Mediationsverfahren eingesetzt werden. Den sozialwissenschaftlichen Kriterien kommt hier also eine ganz wesentliche Be

deutung zu. Die Diskussion darüber, ob Freiwilligkeit als entscheidendes Kriterium angewendet werden soll, ist aber noch nicht abgeschlossen.

In **Schritt 6** schließlich werden die übertägig untersuchten Standorte einer erneuten vergleichenden Bewertung bzw. Abwägung unterzogen, um den relativ besten Standort identifizieren zu können. Auch hier werden wieder alle sozialwissenschaftlichen Abwägungskriterien – im Verbund mit geowissenschaftlichen Kriterien – eingesetzt. Zusätzlich werden hier die infrastrukturellen Kriterien berücksichtigt.

Für **Schritt 7** gehen die derzeitigen Überlegungen dahin, die Bereitschaft für weitergehende Eignungsuntersuchungen und die Einrichtung eines Endlagers bei den grundsätzlich in Frage kommenden Gemeinden abzufragen, d.h., auch in diesem Schritt könnte das sozioökonomische Kriterium der Freiwilligkeit eingeführt werden. Die Überlegungen sind noch nicht abgeschlossen.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass den sozialwissenschaftlichen Kriterien im Suchverfahren große Bedeutung zugemessen wird und damit der Anspruch auf ein alle Aspekte berücksichtigendes Suchverfahren erfüllt werden kann. Insbesondere mit den sozioökonomischen Kriterien werden Gesichtspunkte und Zusammenhänge bewertet, die bei Suchverfahren für Standorte von Versorgungsanlagen ausreichend berücksichtigt werden müssen. Hier wird also weitgehend Neuland beschritten.

Der Arbeitskreis wird sich zukünftig verstärkt mit der Ableitung und Formulierung der sozioökonomischen Kriterien sowie Überlegungen zur Freiwilligkeit befassen. Weitere wesentliche Aufgaben sind die Gewichtung der Abwägungskriterien, die Klärung methodischer Fragen bei der vergleichenden Bewertung sowie die Feinabstimmung zwischen den einzelnen Verfahrensschritten und den jeweils zuzuordnenden sozialwissenschaftlichen und geowissenschaftlichen Kriterien.

6 Internationale Erfahrungen

Zum Auftrag des Arbeitskreises gehört es, bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern zu berücksichtigen. Der Arbeitskreis beschäftigt sich daher intensiv mit der Entwicklung und Umsetzung

von Auswahlverfahren für Endlagerstandorte im Ausland. Er hat dazu Berichte erarbeiten lassen und sucht den direkten Erfahrungsaustausch mit verantwortlichen Institutionen und Personen insbesondere in solchen Staaten, in denen in den letzten Jahren interessante Verfahrensentwicklungen stattgefunden haben. Er hat bereits die Schweiz und Schweden besucht.

Die Erfahrungen in anderen Ländern und die daraus für die Arbeit des Arbeitskreises resultierenden Konsequenzen werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt. Dabei wird differenziert nach der generellen Vorgehensweise bei der Standortwahl, den angewendeten Kriterien, der Öffentlichkeitsbeteiligung und der Einbeziehung von Langzeitsicherheitsnachweisen in Auswahlverfahren. Im Vordergrund steht die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bzw. abgebrannter Brennelemente; denn damit sind die höchsten Anforderungen an das Endlager und die Qualität des Auswahlverfahrens verbunden.

6.1 Vorgehensweise bei der Auswahl

Trotz weitgehender Übereinstimmung der generellen Zielsetzung von Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, nämlich langfristig sichere Standorte für die Endlagerung der in den Ländern anfallenden radioaktiver Abfälle zu finden, werden zur Erreichung dieses Ziels im Detail durchaus unterschiedliche Ansätze verfolgt. Daraus resultieren mehr oder weniger deutliche Unterschiede im konkreten Vorgehen bei der Standortwahl. Sie haben beispielsweise folgende Ursachen:

- Unterschiedliche politische und rechtliche Rahmenbedingungen,
- unterschiedliche Konzepte zur Aufteilung der Abfälle auf Entsorgungswege bzw. Endlagertypen,
- unterschiedliche Prioritätensetzung bei der Standortsuche (z.B. Betonung der Verfügbarkeit vorhandener Informationen),
- unterschiedliche Ansprüche an den gesuchten Standort (geeignet, relativ bester),
- unterschiedliche geologische Verhältnisse im Suchgebiet (Staatsgebiet),

- unterschiedliche Größe des Suchgebietes.

In vielen Staaten haben gezielte Aktivitäten zur Ausweisung von Endlagerstandorten - wie in Deutschland - in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts begonnen. Dabei wurde die Standortauswahl praktisch überall zunächst als allein technisch-wissenschaftliche Aufgabe betrachtet. Eine ausgeprägte Endlagerforschung mit Blick auf den Nachweis der Langzeitsicherheit und das umfassende Verständnis des Gesamtsystems Endlager gab es erst in Ansätzen.

Praktisch alle damals eingeleiteten Verfahren waren schrittweise aufgebaut und beinhalteten Elemente der vergleichenden Bewertung geowissenschaftlicher Sachverhalte. Die konkreten Ziele einzelner Schritte bzw. des Vergleichs waren jedoch unterschiedlich: Z.B. sollten in den USA verschiedene Wirtsgesteinstypen im Zuge der Standortwahl miteinander verglichen werden, während in Deutschland bereits vor Beginn des Auswahlverfahren eine Festlegung auf das Wirtsgestein Steinsalz (und zwar in Salzstöcken) erfolgt ist. Für den Verfahrensablauf bestimmend waren neben solchen Vorfestlegungen auch die Verfügbarkeit geowissenschaftlicher Informationen bzw. die Notwendigkeit, sie vor bestimmten Entscheidungen zu erheben. Besonders bedeutsam waren und sind daneben auch die durch die nationalen rechtlichen bzw. verwaltungsmäßigen Rahmenbedingungen vorgegebenen Zwangspunkte für ein Auswahlverfahren, etwa zur formalen Beteiligung bestimmter Institutionen oder von Gebietskörperschaften am Verfahren.

Verfahrenstransparenz und Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses spielten bei Konzipierung und Umsetzung der meisten Verfahren keine oder nur eine unbedeutende Rolle. Einige Verfahren sind durch Eingriffe von außen so stark beeinflusst worden, dass nicht die vorab festgelegten Verfahrensregeln, sondern sachfremde Argumente das Ergebnis der Auswahl bestimmt haben. Die Verfahren haben dadurch ihre fachliche Nachvollziehbarkeit, die beteiligten Institutionen bei Teilen der Öffentlichkeit an Glaubwürdigkeit verloren. Bis heute hat keines der in den siebziger Jahren begonnenen nationalen Auswahlverfahren für hochaktive Abfälle zur Inbetriebnahme eines Endlagers geführt.

Die negativen Erfahrungen mit Auswahlverfahren sowie die seit den siebziger Jahren eingetretenen gesellschaftlichen Entwicklungen haben in den letzten Jahren in vielen

Staaten zu einem Umdenken geführt: Die Standortauswahl wird nicht mehr nur als technisch-wissenschaftlicher Vorgang gesehen, sondern bedarf unbedingt der Berücksichtigung bestimmter gesellschaftlicher Rahmenbedingungen und der demokratischen Legitimation.

Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Verfahrens sowie Akzeptanz des Auswahlergebnisses gelten daher heute international als selbstverständliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Standortauswahl. Auswahlverfahren müssen daher folgende gesellschaftliche und methodische Mindestanforderungen erfüllen:

- Rechtzeitige Festlegung der Spielregeln,
- schrittweises Vorgehen, klare Verfahrensstruktur mit eindeutigen Arbeits- und Entscheidungsschritten (sowie ein gestuftes Genehmigungsverfahren),
- fundierte Kriterien,
- systematische Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Aspekte,
- frühzeitige (verbindliche) Einbeziehung der Öffentlichkeit bzw. interessierter/betroffener Gruppen und Personen in das Verfahren.

Die nationalen Wege zur Umsetzung dieser Anforderungen sind in den einzelnen Staaten allerdings nach wie vor unterschiedlich, da die eingangs genannten Gründe für Verfahrensunterschiede weiterhin Bestand haben.

6.2 Kriterien

Die Sichtung und Auswertung der internationalen Kriterien und Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (BORK et al. 2001) ergab folgendes Bild:

Hauptziel der Endlagerung ist, die radioaktiven Abfälle für einen möglichst langen Zeitraum sicher von der Biosphäre zu isolieren. In den meisten Ländern ist der entsprechende Langzeitsicherheitsnachweis für einen Zeitraum von mindestens 10.000 Jahren zu führen. Dabei ist die Einhaltung der Schutzziele prognostisch nachzuweisen. Erforderlichenfalls ist eine Isolationswirkung bis in Zeiträume von bis zu

1.000.000 Jahren zu demonstrieren. Die meisten Länder visieren als Langzeitsicherheitsziel für hochradioaktive Abfälle demnach eine Isolationswirkung von 1.000.000 Jahren an. Dem wird bei der Kriterienentwicklung Rechnung getragen.

Kriterien zur Auswahl und Bewertung von Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden weltweit von verschiedenen Ländern und auch ländervereinigten Organisationen aufgestellt. Mit den Kriterienkatalogen sollen solche Standorte identifiziert werden, die die genannten Anforderungen an das Isolationsvermögen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu erfüllen vermögen. Da die grundlegenden Anforderungen an langfristig sichere Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle weitgehend kongruent sind, besteht international Konsens über die Kriterien, die bei der Wahl eines Endlagerstandortes von Bedeutung sind.

Im einzelnen enthalten die nationalen und internationalen Regelwerke, Sicherheitsstudien, Leitlinien oder Empfehlungen, die sich mit der Standortauswahl befassen, folgende übereinstimmenden Anforderungen an die Geologie des Standortes, an das Wirtsgestein als Endlagermedium sowie an die Hydrogeologie und die Geochemie der zur Bewertung anstehenden geologischen Gesteinskomplexe:

- **Geologie**

Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen. Die Tiefenlage des Endlagers muss einen Integritätsverlust der geologische Barriere durch Erosionsprozesse verhindern. Zukünftige klimatische Bedingungen (z.B. Eiszeiten) dürfen die Integrität des Endlagers nicht beeinträchtigen.

- **Wirtsgestein**

Das Wirtsgestein muss gegenüber geodynamischen Einwirkungen (z.B. Erdbeben/neotektonische Bewegungen) stabil sein. Wirtsgestein, Nebengestein und Deckgebirge sollen die Funktion natürlicher Barrieren in einem Mehrbarrierensystem übernehmen. Form und Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers (inklusive einer Schutzzone) sollen genügend Flexibilität hinsichtlich Konfiguration und Auslegung des Endlagers bieten. Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften sollen den sicheren Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers ermöglichen. Das

Wirtsgestein muss über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen.

- **Hydrogeologie**

Der Einlagerungsbereich soll sich durch geringe Grundwasserbewegung auszeichnen, seine Umgebung durch lange Grundwasserfließzeiten. Die hydrogeologische Situation soll durch einen allseits niedrigen hydraulischen Gradienten gekennzeichnet sein. Die Gesteine in der Endlagerumgebung, insbesondere der Wirtsgesteinskörper, dürfen nur geringe Permeabilität aufweisen.

- **Geochemie**

Die physikochemischen und geochemischen Eigenschaften der geologischen Barrieren sollen eine Radionuklidfreisetzung begrenzen. Die hydrochemischen und geochemischen Bedingungen sollen geeignet sein, Radionuklide zu isolieren, die Sorption von Radionukliden zu fördern sowie die Bildung und den Transport von organischen bzw. anorganischen Komplexen, Partikeln und Kolloiden zu verhindern. Das geochemische Umfeld soll geringe Auflösungsraten der Abfallmatrix und geringe Korrosionsraten des Behältermaterials bewirken sowie negativen Auswirkungen auf sonstige technische Barrieren verhindern.

Darüber hinaus ist ein Standort zu bevorzugen, der in der Vergangenheit keiner anthropogenen Veränderung unterworfen war und für den das Risiko menschlichen Eingreifens - auch für zukünftige Generationen - möglichst gering ist. Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.

6.3 Öffentlichkeitsbeteiligung

Eine wichtige Quelle der Anregungen für den Arbeitskreis waren im Jahr 2001 zwei Informationsreisen in die Schweiz und nach Schweden. Dabei ging es nicht darum, Erfahrungen mit der Endlagerung, die in diesen beiden Ländern gemacht wurden, direkt auf die Bundesrepublik Deutschland zu übertragen. Gleichwohl wurde auf allgemeiner Ebene deutlich, dass mit einer Reihe von grundlegenden Prinzipien in die

sen Ländern wichtige Erfahrungen gemacht wurden, die in Deutschland berücksichtigt werden müssen.

Bei der Übertragung der Erfahrungen auf deutsche Verhältnisse ist zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zu Deutschland in beiden Ländern von der Bevölkerung parteienübergreifend akzeptiert wird, dass die langfristig sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle eine gemeinsam zu lösende nationale Aufgabe ist.

In der Schweiz wird deutlich, dass Transparenz und Offenheit des Verfahrens nicht zuletzt ein Ergebnis der politischen Machtbalance sind: Wegen des kantonalen Abstimmungsrechts in Fragen, die unter das Bergrecht fallen, sind die Stimmbürger in manchen Kantonen an der Entscheidung über die Erkundung eines Endlagerstandortes beteiligt. Um die erforderlichen Stimmen der Bürgerinnen und Bürger dafür zu gewinnen, sah man sich dort gezwungen, klare Prüfkriterien für die Eignung oder Nichteignung des für die Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle ins Auge gefassten Standortes (Wellenberg) zu benennen.

Nach den Erfahrungen in der Schweiz ist möglicherweise auch ein direktes Monitoring des Lagers über einen längeren Zeitraum für die Zustimmung der Bevölkerung zu einem Lager bedeutsam. Nach den gegenwärtigen Vorstellungen sollen die Prognosen zum Verhalten der nuklearen Abfälle und der technischen Barrieren und die Ergebnisse von Modellrechnungen zum Radionuklidtransport in speziellen Stollen überprüft werden. In diesem Zusammenhang ist es auch erwähnenswert, dass von dem Begriff Endlagerung Abstand genommen wurde und Langzeitlagerung als treffenderer Begriff gewählt wurde. Rückholbarkeit als Prinzip des Lagerungskonzeptes ist eine logische Konsequenz aus dieser Sicht.

Sowohl in Schweden als auch in der Schweiz hat sich eine klare Regelung für die Standortprüfung nach unterschiedlichen Verfahrensphasen als Voraussetzung für eine mögliche Zustimmung durch die Bevölkerung für ein Lagerungskonzept bzw. einen Endlagerstandort erwiesen. In jedem Prüfschritt gibt es eine neue Debatte über die Einhaltung von Kriterien und die Bewertung von Verfahren. Eine Vorgehensweise "Schritt für Schritt" ist die wesentliche Voraussetzung für die Überprüfbarkeit durch die Bürgerinnen und Bürger.

Wesentlich für die Partizipation durch die Bevölkerung ist der Aufbau von Kompetenz und die unabhängige Kontrolle des Prozesses durch von der Bürgerschaft eingesetzte Experten. Der Aufbau von Kompetenzzentren und die Existenz von Experten, die in einem Dienstleistungsverhältnis zu der Bürgerschaft stehen, sind die Basis einer nicht populistischen Partizipation.

In diesem Zusammenhang wird auch klar, dass die Stimmrechte der Bevölkerung bzw. das Prinzip der Freiwilligkeit Grundvoraussetzung der Beteiligung ist. Allerdings muss mit einem Spannungsverhältnis zwischen lokalen und regionalen Interessen und dem nationalen Interesse, ein sichere Lagerung der nuklearen Abfälle zu gewährleisten, gerechnet werden. In Schweden gibt es hierzu die rechtliche Regelung, im Falle der Unlösbarkeit dieses Konfliktes eine letztgültige Entscheidung durch das Parlament herbei zu führen.

Unabhängig von dieser formalen Regelung wurde gerade in Schweden deutlich, dass die gesellschaftlich geteilte Verantwortung für die Abfallbeseitigung Grundvoraussetzung für das Verhältnis verschiedener Gruppierungen in der Auseinandersetzung um das Lagerungskonzept ist. Der öffentliche Diskurs über Notwendigkeiten, Möglichkeiten, Sicherheit, Risiken und Folgen für die Zukunft einer Region, in der sich der Standort befindet, kann dazu beitragen, die Verantwortlichkeit für die möglichst sichere Lagerung der Abfälle, die Wertentscheidung der Verantwortlichkeit über verschiedene Positionen hinweg als gemeinsame Basis zu entwickeln.

