

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte

Empfehlungen des AkEnd –
Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte



Impressum

Verfasser: Mitglieder des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte

Dr. Detlef Appel, PanGeo-Geowissenschaftliches Büro, Ibykusweg 23, 30629 Hannover

Dr. Bruno Baltes, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Schwertnergasse 1, 50667 Köln

Dr. Volkmar Bräuer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Prof. Dr. Wernt Brewitz, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Theodor-Heuss-Straße 4, 38122 Braunschweig

Prof. Dr. Klaus Duphorn, Zeppelinring 42b, 42146 Kiel

Rainer Gömmel, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Am Walde 2, 38319 Cremlingen

Heinz-Jörg Haury, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg

Prof. Dr. Detlev Ipsen, Universität Kassel, Fachbereich Stadtplanung-Landschaftsplanung, Gottschalk-Straße 28, 34109 Kassel

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geowissenschaften, Burgweg 11, 07749 Jena

Jürgen Kreuzsch, Gruppe Ökologie Hannover e. V., Kleine Düwelstraße 21, 30171 Hannover

Prof. Dr.-Ing. Klaus Kühn, Technische Universität Clausthal, Institut für Bergbau, Erzstraße 20, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Lux, Technische Universität Clausthal, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Erzstraße 20, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Michael Sailer, Öko-Institut e. V., Elisabethenstraße 55 – 57, 64283 Darmstadt

Dr. Bruno Thomauske, Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Straße 5, 38226 Salzgitter

Druck: W & S Druck GmbH, Niehler Str. 254, 50735 Köln.

Dezember 2002

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassende Empfehlung	1
1 Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte	5
1.1 Einrichtung.....	5
1.2 Auftrag und politische Randbedingungen	7
1.3 Arbeitsweise und Organisation	8
1.4 Kommunikation mit der Öffentlichkeit	9
2 Grundlagen.....	11
2.1 Fachliche Rahmenbedingungen	11
2.1.1 Schutzziele und Sicherheitsprinzipien	11
2.1.2 Radioaktive Abfälle.....	14
2.1.3 Einrichtung eines Endlagers in Deutschland bis 2030.....	19
2.1.4 Endlagerung in tiefen geologischen Formationen	20
2.1.5 Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes	27
2.1.6 Isolationszeitraum.....	28
2.1.7 Rückholbarkeit.....	30
2.1.8 Mögliche Endlagerkonzepte in geologischen Formationen	32
2.1.9 Relative Bedeutung geologischer und technischer Barrieren	35

2.2	Internationale Vorgehensweisen und Erfahrungen	39
2.2.1	Internationale Vorgehensweise bei der Auswahl von Endlagerstandorten	40
2.2.2	Internationale Vorgehensweisen bei der Kriterienfestlegung	42
2.2.3	Internationale Erfahrungen bei der Öffentlichkeitsbeteiligung	44
2.2.4	Internationale Erfahrungen zum Langzeitsicherheitsnachweis	48
2.2.5	Schlussfolgerungen für die Arbeit des AkEnd	51
2.3	Prinzipien der Öffentlichkeitsbeteiligung	54
3	Auswahlverfahren.....	63
3.1	Bewertungsgrundsätze	65
3.2	Vorschlag einer Verfahrensstruktur	69
3.2.1	Allgemeine Verfahrensmerkmale	69
3.2.2	Die Verfahrensschritte	72
3.3	Datenlage	78
3.3.1	Geowissenschaftliche Daten	78
3.3.2	Sozialwissenschaftliche Daten	82
4	Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten.....	83
4.1	Geowissenschaftliche Kriterien.....	83
4.1.1	Grundlagen und Definitionen.....	83

4.1.2	Ausschlusskriterien.....	84
4.1.2.1	Großräumige Vertikalbewegungen.....	86
4.1.2.2	Aktive Störungszonen	87
4.1.2.3	Seismische Aktivität	89
4.1.2.4	Vulkanische Aktivität	91
4.1.2.5	Grundwasseralter	94
4.1.3	Mindestanforderungen.....	95
4.1.4	Ermittlung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen.....	98
4.1.4.1	Allgemeine Anforderungen und Abwägungsprozess.....	98
4.1.4.2	Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau	113
4.1.4.3	Konfiguration der Gesteinskörper.....	129
4.1.4.4	Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit.....	144
4.1.4.5	Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse	149
4.1.4.6	Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	150
4.1.4.7	Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten.....	158
4.1.4.8	Gasverträglichkeit.....	172
4.1.4.9	Temperaturverträglichkeit.....	177
4.1.4.10	Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden	180
4.1.4.11	Hydrochemische Verhältnisse.....	185

4.2	Sozialwissenschaftliche Kriterien.....	189
4.2.1	Ableitung sozialwissenschaftlicher Kriterien	189
4.2.2	Planungswissenschaftliche Kriterien	191
4.2.3	Sozioökonomische Kriterien	196
4.3	Kriterien zur Eignungsprüfung	200
5	Beteiligung der Öffentlichkeit im Auswahlverfahren in Phase III	205
5.1	Bewertung, Kontrolle und Entscheidung im Auswahlverfahren (Phase III)	206
5.2	Formen der Beteiligung	209
5.3	Beteiligungsbereitschaft.....	212
5.3.1	Feststellung der Beteiligungsbereitschaft	213
5.3.2	Orientierendes Votum der Bevölkerung am Ende von Schritt 5	214
5.3.3	Vorgehensweise, wenn keine Beteiligungsbereitschaft erreicht wird.	216
6	Chancen für die Entwicklung der Standortregionen	217
6.1	Regionalentwicklung.....	219
6.2	Organisation der Regionalentwicklung	223
6.3	Prinzipien der Finanzierung und der Umsetzung	226
6.4	Szenarien für die Regionalentwicklung.....	228

7	Vorschlag zur Festlegung des Auswahlverfahrens in Phase II	233
7.1	Erster Schritt in Phase II: Institutioneller Beginn	235
7.2	Zweiter Schritt in Phase II: Diskussion des Auswahlverfahrens mit der Öffentlichkeit	237
7.2.1	Dialogisches Feld	237
7.2.2	Zeitraumen für Schritt 2 der Phase II	244
7.3	Dritter Schritt in Phase II: Institutionelles Ende	245
8	Literaturverzeichnis.....	247
8.1	Zitierte Literatur.....	247
8.2	Zuarbeit zum AkEnd im Auftrag des BfS	249
A	Anhang	251
A.1	Mitglieder des AkEnd.....	251
A.2	Gesprächsrunden und Informationsreisen des AkEnd.....	258
A.3	Abkürzungsverzeichnis	260
	Tabellenverzeichnis	VI
	Abbildungsverzeichnis	VII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Anfall an radioaktiven Abfällen bis zum Jahr 2040 [m ³].	15
Tabelle 2.2:	Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen bis 2040 [m ³] *	16
Tabelle 2.3:	Anfall an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bis 2040 [m ³].	17
Tabelle 3.1	Kriterien, Bewertungen und Instrumente der Bürgerbeteiligung in den einzelnen Verfahrensschritten des Auswahlverfahrens.	77
Tabelle 4.1:	Mindestanforderungen	97
Tabelle 4.2:	Gewichtungsgruppen, Anforderungen und Kriterien	106
Tabelle 4.3:	Erfüllungsfunktionen für geowissenschaftliche Abwägungskriterien.	108
Tabelle 4.4:	Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen.	116
Tabelle 4.5:	Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen im Tiefenbereich 300 m bis 1.500 m unter Geländeoberfläche.	116
Tabelle 4.6:	Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	137
Tabelle 4.7:	Langzeitrelevante Radionuklide mit Gesamtaktivitäten größer 10 ¹⁰ Bq nach 1 Million Jahren bei einem angenommenen Inventar von etwa 10.000 abgebrannten DWR Brennelementen (0.534Mg SM/BE).	184
Tabelle 4.8:	Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien.	193
Tabelle 4.9:	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien	195
Tabelle 4.10:	Standardisierte Entwicklungspotenziale	199

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Die AkEnd-Mitglieder am Altstadtmarkt in Braunschweig.....	6
Abbildung 2.1: Bergtechnische Möglichkeiten und Konzepte der Endlagerung in tiefen Gesteinsformationen	34
Abbildung 2.2: Technische Barrieren werden dort bevorzugt eingesetzt, wo die Geologie den sicheren Einschluss nicht allein gewährleisten kann (Beispiel Kristallin in Schweden; SKB)	38
Abbildung 2.3: Großprojekte und Beteiligung.....	58
Abbildung 2.4: Vertrauen in Informationen über Kernenergie	59
Abbildung 2.5: Akzeptanz politischer Entscheidungen.....	61
Abbildung 3.1: Beispiel für ein Bruchschollenmuster (geologisches Profil des südlichen Oberrheingrabens)	80
Abbildung 4.1: Karte der Erdbebenzonen Deutschlands nach DIN 4149.....	90
Abbildung 4.2: Karte der ausgewiesenen Gebiete in Deutschland mit einer vulkanischen Gefährdung.....	92
Abbildung 4.3: Bandbreiten und Medianwerte der k_f -Werte von Gesteinstypen in der vorgesehenen Endlagertiefe (300 m - 1.500 m unter Geländeoberfläche).....	120
Abbildung 4.4: Erkennen und Quantifizierung von Strömungen an Hand der Temperaturverteilung im tiefen Untergrund.....	123
Abbildung 4.5: Regionale schichtfolgende Analyse der Strömungsverhältnisse für ein Testgebiet in Süddeutschland	124
Abbildung 4.6: Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich	134

Abbildung 4.7: Konfigurationstyp Bb: Geologische Strukturen mit unterschiedlichem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich	135
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung von Potenzialgebieten und Endlagerbereich	143
Abbildung 4.9: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten.....	156
Abbildung 4.10: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten.....	157
Abbildung 4.11: Sozialwissenschaftliche Anforderungen und zugehörige Kriterien .	190
Abbildung 4.12: Schematische Darstellung von rechtlichen Regelungen für ein Endlager.....	200
Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der Langzeitsicherheit des Mehrbarrierensystems Endlager	203
Abbildung 5.1: Organisationsstruktur und Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung im Auswahlverfahren	212
Abbildung 6.1: Begriff der Heimat	217
Abbildung 6.2: Erwartete Beeinträchtigung der Region durch ein Endlager.....	221
Abbildung 6.3: Dringlichkeit der Problemlösung der Endlagerung / Umsetzung eines Endlagers in der eigenen Region.....	222
Abbildung 6.4: Organisationsstruktur und Schritte des Beteiligungsverfahrens	226
Abbildung 7.1: Die drei Schritte der Phase II	235
Abbildung 7.2: Dialogisches Feld	239

Abbildung 7.3: Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe	240
Abbildung 7.4: Organisation der Verhandlungsgruppe.....	242
Abbildung 7.5: Ablaufschema der Phase II	244

Zusammenfassende Empfehlung

Mit der Einrichtung des „Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ (AkEnd) hat der Bundesumweltminister ein von der Öffentlichkeit bisher vermisstes Diskussionsforum zur Endlagerung geschaffen. Unterstützt durch das BMU hat der AkEnd das Thema Endlagerung in einer Atmosphäre diskutiert, die dazu angetan war, unabhängig von der unterschiedlichen Haltung der einzelnen Mitglieder zur Kernenergie neue wissenschaftliche und gesellschaftliche Wege zur Lösung des Endlagerproblems zu finden.

Ein zentrales Anliegen des AkEnd ist, die von ihm praktizierte offene Haltung und das Bewusstsein, Verantwortung für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle zu übernehmen, in die breite Öffentlichkeit zu tragen. Deshalb empfiehlt der AkEnd, vor der Suche nach einem Endlager einen gesellschaftlichen Diskurs durchzuführen, in dem die relevanten Interessengruppierungen und die allgemeine Öffentlichkeit einen Konsens über den Weg zur Auswahl eines Endlagerstandortes erarbeiten. Der AkEnd erwartet, dass das Ergebnis dieses Diskurses politisch und rechtlich festgelegt wird, um so dem Verfahren ein Höchstmaß an Legitimität zu geben.

Die Ängste und Befürchtungen der Bevölkerung müssen ernst genommen werden. Vorrang der Sicherheit, Beteiligung der Bevölkerung in allen Verfahrensschritten, Einbindung des Endlagers in eine Regionalentwicklung und Transparenz des Auswahlverfahrens sind deshalb leitende Prinzipien für die Entwicklung der Kriterien und des Verfahrens. Entsprechend dem vom BMU erteilten Auftrag, ein Verfahren zur Suche eines Standortes für die Endlagerung von allen Arten von radioaktiven Abfällen in Deutschland zu entwickeln, hat der AkEnd folgende Grundanforderungen formuliert:

- Das Endlager soll an einem Standort mit langfristiger Sicherheit errichtet und betrieben werden, der in dem kriteriengesteuerten Auswahlverfahren als relativ bester Standort ermittelt wird.
- Das Endlagerbergwerk soll höchste Sicherheitsanforderungen erfüllen, d. h. es wird nachsorgefrei ausgelegt. Die Rückholbarkeit von Abfällen aus dem Endlager

wird bei der Standortsuche nicht berücksichtigt, da dadurch die auf die langfristige Sicherheit zielenden Merkmale von Gebirge und geotechnischen Barrieren nachteilig beeinträchtigt werden können.

- Eine möglichst hohe Beteiligungsbereitschaft der regionalen Bevölkerung wird von Beginn an angestrebt. Die Erkundung eines Standortes hängt von der Beteiligungsbereitschaft ab. Wenn nicht an mindestens zwei Standorten die Bevölkerung ihre Beteiligungsbereitschaft erklärt, legen Bundesregierung und Bundestag das weitere Vorgehen fest.
- Von Anfang an soll die Suche nach einem Endlager mit der Regionalentwicklung eng verbunden werden. Die Analyse der vorgeprägten regionalen Entwicklungsmöglichkeiten und die unter Einbeziehung der Öffentlichkeit zu erarbeitenden Entwicklungskonzepte für eine zukünftige "Endlagerregion" sind wichtige Bausteine bei Suche und Auswahl eines Endlagerstandortes.

Dem Aspekt der langfristigen Endlagersicherheit wird höchste Bedeutung beigemessen, da die heutige Bevölkerung wie auch zukünftige Generationen vor der Gefährdung durch radioaktive Stoffe dauerhaft zu schützen sind.

Die Öffentlichkeit muss an der Auswahl eines Endlagerstandortes umfassend beteiligt werden. Durch eine Informationsplattform wird kontinuierlich und unabhängig von den verschiedenen Akteuren über Endlagerfragen und das Auswahlverfahren informiert. Im Hinblick auf Nachvollziehbarkeit und Transparenz ist das Auswahlverfahren in Schritte mit entsprechenden Beteiligungsmöglichkeiten gegliedert. Zur Vorbereitung der Entscheidungen über Beteiligungsbereitschaft an über- bzw. untertägiger Erkundung sollen in den Regionen Bürgerforen gebildet werden. Sie werden durch Kompetenzzentren mit Experten ihrer Wahl unterstützt. Durch ein Kontrollgremium aus unabhängigen Fachleuten und angesehenen Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens werden der Verfahrensfortschritt überwacht und kritischen Fragen aus der Bevölkerung nachgegangen.

Im Hinblick auf die fachliche Durchführung des Suchverfahrens ist der AkEnd der Ansicht, dass die günstige geologische Gesamtsituation eines Standortes ausschlaggebend für den langfristig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle und deren

Abschluss von der Biosphäre ist. Gesteinsausbildung und Gebirgsbau des Standortes sollen eine Isolation der Abfälle für einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren gewährleisten. Die für ein Endlager notwendigen geotechnischen Barrieren dienen dem sicheren Verschluss von Einlagerungshohlräumen und Schächten.

Bei der Standortsuche und -bewertung unterscheidet der AkEnd zwischen Ausschluss- und Abwägungskriterien. Geologisch auszuschließen sind solche Gebiete, die durch verstärkte Seismizität und Tektonik, erhöhte Hebungsraten, rezente Vulkanismus und junge Grundwässer gekennzeichnet sind. Erfüllen die verbleibenden Gebiete die vom AkEnd festgelegten Mindestanforderungen für den geologischen Einschluss der radioaktiven Abfälle, werden die spezifischen Standorteigenschaften anhand von Abwägungskriterien bewertet. Dabei spielen geologische Sicherheitsreserven und der Aspekt der Nachweissicherheit eine wichtige Rolle. Erforderlich ist die Durchführung von Sicherheitsanalysen, mit deren Hilfe die Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundungsergebnisse bewertet und die Standortauswahl begründet werden können.

Gleiches gilt für die planungswissenschaftlichen Kriterien. Gebiete, wie beispielsweise Nationalparks, Naturschutzgebiete und Grundwassergewinnungsgebiete, sind in so hohem Maße geschützt, dass sie für die Errichtung eines Endlagers grundsätzlich nicht zur Verfügung stehen. Allerdings können diese Gebiete einer Einzelfallprüfung unterworfen werden, in der das öffentliche Interesse an einem Endlager und den zu schützenden Gütern abzuwägen ist.

Der AkEnd unterstreicht die Bedeutung der regional- bzw. standortbezogenen sozioökonomischen Kriterien. Mit Hilfe so genannter Potenzialanalysen sind die Entwicklungschancen einer möglichen "Endlagerregion" aufzuzeigen. Wichtige Indikatorenbereiche sind die Entwicklung des Arbeitsmarktes, des Wohnungsmarktes und des zukünftigen Investitionsvolumens. Regionale Entwicklungsmodelle sind von einer Planungsgruppe zusammen mit der Bevölkerung und in Abstimmung mit den regionalen Planungsämtern zu erarbeiten.

Die Beteiligungsbereitschaft einer Region ist ein wesentliches Element des Auswahlverfahrens. Trotz der von verschiedener Seite geäußerten Zweifel, ob sich Regionen finden lassen, in denen sich die Bevölkerung mehrheitlich für ein Endlager ausspricht, ist der AkEnd der Auffassung, dass es bei hinreichender Vorbereitung und nach intensiven Diskussionen zu einer Beteiligungsbereitschaft kommen wird. Wichtig ist, dass die Zustimmung zur übertägigen und später zur untertägigen Erkundung in getrennten Schritten festgestellt wird. Im Hinblick auf den hohen technischen Aufwand und erheblichen Einsatz finanzieller Mittel muss vor der untertägigen Erkundung der Öffentlichkeit deutlich gemacht werden, dass bei einem günstigen Ergebnis der Standort mit großer Wahrscheinlichkeit für die Endlagerung ausgewählt wird. Gleichwohl schlägt der AkEnd zusätzlich ein abschließendes Votum vor, das dem Deutschen Bundestag als Orientierung bei seiner Standortentscheidung dienen kann.

Eine glaubwürdige Standortentscheidung erfordert, dass mindestens an zwei Standorten untertägige Erkundungen und Sicherheitsbewertungen durchgeführt, das Entwicklungspotenzial unter Berücksichtigung der Regionalentwicklungsmaßnahmen der Regionen bewertet und das Votum der Bevölkerung zur Errichtung eines Endlagers eingeholt werden, bevor die Entscheidung durch den Bundestag unter Beteiligung der Länder für den Endlagerstandort gefällt wird.

Die Vorschläge des AkEnd führen nur dann zum Erfolg, wenn der politische Wille der Bundesregierung zur Errichtung eines Endlagers durch entsprechende Handlungen und Darstellungen gegenüber der Bevölkerung deutlich gemacht wird. Der durch die Arbeiten des AkEnd gewonnene Impuls sollte jetzt genutzt werden, um in naher Zukunft sichtbare Fortschritte in der Standortauswahl zu erreichen.

In eigener Sache weist der AkEnd darauf hin, dass er die in der vorliegenden Empfehlung gemachten Vorschläge zur Strukturierung und zur inhaltlichen bzw. öffentlichkeitsbezogenen Ausgestaltung des Auswahlverfahrens auf der Basis in- und ausländischer Erfahrungen und vor dem Hintergrund der Bedürfnisse einer modernen demokratischen Gesellschaft einvernehmlich entwickelt hat.

1 Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

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. Die Bundesregierung hat allerdings Zweifel an der Eignung von Gorleben. Sie hat deshalb im Einvernehmen mit den Energieversorgungsunternehmen die Erkundung am 1. Oktober 2000 für eine Zeitdauer zwischen drei und maximal zehn Jahren zur Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragen unterbrochen (Moratorium) [BMU 2000].

Der Bund sieht keine Alternative zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen für die langfristig sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle. Deshalb will die Bundesregierung weitere Standorte in unterschiedlichen Gesteinsformationen für die Endlagerung suchen und auf ihre Eignung überprüfen.

Damit stellt sich die Frage, wie Standorte identifiziert werden können, die für eine sichere Endlagerung geeignet sind und gleichzeitig Akzeptanz in der Öffentlichkeit finden.

1.1 Einrichtung

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Februar 1999 den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (im Folgenden AkEnd) eingerichtet. Die Empfehlungen des AkEnd dienen der Unterstützung des Bundes im Rahmen der Wahrnehmung seiner Aufgabe, gemäß § 9 a Abs. 3 Atomgesetz (AtG) [ATG 2002] Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten.

Der AkEnd 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 AkEnd auf Ausgewogenheit hinsichtlich Personen und Institutionen geachtet, damit im AkEnd ein weites Spektrum der in der Fachwelt zum Thema Endlagerung vertretenen Auffassungen repräsentiert ist.

Die Mitglieder des AkEnd sind Fachleute aus den Bereichen Geowissenschaften, Sozialwissenschaften, Chemie, Physik, Mathematik, Bergbau, Deponietechnik, Ingenieurwesen und Öffentlichkeitsarbeit. Sie werden in Anhang A.1 in Kurzbiographien vorgestellt. Abbildung 1.1 zeigt die AkEnd-Mitglieder sowie Mitarbeiter des BMU/BfS, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) und von CCM, die sich am 29.08.2002 anlässlich einer AkEnd-Sitzung in Braunschweig trafen.



Abbildung 1.1: Die AkEnd-Mitglieder am Altstadtmarkt in Braunschweig (von li.: M. Sailer, D. Ipsen, B. Thomaske, D. Appel, R. Wernicke (BMU), B. Baltes, W. Brewitz, J. Kreuzsch, A. Nies (BMU), G. Jentzsch, V. Bräuer, G. Arens (BfS), K. Kühn, H. Alder (BMU), G. Bäuerle (BMWA), H.-J. Haury, A. Wiederhold (CCM), R. Gömmel, K.-H. Lux, K. Duphorn)

Der AkEnd ist bei allen seinen Arbeiten von zahlreichen Seiten unterstützt worden, wofür er sich bedankt. Ein ganz besonderer Dank gilt jedoch Alexander Nies und Dr. Rolf Wernicke vom BMU sowie Georg Arens und Frau Heinke Hagge vom BfS. Ohne den engagierten und kontinuierlichen Einsatz dieser Vier für alle Belange des

AkEnd, insbesondere bei den zahlreichen Sitzungen und Veranstaltungen des AkEnd, wären dessen Diskussionen und Auseinandersetzungen nicht so zielführend gewesen, wie sie jetzt im vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert werden können.

Für alle organisatorischen Angelegenheiten des AkEnd war Frau Anette Wiederhold von CCM Köln verantwortlich. Auch ihr gebührt ein besonderer Dank für ihre stets erfolgreiche Arbeit.

An der Fertigstellung des vorliegenden Abschlussberichtes war ein Redaktionsteam, bestehend aus Frau Eva Hartmann (Öko-Institut e. V.) sowie Thomas Beuth und Dr. Jörg Mönig (GRS), maßgeblich beteiligt. Auch ihnen dankt der AkEnd für ihre Leistung.

1.2 Auftrag und politische Randbedingungen

Der AkEnd hatte den Auftrag, ein nachvollziehbares Verfahren für die Suche und die Auswahl von Standorten zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in Deutschland zu entwickeln. Das Verfahren sollte die Beteiligung der Öffentlichkeit in geeigneter Form vorsehen und fundierte Kriterien beinhalten. Die Entwicklung sollte auf wissenschaftlicher Basis sachorientiert, unvoreingenommen und ohne Ausschluss relevanter Aspekte erfolgen. Dabei sollten die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern berücksichtigt werden. Der AkEnd sollte seine Überlegungen schon während ihrer Entwicklung mit der nationalen und internationalen Fachwelt und mit der interessierten Öffentlichkeit erörtern.

Als Randbedingungen für die Verfahrensentwicklung hat das BMU die folgenden Vorgaben gemacht:

- 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 war nicht die Aufgabe des AkEnd, 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 AkEnd hatte zuletzt 14 Mitglieder. In seiner nahezu vierjährigen Arbeit hat es nur vier Änderungen in der Besetzung des AkEnd gegeben. Hierbei wurde immer darauf geachtet, dass die Ausgewogenheit der Besetzung erhalten blieb. Gerade diese hat sich in der laufenden Arbeit als Motor für die Diskussionen und als hilfreich für die Qualität der Arbeit herausgestellt. Im AkEnd wurden Entscheidungen im Konsens angestrebt. In allen Fragen wurde ein Konsens erreicht, wobei darauf geachtet wurde, dass die inhaltliche Qualität der Empfehlungen des AkEnd nicht beeinträchtigt wurde. Wissenschaftlich differierende Meinungen wären nicht überstimmt, sondern dokumentiert worden.

Entsprechend den Schwerpunkten seiner Arbeit hatte der AkEnd zwei Arbeitsgruppen gebildet, die Arbeitsgruppe Kriterien und die Arbeitsgruppe Öffentlichkeit. Diese bestanden aus fünf bzw. sieben Mitgliedern, die der AkEnd aus seinen Reihen nominiert hat. Den übrigen Mitgliedern des AkEnd stand die Teilnahme offen.

Der AkEnd hat von Anfang an den intensiven Austausch mit der interessierten Öffentlichkeit gesucht, um alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen und zugleich die Transparenz seiner Arbeiten sicherzustellen. Außerdem informierte sich der AkEnd auch vor Ort über Aktivitäten im Ausland. Er legte dabei Wert darauf, direkte Informationen von verschiedenen Interessenvertretern zu bekommen. Im einzelnen sind die Gesprächsrunden und Informationsreisen im Anhang A.2 dokumentiert.

Darüber hinaus wurde der AkEnd durch Forschungs- und Beratungsleistungen unterstützt. Die Vergabe dieser Aufträge und die fachliche Begleitung der Arbeiten erfolgten durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und das BMU. Die im Rahmen dieser Aufträge entstandenen Arbeiten sind im Kapitel 8.2 aufgeführt.

Mit der organisatorischen Unterstützung des AkEnd war die Firma CCM Köln Corporate Communication Management GmbH beauftragt worden.

Das BMU unterstützte den AkEnd bei der organisatorischen und wissenschaftlichen Arbeit und sorgte für eine ausreichende Finanzierung.

1.4 Kommunikation mit der Öffentlichkeit

Die Auswahl von Endlagerstandorten wird vom AkEnd als eine Aufgabe in gesamtgesellschaftlicher Verantwortung angesehen. Deshalb hat der AkEnd die Öffentlichkeit über seine Arbeit informiert und die Möglichkeit eröffnet, sich direkt zu informieren bzw. Rückmeldungen und Anregungen an den AkEnd zu geben. Mit seiner Öffentlichkeitsarbeit wollte der AkEnd auch die Voraussetzungen für die spätere Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Festlegung und Durchführung des Auswahlverfahrens verbessern. Um diese Ziele zu erreichen, hat der AkEnd

- drei öffentliche Workshops veranstaltet,
- Gespräche, z. B. mit Bundestags- und Landtagsabgeordneten, Verbänden, Kirchen, Gewerkschaften, Bürgerinitiativen, Medienvertretern und anderen Interessenverbänden (Stakeholders), geführt,
- auf seiner Homepage (www.akend.de) im Internet über seine Arbeitsfortschritte informiert und über eine dort eingerichtete E-Mail-Adresse Anregungen aufgenommen
- sowie in zwei Zwischenberichten und zwei AkEnd-Foren über aktuelle Themen informiert und Gästen eine Plattform zur Darstellung persönlicher Meinungen gegeben.

Zudem haben AkEnd-Mitglieder

- Vorträge gehalten und
- persönliche Gespräche mit Interessierten geführt.

Dem AkEnd war es wichtig, die Meinung der breiten Öffentlichkeit über die Endlagerung und das Bedürfnis der Bevölkerung an einer Beteiligung im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte kennenzulernen. Deshalb wurden hierzu in den Jahren 2001 und 2002 repräsentative Umfragen vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 2.3 diskutiert.

Die Umfrageergebnisse stützen die Empfehlung des AkEnd, die Bevölkerung und Interessengruppen bei der Festlegung des Auswahlverfahrens zu beteiligen, bevor mit dem Auswahlverfahren selbst begonnen wird.

An dieser Stelle bedankt sich der AkEnd bei allen, die sich an der Diskussion beteiligt und mit dazu beigetragen haben, eine sichere Lösung und eine gesellschaftlich akzeptable Vorgehensweise bei der Standortsuche für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle zu entwickeln.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel erläutert der AkEnd die Grundlagen, die wesentlich für die Entwicklung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte sind. Dabei handelt es sich um äußere Rahmenbedingungen, die vom AkEnd zu berücksichtigen waren. Dazu gehören die Schutzziele und Sicherheitsprinzipien, die Art und Menge der endzulagernden radioaktiven Abfälle sowie die Vorgaben des BMU für die Verfahrensentwicklung. Hinzu kommen Festlegungen, die sich der AkEnd nach Abwägung verschiedener Alternativen selbst als Rahmenbedingungen gesetzt hat. Dazu gehören u. a. die Festlegung, dass die geologischen Barrieren im Hinblick auf die Langzeitsicherheit die Hauptlast tragen sollen, und der Verzicht auf die Berücksichtigung der Rückholbarkeit. Die Gründe für die Festlegung auf eine bestimmte Alternative werden jeweils aufgezeigt. Darüber hinaus bilden internationale Vorgehensweisen und Erfahrungen einen wertvollen Erfahrungsschatz, auf den der AkEnd bei seiner Arbeit zurückgegriffen hat. Diese werden hier ebenso erläutert wie die grundsätzliche Bedeutung der Öffentlichkeitsbeteiligung aus Sicht des AkEnd.

2.1 Fachliche Rahmenbedingungen

2.1.1 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

(IAEO) 1995 formuliert [IAEA 1995], in dem „Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ festgelegt [IAEA 1997] und von der Europäischen Gemeinschaft übernommen wurden [ÜBEREINKOMMEN 1997], das seit 2001 in Deutschland Gesetzeskraft hat:

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

Die Normierungen im deutschen Recht tragen den vorstehend genannten Schutzzielen und Sicherheitsprinzipien Rechnung. Der Risikogedanke ist im Atomgesetz verankert. Weitere Sicherheitsprinzipien ergeben sich für die Betriebsphase eines Endlagers insbesondere aus der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [STRLSCHV 2001] dadurch, dass

- jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden ist und
- 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 ist,

sowie aus den Sicherheitskriterien [BMI 1983] und dem Übereinkommen von 1997 dadurch, dass

- auch nach der Stilllegung Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig abschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Bio-

sphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen dürfen, die 0,3 mSv pro Jahr effektive Dosis überschreiten. Dieser Wert entspricht der mittleren Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland.

Die zitierten Sicherheitskriterien werden derzeit überarbeitet.

Um den Schutzziele 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 unter Zugrundelegung eines gestuften Sicherheitskonzeptes (Mehrbarrierensystem) und die Auswahl eines robusten Standorts.

Für die Endlagerung in geologischen Formationen ist folgende grundlegende Anforderung aus dem Wasserhaushaltsgesetz [WHG 2002] zu beachten:

- Stoffe dürfen nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.

Hierzu stellt der AkEnd fest, dass bei einer strengen Auslegung nur der vollständige Einschluss der Abfälle im Endlager diesem Besorgnisgrundsatz gerecht wird. Unter diesem Gesichtspunkt hat ein Endlager im Salzgestein eindeutige Vorteile gegenüber anderen Barrieregesteinen.

Wird der Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Hinblick auf die Einhaltung von „Geringfügigkeitsschwellen“ oder „Immissionsneutralität“ geführt, kann die Wasserbehörde im Einzelfall die wasserrechtliche Erlaubnis erteilen. Die Erteilung der Erlaubnis steht auch bei Vorliegen der Voraussetzungen für die Erteilung der Erlaubnis im Ermessen der Behörde. Sie berücksichtigt Abwägungs- und Verhältnismäßigkeitsgesichtspunkte, d. h. der zuständigen wasserrechtlichen Behörde kommt eine entscheidende Rolle zu. Die Machbarkeit eines Endlagers in grundwasserhaltigen Gesteinen ist somit mit einem Genehmigungsrisiko belastet.

Es ist für die spätere Genehmigung eines Endlagers von großer Bedeutung, dass das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte auf die Auswahl von geologischen Gesamtsituationen abzielt, die einen möglichst guten „Einschluss der Abfälle“ sicherstellen. Hierzu gehört, dass in grundwasserhaltigen Formationen der Einschluss in einem möglichst kleinräumigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen und die Menge verunreinigten Wassers klein sein sollte (Begrenzung auf den Anlagenbereich). Dies muss durch eine Kombination von geologischen und technischen Barrieren möglichst zuverlässig und langfristig erreicht werden, um dem Schutzziel des Wasserrechtes genügen zu können.

Der AkEnd sieht durch die Anforderungen des WHG keine grundsätzlichen Änderungsnotwendigkeiten bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens. Dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss, kommt vor dem Hintergrund des WHG im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte eine sehr hohe Bedeutung zu. Dies muss bei der Gewichtung der Kriterien für eine günstige geologische Gesamtsituation berücksichtigt werden. Der AkEnd empfiehlt, eine Regelung zu schaffen, die die Anwendung des WHG bei der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen klärt.

2.1.2 Radioaktive 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 abgebrannte Brennelemente (BE) selbst sowie um Betriebs- und Stilllegungsabfälle aus Kernkraftwerken und sonstigen Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs. Mit der 9. Novelle des Atomgesetzes vom 27. April 2002, welche die Strommenge aus der Kernenergienutzung in Deutschland beschränkt, wird die Menge dieser Abfälle begrenzt.

In geringerem Umfang entstehen radioaktive Abfälle auch in Forschung, Medizin und Industrie. Für diese Abfälle müssen auch nach Beendigung der Kernenergienutzung langfristig Entsorgungsmöglichkeiten bereitgestellt werden.

Neben der Einteilung in hochradioaktive (HAW, High Active Waste), mittelradioaktive (MAW, Medium Active Waste) und schwachradioaktive (LAW, Low Active Waste) Abfälle werden in Deutschland die radioaktiven Abfälle für die Endlagerung in wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterschieden. Den Gesamtanfall dieser beiden Abfallkategorien in Deutschland bis zum Jahr 2040 zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Anfall an radioaktiven Abfällen bis zum Jahr 2040 [m³]

	Bestand	Prognose	Prognose	Prognose	Prognose	Summe
	Ende 2000	2001 – 2010	2011 - 2020	2021 - 2030	2031 - 2040	
Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung	76.000	58.000	54.000	76.000	33.000	297.000
Wärmeentwickelnde Abfälle	8.400	9.200	5.700	700	ca. 27	24.000

Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten etwa 99 % der Radioaktivität aller Abfälle. Sie bestehen zu einem großen Teil aus langlebigen Radionukliden und machen ca. 10 % des gesamten Abfallvolumens aus. Vor allem die stark wärmeentwickelnden Abfälle, also verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung oder abgebrannte Brennelemente, werden vor ihrer Endlagerung zum Abklingen der Wärmeleistung aus sicherheitstechnischen und ökonomischen Gründen für einige Jahrzehnte oberirdisch zwischengelagert. Diese Zwischenlagerzeit kann durch Optimierung der geometrischen Auslegung des Endlagers verkürzt werden.

Die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung machen ca. 90 % des Abfallvolumens aus, enthalten aber lediglich ca. 1 % der Radioaktivität. Sie können – sobald ein Endlager vorhanden ist – nach ihrer endlagergerechten Konditionierung ohne Zwischenlagerung endgelagert werden. Wärmeentwickelnde Abfälle sind fast

ausschließlich den Energieversorgungsunternehmen als Verursacher zuzuordnen, während Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu etwa einem Drittel aus Einrichtungen der öffentlichen Hand stammen.

Der voraussichtliche zeitliche Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen und an Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist in den folgenden Tabellen 2.2 und 2.3 zusammengestellt, wobei der in der Vereinbarung vom 14. Juni 2000 und in der Novelle des Atomgesetzes [ATG 2002] festgelegte Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung berücksichtigt wurde.

Tabelle 2.2: Anfall an wärmeentwickelnden Abfällen bis 2040 [m³] *

	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	1.920
	Masse [Mg]**						
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
	Summe						24.000

* Randbedingungen:

HAW: 4.778 Kokillen x 0,19 m³

MAW (Q): 8.764 Kokillen x 0,19 m³

2.052 Fässer x 0,56 m³

AVR+THTR: 457 Castor THTR x 4,2 m³

LWR: 1.790 POLLUX x 10,2 m³

VKTA: 18 Castor MTR 2 x 2,7 m³

FRM-II: 40 Castor MTR 2 x 2,7 m³

** 1 Mg = 1 Tonne.

Erläuterungen:

Verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle

Konditionierte mittelradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle

Brennelemente der Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR

Brennelemente von Leichtwasserreaktoren

Brennelemente des Rossendorfer Forschungsreaktors

Brennelemente des Forschungsreaktors München II

Tabelle 2.3: 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

Die Volumina der endzulagernden wärmeproduzierenden Abfälle sind auch abhängig von der Wirtsgesteinsformation des Endlagers und der anzuwendenden Einlagerungstechnik. Die Umrechnung der Mengen hochradioaktiver Abfälle in die entsprechenden Volumenangaben basiert auf der bisher für ein Endlager im Salzstock Gorleben verfolgten Endlagerkonzeption. Somit sind zum anfallenden Volumen der wärmeentwickelnden Abfälle von ca. 24.000 m³ in Tabelle 2.2 folgende Bemerkungen zu machen:

1. HAW-Kokillen: Diese Kokillen sollen bei der Realisierung eines Endlagers im Salz ohne einen Zusatzbehälter in tiefen Bohrlöchern aufeinander gestapelt eingelagert werden. Das Bruttovolumen einer Kokille beträgt 0,19 m³ bei einem Durchmesser von 430 mm und einer Länge von 1.345 mm.
2. Konditionierte mittelradioaktive Abfälle, die aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich stammen, sind in Kokillen mit gleicher Abmessung und gleichem Volumen verpackt, so dass zu deren Einlagerung in einem Endlager im Salz die gleiche Einbringtechnik verwendet werden kann.

Konditionierte mittelradioaktive Abfälle, die aus der Wiederaufarbeitung in Großbritannien stammen, sind in Edelstahlfässern von 0,56 m³ Volumen verpackt. Diese können entweder in Bohrlöchern oder in Strecken gelagert werden.

3. Die rund 910.000 Tennisball-großen BE-Kugeln, die aus dem Betrieb der stillgelegten Reaktoren AVR und THTR stammen, sind derzeit in 457 Behältern vom Typ CASTOR-THTR mit einem Brutto-Volumen von je 4,2 m³ verpackt. Im Brennelemente-Zwischenlager Ahaus lagern 305 dieser Behälter, im Forschungszentrum Jülich 152. Ob diese Behälter auch direkt in ein Endlager eingelagert werden können, bleibt einer noch ausstehenden Prüfung vorbehalten.

4. Bestrahlte LWR-Brennelemente: Für die Endlagerung dieser Brennelemente sind zwei Verpackungsarten erprobt bzw. entwickelt worden. Die Erstere umfasst die Verpackung von gezogenen Brennstäben in speziell für die Endlagerung konzipierte POLLUX-Behälter. Zur Beladung von POLLUX-Behältern mit einem Bruttovolumen von $10,2 \text{ m}^3$ (Länge 5.517 mm, Durchmesser 1.560 mm) und einem Bruttogewicht von 65 Mg ist der Betrieb einer entsprechenden Konditionierungsanlage erforderlich. Ein POLLUX-Behälter kann 5,5 Mg Schwermetall aufnehmen, was den Brennstäben von 10 DWR-BE oder 30 SWR-BE entspricht. Als Einbringtechnik für POLLUX-Behälter in einem Endlager im Salz ist die Streckenlagerung entwickelt und erprobt worden.

Als Alternative zu diesem Großbehälter ist der sogenannte Brennstabkanister BSK 3 (auch als Endlagerbüchse ELB 3 bezeichnet) konzipiert worden. In zwei von ihnen können die Brennstäbe von drei DWR-BE oder von neun SWR-BE verpackt werden. Auch für die Beladung des BSK 3 ist der Betrieb einer entsprechenden Konditionierungsanlage erforderlich. Der Durchmesser eines BSK 3 von 430 mm ist identisch mit dem einer HAW-Glaskokille, so dass für sein Einbringen in tiefe Bohrlöcher im Salz die gleiche Einlagerungstechnik wie für HAW-Kokillen verwendet werden kann.

5. Die 951 bestrahlten Brennelemente mit 2,3 Mg Schwermetall des stillgelegten Forschungsreaktors Rossendorf (RFR) sind vom VKTA in 18 Behälter des Typs CASTOR-MTR 2 mit einem Bruttovolumen von je $2,7 \text{ m}^3$ verpackt worden und lagern derzeit am Standort Rossendorf.

Die Brennelemente des Forschungsreaktors München II (FRM-II) sollen in Behälter des gleichen Typs verpackt werden.

Die resultierende Anzahl von 58 CASTOR-MTR 2-Behältern (18 aus Rossendorf, 40 aus München) machen ein Gesamt-Einlagerungsvolumen von 157 m^3 aus.

Aus der Summe der erläuterten Gebindevolumina und deren Anzahl resultiert das Gesamtvolumen von ca. 24.000 m^3 an wärmeentwickelnden Abfällen.

Wärmeentwickelnde Abfälle stellen aufgrund der von ihnen ausgehenden Strahlung und Wärme 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 dem der 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 innerer 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 und an die Abfallbinde ist sowohl bei wärmeentwickelnden Abfällen als auch bei Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit einer Gasbildung durch Korrosion der Abfallbehälter zu rechnen.

2.1.3 Einrichtung eines Endlagers in Deutschland bis 2030

Für die Verfahrensentwicklung hat das BMU die folgenden Vorgaben gemacht:

- 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.

Der AkEnd unterstreicht die Vorgabe des BMU, dass die Endlagerung in Deutschland prioritär verfolgt werden soll. Daher hat sich der AkEnd bei der Verfahrens-

entwicklung auf die Gegebenheiten, Kenntnisse und Daten in Deutschland gestützt und ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte in Deutschland entwickelt.

Das Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2030 ein betriebsbereites Endlager zur Verfügung zu haben, hält der AkEnd für ambitioniert angesichts der Aufgaben, die es in diesem Zeitraum zu bewältigen gilt. Gleichwohl ist er der Meinung, dass das Auswahlverfahren so angelegt ist, dass die Auswahl von Standorten für die untertägige Erkundung bis zum Jahr 2010 erfolgen kann. Dies macht jedoch die zügige Legitimierung und Durchführung des Auswahlverfahrens erforderlich.

Die Vorgaben der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sowie die Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in einem Endlager und die Alternativen der Entsorgung werden in den folgenden Kapiteln eingehend diskutiert.

2.1.4 Endlagerung in tiefen geologischen Formationen

Als wichtige Vorgabe für die Arbeit des AkEnd wurde vom BMU festgelegt, dass in Deutschland alle Arten von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden sollen. Die Endlagerung an einem mit Sorgfalt ausgesuchten und untersuchten Standort in tiefen geologischen Formationen soll gewährleisten, dass die Abfälle für sehr lange Zeiträume von der Biosphäre isoliert werden. Die Endlagerung der Abfälle soll wartungsfrei und mit geringem Aufwand an Kontrolle sichergestellt werden. Wegen der Tiefe und des damit großen Abstands der endgelagerten Abfälle zur Biosphäre können gesellschaftliche Veränderungen, Änderungen der oberflächennahen Nutzung des Standortes oder klimatische Veränderungen die Isolation der Abfälle nicht gefährden. Somit fallen nach Einrichtung und Verschluss des Endlagers für nachfolgende Generationen keine unzumutbaren Lasten an.

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 Endlager in geologischen Formationen in Schweden und Finnland für schwach- und mittelradioaktive Abfälle und in den USA für langlebige transuranhaltige Abfälle. IAEO und OECD/NEA haben auf der Grundlage internationalen Expertenwissens Grundsätze für Planung und Sicherheit dieses Entsorgungsweges erarbeitet.

Die Frage nach Alternativen zur Endlagerung wurde in Gesprächen des AkEnd mit der Öffentlichkeit häufig behandelt. Ethisch begründete Prinzipien, wie die Forderung nach dem Offenhalten von Handlungsspielräumen für künftige Generationen, aber auch Fragen der Ressourcenschonung spielten dabei eine wichtige Rolle. Der AkEnd hat deshalb eine Bewertung der international am meisten diskutierten Alternativen vorgenommen:

- Langfristige Zwischenlagerung oder rückholbare Endlagerung der radioaktiven Abfälle
- Abtrennung und Umwandlung (Transmutation) langlebiger und hochtoxischer Radionuklide in weniger toxische und möglichst kurzlebige Radionuklide

Bei der langfristigen Zwischenlagerung und der rückholbaren Endlagerung müsste die (Langzeit-)Sicherheit durch eine langfristige gesellschaftliche Kontrolle gewährleistet werden. Voraussetzungen dafür sind der Weiterbestand der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Möglichkeiten bzw. der Fähigkeiten der Gesellschaft sowie ihr Wille, die Kontrollen und notwendigen Maßnahmen vorzunehmen. Davon kann – wie andere Beispiele aus der Vergangenheit zeigen – nicht ausgegangen werden. Zudem birgt die Prognose der längerfristigen gesellschaftlichen Entwicklung erheblich größere Unsicherheiten in sich als die Prognose der Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere als passiv wirkendes Sicherheitssystem des verfüllten und verschlossenen Endlagers.

Im Übrigen setzt auch die Forderung nach Offenhalten von Handlungsspielräumen für künftige Generationen den Weiterbestand der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Fähigkeiten und den Willen der Gesellschaft voraus. Treten in der Zukunft gesellschaftliche Verwerfungen, wie z. B. Kriege o. ä., mit negativen Auswirkungen

auf die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Möglichkeiten auf, dann führt das Offenhalten der Handlungsspielräume genau zum Gegenteil: Künftige Generationen sind nicht mehr in der Lage, sich um die Abfälle zu kümmern, mit der Konsequenz, dass die Sicherheit bedroht und die Handlungsfreiheit eingeschränkt ist. Außerdem wird durch die Verlagerung der endgültigen Entscheidung auf zukünftige Generationen auch das Verursacherprinzip verletzt.

Für die zweite Alternative, die Abtrennung und Umwandlung von Radionukliden, müssen chemische und kerntechnische Anlagen betrieben werden, deren Risiken auch unter Berücksichtigung der Proliferation (Weiterverbreitung von spaltbarem radioaktiven Material) durchaus höher liegen als das Risiko, das langfristig von einem Endlager ausgeht. Ökonomisch sinnvoll lässt sich dieser Entsorgungsweg allenfalls verfolgen, wenn eine eigens auf Abtrennung und Umwandlung der Radionuklide ausgerichtete Kernindustrie betrieben wird. Dies läuft dem Ausstiegsgedanken des Atomgesetzes zuwider. Außerdem ist eine hundertprozentige Umwandlung aller Radionuklide nicht möglich. Ein verbleibender Rest muss auf jeden Fall als langlebiger radioaktiver Abfall endgelagert werden. Die Umwandlung stellt somit keine echte Alternative dar.

Aus diesen Gründen sieht der AkEnd für eine langfristig sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle keine Alternative zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Ihr grundsätzlicher Vorteil ist aus Sicht des AkEnd, dass bestimmte Gesteinsformationen aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften und des Gebirgsbaus nur geringe Durchlässigkeiten gegenüber wässrigen 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 Jahren von der Biosphäre fernhalten können. Voraussetzung ist allerdings die Identifizierung entsprechend geeigneter Gebirgsbereiche, z. B. mittels eines kriteriengesteuerten Standortauswahlverfahrens und geeigneter Standortuntersuchungsverfahren.

Dem Konzept der Isolation in tiefen geologischen Formationen 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 Lebensraum des Menschen entfernt werden. Aus Kostengründen ist diese Konzeptalternative 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 IAEO erlaubt war, findet seit 1983 auf der Grundlage eines freiwilligen Moratoriums und seit 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 Radionuklidverbreitung - 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. Es stehen jedoch keine erprobten Techniken für die Erschließung eines solchen Endlagers und die Abfalleinlagerung zur Verfügung. Eine solche Option würde 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 1.000 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 Abfälle 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 oder terroristischen Zwecken zu unterbinden. Das impliziert eine 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,
- ein gutes langfristiges Isolationsvermögen für Radionuklide,

- die Extrapolierbarkeit der Entwicklung eines Endlagers über lange Zeiträume auf Grund der nachweislich langsamen Veränderungen der Geologie in der Vergangenheit,
- nach Verschluss und Verfüllung eines Endlagers prinzipiell keine Notwendigkeit von Reparatur- und Überwachungsmaßnahmen und
- eine geringe Beeinflussbarkeit der Sicherheit durch menschliche Einwirkungen.

Damit kann eine Strahlenexposition für Mensch und Umwelt durch die endgelagerten Abfälle für lange Zeiträume ausgeschlossen werden. Menschliches Eindringen in ein verschlossenes Endlager in tiefen geologischen Formationen im Kriegsfall oder durch Terrorismus ist in hohem Maße unwahrscheinlich. Das langfristige Verhalten tiefer geologischer Formationen lässt sich besser prognostizieren als die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft.

Nachteil der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist, 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 praktisch nicht mehr möglich.

Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an das Verfahren zur Standortauswahl, an den 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.

2.1.5 Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes

Als zweite politische Randbedingung für die Verfahrensentwicklung hat das BMU neben der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in Deutschland vorgegeben, dass ein Endlager für alle Arten und Mengen radioaktiver Abfälle ausreicht. Der AkEnd hat geprüft, welche besonderen Aspekte sich daraus für die Entwicklung bzw. Durchführung des Such- und Auswahlverfahrens für einen Endlagerstandort ergeben können. Dabei hat sich der AkEnd auf technisch-wissenschaftliche Beurteilungsfelder konzentriert.

Der AkEnd kommt zu dem Schluss, dass das vorgeschlagene Auswahlverfahren grundsätzlich für die Suche nach einem Endlagerstandort für alle radioaktiven Abfälle ebenso anwendbar ist wie für die Suche nach einem Endlagerstandort für einen Teil der radioaktiven Abfälle.

Das vorgegebene Endlagerkonzept kann allerdings einen Einfluss auf Bedeutung und Gewichtung einzelner Kriterien haben, die bei der Standortsuche und -auswahl anzuwenden sind. Ferner können sich besondere Standortanforderungen, z. B. hinsichtlich der flächenmäßigen Endlagergröße, ergeben. Somit ist denkbar, dass je nach Endlagerkonzeption unterschiedliche Standorte mit Hilfe des Such- und Auswahlverfahrens identifiziert werden. Aus Sicht des AkEnd ist es daher notwendig, vor Anwendung des Verfahrens festzulegen, für welche Arten und Mengen von Abfällen ein Standort gesucht wird. Generell gilt, dass bei der Endlagerung aller Abfälle an einem Standort alle aus verschiedenen Abfallarten resultierenden Anforderungen zugleich erfüllt sein müssen. Von daher ist zu erwarten, dass die Anzahl potenziell geeigneter Standorte für alle Abfälle kleiner ist als die Anzahl potenziell geeigneter Standorte für Teile der Abfälle.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes auf das Auswahlverfahren durch den AkEnd [AkEnd 2002] standen von den identifizierten technisch-wissenschaftlichen Beurteilungsfeldern die entsorgungskonzeptionellen Aspekte, die Langzeitsicherheit des Endlagers und das Verfahren zum Nachweis der Langzeitsicherheit im Vordergrund. Unter dem Gesichtspunkt Langzeitsicherheit hat sich der AkEnd vor allem mit sicherheitstechnischen Folgen des Wärmeeintrags, der

Gasbildung und der chemischen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Abfallarten auseinander gesetzt.

Vor diesem Hintergrund ist der AkEnd zu folgenden Schlussfolgerungen gekommen:

- Die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten, insbesondere von HAW/BE und LAW/MAW, ist unter Sicherheits- und Nachweisaspekten unerlässlich.
- Diese räumliche Trennung verschiedener Abfallarten ist beim Ein-Endlager-Konzept mit größeren Anstrengungen verbunden als bei einer Aufteilung der verschiedenen Abfallarten auf z. B. zwei Endlager.
- Beim Ein-Endlager-Konzept ist der Langzeitsicherheitsnachweis unter Umständen schwieriger zu führen als bei einer Aufteilung der Abfälle auf z. B. zwei Endlager.
- Wahrscheinlich ist beim Ein-Endlager-Konzept die Identifizierung von günstigen geologischen Gesamtsituationen/Standorten, die alle Anforderungen optimal erfüllen, schwieriger und die Anzahl entsprechender Regionen/Standorte eingeschränkt.

Im Hinblick auf die sicherheitstechnisch als besonders bedeutsam angesehene Gasentwicklung ergeben sich aus der Forderung nach langzeitiger Isolation der Abfälle gegenüber dem Transport mit dem Grundwasser einerseits und der Vermeidung kritischer Gasdrücke im Endlager andererseits z. T. schwierig miteinander vereinbare Anforderungen an die geologischen Standortverhältnisse. Dieses Problem ist durch die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten allein nicht lösbar und erfordert ggf. technische Maßnahmen.

2.1.6 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 die Zeiträume der radiotoxischen Wirksamkeit und die Halbwertszeiten der Radionuklide im jeweiligen 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 aufweisen. 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. Die Natur zeigt, dass eine Reihe von Uranerzvorkommen über geologische Zeiträume hinweg von Gesteinen eingeschlossen werden, ohne dass es zu nachteiligen Auswirkungen auf die Biosphäre kommt.

Im Hinblick auf die Anforderung der Isolation radioaktiver Abfälle von der Biosphäre ist festzustellen, 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. Begründete Prognosen der zukünftigen Entwicklung solcher Gesteinsformationen und ihrer Eigenschaften können nur unter Würdigung der geologischen Situation und ihrer geologischen Vergangenheit abgeleitet werden. Dabei ist der Prognosezeitraum eng verknüpft mit der Kenntnis über die geologische Entwicklung in der Vergangenheit. Lässt sich die Entwicklungsgeschichte eines solchen geologischen Systems über viele Millionen von Jahren zurückverfolgen und wissenschaftlich interpretieren und sind darüber hinaus bei diesem geologischen System keine wesentlichen Veränderungen der sicherheitsrelevanten Merkmale zu verzeichnen, so können Prognosen über die zukünftigen Entwicklungen in der Größenordnung von einer Million Jahren begründet werden. Dies trifft für weite Gebiete Deutschlands zu.

Der AkEnd ist der Auffassung, dass nach wissenschaftlichen Erkenntnissen 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 Jahren erstellt werden können. Diese sind Voraussetzung,

um im späteren Genehmigungsverfahren die Langzeitsicherheit eines Endlagers nachweisen zu können.

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

2.1.7 Rückholbarkeit

Unter Rückholbarkeit wird die Möglichkeit verstanden, eingelagerte Abfälle im Bedarfsfall planmäßig und ohne sehr großen technischen Aufwand aus einem Endlager zurückzuholen. Die Rückholung radioaktiver Abfälle wird international diskutiert. Im Vordergrund steht die Rückholung abgebrannter Brennelemente. Für die Rückholbarkeit werden im Wesentlichen sicherheitsbezogene, ethische und ökonomische Argumente angeführt. Diese Argumente, insbesondere die sicherheitsbezogenen und ethischen, sind umstritten.

Bei allen heute international diskutierten Plänen zur Rückholbarkeit wird letztlich auch 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. Als 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 jeweils angepasste 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 AkEnd 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 im Einklang steht:

- Bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens steht die geologische Barriere im Vordergrund (siehe Kapitel 2.1.9).
- Mit dem Auswahlverfahren sollen Gebiete, Regionen und Standorte mit im Hinblick auf die Langzeitsicherheit besonders günstigen geologischen Gesamtsituationen identifiziert werden.

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

Soll die erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle möglich sein, wird der passiv sichere Zustand des Endlagers erst deutlich später erreicht. Bis dahin sind aktive Sicherheitsbeiträge in Form umfangreicher Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen erforderlich, deren Durchführung kaum mit der erforderlichen Zuverlässigkeit garantiert werden kann. Sie erfordern zudem stabile gesellschaftliche und ökonomische Verhältnisse, die gleichfalls für die langen Zeiträume der Rückholbarkeit nicht garantiert werden können.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die im Hinblick auf Langzeitsicherheit bzw. Rückholbarkeit günstigen Gesteinseigenschaften nicht identisch sind. So sind beispielsweise Gesteinstypen, die aufgrund ihres Verformungsverhaltens die Offenhaltung von Einlagerungsräumen begünstigen, hinsichtlich des angestrebten vollständigen und möglichst dichten Einschlusses der Abfälle weniger günstig zu bewerten. Deshalb kann die frühe Berücksichtigung von Rückholbarkeit bei der

Standortauswahl zur Konzentration auf Gebiete, Regionen oder Standorte mit weniger günstigen geologischen Gesamtsituationen führen. Dies ist aus Sicherheitsgründen nicht erwünscht.