6.4 Langzeitsicherheitsnachweis

International ist Voraussetzung für die Genehmigung eines Endlagers, dass ein Langzeitsicherheitsnachweis für das mit radioaktiven Abfällen gefüllte und verschlossene Endlager geführt werden kann. Dieser Nachweis muss zeigen, dass von dem Endlager für sehr lange Zeiträume keine nachteiligen Auswirkungen für Mensch und Umwelt ausgehen. Er muss Aussagen zum Isolationsvermögen des Endlagers insgesamt, zur Wirksamkeit der geologischen und technischen Barrieren sowie zu den Folgen eines Versagens der Barrieren enthalten. Wesentliche Maßstäbe zur Bewertung der Langzeitsicherheit sind rechnerisch aus dem Endlager resultierende Strahlenexpositionen bzw. Strahlenrisiken.

Zur Unterstützung der Arbeiten des Arbeitskreises hat das BfS einen Auftrag zur Auswertung von internationalen Langzeitsicherheitsanalysen vergeben (NAGRA et al. 2001). Die Erkenntnisse sollen in die Kriterienentwicklung des Arbeitskreises einfließen und die Bedeutung der aufgestellten Kriterien für die Langzeitsicherheit aufzeigen. Die Auswertung hat folgende Themenschwerpunkte:

- Positive bzw. negative Standorteigenschaften der geologischen Gesamtsituationen
- Positive bzw. negative Eigenschaften der technischen Barrieren
- Bedeutung der Standorteigenschaften und der technischen Barrieren in den Langzeitsicherheitsanalysen
- Einfluss der Standorteigenschaften auf Isolationsvermögen (Einschlusszeitraum) und Höhe der Radionuklidfreisetzung aus dem Endlagersystem

Ausgewertet wurden insgesamt 18 Sicherheitsanalysen in verschiedenen Staaten, die in den letzten 15 Jahren durchgeführt worden sind und dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Sie betreffen Endlagerstandorte in kristallinen Gesteinen sowie verschiedenen Sedimentgesteinen (einschließlich Steinsalz) und beziehen sich auf verschiedene Arten radioaktiver Abfälle.

Vorläufige Ergebnisse

Die ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen dienten innerhalb den verschiedenen nationalen Endlagerprogrammen unterschiedlichen Zielsetzungen. Bei der Standortauswahl haben Langzeitsicherheitsanalysen bisher nur eine geringe Rolle gespielt. Eine Ausnahme bilden die Länder Schweden (hochaktive Abfälle), Finnland (hochaktive Abfälle) und Schweiz (schwach-/mittelaktive Abfälle), wo die Ergebnisse von Sicherheitsanalysen insbesondere bei der abschließenden Standortfestlegung eine Rolle gespielt haben. In Zukunft wird der Langzeitsicherheitsanalyse jedoch eine größere Bedeutung bei der Standortauswahl zukommen, wie neueste Entwicklungen beispielsweise in Japan, Kanada, Frankreich und Spanien zeigen.

Wichtige Erkenntnisse der Auswertung sind:

- Bei allen Projekten ist das Mehr-Barrieren-System, d.h. die Kombination von technischen und natürlichen Barrieren für die Langzeitsicherheit und ihren Nachweis von großer Bedeutung. Abhängig vom Wirtsgestein lassen sich aber folgende Unterschiede feststellen:
- In vielen Studien zur Langzeitsicherheit für kristalline Wirtsgesteine und stark konsolidierte (geklüftete) Sedimente wird dem System der technischen Barrieren ein sehr hoher Stellenwert für Einschluss und Rückhaltung der Radionuklide zugeschrieben.
- Im Fall plastisch-toniger Sedimente bzw. Sedimentgesteine sind sowohl die technischen Barrieren als auch die Barrierenwirkung der Geosphäre für den Sicherheitsnachweis bedeutsam.
- Für Endlager in Salzformationen (Salzstöcke oder flache Lagerung) erfolgt bei ungestörten Verhältnissen der Einschluss der Abfälle durch das undurchlässige und homogene Wirtsgestein.
- Die Bedeutung der geologischen Barrieren in den Langzeitsicherheitsanalysen hängt in großem Maße von deren Charakterisierbarkeit und der Prognostizierbarkeit des Radionuklidtransports ab.
- Unabhängig vom betrachteten Wirtsgestein bewirken die wasserführenden Deckschichten, besonders aber das Grundwasser oder Oberflächenwasser des Exfiltrationsgebietes (Biosphäre), oft eine Verdünnung der freigesetzten Aktivität, die wichtig für die Einhaltung der radiologischen Schutzziele ist.

6.5 Schlussfolgerungen für die Arbeit des Arbeitskreises

Die Überprüfung des internationalen Diskussionsstandes zum Vorgehen bei der Standortwahl, zur Entwicklung von Kriterien, zur Beteiligung der Öffentlichkeit und zur Berücksichtigung von Sicherheitsanalysen bei der Kriterienentwicklung erlaubt im Hinblick auf die weitere Arbeit des Arbeitskreises folgende Schlussfolgerungen:

Von Ausnahmen abgesehen ist beim **Vorgehen bei der Standortwahl** international eine Entwicklung hin zu klarer Verfahrensstruktur mit ausgeprägtem schrittweisen Vorgehen sowie zur systematischen Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Aspekte neben früher dominierenden geowissenschaftlichen Aspekten und die frühzeitige (verbindliche) Einbeziehung der Öffentlichkeit bzw. interessierter/betroffener Gruppen und Personen in das Verfahren zu erkennen. Das bezieht sich auch auf den verwaltungsmäßigen und politischen Entscheidungsprozess. Der vom Arbeitskreis verfolgte Ansatz zur Verfahrensentwicklung und die bisherigen Ergebnissen seiner Überlegungen zum schrittweisen Verfahrensablauf (s. Kap. 4) machen deutlich, dass er in dieser Hinsicht den internationalen Erfahrungen und der aktuellen technisch-wissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Diskussion Rechnung trägt.

Auch im Hinblick auf die **Kriterienentwicklung** wird das Vorgehen des Arbeitskreises durch den internationalen Vergleich bestärkt: Der vom Arbeitskreis entwickelte Anforderungskatalog für Endlagerstandorte stimmt mit dem internationalen Stand übergeordnet formulierter Anforderungen überein. Mit seinem Ansatz, quantitative Kriterien zur Identifizierung und vergleichenden Beurteilung hydrogeologisch und hydrochemisch „günstiger geologischer Gesamtsituationen“ zu entwickeln, geht er sogar über den internationalen Stand allgemein formulierter Kriterien hinaus.

In Hinblick auf die **Öffentlichkeitsbeteiligung** lassen sich aus den internationalen Erfahrungen, insbesondere der Schweiz und Schwedens, wichtige Rückschlüsse für die Verfahrensentwicklung und -umsetzung ziehen. Mindestvoraussetzung für die Überprüfbarkeit des Verfahrens durch die Bürgerinnen und Bürger ist danach eine Vorgehensweise "Schritt für Schritt" mit Debatten über die Einhaltung von Kriterien und die Bewertung des bisherigen Verfahrens. Insbesondere das Beispiel Schweiz zeigt außerdem, dass Transparenz und Offenheit des Verfahrens durch die Beteiligung der Bevölkerung an der politischen Macht gefördert werden. Das Stimmrecht der Bevölkerung bzw. das Prinzip der Freiwilligkeit sind also Grundvoraussetzungen der Beteiligung. Das unvermeidliche Spannungsverhältnis zwischen lokalen und regionalen Interessen einerseits und dem nationalen Interesse an der sicheren Endlagerung der Abfälle andererseits muss durch einen öffentlichen Diskurs über Notwendigkeiten, Möglichkeiten, Sicherheit, Risiken und Folgen für die Zukunft einer Region, in der sich der Standort befindet, gelöst werden.

Der Arbeitskreis hat die mit der Öffentlichkeitsbeteiligung verbundenen Probleme erkannt und sucht unter Beachtung der internationalen Erfahrungen geeignete Lösungsansätze sowohl für die Ausgestaltung, Festlegung und Umsetzung des Auswahlverfahrens als auch für den angesprochenen Interessenausgleich.

Aus den Ergebnissen der Auswertung von internationalen **Langzeitsicherheitsanalysen** ergeben sich für die weitere Arbeit des Arbeitskreises folgende Erkenntnisse:

Die Bedeutung technischer und natürlicher Barrieren für die Langzeitsicherheit von Endlagern und ihren Nachweis ist wirtsgesteins- und konzeptsabhängig. Zwischen Wirtsgestein und Konzeption besteht eine enge Wechselwirkung. Daher sind bei der Suche nach einer günstigen geologischen Gesamtsituation gesteinstypabhängige konzeptionelle Aspekte zu berücksichtigen, sobald gesteinstypbezogene Standorteigenschaften bedeutsam werden. Diese Zusammenhänge müssen sich bereits in der Kriterienformulierung niederschlagen.

Als für den Nachweis der Langzeitsicherheit wichtige Aspekte müssen auch die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der geologischen Barriere und eines Radionuklidtransports durch die geologische Barriere in die Kriterien einfließen.

Die Wasserführung in Deckschichten über einem Endlager, insbesondere Grundwasser oder Oberflächenwasser mit Kontakt zur Biosphäre, führt zur Verdünnung der freigesetzten Aktivität, die unter bestimmten Bedingungen wichtig für die Einhaltung der radiologischen Schutzziele ist. Es ist zu prüfen, wieweit Verdünnungseffekte bereits bei der Standortwahl und damit auch bei der Kriterienentwicklung berücksichtigt werden müssen.

7 Zur Festlegung des Auswahlverfahrens (Phase II)

Die Ergebnisse der Arbeit des Arbeitskreises werden Ende 2002 als Vorschlag dem BMU vorgelegt. Der Arbeitskreis geht davon aus, dass vor der eigentlichen Durchführung eines Standortauswahlverfahrens zunächst eine politische und gesellschaftliche Einigung stattfinden muss, in der das Standortauswahlverfahren und seine Kriterien -

gegebenenfalls unter Modifikation der Ergebnisse des Arbeitskreises - definitiv festgelegt werden.

Damit ergeben sich insgesamt drei Phasen, bis ein Standort für ein Endlager festgelegt werden kann:

- In Phase I werden Kriterien und Verfahren erarbeitet (jetzige Arbeit des Arbeitskreises).
- In Phase II wird die politische und gesellschaftliche Festlegung des Auswahlverfahrens vorgenommen.
- In Phase III wird das festgelegte Auswahlverfahren durchgeführt.

Nach Auffassung des Arbeitskreises ist für Phase II ein Vorgehen in folgenden Schritten erforderlich (siehe Abb. 7-1):

- Durch einen institutionellen Beginn wird der politische Wille zur Durchführung des Auswahlverfahrens festgeschrieben
- Nach dem Modell des "Dialogischen Feldes" erfolgt das Beteiligungsverfahren mit der Öffentlichkeit
- Am institutionellen Ende steht die politische und rechtliche Entscheidung

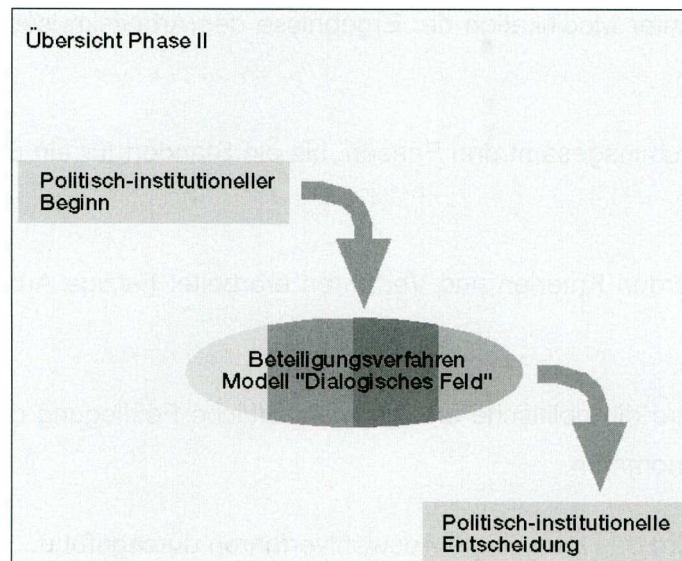


Abb. 7-1: Übersicht Phase II

Nachfolgend werden zunächst in Kapitel 7.1 Möglichkeiten zur institutionellen Verankerung dargestellt. Anschließend wird in Kapitel 7.2 die Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Festlegung von Verfahren und Kriterien behandelt.

7.1 Institutionelle Verankerung für die Festlegung von Verfahren und Kriterien

Nach Auffassung des Arbeitskreises kommt es entscheidend darauf an, dass der institutionelle Beginn und das institutionelle Ende der Phase II als möglichst breit getragener politischer Konsens gestaltet werden. Anderenfalls lässt sich kaum erreichen, dass die verschiedenen politischen Akteure ein Standortsuchverfahren unterstützen.

Vom Grundprinzip her muss deshalb ein geeignetes zentrales demokratisch legitimates Gremium die Festlegung institutionalisieren. Zu Beginn der Phase II würde dieses Gremium beispielsweise den Beschluss fassen, dass die Vorschläge des Arbeitskreises entsprechend zu prüfen sind. Dieser Prüfauftrag wird dann an eine Verhandlungsgruppe gegeben, die dem demokratisch legitimated Gremium wiederum Bericht über ihr Ergebnis erstattet. Im institutionellen Ende des Verfahrens würde das

demokratisch legitimierte Gremium den Bericht der Verhandlungsgruppe entgegennehmen und verabschieden - gegebenenfalls unter Modifikationen. Damit wären dann das Verfahren und die Kriterien, die für die Standortsuche in Phase III gelten, institutionalisiert.

Die zentrale Frage ist die nach dem geeigneten demokratisch legitimierten Gremium für die Institutionalisierung. Hierfür kommen nur wenige Gremien in Betracht. Im Auftrag des Arbeitskreises wurden die bestehenden verfassungsrechtlichen Möglichkeiten geprüft. Dem Arbeitskreis erscheinen die folgenden zwei Varianten möglich:

- Gemeinsamer Beschluss der Ministerpräsidentenkonferenz und der Bundesregierung: Weil die auf der Grundlage der Ergebnisse der Phase II in Phase III stattfindende Feststellung geeigneter Standorte für Endlager für radioaktive Abfälle in Deutschland zugleich auf dem Gebiet eines bzw. mehrerer Bundesländer erfolgen wird, erscheint die Einbeziehung der Bundesländer schon im Vorfeld der konkreten Standortauswahl und -entscheidung - auch im Hinblick auf eine möglichst breit getragene Übereinkunft - sinnvoll. Einer gemeinsamen Vereinbarung oder Beschluss der Bundesregierung und der Ministerpräsidenten der Länder würde nicht entgegenstehen, dass die "Ministerpräsidentenkonferenz" im verfassungsrechtlichen Sinn kein Organ ist. Im übrigen würde dies vom Vorgehen formal auch an die 1979 verabschiedeten "Entsorgungsgrundsätze" (BESCHLUSS 1980) anschließen.
- Beschluss der Bundesregierung und Unterrichtung des Bundestages: Alternativ zur vorherigen Variante kommt auch ein Beschluss der Bundesregierung in Betracht, mit dem die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens direkt oder mit Abänderungen übernommen werden. In diesem Fall würde sich die Unterrichtung des Bundestages empfehlen. Diese Vorgehensweise hätte den Vorteil, dass mit der Unterrichtung eine Verhandlung auf die Tagesordnung des Bundestages gesetzt würde, so dass ein Beschluss des Bundestages herbeigeführt werden könnte. Die Unterrichtung hätte darüber hinaus aber auch den Vorteil, dass sie einzelne oder mehrere Fraktionen veranlassen könnte, selbst aktiv zu werden und eine entsprechende Beschlussfassung zu beantragen (gegebenenfalls unter Abänderung des Beschlusses der Bundesregierung).

Angesichts der faktischen Involviertheit der Bundesländer in die anschließende Standortsuche und Festlegung eines Endlagers für radioaktive Abfälle spricht vieles dafür, auf jeden Fall auszuloten, welche der beiden Varianten praktikabler ist.

Da die Entscheidung über den zweckmäßigen Weg jedoch Sache der Bundesregierung selbst ist, verzichtet der Arbeitskreis auf eine Prioritätensetzung zwischen diesen beiden Alternativen: Beschluss der Ministerpräsidentenkonferenz oder der Bundesregierung mit Unterrichtung des Bundestages.

In Phase II ist es von erheblicher Bedeutung, dass ausreichende Möglichkeiten zur Sicherung einer verbindlichen Umsetzung von Verhandlungsergebnissen bestehen.

Nach der derzeitigen Rechtslage ist es für eine in Verhandlungen einbezogene demokratisch legitimierte Institution nicht zulässig, sich unbesehen zu einer Umsetzung von Teilen einer Übereinkunft oder gar der gesamten Übereinkunft zu verpflichten. Allerdings ist sie grundsätzlich frei, Sachverhaltskomponenten, die im Rahmen von Beteiligungsverfahren entwickelt werden, bei ihrer Ermittlung des Sachverhaltes zu berücksichtigen. Auf dieser Basis könnten Ergebnisse eines Beteiligungsverfahrens dann (gegebenenfalls ohne Abstriche) übernommen werden, wenn sie sachlich gerechtfertigt und hinsichtlich einer gerechten Abwägung nicht zu beanstanden sind. Diese Prüfung ist allerdings unerlässlich und kann folglich erst nach Abschluss des Beteiligungsverfahrens bzw. nach Vorlage der Ergebnisse von der politisch/institutionell verantwortlichen Ebene getroffen werden. Daher können die Beteiligten eines Verhandlungsverfahrens in Phase II nicht bereits zu Anfang oder vor dem Ende des Verfahrens davon ausgehen, dass ihre Ergebnisse so übernommen werden. Allerdings besteht die Chance, dass ihre Ergebnisse unter den eben genannten Kriterien gewürdigt und gegebenenfalls in vollem Umfang oder in Teilen übernommen werden könnten. Eine zulässige Vereinbarung etwa in einer Geschäftsordnung der Verhandlungsgruppe könnte folgendermaßen lauten: "Die Bundesregierung verpflichtet sich, die in Phase II gewonnenen Ergebnisse, soweit sie im Konsens zustande kommen, für die Auswahl der Standortsuche zu übernehmen, soweit Rechtsgründe nicht entgegen stehen."

7.2 Die Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Festlegung des Verfahrens und der Kriterien

Zielsetzung

Der Arbeitskreis hält es für geboten, dass nicht nur die eigentliche Suche nach geeigneten Standorten für ein Endlager nach demokratischen und partizipativen Verfahren erfolgen soll, sondern dass schon die Festlegung der Verfahren und Kriterien partizipativ organisiert werden soll, um zu einem sachlich möglichst richtigen und von einer breiten Zustimmung getragenen Verfahren zu kommen. Mit diesem Weg wird auch international Neuland betreten, da Partizipation in den Ländern, in denen sie überhaupt stattfindet, erst bei der eigentlichen Suche und Prüfung geeigneter Standorte einsetzt. Diese frühzeitige Einbeziehung der Öffentlichkeit soll dazu beitragen, dass in späteren Schritten der Standortsuche nicht jeder Schritt vor Gericht verhandelt werden muss, sondern dass der Dialog zu einer breit getragenen Vorgehensweise führt und klaren und transparenten Kriterien folgt. Um die Frage, wie die Öffentlichkeit bei der Festlegung der Verfahren und Kriterien beteiligt werden soll, geht es im folgenden Beteiligungsmodell.

Das Beteiligungsmodell

Das Beteiligungsmodell besteht aus einer Verhandlung mit Vertretern gesellschaftlicher Interessensgruppen (Verhandlungsgruppe) und der Beteiligung der allgemein interessierten Öffentlichkeit.

Der Kern dieses Verfahrensmodells ist ein "Dialogisches Feld". Dieser neue Begriff weist auf zwei wesentliche Vorstellungen hin, die leitend für die Entwicklung des Beteiligungsverfahrens sind. Zum einen geht es dem Arbeitskreis nicht - wie es bisher meist formuliert wird - nur darum, eine möglichst große Akzeptanz für seine Vorschläge zu gewinnen, sondern um die aktive Einbeziehung der Öffentlichkeit bei der Diskussion und Festlegung über die zu wählenden Verfahren und Kriterien. Die Verfahrens- und Kriterienvorschläge des Arbeitskreises gehen als Vorarbeit in den Dialog ein, von dem man sich eine substanzielle oder graduelle Veränderung und Verbesserung der Verfahrensvorschläge für die eigentliche Suche nach einem Endlager sowie für die Kriterien erwartet. Zum zweiten weist der Feldbegriff sowohl in den So

zialwissenschaften als auch in den Naturwissenschaften auf die Dynamik des Prozesses und vor allem die unterschiedlichen Wirkungskräfte hin, durch die sich das Feld aufbaut und verändert. Hinter dem Vorschlag "Dialogisches Feld" steht also die These des Arbeitskreises, durch Dialoge zu einem sachlich besseren und gesellschaftlich getragenen Modell für die Suche nach einem Endlagerstandort zu kommen, das dann von der Legislative und/oder der Exekutive aufgegriffen werden kann.

Der Beginn und das Ende des dialogischen Feldes werden politisch institutionell bestimmt. Der Beginn könnte durch einen gemeinsamen Beschluss der Bundesregierung und der Ministerpräsidentenkonferenz erfolgen oder durch einen Beschluss der Bundesregierung und des Bundestages. Beide Wege werden vom Arbeitskreis als gleichwertig angesehen. Das Ende der Dialoge wird naheliegend so wie der Beginn gestaltet.

Das dialogische Feld

Das dialogische Feld ist durch vier Aktivitätskerne gekennzeichnet: Eine Verhandlungsgruppe, virtuelle und regionale Foren und Aktionen mit der Jugend.

Die Verhandlungsgruppe nimmt eine herausragende Stellung ein. In ihr und durch sie wird die Diskussion organisiert und gebündelt, so dass am Ende eine ausformulierte Empfehlung an das Parlament, die Bundesregierung und die Ministerpräsidenten vorgelegt werden kann. Durch ein virtuelles Forum werden die jeweiligen Diskussionen in der Verhandlungsgruppe der Öffentlichkeit bekannt gegeben, die darauf mit unterstützenden oder kritischen Argumenten reagieren kann, die aber auch ihrerseits mit Vorschlägen und Forderungen aktiv auf die Verhandlungsgruppe einwirken kann. Eine aus Journalisten und Fachleuten zusammengesetzte Redaktionsgruppe ordnet die Beiträge im virtuellen Forum und lässt die Argumente der Verhandlungsgruppe zukommen. Die Verhandlungsgruppe hat bei ihren Sitzungen einen festen Tagesordnungspunkt "Virtuelle Foren", auf dem diese Argumente diskutiert werden. Die Diskussionsergebnisse gehen dann wieder den virtuellen Foren zu. Auf diese Art und Weise lässt sich ein verbindlicher Dialog zwischen der Verhandlungsgruppe und der allgemeinen Öffentlichkeit herstellen. Es wird möglich sein, sich auch ohne Computer an diesen Foren zu beteiligen (Rundbrief und Briefwechsel).

Eine ähnliche Funktion, nur eben in unmittelbarer Kommunikation, haben die regionalen Foren. Auf diesen öffentlichen Foren wird auf der Grundlage einer vorab publizierten Einladung mit einer entsprechenden Tagesordnung die Verhandlung der Verhandlungsgruppe coram publico durchgeführt. Auch bei den regionalen Foren wird die Diskussion einen erheblichen Zeitraum der Veranstaltung einnehmen, um in direkter Rede und Antwort nicht nur die Argumente, sondern auch die Atmosphäre in der Öffentlichkeit zu erfahren.

Vorgesehen sind als vierter Baustein Aktivitäten, die sich auf die Jugend beziehen, da sie mit den Entscheidungen und den Folgen dieser Entscheidungen leben wird. Hier soll es vornehmlich nicht um Diskussionsforen gehen, sondern um Aktionen zum Thema, deren Ergebnisse dann zum Beispiel über einen Wettbewerb aufgearbeitet werden können (Abb. 7-2).

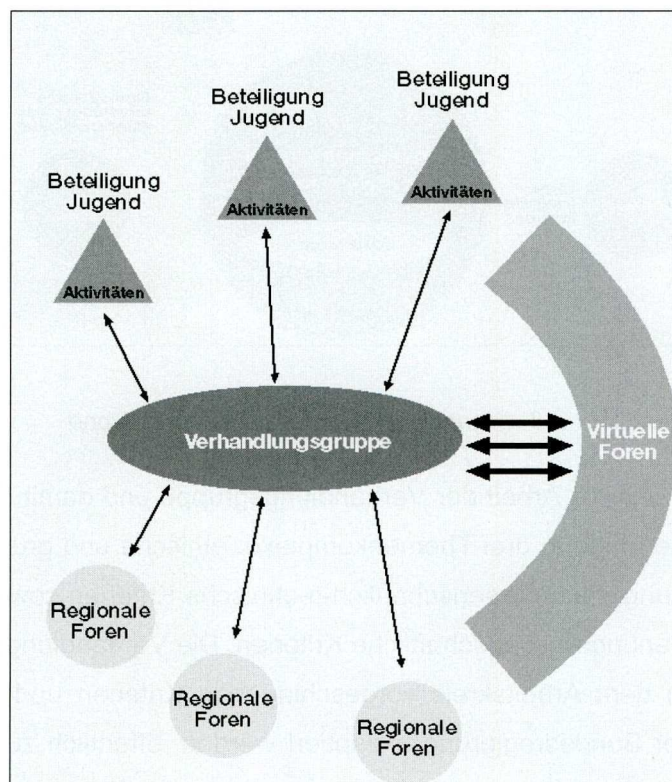


Abb. 7-2: Dialogisches Feld

Die Verhandlungsgruppe verfügt über eine eigene Organisationsstruktur. Experten sollen in einem Projektbeirat die Verhandlungsgruppe beraten. Eine Geschäftsstelle

wird die Verhandlungsgruppe organisatorisch, redaktionell und in Bezug auf dialogische Planungsmethoden unterstützen. Eine professionelle Moderation begleitet die Verhandlungsgruppe in ihrer Arbeit. Eine Steuerungsgruppe, besetzt mit allgemein anerkannten Persönlichkeiten und Vertretern der Regierung, hält die Verbindung zwischen dem "Dialogischen Feld" und der Politik (Abb. 7-3).

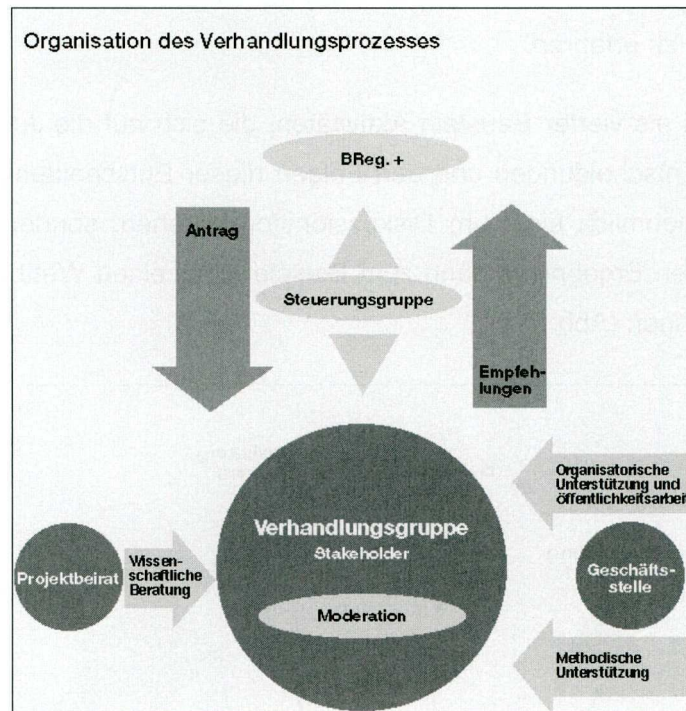


Abb. 7-3: Organisation der Verhandlungsgruppe

Inhaltlich gliedert sich die Arbeit der Verhandlungsgruppe und damit die Kommunikation im dialogischen Feld in drei Themenkomplexe: ethische und grundsätzliche Fragen der Endlagerung, naturwissenschaftlich-technische Kriterien sowie sozialwissenschaftliche und planungswissenschaftliche Kriterien. Die Verhandlungsgruppe hat die Aufgabe, die von dem Arbeitskreis vorgeschlagenen Kriterien und das Verfahren, soweit sie von der Bundesregierung akzeptiert werden, öffentlich zu diskutieren, zu verändern und Festlegungen vorzuschlagen. Thematisch könnte sich das auf folgende Themen aufgliedern:

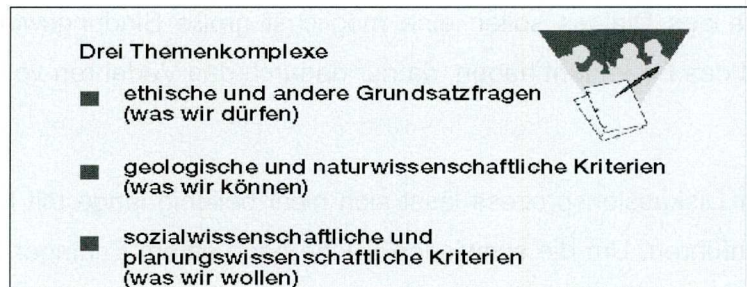


Abb. 7-4: Themen des Dialogischen Feldes

Abb. 7-5 zeigt, wie die Verhandlungsgruppe zusammengesetzt sein könnte. Es ist dem Arbeitskreis bewusst, dass über die Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe noch zahlreiche Verhandlungen geführt werden müssen, damit alle relevanten Gruppierungen sich in einem hinreichenden Maß repräsentiert sehen.

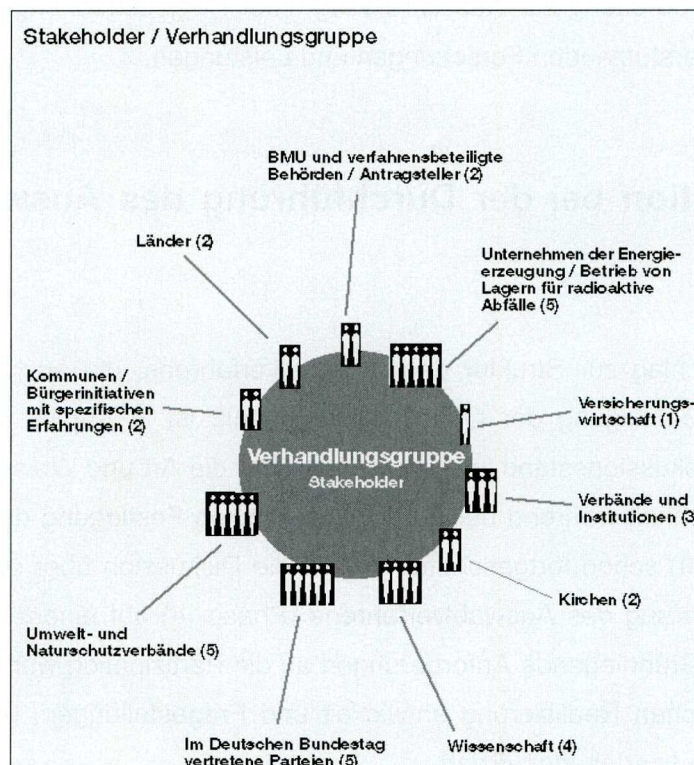


Abb. 7-5: Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe

Die Ergebnisse des Dialogs sollen eine möglichst große Bindungswirkung für die Regierung und das Parlament haben, da nur dadurch das Verfahren voll zur Geltung kommt.

Ein öffentlicher Diskussionsprozess lässt sich nicht beliebig lange mit hinreichender Intensität durchführen. Um die schwierige Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle so früh wie möglich beginnen zu können, ist daher die Dauer des Verfahrens deutlich zu begrenzen. Insgesamt sollte die Diskussion über Verfahren und Kriterien einschließlich der institutionellen Initiierung und Entscheidung nicht länger als 24 Monate dauern. Da die Zeit damit sehr knapp angesetzt ist, schlägt der Arbeitskreis vor, mit der Vorbereitung der Arbeiten, wie dem Aufbau der virtuellen Foren, der Ansprache von Jugendlichen, der Suche nach einem geeigneten Standort für die Sitzungen und die Tätigkeiten der Geschäftsstelle, frühzeitig zu beginnen. Dies gilt auch für die Vorbereitung zur Ausschreibung einer Begleitforschung sowie anderer notwendiger unterstützenden Forschungen und Leistungen.

8 Partizipation bei der Durchführung des Auswahlverfahrens

Ein erster Vorschlag zur Struktur des Auswahlverfahrens, die auch Anknüpfungspunkte für die Beteiligung der Öffentlichkeit enthält, ist in Kapitel 4 beschrieben. Während der Diskussionsstand im Arbeitskreis über die Art und Weise der Partizipation der Öffentlichkeit während der politisch/rechtlichen Festlegung des Auswahlverfahrens (Phase II) schon fortgeschritten ist, ist die Diskussion über die Partizipation bei der Durchführung des Auswahlverfahrens (Phase III) auf einem noch sehr vorläufigen Stand. Grundlegende Anforderungen an die Partizipation wurden aufgestellt, Ideen zur möglichen Realisierung entwickelt und Fragestellungen, die sich daraus ergeben können, wurden identifiziert.