Aus diesen Gründen sieht der AkEnd keinen Anlass, die Rückholbarkeit von Abfällen aus dem Endlager bei der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen. Er verfolgt vielmehr einen konsequent sicherheitsbezogenen Ansatz durch Konzentration auf ein Endlagersystem mit allein passiver Sicherheit und Betonung der Langzeitsicherheit bei der Standortwahl.

Auch die für Rückholbarkeit angeführten ethischen Prinzipien, insbesondere die angestrebte Handlungsfreiheit zukünftiger Generationen, können nicht überzeugen. Aus Sicht des AkEnd ist es nicht hinnehmbar, die Erfüllung eines ethischen Prinzips anzustreben, wenn genau dies zwangsläufig zu Sicherheitseinbußen führt. Vielmehr stellt der Schutz gegenwärtiger und künftiger Generationen gleichfalls eine fundamentale ethische Anforderung dar. Dieser Schutz hat sogar oberste Priorität, denn ohne Sicherheit sind alle anderen Gesichtspunkte weitgehend bedeutungslos.

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 bei Bedarf derjenige mit Vorteilen für die Rückholbarkeit ausgewählt werden.

2.1.8 Mögliche Endlagerkonzepte in geologischen Formationen

In Europa, den USA, 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. Dabei ist die geologische Situation in dem entsprechenden Land von ausschlaggebender Bedeutung. In Deutschland und in den USA sind bereits Erfahrungen mit der Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle im Salzgestein gemacht worden. In Frank-

reich, der Schweiz und Belgien haben Tonsteine bzw. Tone hohe Priorität, während in Schweden und Finnland Kristallingesteine als Endlagergestein vorgesehen sind.

Entscheidend für die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist das Isolationspotenzial des Gesamtsystems, bestehend aus der jeweiligen Endlagerformation sowie den darauf abgestimmten technischen und geotechnischen Barrieren, die u. a. für den langfristig wirksamen Verschluss von Einlagerungshohlräumen und Schächten von Bedeutung sind.

Die Endlagerkonzepte werden von Strahlenschutzaspekten und technischen Anforderungen bestimmt, die sich aus der Radiotoxizität und aus der Langlebigkeit der zu beseitigenden Abfälle und z. T. aus deren Wärmeleistung ableiten. Darüber hinaus sind die Erfahrungen, die im Bergbau, Tunnelbau und bei der Untergrundspeicherung von Kohlenwasserstoffen gesammelt wurden, für die Endlagerplanungen wesentlich. Das gilt insbesondere für saline Formationen, in denen seit Mitte des 19. Jahrhunderts intensiv Bergbau zur Gewinnung von Kalisalzen stattfindet. Dazu kommt, dass in Deutschland mehrere Untertagedeponien für 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.

Für konditionierte, feste radioaktive Abfälle kommen als konkrete Optionen nur die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern, in Salzkavernen oder in Bergwerken in Betracht (siehe Abbildung 2.1). Der Nachteil von tiefen Bohrlöchern und Kavernen ist, dass sie nicht zugänglich sind und nur von über Tage mit Abfällen befüllt werden können. Dadurch wird die Einlagerung unter kontrollierten Bedingungen erheblich erschwert, wenn nicht praktisch unmöglich.

Das Bergwerkskonzept wird derzeit von allen auf diesem Gebiet arbeitenden Ländern favorisiert. Vorteilhaft ist die bedarfsgerechte Bergwerksplanung mit der Möglichkeit einer genauen Erkundung aller wichtigen geologischen Parameter und des Einsatzes zusätzlicher geotechnischer Barrieren. 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 Ermittlung der resultierenden Konsequenzen für Mensch und Umwelt sowie die Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises notwendig.

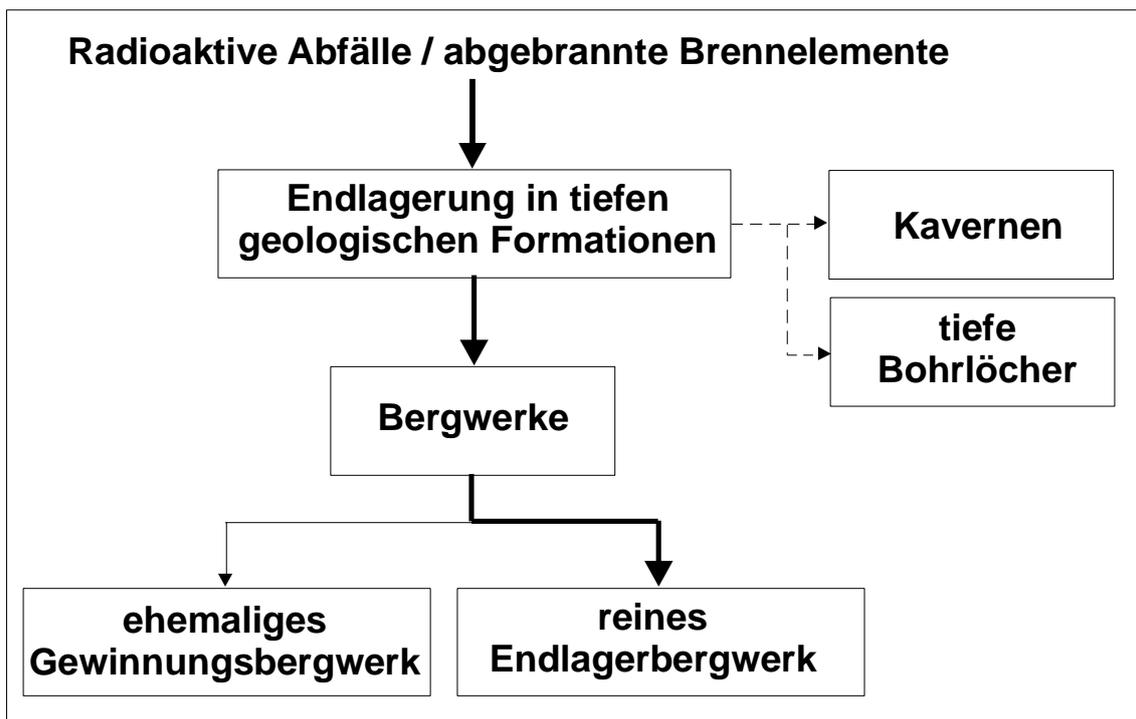


Abbildung 2.1: Bergtechnische Möglichkeiten und Konzepte der Endlagerung in tiefen Gesteinsformationen

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. Auf internationaler Ebene wird die Entwicklung von Endlagertechniken für Granit und Tonsteine sowie für Tuffgestein (in den USA) kontinuierlich vorangetrieben.

2.1.9 Relative Bedeutung geologischer und technischer Barrieren

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle wird zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit weltweit das Mehrbarrierenprinzip angewandt. Ziel der mehrfachen Barrieren ist die wirkungsvolle 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 der technischen Barrieren. Die zeitliche Wirksamkeit technischer Barrieren ist vornehmlich von den geologischen Verhältnissen abhängig, und auch umgekehrt ergänzt eine Endlagerkonzeption mit technischen Barrieren eine günstige geologische Gesamtsituation. Beispiel dafür ist das Konzept der Endlagerung abgebrannter Brennelemente im klüftigen Festgestein (z. B. Kristallin). Hier kompensieren die sehr aufwändigen technischen Barrieren, z. B. Kupferbehälter und Bentonit-Versatz, den Nachteil der Wasserführung einzelner Gebirgsbereiche. Auf der anderen Seite setzen die Funktionstüchtigkeit und die Wirksamkeit dieser technischen Barrieren ein geologisches Umfeld mit stabilen hydrochemischen Bedingungen voraus. In Kontakt mit Salzlösungen stellt dagegen ein Kupferbehälter keine langfristig wirksame Barriere dar.

Für die Entwicklung eines Standortauswahlverfahrens ist es wichtig, 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 beiden Alternativen und bei der Einschätzung der Bedeutung der Barrieren hat der AkEnd der Langzeitsicherheit ein besonderes Gewicht zugemessen. Daher ist der AkEnd der Auffassung, dass im Auswahlverfahren zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation gesucht werden soll. Die in die Abwägung beider Alternativen einfließenden Vor- und Nachteile sind im Folgenden zusammengestellt.

Bei einer auf einer günstigen geologischen Gesamtsituation basierenden Endlagerkonzeption übernimmt das geologische Umfeld den Hauptteil der Barrierewirkung. Die technischen Barrieren fungieren in diesem Fall als Ergänzung.

Vorteil aus Sicht des langzeitsicheren Einschlusses ist, dass sich diese geologischen Strukturen vielfach über sehr lange Zeiträume gebildet und erhalten haben. Unter günstigen Verhältnissen ist in ihnen der grundwassergebundene Stofftransport besonders im tiefen Untergrund stark begrenzt und läuft im Allgemeinen nur sehr langsam ab. Es ist davon auszugehen, dass Veränderungen im geologischen Barriersystem ebenfalls durch eine für die Langzeitsicherheit des Endlagers wichtige extreme Verzögerung gekennzeichnet sind. Diese Prozesse füllen Zeitskalen von Millionen Jahren und können für ähnlich lange Zeiträume in der Zukunft prognostiziert werden.

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

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. Damit liegt die Hauptlast des Barriersystems auf den vorteilhaften Eigenschaften von Gesteinsformationen und günstigen geologischen Strukturen.

Bei der Betrachtung der Langzeitsicherheit kann das zukünftige Verhalten geologischer Strukturen und Formationen anhand nachvollziehbarer geologischer Abläufe in der Vergangenheit abgeschätzt werden. Die Prognose der Verhältnisse in einer Endlagerregion kann sich in einem solchen Fall auf eine bekannte oder ermittelbare geologische Historie stützen. Dabei liefern natürliche Analoga als Indikatoren wichtige Erkenntnisse über unterschiedliche geologische Prozesse (siehe Kapitel 2.2.4).

Die Darstellung relevanter natürlicher Analoga trägt einerseits zur Nachvollziehbarkeit der Sicherheitskriterien bei und ist andererseits als integrativer Bestandteil

der Sicherheitsbetrachtung und einer fortschreitenden Vertrauensbildung zu sehen. Gerade die sehr langen Zeiträume, in denen die Prozesse in der Natur ablaufen und die für die Prognose der Endlagersicherheit herangezogen werden, sind für die Öffentlichkeit nur schwer zu erfassen. Unter Zuhilfenahme von natürlichen Analoga als „geowissenschaftlichen Demonstrationsobjekten“ können Unsicherheiten bei der Beurteilung eines sicheren Endlagers relativiert und das Verständnis der Öffentlichkeit gesteigert werden.

Nachteilig ist bei dieser Konzeptalternative (geologische Barriere), dass geologische Formationen und Strukturen sehr heterogen aufgebaut sein können. Ihre Beurteilung setzt daher ein gutes Verständnis der komplexen Zusammenhänge, die die Qualität der geologischen Barriere bestimmen, voraus. Das bedeutet für die Standorterkundung und für die Ermittlung der Datengrundlage für den Langzeitsicherheitsnachweis, dass z. T. aufwändige Messverfahren zur Erfassung der geologischen Situation eingesetzt werden müssen.

Die geologischen Verhältnisse mit ihrer langfristigen Entwicklung können grundsätzlich nicht verändert werden. Es ist folglich auch nicht möglich, die geologische Situation als solche zu verbessern. Bekannte Defizite müssen in Kauf genommen werden, wenn sie nicht zum Entscheid gegen den Standort führen.

Ein Endlagerbergwerk, dessen Sicherheitsnachweis im Wesentlichen auf geologischen Barrieren aufbaut, muss in jedem Fall mit einem geotechnischen Bauwerk, dem Schachtverschluss, verschlossen werden.

Bei der zweiten Konzeptalternative bilden die technischen Barrieren den Kern des Sicherheitskonzepts (siehe Abbildung 2.2). Die Wirtsgesteinsformationen bilden nur das langzeitstabile "Gerüst" für den Einbau und die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren.

Vorteil dieser Konzeption ist, dass technische Materialien (z. B. die Kupferummantelung der Abfallbehälter) den Sicherheitsanforderungen entsprechend herstellbar sind. Ihre Zusammensetzung (z. B. Industrie-Bentonit als Versatzmaterial) ist normierbar, d. h. sie ist mit geringen Schwankungsgrenzen einstellbar. Eine modellmäßige Beschreibung des Materialverhaltens ist somit leichter möglich als dies bei

natürlichen Materialien, deren Eigenschaften eine größere Schwankungsbreite aufweisen, der Fall ist (z. B. tonige Gesteine).

Nachteil dieser Konzeptalternative ist, dass für den Nachweis ihrer Robustheit z. T. erhebliche Forschungsarbeiten erforderlich sind. Die Einschätzung der Leistungsfähigkeit technischer Barrieren ist somit an den aktuellen Stand der Materialforschung gebunden und beruht z. T. auf nur wenigen Erfahrungen bezüglich des Langzeitverhaltens der Materialien. Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften technischer Barrieren sind daher (wenn überhaupt) nur schwer über Zeiträume in der Größenordnung von einer Million Jahren extrapolierbar.

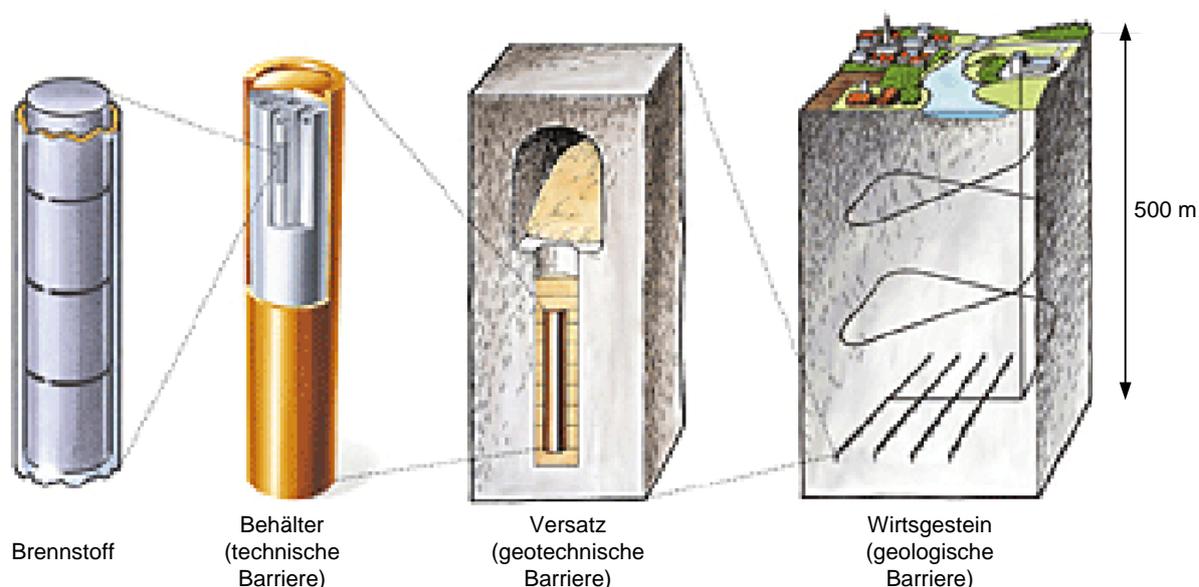


Abbildung 2.2: Technische Barrieren werden dort bevorzugt eingesetzt, wo die Geologie den sicheren Einschluss nicht allein gewährleisten kann (Beispiel Kristallin in Schweden; SKB)

Generell gilt, dass nur ein vollständiges und abgestimmtes Barrierensystem den Einschluss der Schadstoffe im Endlager dauerhaft gewährleisten kann. Unter Abwägung der dargestellten Vor- und Nachteile ist der AkEnd zu der Einschätzung gekommen, dass die geologischen Barrieren und der Schachtverschluss im Hinblick auf die Langzeitsicherheit die Hauptlast tragen sollen. Technische Barrieren können ergänzende Funktionen übernehmen und zusätzliche Sicherheit bieten. Auch ist es

leichter, technische Barrieren an die geologischen Verhältnisse anzupassen als für diese nach einer passenden Geologie zu suchen.

Der AkEnd hat sich deshalb im Hinblick auf das zu entwickelnde Auswahlverfahren dafür entschieden, dass zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation zu suchen ist, deren Barrierewirkung durch angepasste technische Barrieren ergänzt werden kann.

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

2.2 Internationale Vorgehensweisen und Erfahrungen

Zum Auftrag des AkEnd gehörte es, bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens die Vorgehensweisen und Erfahrungen anderer Länder zu berücksichtigen. Der AkEnd hat sich daher intensiv mit der Entwicklung und Umsetzung von Auswahlverfahren für Endlagerstandorte im Ausland beschäftigt. Er hat dazu Studien erarbeiten lassen und den direkten Erfahrungsaustausch mit verantwortlichen Institutionen und Personen gesucht, insbesondere in solchen Ländern, in denen in den letzten Jahren interessante Entwicklungen bei der Standortsuche stattgefunden haben.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten und die daraus für den AkEnd resultierenden Konsequenzen sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Dabei wird nach der generellen Vorgehensweise bei der Standortwahl, den angewendeten Kriterien, der Öffentlichkeitsbeteiligung und der Einbeziehung von Langzeitsicherheitsnachweisen in Auswahlverfahren differenziert. 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.

2.2.1 Internationale Vorgehensweise bei der Auswahl von Endlagerstandorten

Trotz Übereinstimmung der generellen Zielsetzung von Auswahlverfahren, nämlich langfristig sichere Standorte für die Endlagerung der in den verschiedenen Ländern anfallenden radioaktiven Abfälle zu finden, werden zur Erreichung dieses Ziels im Detail durchaus unterschiedliche Ansätze verfolgt. Daraus resultieren mehr oder weniger auch deutliche Unterschiede im konkreten Vorgehen bei der Standortauswahl, die u. a. folgende Ursachen haben

- 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 Ländern 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.

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. So sollten in den USA z. B. ursprünglich verschiedene Wirtsgesteinstypen im Zuge der Standortwahl miteinander verglichen werden, während in Deutschland bereits vor Beginn des Auswahlverfahrens eine Festlegung auf das Wirtsgestein Steinsalz (und

zwar in Salzstöcken) erfolgt ist. Für den Verfahrensablauf bestimmend war neben solchen Vorfestlegungen auch die Verfügbarkeit geowissenschaftlicher Informationen bzw. die Notwendigkeit, diese vor bestimmten Entscheidungen erheben zu müssen. Besonders bedeutsam waren und sind daneben auch die nationalen rechtlichen bzw. verwaltungsbezogenen Vorgaben für das Auswahlverfahren, etwa die formale Beteiligung bestimmter Institutionen oder Gebietskörperschaften.

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

Die negativen Erfahrungen mit Auswahlverfahren sowie die in den letzten Jahrzehnten eingetretenen gesellschaftlichen Entwicklungen haben in vielen Ländern zu mehr Öffentlichkeitsbeteiligung geführt. Die Standortauswahl wird nicht mehr nur als technisch-wissenschaftlicher Vorgang gesehen, sondern bedarf der Berücksichtigung bestimmter gesellschaftlicher Rahmenbedingungen und der demokratischen Legitimation.

International gelten heute Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Verfahrens sowie Akzeptanz des Ergebnisses als wichtige Voraussetzungen für erfolgreiche Standortauswahlverfahren. Diese müssen folgende gesellschaftlichen und methodischen Mindestanforderungen erfüllen:

- schrittweises Vorgehen, klare Verfahrensstruktur mit eindeutigen Arbeits- und Entscheidungsschritten sowie ein gestuftes Genehmigungsverfahren,
- Festlegung der Vorgehensweise und Kriterien vor Durchführung des jeweiligen Verfahrensschrittes,

- 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 zuvor genannten Gründe für Verfahrensunterschiede weiterhin Bestand haben.

2.2.2 Internationale Vorgehensweisen bei der Kriterienfestlegung

Kriterien zur Auswahl und Bewertung von Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden bereits von verschiedenen Ländern und auch ländervereinigen Organisationen aufgestellt. So erschien 1994 im Rahmen der "Safety Series" der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) ein umfassender Bericht über Normen, Kriterien und Spezifikationen für Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen [IAEA 1994], der generelle Richtlinien zur Standortauswahl enthält sowie weitere Gesichtspunkte, wie Sicherheit, Machbarkeit, gesellschaftliche, wirtschaftliche und Umwelt-Aspekte darlegt. Zusätzlich zu den IAEO-Richtlinien wurden 1992 internationale Empfehlungen der Europäischen Union publiziert [CEC 1992], die die parallel gültigen Voraussetzungen bezüglich nuklearer Sicherheit, Strahlenschutz, Umweltschutz und gesellschaftspolitischer Aspekte beschreiben.

Die IAEO-Richtlinien werden in nationalen Vorschriften zur Standortauswahl unterschiedlich stark berücksichtigt. Auch der Detaillierungsgrad ist länderbezogen uneinheitlich. Die Mehrzahl der Kriterien dient dazu, die Langzeitsicherheit des geologischen Endlagersystems zu fördern bzw. die Sicherheitsanalysen zu vereinfachen. Ausschlusskriterien gelangen in den nationalen Richtlinien zur Standortauswahl nur sehr beschränkt zur Anwendung. Äquivalente Kriterien, die ggf. zu einem Ausschluss von Gebieten führen könnten, existieren unter Umständen aber bereits in anderen nationalen Richtlinien.

Die Sichtung und Auswertung der internationalen geowissenschaftlichen Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Endlagerstandorten [BORK et al. 2001] ergab folgendes Bild:

Durch die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sollen die radioaktiven Abfälle für einen möglichst langen Zeitraum sicher von der Biosphäre isoliert werden. In den meisten Ländern wird der Langzeitsicherheitsnachweis für einen Zeitraum von mindestens 10.000 Jahren geführt, wobei es auf die Einhaltung der Schutzziele ankommt. Wo gefordert, wird die Isolationswirkung der Endlagerbarrieren bis 1.000.000 Jahre prognostiziert. Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle visieren die meisten Länder eine Isolationszeit von 1.000.000 Jahren an. Diesem Ziel ist schon bei der Kriterienentwicklung Rechnung zu tragen.

Da die grundlegenden Anforderungen weitgehend vergleichbar sind, besteht international Konsens über die geowissenschaftlichen Kriterien, die für die Auswahl eines langfristig sicheren Endlagerstandortes entscheidend sind. Die Geologie, das Wirtsgestein, die Hydrogeologie und die Geochemie der zur Bewertung anstehenden Gesteinskomplexe sollten folgende Anforderungen erfüllen:

- **Geologie**

Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen. Die Tiefenlage des Endlagers soll die Integrität der geologischen Barriere gewährleisten, so dass Erosionsprozesse an der Erdoberfläche auf die Langzeitentwicklung keinen Einfluss haben. Auch extreme klimatische Bedingungen (z. B. Eiszeiten) sollen in der Zukunft 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 Eigen-

schaften 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 die Barrierengesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, dürfen eine nur geringe Permeabilität aufweisen.

- **Geochemie**

Die physikochemischen und geochemischen Eigenschaften der geologischen Barrieren sollen die Radionuklidfreisetzung begrenzen. Das hydrochemische und geochemische Milieu im Endlager soll 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. Es soll die Auflösungsraten der Abfallmatrix und Korrosionsraten des Behältermaterials möglichst gering halten sowie negative 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 für zukünftige Generationen das Risiko menschlichen Eingreifens möglichst gering ist. Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.

2.2.3 Internationale Erfahrungen bei der Öffentlichkeitsbeteiligung

Das internationale Vorgehen hinsichtlich Öffentlichkeitsbeteiligung und diesbezügliche Erfahrungen bei der Standortauswahl von Endlagern wurden in einer Auftragsarbeit zusammengestellt und ausgewertet [LENNARTZ & MUSSEL 2002]. Weitere Informationen bekam der AkEnd auf zwei Reisen in die Schweiz und nach

Schweden. Dabei wurde deutlich, dass in diesen Ländern wichtige Erfahrungen vorhanden sind, die auch in Deutschland bei der Verfahrensentwicklung berücksichtigt werden sollten.

In den meisten Ländern ist das größte Defizit bei der Standortauswahl nach wie vor der Mangel an öffentlicher Unterstützung und die von der Öffentlichkeit wenig akzeptierte Legitimität des Verfahrens. Aber auch explizit auf Bürgerbeteiligung und den Schutz von Minderheiten zielende Vorgehensweisen können scheitern, wie Erfahrungen in Kanada zeigen, wenn das Verfahren im hohen Maße politisiert wird. Die Erfahrungen in Frankreich lehren vor allem, dass ohne eine intensive Beteiligung und Information der Bevölkerung auch Verfahren scheitern können, die zumindest formell auf Freiwilligkeit beruhen.

In den verschiedenen Ländern ist zu beobachten, dass für den Erfolg oder Misserfolg der Standortsuche sehr spezifische, nur in einem Land wirksame rechtliche und politische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen sind. Als Beispiel soll der Bezug zwischen der gesellschaftlichen Bewertung der Kernenergie und der Haltung gegenüber einem Endlager dienen. In Finnland führt die Einbettung der Kernenergie im Kontext nationaler Unabhängigkeit in den Jahren vor 1990 auch heute noch zu einer eher positiven Bewertung der Endlagerung. In Deutschland steht die Frage der Endlagerung dagegen für viele im Kontext der Auseinandersetzung um die Nutzung der Kernenergie. Dies könnte sich allerdings in den nächsten Jahren ändern, da der zeitliche Abstand zu diesen Auseinandersetzungen zunimmt und die jüngere Generation den Zusammenhang nicht mehr herstellt. Auch die Politik des Ausstiegs aus der Kernenergie könnte den politischen Kontext verändern. So muss jedes Verfahren, das der AkEnd vorschlägt, auf die spezifischen Bedingungen in Deutschland Bezug nehmen.

Der in vielen Ländern wahrnehmbare Mangel an öffentlicher Unterstützung der Standortauswahl und die von der Öffentlichkeit wenig akzeptierte Legitimität des Verfahrens sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Bedeutung und die Anforderungen an wirkliche Öffentlichkeitsbeteiligung häufig unterschätzt werden, obwohl deren Notwendigkeit allgemein nicht mehr bestritten wird. Ausnahmen bilden hier vor allem die Schweiz und Schweden sowie in gewissem Maß Finnland. Bei der

Übertragung der internationalen Erfahrungen auf deutsche Verhältnisse ist zu beachten, dass im Gegensatz zu Deutschland in diesen 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 zu Fragen, die das Bergrecht berühren, sind die Stimmbürger in einigen Kantonen an der Entscheidung über die Erkundung eines Endlagerstandortes direkt beteiligt. Dies machte es erforderlich, klare Prüfkriterien für die Beurteilung der Untersuchungsbefunde aus der untertägigen Erkundung des für die Lagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle ins Auge gefassten Standortes Wellenberg (Kanton Nidwalden) zu benennen. Das jüngste kantonale Votum mit der Ablehnung des geplanten Erkundungsstollen zeigt jedoch, dass auch dieser Ansatz nicht unbedingt zielführend ist, wenn er nicht frühzeitig eingeleitet wird.

Inwieweit eine Überwachung des Lagers (Monitoring) über einen längeren Zeitraum für die Zustimmung der Bevölkerung zu einem Endlager bedeutsam ist, lässt sich nach dem Wellenberg-Referendum nicht abschätzen. Das schweizerische Lagerungskonzept sieht vor, die Prognosen zum Verhalten der radioaktiven Abfälle und der technischen Barrieren sowie die Ansätze zu den Radionuklid-Ausbreitungsrechnungen in einem speziellen Teil des geplanten Endlagers zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist es auch erwähnenswert, dass vom Begriff "Endlagerung" Abstand genommen und stattdessen "geologische Tiefenlagerung" gewählt wurde. Dieses Lagerungskonzept erlaubt auch die Möglichkeit der Rückholung von Abfällen. Da auch diese Klarstellung am Ende nicht zum Erfolg geführt hat, liegt die Vermutung nahe, dass andere Aspekte den Ausschlag für das ablehnende Votum gegeben haben, die es noch zu identifizieren und analysieren gilt.

Sowohl in Schweden als auch in der Schweiz wird die Standortprüfung in einem gestuften Verfahren als wichtige Voraussetzung für die spätere Zustimmung der Bevölkerung für ein Lagerungskonzept bzw. einen Endlagerstandort angesehen. In jedem Prüfschritt gibt es eine Debatte über die Einhaltung der Kriterien und die Bewertung des Verfahrens. Eine Vorgehensweise "Schritt für Schritt" ist die

wesentliche Voraussetzung für die Überprüfbarkeit durch die Bürgerinnen und Bürger. Dies kann aber auch, wie in der Schweiz geschehen, zu einer vorzeitigen Beendigung des Verfahrens führen.

Wesentlich für die Partizipation der Bevölkerung sind der Aufbau von Kompetenz und die unabhängige Kontrolle des Prozesses durch die von der Bürgerschaft eingesetzten Experten. Steht beides in einem Dienstleistungsverhältnis zur Bürgerschaft, dann kann sich eine fachlich orientierte und gegenüber populistischen Argumenten resistente Partizipation entwickeln.

In diesem Zusammenhang wird auch klar, dass das Stimmrecht der Bevölkerung bzw. das Prinzip der Freiwilligkeit Grundvoraussetzungen für Beteiligungsbereitschaft sind. Allerdings muss mit einem Spannungsverhältnis zwischen lokalen und regionalen Interessen einerseits und dem nationalen Interesse, ein sicheres Endlager einzurichten und zu betreiben, andererseits gerechnet werden. In Schweden gibt es die gesetzlich verankerte Regelung, im Falle der Unlösbarkeit dieses Konfliktes eine endgültige Entscheidung durch das Parlament herbei zu führen.

Unabhängig von dieser formalen Regelung wurde gerade in Schweden deutlich, dass ein Konsens zur Verantwortung für die Abfallbeseitigung grundlegend für das Verhältnis verschiedener Gruppierungen bei der Auseinandersetzung um das Endlagerkonzept 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 Endlagerung, die Wertentscheidung über verschiedene Positionen hinweg als gemeinsame Basis zu entwickeln.

International wird das Prinzip der freiwilligen Teilnahme der betroffenen Gemeinden an der Standortfindung in unterschiedlichen Formen praktiziert und durch Gesetze, finanzielle und soziale Programme abgestützt. Das Angebot von Geldsummen oder anderen Leistungen an eine Kommune garantiert aber nicht automatisch Mitwirkung und Zustimmung. So zeigt sich, dass es weder eine Garantie für den Erfolg eines bestimmten Verfahrens noch ein übertragbares Verfahren gibt. Vielmehr hängt die Entscheidung für ein Verfahren von den jeweiligen Gegebenheiten ab. Für die

Behandlung grundsätzlicher Fragen und für die notwendigen Lernprozesse braucht das Suchverfahren Zeit. Auch muss es solche Lernprozesse auf allen Seiten ermöglichen können.

Generell lässt sich der Schluss ziehen, dass im Ausland Öffentlichkeitsbeteiligung, Unterstützungsfähigkeit, Flexibilität und Legitimität zentrale Aspekte der Auswahlverfahren sind.

2.2.4 Internationale Erfahrungen zum Langzeitsicherheitsnachweis

International ist der Langzeitsicherheitsnachweis für das mit radioaktiven Abfällen gefüllte und verschlossene Endlager Voraussetzung für dessen Genehmigung. Es ist dabei aufzuzeigen, dass von dem Endlager für sehr lange Zeiträume keine nachteiligen Auswirkungen für Mensch und Umwelt ausgehen. Bezogen auf die langzeitige Isolation der endgelagerten Abfälle sind die Wirksamkeit der geologischen und technischen Barrieren zu bewerten sowie die Folgen eines Versagens der Barrieren abzuschätzen. Wesentliche Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit sind rechnerisch aus dem Endlager resultierende Strahlenexpositionen bzw. Strahlenrisiken.

Zur Unterstützung der Arbeiten des AkEnd hat das BfS einen Auftrag zur Auswertung von internationalen Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen hinsichtlich der Kriterien für die Auswahl der Standorte vergeben [NAGRA et al. 2002]. Dabei wurden folgende Themenschwerpunkte betrachtet:

- Vorteilhafte bzw. nachteilige Eigenschaften der geologischen Gesamtsituationen in Bezug auf eine Standortauswahl
- Vorteilhafte bzw. eingeschränkte Eigenschaften der technischen Barrieren
- Bedeutung der Standorteigenschaften und der technischen Barrieren in Langzeitsicherheitsanalysen

- Einfluss der Standorteigenschaften auf Isolationsvermögen (Einschlusszeitraum) und Höhe der Radionuklidfreisetzung aus dem Endlagersystem

Es wurden insgesamt 18 Sicherheitsanalysen ausgewertet, die in elf verschiedenen Staaten im Laufe der letzten 15 Jahren durchgeführt worden sind, dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und genügend gut dokumentiert sind. Sie betreffen Endlagerstandorte in kristallinen Gesteinen und Sedimentgesteinen (einschließlich Steinsalz) und beziehen sich auf verschiedene Arten radioaktiver Abfälle.

Übergeordnetes Ziel der Langzeitsicherheitsanalyse ist der Nachweis, dass ein vorgeschlagener Standort – zusammen mit der entsprechenden Endlagerauslegung – den vorgeschriebenen Sicherheitsanforderungen (inklusive angemessenen Sicherheitsreserven) genügt. Die Ableitung einer quantitativen Rangfolge für die sicherheitsrelevanten Faktoren eines Standortes, insbesondere der geologischen und hydrogeologischen Situation und anderer Komponenten des Endlagersystems, ist auf der Grundlage der Langzeitsicherheit aber nicht machbar. Dies liegt darin begründet, dass die "Auflösung" (Empfindlichkeit) der Analyse im Allgemeinen zu grob ist, z. B. wegen lückenhaften Prozessverständnisses, Verwendung eines konservativen Modellansatzes mit vereinfachenden Annahmen und/oder unbestimmter Datengrundlage. Diese Einschränkungen gelten ebenso für die Durchführung von vergleichenden Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene Standorte in gleichen Wirtsgesteinstypen und gleicher technischer Auslegung zur Ermittlung der spezifischen sicherheitsrelevanten Faktoren.

Die ausgewerteten Langzeitsicherheitsanalysen dienen im Rahmen der verschiedenen nationalen Endlagerprogramme unterschiedlichen Zielsetzungen. Dabei war es bisher eher die Ausnahme als die Regel, den Sicherheitsanalysen bei der Standortauswahl eine zentrale Bedeutung zuzuordnen. Traditionell sind sie Teil des Eignungsnachweises sowohl für konzeptionelle Planungen eines Endlagers als auch für die sicherheitsbezogene Bewertung von einzelnen Standorten. Im vergleichenden Auswahlverfahren mit nachfolgender Festlegung eines Standortes sind die Sicherheitsanalysen weniger eingesetzt gewesen. Die Ausnahme bilden Schweden (hochradioaktive Abfälle), Finnland (hochradioaktive Abfälle) und die Schweiz

(schwach-/mittelradioaktive Abfälle), bei denen die Ergebnisse der Sicherheitsanalysen insbesondere für die abschließenden Standortfestlegungen eine Rolle gespielt haben bzw. spielen. Darüber hinaus zeigen die Entwicklungen beispielsweise in Japan, Kanada, Frankreich und Spanien, dass der Langzeitsicherheitsanalyse eine zunehmend größere Bedeutung bei der eigentlichen Standortauswahl zukommt.

Die Auswertung der internationalen Langzeitsicherheitsanalysen ergab, dass in allen Projekten das Mehrbarrierensystem, d. h. die Kombination von geologischen und technischen Barrieren, für die Langzeitsicherheit und ihren Nachweis von großer Bedeutung ist. Abhängig vom Wirtsgestein lassen sich folgende Unterschiede feststellen:

- In vielen Studien zur Langzeitsicherheit kristalliner Wirtsgesteine und stark konsolidierter (geklüfteter) 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 Langzeitsicherheitsanalysen hängt in großem Maße von den sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie von Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit des Radionuklidtransports ab.

Unabhängig vom betrachteten Wirtsgestein bewirken die wasserführenden Deck-schichten, besonders aber das Grundwasser oder Oberflächenwasser des Exfiltrationsgebietes (Biosphäre), oft eine Verdünnung der aus dem Endlager freigesetzten Aktivität, was für die Einhaltung der radiologischen Schutzziele wichtig ist.

Insgesamt wird deutlich, dass das System von geologischen und technischen Barrieren als ein Ganzes beurteilt werden muss. Der früher verfolgte vereinfachende Ansatz, in dem die "geologische" Suche nach dem idealen Standort gänzlich losgelöst von den "technischen" Arbeiten der Endlagerauslegung und den "physiko-chemischen" Aspekten der modellmäßigen Sicherheitsbetrachtungen erfolgen kann, ist heute nicht mehr Stand von Wissenschaft und Technik.

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 AkEnd 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.

2.2.5 Schlussfolgerungen für die Arbeit des AkEnd

Aus der Betrachtung des internationalen Vorgehens bei der Standortwahl, der Entwicklung von Kriterien, der Öffentlichkeitsbeteiligung und bei der Anwendung von Sicherheitsanalysen für Kriterienentwicklung und Standortauswahl ergeben sich folgende Schlussfolgerungen, die vom AkEnd bei der Entwicklung des Standortsuch- und –auswahlverfahrens berücksichtigt wurden.

Von Ausnahmen abgesehen ist in anderen Ländern bei der **Standortauswahl** eine Entwicklung hin zu klareren Verfahrensstrukturen mit ausgeprägtem schrittweisen Vorgehen, mit systematischer Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Aspekte – neben den früher dominierenden geowissenschaftlichen Aspekten – und mit frühzeitiger (verbindlicher) Einbindung der Öffentlichkeit bzw. interessierter/betroffener Gruppen und Personen in das Verfahren zu erkennen. Das bezieht sich auch auf den an das Verfahren gekoppelten verwaltungsmäßigen und politischen Entscheidungs-

prozess. Mit dem vom AkEnd verfolgten Ansatz zur Ausgestaltung und seinen Überlegungen zum schrittweisen Ablauf des Verfahrens (siehe Kapitel 3) werden den internationalen Erfahrungen und den aktuellen technisch-wissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Diskussionen Rechnung getragen.

Der internationale Vergleich bestärkt auch das Vorgehen des AkEnd bei der **Kriterienentwicklung**. Der vom AkEnd entwickelte wissenschaftlich-technische Anforderungskatalog an Endlagerstandorte stimmt mit dem heutigen Stand der grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen überein. Mit seinem Vorschlag, quantitative Kriterien zur Identifizierung und vergleichenden Beurteilung „günstiger geologischer Gesamtsituationen“ anzuwenden, geht er teilweise über den internationalen Stand allgemein formulierter Kriterien hinaus.

Im Hinblick auf die **Öffentlichkeitsbeteiligung** hat der AkEnd aus den internationalen Erfahrungen, insbesondere in der Schweiz und in Schweden, wichtige Rückschlüsse für die Verfahrensentwicklung und -umsetzung gezogen. Mindestvoraussetzung für die Transparenz und Überprüfbarkeit des Verfahrens ist eine Vorgehensweise "Schritt für Schritt" mit Debatten über die Einhaltung der Kriterien und der Bewertung des Verfahrensablaufs mit der Öffentlichkeit. Es zeigt sich, dass Transparenz und Offenheit durch die Beteiligung der Bevölkerung an politischen Entscheidungsprozessen gefördert werden. Die Erfahrungen insbesondere in Schweden machen deutlich, dass unabhängig von einzelnen Verfahrensschritten die gründliche Vorbereitung, die ausgiebige Beteiligung der Öffentlichkeit und klare Entscheidungsrechte für die Öffentlichkeit die Erfolgsaussichten bei der Standort-suche deutlich erhöhen. Im Gegensatz dazu verringern sich die Chancen, einen Standort zu finden, bei einem Mangel an Transparenz, bei unfairen Relationen zwischen dem Verfahrensbetreiber und der Bevölkerung, wie z. B. Unterschiede in der fachlichen Kompetenz.

Das Stimmrecht der Bevölkerung bzw. das Prinzip der Beteiligungsbereitschaft sind Grundvoraussetzungen für ein faires Verfahren. 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 AkEnd hat die mit der Öffentlichkeitsbeteiligung verbundenen Probleme erkannt und bei der Entwicklung geeigneter Lösungsansätze sowohl für die Ausgestaltung, Festlegung und Umsetzung des Auswahlverfahrens als auch für den angesprochenen Interessenausgleich beachtet.

Aus der Auswertung verschiedener **Langzeitsicherheitsanalysen** aus anderen Ländern hat der AkEnd folgende übergreifenden Erkenntnisse abgeleitet und bei der Kriterienentwicklung berücksichtigt:

Die Bedeutung geologischer und technischer Barrieren für die Langzeitsicherheit von Endlagern ist abhängig vom Wirtsgestein und von der Endlagerkonzeption, wobei zwischen beiden eine enge Wechselwirkung besteht. Daher müssen bei der Suche nach einer günstigen geologischen Gesamtsituation auch die gesteinstypabhängigen konzeptionellen Endlageraspekte berücksichtigt werden, sobald die diesbezüglichen Standorteigenschaften bekannt sind. Dieser Zusammenhang muss bereits bei der Formulierung der geowissenschaftlichen Auswahl- und Prüfkriterien beachtet werden.

Dazu kommen für den Nachweis der Langzeitsicherheit insbesondere die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der geologischen Barriere und die Parameter, die einen möglichen Radionuklidtransport durch die geologische Barriere bestimmen, für die geeignete Kriterien festzulegen sind.

2.3 Prinzipien der Öffentlichkeitsbeteiligung

Der AkEnd hält es für unerlässlich, dass die Öffentlichkeit in jeder Phase und in jedem Verfahrensschritt aktiv beteiligt wird. Die Vorschläge des AkEnd für die Beteiligung der Bevölkerung werden für die einzelnen Phasen und Schritte in nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Die grundlegenden Prinzipien und Begründungen, die bei der Verfahrensentwicklung leitend waren, werden jedoch schon hier kurz vorgestellt.

- Der Dialog

Alle Beteiligungsformen, die der AkEnd vorschlägt, gehen von der Figur des Dialogs¹ aus. Hierbei geht es nicht darum, über einzelne Veranstaltungen oder Beteiligungsschritte die Akzeptanz eines fertigen Verfahrens zu erhöhen. Es geht zumindest nicht nur darum, die Legitimität von Entscheidungen zu erhöhen. Vielmehr soll es durch den Dialog zu einem Abgleich von Interessen und zu der Herstellung von gemeinsam getragenen Wahrnehmungen und Bewertungen kommen. Der Dialog beinhaltet die Gleichwertigkeit der These und Antithese. Konflikte werden als Motoren zur Gewinnung besserer Einsichten über Unterschiede und Übereinstimmungen in der Sache und ihrer Bewertung verstanden.

- Die Transparenz

Sämtliche Informationen müssen von Beginn an allen zugänglich sein. Alle Kriterien und jeder Verfahrensschritt müssen vor ihrer Umsetzung bekannt sein. Änderungen müssen rechtzeitig kommuniziert werden. Zeitdruck rechtfertigt nicht eine Vernachlässigung der Informationspolitik.

¹ **Dialog:** Kommunikativer Prozess zum Zwecke von Erfahrungs-, Meinungs- und Wissensaustausch, Entscheidungsfindung, Problem- und Konfliktlösung. Dialogverfahren stellen systematisch entwickelte Konzepte und deren Umsetzung dar, die entlang spezifischer Dialogziele, -teilnehmer und -gegenstände gestaltet sind.

- Faire Verteilung der Kompetenz

Die Suche nach einem geeigneten Standort war bislang eine Sache der Natur- und Ingenieurwissenschaften. Ihre Sachkompetenz soll die Eignung potenzieller Standorte für ein Endlager feststellen und eine möglichst hohe Sicherheit der Endlagerung gewährleisten. Bislang war ein Kompetenzgefälle zwischen der Bevölkerung und den Experten vorhanden. Eine Änderung wird auch nicht durch die Ergänzung der Naturwissenschaften durch die Sozialwissenschaft herbeigeführt. Wenn die Kontrolle des Verfahrens und seine Beeinflussung durch die Bürger von Bedeutung sein sollen, müssen die beteiligten Bürgerinnen und Bürger mit einer Kompetenz ausgestattet sein, die sie in eine faire Position gegenüber den Fachleuten setzt.

- Die Beteiligung als Kontrolle

Sehr häufig werden Verfahren erschwert oder scheitern, weil bei einem Teil der Beteiligten der Eindruck entsteht, bestimmte Informationen würden zurückgehalten, hinter bestimmten Entscheidungen stünden andere Gründe als die vorher festgelegten Kriterien, bestimmte Überprüfungen würden nicht so durchgeführt, wie vereinbart, oder Messergebnisse würden verfälscht. Deshalb müssen das Verfahren und die Einhaltung der Kriterien von Anfang an kontrolliert werden. Die Öffentlichkeit hat das Recht, alle Informationen zu erhalten. Nur so kann die Glaubwürdigkeit des Verfahrens entstehen und bestehen bleiben.

- Die Beteiligung als Zukunftsgestaltung

Ein möglicher Standort für ein Endlager kann nicht isoliert von der Entwicklung der potenziellen Standortregion gesehen werden. Ein Endlager kann negative und positive Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung einer Region haben. Um Nachteile und Vorteile, Gefährdungen und Chancen der Entwicklung zu erkennen, wird die Beteiligung der Bevölkerung benötigt. Zukunftskonzepte können nur mit der gestaltenden Beteiligung der Öffentlichkeit entstehen, Bestand haben und die verschiedenen Interessen in einer Region integrieren.

- Beteiligung heißt auch Verantwortung übernehmen

Die Beteiligung an Entscheidungsprozessen heißt auch immer, dass für etwas Verantwortung übernommen wird. Die Bevölkerung kann und soll das Verfahren zur Suche nach einem Endlager mit steuern. Sie soll die Einhaltung der verabredeten Kriterien kontrollieren und die zukünftige Entwicklung einer potenziellen Standortregion mitbestimmen. Das bedeutet, dass es ebenfalls als eine Verpflichtung anzusehen ist, die Gefährdung, die von einer offenen Lagerung hochradioaktiver Stoffe ausgeht, durch eine möglichst sichere Endlagerung zu verringern.

Zivilgesellschaft als Realität und Perspektive

Die Frage, warum die Öffentlichkeit bei der Suche nach einem Endlager aktiv und intensiv beteiligt werden soll, kann einfach beantwortet werden. Bislang sind nicht nur in Deutschland, sondern in den meisten Ländern, in denen nach einem Endlager gesucht wird, alle Versuche, einen Standort zu realisieren, am Widerstand der Bevölkerung gescheitert. In einigen Ländern gibt es inzwischen mehr oder weniger intensive Versuche, die Bevölkerung bei der Suche nach Standorten zu beteiligen, und in zwei Fällen zeichnen sich erste positive Ergebnisse ab. Die Entscheidung des AkEnd kann folglich ganz pragmatisch begründet werden. Die Einbeziehung der Bevölkerung ist höchstwahrscheinlich der einzige Weg, um ein Endlager realisieren zu können, auch wenn dieser Weg aufwändig und schwierig zu sein scheint.

In den letzten Jahrzehnten hat sich neben der repräsentativen und formalisierten Demokratie eine eher informelle und situative Form demokratischer Willensbildung und Interessendurchsetzung herausgebildet.

Auf der einen Seite existiert und funktioniert die institutionalisierte und formalisierte demokratische Struktur: das System von Parlamenten und Regierung, der unabhängigen Rechtssprechung und der intermediären Organisationen, wie Gewerkschaften, Verbände und Lobbyisten, die ihre spezifischen Interessen in Entscheidungsprozesse einfließen lassen. Auf der anderen Seite versuchen jedoch eher informelle bürgerliche Zusammenschlüsse auf allen Ebenen (von Stadtteilen über Regionen bis hin zu globalen Machtzentren), Einfluss auf die Entscheidungen zu nehmen.

Diese Herausbildung bürgerlicher Selbstorganisation hat zumindest in der neueren Geschichte der Demokratien ihre Wurzeln in den sozialen Bewegungen der sechziger und siebziger Jahre, ist aber inzwischen in allen politischen Lagern verbreitet. Sie tendiert dazu, die herkömmlichen Schemata von linken, rechten und liberalen politischen Lagern zu transzendieren. Zugleich stellt sich die bürgerliche Selbstorganisation nicht als Alternative zur repräsentativen Demokratie dar, sondern ist nur durch und auf sie bezogen politisch wirksam. Die Artikulation ihrer Interessen muss durch die Medien aufgenommen werden und wirkt dann über die Wahlen - das heißt auch durch die politischen Parteien und Verbände - auf die Entscheidungen der Parlamente und die Umsetzungen der Exekutive.

Diese zivilgesellschaftliche Entwicklung hat zu neuen Beteiligungsformen geführt. Beteiligung bedeutet nicht mehr, dass die Bevölkerung informiert wird oder dass sie formelle, rechtswirksame Einspruchsmöglichkeiten hat, sondern Beteiligung entwickelt sich zum Konfliktmanagement, um die Blockierung von Entwicklungen zu überwinden und zur aktiven Gestaltung zukünftiger Entwicklungen zu gelangen. Es geht dementsprechend bei der Partizipation nicht mehr (nur) darum, für Pläne und Entscheidungen die Akzeptanz der Bevölkerung zu gewinnen. Es geht auch nicht mehr (nur) darum, Alltagswissen partiell in die Expertenplanungen zu integrieren, um Planungsfehler zu vermeiden, sondern es geht um die kooperative Gestaltung von Entwicklungen. Zur Kooperation kommen Experten, Interessenvertreter, Parlamentarier, Mitglieder der Regierung und Verwaltungen mit Bürgern und Bürgerinnen zusammen und versuchen, Konflikte zu lösen und Zukunftskonzepte oder konkrete Planungen zu entwickeln. Diesen neuen Aufgaben entsprechen neue Methoden. Mit Zukunftskonferenzen oder Bürgerforen werden in Mediationsverfahren Konflikte bearbeitet oder mit Kommunikationstechniken, wie Metaplan, Konzepte entwickelt [LENNARTZ & MUSSEL 2002].

Bürgerbeteiligung im Meinungsbild der Bevölkerung

Um sich ein Bild von der Rolle der Bürgerbeteiligung im Meinungsbild der Bevölkerung machen zu können, hat der AkEnd repräsentative Umfragen angeregt, die das Bundesamt für Strahlenschutz in Auftrag gegeben hat [STOLLE 2002].

Bei Großvorhaben, dazu zählt selbstverständlich auch die Errichtung eines Endlagers, wird von großen Teilen der Bevölkerung eine Berücksichtigung ihrer Interessen und eine Beteiligung eingefordert und erwartet. Dabei ist der Anteil, der eine Beteiligung einfordert, um so größer, je umstrittener ein Projekt oder eine Entwicklung in der gesellschaftlichen Diskussion ist. Dabei wird vor allem eine frühzeitige Information und Beteiligung gefordert. Man will offensichtlich nicht vor vollendete Tatsachen gestellt werden, sondern an dem Prozess der Planung und Entscheidung teilnehmen.

Während viele eine starke Beteiligung fordern (siehe Abbildung 2.3), sind die tatsächlichen Erfahrungen mit Beteiligungsformen doch nur bei einer kleineren Zahl der Befragten vorhanden. So haben sich 69 % der Befragten noch nie auf einer öffentlichen Versammlung an einer Diskussion beteiligt, in einer Bürgerinitiative haben 11,5 % mitgewirkt.

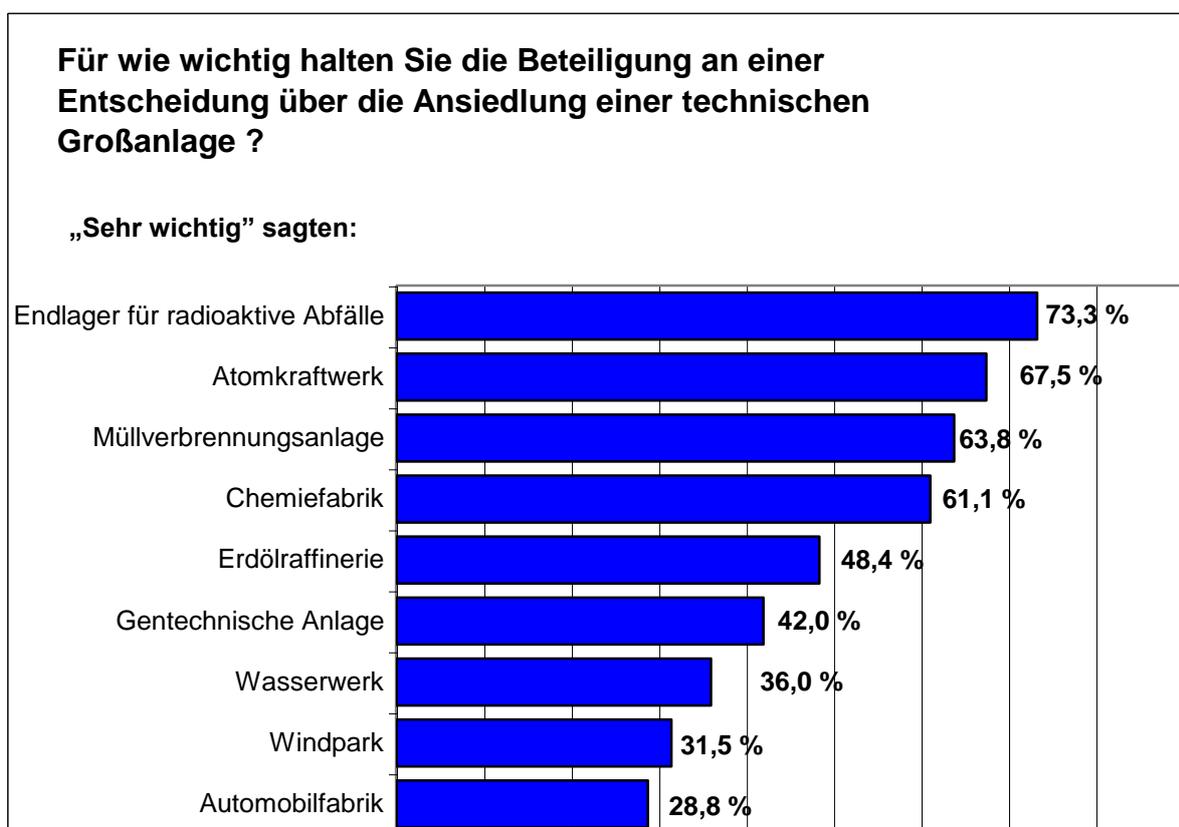


Abbildung 2.3: Großprojekte und Beteiligung

Begleitet wird die Forderung nach Beteiligung von einem ausgeprägten Misstrauen gegenüber den politischen und gesellschaftlichen Institutionen. Offensichtlich ist gerade in diesem Bereich ein erheblicher Vertrauensschwund zu verzeichnen. Ein beachtlicher Sockel zwischen 10 % und beinahe 30 % hat in die verschiedenen Institutionen überhaupt kein oder nur wenig Vertrauen. Lediglich die Umweltverbände, die Justiz, die Polizei und die Wissenschaft genießen noch eine relativ hohe Glaubwürdigkeit.

In Bezug auf Informationen über die Kernenergie konkretisiert sich dieses Misstrauen. Als besonders glaubwürdig werden hier Umweltforschungsinstitute, Umweltverbände und Bürgerinitiativen empfunden (siehe Abbildung 2.4).



Abbildung 2.4: Vertrauen in Informationen über Kernenergie

Die Konstellation von Meinungen und Erfahrungen mit Bürgerbeteiligung zeigen auch die Schwierigkeiten, die jenseits von Meinungsäußerungen mit Beteiligung zu erwarten sind. Auf der einen Seite gibt es sehr hohe Ansprüche an frühzeitige und aktive Beteiligung bei wichtigen Projekten. Auf der anderen Seite wird das Misstrauen

gegenüber den politischen Institutionen und Verbänden die Kooperation erschweren. Bei Berücksichtigung, dass nur ein geringer Teil der Bevölkerung Erfahrungen mit aktiven Beteiligungsformen jenseits der Unterschriftensammlung hat, wird deutlich, dass die Umsetzung einer aktiven und intensiven Beteiligung der sorgsam Vorbereitung und der schrittweisen Vorgehensweise bedarf.

Beteiligung und Verantwortung

Ganz generell gilt, dass die Zivilgesellschaft sich nur dann perspektivisch weiterentwickeln kann, wenn der Anspruch auf Beteiligung an Planungen und Mitentscheidung verbunden wird mit Verantwortung für die Gesellschaft als Ganzes. Es geht also nicht nur darum, seine eigenen Interessen in die Planung und Entscheidung einzubringen, sondern langfristige, nachhaltige und allgemeine Interessen zu berücksichtigen.

In Bezug auf die sichere Lagerung von radioaktiven Abfällen zeigt sich dieses Dilemma deutlich. Über 70 % der Befragten halten das Entsorgungsproblem für sehr dringlich (51 %) bis dringlich (22 %). Über 60 % der Befragten befürworten eine Lösung der Endlagerung innerhalb der nächsten zehn Jahre. Würde jedoch ein Endlager in der Region gebaut, in der man lebt, so wären 80 % der Befragten dagegen. Auch würde man Entscheidungen des Bundestages, des Landtages oder des Gemeinderates nicht akzeptieren. Eine Entscheidung durch eine bundesweite, landesweite oder regionale Volksabstimmung fände bei den Befragten ebenfalls keine Akzeptanz (siehe Abbildung 2.5).