Im Zentrum der Partizipation in der Phase III steht die Vermittlung zwischen dem gesamtgesellschaftlichen Interesse an einer sicheren und langfristigen Entsorgung der radioaktiven Abfälle und den regionalen/lokalen Interessen der Betroffenen.

Die Partizipation in der Phase III muss somit die Standortsuche mit den regionalen Interessen und Entwicklungsmöglichkeiten verknüpfen.

Die Form der Partizipation muss dem Charakter der Verfahrensschritte angepasst sein. Hier sind innerhalb der Verfahrensstruktur zwei Stufen zu unterscheiden.

8.1 Stufe 1: Verfahrensschritte 1 bis 4

In den ersten drei Verfahrensschritten werden - ausgehend von einer weißen Landkarte - die Gebiete ausgewählt, die die Mindestanforderungen einer günstigen geologischen Gesamtsituation und die sozialwissenschaftlichen Mindestanforderungen für Endlagerstandorte erfüllen. Das geschieht mit vorher in Phase II festgelegten Kriterien und Methoden. Ein Expertenpanel, das möglicherweise von einem Beirat aus Vertreter/innen verschiedener Interessensgruppen begleitet wird, könnte diese Aufgabe wahrnehmen. Die Ergebnisse werden der Öffentlichkeit vermittelt und z. B. auf Informationsveranstaltungen erläutert und diskutiert.

Wenn im vierten Verfahrensschritt unter Anwendung geo- und sozialwissenschaftlicher Abwägungskriterien eine Einengung der Suchgebiete auf (kleinere) Regionen mit besonders günstigen Voraussetzungen für die Endlagerung erfolgt, wird es sinnvoll sein, Vertreter/innen von Ländern und Regionen zu beteiligen. Die Funktion der Partizipation in den ersten vier Verfahrensschritten ist primär die Kontrolle der korrekten Verfahrensdurchführung und die Sicherung der Transparenz des Verfahrens.

8.2 Stufe 2: Verfahrensschritte 5 bis 7

Eine neue Form der Partizipation beginnt, wenn ab dem fünften Verfahrensschritt Standorte in den Regionen ermittelt werden sollen. Ab diesem Zeitpunkt ist die unmittelbare Beteiligung der Bevölkerung sinnvoll und notwendig. Auf diese Weise soll die Standortsuche mit den regionalen/lokalen Interessen und Entwicklungsmöglichkeiten verknüpft werden. Ein möglicher Weg, dies zu erreichen, wäre z.B. die Einrichtung von Kompetenzzentren oder der Aufbau eines Expertenstabes durch die Bürgerschaft. Kernpunkt einer regionalen Entwicklungsplanung wäre die Erarbeitung von Szenarien der langfristigen Entwicklung der Region unter dem Gesichtspunkt der

Lebensqualität, der Umweltsituation und der wirtschaftlichen Entwicklung. Wichtig dabei ist, dass die Endlagerplanung mit all ihren problematischen Aspekten und die Entwicklung einer regionalen Zukunftskonzeption miteinander verbunden werden.

Wie weit die Bereitschaft der Bevölkerung (Freiwilligkeit im Sinne der Billigung von Standortuntersuchungen und ggf. der Einrichtung eines Endlagers) leitend für die Durchführung der Verfahrensschritte sein kann, ist im Arbeitskreis in der Diskussion. Die wesentliche Voraussetzung dafür, dass das Prinzip der Freiwilligkeit Anwendung finden kann, ist ein breiter gesellschaftlicher Konsens darüber, dass bei allen unterschiedlichen Positionen klar ist, dass die Gesellschaft in der Verantwortung steht, die radioaktiven Abfälle so sicher und so schnell wie nur möglich auf nationalem Territorium in einem Endlager einzulagern. Die breite Diskussion über Auswahlverfahren und Kriterien in der Phase II kann und muss dazu beitragen, die Basis für einen solchen gesellschaftlichen Konsens zu schaffen. Hinzu kommen zahlreiche praktische und theoretische Fragen. Das beginnt damit, wer konkret beteiligt werden soll, bzw. wie sich die relevante Region definieren lässt. Es geht weiter mit der Frage, wie Freiwilligkeit in einem schrittweisen Verfahren festgelegt werden könnte, und endet bei all den Fragen, die sich auf gegenseitige Qualifizierung und Kompetenz aller an dem Verfahren Beteiligten bezieht.

Bei der Entwicklung der Partizipationsverfahren/Strukturen ist natürlich die Aufgabe desjenigen, der das Auswahlverfahren entsprechend der gesetzlichen Lage durchführt, ebenfalls zu berücksichtigen. Nach der jetzigen Gesetzeslage hat der Bund die Aufgabe, Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten. Zuständig für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern ist das Bundesamt für Strahlenschutz. Die Standortauswahl als Teil der Maßnahmen zur Errichtung eines Endlagers würde somit vom Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführt. Im Rahmen der Bundesauftragsverwaltung obliegt die Genehmigung zur Errichtung und Betrieb von Endlagern den Ländern. Das Bundesumweltministerium hat sowohl die Fachaufsicht über das Bundesamt für Strahlenschutz als auch über die Genehmigungsbehörden der Länder.

Das Verhältnis und die Verantwortlichkeiten zusätzlicher Akteure in dem Auswahlprozess untereinander sowie zu den Behörden des Bundes und der Länder muss noch geklärt werden.

Auch unter diesem Gesichtspunkt hat der Arbeitskreis das Bundesumweltministerium auf die Schwächen der jetzigen Zuständigkeitsverteilung und des für die Endlagerung vorgeschriebenen Planfeststellungsverfahrens hingewiesen. Dies betrifft vor allem die Notwendigkeit einer transparenten Vorgehensweise im Sinne des auch international üblichen schrittweisen Vorgehens bei der Genehmigung eines Endlagers von der Standortauswahl bis zum Betrieb.

9 Literaturverzeichnis

AKEND (2000): Zwischenbericht, Stand: Juni 2000, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.

APPEL, D. & HABLER, W. (2001a): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit.

APPEL, D. & HABLER, W. (2001b): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. In Vorbereitung.

ATG: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959, Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I. 1565), zuletzt geändert durch Gesetz vom 28. Dezember 2000 (BGBl. I. S. 1960).

BESCHLUSS (1979): „Beschluss der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke“ vom 28. September 1979. Bundesanzeiger, Nr. 58, 22.08.1980.

- BMI - Bundesministerium des Innern (1983), Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk; GMBI. 1983, S. 220.
- BORK, M., KINDT, A.; NIERSTE, G. & WALTERSCHEIDT, K.-H. (2001): Zusammenstellung internaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. GRS – A – 2834. In Vorbereitung.
- BRÄUER, V. & JENTZSCH, G. (2001): Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. Bericht an Arbeitskreis.
- BRASSER, TH. et al. (2001): Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung „günstige hydrochemische Bedingungen“. Bericht an Arbeitskreis. In Vorbereitung.
- BREWITZ, W. & BRASSER, TH. (2001): Anwendbarkeit der Indikatoren „teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt“ für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung „keine oder langsame Grundwasserbewegung“. Bericht an Arbeitskreis.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (1995): The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna, 1995.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (1997), Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management, Vienna, 5 September 1997.
- ICRP - International Commission of Radiological Protection (1998), Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive. Publication 81. Annals of the ICRP, Vol. 28, No 4 1998.
- JAVERI, V. & BALTES, B. (2001): Analysen zum Gas- und Stofftransport in der Geosphäre eines vereinfachten Endlagersystems. Bericht an Arbeitskreis.
- JENTZSCH, G. (2001): Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung

hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle.

LUX, K.-H. (2001a): Untersuchungen zur Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten bei unterschiedlichen Gebirgsformationen. In Vorbereitung.

LUX, K.-H. (2001b): Untersuchungen zu günstigen gebirgsmechanischen Verhältnissen bei unterschiedlichen Endlagerformationen. In Vorbereitung.

NAGRA - NATIONALE GENOSSENSCHAFT FÜR DIE LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE; COLENCO POWER ENGINEERING & GESELLSCHAFT FÜR ANLAGEN- UND REAKTORSICHERHEIT (2001): Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten. Abschlussbericht in Vorbereitung.

NIERSTE, G. & BRÄUER, V. (2001): Natürliche Analoga im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei der Verfahrens- und Kriterienanalyse des Arbeitskreises „Auswahlverfahren Endlagerstandorte“. Bericht für den Arbeitskreis.

OECD/IAEA - Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency (2000): Uranium 1999 Resources, Production and Demand.

STRLSCHV - STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (2001): Entwurf einer Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz, Artikel 1, Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen, (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), Vom Bundesrat am 01.06.2001 beschlossener Entwurf der Novelle Strahlenschutzverordnung.

ÜBEREINKOMMEN 1997: Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) BGBl Teil II, Nr. 31, S. 1752.

WHG (1996): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 12.11.1996 (BGBl. I S.

1695), zuletzt geändert durch Art. 19 des Zweiten Gesetzes zur Erleichterung der Verwaltungsreform in den Ländern (2. Zuständigkeitslockerungsgesetz) v. 03.05.2000 (BGBl. I S. 632).

Anhang A: Workshop

2. Workshop

Wege zur Endlagerung

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte veranstaltet seinen 2. Workshop - Wege zur Endlagerung am:

28. und 29. September 2001 in Mörfelden-Walldorf bei Frankfurt/Main

Ziel des Workshops

Auftrag des Arbeitskreises Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit hat den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) 1999 eingerichtet. Er hat den Auftrag, ein Verfahren und Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten für radioaktive Abfälle zu entwickeln.

Beteiligung der Öffentlichkeit Für die Auswahl geeigneter Standorte für die Endlagerung ist eine fachlich solide Planungsgrundlage erforderlich. Sie soll in einem transparenten Prozess entwickelt werden, in den die Öffentlichkeit von Anfang an einbezogen wird. Im Verlauf sollen die Interessen und Anregungen von Betroffenen integriert werden. Die Beteiligung der Öffentlichkeit vor Festlegung und während der Durchführung des Auswahlverfahrens ist deshalb Schwerpunkt des 2. Workshops.

Der AkEnd möchte mit dem 2. Workshop

- an den 1. Workshop anknüpfen,
- Arbeitsergebnisse darstellen und
- zur Mitwirkung anregen.

Der Arbeitskreis wird seine Empfehlung für das Auswahlverfahren voraussichtlich im 2. Halbjahr 2002 vorlegen. Im Anschluss daran soll der AkEnd-Vorschlag unter Beteiligung der Öffentlichkeit festgelegt werden, bevor das Auswahlverfahren durchge-

führt wird. Der Arbeitskreis möchte mit diesem 2. Workshop den sachorientierten Diskurs mit der Öffentlichkeit fortführen. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sind eingeladen, dem Arbeitskreis Anregungen für die weitere Erarbeitung des Auswahlverfahrens zu geben.

Programm

28. September 2001 - Auftakt

**ab 17.00
Uhr**

Empfang

**17.30 -
17.45**

Begrüßung

Prof. Dr. Klaus Duphorn, Universität Kiel (i.R.)

**17.45 -
20.00**

Diskussionsrunde

**AkEnd und BMU stehen Rede und Antwort zur
Endlagerung und der Rolle des AkEnd**

Diskussionsleitung

Barbara Dickmann

AkEnd

Jürgen Kreusch, Gruppe Ökologie e.V., Hannover

Dr. Klaus-Detlef Closs, Forschungszentrum Karlsruhe

BMU

Staatssekretär Rainer Baake

Regierungsdirektor Alexander Nies

Weitere

Dr. Wolfgang Hawickhorst, Gesellschaft für Nuklear-Sevice

Heinz Laing, Greenpeace

*Wolfgang Mayer, 1. Bürgermeister der Gemeinde
Gundremmingen und Sprecher der deutschen
Standortgemeinden*

Dr. Frank Musiol, Naturschutzbund Deutschland e.V.

*Folker Thamm, Pastor, Vors. des Umwelt- und
Bauausschusses der Landessynode der ev.-luth.
Landeskirche Hannover*

Anschließend lädt das Bundesumweltministerium zu einem
gemeinsamen Abendessen ein.

29. September 2001 - Workshop

Block I

09.00 - 10.30 **Bericht des AkEnd zum Stand der Arbeiten**

Sitzungsleitung

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch, Friedrich-Schiller-Universität
Jena

Verfahren bei der Standortauswahl

Referent Dr. Detlef Appel, PanGeo, Geowissenschaftliches
Büro, Hannover

Kriterien zur Standortauswahl

Referent Dr. Bruno Baltes, Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit, Köln

Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Festlegung und
Durchführung des Auswahlverfahrens

Referent Dr. Wernt Brewitz, Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit, Braunschweig

Geplant sind jeweils 15 min Vortrag und 15 min Diskussion.

Kaffeepause

Block II

11.00 - 12.30 **Öffentlichkeit und Standortsuche**

Diskussion in Arbeitsgruppen zu folgenden Themen unter
Leitung von:

A - Welchen Stellenwert soll "Freiwilligkeit" im
Auswahlverfahren haben?

Dr. Helmut Röthemeyer, Bundesamt für Strahlenschutz

B - Möglichkeiten und Grenzen der Beteiligung

Dr. Bruno Thomauske, Bundesamt für Strahlenschutz

C - Verbessert die Beteiligung die Qualität der
Standortsuche?

Heinz-Jörg Haury, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und
Gesundheit, Neuherberg

D - Endlagerung: Belastung und Chance für die Region
Prof. Dr. Detlev Ipsen, Universität GH Kassel

E - Thema der Teilnehmer/ innen
Michael Sailer, Öko-Institut e.V., Darmstadt

F - Thema der Teilnehmer/ innen
Dr. Wernt Brewitz, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig

12.30 -
14.00

Mittagspause

14.00 -
15.00

Posterpräsentation

Ein- oder Mehr-Endlagerkonzept · Gebiete mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen · Rückholbarkeit? · Gasbildung und Barrierenverhalten · Günstige Konfigurationen von geologischen Barrieren · Kriterien und Indikatoren für geringe Grundwasserbewegung · Charakterisierbarkeit geologischer Strukturen · Natürliche Analoga · Kriterien für die Standortauswahl · Die drei Phasen der Standortauswahl: Entwicklung, Festlegung und Durchführung · Endlagerung in tiefen geologischen Formationen · Warum Endlagerung heute?/ Endlagerung und Alternativen

Block III

15.00 -
16.45

Diskussion im Plenum

Sitzungsleitung

Prof. Dr. Klaus Kühn, Technische Universität Clausthal

Bericht der Gruppen über ihre Arbeiten

Sprecher/innen der Arbeitsgruppen

Zusammenfassung der Posterdiskussionen

Dr. Volkmar Bräuer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch, Friedrich-Schiller-Universität Jena

16.45 -
17.00

Schlusswort und Ausblick

Prof. Dr. Detlev Ipsen, Universität GH Kassel

Teilnahme und Übernachtung

Teilnahme Die Teilnahme am Workshop ist kostenlos.

Aufgrund der Raumkapazitäten bitten wir jedoch um schriftliche Anmeldung per Post, Fax oder unter Anmeldung.

Meldeschluss ist der 15.09.2001

Tagungsort Astron-Hotel Frankfurt-Mörfelden, Hessenring 9, 64546 Mörfelden-Walldorf, Telefon 0 6105. 204 -0

Übernachtung Ein Kontingent von Hotelzimmern im Tagungshotel steht den Teilnehmer/innen **bis zum 12.09.2001** für 180 DM/ EZ (inkl. Frühstück) zur Verfügung. Anmeldungen bitte schriftlich oder per Fax unter Angabe des Stichwortes "AkEnd" an das Astron-Hotel (Fax: 0 6105. 204 -100).

Sie können weitere Hotelzimmer in Frankfurt ab 120 DM/ EZ buchen. Verwenden Sie dazu bitte das nachstehende Zimmerreservierungsformular der Tourismus-Congress GmbH Frankfurt am Main

Anfahrt

Bahn z. B. mit dem ICE bis Fernbahnhof Frankfurt-Flughafen oder von Frankfurt/Main Hauptbahnhof mit der S-Bahn zum Regionalbahnhof Frankfurt-Flughafen. Am Terminal 1, Halle A, Ausgang "Ankunft" steht hinter dem Taxistand (Schild: "Hotelbus") ein kostenloser Shuttle-Bus des Astron-Hotels Mörfelden zur Verfügung (Abfahrt ca. alle 30 Minuten).

Auto A5 bis Ausfahrt Mörfelden-Langen, rechts auf die B 486 Richtung Mörfelden, nach 600 m rechts in das Gewerbegebiet einbiegen. Das Hotel liegt auf der rechten Seite.

Anfahrtsskizze und Umgebungsplan finden Sie im Internet unter www.akend.de.

Anmeldung

Wir bitten um Ihre schriftliche Anmeldung per Fax, Post oder e-mail.

Tagungssekretariat des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte:

Frau Fröhlich

c/o CCM Köln - Corporate Communication Management GmbH

Kreuzgasse 2 - 4 · 50667 Köln



Presse

Ansprechpartner für die Presse am Freitag:

Rainer Gömmel, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Remlingen

Heinz-Jörg Haury, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg

Ansprechpartner für die Presse am Samstag:

Jürgen Kreusch, Gruppe Ökologie Hannover e.V.

Rainer Gömmel, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Remlingen

Anhang B: Ansprechpartner

Arbeitskreis:

Herr Dr. D. Appel

PanGeo – Geowissenschaftliches Büro
Ibykusweg 23
30629 Hannover

Herr Dr. B. Baltes

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
Postfach 10 15 64
50455 Köln

Herr Dr. V. Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2
30655 Hannover

Herr Dr. W. Brewitz

GRS Braunschweig
Postfach 21 26
38011 Braunschweig

Herr Dr. K.-D. Closs

Forschungszentrum Karlsruhe
Postfach 36 40
76021 Karlsruhe

Herr Prof. Dr. K. Duphorn

Zeppelinring 42 B
24146 Kiel

Herr R. Gömmel

GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit
Am Walde
38319 Remlingen

Herr H.-J. Haury

GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit
Ingolstädter Landstr. 1
85764 Neuherberg

Herr Prof. Dr. D. Ipsen

Gesamthochschule Kassel
Fachbereich 13
Gottschalkstr. 28
34127 Kassel

Herr Prof. Dr. G. Jentzsch

Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena
Burgweg 11
07749 Jena

Herr J. Kreusch

Gruppe Ökologie Hannover e.V.
Kleine Düwelstraße 21
30171 Hannover

Herr Prof. Dr. K. Kühn

Technische Universität Clausthal
Institut für Bergbau
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld

Herr Prof. Dr. K.-H. Lux

Technische Universität Clausthal
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld

Herr DirProf. H. Röthemeyer

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 40
38201 Salzgitter

Herr M. Sailer

Öko-Institut Darmstadt
Frankensteiner Str. 9
64297 Darmstadt

Herr Dr. B. Thomauske

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
(BMU):**

Frau H. Hagge

Referat RS III A (4)
Heinrich-von-Stephan-Str. 1
53175 Bonn

Herr RD A. Nies

Referat RS III A (4)
Heinrich-von-Stephan-Str. 1
53175 Bonn

Korrektur zu AkEnd: 2. Zwischenbericht – Stand der Diskussion – August 2001:

S. 166 m.:

Herr M. Sailer

Öko-Institut Darmstadt
Elisabethenstraße 55-57
64283 Darmstadt

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):

Herr WOR G. Arens
Willy-Brandt-Str. 5
38226 Salzgitter

CCM Köln GmbH

Frau C. Fröhlich
Kreuzgasse 2-4
50667 Köln

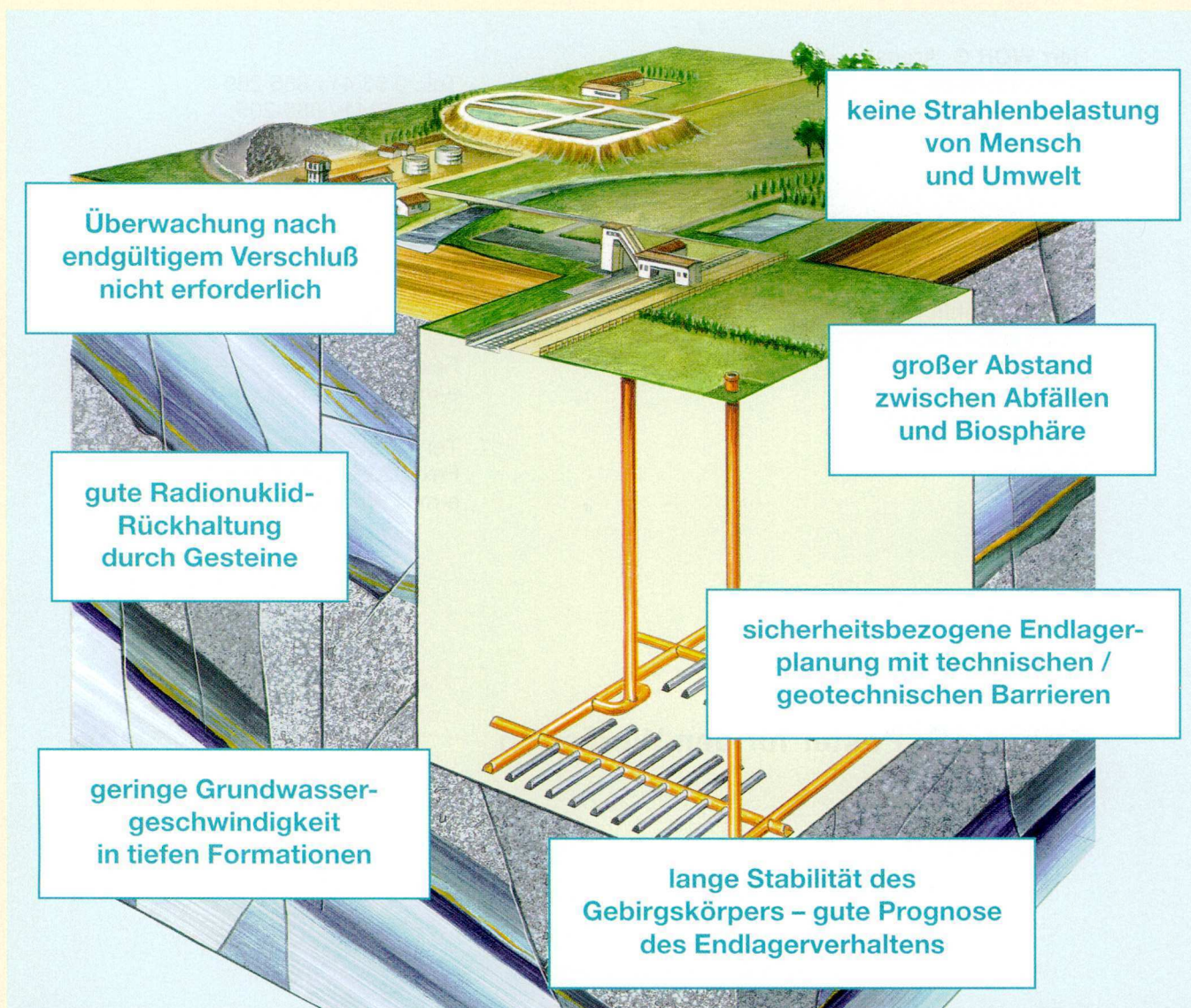
Frau A. Wiederhold
Kreuzgasse 2-4
50667 Köln



Anhang C: Poster für den Workshop

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen

– Wesentliche Merkmale und Argumente –



Als wichtige Vorgabe für die Arbeit des AkEnd wurde vom BMU festgelegt, dass in Deutschland alle Arten von radioaktiven Abfällen in einer tiefen geologischen Formation endgelagert werden sollen.

Grundsätzlicher Vorteil der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist, dass bestimmte Gesteins-

formationen aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften und des Gebirgsbaus nur kleine oder verschwindend geringe Durchlässigkeiten gegenüber fluiden Phasen aufweisen. Sie sind z.T. über geologische Zeiträume hinweg in diesen Eigenschaften unverändert geblieben, so dass sie mit ihrem Isola-

tionspotenzial Schadstoffe über Zeiten in der Größenordnung von einer Million Jahre von der Biosphäre fernhalten können. Voraussetzung ist allerdings die Identifizierung entsprechend geeigneter Gebirgsbereiche z.B. mittels eines kriterien-gesteuerten Standortauswahlverfahrens.

Ein- oder Mehr-Endlager Konzept

Vorbemerkungen

- BMU-Vorgabe »Ein-Endlager-Konzept« hat Auswirkungen auf das Auswahlverfahren
- Auswirkungen sollen für Diskurs in der Öffentlichkeit transparent gemacht werden. AkEnd bereitet daher Positionspapier zum Thema »Ein- oder Mehr-Endlager-Konzept« vor.
- Diskussion ist im AkEnd kontrovers. Poster gibt einige vorläufige Überlegungen wieder.

Weitere Beurteilungsfelder: Entsorgungssicherheit, Anforderungen an Abfälle, Sicherheit in der Betriebsphase, Kritikalität, Safeguards, Umweltauswirkungen, Akzeptanz.

Wahrscheinlich entscheidungsrelevante Beurteilungsfelder und -aspekte

Beurteilungsfeld	Beurteilungsaspekte	Erläuterungen
Entsorgungskonzeptionelle Aspekte	Zeitnähe (2) Konditionierung (3) Bedeutung verschiedener Barrieren (3) Anfall verschiedener Abfälle in der Zeit (1) Transportauswirkungen (2)	(1) Wahrscheinlich entscheidungsrelevant
Langzeitsicherheit	abfallbezogen: Isolationszeitraum (2) Robustheit/Systemverhalten Wärmeeintrag (1) Gasentwicklung (1) chemische Wechselwirkungen (1) abfallunabhängig: Schachtverschlüsse (2)	(2) Differenziert beurteilbar, aber wohl nicht entscheidungsrelevant
Nachweisverfahren	Prognostizierbarkeit Systemverhalten (1) Umgang mit Unsicherheiten (2) Nachweiszeitraum (2) Auswirkungen des über die bisherige thermische Beanspruchung hinausgehenden Wärmeeintrags (2)	(3) Maßgeblich von anderen Beurteilungsaspekten abhängig
Kosten	Kosten für öffentliche Hand (1) Kosten für EVUs (1)	

Anfall an radioaktiven Abfällen

Etwa ein Drittel der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist der öffentlichen Hand (Großforschungseinrichtungen, Landessammelstellen, Kernkraftwerke Rheinsberg und Greifswald etc.) zuzuordnen. Bei den wärmeentwickelnden Abfällen ist der Anteil der öffentlichen Hand äußerst gering.

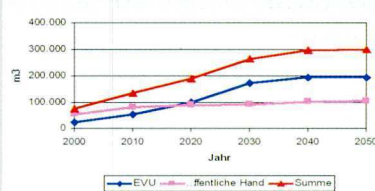
Wärmeeintrag in das Endlager: (Größenordnungen)

LWR-BE	10.000 kW
HAW-Kokillen	3.000 kW
MAW(Q)	200 kW
AVR+THTR	< 20 kW

Wärmeentwickelnde Abfälle

	Bestand Ende 2000	Prognose 2001-2010	Prognose 2011-2020	Prognose 2021-2030	Prognose 2031-2040	Summe
Anzahl						
HAW-Kokillen	84	4.582	112	0	0	4.778
Gewinde MAW (Q)	0	840	7.576	2.400	0	10.816
Kugeln AVR + THTR	908.705	0	0	0	0	908.705
10 ³ kg						
Brennelemente LWR	3.142	3.182	1.819	24	0	8.947
Brennelemente VVER	2,3	0	0	0	0	2,3
Brennelemente FRM-II	0	0,35	0,35	0,35	0,35	1,4

Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung



Aspekte der Langzeitsicherheit und des Nachweisverfahrens

Eine Aufteilung der radioaktiven Abfälle auf mehrere Endlager würde vor allem dann Sinn machen,

- wenn sich gegenüber dem Ein-Endlager-Konzept sicherheitstechnische Vorteile ergeben,
- wenn der Nachweis der Langzeitsicherheit der Endlagerung leichter zu führen wäre,
- wenn durch diese Aufteilung für einen möglichst großen Teil der Abfälle die Anforderungen an den Endlagerstandort reduziert werden könnten.

AkEnd hat sich bisher mit den folgenden die Langzeit-

sicherheit und den Nachweis der Langzeitsicherheit sehr stark beeinflussenden Phänomenen befasst:

Wärmeeintrag: Falls eine gegenseitige thermische Beeinflussung der unterschiedlichen Abfallarten nicht restlos ausgeschlossen werden kann, ist mit erhöhter Gasbildung und komplexerer Geochemie (Mobilität der Radionuklide) zu rechnen.

Gasentwicklung: Für Abfälle mit starker interner Gasentwicklung (LAW/MAW) ist ein Wirtsgestein mit ausreichender Permeabilität günstig. Für wärmeerzeugen-

de Abfälle (HAW/BE) ist die Endlagerung in niedrig permeablen und insbesondere trockenen Wirtsgesteinen vorteilhaft.

Chemische Wechselwirkungen: Sie spielen eine Rolle, wenn nicht restlos ausgeschlossen werden kann, dass die eingelagerten Abfälle langfristig mit Fluiden in Kontakt treten. Das Vorhandensein organischer Bestandteile und Komplexbildner sowie schwer prognostizierbare pH-Werte und Redoxbedingungen erhöhen die Komplexität des geochemisch geführten Langzeitsicherheitsnachweises deutlich.

Vorläufige Schlussfolgerungen

Entsorgungskonzeptionelle Aspekte: Vor dem Hintergrund des realen Abfallaufkommens in Deutschland würden sich für die öffentliche Hand Vorteile ergeben, wenn möglichst bald ein Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorhanden wäre. Die Verfolgung des Ein-Endlager-Konzeptes bedeutet für die öffentliche Hand beträchtliche Mehraufwendungen.

Langzeitsicherheit: Unter den Aspekten des Wärmeeintrags und der chemischen Wechselwirkungen ist eine strikt getrennte Ablagerung verschiedener Abfallarten geboten. Dies kann sowohl im Rahmen des Ein- als auch des Mehr-Endlager-Konzeptes verwirklicht werden. Im Hinblick auf die Gasentwicklung sind Konsequenzen auf das Auswahlverfahren nicht auszuschließen. Eine Aufteilung der Abfälle auf zwei oder mehr Endlager würde wahrscheinlich wesentliche sicherheitstechnische Vorteile bieten.

Bei Verfolgung des Ein-Endlager-Konzeptes sind u.U. sicherheitstechnische Kompromisse zu schließen.

Nachweisverfahren: Der Langzeitsicherheitsnachweis ist u.U. beim Ein-Endlager-Konzept schwieriger zu führen. Eine Aufteilung der Abfälle auf zwei oder mehr Endlager würde wahrscheinlich nachweistheoretische Vorteile bieten.

Geologische Endlagerung mit oder ohne Rückholung

– eine internationale Diskussion –

Im Vordergrund der Diskussion steht die Rückholung abgebrannter Brennelemente. Bei allen heutigen Planungen wird letztlich aber die

Endlagerung angestrebt. Auf dem Weg dorthin werden mehrere Phasen mit fortschreitender Verfüllung der Einlagerungsbereiche, Zu-

gangsstrecken und Schächten durchlaufen. Dabei wird ein späterer Zugang zu den Abfällen sukzessive immer schwieriger.

Zielkonflikt

»Langzeitsicherheit«

Nicht zügig durchgeführte Endverfüllung und hoher Aufwand für die Offenhaltung **stehen gegen** kriteriengesteuerte Standortauswahl und sicherheitsbezogene Endlagerplanung mit zeitlich angepasstem Verfüllkonzept.

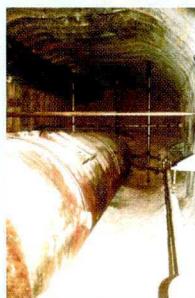
Konzeptueller Unterschied

Zugang für einige hundert Jahre zwecks Kontrollmessungen und ggf. Reparatur (A) **oder** sofortiger Verschuß mit schnellem Erreichen der passiven Langzeitsicherheit (B) des Endlagers.