Um diesem Dilemma zu entgehen, halten immerhin 69 % der Befragten eine Lösung auf der Ebene der EU und 22 % eine Lagerung der radioaktiven Abfälle auch außerhalb der EU für richtig. (Allerdings geben viele Befragte auf diese Fragen keine Antwort, möglicherweise, weil sie sich in der Sache nicht informiert genug fühlen). Bei einer Verschiebung des Problems in das Ausland fordern die meisten Befragten die gleichen Sicherheitsstandards für ein Endlager, die in Deutschland gelten.

Das geschilderte Dilemma im Meinungsbild der Befragten – dringende Lösung des Endlagerproblems, aber nicht in meiner Region, geringes Vertrauen in Institutionen –

zeigt, dass herkömmliche Verfahren bis hin zu basisdemokratischen Abstimmungen als solche den Konflikt zwischen dem eigenen Interesse und der Verantwortung für eine der allgemeinen Sicherheit nützenden Entscheidung aller Wahrscheinlichkeit nicht lösen können. Die Entscheidungsfindung muss schrittweise mit der Möglichkeit, Fehler zu korrigieren, erfolgen. Es bedarf nachprüfbarer Informationen und transparenter Kriterien und Verfahrensregeln und des Dialoges, um eine von den Bürgerinnen und Bürgern mitgetragene Lösung zu finden. Das Konzept einer aktiven und intensiven Bürgerbeteiligung, wie es der AkEnd entwickelt hat und vorschlägt, soll diesen Ansprüchen genügen.

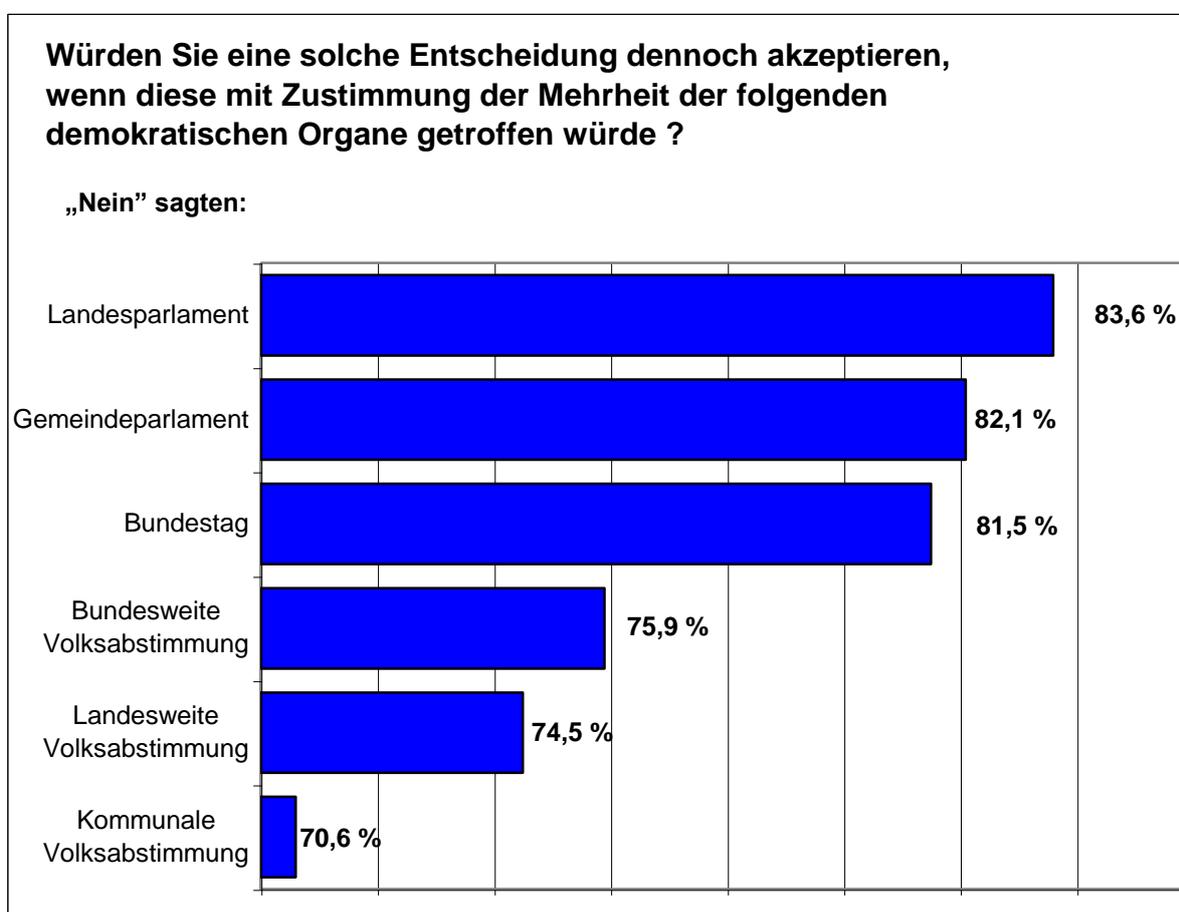


Abbildung 2.5: Akzeptanz politischer Entscheidungen

Bei der Entwicklung des Konzeptes waren internationale Erfahrungen, die detailliert im Kapitel 2.2 beschrieben sind, für den AkEnd von großer Bedeutung. Dies gilt sowohl für Erfahrungen, die auf Misserfolge aufbauen, als auch für Erfahrungen, die erfolgreiche Zwischenschritte darstellen.

Am wichtigsten für die Entwicklung der Vorstellungen des AkEnd waren die Erfahrungen, die in Schweden gemacht wurden. Der AkEnd hat sehr konkrete Anregungen aus dem schwedischen Verfahren erhalten und konnte einen Teil in einer auf deutsche Verhältnisse angepassten Form für seine Vorstellungen verwenden.

Partizipation und Erfolgchancen bei der Suche nach einem Endlager

Sicherlich garantiert Beteiligung nicht den Erfolg des Verfahrens bei der Suche nach einem Endlager. Ein derartiges Beteiligungsverfahren, wie es der AkEnd vorschlägt, hat es in diesem Umfang und mit dieser Intensität weder in Deutschland noch in anderen Ländern gegeben.

In der Zeitachse begibt sich der Vorschlag weit in die Zukunft. Dreißig Jahre ermöglichen eine Vielzahl von Änderungen der gesellschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen, die die Sozialwissenschaft nicht voraussagen kann. Auch in dieser Hinsicht ist es ratsam, sich für Korrekturen offen zu halten. Der AkEnd empfiehlt daher eine Kontrolle jedes Schrittes und eine rechtzeitige Rückkopplung der Ergebnisse.

Weiterhin ist der Vorschlag in die internationale Diskussion eingebettet. Es herrscht international eine große Übereinstimmung darüber, dass der Mangel an Partizipationsmöglichkeiten einer der wichtigen Gründe für das Scheitern vieler bislang begonnener Verfahren ist. Es könnte so formuliert werden: Partizipation garantiert nicht den Erfolg bei der Endlagersuche, mangelnde Partizipation aber erhöht die Chance des Misserfolges.

3 Auswahlverfahren

In diesem Kapitel wird der Weg zum betriebsbereiten Endlager, der sich in verschiedene Phasen gliedert, aufgezeichnet, und es werden die allgemeinen Merkmale und die einzelnen Schritte des vom AkEnd vorgeschlagenen Verfahrens für die Auswahl von Endlagerstandorten beschrieben. Da es sich dabei um ein kriteriengesteuertes Verfahren handelt, spielen die Bewertungsgrundsätze, der Umgang mit Untersuchungsbefunden und Datenunsicherheiten sowie ganz allgemein die Verfügbarkeit von Daten eine wichtige Rolle.

Der Weg bis zum betriebsbereiten Endlager umfasst die drei Phasen des Auswahlverfahrens, das sich daran anschließende atomrechtliche Genehmigungsverfahren sowie die Errichtung des Endlagers.

Phase I: Verfahrensentwicklung (Mandat des AkEnd)

In dieser Phase, die gerade durchlaufen wurde, hat der AkEnd ein Auswahlverfahren für die Standortsuche entwickelt. Das Verfahren wurde in dieser Phase noch nicht festgelegt. Die interessierte Öffentlichkeit wurde über Internet (www.akend.de) informiert und an der Diskussion beteiligt. Der Diskurs mit der Fachöffentlichkeit wurde in Gesprächen, Vorträgen und Publikationen geführt. In jährlichen Workshops trat der AkEnd an eine breite Öffentlichkeit. Der AkEnd hat seine Aufgabe in Phase I mit der Übergabe seiner Empfehlungen an das Bundesumweltministerium Ende 2002 abgeschlossen.

Phase II: Verfahrensfestlegung

Ziel dieser Phase ist die politische/rechtliche Verankerung des Auswahlverfahrens. In dieser Phase werden die vom AkEnd 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. Aus Sicht des AkEnd soll während der Phase II auch eine internationale Überprüfung der Ergebnisse aus Phase I stattfinden. Die Phase II sollte nicht länger als zwei Jahre dauern.

Phase III: Verfahrensdurchführung

In dieser Phase wird das in Phase II endgültig festgelegte Auswahlverfahren angewendet. Das Verfahren endet mit der Entscheidung für den Endlagerstandort. Der AkEnd empfiehlt, dass zumindest zwei Endlagerstandorte auf ihre Eignung untertägig erkundet werden, bevor die Entscheidung für den Endlagerstandort fällt. Für die untertägige Erkundung müssen größenordnungsmäßig zehn Jahre eingeplant werden; die Erkundungsdauer ist allerdings abhängig von den geologischen Standortverhältnissen. Dabei sind geowissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Kriterien zu berücksichtigen, wobei die Sicherheit des Endlagers Vorrang hat.

Nach Durchführung der Phase III wird im anschließenden atomrechtlichen Genehmigungsverfahren der Nachweis für die Sicherheit des Endlagers vom Verfahrensbetreiber geführt. Von der Genehmigungsbehörde wird geprüft, ob alle gesetzlich vorgeschriebenen Anforderungen an ein sicheres und umweltverträgliches Endlager von der geplanten Anlage erfüllt werden. Selbst wenn keine weiteren Erkundungen bzw. Untersuchungen von der Genehmigungsbehörde gefordert werden, sind für das Genehmigungsverfahren, in dem die Antragsunterlagen intensiv geprüft werden, ca. fünf Jahre einzuplanen.

Nachdem die Genehmigung erteilt ist, kann das Endlager errichtet und betrieben werden. Für die Errichtung des Endlagers ist mit einem Zeitbedarf von drei bis fünf Jahren zu rechnen.

Ziel der jetzigen Bundesregierung ist es, bis zum Jahr 2030 ein Endlager für alle Arten von radioaktiven Abfällen zur Verfügung zu haben. Der Weg bis dahin ist mit vielen Hindernissen bestückt und kann nur erfolgreich durchschritten werden, wenn alle Beteiligten ihrer gesamtgesellschaftlichen Verantwortung für die langfristig sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle nachkommen.

3.1 Bewertungsgrundsätze

Der wichtigste beim Auswahlverfahren zu berücksichtigende Grundsatz ist der Vorrang der Sicherheit vor allen anderen Aspekten, denn langfristige und größtmögliche Sicherheit ist das bei der Endlagerung angestrebte Hauptziel. Das Auswahlverfahren muss darüber hinaus nicht nur die in Kapitel 2.1 formulierten Rahmenbedingungen erfüllen, sondern es müssen auch grundsätzliche Festlegungen bzw. Regelungen für die Bewertung der Untersuchungsbefunde und damit zusammenhängende Gesichtspunkte getroffen werden. Dies ist notwendig, um bei dem kriteriengesteuerten Auswahlverfahren den in jedem einzelnen Verfahrensschritt vorzunehmenden Bewertungen einen – auch für Außenstehende – klar erkennbaren und eindeutigen Rahmen zu geben. Die Berücksichtigung der Bewertungsgrundsätze ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass Entscheidungen wirklich nachvollzogen werden können, der angestrebte möglichst weitgehende gesellschaftliche und fachliche Konsens erreicht werden kann und zudem den zuständigen Gremien und Behörden Entscheidungssicherheit gegeben wird. Insbesondere dienen die Regelungen der Einengung wissenschaftlicher Interpretationsspielräume oder gar Spekulationen zu einzelnen Verfahrensschritten, denn genau diese Spielräume oder Spekulationen könnten dazu genutzt werden, um mit vorgeblichen Sachargumenten ideologische, politische, ökonomische oder sonstige Überzeugungen und Interessen im Auswahlverfahren durchzusetzen – ein der sicherheitsmäßigen, gesellschaftlichen und politischen Bedeutung des Auswahlverfahrens unangemessener und die Erfolgsaussichten der Standortsuche sicherlich nicht förderlicher Zustand.

Die Bewertungsgrundsätze betreffen die nachfolgenden Aspekte.

Festlegung der Bewertungsgrundlagen

Bei den Bewertungsgrundlagen handelt es sich im Wesentlichen um die während des Auswahlverfahrens angewendeten Kriterien, und zwar geowissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Kriterien. Sie sind in ihrer Funktion (Ausschluss- oder Abwägungskriterium) und ihrer Formulierung (u. a. die der eigentlichen Bewertung dienenden Erfüllungsfunktion) eindeutig festzulegen. Zum anderen ist zu regeln, wie bei einer Gesamtbewertung mit gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer Kriterien

vorzugehen ist. Dies betrifft die Gewichtung der einzelnen Kriterien, die Art der Aggregation der Einzelbewertungen sowie auch den gewählten methodischen Ansatz bei der vergleichenden Bewertung von Gebieten, Regionen und Standorten. Soweit notwendigerweise subjektive Einstellungen in entsprechende Festlegungen einfließen (z. B. bei der Gewichtung von Kriterien), sind sie als solche zu benennen.

Die Bewertungsgrundlagen sind immer **vor** der Umsetzung der Auswahlsschritte festzulegen, in denen sie angewandt werden. Nur so kann verhindert werden, dass sachfremde Gesichtspunkte in die Bewertung einfließen oder die Bewertung nachträglich verändert bzw. an die zu bewertenden Befunde angepasst wird. Dies ist die Grundvoraussetzung für die Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz der Entscheidungen, die sich aus den Auswahlsschritten ergeben.

Ebenfalls **vor** Umsetzung eines jeden Auswahlsschrittes ist festzulegen, welchem genauen Ziel der Auswahlsschritt und die damit verbundene Bewertung dient, sofern Festlegungen über die in Phase II getroffenen hinaus erforderlich sind (siehe Kapitel 7). Auch die aus der Bewertung sich ergebenden möglichen Konsequenzen eines Verfahrensschrittes sind **vorab** festzulegen.

Informationsbedarf

Die Umsetzung der Verfahrens- und Bewertungsschritte setzt jeweils die Deckung eines bestimmten Informationsbedarfs voraus. Er bestimmt – ausgehend von den bereits vorliegenden Informationen – Umfang und Detaillierungsgrad der zur Durchführung des Bewertungsschrittes noch erforderlichen Untersuchungen.

Der für die Umsetzung jedes einzelnen Auswahlsschrittes mindestens erforderliche qualitative und quantitative Informationsbedarf ist deshalb zu bestimmen. Er hängt ab vom jeweiligen Verfahrensschritt bzw. den Anforderungen, die sich aus den Kriterien ergeben, die den Schritt steuern. Dabei müssen diese Informationen für alle zu beurteilenden Gebiete oder Standorte auch verfügbar sein oder aus Erfahrungen und aus anderen Gebieten übertragen bzw. abgeleitet werden können. Bei der Kriterienentwicklung hat der AkEnd darauf geachtet, dass der zur Anwendung der Kriterien jeweils notwendige Informationsbedarf überhaupt erfüllt werden kann.

Umgang mit Untersuchungsbefunden

Bei Untersuchungsbefunden, die zu kontroversen fachlichen Interpretationen führen, ist grundsätzlich eine Klärung herbeizuführen. Dies kann durch zielgerichtete zusätzliche Untersuchungen geschehen. Generell gilt, dass Informationslücken zu verfahrensrelevanten Aspekten geschlossen werden müssen. Sind sie aus methodischen Gründen oder wegen eines völlig unangemessenen Zeit- und Kostenaufwandes entsprechender Untersuchungen nicht zu schließen, dann können im Einzelfall begründete Annahmen getroffen werden, die nicht zu einer Überschätzung des Isolationsvermögens führen.

Umgang mit Unsicherheiten

In jedem Verfahrensschritt treten Unsicherheiten auf, die bei den Entscheidungsprozessen dargestellt und berücksichtigt werden müssen. Diese Unsicherheiten ergeben sich aus

- einem begrenzten Kenntnisstand über die geologische Entwicklung, die jetzigen geologischen Verhältnisse und die charakteristischen Merkmale von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten,
- einer lückenhaften Kenntnis über die Sicherheitsrelevanz von geologischen Gegebenheiten,
- der eingeschränkten Prognostizierbarkeit geologischer Entwicklungen angesichts der langen zu betrachtenden Zeiträume,
- der für die vergleichende Bewertung von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten unterschiedlichen Qualität der jeweiligen Daten.

Bei der Umsetzung des Auswahlverfahrens sind deshalb am Ende eines jeden Verfahrensschrittes die Quellen von Unsicherheiten zu identifizieren und der Umgang mit ihnen festzulegen. Hierzu gehört beispielsweise die Klärung, auf welche Weise festgestellte Unsicherheiten verringert werden können, wie Erkenntnisse hinsichtlich identifizierter Unsicherheiten im Verfahren berücksichtigt werden oder wann Erkenntnisse aus der Berücksichtigung von Unsicherheiten Neubeurteilungen von getroffenen Entscheidungen nach sich ziehen.

Dem jeweiligen Verfahrensschritt entsprechend müssen die Unsicherheiten durch zielgerichtete Untersuchungen angemessen verringert werden. Hierbei sind dann die zum Umgang mit Untersuchungsbefunden (s. o.) genannten Regelungen zu berücksichtigen. Neugewonnene Erkenntnisse, die zur Reduzierung von Unsicherheiten führen, können eine Änderung von Entscheidungen aus vorhergehenden Verfahrensschritten nach sich ziehen (s. u. Irrtumsvorbehalt). Diese Neubewertung ist auf iterative Weise vorzunehmen. Verbleibende Unsicherheiten können dann akzeptiert werden, wenn sie die Bewertung, ob ein Standort die geforderten Eigenschaften erfüllt, nachweislich nicht beeinflussen. Die Konsequenzen verbleibender Unsicherheiten auf die Entscheidungsprozesse im Auswahlverfahren sind in jedem Fall darzustellen.

Irrtumsvorbehalt

Da der Informationsstand vom ersten Schritt des Auswahlverfahrens bis zur detaillierten über- und untertägigen Erkundung zunimmt, beruht das Ergebnis der Kriterienanwendung in frühen Verfahrensschritten zwangsläufig auch auf Modellvorstellungen und Annahmen (dies betrifft im Wesentlichen geowissenschaftliche Aspekte). Die darauf beruhenden Entscheidungen unterliegen einem Irrtumsvorbehalt; denn im Laufe des Auswahlverfahrens und insbesondere bei der über- und untertägigen Standorterkundung kann sich herausstellen, dass ein Teilgebiet, eine Standortregion oder ein Standort die vorab formulierten Anforderungen nicht bzw. nicht vollständig erfüllt. In diesem Fall sind die Entscheidungen aus vorhergehenden Verfahrensschritten zu überdenken und gegebenenfalls zu revidieren. Das bedeutet zugleich, dass die für frühe Verfahrensschritte formulierten Anforderungen bis zum Eignungsnachweis für einen Standort Bestand haben und im Verfahren fortlaufend auf ihre Einhaltung überprüft werden müssen.

Die vor Beginn und während eines Auswahlverfahrens formulierten sicherheitsgerichteten geowissenschaftlichen Anforderungen an besonders günstige Teilgebiete bzw. Endlagerstandorte im Allgemeinen und an die später in die engere Wahl genommenen Standorte im Besonderen behalten ihre Verfahrenswirksamkeit also bis zur abschließenden umfassenden Sicherheitsbewertung des Standortes. Das gilt insbesondere für Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien, aber auch im

Hinblick auf das Ergebnis von Entscheidungen auf Grund von Abwägungen zwischen mehreren Teilgebieten oder Standorten. Der Irrtumsvorbehalt bezieht sich also nicht auf die Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe, sondern auf die zu beurteilenden Befunde (d. h. nur eine Änderung/Erweiterung der Befundlage kann zu einer Neubewertung führen).

Beachtung des Abwägungsgebotes

Beim Auswahlverfahren ist das Abwägungsgebot zu berücksichtigen. Es dient dem möglichst frühzeitigen Interessenausgleich zwischen unterschiedlichen Belangen sowie der Konfliktminimierung. Nur so können neben der erforderlichen Gerechtigkeit eine nachvollziehbare Entscheidung und letztlich Rechtssicherheit erreicht werden. Seine Konkretisierung im Sinne einer bestmöglichen Zielerreichung erfährt das Abwägungsgebot in Gestalt der vergleichenden Standortbewertung (Bewertung von Standortalternativen). Im Auswahlverfahren sind deshalb an geeigneter Stelle Standortalternativen vergleichend zu bewerten.

3.2 Vorschlag einer Verfahrensstruktur

3.2.1 Allgemeine Verfahrensmerkmale

Schrittweises und kriteriengesteuertes Vorgehen

Das Auswahlverfahren besteht aus fünf aufeinander aufbauenden Verfahrensschritten. Sie bilden das "Rückgrat" des Verfahrens. Jedem Verfahrensschritt sind bestimmte Kriterien zugeordnet. Mit ihrer Hilfe wird entschieden, welche Gebiete im weiteren Auswahlverfahren verbleiben, zurückgestellt oder aber ausgeschlossen werden. Die schrittweise Verfahrensstruktur erfüllt die Forderungen nach Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Auswahlverfahrens, die nicht zuletzt im Zusammenhang mit der Öffentlichkeitsbeteiligung wichtig sind. Das Auswahlverfahren wird durch geowissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Kriterien gesteuert. Dadurch wird neben der Erfüllung der notwendigen Sicherheitsanforderungen auch die aktive Beteiligung der Bevölkerung überhaupt erst ermöglicht. Hierzu sind den einzelnen

Verfahrensschritten bestimmte Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung zugeordnet (siehe Tabelle 3.1).

Im Zuge der Entwicklung des Auswahlverfahrens hat es mehrfach Änderungen der Verfahrensstruktur gegeben. Sie betreffen die Anzahl der Verfahrensschritte, die Zuordnung verschiedener Kriterienarten zu einzelnen Schritten und den Abschluss des Auswahlverfahrens. Diese Änderungen sind Ausdruck des Erkenntnis- und Diskussionsprozesses, der innerhalb des AkEnd sowie mit der Öffentlichkeit stattgefunden und zur Optimierung des Auswahlverfahrens geführt hat.

Keine räumliche Vorfestlegung

Ausgangspunkt für das Verfahren ist die gesamte Fläche Deutschlands. Es werden also keinerlei Vorfestlegungen getroffen oder gar Gebiete vorab aus dem Verfahren ausgeschlossen, sondern es wird von einer "weißen Deutschlandkarte" ausgegangen. Alle Gebiete werden gleich behandelt.

Um dem Vorrang der Sicherheit Rechnung zu tragen, werden in den ersten beiden Verfahrensschritten nur geowissenschaftliche Kriterien angewandt, weil gerade diese sich auf (langzeit-)sicherheitsbedeutsame Merkmale beziehen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass frühzeitig im Auswahlverfahren möglichst alle für die Endlagerung besonders günstigen Bereiche im Untergrund identifiziert werden.

Keine Vorfestlegung auf ein Wirtsgestein

Bei dem Suchverfahren findet keine Vorfestlegung auf ein bestimmtes Wirts- oder Barrierengestein (z. B. Ton, Salz) statt, weil ein geeigneter Endlagerstandort nicht allein durch das Wirts- oder das Barrierengestein, sondern durch eine günstige geologische Gesamtsituation bestimmt wird. Das Auswahlverfahren hat also das Ziel, solche günstigen geologischen Gesamtsituationen zu identifizieren.

Ausschluss- und Abwägungskriterien

In dem Verfahren werden sowohl Ausschluss- als auch Abwägungskriterien benutzt. Die Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen sind während des gesamten

Verfahrensablaufs zu beachten. Sie dienen dem Ausschluss nicht geeigneter Flächen.

Die Abwägungskriterien dienen der vergleichenden Bewertung von Flächen. Sie ermöglichen die Identifizierung von Flächen bzw. Standorten mit relativ günstigeren Voraussetzungen für die Endlagerung und ermöglichen darüber hinaus die Beachtung des bei der Standortauswahl zu berücksichtigenden Abwägungsgebotes. Nur die relativ günstigeren Flächen oder Standorte werden weiterverfolgt, die übrigen werden zurückgestellt.

Möglichkeit des Rücksprungs

Das Verfahren bietet bei Bedarf die Möglichkeit des Rücksprungs in einen früheren Verfahrensschritt. Diese Möglichkeit ist allerdings frühestens ab dem dritten Verfahrensschritt gegeben, weil dann in untersuchungswürdige Teilgebiete oder Standortregionen zurückgegangen werden kann. Die Möglichkeit des Rücksprungs ist deshalb erforderlich, damit das Verfahren nicht beim Auftauchen unerwartet ungünstiger Befunde oder bei fehlender Beteiligungsbereitschaft in allen Standortregionen vorzeitig in eine Sackgasse gerät. Vielmehr muss dann die Möglichkeit bestehen, auf einen früheren gesicherten Verfahrensschritt zurückzugehen und Teilflächen oder Standortregionen, die aus nicht-sicherheitstechnischen Gründen zurückgestellt worden sind, wieder in das Verfahren einzubeziehen. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt, weil die zurückgestellten Teilflächen oder Standortregionen nicht weniger geeignet sein müssen als diejenigen, die zunächst aussichtsreicher erschienen, was sich dann aber bei näherer Untersuchung nicht bestätigte.

Die Rücksprungmöglichkeit ist nicht zu verwechseln mit „Beliebigkeit“ des Verfahrens, denn die **vor** Verfahrensdurchführung in Form von Kriterien festgelegten Anforderungen an Flächen und Standorte bleiben bestehen.

3.2.2 Die Verfahrensschritte

Im Folgenden werden die fünf Verfahrensschritte beschrieben. Dabei wird für die Schritte 2 bis 4 angegeben, wie viele Gebiete/Standortregionen/Standorte ausgewählt bzw. erkundet werden sollen. Die Gründe hierfür sind:

- Das Auswahlverfahren soll den bestmöglichen Standort identifizieren. Der AkEnd versteht darunter den in einem Abwägungsprozess zwischen Alternativen ermittelten Standort und nicht den absolut besten Standort. Der Abwägungsprozess erfolgt an Hand geowissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Kriterien.
- Das Risiko, im Auswahlverfahren zu scheitern, soll minimiert werden. Je größer die Anzahl der betrachteten bzw. untersuchten Teilgebiete, Regionen und Standorten ist, umso geringer ist das Risiko, dass das Verfahren scheitert. Es ist deshalb sinnvoll, eine größtmögliche, aber noch praktikable Anzahl von Teilgebieten, Regionen und Standorten in den Schritten 2 bis 4 zur Verfügung zu haben. Damit wird auch das ökonomische Risiko verringert.
- Es wird als vorteilhaft angesehen, wenn die identifizierten Standorte nicht alle die gleiche geologische Struktur aufweisen. Mit zunehmender Anzahl der näher betrachteten Teilgebiete und Standortregionen wächst die Wahrscheinlichkeit, unterschiedliche geologische Strukturen im Verfahren zu behalten.

Im **ersten Verfahrensschritt** (siehe Tabelle 3.1) werden die Gebiete identifiziert, die für ein Endlager offensichtlich nicht in Frage kommen. Diese Gebiete müssen mit Hilfe von Ausschlusskriterien und zu erfüllenden Mindestanforderungen aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen werden.

Die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien dienen dazu, Gebiete, die offensichtlich ungünstige geologische Voraussetzungen aufweisen, zu ermitteln. Diese Kriterien beziehen sich auf natürliche Vorgänge (z. B. seismische oder vulkanische Aktivitäten), die das Barrierensystem eines Endlagers innerhalb des erforderlichen Isolationszeitraumes in der Größenordnung von einer Million Jahren negativ beeinträchtigen können.

Zusätzlich werden Gebiete ausgeschlossen, die bestimmte geowissenschaftliche Mindestanforderungen nicht erfüllen. Diese Mindestanforderungen beziehen sich hauptsächlich auf die Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, der die Isolation der radioaktiven Abfälle gewährleisten soll. Die Mindestanforderungen sind gleichfalls in Form von Kriterien formuliert.

Am Schluss des ersten Verfahrensschrittes verbleiben also nur die Gebiete im weiteren Verfahren, die keines der Ausschlusskriterien und alle Mindestanforderungen erfüllen.

Die Beteiligung der Öffentlichkeit erfolgt im Wesentlichen durch umfassende Information aller Verfahrensbeteiligten und Kontrolle des Verfahrensablaufs. Hierzu werden eine Informationsplattform und ein Kontrollgremium eingerichtet. Die Informationsplattform sammelt alle Informationen zum Verfahren und stellt sie der Öffentlichkeit und allen Verfahrensbeteiligten zur Verfügung. Das Kontrollgremium achtet auf die regelkonforme Umsetzung des Verfahrens. Diese Elemente der Öffentlichkeitsbeteiligung bleiben auch in allen folgenden Verfahrensschritten aktiv.

Ziel des **zweiten Verfahrensschrittes** ist die Einengung der nach dem ersten Schritt verbliebenen Gebiete auf mindestens fünf räumlich kleinere Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die Endlagerung. Dies geschieht mit einer geowissenschaftlichen Abwägung unter Zuhilfenahme von Abwägungskriterien.

Nur Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen verbleiben im weiteren Verfahren. Diese Teilgebiete sind hinsichtlich ihrer Sicherheit als gleichwertig einzuschätzen. Flächen, bei denen die Datenlage zur geowissenschaftlichen Abwägung nicht ausreicht, werden im Verfahren zurückgestellt. Die Öffentlichkeitsbeteiligung in diesem Schritt entspricht der im ersten Schritt.

Im **dritten Verfahrensschritt** werden in den Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen Standortregionen identifiziert. Der AkEnd empfiehlt nach Möglichkeit fünf, mindestens aber drei Standortregionen für die Durchführung übertägiger Untersuchungen auszuwählen.

Zu Beginn von Schritt 3 werden für die Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen die existierenden oder geplanten Flächennutzungen, die Schutzgüter und die natürlichen Ressourcen, die einem besonders starken gesetzlichen Schutz unterliegen, identifiziert. Mit Hilfe der planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien werden nach Einzelfallprüfung die entsprechenden Flächen in den Teilgebieten ausgeschlossen. Sie stehen für das weitere Verfahren nicht mehr zur Verfügung.

Der Kern des dritten Schrittes besteht in der Abstimmung der Bevölkerung der Standortregion darüber, ob die für Schritt 4 vorgesehenen übertägigen Standortuntersuchungen zugelassen werden sollen. Nur die Regionen, die ihre Beteiligungsbereitschaft für die Durchführung übertägiger Erkundungen auf ihrem Gebiet erklären, bleiben im Verfahren. So ist für die Abgrenzung und Auswahl der Standortregionen die Beteiligungsbereitschaft der Bevölkerung verfahrensleitend, das heißt, es werden Regionen gesucht, die sich als Standortregionen verstehen und deren Bevölkerung bereit ist, Untersuchungen auf ihrem Gebiet zuzulassen. Die Erklärung der Beteiligungsbereitschaft in diesem Schritt bedeutet nicht automatisch, dass die entsprechende Region im Verfahren „gefangen“ ist. Vielmehr kann die Beteiligungsbereitschaft am Ende von Schritt 4 zurückgezogen werden.

In engem Zusammenhang mit der Beteiligungsbereitschaft steht eine Reihe weiterer Maßnahmen. Dazu gehört die Durchführung von sozioökonomischen Potenzialanalysen in den Regionen, die Beteiligungsbereitschaft erkennen lassen oder die Anfertigung einer Potenzialanalyse wünschen. Mit Hilfe der Potenzialanalyse werden die möglichen positiven und negativen Auswirkungen eines Endlagers auf die sozialen und ökonomischen Verhältnisse und die langfristigen Entwicklungschancen der Standortregionen ermittelt. Damit Entwicklungspotenziale von Standortregionen tatsächlich auch genutzt werden können, sollen zusätzlich regionale Entwicklungskonzepte unter Beteiligung der Bevölkerung erarbeitet werden. Schließlich werden auch die übertägigen Erkundungsprogramme sowie die Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der Untersuchungsbefunde der übertägigen Erkundung in Abstimmung mit der Bevölkerung festgelegt.

Die genaue räumliche Festlegung der potenziellen Endlagerstandorte innerhalb der Standortregionen geschieht in einem Abwägungsprozess und hat vor allem die Minimierung von Nutzungskonflikten bzw. Eingriffen in Schutzgüter oder Ressourcen zum Ziel. Dies dient auch der Erfüllung der Anforderungen des Abwägungsgebotes. Hierbei sind vorrangig die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien von Bedeutung, gegebenenfalls auch sozioökonomische und bergbauliche Aspekte.

Erklären weniger als drei Standortregionen ihre Beteiligungsbereitschaft für die über-tägige Erkundung, dann ist das Auswahlverfahren vorerst gestoppt, und die weitere Vorgehensweise ist zu überdenken. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit des Rücksprungs im Verfahren an das Ende von Schritt 2.

Die Öffentlichkeitsbeteiligung im dritten und den folgenden Verfahrensschritten ist entscheidend durch das Kriterium der Beteiligungsbereitschaft geprägt (siehe Kapitel 5.2). Zentrales Element dabei ist das Bürgerforum. Es organisiert auf der Ebene der Standortregion die aktive Beteiligung der Bevölkerung bei der Ermittlung der Beteili-gungsbereitschaft, der Erarbeitung des regionalen Entwicklungskonzeptes sowie der Diskussion aller sonstigen mit dem Auswahlverfahren zusammen hängenden Fragen. Das Bürgerforum gibt Empfehlungen an den Gemeinderat (bzw. die Gemeinderäte) der Region. Dieser hat dann die letztendliche Entscheidung über das weitere Vorgehen zu treffen.

Hauptaufgaben im **vierten Verfahrensschritt** sind die über-tägige Erkundung und die Festlegung von mindestens zwei Standorten für die in Schritt fünf vorgesehene unter-tägige Erkundung. Die bei der über-tägigen Erkundung anfallenden Befunde müssen bewertet werden. Hierbei kommen die in Schritt 3 entwickelten Bewertungs-maßstäbe für die über-tägige Erkundung zur Anwendung. Standorte, die diese nicht erfüllen, werden aus dem Verfahren ausgeschlossen. Sollten weniger als zwei Standorte die Bewertungsmaßstäbe erfüllen, muss in die vorausgegangenen Verfah-rensschritte 3 oder 2 zurückgesprungen werden.

Sind die Ergebnisse des über-tägigen Erkundungsprogramms positiv zu bewerten, dann wird ein zweites Mal die Beteiligungsbereitschaft der Standortregionen abge-fragt, und zwar diesmal für die unter-tägige Erkundung. In diesem Zusammenhang

werden ebenfalls mit Beteiligung der Bevölkerung Prüfkriterien für die untertägige Erkundung entwickelt.

Der Abfrage der Beteiligungsbereitschaft geht die Information voraus, dass die abschließende Standortentscheidung durch den Deutschen Bundestag nach Verfahrensschritt 5 bei positivem Ausgang der untertägigen Erkundung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen der wenigen nach dem vierten Schritt noch im Verfahren verbliebenen Standorte fallen wird. Eine Standortregion, bei der zwar die Bewertungsmaßstäbe erfüllt sind, aber keine Beteiligungsbereitschaft für die untertägige Erkundung besteht, wird im Verfahren zurückgestellt.

Sprechen sich nicht mindestens zwei Standortregionen für die Durchführung der untertägigen Erkundung aus, empfiehlt der AkEnd, dass der Deutsche Bundestag das weitere Vorgehen regelt.

Die Elemente der Öffentlichkeitsbeteiligung entsprechen denen im dritten Verfahrensschritt. So werden in Abstimmung mit der Bevölkerung u. a. die untertägigen Erkundungsprogramme sowie die Prüfkriterien zur Bewertung der Untersuchungsbefunde festgelegt.

Im **fünften Verfahrensschritt** wird die Entscheidung über den Endlagerstandort getroffen, für den das nachfolgende Genehmigungsverfahren durchgeführt werden soll. Hierzu werden zwei aus dem vierten Schritt stammende Standorte untertägig erkundet und mittels Prüfkriterien und Sicherheitsnachweis bewertet. Werden an einem Standort die Prüfkriterien nicht erfüllt, so ist dieser auszuschließen. Der Sicherheitsnachweis dient auch der vergleichenden Bewertung der Standorte, damit vor der endgültigen Entscheidung Klarheit über die jeweiligen Stärken und Schwächen der Standorte besteht.

Die untertägige Erkundung an den einzelnen Standorten wird vom jeweiligen Bürgerforum kontinuierlich begleitet. Bewertungen in Bezug auf die Erfüllung standortspezifischer Prüfkriterien werden im Rahmen der vorgesehenen Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung, die in Kapitel 5.2.1 näher ausgeführt werden, vorgenommen.

Tabelle 3.1 Kriterien, Bewertungen und Instrumente der Bürgerbeteiligung in den einzelnen Verfahrensschritten des Auswahlverfahrens

Verfahrensschritte	Vorgehen, Kriterien, Bewertungen	Instrumente der Bürgerbeteiligung
1. Schritt Ziel: Ausweisung von Gebieten, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen	Für Schritt 1 <ul style="list-style-type: none"> • Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen 	Für das Gesamtverfahren (Schritte 1 - 5) Beteiligung durch Information und Kontrolle: <ul style="list-style-type: none"> • Einrichtung einer Informationsplattform • Kontrollgremium prüft Einhaltung der Verfahrensregeln
2. Schritt Ziel: Auswahl von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen	Für Schritt 2 <ul style="list-style-type: none"> • Geowissenschaftliche Abwägung 	
3. Schritt Ziel: Identifizierung und Auswahl von Standortregionen für die übertägige Erkundung Bei Bedarf Rücksprung ↑	Für Schritt 3 <ul style="list-style-type: none"> • Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien • Sozioökonomische Potenzialanalyse • Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien • Festlegung übertägiger Erkundungsprogramme und deren Bewertungsmaßstäbe • Beteiligungsbereitschaft für übertägige Erkundung • Geowissenschaftliche und bergbauliche Aspekte 	Ab Schritt 3 <ul style="list-style-type: none"> • Bürgerforum als zentrales Element der Beteiligung • Kompetenzzentrum unterstützt Bürgerforum • Runder Tisch der Interessenvertreter • Ermittlung der Beteiligungsbereitschaft in den Schritten 3 und 4 durch Abstimmung • Erarbeitung regionaler Entwicklungskonzepte
	4. Schritt Ziel: Festlegung der Standorte für die untertägige Erkundung Bei Bedarf Rücksprung ↑	
5. Schritt Ziel: Standortentscheidung Bei Bedarf Rücksprung ↑	Für Schritt 5 <ul style="list-style-type: none"> • Untertägige Erkundung und Bewertung • Sicherheitsnachweis • Vergleich der erkundeten Standorte 	
Endlagerstandort für Genehmigungsverfahren		

Am Ende von Schritt 5 liegen zu jedem untertägig erkundeten Standort die Bewertung des Verfahrensbetreibers, des Kontrollgremiums und des Bürgerforums (unterstützt durch das Kompetenzzentrum) sowie die Bewertung des Entwicklungspotenzials und das regionale Entwicklungskonzept vor. Auf dieser Grundlage wird die Bevölkerung am Standort in einer Umfrage nach ihrem Votum zur Errichtung eines Endlagers an diesem Standort gefragt. Diese Informationen dienen dem Deutschen Bundestag zur Orientierung bei seiner abschließenden Standortentscheidung.

3.3 Datenlage

3.3.1 Geowissenschaftliche Daten

Die Abarbeitung der einzelnen Verfahrensschritte wird durch Kriterien gesteuert. Dabei wird überprüft, ob die Gebiete, Teilgebiete, Standortregionen und schließlich Standorte bestimmte Eigenschaften aufweisen.

Für diese Prüfung muss ein Mindestmaß an Kenntnissen und Daten vorliegen. Besonders bei der Anwendung geowissenschaftlicher Kriterien sind dabei folgende Fragen zu beantworten:

- Liegen die Daten flächendeckend für ganz Deutschland vor?
- Ist die Datenqualität einheitlich?
- Sollen Gebiete mit erheblichen Kenntnis- und Datendefiziten ausgeschlossen werden?
- Müssen die Defizite erst beseitigt werden, bevor das Verfahren fortgesetzt werden kann?
- Welcher Aufwand soll betrieben werden, um eventuell neue Daten zu ermitteln?

Bei der Anwendung der fünf geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien werden die vorhandenen Daten zu großräumigen Hebungen, seismischen Aktivitäten, vulkanischen Aktivitäten, aktiven Störungszonen und Grundwasseralter herangezogen.

Derartige Daten liegen nicht flächendeckend für ganz Deutschland, aber für große Teilgebiete vor. So sind Daten zu Hebungen, Seismizität und Vulkanismus vorhanden, während Daten zur Identifizierung von aktiven Störungszonen teilweise vorliegen. Nur punktuell vorhanden sind Daten über das Alter des Grundwassers im tieferen Untergrund.

Bei der Anwendung von Ausschlusskriterien ist zu beachten, dass diese im Verfahren durchgehend wirksam bleiben, d. h. eine während des Verfahrens verbesserte Datenlage kann auch noch im weiteren Verlauf des Verfahrens zum Ausschluss von Flächen führen.

Bei den Daten zu geologischen Strukturen, die bei der Suche nach günstigen geologischen Gesamtsituationen von besonderem Interesse sind, sind Unterschiede in Quantität und Qualität festzustellen:

- Salzstrukturen

Die Daten basieren zum größten Teil auf Bohrungen und Ergebnissen von geophysikalischen Messungen der Erdöl-/Erdgasindustrie sowie auf Erfahrungen des Kali- und Steinsalzbergbaus. Pauschal kann gesagt werden, dass alle Salzstrukturen, auch sehr kleine, bekannt sind. Alle Strukturen werden von mindestens einer Profillinie seismischer Messungen gequert, und die meisten wurden durch eine oder mehrere Bohrungen bis in den oberen Bereich der Salzstruktur erkundet.

Durch aufwändige geophysikalische Spezialbearbeitungen könnten begrenzt Verbesserungen der Aussagequalität erreicht werden.

- Tonformationen

Die Informationen zu Tonformationen beruhen ebenso wie bei Salzstrukturen im Wesentlichen auf Bohrdaten und geophysikalischen Messungen der Erdöl-/Erdgasindustrie. Dabei ist ein „Datengefälle“ zwischen Nord- und Süddeutschland zu beobachten. In Norddeutschland ist die Datendichte nicht immer homogen, aber

insgesamt sehr groß. Für Ausschluss- und Abwägungskriterien verwendbare Daten liegen größtenteils bereits in aufbereiteter Form vor.

In Süddeutschland ist die Datendichte sehr heterogen und insgesamt wesentlich geringer. Nur einige Gebiete, wie z. B. Oberrheingraben und Molassebecken, lassen flächenhafte Darstellungen geologischer Strukturen zunächst in kleinem Kartenmaßstab (1:500.000, 1:200.000) zu (siehe Abbildung 3.1). Für Detailuntersuchungen ist mit einem erheblichen Aufwand zu rechnen.

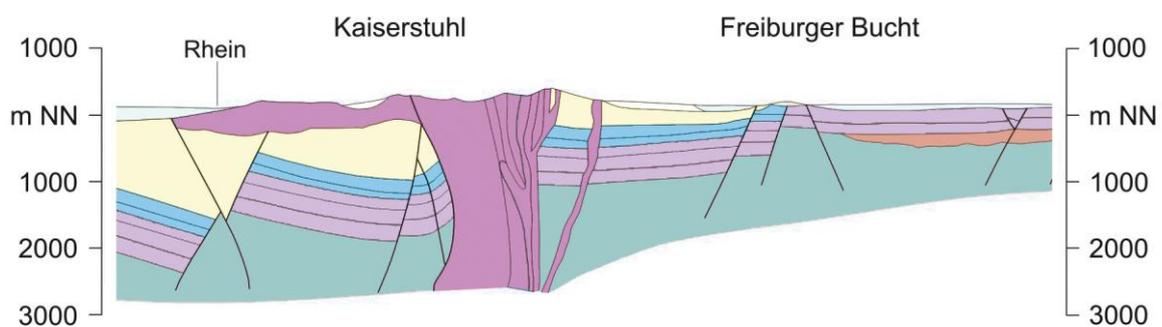


Abbildung 3.1: Beispiel für ein Bruchschollenmuster (geologisches Profil des südlichen Oberrheingrabens)

- Kristallingesteine

Sehr gering ist die Datendichte bei Kristallingesteinen. Sie ist in direktem Maße abhängig von ehemaligem und jetzigem Lagerstätteninteresse. Meist wird zur flächendeckenden Charakterisierung größerer Kristallingebiete von aufgeschlossenen Vorkommen auf Bereiche in größerer Tiefe extrapoliert und versucht, die Daten zu übertragen, wie z. B. vom Schwarzwald zum Kristallin im Untergrund der Nordschweiz. Dies ist, wie gerade dieses Beispiel gezeigt hat, mit erheblichen Ungenauigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Eine flächenhafte Ermittlung von Daten in Kristallingebieten ist daher mit aufwändigen Untersuchungen und erheblichem Zeitaufwand verbunden.

Fazit und Empfehlung

Für die Anwendung von geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in Schritt 1 des Auswahlverfahrens werden Daten benötigt, die mit relativ geringem Aufwand bereit gestellt werden können. Ausnahme bilden in der Regel die Daten zum Alter von Grundwasser in tiefen geologischen Formationen.

Bei den Kriterien zur Abwägung sind dagegen Lücken in der Datenquantität und –qualität feststellbar. Die Schließung dieser Lücken flächendeckend über ganz Deutschland wäre zum Teil mit erheblichem Untersuchungs- und Zeitaufwand verbunden und könnte zu wesentlicher Zeitverzögerung bei der Standortsuche führen. Andererseits widerspricht der Ausschluss von Gebieten allein wegen Kenntnis- und Datendefiziten dem Gerechtigkeitsprinzip. Der AkEnd empfiehlt zur Auflösung dieses Dilemmas folgendes Vorgehen:

Der AkEnd empfiehlt, dass alle in Deutschland ermittelten relevanten geowissenschaftlichen Daten, die für das Auswahlverfahren für Endlagerstandorte benötigt werden, zur Verfügung gestellt werden. Dies betrifft zum Teil Daten aus der Industrie, wobei deren Schutzinteressen berücksichtigt werden müssen, und zum Teil die bei Bundes- und Landesbehörden und -institutionen vorliegenden Daten.

In Schritt 1 des Verfahrens werden die Gebiete ausgeschlossen, in denen die vorhandenen Kenntnisse und Daten zum Ausschluss ausreichen.

In Schritt 2 wird geprüft, ob die vorhandene Datenbasis eine Identifizierung von mindestens fünf Teilgebieten mit besonders günstigen Voraussetzungen zulässt. Ist dies der Fall, stehen genügend Alternativen für die darauf folgenden Verfahrensschritte zur Verfügung. Gebiete mit erheblichen Kenntnis- und Datenlücken werden zurückgestellt.

Können in Schritt 2 nicht mindestens fünf Teilgebiete mit einer ausreichenden Datenbasis ermittelt werden, muss entschieden werden, ob weitere Daten erhoben und welche Gebiete mit unzureichender Datenbasis weiter untersucht werden sollen. Dabei müssen wirtschaftliche Aspekte, wie auch die Erwartungen an die günstigen

geologischen Eigenschaften einfließen, die auf Grund der vorhandenen Informationen begründet werden können.

3.3.2 Sozialwissenschaftliche Daten

Spezifische Datengrundlagen, die sich auf die Suche nach einem Endlager beziehen, sind in den Sozialwissenschaften nicht vorhanden. Aus diesem Grund hat der AkEnd mehrere Aufträge angeregt, um relevante Daten zu erhalten.

Es handelt sich zum einen um zwei repräsentative Umfragen, die die Einstellung der Bevölkerung zu Fragen der Partizipation, dem Regionsbezug und der Endlagerung erfasst haben [STOLLE 2002]. Darüber hinaus wurden Studien zur Öffentlichkeitsbeteiligung und zur Regionalentwicklung in Auftrag gegeben.

Des Weiteren ist eine Reihe von Arbeiten zur Beteiligung der Bevölkerung in anderen Handlungsbereichen auch für die Suche nach einem Endlager von Bedeutung. Dabei wurden die Erfahrungen zur Entwicklung von Beteiligungsmodellen bei Altlasten, Abfalldeponien und sonstigen Großprojekten ausgewertet.

Es muss allerdings betont werden, dass die meisten sozialwissenschaftlichen Daten erst mit Beginn der Suche nach Endlagerstandorten erhoben werden können. Das bezieht sich selbstverständlich auf die Beteiligungsbereitschaft der Bevölkerung, aber auch auf die Erhebung von Entwicklungspotenzialen und den Einfluss, den ein mögliches Endlager auf die Entwicklung dieser Potenziale haben könnte.

Anders stellt sich die Datenlage bei den planungswissenschaftlichen Kriterien dar. Die für die Anwendung dieser Kriterien notwendigen Daten liegen für ganz Deutschland bei den zuständigen Behörden und Ämtern flächendeckend vor.

4 Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten

Entsprechend der in Kapitel 3.2 dargestellten Verfahrensstruktur ist das Auswahlverfahren in Verfahrensschritte gegliedert, deren Abarbeitung durch die Anwendung geo- und sozialwissenschaftlicher Kriterien gesteuert wird. Die Darstellung der Kriterien ist Gegenstand dieses Kapitels.

Sowohl im geo- als auch im sozialwissenschaftlichen Bereich sind Ausschlusskriterien entwickelt worden. Auf Basis der Rahmenbedingungen wurden Mindestanforderungen an die geologische Situation der zu bewertenden Gebiete abgeleitet. Darüber hinaus sind zur Abwägung von Befunden in den geo- und sozialwissenschaftlichen Bereichen Abwägungskriterien entwickelt worden.

4.1 Geowissenschaftliche Kriterien

4.1.1 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.

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

Endlagersystem: Das Endlagersystem besteht aus dem Einlagerungsbereich und den geologischen Barrieren.

4.1.2 Ausschlusskriterien

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

Damit sind Gebiete gemeint, in denen das Barriersystem eines in einer Tiefe von etwa 1.000 m befindlichen Endlagers während des Isolationszeitraumes wesentlich beeinträchtigt oder dessen Entwicklung nach Maßstäben der praktischen Vernunft nicht prognostiziert werden kann.

Für die Ausweisung dieser Gebiete wurden folgende Auswirkungen von geologischen und geophysikalischen Vorgängen auf ein Endlager mit seinem Barriersystem betrachtet:

- Erosion der geologischen Formationen mit Freilegung des Endlagers
- Reduzierung der geologischen Barriere
- Veränderung der Grundwasserverhältnisse
- Schaffung von Wegsamkeiten durch Störungen und Klüfte

- Gas-/Lösungszutritte ins Endlager
- Magmenzutritt ins Endlager
- Überdeckung durch Oberflächengewässer

Die Beurteilbarkeit der Auswirkungen aller Entwicklungen 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 AkEnd folgende fünf Kriterien, deren Nichterfüllung zum Ausschluss von Gebieten im Standortauswahlverfahren führt, identifiziert:

- **Großräumige Vertikalbewegungen:** Die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter im Mittel pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum aufweisen.
- **Aktive Störungzonen:** Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungzonen vorliegen.
- **Seismische Aktivität:** Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.
- **Vulkanische Aktivität:** In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.

Die Berücksichtigung des folgenden fünften Kriteriums (Grundwasseralter) erfordert eine umfassende Gesamtinterpretation der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Grundwasserverhältnisse an einem Standort. Ein hohes Grundwasseralter deutet auf eine geringe Grundwasserbewegung und damit auf eine günstige geologische Gesamtsituation hin. Die notwendigen Detailinformationen liegen allenfalls zufällig an einzelnen Standorten vor. Es kann jedoch bei Vorliegen bestimmter Umweltisotope (Tritium, Kohlenstoff-14), die relativ gut erhebbar und interpretierbar sind, auf junge Grundwässer geschlossen werden. Der Umkehrschluss ist jedoch nicht möglich (siehe Kapitel 4.1.2.5).

- **Grundwasseralter:** Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen. Die Grundwässer dürfen von daher kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 enthalten.

Bei der Herleitung dieser Kriterien wurde die Abhängigkeit vom jeweiligen Kenntnisstand und der Datenbasis deutlich. Zusätzlich zeigte sich, dass die mit den Kriterien verbundenen Auswirkungen 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 fünf genannten Kriterien eine Überprüfung der Anwendbarkeit in Bezug auf die Abgrenzung einzelner Gebiete durchzuführen.

4.1.2.1 Großräumige Vertikalbewegungen

Basis für eine Benennung von Gebieten mit Vertikalbewegungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr in Deutschland bilden die Karten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) 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 Grundwasserabsenkungen 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 Auswahl eines Endlagerstand-

ortes auszuschließen sind, werden zunächst im Wesentlichen die großräumigen natürlichen und nicht reversiblen Vertikalbewegungen herangezogen.

Tektonische Hebungen von einem Millimeter pro Jahr würden - bei Annahme der Konstanz und bei gleichzeitiger Erosion - ein in 1.000 m Tiefe errichtetes Endlager in einer Million Jahren freilegen. Für den AkEnd gelten daher Gebiete mit großräumigen natürlichen Hebungen in dieser Größenordnung 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.

4.1.2.2 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 einerseits 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 AkEnd 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
- an denen nachweislich Fluidtransport stattfindet.

Als Indikatoren für diese tektonischen Bewegungen gelten neben heute an der Erdoberfläche messbaren und im Gesteinsverband erkennbaren Versatzbeträgen auch Mächtigkeitsunterschiede beidseits der Störungen in gleichen Formationen.

Die mutmaßlichen Breiten von Störungszonen sind individuell abzuschätzen. Da eine exakte Zonenbreite in der Regel nicht festlegbar ist, sollte für eine Ausweisung von Gebieten mit besonders ungünstigen Verhältnissen ein "Sicherheitsaufschlag" von einigen Kilometern beidseits der erkannten Zone festgelegt werden.

4.1.2.3 Seismische Aktivität

Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die "Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)" (siehe Abbildung 4.1). Dabei wurden Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensitäten abgegrenzt. Als Grundlage dafür dienten der historische deutsche Erdbebenkatalog, der alle Erdbeben in Deutschland seit dem Jahr 800 aufführt, die Karte der seismotektonischen Einheiten Deutschlands und die Verteilung der beobachteten Schadenbeben in Deutschland. Mit eingeflossen in die Zonenkarte sind auch Annahmen über maximal mögliche Beben in den entsprechenden Gebieten.

Bei der Abgrenzung des für die Anlage eines Endlagers offensichtlich ungünstigen Gebietes muss berücksichtigt werden, dass sich die Zonierung auf Schäden an Oberflächenbauwerken bezieht. Die Auswirkungen von Erdbeben auf Untertagebauwerke werden dagegen im Allgemeinen als geringer eingeschätzt.

Der AkEnd kam vor diesem Hintergrund überein, dass eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete erst ab Erdbebenzone 2 der DIN 4149 sinnvoll ist. Dies entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0 an der Oberfläche. Ab dieser Intensität treten merkliche Schäden an Gebäuden auf. Beben mit kleineren Intensitäten haben abhängig vom Gebäude nur geringe bzw. keinerlei Schadenswirkung. Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden.