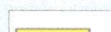
Ethische Abwägung

Die heutige Gesellschaft löst ihr Problem auf der Basis ihrer Werte und Normen und ihres technischen Wissens **oder** verschiebt es mit allen Risiken und Konsequenzen in die Zukunft.

simulierter Brennelement-Behälter in offener Einlagerungsstrecke



A



B



nach 8-jährigem Aufheizexperiment ist der Behälter im Salzversatz eingeschlossen

Position des AkEnd

Der AkEnd sieht keinen Anlaß, die Rückholbarkeit bei der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen. Vielmehr birgt die frühe Forderung nach Rückholbarkeit die Gefahr, dass dies zu einer Standortauswahl mit

einer weniger günstigen geologischen Gesamtsituation führt. Das schließt eine gestufte Planung der Endverfüllung jedoch nicht aus, um später das prognostizierte Verhalten des Endlagers zu überprüfen. Der AkEnd setzt zur Gewährleistung der Langzeit-

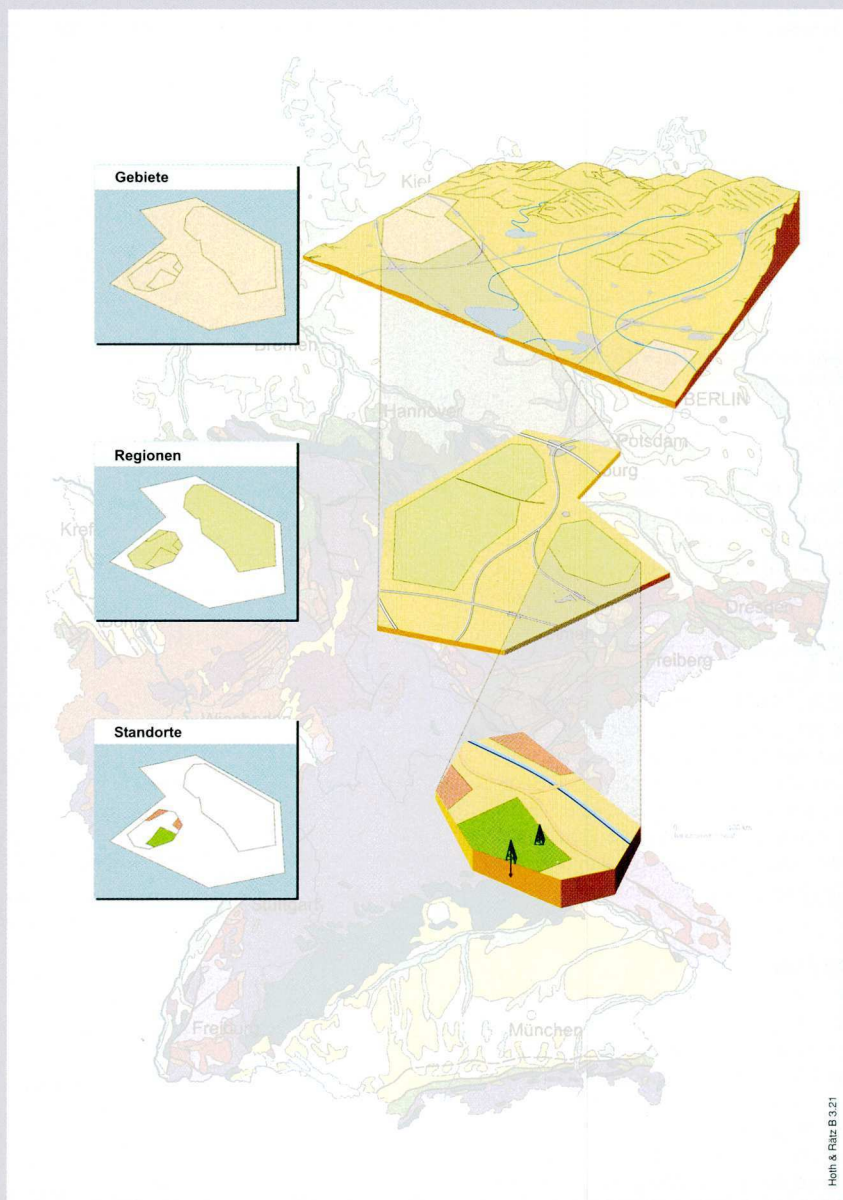
sicherheit auf ein sorgfältig ausgewähltes passives und wartungsfreies Barriersystem. Allein in einem verschlossenen Endlager sind die abgebrannten Brennelemente einem schnellen Zugriff entzogen.

Kriterien für die Standort-Auswahl

Geowissenschaftliche Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation

Geowissenschaftliche Kriterien (Auswahl)

- Es werden Gebiete gesucht mit Gesteinen, die unter langfristig gleichbleibenden oder sehr ähnlichen Bedingungen gebildet wurden.
- Es werden Gebiete gesucht mit Gesteinen, die geologisch einfach gebaut sind und die sich in einer seit langer Zeit stabilen und ruhigen tektonischen Situation befinden.
- Der Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs soll geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen (in Frage kommende Gesteinstypen: Steinsalz und Tonstein).
- Das durch die letzte Eiszeit verursachte Temperatursignal im tieferen Untergrund darf durch advektiven Wärmetransport mit dem Grundwasser nicht überprägt worden sein.
- Das Grundwasser im Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich darf kein Tritium und/oder C-14 enthalten.
- Das tiefe Grundwasser im Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll sich mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht befinden.



Die Rolle der Kriterien im Verfahren

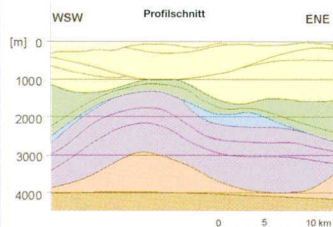
Durch die Anwendung von Kriterien wird die Abarbeitung einzelner Schritte im Standortauswahlverfahren gesteuert. Dabei können die Kriterien einerseits zum Ausschluss von Gebieten und andererseits zur Abwägung im Gebietsvergleich herangezogen werden.

Die einzelnen Verfahrensschritte führen von der Bewertung großräumiger Gebiete über Regionen schließlich zu Standorten.

Charakterisierbarkeit geologischer Strukturen

Beispiel einer einfach gebauten geologischen Struktur aus dem Norddeutschen Becken

Typisches Profil durch das Norddeutsche Tiefland



H. Wirth & P. Krull, u.a. B 3.21

Geologischer Schnitt durch das Gebiet der Strukturkarte.

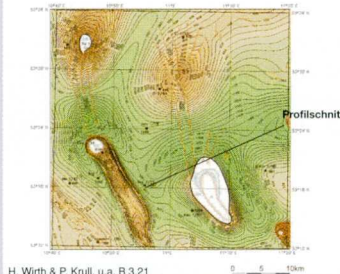
Geologische Karte von Deutschland – nördlicher Teil



© BGR Hannover - B. Loomelis B 1.18

Sedimentgesteine	Alter in Millionen Jahren	Magmatische Gesteine
Holozän		Känozoische Vulkanite < 65 Mio. Jahre
Pleistozän	1,7	Paläozoische Vulkanite > 250 Mio. Jahre
Tertiär	65	Plutonite
Kreide	145	Metamorphes Kristallin
Jura	205	Gneise u.a.
Trias	250	
Perm	295	
Karbon	355	
Devon	415	
Prädevon		

Strukturkarte: Deckgebirge mit durchstoßenden Salzstöcken



H. Wirth & P. Krull, u.a. B 3.21

Tiefenlage der Basisfläche von Tonsteinen des Eozän bis Paläozän (ca. 50 bis 65 Mio. Jahre)

Geologischer Bau

Das norddeutsche Tiefland ist der eiszeitlich geprägte Teil des Norddeutschen Beckens, das sich seit mehr als 400 Mio. Jahren im wesentlichen absenkt. Stagnations- und Hebungsphasen waren nur kurzfristig wirksam, so dass sich in den Senkungszentren über 10.000 m mächtige Sedimente abgelagert haben, die nur untergeordnet von Schichtlücken begleitet werden. Die Basis dieser mächtigen Sedimente bildet ein unterschiedlich altes konsolidiertes Fundament (800 – 300 Mio. Jahre) dass von Norden und Süden zum Senkungszentrum geneigt ist.

Tektonik

Tektonische Bewegungen haben das mächtige voreiszeitliche Sedimentpaket in ein Schollenmosaik von Gräben und Horsten und weitgespannte Sätteln und Mulden zerlegt, dessen Oberfläche generell in Richtung Nordsee abtaucht. Obwohl die tektonischen Bewegungen kurzzeitig mehrmals kulminierten, ist seit der Zechsteinzeit (vor ca. 250 Mio. Jahren) insgesamt eine kontinuierliche Abnahme der Aktivitäten zu beobachten. Seit dem Obermiozän (vor ca. 13 Mio. Jahren) haben sich nur noch relativ wenige Störungen bewegt und in den letzten 2 Mio. Jahren sind – abgesehen von der zentralen Nordsee – keine Bewegungen mehr sicher nachweisbar.

Salzgesteine / Salztektonik

Durch Verdunstung von Meerwasser wurden in der Zechsteinzeit in abgeschnürten Meeresbuchten mehrere hundert Meter mächtige Salzgesteine ausgefällt. Der Gebirgsdruck der später darüber abgelagerten Sedimente sowie tektonische Bewegungen führten zu Fließbewegungen der plastisch reagierenden Salzgesteine in Richtung druckentlastender Schwächezonen der Deckschichten. Letztere wurden dabei angehoben und verstärkt abgetragen. In den Scheitelzonen der Salzkissen können durch Überdehnung Zerrungsspalten und Gräben aufreißen. Diese Bewegungsform wird als Salztektonik bezeichnet. Kommt es in diesen Schwächezonen zum Durchbruch des Salzes, entstehen Salzstöcke (Diapire) mit z. T. mehreren 1000 m mächtigen Salzakkumulationen. Diese Salzstrukturen sind in Norddeutschland gut untersucht.

Tongesteine

Als weitere Sedimentgesteine mit guten Barriereigenschaften sind Tone und Tonsteine neben den Salzen im Norddeutschen Becken vorhanden. Sedimentfolgen, die überwiegend aus tonigen Gesteinen aufgebaut sind und Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern bei großflächiger Verbreitung aufweisen, treten insbesondere im Tertiär, in der Kreide und im Jura auf. Regional existieren deutliche Unterschiede hinsichtlich der Tiefenlagen, Mächtigkeiten und ihrer die Barrierewirkung bestimmenden Eigenschaften.

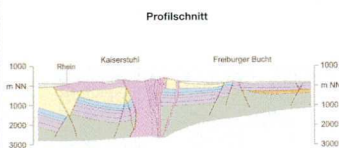
Charakterisierbarkeit

Die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte geforderte gute Charakterisierbarkeit geologischer Strukturen kann im Norddeutschen Raum z.T. erwartet werden. Es lassen sich stärker tektonisch gestörte Gebiete von solchen mit weitgehend ungestörten Lagerungsverhältnissen und langfristig stabilen geologischen Verhältnissen unterscheiden. Mächtige Ton- und Salzgesteine stellen die wesentlichen hydrogeologischen Barrieren dar.

Charakterisierbarkeit geologischer Strukturen

Beispiel einer kompliziert gebauten geologischen Struktur aus Südwest-Deutschland

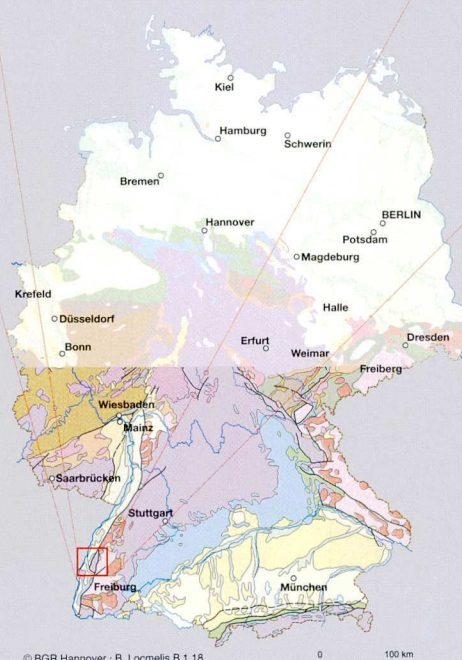
Typisches Profil durch den südlichen Oberrheingraben



R. Hürner
Aus Geologischer Übersichtskarte: Blatt Freiburg Nord CC7910
Maßstab 1:200 000

Geologischer Schnitt im Gebiet der Strukturkarte mit typischem Bruchschollenmuster.

Geologische Karte von Deutschland – südlicher Teil



© BGR Hannover · B. Loomis B 1.18

Sedimentgesteine

Holozän	
Pleistozän	
Tertiär	
Kreide	
Jura	
Trias	
Perm	
Karbon	
Devon	
Prädevon	

Alter in Millionen Jahren

1,7

65

145

205

250

295

355

415

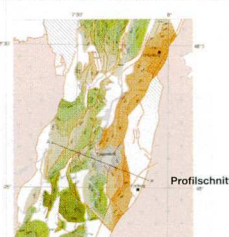
Magmatische Gesteine

Känozoische Vulkanite	< 65 Mio. Jahre
Paläozoische Vulkanite	> 250 Mio. Jahre
Plutonite	

Metamorphes Kristallin

Gneise u.a.	
-------------	--

Strukturkarte: Grundgebirge mit eingebrochener Grabenstruktur



Zusammenstellung: P. Schulz; S. Prüfer B 2.7
Nach Atlas - Geothermal Resources in the European Community
Austria & Switzerland, 1988 - Maßstab 1:200 000

Tiefenlage der Oberfläche des Hauptrogenstein aus dem Dogger (ca. 180 Mio. Jahre)

Geologischer Bau

Südwestdeutschland gehört geologisch zur Süddeutschen Großscholle mit den Grundgebirgseinheiten des Schwarzwaldes und Odenwaldes sowie den überwiegend aus marinen Sedimenten bestehenden Deckgebirgseinheiten der Schwäbischen und Fränkischen Alb und des Molassebeckens. Im Westen schließt sich an den Schwarzwald die markante Struktur des Oberrheingrabens an. Der Oberrheingraben zeichnet eine bereits im Paläozoikum (> 245 Mio. Jahre) angelegte Schwächezone nach, die besonders im Tertiär (vor ca. 50 bis 40 Mio. Jahre) reaktiviert wurde. Bis heute halten seismische Aktivitäten an.

Tektonik

Zu den nachhaltigsten tektonischen Bewegungen kam es im Obereozän/Unteroigozän (ca. 38 Mio. Jahre), die zum Grabeneinbruch mit staffelartigen Abschiebungen führten. Während des Miozäns (ca. 25 Mio. Jahre) setzten außerdem horizontale Bewegungen (Blattverschiebung) ein, die noch durch Hebung der Grabenschultern (Schwarzwald u. Vogesen) begleitet wurden.

Deckgebirge

Anders als im übrigen Südwestdeutschland, wo die überwiegend marinen Sedimente (Sand-, Kalk- und Tonsteine vom Buntsandstein bis zur Kreide) des Deckgebirges weitgehend ungestört und relativ homogen über weite Entfernungen (> 100 km) aushalten, weist der Oberrheingraben aufgrund der intensiven tektonischen Dynamik in der Erdneuzeit erhebliche Zergliederungen besonders im Bau des Deckgebirges auf. So kommt beispielsweise auch die Oberfläche der Bezugsfläche Hauptrogenstein (s. Abb.) nur kleinfächig in Tiefen zwischen +200m und -2300m vor.

Komplexität

Der tektonischen Geschichte entsprechend zeigt sich die geologische Gesamtsituation der Grabenstruktur komplex, vielfältig und stark wechselhaft. Auf kurzer Distanz, sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen, sind entscheidende Wechsel der Gesteine anzutreffen. Diese Situation charakterisiert die Strukturkarte. Für die hier vorhandene komplizierte geologische Situation ist die Anzahl der Aufschlüsse (Bohrungen, seismische Profile) zu gering, um die Oberfläche des dargestellten Bezugshorizontes Hauptrogenstein vollflächig darstellen zu können. Aufgrund der tektonisch bedingten Diskontinuitäten (Klüfte, Scherzonen) muss zudem von tiefreichenden hydraulischen Wegsamkeiten ausgegangen werden.

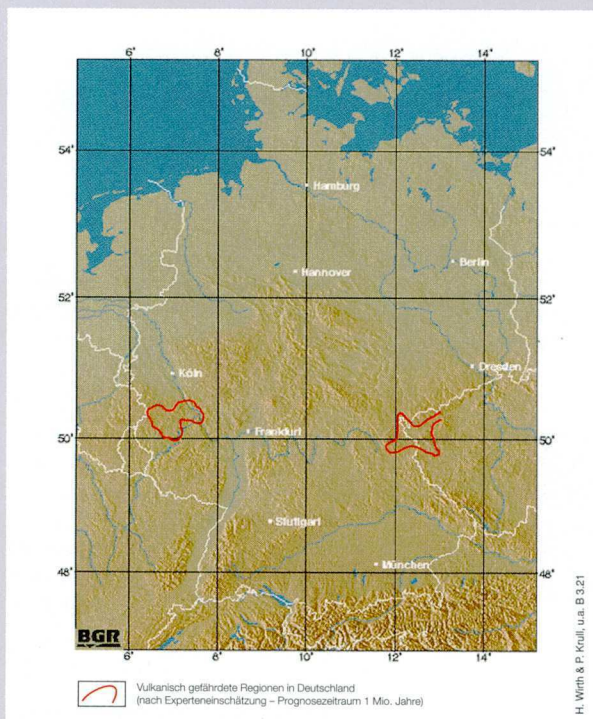
Charakterisierbarkeit

Die geologische Gesamtsituation des Oberrheingrabens ist aufgrund der intensiven und vielfältigen tektonischen Überprägung nicht "normierbar". Dadurch ist jedes Einzelgebiet des Oberrheingrabens nur sehr schwer zu beschreiben. Eine gute Charakterisierbarkeit der geologischen Strukturen, wie vom Arbeitskreis Auswahlverfahren gefordert, ist insbesondere mit Blick auf die Entwicklung des Grabens und die bis in die jüngste Vergangenheit wirkende Tektonik, nicht zu erwarten.