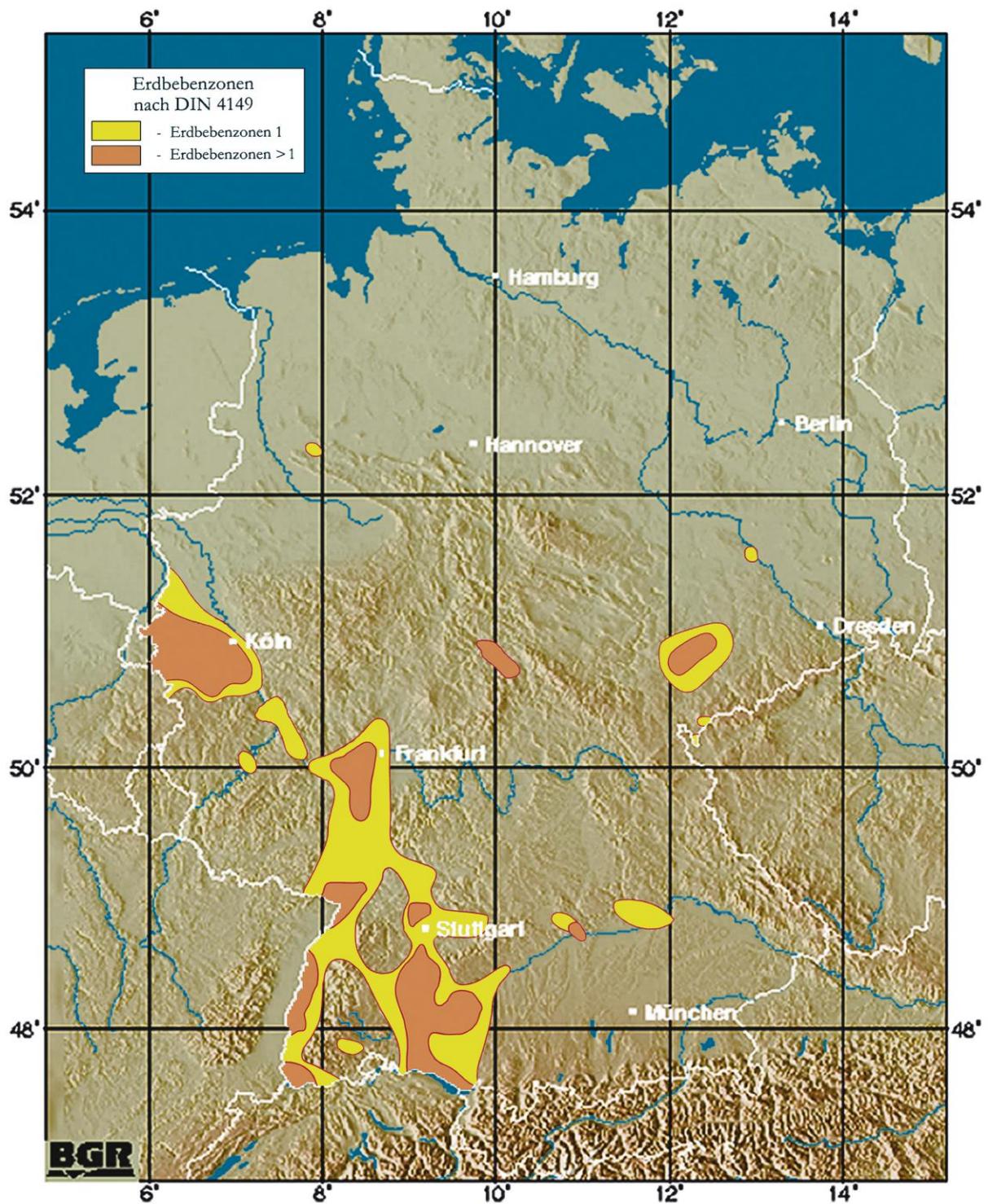


Abbildung 4.1: Karte der Erdbebenzonen Deutschlands nach DIN 4149 (Quelle: BGR)

Die seismische Aktivität eines Gebietes ist eng verknüpft mit dem Auftreten aktiver Störungen. Bei allen Angaben über die seismische Gefährdung eines Gebietes muss

klar sein, dass eine Prognose, basierend allein auf den Erdbebenbeobachtungen ab dem Jahre 800, über einen Zeitraum von einer Million Jahren nicht möglich ist.

4.1.2.4 Vulkanische Aktivität

Grundlage für die Einschätzung der vulkanischen Gefährdung in Deutschland bildete eine Expertenumfrage [JENTZSCH 2001]. Darin sollten folgende Fragen beantwortet werden:

1. Bisher wurden die Eifel und das Vogtland/Egergraben als Gebiete mit quartärem Vulkanismus benannt. Können in diesen Gebieten bei einem Prognosezeitraum von einer Million Jahren vulkanische Aktivitäten auftreten, muss die Aussage eingeschränkt werden oder müssen weitere Gebiete betrachtet werden?
2. Mit welcher Wahrscheinlichkeit muss mit Wiederaufleben des Vulkanismus im Zeitraum von einer Million Jahren gerechnet werden?
3. Wo kann man das Zentrum eines möglichen Ausbruchs annehmen, wie groß kann der Radius der direkten Auswirkungen sein?
4. Welche weiteren Auswirkungen wären möglich?
5. Wie groß könnte die betroffene Fläche sein?
6. Wie wird die vulkanische Gefährdung in anderen Ländern behandelt?

Alle befragten Experten gaben an, dass in Deutschland außer den Gebieten Eifel und Vogtland/Egergraben keine weiteren Gebiete mit einer vulkanischen Gefährdung benannt werden müssen (siehe Abbildung 4.2).

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



Abbildung 4.2: Karte der ausgewiesenen Gebiete in Deutschland mit einer vulkanischen Gefährdung. 1 = Vogtland/Egergraben, 2 = Eifel (Quelle: BGR)

Im Bereich des Vogtlands und in der angrenzenden Region Nordwestböhmens besteht nach dem vorliegenden Kenntnisstand für den Prognosezeitraum eine Wahr-

scheinlichkeit von etwa 50 % für das Wiederaufleben des Vulkanismus im westlichen Teil des Egergrabens.

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 (reißende Schlamm- und Schuttströme) können Täler über viele Kilometer (in der Eifel bis ca. 10 km) auffüllen.

Auch wenn ein Magmenzutritt in ein 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 Barrierewirkung 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 [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 AkEnd legte fest, dass eine Berücksichtigung 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.

4.1.2.5 Grundwasseralter

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 erforderlichen 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 δ (Deuterium) zu δ (Sauerstoff-18)² charakterisiert die Isotopenzusammensetzung heutiger Niederschläge und damit möglicherweise auch junger, aus Niederschlägen gebildeter Grundwässer. Von der "global meteoric water line" deutlich abweichende Verhältnisse von δ (Deuterium) zu δ (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

- ² δ (Deuterium) und δ (Sauerstoff-18) sind auf einen Standard bezogene Konzentrationsangaben.

Einflussfaktoren bekannt sind, sind Rückschlüsse auf das Grundwasseralter aus dem Verhältnis von δ (Deuterium) zu δ (Sauerstoff-18) möglich.

Demgegenüber sind die Konzentrationen von Tritium und Kohlenstoff-14 recht zuverlässige Indikatoren für - gemessen am geforderten Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren - junges Grundwasser. Das Vorhandensein von Tritium bzw. Kohlenstoff-14 kennzeichnet Grundwässer mit einem Alter von Jahrzehnten bzw. wenigen Jahrzehntausenden. Daraus folgt:

- Das Grundwasser im Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Standortes (einer Region) sowie in 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.

4.1.3 Mindestanforderungen

Zur Identifizierung von Gebieten, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Teufenlage erfüllen können, wurden Mindestanforderungen aufgestellt. Deren Nichteinhaltung führt zum Ausschluss der Gebiete aus dem Verfahren. Weiter im Verfahren verbleiben die Gebiete, welche die Mindestanforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation erfüllen. Liegt zur Prüfung einer Mindestanforderung keine ausreichende Datenbasis vor, so verbleiben die Gebiete vorerst im Verfahren. Die Entscheidung, wann und ob die fehlenden Daten erhoben werden sollen, wird in späteren Verfahrensschritten getroffen. Die Prüfung auf Einhaltung der Mindestanforderungen erfolgt in allen Verfahrensschritten.

Die Mindestanforderungen werden wie folgt aus den Rahmenbedingungen abgeleitet:

Zur Gewährleistung der Isolation radioaktiver Abfälle darf nur eine geringe Grundwasserbewegung im Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorhanden sein. Diese wird von der Gebirgsdurchlässigkeit und dem vorhandenen Druckgefälle bestimmt. Bei Gesteinstypen mit sehr kleinen Gebirgsdurchlässigkeiten kann von vornherein von einer geringen Grundwasserbewegung ausgegangen werden. Kommen in einem Gebiet vorwiegend Gesteinstypen mit Gebirgsdurchlässigkeiten größer 10^{-10} m/s vor, so ist die geforderte geringe Grundwasserbewegung nicht zu erwarten. Als eine Mindestanforderung zur Begrenzung des Grundwasserstroms gilt daher, dass eine geologisch günstige Situation überwiegend Gesteine aufweisen muss, die aufgrund kleiner Gebirgsdurchlässigkeiten nur eine begrenzte Grundwasserbewegung erlauben. Die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs darf daher höchstens 10^{-10} m/s und seine Mächtigkeit muss mindestens 100 m betragen.

Die flächenhafte Ausdehnung der betreffenden Gesteinskörper muss zudem so groß sein, dass die Realisierung eines sicheren Endlagers möglich ist. Unter Berücksichtigung der Wärmeentwicklung der Abfälle und infrastruktureller Erfordernisse eines Endlagerbergwerks werden hierfür z. B. im Salz 3 km^2 und im Ton oder Granit 10 km^2 benötigt.

Damit das Endlager vor naturbedingten Einwirkungen von der Erdoberfläche hinreichend geschützt ist, muss die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches mindestens 300 m betragen. Der Bergwerksbetrieb in größeren Teufen erfordert aufgrund entsprechend zunehmender Gebirgstemperaturen hohen technischen Aufwand. Deshalb darf das Endlagerbergwerk nicht tiefer als 1.500 m liegen.

Aus gebirgsmechanischer Sicht darf das Wirtsgestein nicht gebirgsschlaggefährdet sein, um die notwendige Sicherheit bei Errichtung und Betrieb eines Endlagers zu gewährleisten.

Die festgestellten sicherheitsbezogenen geowissenschaftlichen Sachverhalte und damit auch die Wirksamkeit der geologischen Barrieren müssen für den Zeitraum Bestand haben, der Maßstab für die Sicherheitsbewertungen ist. Daher dürfen keine

Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

Die Kriterien zu den Mindestanforderungen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst:

Tabelle 4.1: Mindestanforderungen

Mindestanforderung
Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.
Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen.
Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (z. B. ca. 3 km ² in Salz bzw. von 10 km ² in Ton oder Granit).
Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.
Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

4.1.4 Ermittlung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen

4.1.4.1 Allgemeine Anforderungen und Abwägungsprozess

Der AkEnd 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 Jahren 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 2 geforderten übergeordneten Rahmenbedingungen der Endlagerung erfüllt werden können.

Allgemeine Anforderungen an Endlagerstandorte

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:

- **Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau**

Forderung nach geringer Migration von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich, langen Grundwasserlaufzeiten und Radionuklidtransportzeiten

- **Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich**

Forderung nach großem Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, großen Sicherheitsabständen zu wasserführenden Formationen und Sicherheit bei Versagen einzelner Barrieren

- **Gute räumliche Charakterisierbarkeit**

Forderung nach hoher Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung, großer Planungssicherheit für das Endlagerbergwerk und geringem Erkundungsaufwand

- **Gute Prognostizierbarkeit**

Forderung nach hoher Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung für lange Zeiträume, guter Begründbarkeit der Szenarien zur Schadstofffreisetzung und -ausbreitung und Reduzierung der Unsicherheiten

- **Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen**

Forderung nach Minimierung von Schädigungen der Barrierensysteme auf Grund des Baus und Betriebs des Endlagerbergwerks

- **Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten**

Forderung nach einem robusten Verhalten der Barrierengesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Beanspruchung, d. h. Forderung nach geringer Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Wasserwegsamkeiten oder nach hohem Selbstheilungsvermögen

- **Gute Gasverträglichkeit**

Forderung nach Beherrschung der Gasentwicklung aus den Abfällen, so dass keine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu besorgen ist

- **Gute Temperaturverträglichkeit**

Forderung nach Reduzierung der Auswirkungen des Wärmeeintrages auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und Verhinderung einer Beeinträchtigung durch thermische oder thermomechanische Belastungen

- **Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden**

Forderung nach guten Sorptionseigenschaften der Gesteine für Radionuklide

- **Günstige hydrochemische Verhältnisse**

Forderung nach Reduzierung von Freisetzung und Transport von Radionukliden

Inwieweit die allgemeinen Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation eingehalten werden, wird mit Hilfe von Abwägungskriterien beurteilt. Dazu werden den allgemeinen Anforderungen Eigenschaften, d. h. charakteristische Standort-/Grundwasser-/Gesteinsmerkmale, zugeordnet und in Kriterien umgesetzt. Die Kriterien stellen die logische bzw. mathematische Beziehung zwischen Bewertungsmaßstab und zugehöriger Beurteilungsgröße her. Für ihre Ableitung 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 regionalgeologischen Kenntnisse für ganz Deutschland sind nicht einheitlich. Dieser Sachverhalt muss im Auswahlverfahren berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass die eigentlich heranzuziehenden Bewertungsgrößen aus messtechnischen Gründen nicht erhoben oder wegen fehlender oder unzureichender Daten nicht ermittelt werden können. In diesem Fall müssen stellvertretend Indikatoren herangezogen werden, um eine entsprechende Bewertung mit hinreichender Zuverlässigkeit vornehmen zu können.

Indikatoren

Indikatoren sind Ersatzgrößen, die zur Beurteilung herangezogen werden, wenn die zu prüfenden Eigenschaften nicht direkt ermittelt werden können oder noch nicht ermittelt worden sind. Folgendes Beispiel soll die Anwendung von Indikatoren verdeutlichen:

Angaben zur Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers als Maß für die Anforderung „langsamer Transport durch Grundwasser“ liegen in der Regel nicht flächendeckend vor. Wenn, wie im Fall der Endlagerung, eine sehr geringe Abstandsgeschwindigkeit gefordert wird, ergibt sich die Schwierigkeit einer direkten und repräsentativen Messung. Die charakteristischen hydraulischen Grundwasser- und Gesteinsmerkmale für die o. g. Anforderung sind ein geringer hydraulischer Gradient sowie eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit und effektive Porosität des geologischen Systems. Sind diese charakteristischen Größen bekannt, kann die Abstandsgeschwindigkeit modellhaft abgeschätzt werden. Für die Gebirgsdurchlässigkeit und die Porosität liegen in der Regel Messgrößen flächendeckend nicht vor. Hier helfen Erfahrungswerte mit vergleichbaren Gesteinstypen weiter, die als Indikatoren herangezogen werden können und eine Abschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit und Porosität erlauben. Gesteinstypen, die auf eine Gebirgsdurchlässigkeit von deutlich kleiner als 10^{-10} m/s schließen lassen und keine durchgängigen Risse (Klüfte) aufweisen, stellen einen Indikator für Abstandsgeschwindigkeiten von kleiner als 1 mm pro Jahr dar.

Der Prozess der Abwägung

Nachdem in Verfahrensschritt 1 diejenigen Bereiche aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen worden sind, die aus offensichtlichen geowissenschaftlichen Gründen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle nicht in Frage kommen (siehe Kapitel 4.1.2 und 4.1.3), werden im Verfahrensschritt 2 Teilgebiete mit besonders günstigen Voraussetzungen für die Endlagerung ermittelt. Ihre Identifizierung erfolgt im Zuge eines Abwägungsprozesses, der folgende Elemente umfasst:

- Die Prüfung mit Hilfe von Abwägungskriterien (siehe Kapitel 4.1.4.2 bis 4.1.4.11), inwieweit die allgemeinen Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation bzw. die zugehörigen Kriterien durch die betrachteten Teilgebiete erfüllt werden.
- Die unterschiedliche Gewichtung der in die Identifizierung besonders günstiger Teilgebiete insgesamt einfließenden Anforderungen und Kriterien nach ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit.
- Die Zusammenführung (Aggregation) der Ergebnisse der gewichteten Einzelkriterien zur Gesamtaussage, welche der betrachteten Teilgebiete als besonders günstig und im Rahmen der Aussagesicherheit als sicherheitstechnisch gleichwertig anzusehen sind und welche nicht.

Um die Einstufung "besonders günstig" zu rechtfertigen, muss ein Teilgebiet unter Einbeziehung aller Kriterien im Vergleich mit anderen Teilgebieten folgende Vorteile aufweisen:

- Höhere Zuverlässigkeit hinsichtlich der Einschätzung des Isolationsvermögens,
- geringere Unsicherheit in der Beurteilung der geforderten Eigenschaften und
- Vorhandensein größerer Sicherheitsreserven.

Abwägungskriterien

Im Zuge der Abwägung wird für die betrachteten Teilgebiete der Grad der Erfüllung der in den Abwägungskriterien gefassten Anforderungen bestimmt. Dazu sind für alle Kriterien auf Grundlage von Sicherheitsbetrachtungen ordinal skalierte Erfüllungsfunktionen für die zu prüfenden Sachverhalte mit den drei (ausnahmsweise auch nur zwei) Bewertungsstufen "günstig", "bedingt günstig" und "weniger günstig" abgeleitet worden. Jedem Teilgebiet werden für jedes Kriterium anhand der dazu vorliegenden geowissenschaftlichen Informationen und Befunde eine der drei (ausnahmsweise zwei) Bewertungsstufen zugeordnet. Eine zusammenfassende Darstellung der Abwägungskriterien mit den Erfüllungsfunktionen enthält Tabelle 4.3.

Gewichtung der allgemeinen Anforderungen

Die Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation bzw. die entsprechenden mit den Abwägungskriterien zu bewertenden Sachverhalte sind für die Langzeitsicherheit eines Endlagers und den erfolgreichen Nachweis der Langzeitsicherheit von unterschiedlicher Bedeutung. Dies muss bei der Zusammenführung der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung zu einer Gesamtbeurteilung berücksichtigt werden. Der AkEnd unterscheidet daher drei Gewichtungsgruppen, denen die o. g. Anforderungen (und die zugehörigen Kriterien) wie folgt zugeordnet werden:

Gewichtungsgruppe 1 - Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

- kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau
- günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- gute räumliche Charakterisierbarkeit hinsichtlich der gesuchten Eigenschaften
- gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Gewichtungsgruppe 2 - Absicherung des Isolationsvermögens

- günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen
- geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

Gewichtungsgruppe 3 - Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

- gute Gasverträglichkeit
- gute Temperaturverträglichkeit
- hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden
- günstige hydrochemische Verhältnisse

Insbesondere zur Ermittlung der Eigenschaft „günstige hydrochemische Verhältnisse“ müssen standortspezifische Kenntnisse und Angaben zur Endlagerkonzeption vorliegen, die frühestens im Verfahrensschritt 4 bereitgestellt werden (siehe Kapitel 4.1.4.11).

Gewichtung und Zuordnung der Anforderungen und Kriterien zu den Gewichtungsgruppen beruhen auf der erfahrungsbasierten Einschätzung der AkEnd-Mitglieder.

Die Gesamtgüte der geologischen Gesamtsituation wird nach dieser Zuordnung vor allem durch die Güte des Isolationsvermögens und die Zuverlässigkeit des Nachweises (Gewichtungsgruppe 1) bestimmt. Das Isolationsvermögen wird dabei charakterisiert durch die Grundwasserbewegung und die Konfiguration der sicherheitsrelevanten Gesteinskörper (Mächtigkeit der Barrierengesteine, Umschließungsgrad, Tiefenlage und Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial). Die räumliche Charakterisierbarkeit und die Prognostizierbarkeit der geologischen Gesamtsituation bestimmen dagegen die Zuverlässigkeit des Nachweises.

Die in Gewichtungsgruppe 2 zusammengefassten Anforderungen (günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen, geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten) dienen der Absicherung des Isolationsvermögens der geologischen Gesamtsituation. Sie gehen in die Gesamtbewertung mit geringerem Gewicht als die Kriterien der Gewichtungsgruppe 1 ein.

Den der Gewichtungsgruppe 3 zugeordneten weiteren Anforderungen (gute Gasverträglichkeit, gute Temperaturverträglichkeit, hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden, günstige hydrochemische Verhältnisse) bzw. zugehörigen Kriterien kommt bei der Bewertung der Gesamtgüte das geringste Gewicht zu. Ihre sicherheitstechnische Bedeutung kann überwiegend erst im Zusammenhang mit der detaillierten Anlagenplanung und auf Basis standortspezifischer Erkundungsergebnisse beurteilt werden.

Aggregation

Nach Anwendung der Abwägungskriterien liegt für jedes der betrachteten Teilgebiete ein umfangreicher Satz von Einzelbewertungen vor. Damit die Kriterien mit der beabsichtigten Gewichtung in das Gesamtergebnis einfließen und die angestrebte Unterscheidung zwischen besonders günstigen und nicht besonders günstigen Teilgebieten erlauben, wird wie folgt vorgegangen:

Die Anforderungen und Kriterien der Gewichtungsgruppe 1 erhalten das vorgesehene Gewicht bei der zusammenfassenden Beurteilung dadurch, dass die gesuchten besonders günstigen Teilgebiete diese Anforderungen bzw. Kriterien in besonders hohem Maße erfüllen müssen. Das ist dann der Fall, wenn sie bei den Kriterien dieser Gruppe die Wertung „günstig“, allenfalls vereinzelt die Wertung "bedingt günstig" erhalten. Die Anwendung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 führt zur Differenzierung der Gesamtbewertung, wenn sich diejenigen Teilgebiete, die in Gewichtungsgruppe 1 annähernd gleich günstig abschneiden, hinsichtlich der Erfüllung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 unterscheiden. "Besonders günstige" Teilgebiete müssen auch in Gewichtungsgruppe 2 gute Ergebnisse aufweisen. Entsprechendes gilt hinsichtlich der Bedeutung der Kriterien in Gewichtungsgruppe 3.

Der AkEnd hat für die Aggregation der Einzelergebnisse der Abwägungskriterien keine formalisierte Regel aufgestellt. Wegen der Heterogenität der in die Bewertung einfließenden Aspekte und wegen der zum Zeitpunkt der Abwägung gegebenen Informationslage hält er es vielmehr für geboten, die Zusammenführung der Einzelbewertungen aus den drei Gewichtungsgruppen verbal argumentativ vorzunehmen.

Ergebnis dieses Prozesses sind die identifizierten Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die Endlagerung.

Die nachstehend aufgeführten Tabellen 4.2 und 4.3 geben eine zusammenfassende Darstellung der Inhalte aus den folgenden Kapiteln 4.1.4.2 – 4.1.4.11 in Bezug auf Anforderungen, Kriterien, bewertungsrelevante Eigenschaften des Kriteriums, die Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. des Indikators und die Abwägungskriterien.

Tabelle 4.2: Gewichtungsgruppen, Anforderungen und Kriterien

Anforderung	Kriterium
Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises	
1. Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau	<p>Die Abstandsgeschwindigkeit sollte möglichst gering, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr, sein.</p> <p>Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen.</p> <p>Der effektive Diffusionskoeffizient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte möglichst gering sein (kleiner 10^{-11} m²/s).</p>
2. Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich	<p>Die barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen über eine Mächtigkeit verfügen, die eine Isolation der Radionuklide in der Größenordnung von einer Million Jahren bewirken.</p> <p>Der Endlagerbereich bzw. der Wirtsgesteinskörper sollte von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs umschlossen sein.</p> <p>Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte möglichst groß sein.</p> <p>Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine räumliche Ausdehnung verfügen, die größer ist als das für das Endlager rechnerisch erforderliche Volumen.</p> <p>Der spezifische hydraulische Gradient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein (kleiner 10^{-2}).</p>
3. Gute räumliche Charakterisierbarkeit	<p>Die Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften sollten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein.</p> <p>Die geologische Einheit sollte eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Deren Ausmaß wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik.</p> <p>Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen der Schichten mit unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften aufweisen.</p> <p>Günstig sind Flächen, in denen die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind.</p>
4. Gute Prognostizierbarkeit	<p>Die Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.</p>
Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens	
5. Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	<p>Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone um die Endlager Hohlräume sollte möglichst gering sein.</p>

Anforderung	Kriterium
6. Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	<p>Die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit sollte gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein.</p> <p>Die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar sein.</p> <p>Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen.</p> <p>Risse/Risssysteme im Gestein sollten bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen sein.</p> <p>Risse/Risssysteme im Gestein sollten nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt sein.</p>
Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften	
7. Gute Gasverträglichkeit	<p>Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.</p> <p>Der Druckaufbau durch die erwartete Gasbildung der Abfälle sollte möglichst gering sein.</p>
8. Gute Temperaturverträglichkeit	<p>Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen kleiner 100 °C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen.</p> <p>Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.</p>
9. Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden	<p>Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine sollte möglichst groß sein; der Kd-Wert für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide sollte größer oder gleich 0,001 m³/kg sein.</p> <p>Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten möglichst hohe Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche aufweisen.</p>
10. Günstige hydrochemische Voraussetzungen	<p>Das tiefe Grundwasser in Wirtsgestein und im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll sich mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht befinden.</p> <p>Im Bereich des Tiefenwassers sollte ein pH-Wert von 7-8 vorliegen.</p> <p>Im Bereich des Tiefenwassers sollten günstige Redoxbedingungen vorliegen.</p> <p>Der Gehalt an Kolloiden im Tiefenwasser sollte möglichst gering sein.</p> <p>Der Gehalt an Komplexbildnern und die Karbonatkonzentration im Tiefenwasser sollten gering sein.</p>

Tabelle 4.3: Erfüllungsfunktionen für geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Anforderung: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau (Gewichtungsgruppe 1); (Kapitel 4.1.4.2)				
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 - 1	> 1
Grundwasserangebot	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² - 10 ⁻¹⁰	
Diffusionsgeschwindigkeit	effektiver Diffusionskoeffizient [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Anforderung: Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich (Gewichtungsgruppe 1); (Kapitel 4.1.4.3)				
Barrierenwirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 -100
	Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig	
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300- 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindestflächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km ² und Ton 10 km ²)]	> 2-fach	2-fach	< 2-fach
Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial	Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10 ⁻¹⁰ m/s und effektiver Porosität 0,1)	<< 10 ⁻²	etwa 10 ⁻²	>> 10 ⁻²
Anforderung: Gute räumliche Charakterisierbarkeit (Gewichtungsgruppe 1); (Kapitel 4.1.4.4)				
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Eigenschaften der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	gleichmäßig	kontinuierliche räumliche Veränderungen	diskontinuierliche räumliche Veränderungen

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km), Flexuren	intensiv gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), intensiv gefaltet
	für Salz gilt	große ovale Salzstrukturen		kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstrukturen
Übertragbarkeit der Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd
Anforderung: Gute Prognostizierbarkeit (Gewichtungsgruppe 1); (Kapitel 4.1.4.5)				
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Veränderung der Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
Anforderung: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen (Gewichtungsgruppe 2); (Kapitel 4.1.4.6)				
Neigung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone	Lagebezug der Endlagerteufe zur Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit (Abbildung 4.9: Festgesteine mit nicht bzw. gering kriechfähigem Materialverhalten; Abbildung 4.10: Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten)	Die zu bewertende Teufe liegt unterhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt mäßig (< 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Anforderung: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten (Gewichtungsgruppe 2); (Kapitel 4.1.4.7)				
Veränderbarkeit der Gebirgspermeabilität	Verhältnis repräsentative Gebirgspermeabilität/repräsentative Gesteinspermeabilität [Maß ist die Wasserdurchlässigkeit in m/s]	< 10	≤ 100	> 100
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Die Gebirgsforma- tion/der Gesteins- typ wird unmittl- bar/mittelbar an- hand eines oder mehrerer Erfah- rungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geoge- ner/technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsforma- tion/der Gesteins- typ ist mangels Er- fahrung nicht un- mittelbar/mittelbar als gering durch- lässig bis geolo- gisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsforma- tion/der Gesteins- typ wird un- mittelbar/mittelbar anhand eines Er- fahrungsbereichs als nicht hinrei- chend gering durchlässig identi- fiziert.
	Duktilität des Gesteins	duktil/ plastisch- viskos ausgeprägt	spröde-duktil bis elasto-visko- plastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear- elastisch

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Die Riss-schließung erfolgt aufgrund eines duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Riss-schließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringerung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z. B. Quelldeformationen.	Die Riss-schließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z. B. sprödes Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten auf Grund der Bewertung der einzelnen Indikatoren:		Bewertung überwiegend "günstig": Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "bedingt günstig": Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "weniger günstig": Bildung von dauerhaften sekundären Wasserwegsamkeiten zu erwarten
Anforderung: Gute Gasverträglichkeit (Gewichtungsgruppe 3); (Kapitel 4.1.4.8)				
Gasbildung	Wasserangebot im Wirtsgestein	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	feucht

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Druckaufbau	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	$> 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$< 10^{-10}$
Anforderung: Gute Temperaturverträglichkeit (Gewichtungsgruppe 3); (Kapitel 4.1.4.9)				
Temperaturstabilität des Gesteins	Temperatur, bei der es zu Mineralumwandlungen in den Gesteinen kommt [°C]	> 120	100 - 120	< 100
Thermisch bedingte Sekundärpermeabilität	Ausdehnung der thermomechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume [m]	< 10	10 - 50	> 50
	Zugfestigkeit [MPa] im Nahbereich (etwa 10 m bis 50 m) um Endlager bei einer Kontakttemperatur von 100 °C für Granit Tonstein Steinsalz	> 13 > 8 > 2	≥ 8 ≥ 4 1 - 2	< 8 < 4 < 1
Anforderung: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden (Gewichtungsgruppe 3); (Kapitel 4.1.4.10)				
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Kd-Wert für langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001$ [m ³ /kg]	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	
	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Hohe Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche, wie Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxidhydrate		

4.1.4.2 Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

Als günstig wird bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle die hydrogeologische Situation dann bezeichnet, wenn sowohl das Grundwasserangebot an die Abfälle als auch die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gering ist. Ein geringes Grundwasserangebot begrenzt beispielsweise die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen. Eine geringe Grundwasserbewegung ist Bedingung für einen langsamen advektiven Transport von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Sachverhalt

Die Anforderung "kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau" charakterisiert eine günstige hydrogeologische Situation. Als günstig wird eine Situation dann bezeichnet, wenn sich das Grundwasser in der Endlagerformation nur gering bewegt. Damit sind die Bedingungen für einen geringen Radionuklidtransport durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gegeben. Als Bewertungsgröße für diese Anforderung wird die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers herangezogen. Diese errechnet sich aus der Entfernung, die das Grundwasser in einer Zeiteinheit zurücklegt.

Kriterium: Die Abstandsgeschwindigkeit sollte möglichst gering, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr, sein.

Abwägung: Abstandsgeschwindigkeit im einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

Abstandsgeschwindigkeit in mm/a	< 0,1	0,1 - 1	> 1
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Indikator für das Fehlen einer Grundwasserbewegung ist ein auf Dauer trockenes Gestein.

Für wasserführende Gesteine werden im Folgenden Indikatoren für die langsame Grundwasserbewegung im Hinblick auf die Kriterienentwicklung untersucht.

Indikator: Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinstypen

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.

Die Gebirgsdurchlässigkeit kann nur in situ durch gezielte Untersuchungen 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.

Grundlagen

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 ist für den AkEnd eine systematische Dokumentation und Auswertung der verfügbaren Ergebnisse von in situ durchgeführten Untersuchungen an Gesteinstypen mit relativ geringer Gebirgsdurchlässigkeit durchgeführt worden [APPEL & HABLER 2001 und 2002]. Die dabei erfassten und dokumentierten Durchlässig-

keitsbeiwerte (k_f -Werte) stammen im Wesentlichen aus den Untersuchungsprogrammen der Endlagerung radioaktiver und konventioneller Abfälle. Sie decken insgesamt den Tiefenbereich zwischen 5 m und 9.066 m unter Geländeoberfläche ab, wobei die Werte für Steinsalz ausschließlich aus der vorgesehenen Endlagertiefe zwischen 300 m und 1.500 m unter Geländeoberfläche stammen (maßgeblich für die Tiefenangabe ist die Mitte des Testintervalls).

Auf der Basis von rund 2.650 ausgewerteten Daten ergeben sich für Ton bzw. Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis, die auch in Deutschland in für die Endlagerung ausreichender Ausdehnung vorkommen, sowie für Steinsalz folgende gesteinstyp-übergreifende Ergebnisse:

- Die Durchlässigkeitsbeiwerte aller Gesteinstypen weisen mit Ausnahme von Steinsalz sehr große Bandbreiten (z. T. mehr als zehn Größenordnungen) auf. Die Bandbreiten verschiedener Gesteinstypen überschneiden sich in weiten Bereichen (siehe Tabelle 4.4).
- Im für die Endlagerung vorgesehenen Tiefenintervall von 300 m bis 1.500 m unter der Geländeoberfläche (siehe Kapitel 4.1.3) sind die Bandbreiten der Messwerte bei Mergelstein, Granit und Gneis ebenfalls sehr groß. Bei Tonstein ist die Bandbreite dagegen sogar kleiner als bei Steinsalz. Auch die Medianwerte der Durchlässigkeitsbeiwerte sind bei Steinsalz und Tonstein deutlich kleiner als bei den anderen Gesteinstypen (siehe Tabelle 4.5 und Abbildung 4.3). Der Unterschied ist statistisch signifikant.

Tabelle 4.4: Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen

Gesteinstyp	Mittlere Testtiefe unter Geländeoberfläche (m)	Anzahl Messwerte	Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Werte in m/s)	
			Bandbreite	Medianwert
Steinsalz	300 - 841	75	$9,81 \times 10^{-17} - 2,94 \times 10^{-10}$	$5,50 \times 10^{-14}$
Mergelstein	9 - 1.856	199	$5,00 \times 10^{-14} - 1,00 \times 10^{-03}$	$6,67 \times 10^{-11}$
Ton/Tonstein	5 - 1.474	676	$5,50 \times 10^{-15} - 1,04 \times 10^{-04}$	$1,20 \times 10^{-06}$
Granit	11 - 3.485	891	$2,23 \times 10^{-15} - 1,64 \times 10^{-01}$	$3,16 \times 10^{-08}$
Gneis	15 - 9.066	472	$4,70 \times 10^{-15} - 8,68 \times 10^{-05}$	$3,99 \times 10^{-09}$

Tabelle 4.5: Gebirgsdurchlässigkeit verschiedener Gesteinstypen im Tiefenbereich 300 m bis 1.500 m unter Geländeoberfläche

Gesteinstyp	Mittlere Testtiefe unter Geländeoberfläche (m)	Anzahl Messwerte	Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Werte in m/s)	
			Bandbreite	Medianwert
Steinsalz	300 - 841	75	$9,81 \times 10^{-17} - 2,94 \times 10^{-10}$	$5,50 \times 10^{-14}$
Mergelstein	304 - 1.104	157	$5,00 \times 10^{-14} - 3,00 \times 10^{-05}$	$3,07 \times 10^{-11}$
Ton/Tonstein	313 - 1.474	36	$5,50 \times 10^{-15} - 2,05 \times 10^{-10}$	$9,50 \times 10^{-13}$
Granit	302 - 1.480	605	$2,23 \times 10^{-15} - 4,00 \times 10^{-04}$	$2,80 \times 10^{-08}$
Gneis	301 - 1.498	271	$4,70 \times 10^{-15} - 1,20 \times 10^{-05}$	$3,00 \times 10^{-10}$

Bei differenzierter standort- und tiefenabhängiger Betrachtung der Durchlässigkeitsbeiwerte ergeben sich für die einzelnen Gesteinstypen folgende Ergebnisse:

Erwartungsgemäß sind die Durchlässigkeitsbeiwerte für **Steinsalz** sehr niedrig; die Wertebandbreite ist gering. Mit Steinsalz vergesellschaftete Gesteinstypen, insbesondere Anhydrit, weisen in der Regel deutlich höhere Wasserdurchlässigkeiten auf.

Bei **Ton bzw. Tonstein** ist eine deutliche Abhängigkeit der Durchlässigkeitsbeiwerte von der Tiefe des Testintervalls unter der Geländeoberfläche festzustellen. Oberhalb

von etwa 150 m bis 200 m Tiefe wird die gesamte Bandbreite mit Betonung hoher Werte angetroffen. In der vorgesehenen Endlagertiefe treten dagegen 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. Ein Großteil der hohen Werte gilt für kalkreiche Mergelsteinsfolgen oder Mergelstein mit Kalkbänken.

Charakteristisches Merkmal der Durchlässigkeitsbeiwerte für **Granit** ist die über den gesamten durch Messwerte belegten Tiefenbereich durchgängig große Bandbreite. Nur an einzelnen Standorten treten bevorzugt geringe Werte auf.

Bei **Gneis** ist eine generelle Abnahme der Durchlässigkeitsbeiwerte mit zunehmender 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

Die insgesamt großen Bandbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte aller betrachteten Gesteinstypen außer Steinsalz und die weiten Überschneidungsbereiche zwischen den verschiedenen Gesteinstypen haben 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 können bereits bei der Gesteinsentstehung angelegt werden (z. B. bei magmatischen Gesteinen durch Abkühlung der Gesteinsschmelze) oder 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 300 m bis 1.500 m unter Geländeoberfläche weisen **Steinsalz** und **Tonstein** 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** wirkt sich der Karbonatgehalt, und zwar insbesondere in Gestalt karbonatreicher Einschaltungen (Kalksteinbänke) mit Trennfugen, differenzierend auf die Durchlässigkeit aus. Solche Einschaltungen stellen einen eigenen Gesteinstyp mit erhöhter Durchlässigkeit innerhalb der Mergelsteinsolgen dar. Offene Trennfugen bleiben darin offenbar in allen betrachteten Tiefenbereichen bestehen. Die Eigenschaften von Mergelstein mit geringem Kalkgehalt und ohne solche Einschaltungen ähneln dagegen 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 über den gesamten betrachteten Tiefenbereich, also auch in der vorgesehenen maximalen Endlagertiefe, offen sein. Darüber hinaus werden relativ hohe k_f -Werte durchaus auch in Gesteinsabschnitten ohne optisch deutlich erkennbare Gefügestörungen gemessen.

Konsequenzen für die Ableitung eines Kriteriums zur Gebirgsdurchlässigkeit

Aus den vorliegenden Ergebnissen ergeben sich im Hinblick auf die Ableitung eines Kriteriums "Gesteinstyp als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinskörpern" (in der vorgesehenen Endlagertiefe) folgende Konsequenzen:

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

Tonstein, Mergelstein, Granit und Gneis können 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. Eine eindeutige quantitative Beziehung zwischen Kalkgehalt und k_f -Werten konnte anhand des vorliegenden Datenmaterials nicht nachgewiesen werden.

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 aufwändig. Bei diesen beiden Gesteinstypen bestehen daher erhebliche Probleme hinsichtlich der Identifizierung und der geforderten guten Beschreibbarkeit der günstigen geologischen Gesamtsituation.

Gemäß der in Kapitel 4.1.3 formulierten Mindestanforderung muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-10}$ m/s zugeordnet werden kann. Im Zuge der geowissenschaftlichen Abwägung werden Gesteinstypen mit einer charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-12}$ m/s als "günstig", solche mit einer charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit zwischen 10^{-12} m/s und 10^{-10} m/s als "bedingt günstig" eingestuft. Misst man die zu den einzelnen Gesteinstypen aus dem für ein Endlager möglichen Tiefenintervall vorliegenden Medianwerte und Bandbreiten der k_f -Werte (siehe Tabelle 4.5) an diesen Anforderungen, so ergibt sich folgendes Bild:

Die Gesteinstypen **Steinsalz** und **Tonstein** können zweifellos als Indikatoren für geringe Gebirgsdurchlässigkeit angesehen werden. Bei beiden Gesteinstypen liegen der Medianwert und der weitaus größte Teil der Messwerte unter 10^{-10} m/s. Auch das 95%-Vertrauensintervall der Medianwerte liegt deutlich unterhalb von 10^{-10} m/s (siehe Abbildung 4.3). Die Wahrscheinlichkeit, dass Gesteinskörper dieser Gesteinstypen die Mindestanforderung erfüllen und darüber hinaus im Rahmen der Abwägung (siehe nachfolgend unter Abwägung die Bewertungsfunktion) zumindest als "bedingt günstig" einzustufen sind, ist daher groß. Bei Steinsalz ist sogar die Einstufung als "günstig" wahrscheinlich.

Mergelstein mit geringem Kalkgehalt und insbesondere ohne Kalksteinbänke ist ähnlich zu beurteilen wie Tonstein, wenngleich die niedrigsten der für Mergelstein erfassten k_f -Werte immerhin um eine Größenordnung über denen für Tonstein liegen.

Bei **Granit** und **Gneis** sind die Medianwerte deutlich größer als der gemäß Mindestanforderung höchstzulässige charakteristische k_f -Wert. Die Maximalwerte liegen um ca. sechs bzw. fünf Größenordnungen darüber. Beide Gesteinstypen können also nicht als Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit herangezogen werden. Diese Einschätzung gilt auch bei Berücksichtigung der Tatsache, dass bei der Untersuchung von Granit und Gneis mutmaßlich wassergängige Zonen, wie Trennfugen oder Störungszonen, oft gezielt untersucht werden. Dadurch sind hohe Messwerte in der Datenbasis gegenüber den realen Verhältnissen überrepräsentiert.

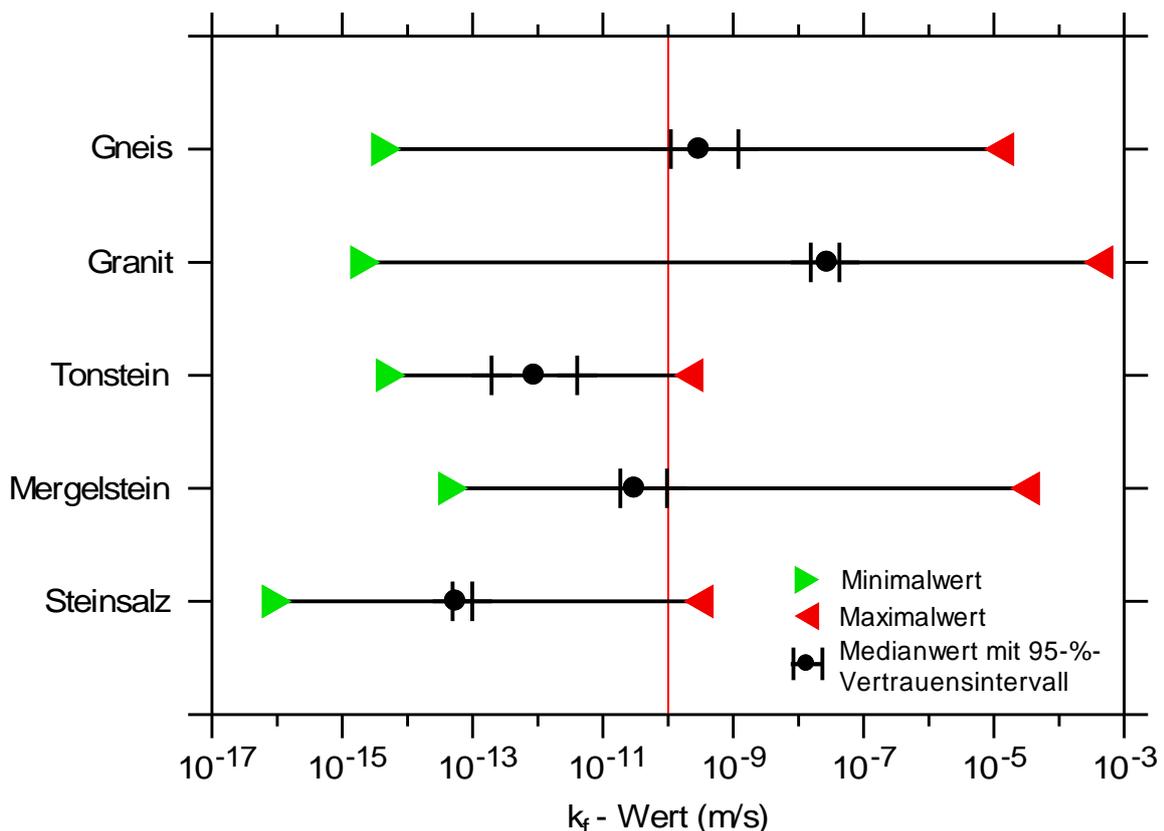


Abbildung 4.3: Bandbreiten und Medianwerte (mit Grenzen des 95%-Vertrauensintervalls) der k_f -Werte von Gesteinstypen in der vorgesehenen Endlagertiefe (300 m - 1.500 m unter Geländeoberfläche)

Vertikale Linie: Gemäß Mindestanforderung zu unterschreitender k_f -Wert 10^{-10} m/s (siehe Kapitel 4.1.3)

Ableitung eines Kriteriums:

Der Gesteinstyp des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit und damit zugleich für das Grundwasserangebot und die Grundwassergeschwindigkeit.

Kriterium: Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen.

Abwägung: Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps:

Gebirgsdurchlässigkeit in m/s	$< 10^{-12}$	$10^{-12} - 10^{-10}$
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig

Indikator: Temperaturverteilung im tiefen Untergrund

Sachverhalt

Die Temperaturverteilung im tiefen Untergrund reagiert sehr empfindlich auf Grundwasserbewegungen, denn neben gelösten Stoffen wird auch Wärmeenergie durch Grundwasserströmungen transportiert. Schon geringe Strömungsgeschwindigkeiten machen sich auf diese Weise im ansonsten durch Wärmeleitung bestimmten Temperaturfeld bemerkbar. 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 vorhanden, wenn auch nicht immer in der gewünschten Qualität.

In einer Studie "Geothermische Rasteranalyse" [CLAUSER et al. 2002] ließ der AkEnd die Möglichkeiten und Grenzen einer Analyse der Temperaturverteilung des tieferen Untergrundes als Indikator für Grundwasserströmungen untersuchen.

Die zentrale Aufgabenstellung in dieser Studie war die Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Bestimmung von Grundwassergeschwindigkeiten im tiefen Untergrund. Hierbei gilt es, die bestimmenden physikalischen Effekte bezüglich der Temperaturverteilung im Untergrund zu identifizieren, von anderen Einflüssen zu trennen und in einem ausreichenden Maße zu quantifizieren. In diesem Zusammenhang sind die wesentlichen Mechanismen des Wärmetransports die im Normalfall dominierende stationäre Wärmeleitung, die zeitabhängigen Änderungen der Oberflächentemperatur (Paläoklima) sowie der durch Grundwasserströmung verursachte advective Wärmetransport. Der letztgenannte Mechanismus ist dabei die eigentliche Zielgröße, die es aus den genannten überlagernden Effekten zu bestimmen gilt.

Temperaturmessungen in Bohrungen belegen das einfache thermische Modell, dass unter Annahme eines homogenen Materials der oberen Erdkruste, eines konstanten Wärmestromes an der Unterkante der Erdkruste und einer konstanten Temperatur an der Erdoberfläche die Temperatur mit zunehmender Teufe linear ansteigt. Dieser einfache Zusammenhang wird jedoch überlagert durch Effekte, die durch Inhomogenitäten im Untergrund, anisotrope Eigenschaften und variable natürliche Wärmeproduktion der Gesteine verursacht werden. Weitere Einflüsse entstehen durch Änderungen der mittleren Temperatur an der Erdoberfläche, welche als instationäres Temperatursignal in den Untergrund diffundieren, sowie durch den von Grundwasserströmungen hervorgerufenen advectiven Wärmestrom. Dieser kann als Indikator für eine Grundwasserströmung dienen.

Die in der Studie verfolgte Methode beruht daher auf der Identifizierung strömungsbedingter Anomalien im Temperaturfeld des Untergrundes, die nicht durch Wärmeleitung oder paläoklimatische Variationen hervorgerufen sind (siehe Abbildung 4.4).

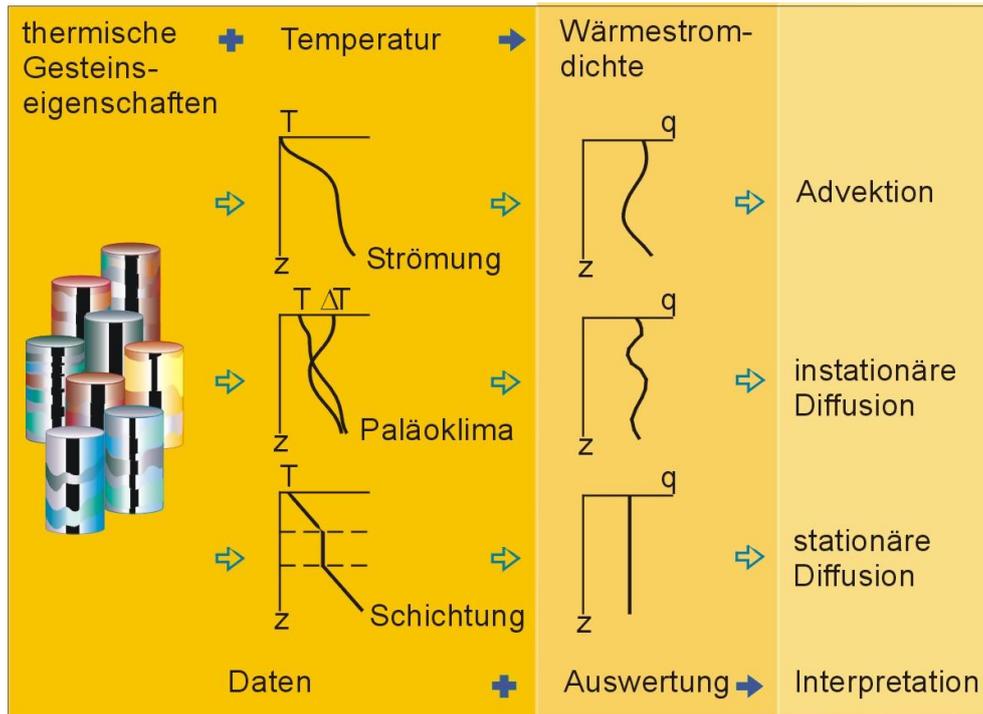


Abbildung 4.4: Erkennen und Quantifizierung von Strömungen an Hand der Temperaturverteilung im tiefen Untergrund

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

Zu Zwecken der Methodenentwicklung wurde daher unter Einbeziehung von Anzahl, Qualität und Verteilung von Daten das westliche Molassegebiet in Süddeutschland als geeignetes Testgebiet ausgewählt. Für dieses wurde ein auf reiner Wärmeleitung beruhendes Referenzmodell auf der Basis bekannter geologischer Strukturinformationen aufgebaut. Auf der Grundlage von Messungen an Bohrkernen, Rekonstruktionen aus geophysikalischen Logs und publizierten Daten wurden die thermophysikalischen Eigenschaften der wichtigsten Gesteinsschichten bestimmt.

Die Anwendung der Methode zeigte, dass sowohl die paläoklimatischen Effekte erfasst als auch die durch Wärmeleitung bedingte Verteilung der Temperatur mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden konnten. Quantitative Aussagen über vorhandene Strömungen konnten durch die Abschätzung der vertikalen Filter-

geschwindigkeit mittels einer Pécletzahl-Analyse (Verhältnis von advektivem zu konduktivem Wärmefluss) gewonnen werden. Unter günstigen Bedingungen können mit dieser Methode Strömungen ab einer vertikalen Filtrationsgeschwindigkeit von 1 mm/a nachgewiesen werden. Bei horizontaler Strömung ist die thermische Wirkung deutlich geringer. Jedoch konnten für einen der wichtigsten bekannten Aquifere in ca. 1.500 m Tiefe im Untersuchungsgebiet regionale Mittelwerte der horizontalen Filtergeschwindigkeiten in der Größenordnung von 30 m/a ermittelt werden. Diese korrelieren mit direkten hydraulischen Testergebnissen (siehe Abbildung 4.5).

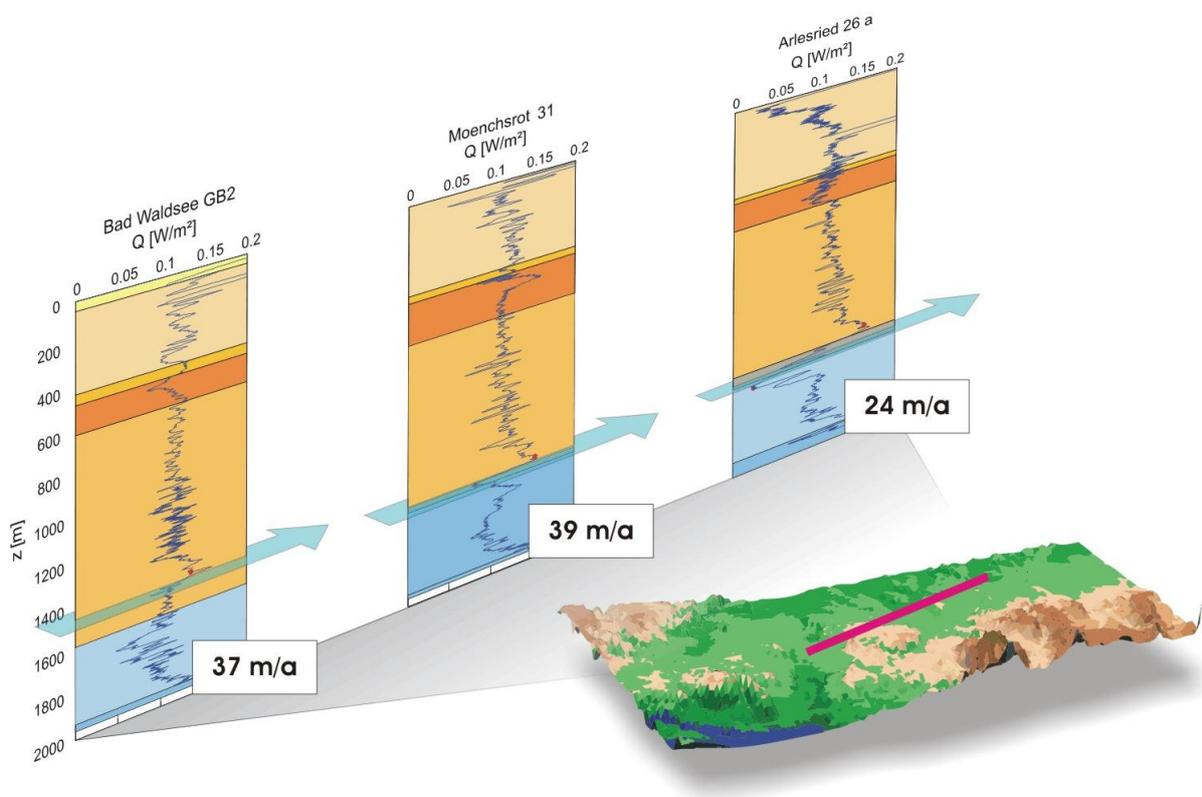


Abbildung 4.5: Regionale schichtfolgende Analyse der Strömungsverhältnisse für ein Testgebiet in Süddeutschland

Vergleichbar geringe Fließgeschwindigkeiten, wie sie mit der geothermischen Methode ermittelt werden können, sind auf keine andere Weise bestimmbar. Insbesondere führt hier – wie bei den im regionalen Maßstab und in großen Tiefen kaum einsetzbaren Tracerversuchen - eine direkte Wirkung der Strömung zur

Abschätzung ihrer Geschwindigkeit, ohne dass andere physikalische Prozesse herangezogen werden.

Ableitung eines Kriteriums

Die bisherigen Untersuchungen demonstrieren das große Potenzial der geothermischen Methode für die Ausweisung von Gebieten mit signifikanter Grundwasserströmung in tiefen Gesteinsschichten sowie für die Quantifizierung des Betrages und der Richtung solcher Strömungen. Für die Untersuchung des Beitrages der Grundwasserströmung zum Wärmetransport ist jedoch außer der Modellierung der relevanten gekoppelten Prozesse eine Validierung des entwickelten Modells vorzunehmen.

Im Rahmen des zukünftigen Auswahlverfahrens kann die Temperaturverteilung in Gebieten unter Zugrundelegung eines in Bezug auf Quantität und Qualität ausreichenden Datenbestandes als eindeutiger Indikator für die Existenz von Grundwasserströmungen herangezogen werden.

Anzumerken ist hierbei, dass der Erfolg für die Anwendung der geothermischen Methode auch von der Untergrundbeschaffenheit (Inhomogenität, Anisotropie) abhängt.

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 unter Einbeziehung der Temperaturverteilung ungünstige Gebiete für die Endlagerung zuverlässig ausgewiesen werden. Günstige Gebiete allerdings sind allein durch eine Analyse der Temperaturverteilung nicht zuverlässig erkennbar. Daher ist die Ableitung eines Kriteriums nicht möglich.

Indikator: Teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte

Sachverhalt

Zur Beantwortung der Frage, ob bzw. für welche geologischen 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 [BRASSER & BREWITZ 2001].

Als Ergebnis der durchgeführten Recherchen ist der Sachverhalt wie folgt:

Zunehmende Mineralisation mit der Tiefe ist eine weit verbreitete 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 Grundwasserbewegung andererseits konnte - mit Ausnahme der Untersuchungen im Bereich der Schichtanlage 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.

Diffusionsgeschwindigkeit

Sachverhalt

Radionuklide können auch beim Fehlen advektiver Grundwasserbewegung durch Diffusion über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich in die Nebengesteine gelangen und von dort in die Biosphäre transportiert werden. Die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss so auf das Diffusionsvermögen von Radionukliden durch das Barrieregestein abgestimmt werden, dass die Migrationszeiten durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglichst dem geforderten Isolationszeitraum entsprechen. Im Hinblick auf diese Anforderung werden Gesteine mit einem geringen Diffusionskoeffizienten, d. h. mit einer geringen Diffusionsgeschwindigkeit, gesucht.

Zur Beurteilung der Diffusionsgeschwindigkeit wird als Modell eine 50 m mächtige Barriere angenommen, die einseitig mit einer erhöhten Ausgangskonzentration eines idealen Tracers beaufschlagt wird. Geringe Diffusionsgeschwindigkeit heißt, dass die Konzentration eines Tracers am Austritt aus der Barriere über einen Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb 1 % der Ausgangskonzentration verbleibt. Dies ist bei einem effektiven Diffusionskoeffizienten $< 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ der Fall.

Ableitung eines Kriteriums

Die Diffusion von Radionukliden durch ein wassergesättigtes Gestein ist maßgeblich vom Konzentrationsgradienten der Radionuklide und dem effektiven Diffusions-

koeffizienten des Gesteins abhängig. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist direkt proportional dem effektiven Diffusionskoeffizienten für das Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient wiederum wird bestimmt durch den Diffusionskoeffizienten in Wasser, vermindert um die Effekte bestimmter Gesteinseigenschaften, welche die Diffusion behindern. Diffusion durch ein wassergesättigtes Gestein erfolgt entlang der Porengänge. Deren Ausbildung, z. B. Windungen, Verengungen, behindert die Ausbreitung im Vergleich zur Diffusion im freien Wasser durch Verlängerung des Migrationsweges. Das Ausmaß dieser Behinderung wird in erster Linie durch die Korngrößenverteilung des Gesteins und - bei Sedimentgesteinen - den Grad der diagenetischen Verfestigung bestimmt: Mit steigendem Feinkornanteil und zunehmender Verfestigung nimmt die Verzögerung der Diffusion gegenüber der in freiem Wasser zu.

Kriterium: Der effektive Diffusionskoeffizient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte möglichst gering sein (kleiner $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$).

Abwägung : Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps bei der erwarteten Gebirgstemperatur im einschlusswirksamen Gebirgsbereich:

Diffusionskoeffizient in m^2/s	$< 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-10}$	$> 10^{-10}$
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Der effektive Diffusionskoeffizient für die Gesteine als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit liegt flächendeckend nicht vor. Als Indikator dafür kann der Gesteinstyp herangezogen werden.

In Abhängigkeit der Gesteinstypen sind unterschiedliche charakteristische Merkmale einschlägig.

Bei Sedimentgesteinen beispielsweise sind eine geringe Permeabilität und eine geringe Porosität Merkmale für einen geringen effektiven Diffusionskoeffizienten.

Beispiel Tonstein

Für Tonstein sind dies die absolute Porosität sowie der diagenetische Verfestigungsgrad. Das zugehörige Kriterium für Tonstein lautet:

Kriterium: Das Gestein sollte über eine geringe absolute Porosität und einen hohen diagenetischen Verfestigungsgrad verfügen

Abwägung: Charakteristische absolute Porosität und charakteristischer Verfestigungsgrad des Gesteinstyps:

absolute Porosität	< 20 %	20 % - 40 %	> 40 %
Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Für andere Gesteine müssen im Auswahlverfahren entsprechende Abwägungsmaßstäbe aufgestellt werden.

4.1.4.3 Konfiguration der Gesteinskörper

Neben den die Radionuklidenausbreitung beeinflussenden Eigenschaften der Gesteinskörper der geologischen Barriere sowie den hydraulischen und hydrochemischen Grundwasserverhältnissen trägt auch die Konfiguration der Gesteinskörper in der Geosphäre zu einer günstigen geologischen Gesamtsituation bei. Sicherheitsrelevante Merkmale der Konfiguration müssen daher bei der Standortauswahl berücksichtigt werden.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst der Begriff Konfiguration definiert und die grundsätzlich möglichen Typen der Konfiguration von Wirtsgestein und einschlußwirksamem Gebirgsbereich beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für eine günstige geologische Gesamtsituation beurteilt [a) Konfigurationstypen]. Aus wichtigen sicherheitsbezogenen Merkmalen von Konfigurationen werden abschließend konfigurationsbezogene Kriterien abgeleitet [b) Konfigurationsbezogene Kriterien].

a) Konfigurationstypen

Definition

Unter dem Begriff Konfiguration sind in erster Linie 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. Hinzu kommen die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb der Geosphäre sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial. Ausdehnung, Anordnung und Tiefenlage 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 erkennbarem 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. Er 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 Ergebnissen differenzierter Auswertungen von Daten zur Wasserdurchlässigkeit bestimmter Gesteinstypen (siehe Kapitel 4.1.4.2) 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).

Unter Beachtung der funktionalen Differenzierung zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich lassen sich hinsichtlich deren Anordnung innerhalb der geologischen Barriere zwei konfigurative Haupttypen ableiten (siehe Abbildung 4.6):

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 Endlagerbergwerks 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 Endlagerhöhlräumen 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 Typ 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 Typ 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 (siehe Abbildung 4.7).

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 sowie Steinsalz). Im Hinblick auf die Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich besteht ein Zielkonflikt zwischen der Verhinderung oder Behinderung des advektiven Radionuklid-

transports 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. Bei ihrer vergleichenden Bewertung ist zwischen der Verhinderung bzw. Behinderung des advektiven Radionuklidtransports und der Vermeidung bzw. Reduzierung negativer Folgen der Gasentwicklung aus Abfällen zu unterscheiden (siehe b) Konfigurationsbezogene Kriterien).
- 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.

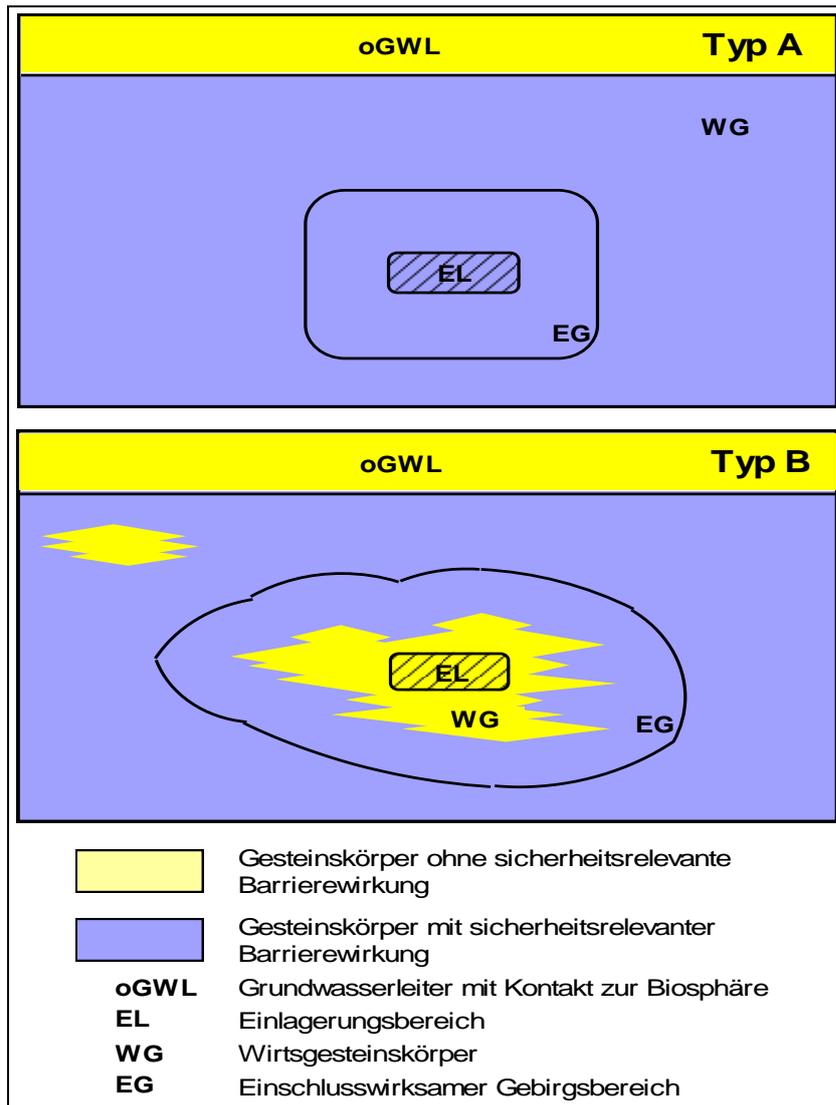


Abbildung 4.6: Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Typ A: Wirtsgestein ist sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Typ B: Wirtsgestein ist kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (die Darstellung entspricht Typ Ba)

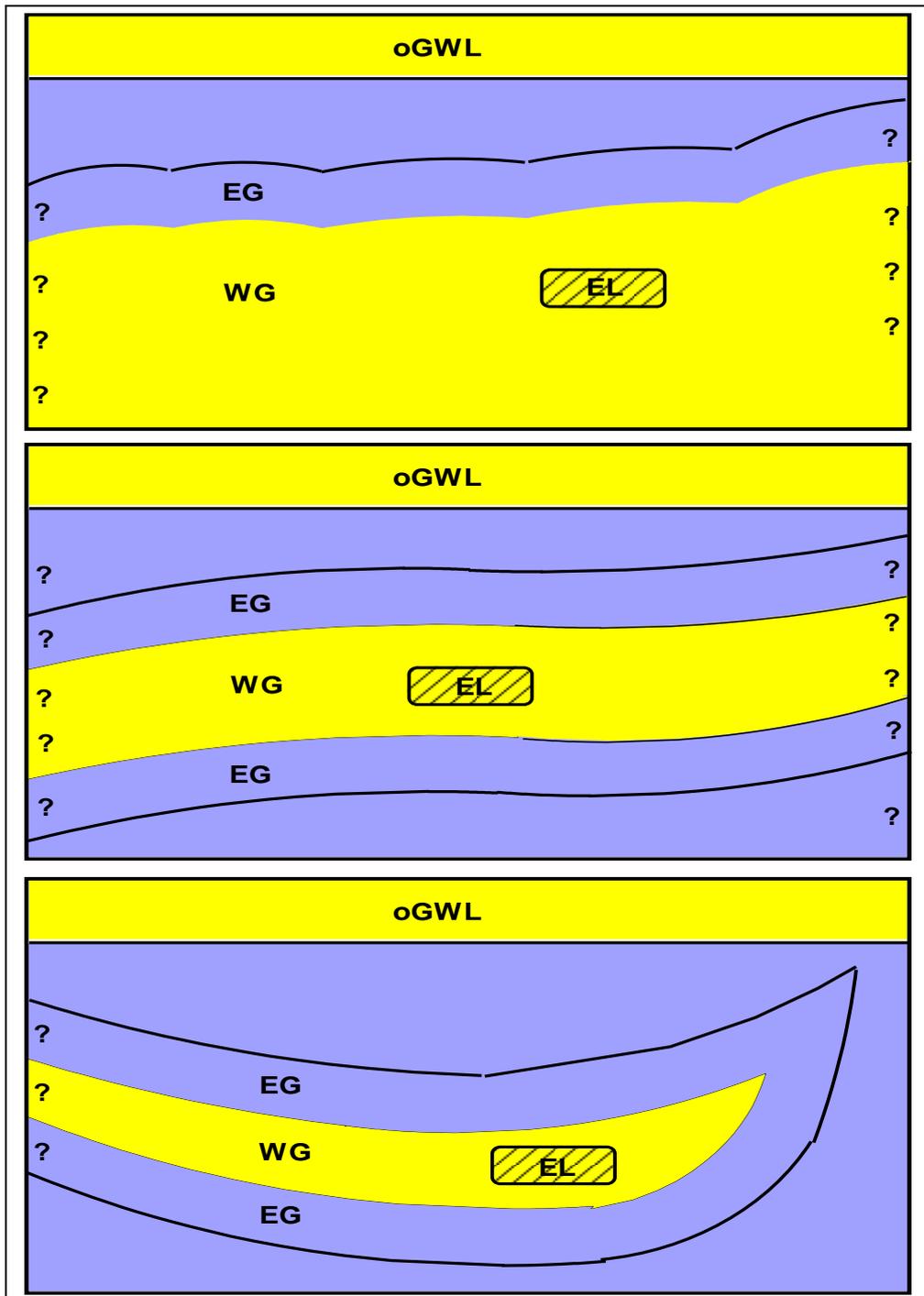


Abbildung 4.7: Konfigurationstyp Bb: Geologische Strukturen mit unterschiedlichem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlußwirksamen Gebirgsbereich (schematisch, ohne Maßstab, „?“ bedeutet weitere Ausdehnung unbekannt, Legende siehe Abbildung 4.6)

b) Konfigurationsbezogene Kriterien

Mindestbarrierenwirksamkeit 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 (siehe a) Konfigurationstypen). Die zur Gewährleistung der Mindestbarrierenwirksamkeit, d. h. 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.

Nach den in Kapitel 2.1 dargestellten Rahmenbedingungen soll der Isolationszeitraum für Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Größenordnung von einer Million Jahren liegen. Innerhalb dieses Zeitraums dürfen Radionuklide also durch das Grundwasser nicht über den Außenrand des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hinaus transportiert werden.

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

Aus Radionuklidtransportzeiten in der Größenordnung von einer Million Jahren durch einen advektiven Transport mit dem Grundwasser lassen sich mittels charakteristischer Daten zur Wasserdurchlässigkeit und Porosität von Barrieregesteinen und für repräsentative hydraulische Verhältnisse in der Endlagertiefe sowie für Mindestausdehnungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich modellhaft errechnen. Als Ausgangssituation der Betrachtung wird eine ideale Gesteinsbarriere mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-12} m/s und einer Porosität von 5 % angenommen. An ihr soll ein hydraulischer Gradient der Größe 0,05 m/m wirken. Für die Berechnung von Grundwassergeschwindigkeiten wird vereinfachend angenommen, 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 (siehe a) Konfigurationstypen). Die für die 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 Radionuklidtransportzeit durch die ideale Gesteinsbarriere in der Größenordnung von einer Million Jahren beispielhaft folgende Werte der Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (siehe Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	Porosität [%]	Gradient [m/m]	Rechnerische Mindestausdehnung [m]
10^{-12}	5	0,05	33
5×10^{-12}	5	0,05	160
10^{-11}	5	0,005	33

Ableitung eines Kriteriums

Zur Abwägung dient die Mächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Beurteilungsgrundlage ist die ideale Barrierewirkung bei einer Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-12} m/s (s. o.).

Der AkEnd hat das folgende Abwägungskriterium zur Barrieremächtigkeit formuliert:

Kriterium: Die barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen über eine Mächtigkeit verfügen, die eine Isolation der Radionuklide in der Größenordnung von einer Million Jahren bewirken.

Abwägung: Mächtigkeit der geologischen Barrieren des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Meter (ideale Barrierenwirkung bei einer Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-12} m/s):

Mächtigkeit in m	> 150	100 - 150	50 -100
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Die barrierewirksamen Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen über eine Mächtigkeit verfügen, die größer ist als die rechnerische Mindestmächtigkeit von 50 m.

Umschließung des Wirtsgesteins durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich

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

1. **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** 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. Bei **Konfigurationstyp Bb** 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).

Stehen andere Beurteilungsaspekte als der advective Radionuklidtransport im Vordergrund, ergibt sich eine andere Beurteilung der Konfigurationstypen: Für Konfigurationstyp Ba können insbesondere bei komplexer Anordnung der beteiligten Gesteinskörper Schwierigkeiten hinsichtlich der geforderten zuverlässigen räumlichen Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit der Konfiguration (siehe Kapitel 4.1.4.4) auftreten, während sich für Konfigurationstyp A in dieser Hinsicht - je nach Gesteinstyp - Vorteile ergeben können.

Ableitung eines Kriteriums

Zumindest in frühen Phasen der Standortauswahl ist die differenzierte Beurteilung der dargestellten Zusammenhänge nicht möglich. Zweifellos hängt aber die Isolationswirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber dem advectiven Radionuklidtransport mit dem Grundwasser davon ab, wie weitgehend der

Wirtsgesteinskörper bzw. (wenn Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamer Gebirgsbereich identisch sind) der Endlagerbereich vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen ist. Daraus ergibt sich folgendes Abwägungskriterium:

Kriterium: Der Endlagerbereich bzw. der Wirtsgesteinskörper sollte von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs umschlossen sein.

Abwägung: Grad der Umschließung:

Umschließungsgrad	vollständig	unvollständig
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig

Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Sachverhalt

Mit zunehmender Tiefe des Endlagers innerhalb der Geosphäre wächst der Abstand zwischen Abfällen und Biosphäre. Zusätzlich sind damit in der Regel abnehmende Grundwasserbewegung und zunehmender Schutz des Endlagers gegenüber exogenen, z. B. klimainduzierten Prozessen oder menschlichen Einwirkungen verbunden. Letzteres gilt auch hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Größere Tiefe bedeutet also größeren Schutz.

Ableitung eines Kriteriums

Maßgebliche Beurteilungsgröße ist die Teufenlage der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter der Geländeoberfläche. Sie wird indirekt begrenzt durch die geforderte Mindest- bzw. Maximaltiefe des Endlagers (siehe Kapitel 4.1.3). Es ist zudem zu beachten, dass bei einigen Gesteinstypen mit zunehmender Tiefe gebirgsmechanische Nachteile auftreten (siehe Kapitel 4.1.4.6). Der erforderliche einschlusswirksame Gebirgsbereich ergibt sich aus der geforderten Mindestausdehnung (s. o.). Daraus leitet sich folgendes Abwägungskriterium ab:

Kriterium: Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte möglichst groß sein.

Abwägung: Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Geländeoberfläche:

Teufe in m	> 500	300 - 500
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig

Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Sachverhalt

Große Volumina des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gestatten eine flexible Endlagergestaltung und Endlagerauslegung. Der Volumenbedarf des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergibt sich aus der flächenhaften Ausdehnung des Endlagerbereichs, der geforderten Barrierenmächtigkeit und der geforderten Ausdehnung der Barrieren um das Endlagerbergwerk. Bei einsöhliger Anordnung der Einlagerungshohlräume sind als Mindestflächenbedarf für die Errichtung eines Endlagers beispielsweise in Salz 3 km² und in Ton bzw. Granit 10 km² abgeschätzt worden. Bei dichten Gesteinen ist zusätzlich der Bedarf an Gassammelräumen (siehe Kapitel 4.1.4.8) zu berücksichtigen.

Ableitung eines Kriteriums

Beurteilungsgröße ist die flächenhafte Verbreitung der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der vorgesehenen Endlagertiefe, und zwar ausgedrückt als Vielfaches des geforderten Mindestflächenbedarfs.

Je größer die flächenhafte Verbreitung der Gesteine ist, umso größer ist die Chance, die Anforderungen an die sichere Endlagerung umsetzen zu können.

Kriterium: Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine räumliche Ausdehnung verfügen, die größer ist als das für das Endlager rechnerisch erforderliche Volumen.

Abwägung: Die flächenhafte Verbreitung der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der vorgesehenen Endlagertiefe sollte ein Vielfaches des Mindestflächenbedarfs von z. B. für Salz 3 km² und Ton 10 km² betragen:

	> zweifach	zweifach	< zweifach
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Gesteinskörper mit erhöhtem hydraulischen Potenzial

Sachverhalt

Insbesondere bei der Endlagerung in Sedimentgesteinen kann der einschlusswirksame Gebirgsbereich von wasserleitenden Formationen erhöhten hydraulischen Potenzials (Potenzialbringer) über- oder unterlagert sein. Dies kann unter Umständen zur Induzierung bzw. Verstärkung der Durchströmung des Endlagerbereichs durch das Grundwasser und damit auch des Radionuklidtransports führen. Sind mögliche hydraulische Potenzialbringer vorhanden, ist daher unter Berücksichtigung der Barrierenmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs deren Einfluss auf den Radionuklidtransport abzuschätzen. Es sollten im Hinblick auf eine Fehleinschätzung der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs Sicherheitsreserven vorhanden sein. Eine Abstandsgeschwindigkeit von 1 mm/a sollte selbst dann eingehalten werden, wenn die Gebirgsdurchlässigkeit nur der Mindestanforderung von 10^{-10} m/s entspricht und für die effektive Porosität der Wert 0,1 angenommen wird.

Zur Berechnung der induzierten Abstandsgeschwindigkeit wird der spezifische hydraulische Gradient über die Barrierenmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs herangezogen. Er wird berechnet aus der größten Differenz des hydraulischen Potenzials über den Endlagerbereich zwischen den Außenbegrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Gesamtmächtigkeit der dazwischen liegenden Barrierengesteinskörper.

Um abzuschätzen, ob einzelne wasserleitende Schichten in Nachbarschaft des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nennenswerte Potenziale liefern, ist festzustellen, welche Schichten Anschluss an Gebiete erhöhten Potenzials haben und wie groß die Durchlässigkeitskontraste zwischen Barrierschichten und der wasserleitenden Schicht sind. Weiterhin ist zu prüfen, wie groß der hydraulische Widerstand innerhalb der wasserleitenden Schicht ist. Dieser ergibt sich aus der Gebirgsdurchlässigkeit der grundwasserleitenden Schicht und der Entfernung zwischen dem Hochpotenzialgebiet und dem Endlagerbereich (siehe Abbildung 4.8).

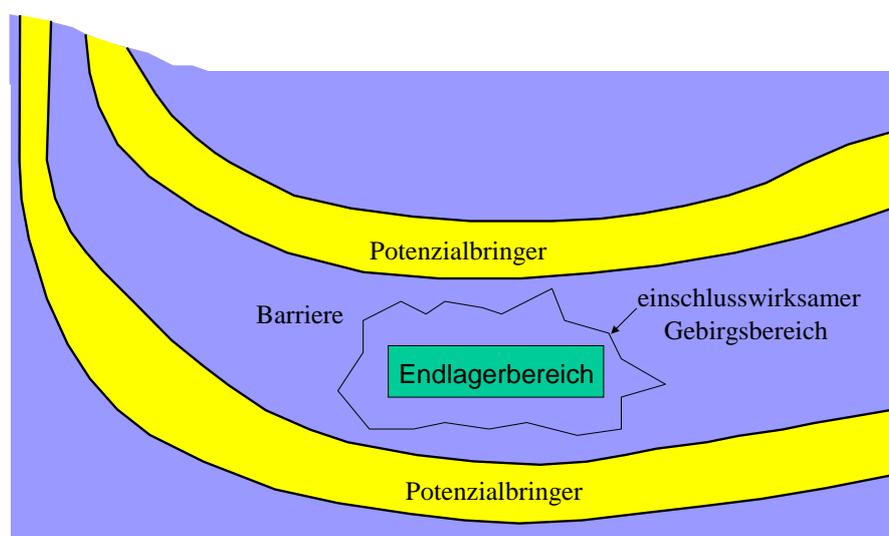


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung von Potenzialgebieten und Endlagerbereich

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit ist die räumliche Lage der Schicht erhöhten Potenzials zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich bedeutsam. Ein direkter Kontakt beider ist bei einer Barrierenmächtigkeit ohne wesentliche Sicherheitsreserven als weniger günstig einzuschätzen als bei einer Barrierenmächtigkeit mit erheblichen Sicherheitsreserven. Maßgebliche Beurteilungsgrößen sind die Potenzialkontraste in der Umgebung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Daraus leitet sich folgendes Abwägungskriterium ab:

Kriterium: Der spezifische hydraulische Gradient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein (kleiner 10^{-2}).

Abwägung: Spezifischer hydraulischer Gradient (gültig bei einer festgelegten Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-10} m/s und einer effektiven Porosität von 0,1):

hydraulischer Gradient	$\ll 10^{-2}$	etwa 10^{-2}	$\gg 10^{-2}$
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Für die Berechnung des spezifischen hydraulischen Gradienten gilt: Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 10^{-10} m/s, effektive Porosität 0,1.

In frühen Phasen des Auswahlverfahrens liegen die zur Anwendung dieses Kriteriums erforderlichen Informationen möglicherweise nicht vor. Dann können zur Beurteilung von Potenzialkontrasten folgende Indikatoren mit zugehörigen Kriterien herangezogen werden:

Indikator:

- Anschluss von Schichten in Nachbarschaft zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich an ein hohes hydraulisches Potenzial

Kriterien:

- Ein Anschluss an ein hohes Potenzial sollte möglichst nicht gegeben sein.
- Der hydraulische Widerstand der leitenden Schicht zwischen Potenzialanschluss und Endlagerposition sollte groß sein, d. h. die Transportlänge sollte groß und die Gebirgsdurchlässigkeit klein sein.

4.1.4.4 Räumliche Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit

Die beiden Anforderungen der „guten Charakterisierbarkeit“ und der „guten Prognostizierbarkeit“ (siehe Kapitel 4.1.4.5) werden in internationalen Konzepten zu den Hauptkriterien gerechnet. Leitend bei der Aufstellung dieser Anforderungen ist,

dass es nicht ausreichen kann, günstige lokale geologische Verhältnisse zu ermitteln, sondern auch gewährleistet sein muss, dass in einer günstigen geologischen Gesamtsituation diese Verhältnisse sowohl räumlich als auch zeitlich Bestand haben müssen.

Die Anforderung der guten räumlichen Charakterisierbarkeit einer günstigen geologischen Gesamtsituation betrifft in erster Linie die Zuverlässigkeit und Qualität der Aussagen zu geologischen Parametern, die später in die Sicherheitsanalyse einfließen sollen. Diese beziehen sich auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Gesteinskörper des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Bei der Auswahl von Teilgebieten im zweiten Verfahrensschritt kann sich die entsprechende Überprüfung mangels Information nur auf den Gesteinstyp dieser Gesteinskörper erstrecken. Er ist der Indikator für wichtige sicherheitsbezogene Eigenschaften der Gesteinskörper. Die Zuverlässigkeit von Aussagen zum Vorhandensein bestimmter Gesteinstypen und zu ihren sicherheitsbezogenen Eigenschaften hängen ab von

- der **Ermittelbarkeit** der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und
- der **Übertragbarkeit** der Eigenschaften dieser Gesteinstypen.

Ermittelbarkeit

Sachverhalt

Die Ermittlung betrifft die Frage, ob die Gesteinstypen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eindeutig bestimmbar und ihre charakteristischen Eigenschaften daher zuverlässig erhebbare sind. Wesentlich dafür sind die räumliche Verteilung der Eigenschaften sowie der Bauplan der geologischen Struktur, deren Teil der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist. Sie werden daher zur Bewertung der Ermittlung heran gezogen. Damit verbunden sind aber auch die Fragen nach den technischen Voraussetzungen für die Explorierbarkeit eines Teilgebietes und der Verfügbarkeit geeigneter Erkundungsmethoden und -techniken.

Das Kriterium zur Beurteilung der Ermittlung lautet:

Kriterium: Die Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften sollten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein.

Abwägung: Räumliche Verteilung der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche räumliche Veränderungen	diskontinuierliche räumliche Veränderungen
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Beim Bauplan der geologischen Einheit, zu der der einschlusswirksame Gebirgsbereich gehört, sind die Veränderungen zu betrachten, die ausgehend von einem ursprünglich ungestörten zu einem gestörten Gebirgsverband geführt haben. Dabei spielen tektonische und salztektonische (einschließlich rein halokinetischer) Vorgänge eine entscheidende Rolle. Da deren Auswirkungen sowohl phänomenologisch als auch hinsichtlich der Bedeutung für die Ermittelbarkeit nicht gesteinstypunabhängig sind, müssen sie auch getrennt betrachtet werden.

Die rein tektonische Überprägung (Bruch- und Falten tektonik, ausgenommen Salztektonik) hat in den meisten Fällen negative Auswirkungen auf die Charakterisierbarkeit der geologischen Struktur. Die Ermittelbarkeit der räumlichen Verteilung der charakteristischen Eigenschaften wird dadurch eingeschränkt.

Für tektonisch überprägte Gesteinskörper wird daher die Ermittelbarkeit mit folgendem Kriterium bewertet:

Kriterium: Die geologische Einheit sollte eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Deren Ausmaß wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik.

Abwägung: Tektonische Überprägung:

Tektonische Überprägung	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km), Flexuren	intensiv gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), intensiv gefaltet
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Bei Salzgesteinen, insbesondere Steinsalz, kann es allerdings zur salztektonischen Überprägung kommen: Das halokinetische Zusammenströmen von Steinsalz in Salzstrukturen (insbesondere Salzstöcken) kann mit kleinräumiger Verfaltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes aus Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften (vor allem Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit, Tonstein) verbunden sein. Andererseits können dadurch aber auch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind entsprechend differenziert zu beurteilen.

Bei dieser Beurteilung muss berücksichtigt werden, dass Salzstrukturen einen individuellen internen Bauplan aufweisen, der erst durch gezielte Untersuchungen und damit erst spät im Rahmen des Auswahlverfahrens im Detail geklärt werden kann. Erfahrungen im Salz- und Kavernenbergbau zeigen, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen der äusseren Form und der Größe einer Salzstruktur und der Intensität der Verfaltung der beteiligten unterschiedlichen Schichten besteht. Zur frühzeitigen Einbeziehung der Auswirkungen der salztektonischen Überprägung auf die Ermittlung der gesuchten Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Salzstrukturen in das Verfahren wird daher folgender Indikator vorgeschlagen:

Indikator: Form und Größe von Salzstrukturen

Zur Beurteilung der möglichen Auswirkungen der salztektonischen Überprägung von Salzstrukturen auf die Ermittelbarkeit der gesuchten Eigenschaften wird daher folgendes Kriterium abgeleitet:

Kriterium: Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen der Schichten mit unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften aufweisen.

Abwägung: Salztektonische Verfaltung

Salztektonische Verfaltung	große ovale Salzstrukturen	kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstrukturen
Wertungsgruppe	günstig	weniger günstig

Übertragbarkeit

Sachverhalt

Die Übertragbarkeit betrifft in erster Linie die Interpolation und Extrapolation von ortsbezogenen lokalen Informationen. Ihre Zuverlässigkeit ist von der Ausdehnung von Gebirgsbereichen mit einheitlichen Eigenschaften und dem Bauplan der geologischen Einheit abhängig, deren Teil der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist.

Mit folgendem Kriterium wird geprüft, ob auf der Basis ortsbezogener lokaler Informationen zuverlässige Aussagen zum Vorhandensein ausreichend ausgedehnter Bereiche des betrachteten Gesteinstyps mit seinen charakteristischen Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich sind:

Kriterium: Günstig sind Flächen, in denen die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind.

Abwägung: Im Hinblick auf die räumliche Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine werden auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig folgende Wertungsgruppen abgeleitet:

Gesteinsausbildung	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Für die Beurteilung des Bauplans der geologischen Struktur gilt das entsprechende Kriterium bei Ermittelbarkeit.

4.1.4.5 Prognostizierbarkeit der langfristigen Verhältnisse

Sachverhalt

Bei der Beurteilung von Teilgebieten genügt es nicht, die geologischen Verhältnisse zu ermitteln und räumlich zu charakterisieren; vielmehr müssen zur Identifizierung und Einschätzung sicherheitsrelevanter Langzeitveränderungen auch verlässliche Voraussagen über deren zukünftige Entwicklung möglich sein. Die Anforderung der guten Prognostizierbarkeit ist daher eine wesentliche Voraussetzung für den Nachweis der langfristigen Stabilität der günstigen geologischen Verhältnisse.

Das Auswahlverfahren zur Endlagerstandortsuche zielt auf eine günstige geologische Gesamtsituation ab. Auch die Anforderung der guten Prognostizierbarkeit richtet sich auf die gesamte geologische Struktur. Die Anforderung ist also nicht nur

bei Einzelkriterien, sondern übergreifend bei der Gesamtheit der geowissenschaftlichen Kriterien wirksam.

Prognosen über den geforderten Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren erfordern eine rückblickende Betrachtung über weit mehr als eine Million Jahre. Erst dann können zukünftige Entwicklungen der geologischen Verhältnisse analysiert und bewertet werden. Gesucht werden daher Teilgebiete, deren Entwicklungsgeschichte sich über lange Zeiträume zurückverfolgen lässt und bei denen keine wesentliche Veränderung der sicherheitsrelevanten Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verzeichnen ist.

Kriterium: Die Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Abwägung: Veränderung der Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Veränderung der Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum von 1 Mio. bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

4.1.4.6 Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

Die mit der Anforderung *Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen* verbundene Zielsetzung besteht aus geotechnischer bzw. gebirgsmechanischer Sicht darin, im anstehenden Gebirge ein standsicheres Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauen und Endlagerungshohlräumen ohne nachhaltige Schädigung des umgebenden Gebirges (Rissbildung) sowie mit möglichst geringem Aufwand an technischen Sicherungsmitteln (kein tragender Ausbau) für die jeweilig vorgesehene Betriebszeit auslegen zu können. Darüber hinaus sollten durch anthropogene

Einwirkungen sowohl in der Betriebszeit als auch in der Nachbetriebszeit keine für den Erhalt der Barrierenintegrität nachteiligen mechanischen, thermischen oder hydraulischen Prozesse induziert werden (z. B. mechanisch oder thermisch bedingte Rissbildungen, Fluidströmungen). Insbesondere sollte die spätere Errichtbarkeit und Funktionsfähigkeit von geotechnischen Barrieren, wie z. B. Streckendamm-
bauwerken oder Schachtverschlussbauwerken, nicht derart beeinträchtigt werden, dass die Gewährleistung der Langzeitsicherheit entsprechend dem jeweiligen Stilllegungskonzept nachteilig beeinflusst wird. Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des anthropogenen Eingriffs in das Gebirge mit Entfestigung und Auflockerung des Gesteinsgefüges und Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten in der Bau- und Betriebszeit möglichst gering sind und darüber hinaus im Bereich von geotechnischen Barrieren längerfristig nach der Stilllegung wieder vermindert und schließlich bei jederzeitigem Erhalt der Barrierenintegrität eliminiert werden.

Ableitung von Sachverhalten/Eigenschaften

Grundsätzlich sind für das anstehende Gebirge anforderungsbezogen Sachverhalte/Eigenschaften zu formulieren, die eine auf ein Endlager bezogene günstige Situation charakterisieren und die dann zur Identifizierung von denjenigen Gebirgsverhältnissen herangezogen werden, die der Anforderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen genügen.

Zur Formulierung eines zunächst orientierenden Katalogs von Sachverhalten erscheint es plausibel, folgende Sachverhalte zu postulieren:

- Sachverhalt 1: Über eine Kontursicherung hinausgehend sollte kein tragender Ausbau erforderlich sein, um mit der Eigentragfähigkeit des Gebirges zusammenstandsichere Grubenbaue zu erhalten
- Sachverhalt 2: In den geologischen Barrieren sollten keine die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden Sekundärpermeabilitäten erzeugt werden

- Sachverhalt 3: Die Funktionstüchtigkeit von geotechnischen Barrieren (z. B. Querschnittsabdichtungen) sollte durch konturnahe Gebirgsentfestigung nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus herabgesetzt werden

Ableitung von sachverhaltsbezogenen Indikatoren

Vor dem Hintergrund dieses orientierenden Sachverhaltskataloges können ohne explizite Zuordnung zu den Sachverhalten zunächst zwei Indikatoren für das Vorliegen von günstigen geomechanischen Verhältnissen formuliert werden:

Indikator 1:

Das Gebirge wirkt geomechanisch als Haupttragelement

Sachverhalt

Das Gebirge wird als Haupttragelement angesehen, wenn von ihm die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden kann (abgesehen von einer Kontursicherung, z. B. Anker - Maschendraht).

Das Gebirge wird als hinreichend tragfähig angesehen, wenn die aus den Einwirkungen (Lasten und Temperaturänderungen aus Gebirge und Abfall) resultierenden Beanspruchungen seine Tragfähigkeit nicht überschreiten. Die Gebirgstragfähigkeit ist erreicht, wenn nachhaltige Konturbrüche zu besorgen sind. Die Kontursicherung wird in ihrer Tragwirkung implizit berücksichtigt. Gebirgsbereiche, in denen die Tragfähigkeitsgrenze erreicht wird, werden als pseudoplastische Zonen bezeichnet.

Die im Felsbau im Rahmen von Tragwerksplanungen/Standortsicherheitsnachweisen an dieser Stelle üblichen und notwendigen Begriffe "Standfestigkeit" und "Standortsicherheit" werden absichtlich nicht benutzt, da bei der Standortauswahl keine Nachweise geführt werden und auch keine Sicherheitsmargen in diese grundsätzlichen Betrachtungen eingearbeitet sind.

Indikator 2:

Es liegt keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbar) konturnah entfestigten Saumzone vor.

Sachverhalt

Sekundärpermeabilitäten sind infolge einer Beanspruchung, die die Dilatanzfestigkeit überschreitet, auf dilatante Gebirgsdeformationen zurückzuführen. Dabei erweitern sich vorhandene Fissuren, und es können sich darüber hinaus neue Risse ausbilden und vernetzen. Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen Saumzone sind ohne erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht detektierbar und bedingen daher zusätzliche, aber bei entsprechender Planung grundsätzlich vermeidbare Unsicherheiten in Sicherheitsanalysen. Die Prognostizierbarkeit der geohydraulischen Situation im barrierewirksamen Teil des Gebirges wird dadurch herabgesetzt.

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

Weiterhin bedingen eine über den Konturbereich hinausgehende und nicht hinreichend quantifizierbare Gebirgsentfestigung und Gebirgsauflockerung eine zusätzliche Minderung der ansetzbaren hydraulischen Leistungsfähigkeit von geotechnischen Barrieren, wie Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerken. Eine konturnahe und vertretbare Entfestigungs-/Auflockerungszone soll dann gegeben sein, wenn die Überschreitung der Dilatanzfestigkeit als moderat anzusehen ist und je nach Gesteinsart in unterschiedlicher Größe, grundsätzlich aber auf einige wenige Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt.

Vorgehensweise bei der Abwägung

Zur Demonstration und Analyse des grundsätzlichen Tragverhaltens verschiedener Gebirgsarten als Reaktion auf endlagerrelevante Einwirkungen ist im Auftrag des AkEnd eine zweiteilige Studie erarbeitet worden [LUX 2002b und 2002c]. Dabei wird

exemplarisch ein für ein Endlager repräsentativer Grubenbau in seinem Tragverhalten betrachtet (einlagerungsbereichsnahe Richtstrecke).

Wesentliche Ergebnisse dieser Studie sind:

(a) Bei gebirgsartbezogener Vorgabe einer zulässigen

- Ausdehnung der konturnahen Bruchzone (pseudoplastische Zone),
- Ausdehnung der konturnahen Auflockerungszone und
- Gebirgsdeformation (Verzerrung, Verschiebung).

besteht bei Einhaltung vorgegebener mechanischer Grenzwerte ein systematisierbarer Zusammenhang zwischen möglicher Teufenlage eines Grubenbaus und der Gebirgsfestigkeit.

(b) Zu differenzieren sind im Hinblick auf die Gleichartigkeit des Tragverhaltens

- einerseits Gesteine mit elastisch-sprödem und elastisch-gering plastischem/gering kriechfähigem Materialverhalten und
- andererseits Gesteine mit ausgeprägtem Kriechverhalten.

Die Studie hat gezeigt, dass aus gebirgsmechanischer Sicht Ergebnis bezogen die beiden Indikatoren und damit dann auch die Kriterien in einem übergeordneten Kriterium zusammengefasst werden können. Grund hierfür ist der Sachverhalt, dass bei hinreichender Tragfähigkeit des Gebirges (= Haupttragelement) auch nur in begrenztem Maß Konturentfestigungen und Konturauflockerungen zu erwarten sind, so dass bei Verzicht auf einen Ausbau eine hinreichende Standfestigkeit einerseits und die nur begrenzte Ausbildung von dilatanten Gebirgsbereichen (und damit Sekundärwegsamkeiten) andererseits als Trageigenschaften des Gebirges in enger Beziehung zueinander stehen.

Durch konservative Aggregation der an den vorgegebenen mechanischen Grenzwerten gemessenen Berechnungsdaten kann die Anforderung grob vereinfacht durch ein einziges übergreifendes Kriterium in Form einer Relation *repräsentative*

Gebirgsdruckfestigkeit – zulässige Teufenlage operationalisiert werden. Zwischen repräsentativer Gebirgsdruckfestigkeit und möglicher Teufenlage bei Einhaltung der vorgegebenen zustandsgrößenbezogenen Grenzwerte ergeben sich Materialtyp bezogen nach vorstehender Differenzierung unter (b) allerdings unterschiedliche charakteristische Relationen. Die Identifizierung gebirgsmechanisch günstiger Voraussetzungen ist damit trotz der einerseits geomechanisch und andererseits geohydraulisch geprägten Aspekte der Anforderung allein mit Hilfe eines übergreifenden Kriteriums möglich. Dieses Kriterium kann wie folgt formuliert werden:

Kriterium: Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone um die Endlager Hohlräume sollte möglichst gering sein.

Als Hilfe für die Abwägung in der praktischen Anwendung sind zwei Diagramme (siehe Abbildung 4.9 und 4.10) entwickelt worden mit der materialeigenschaftsbezogenen Differenzierung in

a) Wirts-/Barrierengesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten und

b) Wirts-/Barrierengesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten,

die dann in weiterer Abhängigkeit von der Teufenlage des relevanten Grubenbaus und der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit eine kriterienbezogene Abwägung ermöglichen. Gegenstand der über die Diagramme auf quantitativer Grundlage erfolgenden Abwägung und Grundlage der Bewertung im Rahmen einer dreistufigen Bewertungsskala ist damit die Beantwortung der Frage, ob eine Neigung zur Ausbildung mechanisch bedingter Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnah zugelassenen entfestigten Saumzone nicht, in noch vertretbarem Maße oder in einem nicht mehr vertretbarem Maß vorliegt. Die Beantwortung dieser Frage wird transformiert auf die Frage, ob in Abhängigkeit von der Gebirgsfestigkeit eine vorgegebene Teufe nicht, nur mäßig oder unverträglich überschritten wird.

Abwägung: Zulässige Teufenlage in Abhängigkeit von der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit

Abwägung a): Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (siehe Abbildung 4.9).

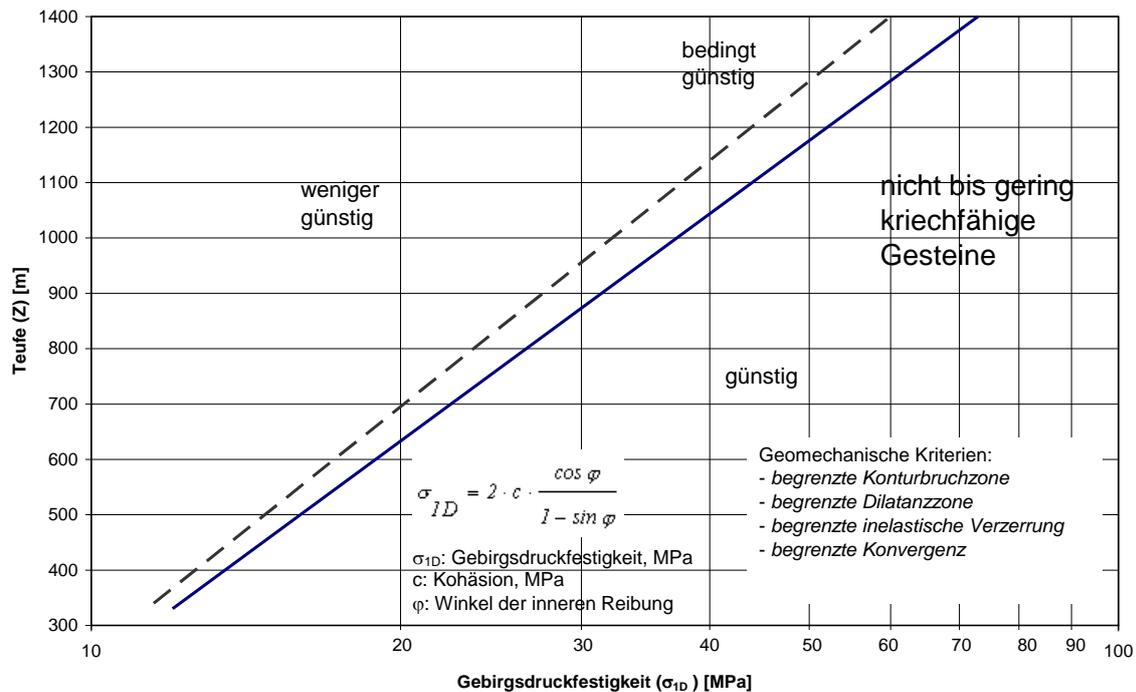


Abbildung 4.9: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten aus [LUX 2002b]

Zulässige Teufenlage (Abbildung 4.9)	Die zu bewertende Teufe liegt unterhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit (durchgezogen).	Die zu bewertende Teufe liegt mäßig (< 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit (gestrichelt).	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Abwägung b): Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten (siehe Abbildung 4.10).

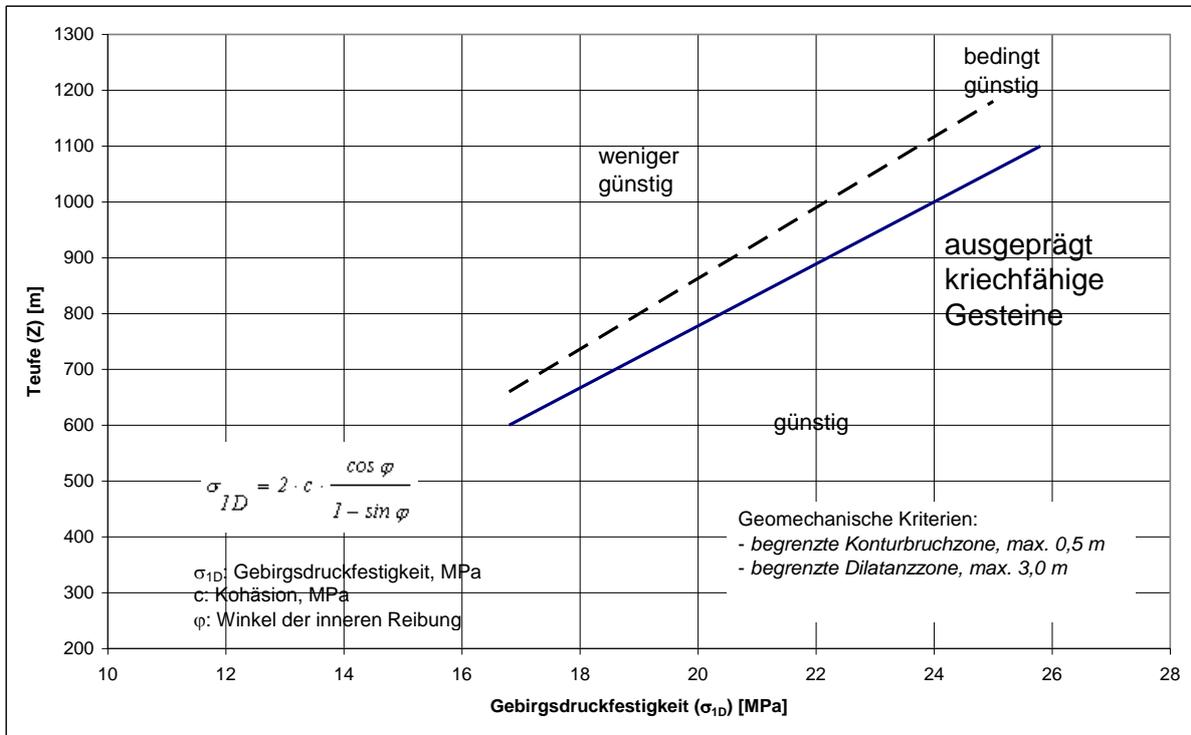


Abbildung 4.10: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten aus [LUX 2002c]

Zulässige Teufenlage (Abbildung 4.10)	Die zu bewertende Teufe liegt unterhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit (durchgezogen).	Die zu bewertende Teufe liegt mäßig (< 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit (gestrichelt).	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

4.1.4.7 Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten

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

- auf primär im Gebirge bereits vorhandenen Wegsamkeiten,
- auf sekundär durch den anthropogenen 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 der einschlusswirksame Gebirgsbereich grundsätzlich eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweist. Als Wegsamkeiten sind dabei fluid zugängliche vernetzte Poren- und Klufthohlräume im Gesteinsgefüge beliebiger Größe und Form vom Mikro- bis in den Makrobereich zu verstehen. Mechanismen für die Ausbildung von Wegsamkeiten können sein

- (1) Gefügeauflockerungen infolge thermomechanischer Beanspruchung (Rissaufweitungen, Rissbildungen) und
- (2) selektive Auflösung von Gesteinspartien infolge Einwirkung lösungsfähiger Wässer (geochemisch reaktives Milieu im Rissbereich).

Da der Mechanismus zu (2) als Folge anthropogener Einwirkungen neben lösefähigen Gesteinen und einem großräumigen hydraulischen Potenzialgefälle grundwassernah die Ausbildung von ersten Wegsamkeiten, die ein Eindringen von lösungsfähigen Fluiden in dieses Gestein ermöglichen, voraussetzt, hier aber Gesteinsarten mit geringer Neigung zu Rissbildung präferiert werden, erfolgt im Rahmen der Kriterienentwicklung eine Beschränkung auf den Mechanismus (1) – mechanisch bedingte Rissaufweitung/Rissbildung.

Zur weiteren Spezifizierung dieser Anforderung erscheint es plausibel, davon auszugehen, dass sowohl grundsätzliche Gesteinseigenschaften als auch die Relation

zwischen schädigungsfreier Gesteinsbeanspruchbarkeit und vorhandener bzw. zu erwartender Gesteinsbeanspruchung in Betracht zu ziehen sind.

Ableitung von Sachverhalten/Eigenschaften

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 gering permeablen bis impermeablen Gebirgsformationen zusätzliche Rissysteme entstehen können und zwar dann, wenn unter der Einwirkung zukünftiger geogener oder anthropogener Beanspruchungen

- die Gesteine nicht hinreichend tragfähig sind, um die aufgeprägten Beanspruchungen ohne Überschreitung der Zug- sowie Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit aufzunehmen,
- die Gesteine kein hinreichendes Spannungsrelaxationsvermögen aufweisen, um bruchlos durch einen deformationsbegleiteten Spannungsumlagerungsprozess mit Beanspruchungsabbau die äußeren Lasten aufzunehmen,
- die Gesteine trotz eines ausgeprägt plastisch-viskosen Verhaltens beanspruchungs- und deformationsbedingt Gefügearlockerungen und Gefügeentfestigungen erfahren.

In allen diesen Fällen reagieren die Gesteine mit der Ausbildung von neuen bzw. der Weiterentwicklung von schon bestehenden Fissuren (Mikro- bis Makrorissen) auf die äußeren Lasten. Diese Sekundärrisse führen dann auch bei einem primär gering permeablen bzw. impermeablen Gestein nach einer hinreichenden Vernetzung zur Ausbildung einer möglicherweise unverträglich großen Sekundärpermeabilität.

Da die Anforderung „geringe Neigung zur Rissbildung“ nicht unmittelbar in ein an Maß und Zahl orientiertes und damit einer Abwägung zugängliches Kriterium umgesetzt werden kann, werden zunächst Eigenschaften abgeleitet, die jeweils

einzelne Aspekte dieser zentralen Anforderung erfassen und für die dann nachfolgend Kriterien formuliert werden können. Vorhandene generelle Kenntnisse zu Gesteins- und Gebirgseigenschaften unter geotektonischer und endlagerrelevanter Beanspruchung legen zur näheren Ausformung der Anforderung die thesenartige Formulierung folgender Sachverhalte als Eigenschaften nahe:

- (1) Gesteine mit ausgeprägter Duktilität weisen im Grundsatz eine nur geringe Neigung zur Rissbildung auf.
- (2) Gesteine mit nachgewiesener Fähigkeit zur Rückbildung von Rissen unter äußerer Belastung (ohne Sekundärmineralisation) sind tendenziell als duktil anzusehen und besitzen dementsprechend eine nur geringe Neigung zur dauerhaften Ausbildung von Rissen.
- (3) Tektogenetisch in unterschiedlicher Weise deviatorisch vorbeanspruchte Gebirgsformationen, die erfahrungsgemäß derzeit gering durchlässig sind, neigen auch in nur geringem Maße zur Ausbildung von Wegsamkeiten.
- (4) 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 vorhanden oder vorhanden gewesen.
- (5) Ausgeprägt spröde und hochfeste Gesteine neigen grundsätzlich zur Rissbildung und weisen eine nur geringe Rissrückbildungsfähigkeit auf. Vernetzte Rissysteme sind grundsätzlich zu erwarten. Bei einer bisherigen geogenen Beanspruchung, die nicht zu einer Überbeanspruchung geführt hat, und einer ruhigen tektonischen Lagerung, die zukünftig keine nachhaltige Veränderung der geogenen Beanspruchung erwarten lässt, ist nicht auszuschließen, dass etwaige unvermeidbare, anthropogen bedingte und konturnah begrenzte Risse/Rissysteme durch (geo)technische Maßnahmen in dem erforderlichen Maße dauerhaft hydraulisch wirksam zu verheilen sind.

Ableitung von Indikatoren

Die vorstehend aufgeführten Eigenschaften zur näheren Charakterisierung der Anforderung sollen in zwei übergeordneten Indikatoren mit zugehörigen Bedingungen zusammengefasst werden:

- **Indikator I1:** Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität unter den zu erwartenden anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchungen des Gebirges gering sein.

- **Indikator I2:** Rückbildung von anthropogen/geogen bedingten Rissen/Riss-systemen

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte aufgrund der Gesteinseigenschaften grundsätzlich die Rückbildbarkeit von anthropogen/geogen bedingten Rissen/Rissystemen gegeben sein.

Ableitung von indikatorbezogenen Kriterien

Aufbauend auf den zur Spezifizierung der Anforderung zunächst noch in Thesenform postulierten Eigenschaften und den daraus abgeleiteten Indikatoren zugeordnet werden nachfolgend Kriterien entwickelt. Diese Kriterien sind so beschaffen, dass sie die formulierten Indikatoren kriterienartig in qualitativ/quantitativ fassbare und damit auch bewertbare Größen umsetzen. Hierzu werden in [LUX 2002a] die wesentlichen Sachverhalte zusammengetragen. Danach konnten den beiden Indikatoren folgende Kriterien zugeordnet werden:

Kriterien zu Indikator I1:

Kriterium 1:

Bewertungsmaßstab:

Verhältnis aus Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit

Kriterium: Die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit sollte gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein.

Sachverhalt

Die Durchlässigkeit/Permeabilität des Gebirges ist sehr eng verknüpft einerseits mit gesteinstypischen Eigenschaften (→ Matrixporosität/Matrixpermeabilität) und andererseits mit der Neigung der Formation zu einer Riss behafteten rupturrellen Reaktion auf geotektonische Beanspruchung (→ Gebirgsporosität/Gebirgspermeabilität–Trennflächengefüge). Daher lassen Gebirgsformationen mit einer dem zugehörigen Gestein (Handstück) im Grundsatz gleichen großräumigen Permeabilität tendenziell auf eine nur geringe Neigung zur Rissbildung schließen, insbesondere bei gestörter Lagerungsform, die als Indiz für erhebliche geotektonische Beanspruchungen gelten kann. Hinzu kommt, dass für hier relevante Gesteinsarten mit geringer Matrixporosität/Matrixpermeabilität korrespondierende Daten sowohl aus laborativen Untersuchungen an Prüfkörpern (Bohrkernmaterial) wie auch aus Feldmessungen vorliegen. In [APPEL & HABLER 2001 und 2002] wird eine aktuelle Zusammenstellung und Auswertung vorliegender Feldmessdaten gegeben.

Kriterium 2:

Bewertungsmaßstab:

Erfahrungen über die Barrierenwirksamkeit der Gebirgsformation

Kriterium: Die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar sein.

Sachverhalt

Aus Erfahrung ist bekannt, dass Gebirgsformationen gegenüber Grundwasserbewegungen ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Unterschieden werden aus hydrogeologischer Sicht

- Grundwasserleiter und
- Grundwassergeringleiter.

Weiterhin ist aus dem bergbaulichen Erfahrungsbereich auch bekannt, dass Grubenbaue in manchen Gebirgsformationen erheblichen Zuflüssen ausgesetzt sind, während in anderen Gebirgsformationen ein trockenes Grubengebäude vorliegt. Im salinaren Bergbau ist es von existenzieller Bedeutung für den Grubenbetrieb, Zuflüsse aus wasserführenden Hangend-, Liegend- oder Nebengebirgsschichten durch die Anordnung von sogenannten hydrogeologischen Schutzschichten und eine entsprechende Abbauführung fernzuhalten.

Die Eigenschaft mancher Gebirgsformationen, gering- oder undurchlässig gegenüber Fluiden zu sein, macht man sich bei der behälterlosen Lagerung von flüssigen oder gasförmigen Medien (Kohlenwasserstoffen) in Kavernen und Bergwerken sowie bei der Entsorgung von chemotoxischen Abfällen untertage zu Nutze.

Als geogene (natürliche) oder auch anthropogene Anzeichen für die Existenz gering bis nicht durchlässiger Gebirgsformationen können ausgehend aus geowissenschaftlicher, bergbaulicher und geotechnischer Sicht die nachfolgend unter „Abwägung I2“ genannten Erfahrungsbereiche angesehen werden.

Kriterium 3:

Bewertungsmaßstab:

Duktilität des Gesteins (qualitative oder quantitative Ausformung je nach Datenlage).

Kriterium: Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen.