Gebiete mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen

Beispiele: » Vulkanische Aktivität « & » Seismische Aktivität «

Vulkanische Gefährdung



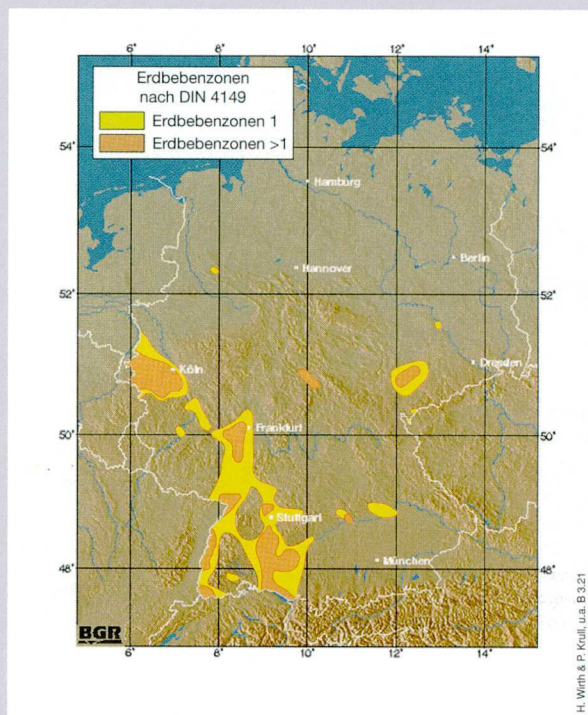
Vulkanische Aktivität

Nach Experteneinschätzung ist ein Wiederaufleben des Vulkanismus in der Ost- und in der West-Eifel im Prognosezeitraum von 1 Mio. Jahren mit 100 % wahrscheinlich. Die nähere Umgebung von einem Eruptionszentrum ist durch hochexplosive Magma-Wasser-Eruptionen und dabei entstehenden Druckwellen gefährdet.

Im Vogtland und der angrenzenden Region Nordwest-Böhmens wird neben periodisch wiederkehrenden Schwarmbeben eine Kombination aus seismischer Aktivität und flächenhaftem Austritt von CO₂ an der Oberfläche mit hoher Gasflußrate beobachtet. Für die nächsten 400.000 Jahre besteht nach vorliegendem Kenntnisstand eine Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % für das Wiederaufleben des Vulkanismus.

Es sollte ein »Sicherheitsradius« von 10 km um potentiell gefährdete Gebiete geschlagen werden.

Erdbebenzonen nach DIN 4149



Seismische Aktivität

Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die »Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)«. Diese Zonierung bezieht sich auf Schäden an Bauwerken an der Erdoberfläche. Die Auswirkungen von Erdbeben auf Untertagebauwerke werden als geringer eingeschätzt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete ab Erdbebenzone 2 (DIN 4149). Dies entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0.

Alle Angaben über die seismische Gefährdung eines Gebietes basieren allein auf Erdbebenbeobachtungen ab dem Jahre 800. Daraus eine Prognose für einen Zeitraum von einer Million Jahre abzuleiten ist nicht möglich. Eine exakte und im Gelände anwendbare Zonierung ist nur schwer möglich. Die Beurteilung von Standorten in Randbereichen erfordert in jedem Fall eine Einzelprüfung.

Konfigurationstypen und ihre Bewertung

Aufgabe

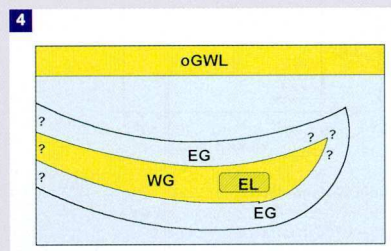
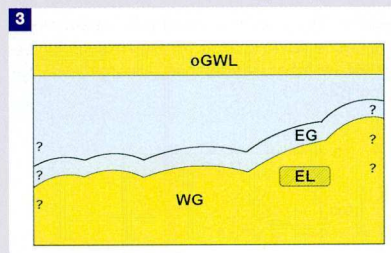
Die günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich, also Ausdehnung und Anordnung der beteiligten Gesteinskörper, ist ein wichtiges Merkmal einer »günstigen geologischen Gesamtsituation«. Im Vergleich zu anderen Merkmalen ist sie einfach zu erheben bzw. früh zu erkennen. Sie kann daher bereits für die Standortauswahl bedeutsam sein. Daher sind die möglichen Konfigurationen von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich zu typisieren und im Hinblick auf ihren Beitrag zu einer »günstigen geologischen Gesamtsituation« zu bewerten.

Funktionale Differenzierung zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Wirtsgestein: Aufnahme der Abfälle, Errichtung und Betrieb des Endlagerbergwerks ohne Beeinträchtigung durch Abfallauswirkungen erlauben.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Einschluss der Abfälle für den geforderten Isolationszeitraum gewährleisten

- unterschiedliche funktionale Anforderungen an Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- zu günstiger Konfiguration gehören günstige funktionsbezogene Eigenschaften der beteiligten Gesteinskörper



Konfigurationstypen

Typ A – Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Abb. 1)

Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich sind Teil ein und desselben Gesteinskörpers (bzw. mehrerer Gesteinskörper mit übereinstimmenden barrierewirksamen Eigenschaften) mit günstigen Eigenschaften für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

- günstige barrierewirksame Eigenschaften, insbesondere geringe Wasserdurchlässigkeit
- große Ausdehnung
- Stabilität gegen Abfallauswirkungen

Typ B – Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Abb. 2)

Bei Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich handelt es sich um verschiedene Gesteinskörper mit unterschiedlichen barrierewirksamen Eigenschaften:

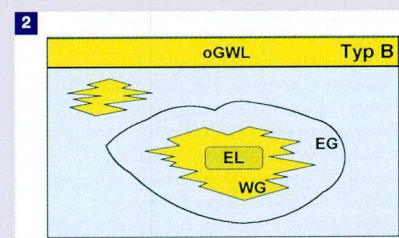
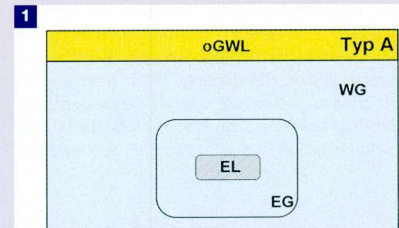
- Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: günstige funktionale Eigenschaften wie bei Typ A
- Wirtsgestein: für die Standsicherheit von Endlagerhöhlräumen günstige mechanische Eigenschaften, gegenüber Abfallauswirkungen unempfindlich.

Untertypen von Typ B

Typ Ba – Wirtsgesteinskörper vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich vollständig umschlossen: Weitere Unterteilung nach der Entstehungsart der Konfigurationen, z.B. durch Faziesdifferenzierung (schematisches Beispiel in Abb. 2), Tektonik oder Zusammenwirken mehrerer Prozesse

Typ Bb – Wirtsgesteinskörper vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht vollständig umschlossen: Weitere Unterscheidung nach dem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Abb. 3 und 4 zeigen schematische Beispiele mit unterschiedlicher konfigurationsbezogener Barrierewirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

- Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung
- Gesteinskörper ohne sicherheitsrelevante Barrierewirkung
- oGWL Grundwasserleiter mit Kontakt zur Biosphäre
- EL Einlagerungsbereich
- WG Wirtsgestein
- EG Einschlusswirksamer Gebirgsbereich



Bewertung

1. Typ Ba (Abb. 2): Konfiguratives Optimum; denn es sind Konfigurationen vorstellbar, bei denen Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich die spezifischen funktionalen Anforderungen jeweils besonders gut erfüllen. Diesem Vorteil können Nachteile bei der Identifizierung, der zuverlässigen Erkundung und räumlichen Charakterisierung entgegen stehen.

2. Typ A (Abb. 1): Barrierewirksamkeit ähnlich Typ Ba. Fehlen eines günstigen Wirtsgesteins muss u.U. durch technische Maßnahmen ausgeglichen werden. Entspricht herkömmlichem Ansatz bei der Auswahl von Endlagerstandorten.

3. Typ Bb (Abb. 3 u. 4): Die Konfiguration leistet allein keinen ausreichenden Beitrag zu einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Vielmehr sind zusätzlich günstige konfigurationsunabhängige Standorteigenschaften (z.B. günstige hydraulische Bedingungen) erforderlich.

Zielkonflikt: Bewertung gilt für Radionuklidtransport mit dem Grundwasser in die Biosphäre. Im Hinblick auf die Vermeidung nachteiliger Folgen durch Gasentwicklung schneidet Typ Ba ungünstiger ab, während Konfigurationen des Typs Bb günstiger abschneiden.

Schlussfolgerungen für die Standortauswahl

- Geologische Strukturen mit günstiger Konfiguration der Gesteinskörper sind Indikatoren für eine »günstige geologische Gesamtsituation«.
- Funktionsspezifische Anforderungen an Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich müssen bei der Standortauswahl von Anfang an berücksichtigt werden.

Im Vordergrund steht der einschlusswirksame Gebirgsbereich, für den nur Gesteinstypen mit geringer Wasserdurchlässigkeit in Frage kommen.

- Zu jeder günstigen Konfiguration gehört als einschlusswirksamer Gebirgsbereich ein Gesteinskörper mit hoher Barrierewirksamkeit und großer Ausdehnung. Es sind daher auf jeden Fall besonders ausgedehnte Vorkommen geeigneter Gesteinstypen

(vor allem Tonstein, Steinsalz) zu suchen (Konfigurationstyp A). Um die konfigurativen Vorteile von Typ Ba gezielt zu nutzen, ist dann zu prüfen, ob die identifizierten Gesteinskörper so mit anderen Gesteinskörpern vergesellschaftet sind, dass sich Vorteile im Hinblick auf den Radionuklidtransport mit dem Grundwasser ergeben.

Gesteinstyp als Indikator für die Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen

Aufgabe

Die Geschwindigkeit des Radionuklidtransports aus dem Endlager in die Biosphäre mit dem Grundwasser ist maßgeblich von der Wasserdurchlässigkeit der durchströmten Gesteinskörper abhängig. Gesucht werden daher Gesteinskörper mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit (Wasserdurchlässigkeit des natürlichen Gesteinsver-

bandes). Messgröße ist der k_f -Wert (oder Durchlässigkeitsbeiwert). k_f -Werte können nur an Ort und Stelle (insitu) durch gezielte Untersuchungen erhoben werden. Solche Daten stehen zu Beginn der Standortauswahl weder flächendeckend zur Verfügung noch können sie flächendeckend erhoben werden.

Wenn bestimmten Gesteinstypen charakteristische Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit

zugeordnet werden können, kann aber der Gesteinstyp eines Gesteinskörpers als Indikator für dessen Gebirgsdurchlässigkeit dienen. Zwischenergebnisse der Prüfung dieser Arbeitshypothese werden für folgende Gesteinstypen, die auf Grund ihres Vorkommens in Deutschland möglicherweise für die Endlagerung in Frage kommen, vorgestellt: Steinsalz, Ton bzw. Tonstein, Mergelstein, Granit, Gneis.

Datenbasis und Auswertung

- mehr als 2600 In-situ-Messwerte überwiegend aus Packertests
- Daten überwiegend aus der Endlagerung radioaktiver oder »konventioneller« Abfälle
- 41 Standorte bzw. Regionen
- Messtiefen (Mitte der Testintervalle) bis zu 4.000 m unter Geländeoberfläche
- Auswertung unter Berücksichtigung möglicher Einflüsse auf die Gebirgsdurchlässigkeit, wie potenziell wasserleitende Gesteinseinschlüsse, Gefügestörungen (Trennfugen; Störungen, Klüfte, Risse usw.) und Testtiefe, insbesondere der für die Endlagerung in Frage kommende Tiefenbereich (für Auswertung festgesetzt: 300–1.100 m)

Ergebnisse (Stand Juli 2001)

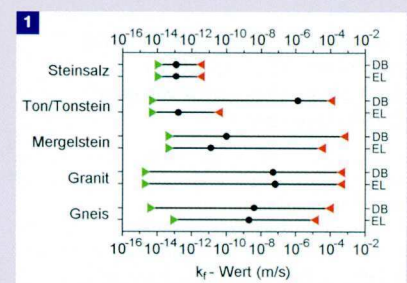
Alle Gesteinstypen: Außer bei Steinsalz große Bandbreiten der k_f -Werte; Bandbreiten verschiedener Gesteinstypen überschneiden sich in weiten Bereichen. Bei Ton/Tonstein deutliche Unterschiede zwischen Gesamtdatenbasis und Daten für 300 bis 1.100 m Tiefe (s. Abb. 1). Medianwerte für Steinsalz und Ton/Tonstein in 300–1.100 m Tiefe signifikant kleiner als bei den anderen Gesteinstypen.

Steinsalz: Kleine Bandbreite der k_f -Werte, niedrige Werte (nur 300–1.100 m Tiefe).

Ton/Tonstein: Oberhalb von etwa 200 m unter Geländeoberfläche große Bandbreite der k_f -Werte bei hohen Werten, darunter nur niedrige Werte (s. Abb. 1 u. 2).

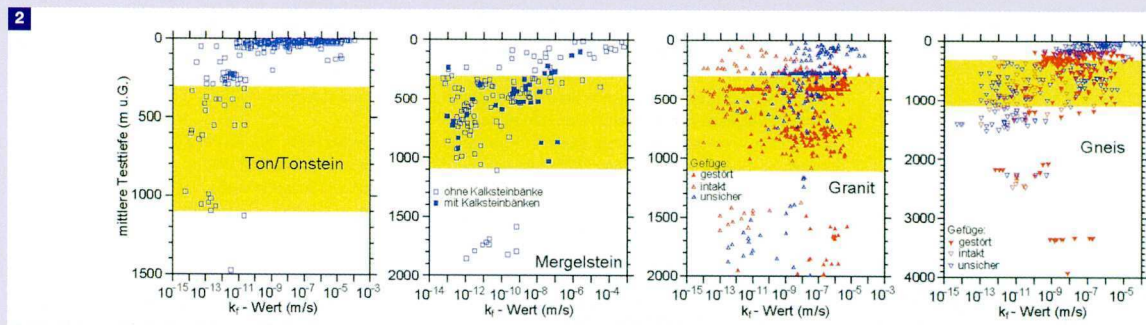
Mergelstein: Gebirgsdurchlässigkeit ist tiefenabhängig (s. Abb. 2). In Kalksteineinschlüssen bis in größere Tiefen vermehrt hohe k_f -Werte, ohne Kalksteinbänke eher niedrige Werte.

Granit: Außer an einem Standort mit überwiegend niedrigen Werten über gesamten Tiefenbereich große Bandbreite der k_f -Werte (s. Abb. 2). Bei gestörtem Gefüge signifikant höhere k_f -Werte als bei intaktem Gefüge.



Bandbreiten und Medianwerte (Kreise) der k_f -Werte verschiedener Gesteinstypen
DB - alle Werte, EL-Werte für Tiefenbereich 300–1.100 m unter Geländeoberfläche. Der Medianwert ist der mittlere Wert einer nach der Größe geordneten Wertereihe.

Gneis: Anteil niedriger k_f -Werte nimmt mit der Testtiefe zu, aber über gesamten Tiefenbereich auch hohe Werte (s. Abb. 2). Signifikanter Unterschied zwischen intakten und gestörten Gebirgsbereichen.



k_f -Werte der Gesteinstypen Ton/Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis in Abhängigkeit von der mittleren Testtiefe (Mitte des Testintervalls)

Abhängigkeit von k_f -Werten von der mittleren Testtiefe (Mitte des Testintervalls) unter Geländeoberfläche mit Kennzeichnung durchlässigkeitsdifferenzierender Gesteinsmerkmale (Mergelstein: Kalksteinbänke; Granit und

Gneis: Gefügestörungen)
gelb: möglicher Tiefenbereich für Endlager (300–1.100 m unter Geländeoberfläche)

Vorläufige Schlussfolgerungen

Gesteinskörper aller betrachteten Gesteinstypen können Bereiche mit der gesuchten geringen Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, doch sind die Voraussetzungen für Identifizierung und Ausweisung solcher Bereiche unterschiedlich zu beurteilen:

Steinsalz und Ton/Tonstein: Niedrige k_f -Werte in 300–1.100 m Tiefe unter Geländeoberfläche sind mit dem plastischen Verhalten beider Gesteinsty-

pen in diesen Tiefen zu erklären. Beide können als Indikatoren für geringe Gebirgsdurchlässigkeit gelten.

Mergelstein: Kalksteineinschlüsse können bis in größere Tiefe zu erhöhter Durchlässigkeit führen. Mergelstein ohne Kalksteinbänke (und mit geringem Kalkgehalt) kann sich bei der weiteren Bearbeitung als Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit erweisen.

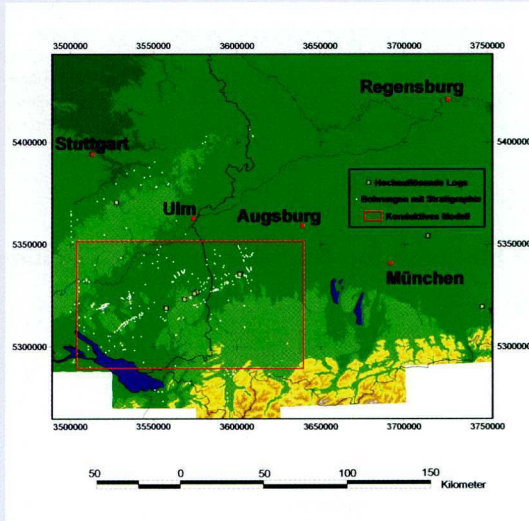
Granit und Gneis: Da wassergängige Trennfugen bis in sehr große Tiefen auftreten, stößt der Nachweis ausreichend großer Gebirgsbereiche mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit auf Schwierigkeiten. Beide Gesteinstypen (und solche mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften) scheiden daher wahrscheinlich als Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit aus.

Identifizierung von Grundwasserströmung

Geothermische Methoden zum Nachweis der von Grundwasser durchströmten Gebiete

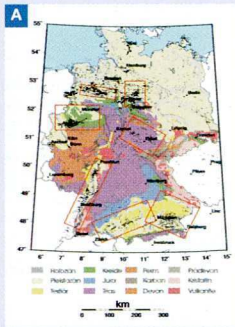
Projektziel

Günstige Voraussetzungen für einen Endlagerstandort liegen nur dort vor, wo keine bzw. nur langsame Grundwasserbewegung vorhanden ist. Im Rahmen des Auswahlverfahrens müssen solche Gebiete im tiefen Untergrund zuverlässig erkannt werden können. Grundwasserströme führen jedoch nicht nur Schadstoffe, sondern auch Wärme mit sich. Unter entsprechenden Umständen können vorhandene Temperaturmessungen in Bohrlöchern zum Nachweis dieser Bewegungen benutzt werden. Unter welchen Umständen und mit welcher Genauigkeit die Analyse der Temperaturverteilung im Untergrund zum Erkennen und Quantifizieren von Strömung eingesetzt werden kann, wird mit diesem Forschungsprojekt untersucht. Nach Abschluss der ersten Phase wurde das westliche Molassebecken als Testgebiet ausgewählt.

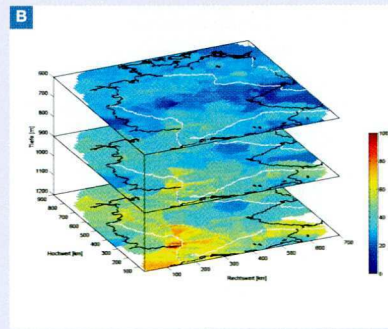


Darstellung der Temperaturen im Untergrund Deutschlands

Die Basis der Untersuchungen bildet eine Datenbank der Temperaturen im Untergrund Deutschlands. Insgesamt enthält diese Datenbank Werte aus fast 10.000 Bohrungen. In Abb. A sind alle erfassten Bohrungen (schwarze Punkte) mit Messungen tiefer als 500 m in einer geologischen Karte dargestellt. Die Datenbank enthält Werte aus unterschiedlichen Quellen, wie zum Beispiel Temperaturlogs aus Messungen zu Forschungszwecken oder Einzelmessungen in Kohlen-

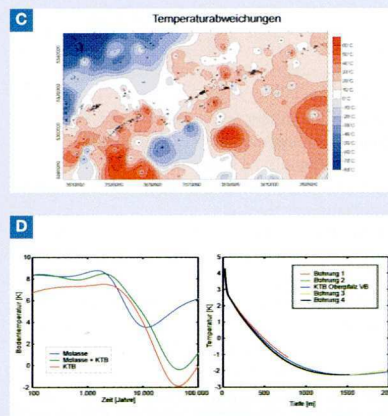


wasserstoffbohrungen. Aus den Temperaturdaten wurden Horizontalschnitte in den Tiefen 500 – 1200 m Tiefe erstellt (Abb. B). Aus diesen ist die regionale Verteilung der Temperatur im Untergrund ersichtlich.



Computer-Modell

Zur Berechnung von Temperaturabweichungen (gemessen – berechnet) wurde ein 3D Modell des Untersuchungsgebietes erstellt, welches lediglich auf Wärmeleitung beruht. Geländehöhen und Lufttemperaturen sind im Modell berücksichtigt. Die Strukturen des Modells wurden aus Bohrungen (weiße Signatur in der Karte) und Literaturdaten rekonstruiert. Blaue Zonen deuten auf Neubildungszonen von Grundwasser hin (z.B. Schwäbische Alb), während rote Gebiete möglicherweise Aufstiegsgebieten warmer Wässer entsprechen. (Abb. C)



Hintergrund

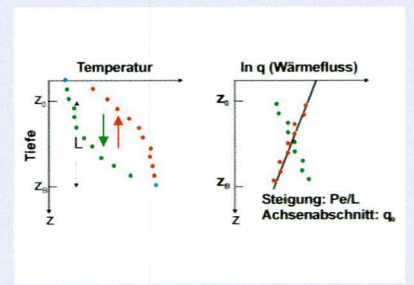
In Gebieten ohne Grundwasserströmung wird die Wärme nur über Wärmeleitung in den Gesteinen transportiert. Im Idealfall drückt sich dies durch eine lineare Zunahme der Temperatur mit der Tiefe aus, im Durchschnitt etwa 30°C/km. Abweichungen von diesem Verlauf entstehen durch:

- **Veränderliche Gesteinseigenschaften:** Die Temperaturzunahme ist proportional zur Wärmeleitfähigkeit des Gesteins.
- **Zeitabhängige Effekte:** Klimaänderungen dringen als zeitabhängiges Signal in den Untergrund ein. Zum Beispiel wurde das Signal der Erwärmung nach der letzten Eiszeit in einer Tiefe von 1200 m nachgewiesen.
- **Grundwasserbewegung:** Grundwasser führt Wärme mit sich und beeinflusst das regionale Temperaturfeld.

Wenn diese drei Prozesse erkannt und beziffert werden, ist eine Abschätzung der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers möglich. Dies ermöglicht Aussagen, die bedeutsam sind, sowohl in Hinsicht auf die Einlagerung radioaktiver Stoffe wie auch zur Nutzung von Erdwärme.

Pécletzahlanalyse

Eine **aufwärts** (**abwärts**) gerichtete Grundwasserströmung führt zu einer **konvexen** (**konkaven**) Verbiegung des sonst linearen Verlaufs der Bohrlochtemperatur (links). Die dimensionslose Pécletzahl wird aus der Tiefenabhängigkeit des Wärmestroms berechnet (rechts).



Paläoklimatische Korrektur

Um eine Verwechslung mit Strömungsauswirkungen auszuschließen, müssen die Signale des Paläoklimas erkannt und entfernt werden. Mit Hilfe eines mathematischen Umkehrverfahrens lässt sich Information über den Klimaverlaufs der letzten 20000 Jahre aus den Temperaturdaten gewinnen. Für die hochauflösenden Logs in der Molasse (grüne Signatur in der Karte) wurde der Verlauf der Bodentemperatur rekonstruiert (Abb.D, links). Daraus ergeben sich in den Bohrlöchern Abweichungen bezüglich der ungestörten Temperatur von bis zu ± 3 Kelvin (Abb. D, rechts).

Gasbildung im Endlager: Bedeutung für Standortauswahl, Auslegung und Konditionierung

Gasbildung im Endlager

- **Gasbildungsprozesse**
 - Korrosion metallischer Bestandteile
 - mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile des Abfalls
 - Radiolyse
- **Bedeutung der Gasbildung für die Sicherheit**
 - Druckaufbau bewirkt Beeinträchtigung der Stabilität/Integrität der Barriere
 - der Wirksamkeit der Barriere

- **Zusammenhang von Abfallart und Gasbildung**
 - **HAW/BE:** hauptsächlich Korrosion bei Kontakt mit von außen eindringenden Wässern / Laugen
 - **LAW/MAW:**
 - Korrosion bei Kontakt mit eingedringenen Wässern bzw. Laugen sowie durch bereits vorhandene Feuchte im Abfall
 - mikrobielle Zersetzung

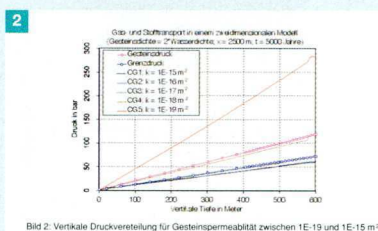
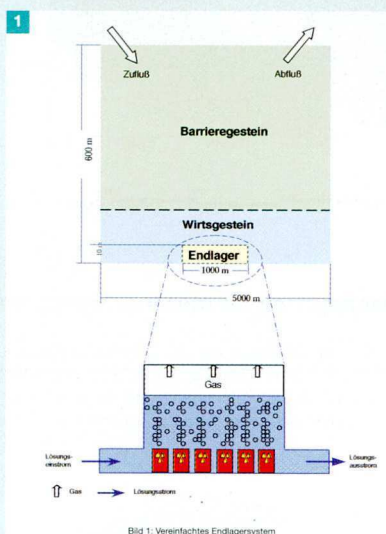
- **Optimierungsmöglichkeiten durch**
 - Beeinflussung der Gasbildung (Abfallarten, Konditionierung)
 - geeignete Standortwahl (Einfluß von Gesteinsdurchlässigkeiten auf Druckauf- bzw. -abbau, Anforderungen an mechanische Integrität)
 - Endlagerauslegung (Gassammelräume, z.B. Hohlräume oder Porenräume)

Fallstudien zur Orientierung und zur Stützung von Optimierungsentscheidungen

FALLSTUDIE 1:

Endlager in einem wassergesättigten einschlußwirksamen Gebirgsbereich

- Modellstudie mit dem Rechenprogramm TOUGH2/EOS7
- Modellannahmen:
 - vereinfachtes zweidimensionales Endlagersystem (Bild 1)
 - Gasbildung $10000 \text{ Nm}^3/\text{a}$ für die ersten 5000 Jahre \rightarrow insgesamt $5 \cdot 10^7 \text{ Nm}^3$
 - Endlagervolumen $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 - 2 Phasen (Gas, Flüssigkeit)
 - in Flüssigkeit gelöster Schadstoff
 - Anfangszustand: Endlager geflutet, Schadstoff zu 100 % im Endlagerbereich gelöst
- Variation der Permeabilität von Wirts- und Barrieregestein ($10^{-19} \text{ m}^2 \dots 10^{-15} \text{ m}^2$)
- Ermittlung sicherheitsrelevanter Größen:
 - Druckaufbau
 - Schadstoffaustrag aus Endlagerbereich
- Ergebnisse:
 - mit abnehmender Permeabilität \rightarrow steigender Druck, besonders für Werte $< 10^{-17} \text{ m}^2$ (Bild 2)
 - \rightarrow aber sinkender Schadstoffaustrag (Bild 3)
- **Schlußfolgerungen zur Stabilität/Integrität**
 - Annahme: Gewährleistung der geomechanischen Stabilität und Integrität, wenn der Druck im Endlager das c-fache des hydrostatischen Drucks nicht übersteigt. Faktor c hängt vom jeweiligen Wirtsgestein ab!
 - Grenzdruckverlauf mit Arbeitshypothese $c = 1,2$ (Bild 2)
 - für o.g. Modellannahmen und bei einer Permeabilität $> 10^{-17} \text{ m}^2 \rightarrow$ Einhaltung des Grenzdrucks
 - niedrigere Permeabilitäten würden geringere Gasbildungsrate erfordern (Bild 4)



Abkürzungen

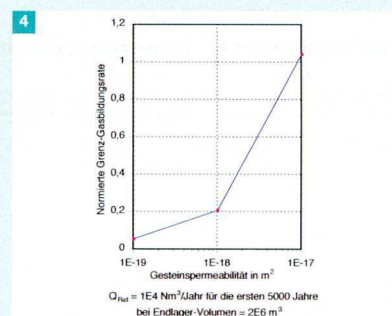
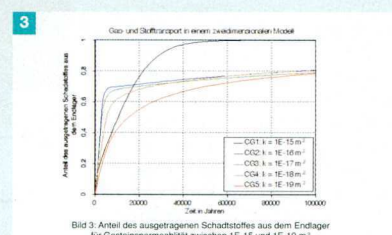
HAW/BE: Hochaktive Abfälle/Brennelemente

LAW/MAW: Schwachaktive Abfälle/Mittelaktive Abfälle

Endlager im wassergesättigten einschlußwirksamen Gebirgsbereich:

Zur Druckbegrenzung müssen die Gasbildungsrate, der Endlagerhohlraum und die Permeabilität aufeinander abgestimmt werden.

- **HAW/BE:** Zur Begrenzung des Grundwasserangebots bzw. der Gasbildung ist eine Permeabilität $< 10^{-19} \text{ m}^2$ als günstig einzuschätzen.
- **LAW/MAW:** Bei Annahme obiger Referenz-Gasbildungsrate sollte der einschlußwirksame Gebirgsbereich eine Permeabilität $> 10^{-17} \text{ m}^2$ aufweisen; kleinere Permeabilitäten erfordern eine Reduzierung der Gasbildungsrate, z.B. durch Konditionierungsmaßnahmen.



FALLSTUDIE 2:

Endlager in einem trockenen dichten Gebirgsbereich

- **HAW/BE:** Gasentwicklung von untergeordneter Bedeutung
- **LAW/MAW:**
 - Druckaufbau begrenzen:
 - Abfallkonditionierung
 - Endlagerauslegung

Endlager im trockenen/dichten einschlußwirksamen Gebirgsbereich:

- **HAW/BE:** Hinsichtlich der Gasentwicklung werden keine wesentlichen Anforderungen an den einschlußwirksamen Gebirgsbereich gestellt.
- **LAW/MAW:** Für diese Abfälle, die eine interne Gasentwicklung aufweisen, ist einer Druckentwicklung entweder durch Abfallkonditionierung oder durch konzeptionelle Maßnahmen bei der Endlagerauslegung, z.B. durch Bereitstellung von Gassammelräumen (Porenräumen), zu begegnen.

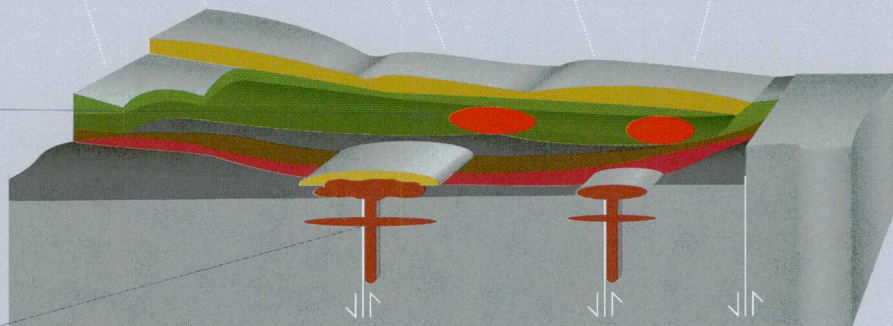
Natürliche Analoga – Beispiele für geologische »Endlager-Konfigurationen«

Bis zu 2000 Millionen Jahre alte Uranlagerstätten eingeschlossen in geologischen Formationen



© BGR-Archiv: B 1.23

© Nagra informiert 171932.14



Subconformity Lagerstätte	Sandstein	Unconfmity Lagerstätte
Kalkstein	Tonstein	Oxidationszone
Mergel	Tonmantel	Reduktionszone, tonig
		Kristallines Grundgebirge

Die Betrachtung von Uranerzlagerstätten in ihrer geologischen Entwicklung unterstützt die Ableitung von Gesteins-Konfigurationen, die günstige geologische Gesamtsituationen für einen in der Zukunft langfristig sicheren Endlagerstandort erwarten lassen. Ungestörte, über sehr lange Zeiträume eingeschlossene Uranerzlagerstätten in tiefen geologischen Formationen pausen sich nicht durch das Auftreten messbarer Ra-

dioisotope an der Erdoberfläche durch. Weltweit sind sie Beispiel natürlicher Systeme mit den günstigen einschlußwirksamen Eigenschaften:

- hohe natürliche Barrierewirksamkeit,
- hohes Rückhaltevermögen,
- langzeitliche hydrochemische Stabilität.