Sachverhalt

Als eine Eigenschaft von Gesteinen, die eine nur geringe Neigung zur Rissbildung aufweisen, wird eine phänomenologisch als duktil charakterisierte Deformationsfähigkeit angesehen. Diese Form der Deformationsfähigkeit äußert sich unter äußeren Lasten durch irreversible plastisch-viskose Deformationsanteile und bedingt, dass in bei linear-elastischem Materialverhalten extrem beanspruchten Tragwerksbereichen bereits bei der Lastaufnahme oder zeitnah zu der Lastaufnahme nunmehr Spannungsumlagerungen erfolgen, die die aus der Analyse mit einem linear-elastischen Stoffmodell folgenden Extrembeanspruchungen erst gar nicht entstehen lassen bzw. reduzieren und gleichzeitig in diesen Bereichen zu verstärkten Deformationen führen. Diese sowohl eher momentan wie auch ausgeprägt zeitabhängig ablaufenden Spannungsumlagerungen erfolgen jedoch nicht grundsätzlich frei von (Mikro)Rissbildungen im Gesteinsgefüge, die verallgemeinernd als Gefügeschädigungen bezeichnet werden. Je ausgeprägt duktiler allerdings die Deformationsfähigkeit eines Materials ausgebildet ist, desto weniger sind die Deformationen von Gefügeschädigungen begleitet. Phänomenologisch sind diese Gefügeschädigungen mit einer Gefügeentfestigung und einer Gefügebrauchung verbunden, die zu einer Zunahme/Ausdehnung des Gesteinsvolumens führt und die dann als Dilatanz bezeichnet wird. Als Dilatanzgrenze wird das Beanspruchungsniveau bezeichnet, bei dem (integral bezogen auf einen Prüfkörper) anfänglich dilatante Deformationen des Gesteins beobachtet werden. Nicht ausgeschlossen ist damit die schon vorhergehende Ausbildung von Gleitflächen mit Festigkeitsreduzierung, allerdings ohne Volumenzunahme (= geschlossene latente Trennflächen, z. B. Schieferungsflächen). Die Duktilität und auch die Dilatanzgrenze eines Materials sind abhängig von der Minimalspannung und von der Temperatur, aber auch z. B. von der Beanspruchungsrate. Damit werden bezogen auf die Besorgnis von Rissbildungen im Gesteinsgefüge zwei Mechanismen deutlich: einerseits die deformationsverbundene Spannungsumlagerung mit Beanspruchungsreduzierung ohne Rissbildung und andererseits die dilatanzbehaftete Deformation bei insgesamt zu hohem Beanspruchungsniveau.

Wichtig ist aus mechanischer Sicht im Hinblick auf das langfristige Tragverhalten insbesondere die Kriechfähigkeit. Dabei sind Endlager bezogen nicht kriechfähige

spröde Gesteine mit einem vernachlässigbaren Kriechverhalten, wie Granitgesteine und auch Tonmergelsteine, sowie plastisch-duktiler Gesteine, z. B. Tongesteine, mit einem eher geringen und Salinalgesteine mit einem im Vergleich dazu stark ausgeprägten Kriechvermögen zu unterscheiden.

Die Formulierung von Indikator bezogenen Bewertungsmaßstäben erscheint dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechend auf verschiedenen Betrachtungsebenen möglich:

(a) Qualitative Betrachtungsebene (keine Standort bezogenen Untersuchungen; Übertragung von grundsätzlichen Erfahrungen):

- Angabe der Gesteinsart als Indikator für den Mineralkornbestand
- Aus dem Mineralkornbestand (monomineralisch, polymineralisch) folgt die Zuordnung zu dem grundsätzlichen Materialtypus (spröde, duktil) sowie zu dem
- Deformationsgrundtyp (elastisch/spröde, elastisch-pseudoplastisch mit eher momentaner Entfestigung, elastisch-viskoplastisch/duktil mit eher allmählicher Entfestigung, elastoviskos/duktil)

(b) Quantitative Betrachtungsebene (standortbezogene laborative Untersuchungen):

- Ermittlung der Dilatanzfestigkeit (→ Maß für die mikrorissfreie Beanspruchungsintensität)
- Ermittlung des Dilatanzwinkels (→ Maß für die Rissbildungsintensität = Gefügeflockung)
- Ermittlung der Größe der inelastischen Deformationen im Vergleich zu der Größe der elastischen Deformationen an der Dilatanzgrenze (→ Maß für die Duktilität ohne rissbehaftete Gefügeveränderung):

$$- \varepsilon^{je} > \varepsilon^{el} \text{ für } \nu_{Dil} > \eta_{Dil}$$

Kriterien zu Indikator I2:

Kriterium 1:

Bewertungsmaßstab:

Rissschließung

Kriterium: Risse/Risssysteme im Gestein sollten bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen sein.

Sachverhalt

Im Hinblick auf ihre Fähigkeit, Risse zu verschließen und damit eine Reduktion der Sekundärpermeabilität herbeizuführen, sind folgende Gesteinsarten zu unterscheiden:

- *Polykristalline und auch feinklastische Gesteine mit elastisch-sprödem Materialverhalten* und keinen bzw. vernachlässigbar geringen Kriecheigenschaften, wie z. B. Granitgesteine, tendenziell aber auch Tonmergelsteine
- *Feinklastische Gesteine mit viskoplastisch-duktilen Materialverhalten*, wie z. B. Tone und manche Tongesteine
- *Polykristalline Gesteine mit viskoplastischem Materialverhalten und ausgeprägtem Kriechvermögen*, wie z. B. (chloridische) Salzgesteine

Die Formulierung von indikatorbezogenen Bewertungsmaßstäben kann beruhen:

- Qualitativ auf den prinzipiellen Fähigkeiten eines Gesteins zur Rissschließung, d. h. auf den Eigenschaften, die das Gestein aufgrund seines Mineralkorngefüges selbst aufweist
- Quantitativ auf Untersuchungsergebnissen, wie z. B. zu der Intensität der Rückbildung von Sekundärpermeabilitäten nach dem Aufbau eines realitätsnahen Kompaktionsdruckes

Kriterium 2:

Bewertungsmaßstab:

Rissverheilung

Kriterium: Risse/Risssysteme im Gestein sollten nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt sein.

Sachverhalt

Die Rissverheilung erfolgt durch geochemisch geprägte Rekristallisationsprozesse im Riss mit oder ohne Fremdminerale in Abhängigkeit von den vorliegenden Druck- und Temperaturbedingungen. Dabei werden in den ehemaligen Rissbereichen erneut atomare Bindungskfäfte aufgebaut, die phänomenologisch zur Rückbildung der Kohäsion führen.

Für verschiedene Gesteinsarten sind unterschiedliche Verheilungsmechanismen bekannt:

- Elastisch-spröde polykristalline Gesteine mit keinen bzw. vernachlässigbar geringen Kriecheigenschaften, z. B. Granit, verheilen nur durch Sekundärmineralisation. Kluftverheilung durch Sekundärmineralisation findet nur in Anwesenheit eines Lösungsmittels, eines Konzentrations- und Temperaturgefälles sowie in Lösung befindlicher Ionen statt (Lösungsinhalte).
- Gering plastisch-duktil feinklastische Gesteine, z. B. Tongesteine, verheilen nur durch Sekundärmineralisation, wobei dieser Prozess nicht regelmäßig auftreten muss und daher nicht mit der erforderlichen Sicherheit prognostizierbar ist. Der Prozess des Quellens wird hier nicht berücksichtigt, da dieser im engeren Sinne keine Verheilung, sondern eher eine Rissschließung darstellt.
- Viskoplastisch-duktil polykristalline Gesteine mit ausgeprägtem Kriechvermögen, z. B. chloridische Salzgesteine, verheilen nach erfolgter mechanischer Rissschließung und durch geochemisch geprägte Rekristallisationsvorgänge unter Einfluss von Temperatur, Feuchtigkeit (Salzlösung) und Druck mit Mineralkorn-

neubildung im Rissbereich. Einen bergbautechnisch bekannten Extremfall und zugleich in situ-Beleg stellt die Rekompaktion von Salzgrus (Salzhautwerk) dar, die unter den Randbedingungen Zeit, Druck, Temperatur, Feuchtigkeit bis hin zur Ausbildung eines Festgesteins mit nahezu natürlichen Eigenschaften erfolgen kann.

In die Formulierung von indikatorbezogenen Bewertungsmaßstäben können einbezogen werden:

- Qualitativ die Existenz der Mechanismen Rekristallisation und Sekundärmineralisierung in Verbindung mit dem grundsätzlichen Vorhandensein der Bedingungen für die Aktivierung und die Umsetzung der jeweiligen gesteinsabhängigen Verteilungsprozesse
- Quantitativ der Grad der Rückbildung der Kohäsion unter den jeweiligen in situ-Bedingungen (z. B. Druck, Temperatur, Feuchtigkeit)

Vorgehensweise bei der Abwägung

Es wurden zur Bewertung der Anforderung zwei Kriterien mit insgesamt fünf Indikatoren abgeleitet. An den einzelnen Kriterien orientiert ist ein je nach Sachverhalt qualitativ oder quantitativ ausgeformter Bewertungsmaßstab entwickelt worden. Die Sachverhalte sind in [LUX 2002a] zusammengestellt, grundlegende Aspekte dieser Sachverhalte sind vorstehend skizziert worden. Die daraus entwickelten Bewertungsmaßstäbe sind so aufgebaut, dass Kriterien bezogen bis auf eine Ausnahme eine dreistufige Abwägung der jeweiligen Befunde möglich wird.

Nach Durchführung des Abwägungsprozesses für jeden einzelnen Indikator wird eine Aggregation zu einer Gesamtabwägung vorgenommen.

Im Folgenden sind die Kriterien und die Abwägung zusammenfassend dargestellt:

Veränderbarkeit der Gebirgspermeabilität

Indikator I1: Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte die Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgspermeabilität unter den zu erwartenden anthropogenen und zukünftigen geogenen Zusatzbeanspruchungen des Gebirges gering sein.

Kriterium 1 zu I1: Die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit sollte gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein.

Abwägung 1 zu I1: Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit/Gesteinsdurchlässigkeit:

Verhältnis aus Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit	$K_{\text{geb}}/K_{\text{gest}} < 10$	$K_{\text{geb}}/K_{\text{gest}} \leq 100$	$K_{\text{geb}}/K_{\text{gest}} > 100$
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Kriterium 2 zu I1: Die Barrierenwirkung der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar sein.

Abwägung 2 zu I1: Berücksichtigung folgender Erfahrungsbereiche bzgl. der Gebirgsformationen:

- Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein
- Fossile Fluideinschlüsse
- Unterlagernde wasserlösliche Gesteine
- Unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe
- Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken

- Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung
- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien

Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit der Gebirgsforma-tionen	Die Gebirgsformati-on/der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchläs-sig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener/ technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsforma-tion/der Gesteinstyp ist mangels Er-fahrung nicht unmit-telbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsforma-tion/der Gesteinstyp wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identi-fiziert.
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Kriterium 3 zu I1: Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen.

Abwägung 3 zu I1:

Duktilität des Gesteins	duktil/plastisch-viskos ausgeprägt	spröde-duktile bis elasto-viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear-elastisch
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Rückbildbarkeit von Rissen

Indikator I2: Rückbildung von anthropogen/geogen bedingten Rissen/Risssystemen

Bedingung: Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte aufgrund der Gesteinseigenschaften grundsätzlich die Rückbildbarkeit von anthropogen/geogen bedingten Rissen/Risssystemen gegeben sein.

Kriterium 1 zu I2: Risse/Risssysteme im Gestein sollten bei Beanspruchungs-inversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen sein.

Abwägung 1 zu I2:

Rissverheilung	Die Risssschließung erfolgt aufgrund eines duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risssschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringerung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z. B. Quelldeformationen.	Die Risssschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z. B. sprödes Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Kriterium 2 zu I2: Risse/Risssysteme im Gestein sollten nach der Risssschließung geomechanisch wirksam verheilt sein.

Abwägung 2 zu I2:

Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich	-----	Rissverheilung nur durch Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Zusammenfassende Abwägung I1 - II2:

Nach Wertung der einzelnen Abwägungsprozesse folgt die zusammenfassende Abwägung für die Anforderung „*Geringe Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten*“ mit Hilfe des nachfolgenden Wertungsschemas:

Summe der Einzelindikatorpunkte	überwiegend günstige Wertung	überwiegend bedingt günstige Wertung	überwiegend weniger günstige Wertung
	keine bis marginale Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Wasserwegsamkeiten	Bildung von dauerhaften sekundären Wasserwegsamkeiten zu erwarten
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

4.1.4.8 Gasverträglichkeit

Sachverhalt

Endgelagerte radioaktive Abfälle können bei Kontakt mit Wasser oder Lösungen durch Korrosion und Radiolyse Gase bilden. Weitere Quellen für eine Gasbildung sind organische Bestandteile in den Abfallgebinden selbst oder deren mikrobielle Zersetzung. Zur Beurteilung der Auswirkung der Gasbildung auf die Sicherheit des Endlagers sind die maximal mögliche Gasmenge, die unter Endlagerungsbedingungen aus dem Abfall gebildet werden kann, sowie die Gasbildungsrate (Volumen pro Jahr) von Bedeutung. Die Gasmenge wird im Wesentlichen von der Art und den Inhaltstoffen der Abfälle, durch die Feuchte in den Abfallgebinden sowie durch das Grundwasser- bzw. Lösungsdargebot an die Gebinde bestimmt. Die Gasbildungsrate hängt ab von der Temperatur, der Feuchte und dem chemischen Milieu am Einlagerungsort bzw. im Gebinde.

Bei Kontakt der Abfallgebände mit Grundwasser oder externen, d. h. von außen zutretenden, Lösungen werden Korrosionsgase gebildet. Darüber hinaus können bei

einer ausreichend hohen Strahlungsintensität der Abfallgebinde Radiolysegase entstehen. Beide Entstehungsarten werden als externe Gasbildung bezeichnet.

Schwach und mittelradioaktive Abfälle (LAW/MAW) hingegen setzen auch ohne äußer Einflüsse Gase frei. Diese entstehen durch interne Prozesse, wie mikrobielle Zersetzung von organischen Abfallbestandteilen oder durch Korrosion von Abfallbestandteilen aufgrund des Feuchtegehaltes der Abfallgebinde (interne Gasbildung).

Für den bis zum Jahr 2040 prognostizierten Anfall an LAW/MAW Abfällen von ca. 300.000 m³ wird bei Anwesenheit externer Lösungen eine Gasmenge - durch interne und externe Gasbildung - von ca. 50 Millionen Normkubikmeter abgeschätzt, wobei etwa ein Drittel aus der internen Gasentwicklung stammt.

Sicherheitstechnische Bedeutung der Gasbildung

Die Gasbildung radioaktiver Abfälle in der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann bei hohen Gasbildungsraten und großen Gasmengen zu einem Druckaufbau im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Die sicherheitstechnische Bedeutung des mit der Gasbildung verbundenen Druckaufbaus liegt in der Gefährdung der Integrität der Barrieren. Auch eine Beschleunigung des Radionuklidtransports durch Gase ist nicht auszuschließen.

Gegenmaßnahmen

Eine wissenschaftlich belastbare Überprüfung der Auswirkung der Gasbildung ist erst mit standortspezifischen Daten in einem Anlagenkonzept möglich. Daher sollen im Folgenden Gegenmaßnahmen diskutiert und bewertet werden.

Um den Druckaufbau aufgrund von Gasentwicklung auf zulässige Werte zu begrenzen, müssen die Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und die Endlagerkonzeption so aufeinander abgestimmt sein, dass die Barrierenintegrität und die Barrierenwirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht gefährdet werden. Als Maßnahmen gegen einen unzulässig hohen Druckaufbau stehen prinzipiell folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Begrenzung der Gasentwicklung bzw. der Gasmenge und der Gasbildungsrate,
- Begrenzung des Druckaufbaus durch konzeptionelle Maßnahmen.

Eine Begrenzung der internen Gasentwicklung bei LAW/MAW-Abfällen ist nur durch eine andere Konditionierung der Rohabfälle oder durch Umkonditionierung der bereits konditionierten Altabfälle zu erreichen. Für die ca. 60.000 m³ Altabfälle wäre eine Umkonditionierung zur Begrenzung der internen Gasbildung erforderlich.

Eine Verhinderung oder Begrenzung der externen Gasbildung kann durch Einlagerung der Abfallgebinde in dichte, trockene oder nahezu trockene Barrieregesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erreicht werden. Eine derartige Gebirgs-situation kann am ehesten für Gesteinstypen mit einer Gebirgspermeabilität kleiner 10⁻¹⁹ m² erwartet werden. Bei Einlagerung von LAW/MAW-Abfällen in ein solches Barrieregestein ist aufgrund der internen Gasbildung die Schaffung von Gassammel-räumen zur Druckbegrenzung erforderlich.

Durch ein Wirtsgestein ausreichender hoher Permeabilität und räumlicher Ausdehnung kann dem Druckaufbau sowohl durch die natürliche Speicherfähigkeit des Wirtsgesteins als auch durch Verdrängungsprozesse des Grundwassers begegnet werden. In diesem Fall ist eine interne und externe Gasbildung zu unterstellen. Für den LAW/MAW-Abfall ist mit einer Gasentwicklung von ca. 50 Millionen Normkubikmeter zu rechnen. Es wurden im Auftrag des AkEnd Fallstudien für unterschiedliche geologische Situationen und Gasentwicklungen durchgeführt [JAVERI & BALTES 2001]. Diese zeigen z. B., dass ein Wirtsgestein mit einer hydraulischen Leitfähigkeit größer 10⁻¹⁰ m/s und einer Ausdehnung von mehreren Hundert Metern, d. h. einigen Mio. Kubikmetern Volumen, in der Lage wäre, die Druckerhöhung im Endlagerbereich auf 20 % des dort herrschenden hydrostatischen Druckes zu begrenzen.

Bewertung der Gegenmaßnahmen

Für die LAW/MAW-Abfälle steht kein effizientes Verfahren zur Umkonditionierung der Altabfälle im Hinblick auf die Reduzierung der Gasbildung zur Verfügung steht. Daher muss bei der Endlagerung dieser Abfälle die interne Gasbildung berücksichtigt werden.

Bei der Schaffung von Gassammelräumen muss deren Funktionstüchtigkeit über lange Zeiträume gewährleistet sein. Zusätzlich ist das Risiko zu bewerten, dass Wässer zutreten, die sich nicht im Gleichgewicht mit der Formation befinden, in denen die Gassammelräume angelegt wurden. Das Endlagersystem kann hierdurch unkalkulierbar nachteilig beeinflusst werden. Die zukünftige Entwicklung eines solchen Endlagersystems ist nur bedingt prognostizierbar und der Nachweis der Langzeitsicherheit nur erschwert zu führen. Weiterhin sind Auswirkungen unbeabsichtigter menschlicher Eingriffe in das Endlagersystem nicht oder nur schwer zu beherrschen. Deshalb muss für dieses Konzept der Zutritt von Wässern mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.

Bei der Einlagerung der LAW/MAW-Abfälle in ein höher permeables Wirtsgestein liegt ein Zielkonflikt mit der Forderung nach Gesteinstypen kleiner Permeabilität zur Isolation der Abfälle vor. Die Erfüllung beider Anforderungen ‚Begrenzung des Druckaufbaus‘ und ‚Isolation der Abfälle‘ erfordert Konfigurationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die ein höher permeables Wirtsgestein ausreichender Abmessung eingebettet in ein Barrieregestein aufweisen.

Zutretende Formationswässer in die Endlagerhohlräume bedeuten nicht nur ein Risiko für die Freisetzung von Schadstoffen aus den LAW/MAW-Abfällen, sondern auch für die HAW-Abfälle, wenn beide Abfallströme nicht in weiträumig hydraulisch getrennten Bereichen eingelagert wurden. Verbindungswege innerhalb eines Endlagers stellen jedoch immer ein Risiko für die Ausbreitung von Wässern dar. Bei der Endlagerung beider Abfallströme in ein Endlager ist ein Standort anzustreben, der die Einlagerung des HAW/BE-Abfalls in das Barrieregestein und die Einlagerung des LAW/MAW-Abfalls in ein permeables Wirtsgestein ermöglicht.

Schlussfolgerungen

Für die Auswahl von Standorten sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Zur Begrenzung der externen Gasbildung aufgrund von außen zutretender Wässer oder Lösungen ist es geboten, im Auswahlverfahren nach einer günstigen geologischen Gesamtsituation mit möglichst dichtem Einschluss und möglichst geringem Wasserangebot zu suchen.

- Bei der Einlagerung von LAW/MAW-Abfällen in dichtes Barrieregestein ist die Schaffung von Gassammelräumen unabdingbar. Aus Gründen der Langzeitsicherheit muss für dieses Konzept der Zutritt von Formationswässern mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.
- Die gezielte Suche nach Konfigurationen einschlusswirksamer Gebirgsbereiche mit einem Wirtsgestein ausreichender Permeabilität und Abmessungen, welches von einem Barrieregestein umgeben ist, stellt sehr hohe Anforderungen an die zur Ausführung des Auswahlverfahrens erforderliche geologische Datengrundlage und geowissenschaftlichen Kenntnisse.
- Im Auswahlverfahren muss berücksichtigt werden, dass das Konzept der Einlagerung von LAW/MAW-Abfällen mit Gassammelräumen den Flächenbedarf /Volumenbedarf für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wesentlich erhöht. Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei Einlagerung von wärmeproduzierenden HAW/BE-Abfällen und nicht wärmeproduzierenden LAW/MAW-Abfällen in ein gemeinsames Endlager eine ausreichende räumliche Trennung der beiden Abfallströme erforderlich ist, um die Beeinflussung der Gasbildung durch Temperaturerhöhung an den LAW/MAW-Abfällen zu minimieren.

Für die beiden Abfallströme sind jeweils unterschiedliche geologische Voraussetzungen als besonders günstig zu bezeichnen. Unter Abwägung der genannten Punkte ist daher bezüglich der Gasproblematik die Einlagerung der HAW/BE-Abfälle und LAW/MAW-Abfälle an zwei adäquaten Standorten oder an einem Standort in adäquate Wirtsgesteine unter Sicherheits- und Nachweisaspekten sinnvoll bzw. unerlässlich.

Ableitung eines Kriteriums

Kriterium: Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.

Indikator: Wasserangebot im Wirtsgestein

Abwägung: Wassergehalt und gegebenenfalls Gebirgsdurchlässigkeit als Indikatoren für das Wasserangebot:

Wasserangebot im Wirtsgestein	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s)	feucht
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Ist das Wasserangebot der Gesteine derart, dass die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht, wird die Situation im Sinne des folgenden Kriteriums als „feucht“ eingestuft, im anderen Fall als „trocken“.

Kriterium: Der Druckaufbau durch die erwartete Gasbildung der Abfälle sollte möglichst gering sein.

Indikator: Wirtsgesteinstyp

Abwägung: Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteinstyps (m/s):

Gebirgsdurchlässigkeit in m/s	$> 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$< 10^{-10}$
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

4.1.4.9 Temperaturverträglichkeit

Sachverhalt

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) wurden im Auftrag des AkEnd neue numerische Untersuchungen zur Wärme-Ausbreitung und damit zum Aufbau lokaler Temperaturspannungen durchgeführt [JENTZSCH 2002]. Diese Modellrechnungen gestatten die Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der

Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnungen. Die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, wie der Zugfestigkeit, ermöglicht die Angabe der Bereiche um eine Wärmequelle, in denen Brüche zu erwarten sind. Umgekehrt lassen sich daraus unter der Randbedingung des vorgegebenen Wärmeeintrags Anforderungen an das Gestein ableiten, die erfüllt sein müssen, wenn die Bruchzone auf die unmittelbare Umgebung des Endlagers beschränkt sein soll, um eine Beeinträchtigung der Barriere zu vermeiden.

Ableitung von Kriterien

Bei der Ableitung der Kriterien sind zwei Aspekte zu berücksichtigen:

- a) Temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften (*mineralogischer Ansatz*),
- b) Thermomechanische Spannungen, die zu Brüchen führen und damit Wasserwegsamkeiten öffnen (*thermomechanischer Ansatz*).

Der mineralogische Aspekt ist für Tonstein von Bedeutung, aber auch für Granit, da dort durch die Verfüllung mit Bentonit als zusätzlicher technischer Barriere ein Material verwendet wird, das ähnliche Eigenschaften wie Tonstein aufweist. Somit kann der aus mineralogischer Sicht zu erwartende Vorteil der besseren Temperaturverträglichkeit von Granit gegenüber Tonstein nicht ausgenutzt werden. Außerdem zeigen die Modelluntersuchungen, dass hohe thermische Spannungen auftreten können, die auch im Granit nur dann nicht zu Brüchen führen, wenn bestimmte Zugfestigkeiten nicht unterschritten werden.

Bei der Betrachtung der Temperaturverträglichkeit der Gesteine sind hohe und isotrope Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität und geringer Wärmeausdehnungskoeffizient sowie eine hohe Zugfestigkeit und hohes Relaxationsvermögen der Gesteine positive Eigenschaften. Durch die Forderung, dass die gesuchte günstige geologische Gesamtsituation für die Errichtung eines Endlagers ausreichende Ausdehnung aufweisen muss, ist gewährleistet, dass eine mittlere Wärmeproduktion im Endlagerbereich von $0,1 \text{ W/m}^3$ und eine Temperatur von $100 \text{ }^\circ\text{C}$ an der Kontur der Endlager Hohlräume unterschritten werden können.

Kriterium zu a): Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen < 100 °C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen.

Abwägung: Die geochemische Stabilität der Gesteine unmittelbar um die Abfallhohlräume gegenüber wärmeinduzierten Mineralumwandlungen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflussen ist gewährleistet im Temperaturbereich:

Temperatur in °C	> 120	100 - 120	< 100
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Kriterium zu b): Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.

Abwägung 1: Entfernung um die Einlagerungshohlräume (m), in der thermisch bedingte Überschreitungen der Zug- und Dilatanzfestigkeiten auftreten können:

thermomechanisch gestörte Umgebung in m	< 10	10 - 50	> 50
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

Abwägung 2: Zugfestigkeit des Gesteins (MPa) im Nahbereich (im Abstand von etwa 10 m bis 50 m vom Endlagerbereich) bei einer Kontakttemperatur von 100 °C beispielhaft für die Gesteinstypen Granit, Tonstein und Steinsalz:

Granit	> 13	≥ 8	< 8
Tonstein	> 8	≥ 4	< 4
Steinsalz	> 2	1 - 2	< 1
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

4.1.4.10 Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden

Sachverhalt

Für eine Retardation von Radionukliden in der Geosphäre sind die Ionenstärke bzw. die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z. B. Karbonat 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 (z.B. Kohle, Torf) 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 Karbonat-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 Kapitel 4.1.4.11). Vielmehr muss eine Beurteilung günstiger geochemischer Verhältnisse für Sorptionsvorgänge im Rahmen einer komplexen Gesteins-, Nuklid- und Milieu-spezifischen Fallunterscheidung vorgenommen werden.

Kriterium: Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine sollte möglichst groß sein.

Diskussion:

Eine wissenschaftlich belastbare Überprüfung des Kriteriums ist erst mit standort-spezifischen Daten in einem Anlagenkonzept möglich, d. h. ein pauschal anwendbares quantitatives Kriterium für günstige geochemische Verhältnisse im Hinblick auf Sorptionsprozesse ist nicht ohne weiteres ableitbar (siehe Kapitel 4.1.4.11). Dennoch lassen sich hinsichtlich günstiger Gesteinszusammensetzungen 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 Lösungszusammen-

setzung), für die sie ermittelt wurden. Die Übertragung von Sorptionsdaten auf andere geochemische Bedingungen ist nicht möglich.

Ableitung eines Kriteriums aus sicherheitsanalytischen Betrachtungen

Aufgrund obiger Gegebenheiten ist eine Einschätzung des Rückhaltevermögens der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Verfahrensschritt 2 nur mit eingeschränkter Zuverlässigkeit möglich. Aus diesem Grund kann diese Anforderung im Verfahrensschritt 2 nur als Sicherheitsreserve in das Verfahren einbezogen werden.

Indikatoren für das Rückhaltevermögen der Gesteine sind ihr Sorptionsvermögen gegenüber Radionukliden sowie das Vorhandensein von Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche.

Als Maß für das Sorptionsvermögen wird in Sicherheitsanalysen der lineare Sorptionskoeffizient K_d herangezogen. Ein K_d -Wert von $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ bedeutet bei einer absoluten Porosität des Gesteins von 0,15, dass der Transport von Radionukliden im Grundwasser gegenüber der Abstandsgeschwindigkeit um etwa den Faktor 10 - 20 verzögert wird.

Insbesondere gilt, dass Gesteine, die ein Sorptionsvermögen für langlebige Radionuklide aufweisen, vorteilhaft sind. Langzeitsicherheitsanalysen zeigen, dass von radioaktiven Abfällen mit kleineren Aktivitäten keine relevanten radiologischen Risiken ausgehen. Gestützt wird dies durch die Werte der Strahlenschutzverordnung für die uneingeschränkte Freigabe von radioaktiv kontaminiertem Bauschutt ($> 1.000 \text{ t/a}$). Den Analysen liegt ein Richtwert von $0,01 \text{ mSv}$ pro Jahr Individualdosis für die maximal zulässige Strahlenexposition zugrunde. Demnach können jährlich Abfälle mit Aktivitäten von etwa 10^8 Bq bis 10^9 Bq langlebiger Radionuklide (U-238, Np-237) uneingeschränkt freigegeben werden. Aus diesen Betrachtungen lässt sich als Kriterium für die Rückhaltung wie folgt ableiten:

Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Kriterium: Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine sollte möglichst groß sein; der Kd-Wert für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide sollte größer oder gleich 0,001 m³/kg sein.

Abwägung: Anzahl der Elemente von langzeitrelevanten Radionuklide, die von den Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut sorbiert werden:

Elemente	Uran Protactinium Thorium Plutonium Neptunium Zirkonium Technetium Palladium Jod Cäsium Chlor	Uran Plutonium Neptunium Zirkonium Technetium Cäsium
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig

Die Liste muss vor der Verfahrensdurchführung an aktuelle Abschätzungen des Nuklidinventars angepasst werden (siehe Tabelle 4.7).

Tabelle 4.7: Langzeitrelevante Radionuklide mit Gesamtaktivitäten größer 10^{10} Bq nach 1 Million Jahren bei einem angenommenen Inventar von etwa 10.000 abgebrannten DWR Brennelementen (0.534Mg SM/BE)

Radionuklid	Abgeschätzte Gesamtaktivität nach 1000 Jahren [Bq]	Abgeschätzte Gesamtaktivität nach 1 Million Jahre [Bq] [HERRMANN & RÖTHEMEIER 1998]
Ra 226	$3,2 \times 10^{12}$	10^{14}
Ac 227		10^{12}
Th 229	$1,5 \times 10^{11}$	10^{14}
Pa 231	$2,6 \times 10^{11}$	10^{12}
U 233	$3,7 \times 10^{12}$	10^{12}
U 234	$2,2 \times 10^{15}$	10^{14}
U 235	$1,2 \times 10^{13}$	10^{12}
U 236	$2,9 \times 10^{14}$	10^{13}
U 238	$2,6 \times 10^{14}$	10^{15}
Pu 242		10^{14}
Np 237	$1,1 \times 10^{15}$	10^{14}
Zr 93	$2,2 \times 10^{15}$	10^{14}
Tc 99	$1,4 \times 10^{16}$	10^{14}
Pd 107	$1,3 \times 10^{14}$	10^{13}
J 129		10^{13}
Cs 135	$4,1 \times 10^{14}$	10^{14}
Cl 36	$2,2 \times 10^{15}$	10^{11}

Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Kriterium: Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten möglichst hohe Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche aufweisen

Filterung von Kolloiden

Die Kolloidgröße ist per definitionem: 1 μm bis 1 nm (10^{-6} m 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.

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.

Für die Filterung von Kolloiden lässt sich kein Kriterium ableiten.

4.1.4.11 Hydrochemische Verhältnisse

Sachverhalt

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 CO₂-Partialdruck charakterisiert. Unter derartigen Bedingungen sind geringe Löslichkeiten von Radionukliden zu erwarten.

Als mögliche Indikatoren zur Identifizierung günstiger hydrochemischer Verhältnisse gelten der Eh-Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, der Gehalt an organischen Substanzen und das Fehlen freien Sauerstoffs im Grundwasser sowie darüber hinaus der pH-Wert und die Pufferung durch vorhandene karbonathaltige Gesteine. Für eine Retardation von Radionukliden sind die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z. B. Karbonatkomplexe 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 Tiefenwasser und Gestein.

Der AkEnd hat geprüft, inwieweit sich auf der Basis heute zugänglicher Daten quantitative bzw. qualitative Kriterien für die o. g. Indikatoren ableiten lassen [LARUE et al. 2001]. Dabei wurden auch das schrittweise Vorgehen bei einer Standort-

auswahl und die beim jeweiligen Verfahrensschritt voraussichtlich vorliegenden Kenntnisse und Daten berücksichtigt.

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

Ableitung von Kriterien

Kriterien für die unter geochemischen Gesichtspunkten auszuwählenden Endlagerformationen können, wenn keine speziellen Befunde in den ersten beiden Verfahrensschritten vorliegen, nur an Hand vorhandener und leicht zugänglicher Informationen des Mineralbestandes, der Tiefenwasserzusammensetzung und der aus Laborversuchen abgeleiteten Kenntnisse zum Verhalten von Abfällen und Radionukliden entwickelt 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 derzeit zu lückenhaft, um eine Charakterisierung vornehmen zu können. Es fehlen in der Regel wichtige Daten, z. B. zum Redox-Potenzial und zur Konzentration von gelösten redoxsensitiven Komponenten. Angaben zu pH-Werten sind ebenfalls lückenhaft. Zuverlässige Aussagen sind daher erst nach genauerer regionaler bzw. standortspezifischer Betrachtung möglich.

Eine wichtige Eigenschaft einer günstigen geologischen Gesamtsituation ist das Vorliegen eines chemischen Gleichgewichtes zwischen Tiefenwasser und dem anstehenden Gestein. Diese Bedingung ist aber auf Grund der in der Regel unzureichenden Datenbasis in den ersten beiden Verfahrensschritten nicht direkt überprüfbar und damit nachrangig zum hydraulischen Kriterium "geringe Grundwasserbewegung" zu verwenden. Denn bei günstigen hydraulischen Kennwerten des Wirtsgesteins (z. B. hydraulische Leitfähigkeit $< 10^{-12}$ m/s) und einer entsprechend mächtigen Gesteinsformation kann von einem chemischen Gleichgewicht aus-

gegangen werden. Der Nachweis des thermodynamischen Gleichgewichts erfolgt mit Hilfe geochemischer Modellrechnungen.

Hydro- und geochemische Parameter, die einen Einfluss auf Löslichkeit und Transportverhalten von Radionukliden haben, sind potenzielle Ansatzpunkte zur Ableitung weiterer Kriterien. Für die einzelnen Einflussfaktoren des geochemischen Milieus wie pH-Wert, Redoxzustand, Ionenstärke, Kolloidbildung und –stabilität sowie Komplexbildung mit Lösungsinhaltsstoffen lassen sich aber aufgrund komplexer Wechselwirkungen keine einfachen quantitativen Kriterien ableiten. Vorteilhaft sind pH-Werte über 7 und geringe Karbonatkonzentrationen des Tiefenwassers. Wegen der komplexen Zusammenhänge lässt sich auch keine allgemeingültige Rangfolge der Einflussfaktoren aufstellen, vielmehr muss die Priorität der Kriterien in Abhängigkeit von der Gesteinsformation in jedem Einzelfall auf der Basis standortspezifischer Untersuchungen und Daten abgewogen werden.

Allerdings können die genannten Einflussgrößen als Indikatoren herangezogen werden. Die hinsichtlich niedriger Radionuklidlöslichkeiten wünschenswerten Bereiche der Indikatoren ergeben sich wie folgt:

Indikator: pH-Wert

Aus der pH-Abhängigkeit der Radionuklidlöslichkeit kann ein Tiefenwasser-pH-Wert zwischen 7 und 8 als positives Kriterium festgelegt werden.

Liegen Karbonat-Spezies in Lösung vor, ist bei pH-Werten über 9 mit einem Anstieg der Actinidenkonzentrationen in Lösung aufgrund von Karbonatkomplexierung zu rechnen. Sind nur äußerst wenige Karbonat-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 Karbonatkonzentration 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 -Oxidhydrate, wünschenswert. Da aber die Ladung der sorbierenden Feststoffoberflächen in komplexer Weise vom geochemischen Milieu abhängt (besonders pH-Wert, Ionenstärke), eignet sich diese Einflussgröße nicht als generell anwendbares quantitatives Kriterium.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zur quantitativen Festlegung geochemischer Kriterien standortspezifische Kenntnisse und Angaben zur Endlager-

konzeption vorliegen müssen. Diese können frühestens im Verfahrensschritt 4 bereitgestellt werden.

4.2 Sozialwissenschaftliche Kriterien

Die politische und gesellschaftliche Diskussion um die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland hat nach Einschätzung des AkEnd gezeigt, dass ein Endlagerstandort nur unter Einbeziehung sozialwissenschaftlicher Aspekte erfolgreich realisiert werden kann.

In einem Auswahlverfahren sind sozialwissenschaftliche Kriterien gleichrangig zu naturwissenschaftlichen Kriterien anzuwenden. Allerdings darf dies nicht zur Einschränkung der Sicherheit eines zukünftigen Endlagers führen. Diese Aussage wird durch die Ergebnisse der in den Jahren 2001 und 2002 durchgeführten repräsentativen Umfragen bestätigt. Damit wird gleichzeitig deutlich gemacht, dass sich ein sicheres Endlager und die gesellschaftlichen Interessen in der Wahrnehmung der Bürger und Bürgerinnen nicht gegenseitig ausschließen.

4.2.1 Ableitung sozialwissenschaftlicher Kriterien

Die sozialwissenschaftlichen Kriterien orientieren sich an zwei grundsätzlichen Anforderungen (siehe Abbildung 4.11): Zum einen sollen durch ein Endlager die Entwicklungspotenziale einer Region möglichst positiv, auf keinen Fall aber negativ beeinflusst werden. Zum zweiten soll die Bereitschaft der Bevölkerung, sich bei der Suche nach der Eignung eines Standortes für ein Endlager zu beteiligen, hoch sein.

Aus den Entwicklungspotenzialen werden zwei Kriteriengruppen abgeleitet. Eine Kriteriengruppe folgt aus den gesetzlich geschützten Potenzialen. Es handelt sich hierbei zum Beispiel um Naturschutzgebiete, Wasserschutzgebiete, denkmalgeschützte Objekte und Ensembles (Gruppierung von Einzelobjekten, die ein schützenswertes Gesamtbild darstellen).

Die rechtlich geschützten Entwicklungspotenziale führen zu den planungswissenschaftlichen Kriterien. Die rechtlich festgestellten geschützten oder für eine bestimm-

te Nutzung vorgehaltenen Gebiete werden aus planungswissenschaftlichen Gründen grundsätzlich als nicht geeignet oder weniger geeignet für einen Endlagerstandort eingestuft.

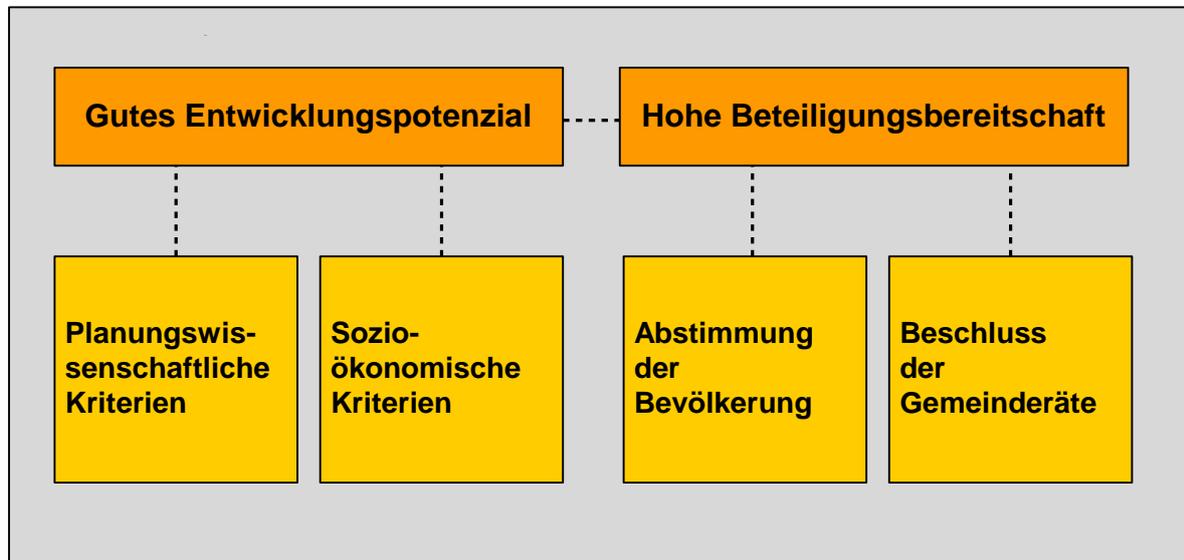


Abbildung 4.11: Sozialwissenschaftliche Anforderungen und zugehörige Kriterien

Die materielle Begründung für die rechtliche Unterschutzstellung wird grundsätzlich anerkannt. Je nach Stärke der Unterschutzstellung handelt es sich dabei um Ausschlusskriterien oder Abwägungskriterien. Nur in besonders begründeten Einzelfällen kann eine rechtliche Regelung in Frage gestellt werden. Dies muss dann durch Gutachten gestützt werden, bevor ein Verfahren zur Rücknahme der Unterschutzstellung eingeleitet werden kann.

In der zweiten Kriteriengruppe gibt es eine Vielzahl von Entwicklungspotenzialen, die keiner rechtlichen Schutzregelung unterliegen. Hierbei handelt es sich um kulturelle, soziale, ökonomische und natürliche Entwicklungspotenziale. Aus diesen Entwicklungspotenzialen ergeben sich sozioökonomische Kriterien. Dabei handelt es sich zum Teil um regionalspezifische Kriterien, die spezielle Wirtschaftsbranchen in der Region betreffen (z. B. Fremdenverkehr, Altindustrie) oder um allgemeingültige Kriterien (z. B. für den Wohnungsmarkt).

In Abstimmung mit der Bevölkerung sollen deshalb Gutachten zur Ermittlung der sozioökonomischen Entwicklungspotenziale der Standortregionen erstellt werden (Potenzialanalysen). Hierin werden zum Beispiel die möglichen Auswirkungen eines

Endlagers auf regionalspezifische Wirtschaftsbranchen (Fremdenverkehr, Altindustrie) oder auf den Wohnungsmarkt eingeschätzt. Für die Bewertung des Entwicklungspotenzials werden sozioökonomische Kriterien herangezogen, die sich unmittelbar auf sozioökonomische Strukturen und Prozesse beziehen, die die Entwicklung und die Lebensqualität einer Region oder eines Ortes bestimmen. Ein potenzielles Endlager soll die Entwicklung der Region wenn möglich positiv, auf keinen Fall aber negativ beeinflussen.

Kriterium Beteiligungsbereitschaft

Die internationale Gemeinschaft diskutiert, angeregt durch die Konzepte in Schweden und Finnland, über das Prinzip der freiwilligen Bewerbung von Regionen als ein wesentliches Element bei der Suche nach geeigneten Standorten. Der AkEnd hat entschieden, mit dem Konzept der Beteiligungsbereitschaft zu arbeiten. Die Beteiligungsbereitschaft baut auf eine von einer breiten Mehrheit akzeptierte gesellschaftliche Verpflichtung, ein Endlager zu errichten.

Die Abfrage der Beteiligungsbereitschaft bietet der Bevölkerung die Möglichkeit, sich für oder gegen eine Beteiligung an den jeweiligen Verfahrensschritten zu erklären und sich somit an den Entscheidungen bei der Suche nach einem Endlager aktiv zu beteiligen oder aber aus dem Verfahren zurückzuziehen.

Sollte es in keiner der potenziellen Standortregionen eine Beteiligungsbereitschaft geben oder sollte nach mehreren Versuchen in allen Standortregionen die Beteiligungsbereitschaft zurückgezogen werden, empfiehlt der AkEnd, dass der Deutsche Bundestag das weitere Vorgehen regelt, wobei die grundsätzliche Vorgehensweise im Auswahlverfahren beibehalten werden sollte.

4.2.2 Planungswissenschaftliche Kriterien

Bei jeder raumbedeutsamen Maßnahme – und dazu gehört auch die Endlagerung – kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Konflikten mit bestehenden oder geplanten Flächennutzungen oder Schutzgebietsausweisungen. In der Regel wird sich diese Konfliktsituation auf die für die oberirdischen Einrichtungen des Endlagers

benötigten Flächen beschränken, da sich die meisten raumordnerischen Flächen- bzw. Schutzgebietsausweisungen auf die Nutzung der Erdoberfläche selbst oder oberflächennaher Ressourcen bzw. Schutzgüter, einschließlich Oberflächenwasser und Grundwasser, beziehen. Die planungswissenschaftlichen Kriterien beziehen sich also auf Flächen, die wegen vorrangiger Nutzungen oder sonstiger spezieller Wertigkeiten (z. B. als Ressource oder Biotop) im Rahmen der Raumordnung und Landesplanung mittels gesetzlicher Vorgaben einem besonderen Schutz unterstellt werden. Diese Flächen, Ressourcen oder Schutzgüter sind also mehr oder weniger stark gegen konkurrierende Nutzungen und Eingriffe geschützt.

Die nach der heutigen Gesetzeslage zu berücksichtigenden planungswissenschaftlichen Kriterien sind bekannt. Grundlage für ihre Formulierung ist der Grad der Verbindlichkeit, mit dem die Flächen einer mit der Endlagerung konkurrierenden Nutzung bereits vorbehalten sind oder der Schutzstatus, mit dem Ressourcen bzw. Schutzgüter gegen Eingriffe geschützt sind. Je nach Grad des Schutzes lassen sich planungswissenschaftliche Ausschluss- und Abwägungskriterien ableiten.

Die planungswissenschaftlichen Kriterien brauchen zu Beginn der konkreten Umsetzung des Auswahlverfahrens nur noch unter Berücksichtigung der dann vorliegenden Gesetzeslage modifiziert/ergänzt zu werden. Die für die Anwendung dieser Kriterien notwendigen Daten liegen für ganz Deutschland flächendeckend vor.

Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien

Die planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien beziehen sich auf Flächen, Ressourcen oder Schutzgüter, die durch gesetzliche Vorgaben so stark geschützt sind, dass konkurrierende Nutzungen bzw. Eingriffe grundsätzlich verboten sind. Die entsprechenden Flächen kommen somit als Standort für ein Endlager nicht in Frage und werden mittels der Anwendung der Ausschlusskriterien im Verfahren ausgeschlossen (Ausschlussflächen). Insofern sind die planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien in ihrer Verfahrenswertigkeit den geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien vom Grundsatz her gleichgestellt. Unter ganz bestimmten Umständen kann allerdings eine Ausnahmeregelung in Kraft treten (s. u.).

Die planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien beziehen sich vor allem auf Naturschutzgebiete, Nationalparks, spezielle Biotope, Naturdenkmale und Wasserschutzgebiete (siehe Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8: Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien

Beurteilungsfeld	Kriterium	Begründung	Anmerkung
Natur- und Landschaftsschutz	Naturschutzgebiete	§ 23 BNatschG	
	Nationalparks	§ 24 BNatschG	Einzelfallprüfung
	Biosphärenreservate	§ 25 BNatschG	Einzelfallprüfung
	Naturdenkmale	§ 28 BNatschG	
	Geschützte Landschaftsbestandteile	§ 29 BNatschG	Einzelfallprüfung
	Gesetzlich geschützte Biotope	§ 30 BNatschG	Einzelfallprüfung
	Europäisches Netz "Natura 2000"	§§ 32 - 38 BNatschG	Einzelfallprüfung
Land- und Forstwirtschaft	Schutz- und Bannwälder, Naturwaldreservate	Forstgesetze d. Länder, z. B. § 22 Hess. Forstgesetz	länderspezifische Regelungen, Einzelfallprüfung
Wassernutzung	festgesetzte, vorläufig sichergestellte und geplante Trinkwasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete	§ 19 Abs. 2 WHG, Wassergesetze der Länder	zumindest Schutzzonen I und II
Überschwemmungsgebiete	festgesetzte, vorläufig sichergestellte und geplante Überschwemmungsgebiete	§ 32 Abs. 2 WHG, Wassergesetze der Länder	

Einzelfallprüfung bedeutet: Prüfen, ob bzw. welche Flächenanteile der entsprechenden Gebiete so stark geschützt sind, dass sie ausgeschlossen werden müssen.

Die planungswissenschaftlichen Ausschlusskriterien werden zu Beginn des dritten Verfahrensschrittes auf die nach dem zweiten Verfahrensschritt verbleibenden Teilgebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen angewandt (siehe Kapitel 3.2). Es werden also aus diesen Teilgebieten die Flächen "herausgeschnitten", die aus planungswissenschaftlichen Gründen für ein Endlager nicht in Frage kommen.

Der Ausschluss kann dann überregelt werden - und damit ein Eingriff in die geschützte Fläche bzw. die Ressource oder das Schutzgut genehmigt werden -, wenn zwingende Gründe des öffentlichen Interesses dafür sprechen und aus Sicherheitsgründen keine gleichwertigen Standortalternativen gegeben sind. Bei der Standortauswahl wäre dies der Fall, wenn der aus Sicherheitsgründen gegenüber anderen Standorten mit erheblichem Abstand höchstwertige Standort ein entsprechend geschütztes Gebiet beeinträchtigen oder wenn ein aus Sicherheitsgründen geeigneter Standort überhaupt nur in einem entsprechend geschützten Gebiet gefunden würde.

Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien

Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich auf Flächen, deren rechtlicher Schutz nicht so stark ist, dass andere Nutzungen oder Eingriffe ausnahmslos verboten sind oder aber nicht kompensierbar wären. Es handelt sich also um Flächen, die als Standort für ein Endlager möglichst nicht in Anspruch genommen werden sollten (Abwägungsflächen).

Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich u. a. auf ausgewiesene Vorranggebiete für bestimmte Nutzungen, Gebiete mit besonderer Bedeutung für bestimmte Nutzungen, Landschaftsschutzgebiete und Naturparks (siehe Tabelle 4.9). Bei allen planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien, die mit Vorgaben der Raumordnung oder der Landesplanung begründet werden, ist jedoch zu bedenken, dass bei deren Aufstellung ein möglicher Endlagerstandort naturgemäß noch nicht berücksichtigt werden konnte. Für die Festlegung von Endlagerstandorten müssen Raumordnung und Landesplanung also entsprechend überarbeitet werden.

Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien helfen bei den notwendigen Abwägungsprozessen, die bei der Auswahl von Standorten innerhalb der Standortregionen stattfinden müssen. Mit ihrer Hilfe können Flächen identifiziert werden, die im Vergleich zu anderen Flächen relativ konfliktärmer sind. Die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien gehören verfahrenssystematisch in den dritten Schritt des Auswahlverfahrens, da hier die Festlegung von Standorten innerhalb der Standortregionen stattfindet (siehe Kapitel 3.2.2).

Tabelle 4.9: Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien

Beurteilungsfeld	Kriterium	Begründung	Anmerkung
Natur- und Landschaftsschutz	Landschaftsschutzgebiete	§ 26 BNatschG	
	Naturparks	§ 27 BNatschG	
	Biosphärenreservate, geschützte Landschaftsbestandteile, gesetzlich geschützte Biotope	§§ 25, 29 und 30 BNatschG	sofern Einzelfallprüfung ergibt, dass sie nicht unter die Ausschlusskriterien fallen
	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für Natur und Landschaft	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Land- und Forstwirtschaft	Waldflächen mit besonderen Funktionen	Bundeswaldgesetz, Wald- und Forstgesetze der Länder	sofern Einzelfallprüfung ergibt, dass sie nicht unter die Ausschlusskriterien fallen
	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für Land- und Forstwirtschaft	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
	Gebiete landwirtschaftlich wertvoller Flächen (z. B. Sonderkulturen)	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Erholung	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für die Erholung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Denkmalschutz	Bau-, Kultur- oder archäologische Denkmale Bodendenkmale bewegliche Denkmale	Denkmalschutzgesetze der Länder	sofern Einzelfallprüfung ergibt, dass sie nicht unter die Ausschlusskriterien fallen
Wassernutzung	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für die Wassergewinnung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Reststoffgewinnung	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für oberflächennahe und tiefliegende Rohstoffe	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Konkurrierende Nutzung des untertägigen Raumes	Vorranggebiete Infrastruktur Energieversorgung Abfallentsorgung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	

Beurteilungsfeld	Kriterium	Begründung	Anmerkung
Infrastruktur	Verkehrsanbindung		
	Ver- und Entsorgungsmöglichkeiten		
	Vorrangstandorte für bestimmte Nutzungen (z. B. Energieerzeugung, Abfallbehandlung)	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
	Schutzzonen um Flughäfen, militärische Anlagen u. ä.	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung	
Mensch und Siedlung	Abstand zu Wohn- und Siedlungsgebieten	z. B. Abstands-erlass NRW	

4.2.3 Sozioökonomische Kriterien

Die sozioökonomischen Kriterien fußen auf der Überlegung, dass die langfristige Entwicklung einer Standortregion durch die Errichtung eines Endlagers keinen Schaden nehmen soll. Die einzelnen Kriterien beziehen sich auf die potenzielle Entwicklung des Arbeitsmarktes, der regionalen Investitionen und des Wohnungsmarktes unter der Annahme, dass ein Endlager errichtet wird. Die Durchführung einer Potenzialanalyse wird die notwendigen allgemeinen und ortsspezifischen Daten gewinnen, um Abweichungen feststellen zu können.

Grundsätzlich soll das Entwicklungspotenzial einer Standortregion als das Ergebnis mentaler und materieller Bestimmungsfaktoren verstanden werden, d. h. eine sinkende oder steigende regionale Identität wirkt sich als mentaler Faktor, die Entwicklung der natürlichen Umwelt oder der Verkehrsinfrastruktur als materieller Faktor auf die potenzielle Entwicklung aus. Diese zum Teil quantifizierbaren, zum Teil auch qualitativen Faktoren, die das Entwicklungspotenzial bestimmen, sind durch eine Potenzialanalyse für die einzelnen Standortregionen zu spezifizieren.

Grundlage bilden Entwicklungsgutachten, die von einschlägigen Instituten anzufertigen sind. Die Potenzialanalyse soll einen allgemeinen für alle Standortregionen standardisierten Teil enthalten, um sowohl eine Vergleichbarkeit zwischen den

untersuchten Standortregionen herzustellen als auch die Besonderheiten jeder individuellen Standortregion zu erfassen. Darüber hinaus sollen für die einzelnen Standortregionen spezifische Potenziale erfasst werden. Es könnte sich dabei um prägende historische Entwicklungen und Erfahrungen handeln, die mentale Strukturen formen. Es kann sich aber auch um regional spezifische wirtschaftliche Sektoren handeln, wie etwa das Brauereiwesen, oder um regionale landschaftliche Besonderheiten, die für die weitere Entwicklung von Bedeutung sind. Ein sowohl mentale als auch wirtschaftliche Strukturen betreffendes Potenzial stellt das Image einer Region dar, welches durch ein potenzielles Endlager beeinflusst wird. Bei der Beauftragung der Forschungsinstitute, durch die die Potenzialanalysen durchgeführt werden, ist es geboten, Einvernehmen zwischen Verfahrensbetreiber und der betroffenen Gemeinde nach der Diskussion im Bürgerforum herzustellen.

In den Potenzialanalysen sind, soweit möglich, auch quantitative Schwellenwerte anzusetzen, die auf positive oder negative Abweichungen in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen. Dieser Vergleich kann beispielsweise auf die durchschnittliche Entwicklung des Regierungsbezirkes, zu dem die Standortregion gehört, oder auch der des Landes oder Bundes abheben. In der Regel sollte zum Vergleich eine geographisch in der Nähe des Standortes liegende Region herangezogen werden, z. B. der Regierungsbezirk. Aus sozialwissenschaftlichen Studien bieten sich für das Maß der Abweichung folgende Schwellenwerte an:

- signifikante Abweichung (+/-10 %)
- relevante Abweichung (+/-15 %)
- gravierende Abweichung (+/-20 %)

Der AkEnd empfiehlt die Anwendung dieser Schwellenwerte.

Über die standardisierte Potenzialanalyse hinaus müssen auch die Potenziale erfasst werden, die spezifisch für eine Standortregion sind. Die Potenzialanalyse sollte folgende Bereiche behandeln:

- Beschreibung der sozioökonomischen Ausgangslage

- Identifizierung standortspezifischer Entwicklungspotenziale
- Entwicklungsprognose des Standortes ohne Endlager
- Darstellung der positiven und negativen Faktoren, die mit einer Ausweisung als Endlagerstandort und der Errichtung des Endlagers entstehen können
- Szenario der möglichen Entwicklung in Folge einer Standortentscheidung für die Errichtung eines Endlagers
- Repräsentative Befragung der Bürger und Bürgerinnen zu ihren Vorstellungen über eine wünschenswerte Regionalentwicklung
- Ergebnisse eines mit Bürgern und Bürgerinnen durchgeführten Workshops zu zukünftigen Entwicklungen
- Ergebnisse einer öffentlichen Diskussionsveranstaltung zu den Aussagen der Potenzialanalyse

Die Potenzialanalyse soll zu einer qualitativ gewichteten und wo immer möglich quantitativ gestützten Aussage darüber kommen, ob die Realisierung eines Endlagers in der Standortregion positive, negative oder neutrale Entwicklungschancen erwarten lässt.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse werden von den Bürgern und Bürgerinnen und dem Verfahrensbetreiber bewertet. Sollten diese Bewertungen stark voneinander abweichen, so schlägt der AkEnd vor, dass unter der Verantwortung des Kontrollgremiums ein weiteres Gutachten die strittigen Fragen klärt.

Damit dies nicht zu einer endlosen Reihe von weiteren Gutachten führt, sollten sowohl der Verfahrensbetreiber als auch das Bürgerforum und die Gemeinde bei der Definition der strittigen Fragen und der Auswahl der Gutachter beteiligt werden. Kommt es dennoch zu keiner Einigung, so entscheidet das Kontrollgremium.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse können den Verfahrensbetreiber veranlassen, einen Standort trotz vorhandener Beteiligungsbereitschaft nicht weiter zu untersuchen, wenn die Auswirkungen eines Endlagers die Entwicklungschancen einer

Region gravierend und nachhaltig negativ beeinflussen. Umgekehrt sollte bei in etwa gleich starker Beteiligungsbereitschaft die Standortregion weiter untersucht werden, in der die Entwicklungspotenziale bei der eventuellen Errichtung eines Endlagers besonders positiv sind (siehe Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Standardisierte Entwicklungspotenziale

Entwicklungsbereich	Indikatoren	Methode
Arbeitsmarkt	<ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Entwicklung der Arbeitslosigkeit • erwarteter Wanderungssaldo • erwartete Kaufkraftentwicklung 	Analyse des regionalen Entwicklungspotenzials
Investitionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Entwicklung der Investitionen • erwartete Strukturstärkung oder Schwächung durch die Entwicklung wichtiger Branchen 	s. o.
Wohnungsmarkt	<ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Belegung der Wohnungen • erwartete Entwicklung der Baulandpreise bzw. Pachtpreise 	s. o.

In der Abfolge der einzelnen Schritte kann es zu einer inhaltlichen Verschränkung der Durchführung einer Potenzialanalyse und der Feststellung der Beteiligungsbereitschaft kommen. So ist es denkbar, dass die Bürger einer Standortregion erst dann über ihre Bereitschaft zur Erkundung des Standortes abstimmen wollen, wenn sie sich mit Hilfe einer Potenzialanalyse Klarheit darüber geschaffen haben, welche möglichen Auswirkungen ein Endlager auf die Entwicklung einer Region haben könnte. Der AkEnd schlägt vor, hier flexibel vorzugehen und in solchen Fällen die Potenzialanalyse vorzuziehen.

4.3 Kriterien zur Eignungsprüfung

Die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers bedürfen nach § 9b des Atomgesetzes (AtG) der Planfeststellung. Das Endlager muss die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Schadensvorsorge gewährleisten. Die Sicherheitskriterien legen die zu fordernden Sicherheitsprinzipien und Schutzziele und die daraus folgenden grundlegenden Anforderungen an ein Endlager fest. Sie stellen somit eine Konkretisierung der Schadensvorsorge dar. Eine Aktualisierung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk ist derzeit in Arbeit. In Abbildung 4.12 ist das System rechtlicher Regelungen für ein Endlager dargestellt.



Abbildung 4.12: Schematische Darstellung von rechtlichen Regelungen für ein Endlager

Die Standortauswahl nach einem qualifizierten Standortauswahlverfahren ist eine grundlegende Anforderung, die in den aktualisierten Sicherheitskriterien enthalten sein soll. Der AkEnd hat die geowissenschaftlichen Auswahlkriterien und Abwägungsprozesse für die Verfahrensschritte 1 und 2 im Hinblick auf langfristige und größtmögliche Sicherheit des Endlagerstandortes und damit auf möglichst günstige Voraussetzungen für die Erfüllung der Sicherheitskriterien entwickelt. Im Laufe der

Verfahrensschritte 4 und 5 des Auswahlverfahrens muss geprüft werden, ob die Sicherheitskriterien tatsächlich an den jeweiligen Standorten erfüllt werden. Dieser Prozess wird als geowissenschaftliche Eignungsprüfung bezeichnet und wird von dem Verfahrensbetreiber unter Beteiligung des Kontrollgremiums und der Öffentlichkeit durchgeführt. Hiervon zu unterscheiden sind die Nachweise, die im anschließenden atomrechtlichen Genehmigungsverfahren geführt und von der Genehmigungsbehörde geprüft werden.

Die Eignungsprüfung erfolgt durch Bewertung der in Schritt 4 und 5 erhobenen Befunde. Hierzu benennt der Verfahrensbetreiber vor Durchführung der übertägigen Erkundungen in Schritt 4 und der untertägigen Erkundungen in Schritt 5 die entscheidenden Argumente für die Auswahl bzw. Eignungsaussage und legt zusammen mit der Bevölkerung (Kompetenzzentrum) und dem Kontrollgremium Bewertungsmaßstäbe für die Erkundungsergebnisse fest, die zur Bestätigung der Argumente erbracht werden müssen. Bestätigen die Erkundungsergebnisse die Argumente nicht, muss der Verfahrensbetreiber im Verfahren zurückgehen. Die übertägige Erkundung in Schritt 4 muss somit die wesentlichen Argumente, die für die Auswahl der besonders günstigen Teilgebiete am Ende von Verfahrensschritt 2 herangezogen wurden, bestätigen. Für die Beurteilung der untertägigen Erkundung in Schritt 5 werden Prüfkriterien aus vorangegangenen Sicherheitsbewertungen, die auf die Ergebnisse von orientierenden Sicherheitsanalysen aufbauen, abgeleitet. Die Prüfkriterien müssen sich auf einfache und mit eindeutigem Ergebnis zuverlässig erhebbare Sachverhalte beschränken und beziehen sich auf für die Langzeitsicherheit wichtige Sachverhalte.

Darüber hinaus muss geprüft werden, ob die im Atomgesetz geforderte Schadensvorsorge im Hinblick auf die Betriebssicherheit und die Langzeitsicherheit des Endlagers in einem späteren Genehmigungsverfahren nachgewiesen werden kann.

Unter dem Begriff Langzeitsicherheit versteht der AkEnd denjenigen Zustand des Endlagersystems, bei dem dauerhaft und nachsorgefrei keine Gefährdung von Mensch und Umwelt von den radioaktiven Abfällen ausgeht. Um dies zu gewährleisten, sollen mit dem Auswahlverfahren Standorte identifiziert werden, bei denen

- für den Fall der Normalentwicklung innerhalb des Isolationszeitraums von größenordnungsmäßig einer Million Jahre keine Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden und darüber hinaus im Hinblick auf den Schadstoffeinschluss Sicherheitsreserven ausgewiesen werden,
- für den Fall von außergewöhnlichen Entwicklungen die für Mensch und Umwelt geltenden Normen eingehalten werden.

Eine Normalentwicklung ist dann gegeben, wenn die freisetzungsrelevanten Zustände bzw. Prozesse mit hoher Wahrscheinlichkeit erhalten bleiben bzw. eintreten. Diese Zustände bzw. Prozesse müssen grundsätzlich gut beschreibbar sein. Eine außergewöhnliche Entwicklung ist durch zusätzliche standortbezogen abgeleitete Zustände bzw. Prozesse, die nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten, gekennzeichnet.

Die erforderlichen Sicherheitsnachweise für die verbliebenen Standorte werden am Ende des Verfahrensschrittes 5 durchgeführt. Mit den Sicherheitsnachweisen wird gezeigt, welches Isolationsvermögen der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren hat. Hierzu werden die Normalentwicklung und die außergewöhnlichen Entwicklungen (Veränderungen) der Komponenten des Mehrbarrierensystems des Endlagers sowie die Auswirkungen unbeabsichtigter Einwirkungen des Menschen in einer Langzeitsicherheitsanalyse betrachtet. Dabei sind die Streubreiten der freisetzungsrelevanten Parameter in angemessener Weise zu berücksichtigen. Sowohl für die orientierenden Sicherheitsbewertungen in Verfahrensschritt 4 als auch für die Sicherheitsnachweise in Verfahrensschritt 5 müssen Anlagenkonzepte für das Endlager an dem jeweiligen Standort vorliegen. Nur an Hand derer kann das Zusammenwirken von Abfallbehältern, Verfüllung der Hohlräume, Schachtverschlüssen und geologischen Barrieren bewertet werden (siehe Abbildung 4.13).

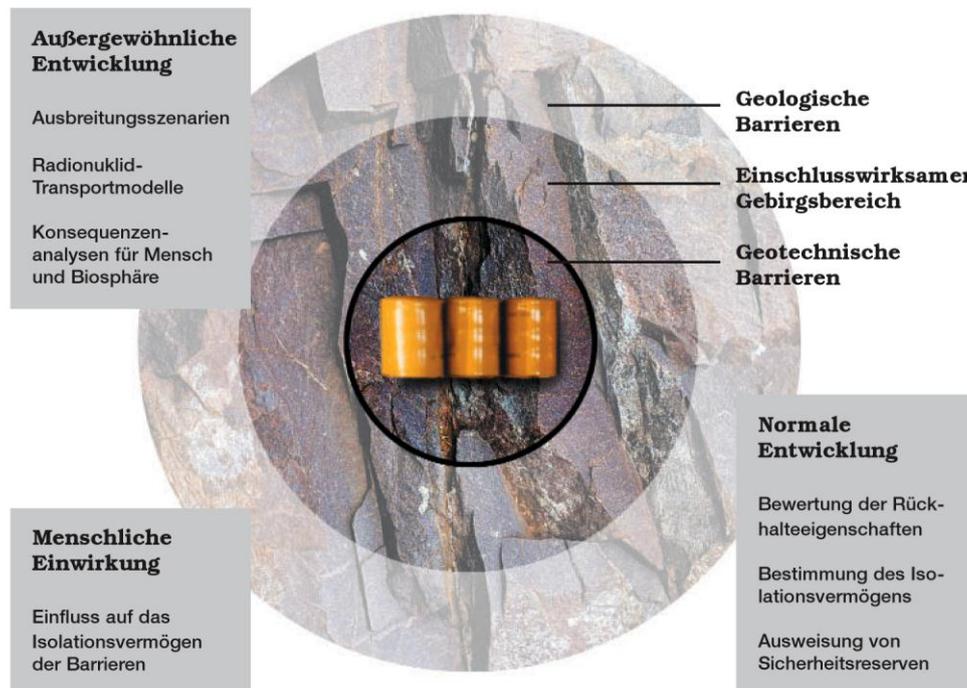


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der Langzeitsicherheit des Mehrbarrierensystems Endlager

Die Eignungsprüfung basiert somit auf den Ergebnissen von geowissenschaftlichen Studien, die Grundlage für die Aufstellung eines Erkundungsprogramms in Schritt 3 sind, und auf Ergebnissen von Sicherheitsanalysen, die Grundlage der orientierenden Sicherheitsbewertungen in Schritt 4 sind, sowie den Sicherheitsnachweisen in Schritt 5.

An Hand dieser Studien und Analysen werden u. a.

- das Isolationsvermögen des Endlagersystems bewertet,
- die Bedeutung sicherheitsbestimmender Eigenschaften und Parameter des Endlagersystems dargestellt,
- die Erkundungsprogramme festgelegt,
- Bewertungsmaßstäbe bzw. Prüfkriterien für die übertägige und untertägige Erkundung aufgestellt,

- Planungsgrundlagen für das Endlager abgeleitet und
- Risiken der nicht völlig auszuschließenden Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager berechnet (Konsequenzanalysen) und bewertet.

Die geowissenschaftlichen Studien und Sicherheitsanalysen werden vom Verfahrensbetreiber erstellt. Die Bewertung erfolgt sowohl durch den Verfahrensbetreiber als auch durch das Kontrollgremium. Die Bekanntgabe aller Kriterien zur Eignungsprüfung und ihre konsequente Anwendung am Ende des Auswahlverfahrens machen die Standortentscheidung sowohl für den Entscheider als auch für die Öffentlichkeit kontrollierbar und nachvollziehbar.

5 Beteiligung der Öffentlichkeit im Auswahlverfahren in Phase III

In demokratischen Staaten erfordert die Realisierung von Großprojekten eine intensive Beteiligung der Öffentlichkeit, bereits bevor eine formelle Planung beginnt. Seit der Umweltkonferenz von Rio de Janeiro (1992) wird in der Agenda 21 diesem Gedanken Rechnung getragen. Die Übereinkunft von Aarhus (1998) beinhaltet das Recht der Öffentlichkeit auf Zugang zu Informationen, Beteiligung an Entscheidungen und Zugang zu Gerichten im Zusammenhang mit Eingriffen in die Umwelt und damit möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit. Inzwischen haben sich besonders in der Stadt-, Regional- und Landschaftsplanung verschiedene Beteiligungsformen gebildet. Viele Länder, die auf der Suche nach Endlagerstandorten sind, haben erklärt, die Öffentlichkeit zu beteiligen. Der AkEnd hält eine aktive Beteiligung der Öffentlichkeit in jeder Phase und in jedem Verfahrensschritt für unerlässlich.

Das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS, Karlsruhe) hat im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz für den AkEnd in den Jahren 2001 und 2002 zwei für die Bundesrepublik Deutschland repräsentative Umfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und zum Vertrauen der Bevölkerung in verschiedene Institutionen durchgeführt [STOLLE 2002]. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, von welchen Anfangsbedingungen bei der Öffentlichkeitsbeteiligung ausgegangen werden muss (siehe Kapitel 2.3).

Der AkEnd hat die Öffentlichkeit bei der Entwicklung des Auswahlverfahrens (Phase I) kontinuierlich über den Fortgang seiner Arbeiten informiert. Interessierte Teil-Öffentlichkeiten konnten zu verschiedenen Gelegenheiten und auf unterschiedlichen Wegen ihre Vorstellungen einbringen. Die Ergebnisse dieser Diskussionen und die Anregungen wurden vom AkEnd aufgegriffen, bewertet und - soweit sich der AkEnd den Vorstellungen anschließen konnte - übernommen.

5.1 Bewertung, Kontrolle und Entscheidung im Auswahlverfahren (Phase III)

In Phase III soll das Standort-Auswahlverfahren auf der Basis der in Phase II (siehe Kapitel 7) einvernehmlich festgelegten Kriterien und Verfahrensstrukturen durchgeführt werden. Ziel der fünf Verfahrensschritte (siehe Kapitel 3.2.2) ist dabei letztendlich die Entscheidung für den Standort, an dem das Endlager gebaut werden soll. Das Jahr für diese Entscheidung kann derzeit nicht festgelegt werden; jedoch ist dafür die erklärte Absicht der Bundesregierung zu berücksichtigen, das Endlager im Jahr 2030 in Betrieb zu nehmen. Um dieses Datum realisieren zu können, hält es der AkEnd für unverzichtbar, bis zum Jahr 2010 das Ziel des vierten Schrittes zu erreichen, welches die Festlegung von mindestens zwei Standorten umfasst, die untätig erkundet werden sollen.

Ein grundlegendes Element des vom AkEnd vorgeschlagenen Auswahlverfahrens stellt die Beteiligungsbereitschaft der Betroffenen dar. Für eine zivilgesellschaftlich überzeugende Lösung der nationalen Aufgabe der Endlagerung radioaktiver Abfälle bedarf es neben einem geeigneten Standort auch der Bereitschaft der Bevölkerung an diesem Standort, an der Lösung mitzuwirken. Das Auswahlverfahren sieht deshalb intensives Bemühen und Anreize für eine ausreichende Beteiligungsbereitschaft vor.

Der AkEnd ist überzeugt, dass darüber hinaus das Auswahlverfahren nur dann zu einem Standort für ein Endlager führt, wenn seine Durchführung, die Bewertung der Verfahrensergebnisse sowie die Entscheidungen über die Verfahrensfortschritte unabhängig und in getrennten Verantwortlichkeiten erfolgen.

Der AkEnd macht bewusst keinen namentlichen Vorschlag, welche der heute bestehenden Institutionen die Rollen der drei nachfolgend vorgeschlagenen Verfahrensbeteiligten ausfüllen sollen.

- **Verfahrensbetreiber**

Dies ist die verfahrensführende Institution, die dafür verantwortlich ist, dass das Verfahren nach den in Phase II vereinbarten Regeln zügig und wirtschaftlich durchgeführt wird. Der Verfahrensbetreiber erstellt eine eigene sicherheitstechnische Bewertung und bindet von Anfang an das Kontrollgremium ein. Als Verfahrensbetreiber ist der spätere Antragsteller denkbar, weil er die Hauptverantwortung für die Verfahrensumsetzung und die Sicherheit des Endlagers trägt.

- **Kontrollgremium**

Das neutrale Kontrollgremium verfolgt kontinuierlich die Arbeit des Verfahrensbetreibers (siehe auch Kapitel 5.2.1). Es achtet darauf, dass das Auswahlverfahren regelkonform umgesetzt wird. Außerdem prüft und bewertet es die Ergebnisse der einzelnen Verfahrensschritte und hat deshalb Einsicht in alle Unterlagen. Das Gremium berichtet dem Entscheider während und am Ende jedes Schrittes. Es informiert kontinuierlich und eigenverantwortlich die Bevölkerung, besonders die der betroffenen Region, und steht Anregungen offen gegenüber. Das Kontrollgremium ist nicht zuständig für eine Kontrolle der finanziellen Aspekte des Standortauswahlverfahrens. Diese obliegt dem Verfahrensbetreiber und dem Entscheider.

Die Mitglieder des Kontrollgremiums sollen sich durch wissenschaftlich-technische Kompetenz und hohes Ansehen in der Öffentlichkeit auszeichnen. Sie werden von einer neutralen wissenschaftlich/technischen Institution vorgeschlagen und von der Bundesregierung unter Ausschluss des Entscheiders berufen. Im Kontrollgremium sollen auch einige angesehene Medienvertreter mitwirken.

- **Entscheider**

Der Entscheider hat die Aufsicht über das Verfahren und sorgt für eine möglichst hohe Legitimation der Entscheidungen. Er berücksichtigt dabei sowohl die Ergebnisse des Verfahrensbetreibers als auch des Kontrollgremiums. Er entscheidet in eigener Verantwortung, ob und mit welchem Ergebnis ein Verfahrensschritt abgeschlossen ist und wann der nächste Schritt begonnen wird.

Bei der Einrichtung und Beauftragung von Verfahrensbetreiber, Kontrollgremium und Entscheider sind die dann gültigen gesetzlichen Grundlagen zu beachten oder erforderlichenfalls zu ergänzen bzw. neu zu schaffen.

Nach derzeitigem Recht ist gemäß § 9b AtG das Genehmigungsverfahren für Errichtung und Betrieb eines Endlagers das Planfeststellungsverfahren. Die atomrechtliche Genehmigungsbehörde wird demzufolge erst in das Verfahren einbezogen, wenn der Verfahrensbetreiber einen Antrag auf Planfeststellung für ein Endlager an einem bereits ausgewählten Standort stellt. Außerdem ist die Genehmigungsbehörde eine Behörde desjenigen Bundeslandes, in dem sich der ausgewählte Endlagerstandort befindet. Aus Sicht des AkEnd ist es aber sinnvoll und wünschenswert, die technisch/wissenschaftlichen Vorstellungen der Genehmigungsbehörde von Anfang an in das Standortauswahlverfahren, bei der Aufstellung von Erkundungsprogrammen sowie bei der Bewertung der Erkundungsergebnisse zu integrieren und den fachlichen Dialog zwischen Verfahrensbetreiber und Genehmigungsbehörde zu ermöglichen. Daher empfiehlt der AkEnd, die atomrechtliche Genehmigungsbehörde bereits im Verfahrensschritt 3 mit einzubeziehen. Um die zeitliche und rechtliche Lücke zwischen Aufstellung der Erkundungsprogramme im Auswahlverfahren und dem Beginn eines Genehmigungsverfahrens nach derzeitiger Rechtslage zu überbrücken, schlägt der AkEnd vor,

- entweder eine Ergänzung/Änderung des Planfeststellungsverfahrens durchzuführen und/oder eine Bundesbehörde mit der Durchführung des Planfeststellungsverfahrens zu beauftragen
- oder eine andere Möglichkeit, z. B. eine Arbeitsgemeinschaft der Bundesländer, zu schaffen.

Zu diesen Vorschlägen ist anzumerken, dass derzeit (Ende 2002) im BMU über eine Neuordnung des Genehmigungsverfahrens diskutiert wird.

Die Zuständigkeiten anderer Behörden für Einzelmaßnahmen innerhalb der Verfahrensschritte 3 bis 5 (z. B. für Erkundungsbohrungen) sind davon nicht betroffen. Bis zum Jahr 2010 soll Klarheit über die Standorte bestehen, die untertägig auf ihre Eignung als Endlager erkundet werden sollen. Spätestens bis zum Jahr 2030 soll ein

Endlager für alle radioaktiven Abfälle in Betrieb genommen werden. Diese zeitliche Zielsetzung wird gestützt durch einen Beschluss des Bundestages vom 12. Dezember 2001. Darin wird die Notwendigkeit unterstrichen, dass alle Verantwortlichen mit Nachdruck und im Bewusstsein der gemeinsamen Verantwortung auf die Errichtung eines dauerhaft sicheren Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Deutschland hinarbeiten müssen.

5.2 Formen der Beteiligung

Der AkEnd ist der Überzeugung, dass die kontroverse Haltung der Gesellschaft zur Endlagerung aufgelöst werden kann, wenn die Bürger und Bürgerinnen mit ihren vielschichtigen Interessenlagen angemessen an der Lösung beteiligt werden. Der AkEnd unterscheidet zwischen verschiedenen Formen der Beteiligung, die in den jeweiligen Verfahrensschritten zur Anwendung kommen sollen und die sich gegenseitig ergänzen. Dabei handelt es sich um:

- Beteiligung durch umfassende Information,
- Beteiligung an der Kontrolle des Verfahrens,
- Beteiligung an der Vertretung regionaler Interessen und
- Beteiligung an der Entscheidungsfindung.

Die Beteiligung durch umfassende Information soll von Anfang an dazu beitragen, dass der interessierten Bevölkerung alle Verfahrensschritte deutlich werden. Missverständnisse und Gerüchte sollen vermieden werden. Dazu wird eine unabhängige **Informationsplattform** eingerichtet, die selbständig zu den Themen informiert, Fragen und Thesen der Öffentlichkeit über verschiedene Medien aufgreift und interessante nationale oder internationale Themen auch in öffentlichen Veranstaltungen eigenständig darstellt.

Zur öffentlichen Kontrolle des Verfahrens soll in Phase III eine Gruppe unabhängiger Experten und Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens eingerichtet werden - das **Kontrollgremium**. Es verfolgt jeden Schritt des Auswahlverfahrens und überwacht,

dass die in Phase II getroffenen Feststellungen eingehalten werden. Das Kontrollgremium arbeitet im Dienste der Öffentlichkeit, informiert kontinuierlich und eigenverantwortlich über den Verfahrensfortschritt und prüft kritische Fragen aus der Bevölkerung.

Zur Beteiligung an der Vertretung regionaler Interessen und an Entscheidungsfindungen soll in jeder Standortregion ein **Bürgerforum** eingerichtet werden, das durch ein **Kompetenzzentrum** mit Experten seiner Wahl unterstützt wird. Im Bürgerforum sollen die Bürger und Bürgerinnen einer Standortregion aktiv an der Diskussion um Endlagerfragen im Allgemeinen und die regionalen Interessen im Hinblick auf die Beteiligungsbereitschaft im Besonderen teilnehmen und dem Gemeinderat oder den beteiligten Gemeinderäten entsprechende Vorschläge und Forderungen unterbreiten können.

Darüber hinaus sollen die Chancen, die sich mit der Einordnung eines Endlagers für die Standortregion ergeben können, an einem **Runden Tisch Regionalentwicklung** diskutiert werden, an dem sich Vertreter regionaler Interessengruppen, der Parteien, der Wirtschaft, der Gewerkschaften, der Landwirtschaft, der Naturschutzverbände bis hin zu weiteren maßgebenden Vereinen und Verbänden beteiligen können.

Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung

Die Organisationsstruktur und einzelnen Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung am Auswahlverfahren sind in Abbildung 5.1 dargestellt und nachfolgend beschrieben.

- Informationsplattform

Verfahrensbetreiber, Kontrollgremium und Entscheider sind verpflichtet, die Öffentlichkeit über den Fortgang der Arbeiten umfassend und zeitnah zu informieren. Hierzu schlägt der AkEnd die Einrichtung einer Informationsplattform vor, die unabhängig und eigenständig alle Informationen zum Auswahlverfahren bundesweit organisiert, sammelt und in geeigneter Form für die Öffentlichkeit bereitstellt. Das betrifft vor allem die Arbeitsergebnisse des Verfahrensbetreibers, des Kontrollgremiums und des Entscheiders.

Außerdem ermöglicht die Informationsplattform die Bearbeitung von Anfragen aus der Öffentlichkeit. Interessante Themen werden darüber hinaus in geeigneter Form aufbereitet und der Bevölkerung zugänglich gemacht. Dazu werden ausgewiesene Experten und Institutionen herangezogen. Außerdem soll die Informationsplattform Diskussionsveranstaltungen anregen und begleiten. Die Informationsplattform arbeitet unabhängig und parallel zur Öffentlichkeitsarbeit der drei verfahrensbeteiligten Institutionen.

- Bürgerforum

In den potenziellen Standortgemeinden gründen sich Bürgerforen, in denen alle Fragen der Standortuntersuchung diskutiert werden. Das Bürgerforum empfiehlt dem Gemeinderat bzw. -räten, sich an dem Verfahren zu beteiligen oder dies nicht zu tun. In dem Bürgerforum werden auch alle Fragen der regionalen Entwicklung diskutiert, soweit sie in einem Zusammenhang mit der Suche nach einem Endlager stehen (siehe Kapitel 6). Die Bürgerforen sollen vom Verfahrensbetreiber finanziert werden.

- Kompetenzzentrum

Die Bürgerforen werden mit finanziellen Mitteln ausgestattet, um sich von Experten ihres Vertrauens (Kompetenzzentrum) beraten zu lassen. Diese ausgewiesenen Experten müssen in der Lage sein, sowohl die naturwissenschaftlichen als auch die sozialwissenschaftlichen Kriterien zu beurteilen.

- Runder Tisch

Neben dem Bürgerforum müssen bei der Regionalentwicklung die lokale Politik und Verwaltung sowie relevante regionale Interessengruppierungen beteiligt sein, deren Vertreter den Runden Tisch bilden.

An dem Runden Tisch sollen Impulse aus dem Bürgerforum aufgenommen und ausgearbeitet werden. Die erarbeiteten Konzepte werden im Bürgerforum diskutiert und gehen mit Empfehlungen, Änderungswünschen oder Bedenken an den Gemeinderat, der in diesem Fall die Entscheidung über das weitere Vorgehen hat.

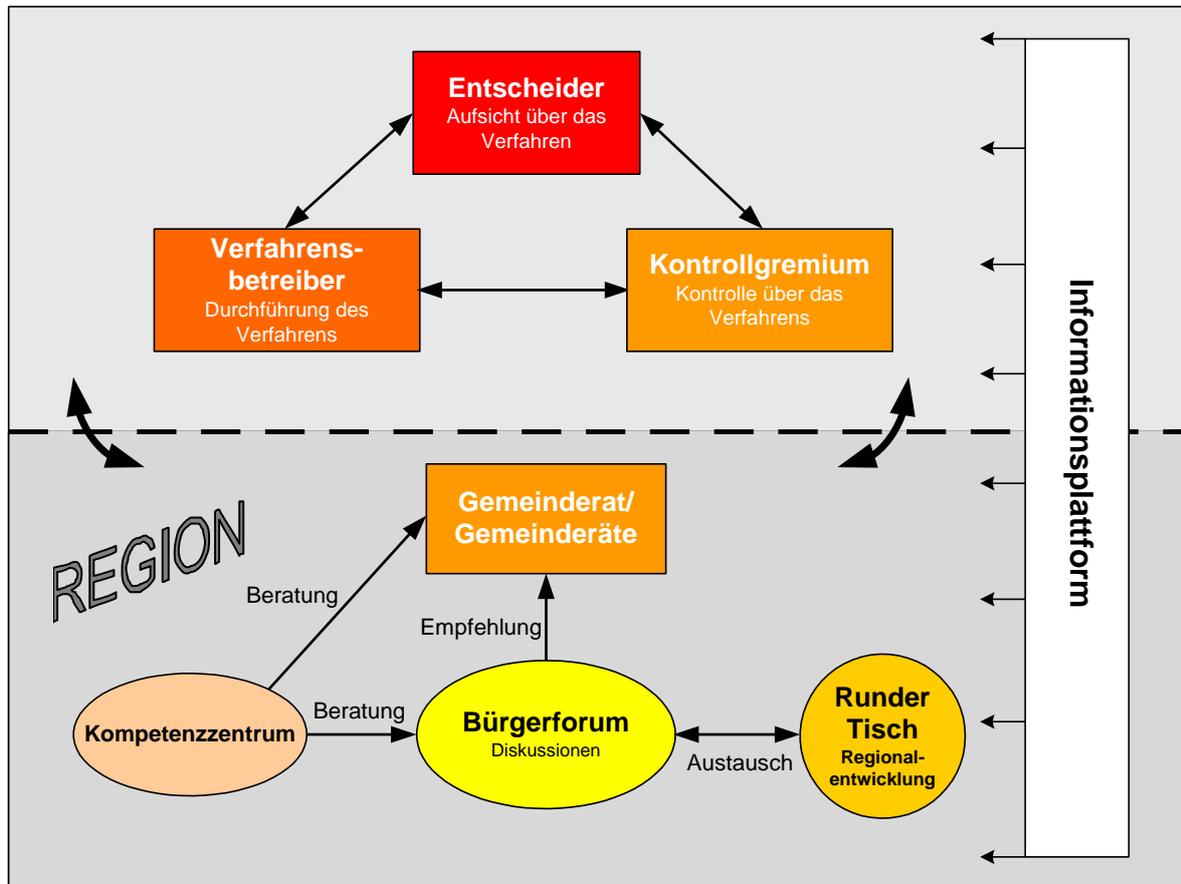


Abbildung 5.1: Organisationsstruktur und Instrumente der Öffentlichkeitsbeteiligung im Auswahlverfahren

5.3 Beteiligungsbereitschaft

In der Beteiligungsbereitschaft werden viele Faktoren erfasst. Sie reichen von den in einer Region gemachten Erfahrungen im Umgang mit Technik und Industrie bis hin zu den in der Bevölkerung spezifisch vorherrschenden Wertemustern und kollektiven historischen Erfahrungen. Für die Beteiligungsbereitschaft der Bevölkerung können die Ergebnisse einer regionalspezifischen Potenzialanalyse, in der die sozio-ökonomischen Faktoren einer Region analysiert werden, von großer Bedeutung sein. Es ist leicht vorstellbar, dass die Bevölkerung einer Region ihre Entscheidung, sich an einer überträgigen Erkundung zu beteiligen, von den Ergebnissen einer solchen Potenzialuntersuchung abhängig macht. In diesem Fall schlägt der AkEnd vor, dass die Potenzialanalyse vorab auf Wunsch der Bevölkerung durchgeführt wird, selbst wenn dies eine größere Zahl von Potenzialanalysen erforderlich macht. Die

Beteiligungsbereitschaft der Bevölkerung ist in den verschiedenen Verfahrensschritten verfahrensleitend.

5.3.1 Feststellung der Beteiligungsbereitschaft

Sowohl eine vorhandene als auch eine mangelnde Beteiligungsbereitschaft sind Ergebnisse gesellschaftlicher Entscheidungsprozesse. Daher sind Informationen, Diskussionen und klärende Aussagen für das Erreichen einer Beteiligungsbereitschaft unverzichtbar. Der AkEnd schlägt vor, dass

- die Bevölkerung durch den Verfahrensbetreiber und die Informationsplattform umfassend informiert und
- Diskussionsveranstaltungen für relevante Bevölkerungsgruppen durchgeführt

werden. Die Beteiligungsbereitschaft ist durch eine Abstimmung der Bürger und Bürgerinnen (dieses Verfahren bevorzugt der AkEnd) oder eine repräsentative Umfrage zu erheben, die jeweils vom Gemeinderat organisiert wird. Keinesfalls darf die Bürgerbeteiligung einen Rückschritt gegenüber bereits existierenden Möglichkeiten in den jeweiligen Ländern beinhalten.

Die Beteiligungsbereitschaft wird im Laufe des Verfahrens zweimal abgefragt. Zum einen wird in Verfahrensschritt 3 die Zustimmung erfragt, übertägige Erkundungen in der Standortregion zuzulassen, und dann wird in Verfahrensschritt 4 die Zustimmung erfragt, untertägige Erkundungen eines Standortes zuzulassen. Dabei wird unter Beteiligung der Bürger und Bürgerinnen festgelegt, welche Bedingungen (z. B. sozio-ökonomische Kriterien in Kapitel 4.2 oder Prüfkriterien in Kapitel 4.3) für die weitere Beteiligung einzuhalten sind.

Jede dieser beiden Abfragen der Beteiligungsbereitschaft setzt sich an jedem im Verfahren verbliebenen Standort aus zwei Elementen zusammen: einem Votum der Bevölkerung und einer Abstimmung im Gemeinderat bzw. den Gemeinderäten. Das Votum der Bevölkerung zur Beteiligungsbereitschaft geht als Empfehlung an den Gemeinderat bzw. die Gemeinderäte, wenn die Standortregion aus mehreren Gemeinden besteht. Die Gremien entscheiden in öffentlicher Sitzung über die

Beteiligung der Gemeinden. Sollte die geografische Fläche eines potenziellen Endlagers das Gebiet mehrerer Gemeinden berühren, dann ist dieses Verfahren in jeder Gemeinde durchzuführen. Nur bei übereinstimmenden Beschlüssen gilt die Beteiligungsbereitschaft als gegeben. Bei der Abstimmung der Bürger und Bürgerinnen entscheidet die einfache Mehrheit der abgegebenen Stimmen. Sollte die Region über eine Landes- oder Bundesgrenze hinausgehen, sind die Bürger und Bürgerinnen der betroffenen "Nachbarländer" mit einzubeziehen.

Die Beteiligungsbereitschaft gilt als gegeben, wenn sowohl die Bevölkerung als auch der Gemeinderat bzw. die Gemeinderäte mehrheitlich für eine weitere Beteiligung votieren. Bei einer Abwägung zwischen verschiedenen Standortregionen wird die relative Zahl der Stimmen vergleichend zu Grunde gelegt. Das Gleiche gilt für die Entscheidung in dem oder den Gemeinderäten.

5.3.2 Orientierendes Votum der Bevölkerung am Ende von Schritt 5

Das Auswahlverfahren, welches sich aus fünf Verfahrensschritten zusammen setzt (siehe Kapitel 3.2.2), sieht in Schritt 3 die Abfrage der Beteiligungsbereitschaft zur übertägigen und in Schritt 4 zur untertägigen Erkundung vor. Diese Abfragen haben verfahrensleitenden Charakter, d. h. Standortregionen, bei denen keine mehrheitliche Beteiligungsbereitschaft besteht, werden im Auswahlverfahren zurückgestellt.

Der Abfrage der Beteiligungsbereitschaft zur untertägigen Erkundung geht die Information voraus, dass eine Entscheidung des Deutschen Bundestages für einen der verbliebenen Standorte am Ende von Schritt 5 zu einem Endlagerstandort wahrscheinlich ist, wenn die Ergebnisse der untertägigen Erkundung, gemessen an den vorher festgelegten Prüfkriterien, positiv sind.

Das Bürgerforum, gestützt auf sein Kompetenzzentrum, begleitet die untertägige Erkundung kontinuierlich und kommt so zu einer eigenen Bewertung, ob die Ergebnisse der untertägigen Erkundung die Prüfkriterien erfüllen. Beide Bewertungen werden dem Kontrollgremium vorgelegt, das seinerseits eine Bewertung vornimmt.

Am Ende von Schritt 5 liegen für zwei Standorte jeweils die Sicherheitsbewertungen des Verfahrensbetreibers, des Bürgerforums und des Kontrollgremiums sowie die Bewertungen der Entwicklungspotenziale und die Regionalentwicklungskonzepte vor. Auf diesen Grundlagen wird die Bevölkerung an den Standorten in Umfragen nach ihren Voten zur Errichtung eines Endlagers am jeweiligen Standort gefragt. Diese Informationen dienen dem Deutschen Bundestag zur Orientierung bei seiner abschließenden Standortentscheidung.

Für seine Position hat der AkEnd folgende Argumente gegen bzw. für ein Votum der Bevölkerung am Ende von Schritt 5 des Auswahlverfahrens betrachtet und abgewogen:

Gegen ein abschließendes Votum der Bevölkerung spricht, dass ein derartiges Votum als Pseudobeteiligung verstanden und somit die Glaubwürdigkeit des Auswahlverfahrens beeinträchtigt werden könnte. Auch wird befürchtet, dass – unter der Voraussetzung, dass die Ergebnisse der untertägigen Erkundung positiv sind – ein Votum durch sachfremde Argumente negativ beeinflusst und das gesamte Verfahren entwertet wird. Auch ist zu berücksichtigen, dass die untertägige Erkundung zweier Standorte Kosten in Milliardenhöhe verursacht, die bei positiven Ergebnissen der Erkundung durch ein negatives Votum nicht einfach abgeschrieben werden können. Insbesondere, da die Bevölkerung bei der Aufstellung der Prüfkriterien für die Bewertung der Ergebnisse der untertägigen Erkundung beteiligt wurde.

Für ein Votum am Ende von Schritt 5 spricht, dass die Bürgerschaft durch ein abschließendes Votum nicht nur subjektiv, sondern auch im Sinne der Kontrolle des Verfahrens einen entscheidenden Einfluss ausübt. Zudem wird die Bürgerschaft durch die ständige Begleitung der Untersuchungen darüber informiert, wie die Ergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit zu bewerten sind. Dies wiederum verhindert das Entstehen von Fehlinformationen oder Gerüchten und stärkt sowohl die Kontrolle über das Verfahren als auch das Vertrauen in seine seriöse Handhabung. Dazu bedarf es einer hohen Bereitschaft der Bevölkerung, sich zu beteiligen. Um die Motivation aufrecht zu erhalten, sollte im Hinblick auf die langen Zeiträume der untertägigen Erkundung die Bevölkerung, wenn es um die abschließende und entscheidende Frage geht, noch einmal nach ihrer Meinung

gefragt werden. Auch ist es vorstellbar, dass bei einem Standortvergleich die Standorte in gleicher Weise geeignet sind. In diesem Fall hat das Votum möglicherweise eine verfahrensleitende Funktion.

5.3.3 Vorgehensweise, wenn keine Beteiligungsbereitschaft erreicht wird

Es ist nicht auszuschließen, dass trotz intensiven Bemühens möglicherweise keine ausreichende Beteiligungsbereitschaft erreicht werden kann. Auch ist es möglich, dass eine einmal erklärte Bereitschaft ab einem bestimmten Zeitpunkt durch eine neuerliche Abstimmung der Bürger und Bürgerinnen zurückgezogen wird. Sollte es nicht gelingen, in mindestens zwei potenziell geeigneten Standortregionen Beteiligungsbereitschaft zu erreichen und aufrecht zu erhalten, wäre dies ein schwerer Rückschlag für die Standortsuche.

Für diesen Fall empfiehlt der AkEnd, dass der Deutsche Bundestag das weitere Vorgehen regelt, wobei die übrigen Bestandteile des Auswahlverfahrens bei der weiteren Standortsuche erhalten bleiben sollen. Eine solche Einschränkung ist nur dann zu rechtfertigen, wenn im Auswahlverfahren alle Möglichkeiten ausgeschöpft wurden.

Der AkEnd erwartet aber, dass aufgrund der im Verfahren vorgesehenen umfangreichen Aktivitäten eine lokale bzw. regionale Beteiligungsbereitschaft herstellbar ist und die Suche und die Standortauswahl insgesamt erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen werden können.

6 Chancen für die Entwicklung der Standortregionen

Standortregionen, die auf ihre Eignung im Hinblick auf die Errichtung eines Endlagers geprüft werden, sind für die dort lebenden Menschen die Lebenswelt, in der sie sich aufhalten. Die Lebenswelt umfasst den Alltag und seine Deutungen. Der größte Teil des sozialen Netzes, in dem sich die Menschen bewegen, die materielle Grundlage des Lebens, das Wohnen, die Freizeitinteressen – all dies ist in einem hohen Maß regional. Die Bereitschaft, in ein anderes Bundesland umzuziehen, ist nur bei einer Minderheit ausgeprägt [STOLLE 2002]. Über die Hälfte der Menschen lebt in der Region, in der sie ihre Kindheit verbracht hat. Man informiert sich über die Ereignisse der Region über eine Tageszeitung. Über 60 % fühlen sich dabei sehr gut bis gut informiert. Neben dem Stadtteil oder dem Dorf, in dem man wohnt, fühlt man sich der Region ebenfalls eng verbunden. Auf die Frage, was man als Heimat bezeichnet, ist die Region beinahe so häufig genannt wie Deutschland (siehe Abbildung 6.1).

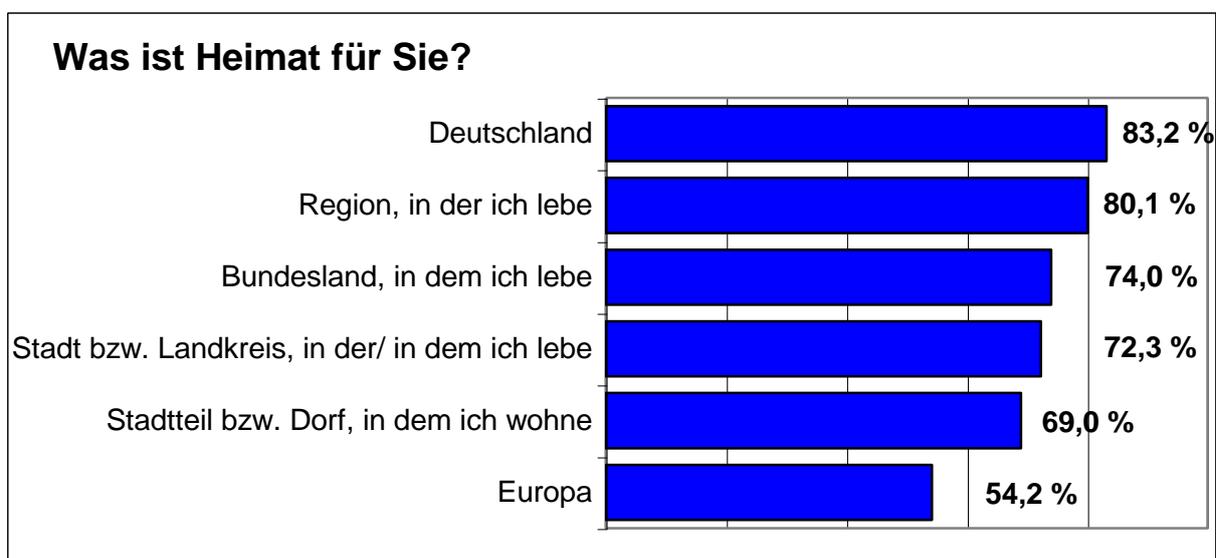


Abbildung 6.1: Begriff der Heimat

Aus der Sicht der Bürger und Bürgerinnen ist es die wichtigste Aufgabe der regionalen Politik, den Wirtschaftsstandort zu fördern, die Konjunktur anzukurbeln und die Arbeitslosigkeit abzubauen. Der AkEnd empfiehlt deshalb, dass den möglichen Standortregionen die Entwicklung einer regionalen Entwicklungsperspektive und staatliche Hilfe bei deren Umsetzung angeboten werden. Regionalentwicklung darf

dabei auf keinen Fall als Kompensation für die Sorgen und Befürchtungen der Bevölkerung verstanden werden.

Bildung und Abgrenzung von Regionen

Eine Region ist keine administrative, sondern eine soziale, kulturelle und ökonomische Einheit. Das heißt, sie hat auch keine feste Grenze. Sie ist eher ein Prozess als ein feststehender Raum. Menschen bewegen sich, Güter werden transportiert, Informationen fließen, ebenso Wasser, Energie, Abfälle. Eine Region ist ein System von Fließgrößen mit Verdichtungen und wechselnden Randzonen. Für die Frage der Standortsuche heißt dies, dass sich eine Region kommunikativ herstellt und dabei sowohl den Kern wie den Rand „konstruiert“. Der dynamische Charakter der Region ist bei der Organisation der Beteiligung³ und der Entscheidungsfindung von großer Bedeutung. Es ist damit zu rechnen, dass sich im Laufe des Verfahrens die Abgrenzungen der Standortregionen ändern können.

Die Bildung einer Region richtet sich also nicht nach geologischen und politischen Raumeinheiten, sondern wird durch die Akteure in den Gemeinden in einem dynamischen und kommunikativen Prozess erfolgen.

Die Entwicklung einer Zukunftsperspektive für eine Region in Verbindung mit der Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle setzt allerdings voraus, dass sich eine entscheidungs- und handlungsfähige Gruppe von Gemeinden gebildet hat, deren Bevölkerung bereit ist, sich am weiteren Auswahlverfahren zu beteiligen und ggf. das Endlager bei sich aufzunehmen. Bei der Abgrenzung der Regionen spielen funktionale räumliche Verflechtungen zwischen den Gemeinden, die z. B. den Arbeitsmarkt, Transport von Energie und Gütern, Nutzung von Infrastruktureinrichtungen betreffen, eine wichtige Rolle. Auch deshalb müssen die in der Region am

³ **Beteiligung/Partizipation:** Allgemein die Bezeichnung für die Teilnahme von Mitgliedern einer Gruppe, einer Organisation an einer Zielverwirklichung. In der Regionalplanung: Beteiligung der Bürger am Planungsprozess. Beteiligung bzw. Partizipation ergänzt den formalen Entscheidungsprozess, ersetzt ihn aber nicht.

Prozess beteiligten Bürger von den bestehenden Verwaltungsstrukturen unterstützt werden.

6.1 Regionalentwicklung

Den potenziellen Standortregionen sollen die Entwicklung einer regionalen Zukunftsperspektive und staatliche Hilfe bei deren Umsetzung angeboten werden. Der Konflikt zwischen der nationalen Aufgabe, ein Endlager für radioaktive Abfälle einzurichten, und den regionalen Interessen kann auf diese Weise zwar nicht aufgelöst werden, jedoch kann zwischen nationalen und regionalen Interessen eine Brücke gebaut werden. Der AkEnd schlägt diese Form einer perspektivischen Option vor und nicht einen kurzfristigen finanziellen Ausgleich. Es muss aber sichergestellt werden, dass die langfristige Umsetzung der Entwicklungsperspektiven finanziell abgesichert ist.

Die Entwicklung regionaler Zukunftsperspektiven ist mit den sozialwissenschaftlichen Abwägungskriterien eng verbunden und hängt somit unmittelbar von den Ergebnissen der Potenzialanalyse für die Region ab (siehe Kapitel 4.2). Außerdem wird die Bereitschaft, sich an der übertägigen oder untertägigen Erkundung zu beteiligen und ggf. das Endlager in der eigenen Region aufzunehmen, in einem engen Zusammenhang mit den Entwicklungspotenzialen und der Erarbeitung einer regionalen Zukunftsperspektive stehen.

Der AkEnd schlägt vor, wie in Kapitel 4.2 erläutert, dass das Entwicklungspotenzial bei dem Prozess der Abwägung zur Identifizierung von Standortregionen in Schritt 3 des Auswahlverfahrens berücksichtigt wird; d. h. dass Regionen von dem weiteren Verfahren zurückgestellt werden können, wenn das zu erwartende Entwicklungspotenzial bei der Errichtung eines Endlagers negativ ist. Im Gegensatz dazu sind die Regionen in die engere Wahl zu ziehen, bei denen neutrale und positive Entwicklungspotenziale zu erwarten sind.

Wie eine derartige Entwicklungsperspektive in den einzelnen potenziellen Standortregionen aussieht, kann nur konkret für jede Region benannt werden. Sie soll mit den Bürgern in dem Bürgerforum erarbeitet werden. Für die Erarbeitung einer solchen

regionalen Entwicklungsperspektive hat der AkEnd unter Berücksichtigung der Arbeiten des Institutes für Organisationskommunikation (IFOK) folgende strategische Ziele entwickelt, die an ein potenzielles Endlager anknüpfen [IFOK 2002]:

Endlager in die Region integrieren und Arbeitsplatzeffekte stärken

Hinsichtlich der Arbeitsplatzeffekte und der wirtschaftlichen Verflechtung mit der Region liegt das strategische Ziel nahe, die Potenziale des Endlagers und dessen Integration in die Region zu nutzen, eine Verbesserung der Beschäftigungs- und Einkommenssituation in der Region zu erreichen und zu einer nachhaltigen regionalwirtschaftlichen Entwicklung beizutragen. Es ist vor allem notwendig, die entstehenden Arbeitsplätze an die Region zu binden sowie zusätzliche Beschäftigungsmöglichkeiten in Verbindung mit der Ansiedlung des Endlagers zu schaffen. Dabei ist es erforderlich, Synergieeffekte und ein kreatives Umfeld aufzubauen und die Wertschöpfungskette⁴ zu erweitern.

Eigentumswertminderungen vermeiden, Eigentumswerte steigern

In Bezug auf die Befürchtungen zu Eigentumswertminderungen sollte vermieden werden, individuelle Nachteile entstehen zu lassen. Weitergehend kann angestrebt werden, Eigentumswertsteigerungen durch den regionalen Entwicklungsprozess in Gang zu setzen. Für mögliche individuelle Belastungen sind Ausgleichsmöglichkeiten zu finden.

Imageschäden vermeiden, Image aufwerten

Für eine Region ist es besonders wichtig, wie sich ihr Image durch die Errichtung eines Endlagers verändert. Davon hängt wiederum die Bereitschaft der Bevölkerung ab, das Endlager in ihrer Region aufzunehmen. Das Image einer Region wirkt auf die

⁴ **Wertschöpfungskette:** Unter Wertschöpfung wird allgemein der Wertbildungsprozess in Unternehmen, Institutionen oder anderen Wirtschaftseinheiten verstanden. Die Wertschöpfungskette ist eine Kette solcher Wertbildungsprozesse innerhalb eines Unternehmens (Einkauf, Produktion, Verkauf) und zwischen Unternehmen (etwa Rohstoffproduzent, -lieferant, Verarbeiter, Transportunternehmen, Vertriebsunternehmen).

Wanderungsbewegungen der Menschen und die Mobilität des Kapitals. Regionen mit positivem Image ziehen beides an, Regionen mit einem negativen Image führen dagegen zu einer Abwanderung. Dies wirkt sich auf die Immobilienpreise, den Arbeitsmarkt und die Investitionen in einer Region aus. Es ist deshalb kein Wunder, dass 76,5 % der Bevölkerung einer Region von einer Veränderung des Images persönlich betroffen sind.

Positive strategische Ziele in den einzelnen Teilbereichen tragen in ihrer Gesamtheit automatisch zu dem Ziel bei, das Image der Region zu verbessern. Darüber hinaus wird angestrebt, ein positives überregional wirkendes Signal zu setzen, um einen Imageverlust zu vermeiden bzw. das Image sogar aufzuwerten. Das aufzubauende positive Image sollte auch überregional kommuniziert werden.

Gefährdungen vermeiden, den Umwelt- und Gesundheitsbereich der Region unterstützen

Mit einem Endlager verbindet ein Großteil der Bevölkerung nicht nur die Belastungen in der Bauphase und während des Betriebes, sondern auch eine Gefährdung ihrer Gesundheit durch Radioaktivität (siehe Abbildung 6.2). Deshalb ist auch die Einstellung der Bevölkerung, man halte die Endlagerung für ein dringend zu lösendes Problem, aber man wünsche sich seine Umsetzung nicht in der eigenen Region, verständlich (siehe Abbildung 6.3).

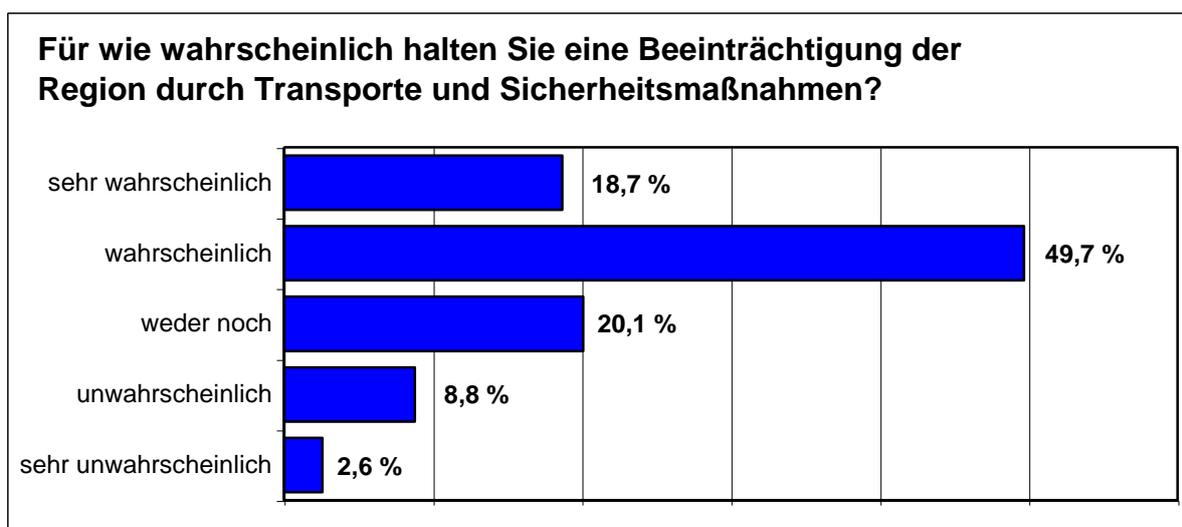


Abbildung 6.2: Erwartete Beeinträchtigung der Region durch ein Endlager

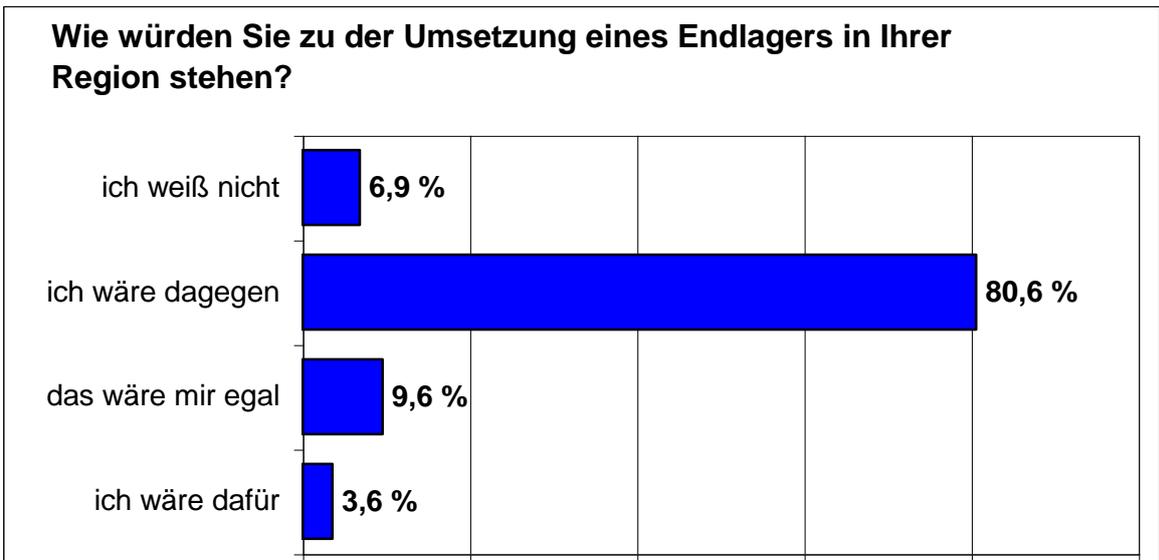
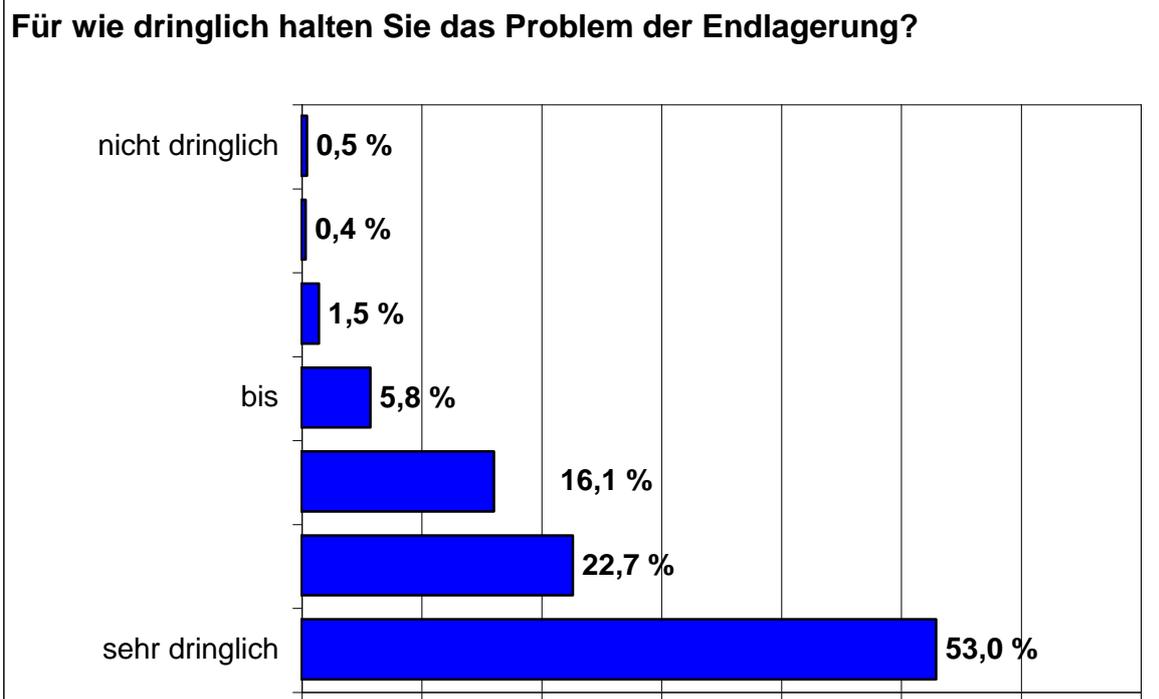


Abbildung 6.3: Dringlichkeit der Problemlösung der Endlagerung / Umsetzung eines Endlagers in der eigenen Region

Mit Blick auf die wahrgenommene Gefährdung der Umwelt und der Gesundheit muss es das Ziel sein, diesen Ängsten entgegenzuwirken. Der AkEnd stellt die Sicherheit im Auswahlverfahren an erste Stelle. Die Sicherheit des Endlagers ist somit Grundvoraussetzung für die Entwicklung einer regionalen Zukunftsperspektive. Daneben ist es ein weiteres Ziel, das Endlager mit den höchsten Umweltqualitätsstandards auszustatten. Darüber hinaus sollen alle Politikbereiche in der Region Umwelt- und

Gesundheitsziele stärker beachten (z. B. Landschaftsgestaltung, Erholungseinrichtungen).

Polarisierungen vermeiden und Zusammenarbeit fördern

Um soziale Spannungen zu vermeiden, besteht ein Ziel darin, ein friedliches und tolerantes Zusammenleben zu ermöglichen, eine offene und transparente Diskussion um die Integration des Endlagers in die Standortregion zu führen und kommunikative Problemlösungen herbeizuführen. Es muss in diesem Zusammenhang vor allem aber auch die Aufgabe sein, das Verfahren der Standortwahl transparent zu gestalten. Die Erarbeitung einer regionalen Zukunftsperspektive muss daher generell mit dem Auswahlverfahren korrespondieren.

6.2 Organisation der Regionalentwicklung

Bei der Erarbeitung eines regionalen Entwicklungskonzeptes und einer darauf aufbauenden konkreten Planung zur Umsetzung müssen professionelles Know-how und die Bedürfnisse der Bürger und Bürgerinnen zusammenkommen. Die Organisation muss anschlussfähig sein, das heißt, sie muss in einem fachlichen und operativen Zusammenspiel die für Planung und Entwicklung zuständigen Institutionen einbeziehen. Sie muss die komplexen Interessenlagen in einer Region und die Belange der Nachbargemeinden mit berücksichtigen. Die Regionalentwicklung steht in einem engen Zusammenhang mit der zukünftigen Planung des Endlagers.

Es ist dabei zu gewährleisten, dass die Vorgehensweise bei der Regionalentwicklung in allen potenziellen Standortgemeinden vergleichbar ist. Wichtig ist dem AkEnd, dass die Durchführung des Auswahlverfahrens und die Erarbeitung eines regionalen Entwicklungskonzeptes organisatorisch, personell und finanziell unabhängig voneinander sind.

Bürger und Bürgerinnen stehen im Mittelpunkt

Ein Entwicklungskonzept kann nur auf einer Plattform erstellt werden, die einerseits offen genug ist, um eine breite Beteiligung der Bürger und Bürgerinnen zu gewähr-

leisten, die andererseits aber dennoch verbindlich arbeitet. Das Bürgerforum soll die aktive Beteiligung organisieren. Alle Fragen der Standortuntersuchung und der regionalen Entwicklungsperspektive kommen hier zur Sprache. Für alle Bürger und Bürgerinnen aus den betroffenen Gebieten steht die Mitarbeit in den Bürgerforen offen. Das Bürgerforum kann Arbeitsgruppen bilden, die sich z. B. mit der regionalen Zukunftsperspektive oder mit Risiken/Belastungen durch das Endlager beschäftigen. Es kann auch regionale Zukunftskonferenzen durchführen. Wichtig ist, dass das Bürgerforum in öffentlichen Veranstaltungen die Bürger informiert und zu Wort kommen lässt, die sich nicht im Bürgerforum engagieren. Auf diese Weise wird eine Isolierung der „Bürgerspezialisten“ des Forums vermieden, und die Interessen und Bedenken der gesamten Bevölkerung am Standort können einfließen. Auf Grund des engen Bezuges zwischen den sozialwissenschaftlichen, insbesondere den sozio-ökonomischen Kriterien und der Entwicklung einer regionalen Zukunftsperspektive schlägt der AkEnd vor, dass die Aspekte, die sich auf die Standortsuche beziehen, und diejenigen, die sich auf die Regionalentwicklung beziehen, gleichzeitig im Bürgerforum diskutiert werden.

Letztlich müssen klare Empfehlungen formuliert werden. Das Bürgerforum hat ein Vorschlagsrecht, gibt also Empfehlungen an den Gemeinderat, bei dem die Entscheidung über das weitere Vorgehen liegt.

Unterstützung durch ein Kompetenzzentrum

Um diese umfangreichen inhaltlichen und organisatorischen Aufgaben bewältigen zu können, muss die Region darin unterstützt werden, entsprechende Kompetenzen aufzubauen. Dabei handelt es sich um fachliche Kompetenz, um das Wissen über politische Institutionen und rechtliche Regelungen sowie um kommunikative Fähigkeiten. Dazu soll das Bürgerforum durch ein Kompetenzzentrum unterstützt werden. In diesem Zentrum arbeiten Fachleute sowohl zu Fragen der Endlagerung als auch zur Raumplanung und Regionalentwicklung. Das verbindliche Vorschlagsrecht für die Besetzung der Stellen im Kompetenzzentrum soll bei dem Bürgerforum liegen. Das Kompetenzzentrum spielt eine wichtige Rolle in der Frage nach der Fairness des Verfahrens. Indem die Bürger auf Fachleute ihres Vertrauens

zurückgreifen können, gewinnen sie eine ebenbürtige Position gegenüber den Experten des Verfahrensbetreibers und der anderen beteiligten Institutionen.

Ein Runder Tisch für Regionalentwicklung

Neben dem Bürgerforum müssen bei der Regionalentwicklung an einem Runden Tisch die lokale Politik und Verwaltung sowie die verschiedenen Interessengruppierungen beteiligt sein (siehe Kapitel 5.2.1). Dies sind die Industrie- und Handelskammer, die Handwerkerschaft, die Vertreter der Landwirtschaft, die Kirchen, Gewerkschaften und relevante Vereine. An dem Runden Tisch haben aber auch die Bürgermeister der Nachbargemeinden einen Sitz, um ihre Interessen zu vertreten. Zwischen dem Runden Tisch und dem Bürgerforum werden auch mögliche Veränderungen der räumlichen Abgrenzung der Standortregion behandelt und eventuelle Vergrößerungen und Verkleinerungen vorgeschlagen. Sollte es nicht zu einer einvernehmlichen Lösung zwischen dem Bürgerforum und dem Runden Tisch kommen, vermittelt der Kreistag bzw. der Regierungspräsident, ggf. auf der Basis gutachterlicher Stellungnahmen.

An dem Runden Tisch sollen Impulse aus dem Bürgerforum aufgenommen und ausgearbeitet werden. Die dort erarbeiteten Konzepte werden im Bürgerforum diskutiert und gehen mit Empfehlungen, Änderungswünschen oder Bedenken an den Gemeinderat, der auch in diesem Fall die Entscheidung über das weitere Vorgehen hat.

Alle institutionellen und politischen Kontakte sollen über die Gemeindeverwaltung direkt laufen. Sie und der Gemeinderat sind dafür zuständig, dass alle Entwicklungskonzepte und Planungen mit bestehenden Institutionen, Planungsvorgaben und den allgemeinen öffentlichen Belangen abgestimmt werden.

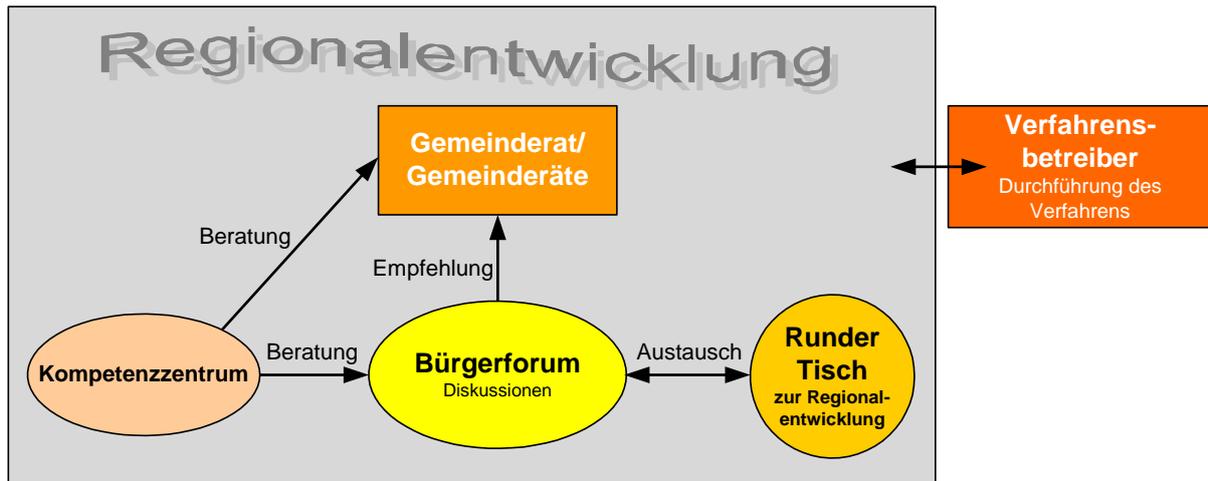


Abbildung 6.4: Organisationsstruktur und Schritte des Beteiligungsverfahrens

Die Abbildung 6.4 zeigt das Schema der Organisation der partizipativen Regionalentwicklung, wie sie der AkEnd vorschlägt.

Es ist möglich, dass eine Standortregion das Gebiet mehrerer Gemeinden umfassen oder berühren kann. Alle notwendigen Entscheidungen müssen dann konsensual in den verschiedenen Gemeinderäten gefällt werden. Die Bürger und Bürgerinnen aller beteiligten Gemeinden bilden ein Bürgerforum, das seine Empfehlungen dann an die jeweiligen Gemeinderäte abgibt.

6.3 Prinzipien der Finanzierung und der Umsetzung

Langfristige Chancen statt kurzfristiger Vorteile

Mit der Erarbeitung eines regionalen Entwicklungskonzeptes und der Umsetzung der darin vorgeschlagenen Maßnahmen sollen die mit einem Endlager einhergehenden zukünftigen Chancen ausgelotet und wahrgenommen werden, ohne damit den Eindruck der "politischen Landschaftspflege" oder gar der "Bestechung" zu vermitteln. Damit ein solcher Eindruck nicht entsteht, muss die Finanzierung einer regionalen Entwicklungsperspektive auf einer zulässigen rechtlichen Grundlage erfolgen. Dabei ist zu beachten, wie die Finanzierungsstrategien im Hinblick auf Verfahrenskultur und Demokratieverträglichkeit in der Öffentlichkeit wahrgenommen werden könnten.

Unterstützung dient der Eigeninitiative

Jede Leistung, finanzielle wie auch Sach- und Personalleistungen, soll nur zur Unterstützung der Eigeninitiative von Unternehmen, Vereinen, Verbänden und Institutionen dienen. Das regionale Entwicklungskonzept muss von innen heraus entstehen und durch die Initiative der Region umgesetzt werden. Die Finanzmittel sind nur als Unterstützung zur Eigeninitiative zu verstehen. Die Finanzmittel oder andere Transferleistungen sind in diesem Sinne eng an das Entwicklungskonzept und die Standortregion gebunden.

Alle Zuwendungen sind zeitlich befristet

Die Höhe der finanziellen Unterstützung hängt von der Ausgestaltung der regionalen Entwicklungsperspektive ab, die im Dialog mit der Region entwickelt wird. Es zeigt sich, dass die Höhe der Kosten insbesondere vom Erfolg der Maßnahmen (ab wann tragen sie sich selbst?) und von der zeitlichen Dauer der Finanzierung (wie lange wird finanziert?) abhängen. Die Finanzierung der regionalen Entwicklungsmaßnahmen ist nur so lange aufrecht zu erhalten, bis der Entwicklungsimpuls sich selbst trägt.

Vom wem kommt die Unterstützung?

Für die Erarbeitung und Umsetzung des regionalen Entwicklungskonzeptes schlägt der AkEnd vor, dass die Abfallverursacher den Regionen Gelder zur Verfügung stellen. Diese sollten in einen Fonds eingebracht werden, um eine flexible Handhabung zu gewährleisten. Eine Mitfinanzierung einzelner Maßnahmen durch die Länder wird nicht ausgeschlossen.

Abgestufte Realisierung der regionalen Entwicklungsplanung

Die Erarbeitung und schrittweise Umsetzung einer regionalen Entwicklungsperspektive steht im engen Zusammenhang mit vorbereitender Planung zu einem möglichen Endlager. Vor der Abfrage der Beteiligungsbereitschaft im Schritt 3 des Auswahlverfahrens soll das vorhandene Entwicklungspotenzial der Region ermittelt werden. Während der übertägigen Erkundung sollen darauf aufbauend Konzepte für die

zukünftige Entwicklung der Regionen erarbeitet werden, die ihre Beteiligungsbereitschaft erklärt haben. Der AkEnd empfiehlt, dass im Zuge der untertägigen Erkundung Starter- und Pilotprojekte realisiert werden, um die Umsetzung des Regionalentwicklungskonzeptes vorzubereiten. Mit der Errichtung des Endlagers sollte dann das Entwicklungskonzept als Ganzes umgesetzt werden.

6.4 Szenarien für die Regionalentwicklung

Wie bereits erwähnt, sind die Entwicklungsperspektiven auf das engste mit den konkreten regionalen Situationen verbunden, so dass vorab keine modellhaften oder gar übertragbaren Perspektiven entwickelt werden können. Um zu zeigen, dass mit der Einrichtung eines Endlagers positive Entwicklungsmöglichkeiten verbunden sein können, hat der AkEnd das Institut für Organisationskommunikation (IFOK) damit beauftragt, Szenarien für regionale Entwicklungsimpulse für drei unterschiedliche Regionstypen zu entwerfen [IFOK 2002]. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl möglicher regionaler Entwicklungsszenarien; mit den drei Szenarien für sehr unterschiedliche Regionen soll ein möglichst großes Spektrum an Entwicklungspfaden vorgestellt werden.

Die Szenarien sollen vermitteln, dass mit einem Endlager eine positive Entwicklung verknüpft sein kann, und sollen Denkanstöße für Innovationsimpulse geben. Es geht nicht darum, realistische und tatsächlich umsetzbare Entwicklungsmöglichkeiten zu skizzieren.

Szenario A „Ländlicher Raum“

Das Szenario A wurde für einen ländlichen Raum erstellt, der mit Potenzialen für den Tourismus ausgestattet ist [IFOK 2002]. Das Szenario knüpft insbesondere an den für Menschen kaum fassbaren Zeitraum an, der mit der Endlagerung verbunden ist, sowie an die Verantwortung der heute lebenden Generationen gegenüber den folgenden Generationen. Im diesem Zusammenhang können vielfältige Einrichtungen aus den Bereichen Forschung, Bildung, Kultur und Wissenschaft als Chance für die Entwicklung der Region aufgefasst werden.

Die erste Komponente des Impulses besteht aus einem besonders attraktiv ausgebauten Endlager-Informationszentrum, das unterhaltsam und eindrucksvoll, z. B. mit einem begehbaren Nachbau eines Endlagerstollens, über Kernkraft und Endlagerung informiert. Die zweite Komponente stellt ein Zentrum für Langzeitverantwortung dar, das sich als Forschungseinrichtung sowie als Bildungs-, Begegnungs- und Besinnungsstätte interdisziplinär mit den Anforderungen und Möglichkeiten einer Lösung von Zukunftsproblemen beschäftigt. Geforscht werden sollte dabei auch darüber, in welcher Weise mit zukünftigen Generationen kommuniziert werden kann. Abgerundet wird das Szenario mit einem Themenpark über das Verhältnis von Mensch, Raum und Zeit, in dem instruktive und interaktive Exponate einen Eindruck von der Vergangenheit und der Zukunft der Erde und des Menschen vermitteln. Brennpunkt könnten dabei die Energiefragen der Menschheit sein. Die Größe der Einrichtungen muss an die Bevölkerungs- und Infrastrukturdichte der Region angepasst sein.

Szenario B „Industrieregion“

Das Szenario B wurde für eine Industrieregion mit relativ hoher Bevölkerungsdichte aufgestellt [IFOK 2002]. Es enthält die Vorstellung, dass Kompetenzen auf dem Gebiet der Umnutzung und Sanierung von Industriebrachen und Umwelttechnologie systematisch aus- bzw. aufgebaut werden. Forschung und Lehre können durch einen Hochschulstandort mit mehreren einschlägigen Fachbereichen eingebracht werden, wobei z. B. innovative ökologische Abfallbeseitigungstechnologien, der Rückbau von Kernenergieanlagen sowie Fragen der Konversion und der Regionalentwicklung in diesem Zusammenhang erforscht werden können.

Als zweite Einrichtung ist ein Institut für sichere Endlagerung und Untertagedeponien denkbar, das die Endlagerung aber auch Untertagedeponien als Forschungsgegenstand aufgreift. Forschungsbedarf ergibt sich aus den erforderlichen Langzeitsicherheitsanalysen für die Endlagerung und auch für Untertagedeponien. Im Hinblick auf die Sicherheitstechnik sind sowohl bergbau- und geotechnische Fragen als auch Verschlusskonzepte zu untersuchen. Auch könnte die Frage der Rückholbarkeit des Abfalls ein wichtiges Forschungsthema innerhalb des Institutes sein.

Weiter könnte es ein internationales Netzwerk⁵ einiger weniger hochqualifizierter Institute zur Endlagersicherheitsforschung in der Welt koordinieren.

Schließlich beinhaltet dieser Entwicklungsansatz auch die Einrichtung eines Industrie- und Gewerbeparks, der ein Technologie- und Gründerzentrum als Verbindungsglied zwischen Forschung und Lehre sowie Unternehmen herstellt. Ergänzend dazu sind Tagungs- und Ausstellungsmöglichkeiten in Form eines Informations-, Kommunikations- und Innovationsparks zu schaffen. Industrie- und Gewerbeansiedlungen sollen hier vor allem im Sektor Abfall- und Umwelttechnologie entstehen.

Szenario C „Ballungsraum“

Im dritten Szenario C steht ein wachstumsstarker Ballungsraum im Vordergrund, der sehr stark durch Dienstleistungen, Forschung und Entwicklung sowie kulturelle Einrichtungen geprägt ist [IFOK 2002]. Er weist günstige Standortbedingungen auf, um dort die stark miteinander verknüpften Bereiche Wissensgesellschaft, Risikobewertung und Konfliktlösung zu thematisieren. Unter diesem Blickwinkel beschäftigt sich ein bundesweit anerkanntes Wissenscenter als Zweig einer Hochschule mit dem Verhältnis von Wissen, Gesellschaft und Technologie im Hinblick auf den gezielten Einsatz von Wissen als zentralem Innovationsfaktor in der Gesellschaft. Es geht dabei um den Kontakt zu den nicht digitalisierten bzw. nicht übersetzten Quellen der Vergangenheit als auch die Bewahrung und das Verständnis der Zeugnisse des sich immer mehr beschleunigenden gesellschaftlichen Wandels. Unter anderem wird am Beispiel des aussterbenden nukleartechnischen Know-hows daran gearbeitet, wie die Gesellschaft ihr Wissen strukturiert und archiviert. Die Lehrstühle arbeiten verstärkt interdisziplinär, und die Zukunftsforschung sowie die Wissenskommunikation und -organisation haben einen hohen Stellenwert.

⁵ **Netzwerk:** Dieser Begriff wird häufig als Metapher für ein Beziehungsgeflecht verwendet. Ein Netzwerk bezeichnet eine Menge von Einheiten zusammen mit den zwischen diesen bestehenden Beziehungen. Die Einheiten können sowohl Personen als auch Gruppen, Organisationen oder ganze Gesellschaften sein. Häufig hat ein Netzwerk die Funktion, Erfahrungen auszutauschen, zu kooperieren oder sich gegenseitig zu unterstützen.

Eine zweite Einrichtung kann ein Institut für anwendungsbezogene Risiko- und Konfliktforschung sein, das sich in Anlehnung an das Endlager mit Risiken und gesellschaftlichen Konfliktlagen beschäftigt. Ein Bedarf in der Risikoforschung ergibt sich insbesondere in einer Langzeitperspektive und ganzheitlichen Betrachtungsweise im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung. Die Konfliktforschung knüpft an die Kommunikation von Risiken an und ermöglicht die öffentliche und wirtschaftliche Anwendung der Erkenntnisse aus der Konfliktbewältigung und dem Konfliktmanagement. Der Aufbau einer Wissensdatenbank und ein entsprechender Rechercservice sind ebenfalls in das Institut integriert. Das Institut soll sich insbesondere diskursorientiert⁶ an die Bürger wenden sowie Politik und Unternehmen beraten. Ein dritter Baustein, das Zentrum für Kultur und Verständigung, ergänzt diesen diskursiven Ansatz. Das Zentrum soll Bürgerinitiativen, Verbände und Vereine, ein Bürgerbüro sowie Bildungseinrichtungen beherbergen können und somit die Verständigung zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und dem Bürger beispielhaft gelebt werden. Zusätzlich werden Kulturangebote in Form von Theater, Musik und Ausstellungen geschaffen.

Insgesamt sollte sich die Entwicklung einer regionalen Zukunftsperspektive sowohl an den alltäglichen Interessen und den in einer Region vorhandenen Entwicklungskernen und wirtschaftlichen Clustern⁷ orientieren als auch besondere mit dem Endlager verbundene und innovative Ideen entwickeln. Diese könnten dann als Impulsgeber für Entwicklungen wirken, die eine überregionale Bedeutung erlangen.

⁶ **Diskurs:** wörtlich Gespräch. Inhaltlich wie formal definierter Kommunikationszusammenhang auf der Ebene von Individuen, Gruppen oder Gesellschaften. Die ursprüngliche philosophische Idee des Diskurses zielte auf die Gestaltung systematischer Argumentationsfolgen und Gesprächssituationen zur Wahrheitsfindung. Im vorliegenden Kontext geht es um gesellschaftliche Diskurse, die im Unterschied zu Diskursen auf anderen Ebenen häufig ungeordnet verlaufen; sie können mit Debatten verglichen werden.

⁷ **Clusterbildung:** Der Begriff bezeichnet die räumliche Konzentration von Unternehmen mit einem spezifischen Spezialisierungsprofil und einer hohen Dichte zwischenbetrieblicher Interaktionen (regionale Cluster).

7 Vorschlag zur Festlegung des Auswahlverfahrens in Phase II

Der AkEnd geht davon aus, dass vor der Durchführung eines Standortauswahlverfahrens zunächst eine politische und gesellschaftliche Einigung stattfinden muss. Das Standortauswahlverfahren und seine Kriterien – gegebenenfalls unter Modifikation der Ergebnisse des AkEnd – muss definitiv festgelegt werden. Es ist davon auszugehen, dass ohne klare Regelungen vor der Durchführung des Standortauswahlverfahrens unausweichlich Zweifel in der Bevölkerung an der objektiven Durchführung des Verfahrens entstehen. Die daraus resultierenden Probleme würden die Akzeptanz des Auswahlergebnisses gefährden.

Aus der Notwendigkeit, zunächst die Regeln für das Verfahren festzulegen, hat der AkEnd eine Vorgehensweise gewählt, die drei Phasen bis zur Auswahl eines Standortes für ein Endlager umfasst:

- In Phase I wird ein Vorschlag für Kriterien und ein Standortauswahlverfahren erarbeitet; sie ist mit der Abgabe der Empfehlung an das BMU und dem hier vorliegenden Abschlussbericht des AkEnd abgeschlossen.
- In Phase II wird die politische und gesellschaftliche Festlegung des Auswahlverfahrens und der zugrunde liegenden Kriterien vorgenommen.
- In Phase III wird dann das festgelegte Auswahlverfahren durchgeführt (siehe Kapitel 3 und 5).

Mit diesem Weg wird international Neuland betreten, da Partizipation in den Ländern, in denen sie überhaupt stattfindet, erst bei der eigentlichen Suche und Prüfung geeigneter Standorte einsetzt.

Bei der Festlegung und Durchführung des Verfahrens geht die Öffentlichkeitsbeteiligung über die Weitergabe von Informationen und die Diskussion von Ergebnissen hinaus. Der AkEnd hält die Einbeziehung der Öffentlichkeit auch in die Meinungs- und Willensbildung für unerlässlich. In der Phase II ist ein faires, gerechtes und effizientes Verfahren mit Beteiligung relevanter Interessengruppen

und der interessierten Öffentlichkeit festzulegen. Nur durch einen breit angelegten Dialog zwischen Experten, Interessenvertretern, Politik und Bevölkerung ist es möglich, eine hohe gesellschaftliche Legitimation des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte zu erreichen.

Im bestehenden Rechtsrahmen ist das vorgeschlagene Standortauswahlverfahren grundsätzlich durchführbar. Es könnte aber in der Phase II überlegt werden, inwieweit Veränderungen des bestehenden Rechtsrahmens sinnvoll und praktikabel sind.

Nach Ansicht des AkEnd soll die Phase II in drei Schritten aufgebaut werden, um einerseits die notwendige hoheitliche Tätigkeit von Verfassungsorganen und andererseits den Einbezug der gesellschaftlichen Diskussion zu ermöglichen (siehe Abbildung 7.1):

- Durch einen **institutionellen Beginn** wird der politische Wille zur Durchführung des Auswahlverfahrens festgeschrieben.
- Als zweiter Schritt werden Öffentlichkeit und Interessengruppen nach dem Modell des "**Dialogischen Feldes**" beteiligt, in dessen Zentrum die **Verhandlungsgruppe** steht. Diese hat die Aufgabe, die vom AkEnd vorgeschlagene Vorgehensweise zur Endlagerstandortsuche zu überprüfen.
- Mit dem **institutionellen Ende** erfolgt die politische und rechtliche Festlegung des Auswahlverfahrens unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Verhandlungsgruppe.

Durch diesen Aufbau wird der notwendige Grad der Verbindlichkeit für die Durchführung des Auswahlverfahrens in Phase III erreicht.

Der AkEnd hat sich bei der Entwicklung des folgenden Modells durch ein detailliert ausgearbeitetes Gutachten der Wirtschaftsprüfungsgesellschaft WIBERA beraten lassen [LENNARTZ & MUSSEL 2002]. In Kapitel 4 dieses Gutachtens finden sich für eine Reihe von Aspekten ausgearbeitete sozialwissenschaftliche und rechtliche Begründungen.

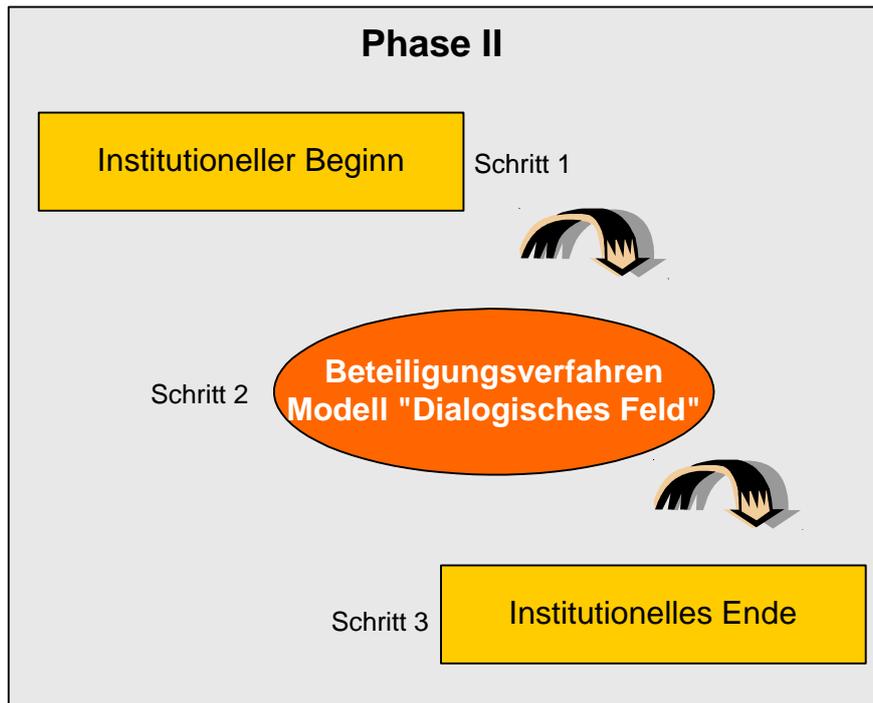


Abbildung 7.1: Die drei Schritte der Phase II

Der AkEnd schlägt weiterhin vor, dass parallel zur Phase II eine Evaluierung seines Vorschlags durch eine internationale Expertengruppe, z. B. der OECD, stattfinden soll. Damit würde abgesichert, dass die Vorschläge die international etablierten Anforderungen erfüllen. Der Zeitrahmen für die internationale Evaluierung sollte so gewählt werden, dass die Ergebnisse in die Entscheidungen, die zum institutionellen Ende der Phase II zu fällen sind, einfließen können.

7.1 Erster Schritt in Phase II: Institutioneller Beginn

Nach Auffassung des AkEnd kommt es entscheidend darauf an, dass der institutionelle Beginn und das institutionelle Ende der Phase II als möglichst breiter politischer Konsens gestaltet werden. Anderenfalls lässt es sich kaum erreichen, dass die verschiedenen politischen Akteure ein Standortauswahlverfahren unterstützen. Da die Bundesländer von der anschließenden Standortsuche und Festlegung eines Endlagers für radioaktive Abfälle betroffen sind, sollten sie in das Verfahren in einer geeigneten Weise eingebunden werden. Ein geeignetes zentrales demokratisch legitimes Gremium sollte den Festlegungsprozess anstoßen und institutionalisie-

ren. Zu Beginn der Phase II wird dieses Gremium beispielsweise den Beschluss fassen, dass die Vorschläge des AkEnd zu prüfen sind. Dieser Prüfauftrag wird dann an eine Verhandlungsgruppe gegeben, die dem demokratisch legitimierten Gremium wiederum Bericht über ihr Ergebnis erstattet. Im dritten Schritt der Phase II, dem institutionellen Ende, würde das demokratisch legitimierte Gremium den Bericht der Verhandlungsgruppe entgegennehmen und verabschieden – gegebenenfalls mit entsprechenden Modifikationen. Damit wären dann das Verfahren und die Kriterien, die für die Standortsuche in Phase III gelten, legitimiert. Die resultierenden Änderungen an den rechtlichen Rahmenbedingungen werden vorgenommen.

Als demokratisch legitimierte Gremien für den institutionellen Beginn kommen nur wenige in Betracht. Am geeignetsten wäre ein entsprechender Beschluss der Bundesregierung, gegebenenfalls im Zusammenwirken mit anderen Verfassungsorganen. Dieses Zusammenwirken mit anderen Verfassungsorganen wäre vor allem notwendig, damit sich als Folge einer breiten Übereinkunft parteipolitische Auseinandersetzungen in einem begrenzten Rahmen halten. Andere beteiligte Verfassungsorgane könnten der Bundestag und/oder die Regierungschefs des Bundes und der Länder sein. Letzteres würde an den 1979 verabschiedeten Beschluss zur Entsorgungsvorsorge [BMI 1980] anknüpfen.

Aus Sicht des AkEnd könnte der Beschluss als zentrale Bestandteile

- zum einen die politische Festlegung, einen Prozess der Standortfindung in der Art durchzuführen, wie er vom AkEnd vorgeschlagen wurde, oder in einer ähnlichen Weise, und
- zum anderen die Randbedingungen für den zweiten Schritt (Diskussion des Auswahlverfahrens mit der Öffentlichkeit) und dritten Schritt (institutionelles Ende) der Phase II

enthalten.

Im Rahmen des institutionellen Beginns müssen auch die Voraussetzungen für den zweiten Schritt geschaffen werden. Dazu gehören vor allem die notwendigen personellen, inhaltlichen, organisatorischen und finanziellen Entscheidungen.

7.2 Zweiter Schritt in Phase II: Diskussion des Auswahlverfahrens mit der Öffentlichkeit

Der AkEnd hält es für geboten, dass nicht nur die eigentliche Suche nach geeigneten Standorten für ein Endlager nach demokratischen und partizipativen Verfahren erfolgt, sondern dass schon die Festlegung des Verfahrens und der Kriterien partizipativ organisiert wird, um möglichst zu einem sachlich richtigen und von einer breiten Zustimmung getragenen Verfahren mit transparenten Kriterien zu gelangen. Die frühzeitige Einbeziehung der Öffentlichkeit soll die Legitimität des Auswahlverfahrens und die Akzeptanz der Ergebnisse erhöhen. Der AkEnd knüpft daran die Hoffnung, dass der Dialog zu einer breiten Zustimmung führt und in späteren Schritten der Standortsuche nicht jeder Schritt vor Gericht verhandelt werden muss.

Der zweite Schritt der Phase II ist bestimmt durch die Diskussion des Auswahlverfahrens in einem Beteiligungsverfahren (Modell des „Dialogischen Feldes“, Abbildung 7.2). Das Beteiligungsverfahren beinhaltet den Dialog von Vertretern gesellschaftlicher Interessengruppen (Verhandlungsgruppe) inklusive Vertretern des Bundes und der Länder und die Beteiligung der Öffentlichkeit an diesem Prozess.

7.2.1 Dialogisches Feld

Der neue Begriff „Dialogisches Feld“ weist auf zwei wesentliche Vorstellungen hin, die leitend für die Entwicklung des Beteiligungsverfahrens waren. Zum einen geht es dem AkEnd nicht nur darum, eine möglichst große Akzeptanz für seine Vorschläge zu gewinnen, sondern um die aktive Einbeziehung der Öffentlichkeit bei der Diskussion und Festlegung über das zu wählende Verfahren und die Kriterien. Die Verfahrens- und Kriterienvorschläge des AkEnd stellen die Basis für den Dialog dar, von dem eine substantielle oder graduelle Veränderung und Verbesserung der Verfahrensvorschläge für die Kriterien sowie für die eigentliche Suche nach einem Endlager erwartet wird. Zum zweiten weist der Feldbegriff sowohl in den Sozialwissenschaften 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 AkEnd, durch Dialoge zu einem sachlich besseren und gesellschaftlich getragenen Modell für die Suche nach einem Endlagerstandort zu gelangen, das dann von der Legislative aufgegriffen und endgültig verabschiedet wird.

Der Dialog soll folglich eine Überprüfung des Verfahrens und der Kriterien ermöglichen und zum anderen eine möglichst hohe Übereinstimmung im Sinne eines gesellschaftlichen Konsenses erwirken, um eine breit akzeptierte Basis für die Durchführung des eigentlichen Auswahlverfahrens zu erreichen. Damit erhält das Verfahren eine hohe Legitimität, weil die Bürger und Bürgerinnen sowie ihre Interessengruppen bereits während der endgültigen Festlegung des Verfahrens und seiner Regeln beteiligt werden. Auf diese Weise werden auch die Anforderungen nach Repräsentativität, Glaubwürdigkeit, Fairness, Kompetenz und Transparenz erfüllt.

Das „Dialogische Feld“ ist durch vier Aktivitätskerne gekennzeichnet: Eine Verhandlungsgruppe, virtuelle und regionale Foren sowie Aktionen mit der Jugend (siehe Abbildung 7.2).

Aufgabe der Verhandlungsgruppe

Im Zentrum des „Dialogischen Feldes“ steht die Verhandlungsgruppe, die im Rahmen der Vorgaben die Auswahl der zu verhandelnden Themen selbst trifft. Inhaltlich könnte sich die Arbeit der Verhandlungsgruppe und damit die Kommunikation im Dialogischen Feld in die folgenden drei Themenkomplexe gliedern:

- Ethische Grundsatzfragen (was wir dürfen)
- Naturwissenschaftlich-technische Kriterien (was wir können)
- Sozial- und planungswissenschaftliche Kriterien (was wir wollen)

Die Verhandlungsgruppe organisiert und bündelt die Diskussion und hat die Aufgabe, die von dem AkEnd vorgeschlagenen Kriterien und das Verfahren öffentlich zu diskutieren, gegebenenfalls zu verändern und Entscheidungen vorzubereiten. Am Ende erfolgt eine ausformulierte Empfehlung an das Parlament, die Bundesregierung und die Regierungschefs der Länder.

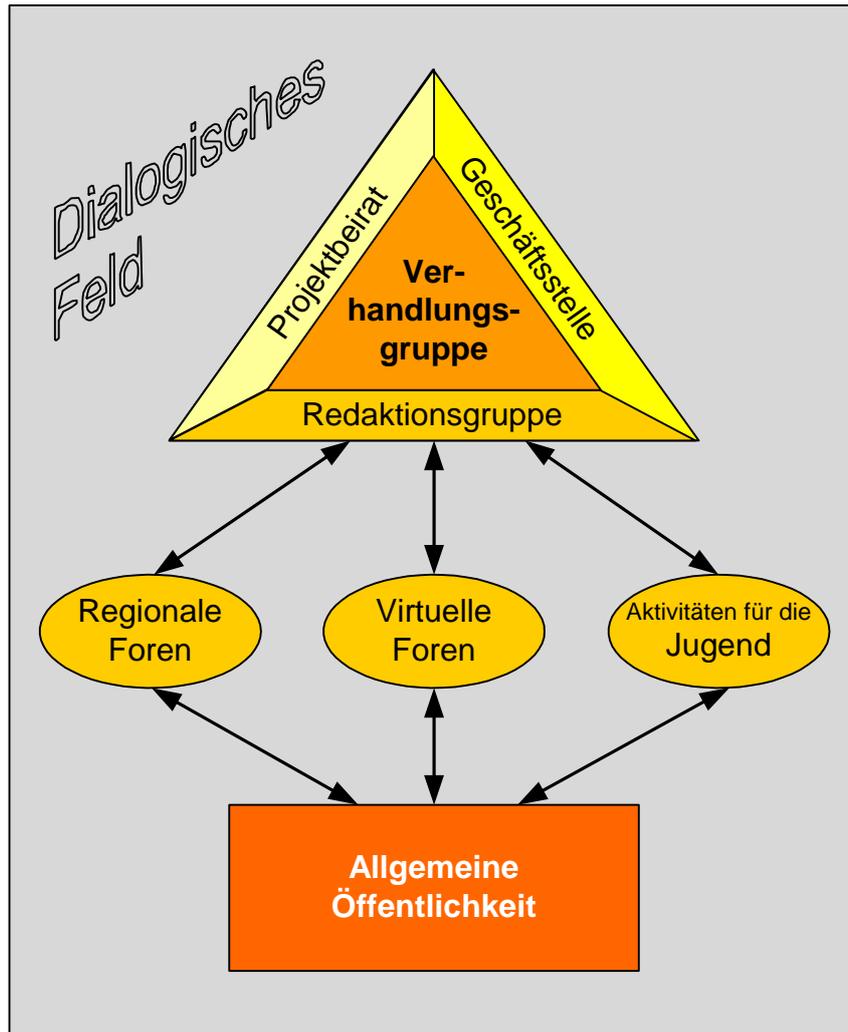


Abbildung 7.2: Dialogisches Feld

Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe

Die Anzahl der Teilnehmer an der Verhandlungsgruppe muss überschaubar sein, um die Arbeitsfähigkeit nicht zu gefährden. Erfahrungsgemäß darf eine Obergrenze von 25 bis max. 30 Mitglieder nicht überschritten werden.

Der Teilnehmerkreis der Verhandlungsgruppe (siehe Abbildung 7.3) könnte aus Vertretern und Vertreterinnen

- der im Deutschen Bundestag vertretenen Parteien,
- der Umwelt- und Naturschutzverbände,

- der Bundesländer,
- der Unternehmen der Energieerzeugung,
- von BMU und BfS,
- von Kommunen,
- von Bürgerinitiativen,
- der Kirchen,
- der Jugendverbände,
- von weiteren Verbänden und Institutionen und
- der Wissenschaft

bestehen.

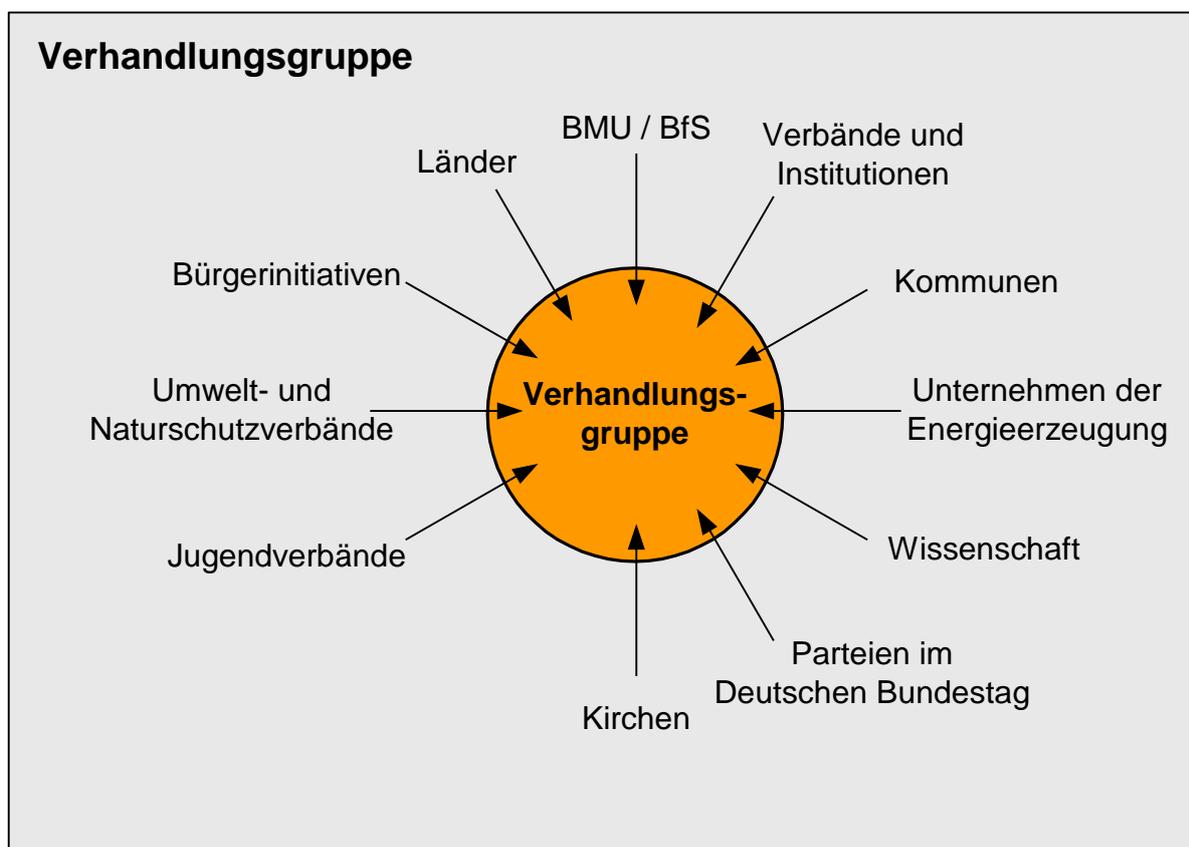


Abbildung 7.3: Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe

Die Zusammensetzung der Verhandlungsgruppe sollte von der Bundesregierung als demokratisch legitimiertem Gremium, das den institutionellen Beginn der Phase II eingeleitet hat, bestimmt werden. Der AkEnd schlägt in diesem Zusammenhang vor, dass die Bundesregierung relevante Organisationen und Institutionen zur Teilnahme an der Verhandlungsgruppe auffordert und diese dann die Auswahl der in die Verhandlungsgruppe zu entsendenden Einzelpersonen vornehmen.

Aufgrund des jetzigen Diskussionsstandes in den verschiedenen mit der Endlagerung befassten gesellschaftlichen Gruppen ist es wahrscheinlich, dass alle benannten Gruppen an der Verhandlungsgruppe teilnehmen werden. Sollte eine Gruppe die Teilnahme ausschlagen, so ergibt sich dadurch kein wesentliches Defizit, weil dadurch die Funktion der gesellschaftlichen Vermittlung, die die Verhandlungsgruppe hat, nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Begründungen dafür finden sich in Kapitel 4.5.2 des Gutachtens von WIBERA [LENNARTZ & MUSSEL 2002].

Organisationsstruktur der Verhandlungsgruppe

Die Verhandlungsgruppe erhält eine eigene Organisationsstruktur (siehe Abbildung 7.4). Es ist sinnvoll, aus den Teilnehmern der Verhandlungsgruppe einen Vorsitzenden und zwei Stellvertreter zu bestimmen. Diese sollen unter anderem die Strukturierung des Arbeitsprogramms und der Sitzungen übernehmen. Die Verhandlungsgruppe wird unterstützt von einem Moderatorenteam, das die Sitzungen leitet, sowie einer Geschäftsstelle, die die Verhandlungsgruppe organisatorisch, redaktionell und in Bezug auf dialogische Planungsmethoden unterstützt.

Können in der Verhandlungsgruppe einzelne Punkte nicht im Konsens entschieden werden, werden bei diesen Punkten Mehrheitsentscheidungen getroffen. Die Möglichkeit für Minderheitsvoten ist gegeben.

Für die wissenschaftliche Beratung während der Phase II wird ein Projektbeirat aus Experten eingerichtet. Die Teilnehmer sollen von der Geschäftsstelle vorgeschlagen und von der Verhandlungsgruppe bestätigt werden. Außerdem müssen in der Phase II Strukturen eingerichtet werden, die die Einbeziehung der Öffentlichkeit in den oben beschriebenen Formen organisatorisch und inhaltlich ermöglichen.

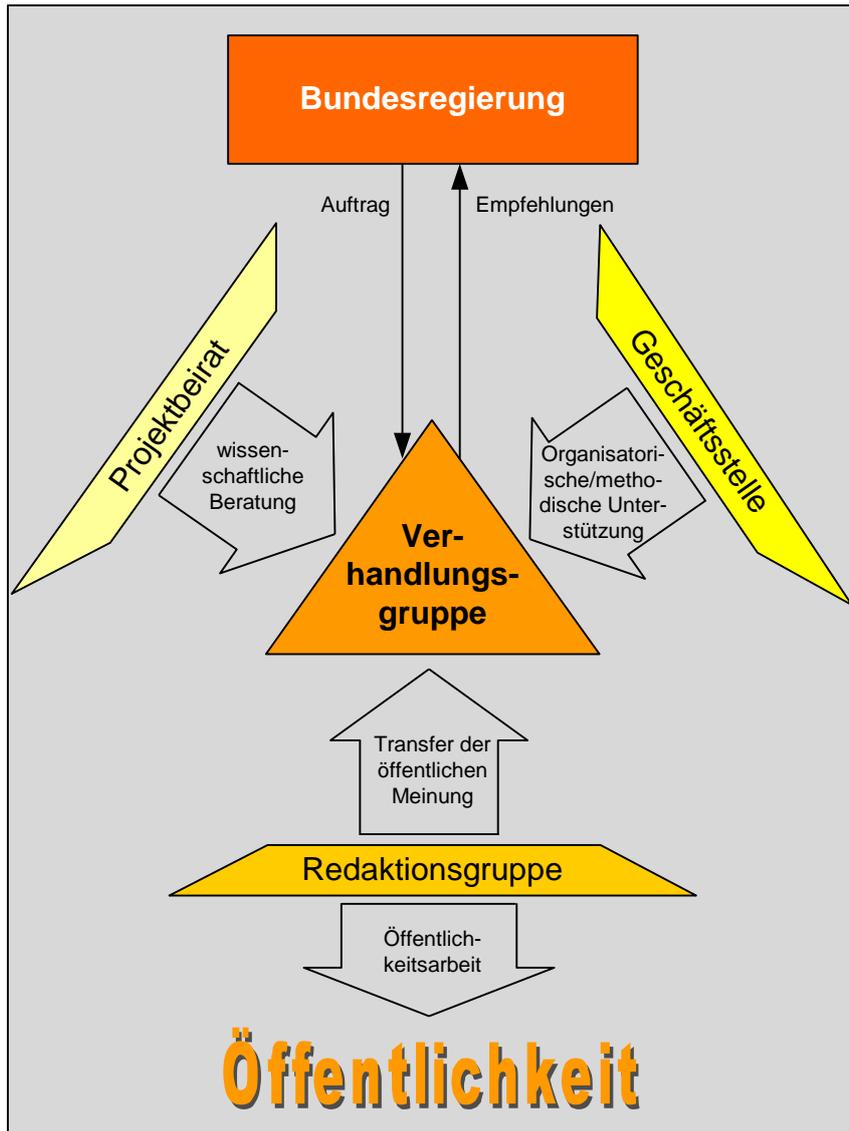


Abbildung 7.4: Organisation der Verhandlungsgruppe

Beteiligung der Öffentlichkeit an den Verhandlungen

Die Bevölkerung wird an der Verhandlung über das Internet (Chat-room) aktiv mitwirken können - es sind aber auch andere Formen der Mitwirkung zu ermöglichen. Zudem soll die Verhandlungsgruppe regional in öffentlichen Sitzungen tagen und so eine weitere Beteiligung der Bevölkerung ermöglichen sowie durch die Gewährleistung einer Berichterstattung durch die Medien weiterführende Transparenz schaffen. Die Zugänglichkeit der Verhandlungen für die Öffentlichkeit sollte Teil der Geschäftsordnung der Verhandlungsgruppe sein.

Durch ein virtuelles Forum wird der aktuelle Diskussionsstand in der Verhandlungsgruppe der Öffentlichkeit bekannt gegeben (siehe Abbildung 7.2). Diese kann darauf mit unterstützenden oder kritischen Argumenten reagieren und ihrerseits mit Vorschlägen und Forderungen aktiv auf die Verhandlungsgruppe einwirken. Eine aus Journalisten und Fachleuten zusammengesetzte Redaktionsgruppe ordnet die Beiträge im virtuellen Forum und leitet die Argumente der Verhandlungsgruppe weiter. Die Verhandlungsgruppe hat bei ihren Sitzungen als festen Tagesordnungspunkt "Virtuelles Forum", auf dem diese Argumente diskutiert werden. Die Diskussionsergebnisse erscheinen wieder in dem virtuellen Forum. Auf diese Art und Weise lässt sich ein verbindlicher Dialog zwischen der Verhandlungsgruppe und der Öffentlichkeit herstellen. Es muss darüber hinaus möglich sein, sich auch ohne Computer an diesem Forum zu beteiligen (Rundbrief und Briefwechsel).

Eine ähnliche Funktion haben die regionalen Foren. Auf diesen öffentlichen Foren führt die Verhandlungsgruppe ihre Sitzung *coram publico*, auf Grundlage einer Einladung mit entsprechender Tagesordnung, durch. Bei den regionalen Foren wird die Diskussion einen erheblichen Zeitraum der Veranstaltung einnehmen, um in direkter Rede und Antwort nicht nur die Argumente auszutauschen, sondern auch die Atmosphäre in der Öffentlichkeit zu erfahren.

Die heranwachsende Generation, die im besonderen Maße durch die Suche, den Bau und Betrieb eines Endlagers betroffen sein wird, soll durch besondere Aktivitäten für die Jugend einbezogen werden. Hier soll es vornehmlich nicht um Diskussionsforen gehen, sondern um Aktionen zum Thema, wie z. B. Ausstellungen und Wettbewerbe, deren Ergebnisse dann aufgearbeitet werden können (siehe Abbildung 7.2).

Am Ende des Beteiligungsverfahrens in Phase II werden die Diskussionsergebnisse der Verhandlungsgruppe in Form eines Berichtes als Entscheidungsgrundlage an das auftraggebende Verfassungsorgan übergeben; damit ist der zweite Schritt beendet (siehe Abbildung 7.5).

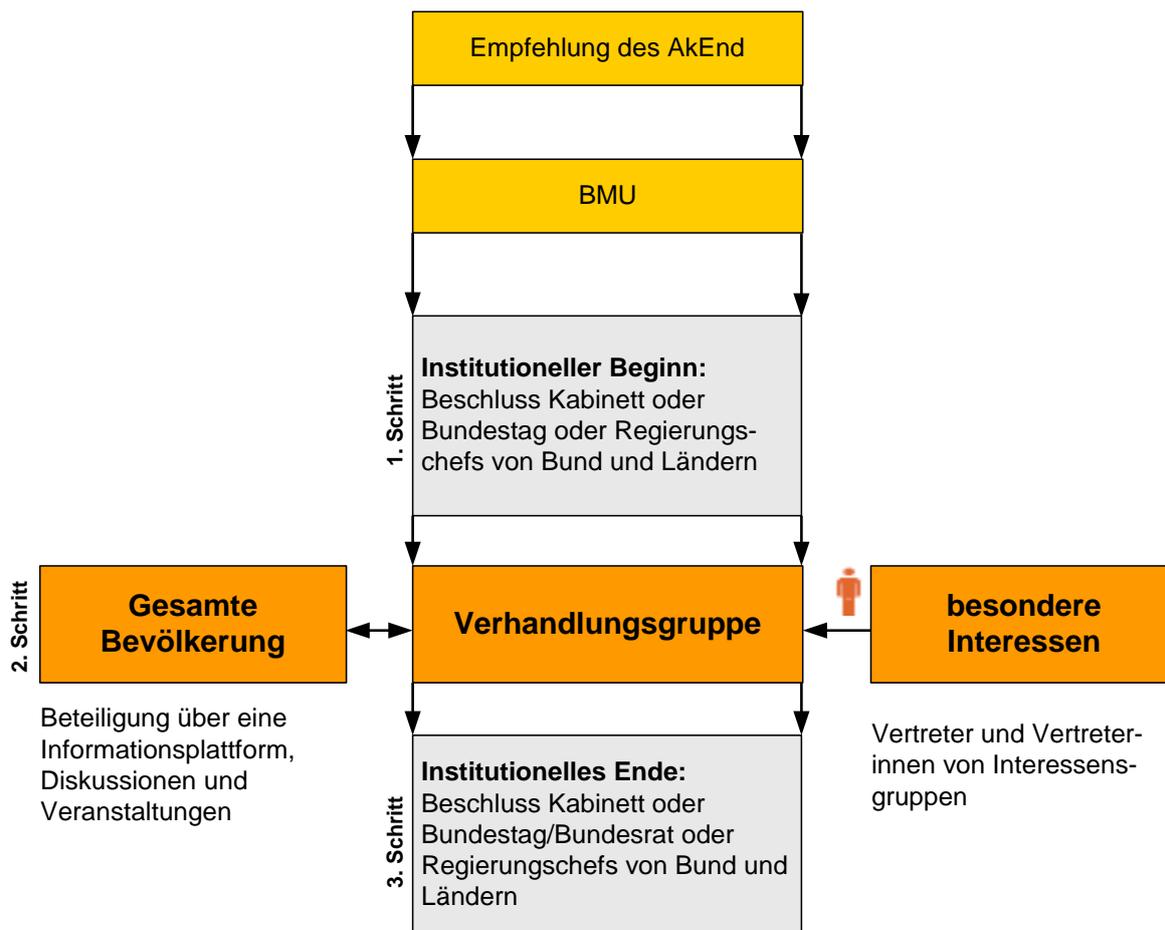


Abbildung 7.5: Ablaufschema der Phase II

7.2.2 Zeitrahmen für Schritt 2 der Phase II

Ein öffentlicher Diskussionsprozess lässt sich nicht beliebig lange mit hinreichender Intensität durchführen. Um die Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle so früh wie möglich beginnen zu können, ist daher die Dauer der Phase II zeitlich zu begrenzen. Für die Durchführung des zweiten Schrittes im „Dialogischen Feld“ geht der AkEnd von einem Zeitbedarf von etwa einem Jahr aus. Insgesamt sollte die Diskussion über das Verfahren und die Kriterien einschließlich des institutionellen Beginns und Endes nicht länger als 24 Monate dauern. Da die Zeit damit sehr knapp angesetzt ist, schlägt der AkEnd vor, mit der Vorbereitung der Arbeiten, wie dem Aufbau der virtuellen Foren, der Ansprache von Jugendlichen, der Suche nach einem geeigneten Standort für die Geschäftsstelle, unmittelbar zu beginnen.

7.3 Dritter Schritt in Phase II: Institutionelles Ende

Im dritten Schritt (Institutionelles Ende) findet die politisch rechtliche Festlegung des Auswahlverfahrens durch die Bundesregierung bzw. die auftraggebenden Verfassungsorgane statt. Basis dazu sollte der Bericht der Verhandlungsgruppe sein, soweit dem nicht gesetzliche oder verfassungsrechtliche Gründe entgegenstehen.

Dem AkEnd erscheinen die folgenden Varianten möglich:

- Beschluss der Bundesregierung und Unterrichtung des Bundestages

Die Bundesregierung fasst einen Beschluss, in dem die Ergebnisse des Beteiligungsverfahrens direkt oder mit Änderungen übernommen werden. In diesem Fall würde sich die Unterrichtung des Bundestages empfehlen.

- Beschluss des Bundestages unter Mitwirkung des Bundesrates

Der Beschluss kann z. B. in Form eines Gesetzes erfolgen, in dem die wesentlichen Randbedingungen für das folgende Standortauswahlverfahren (Phase III) festgelegt werden. Dies kann unter anderem die folgenden Punkte umfassen:

- Verfahrensregeln,
- anzuwendende Kriterien,
- Festlegungen zu konsultativen Abstimmungen in verschiedenen Schritten der Phase III,
- Festlegung, dass der Bundestag am Ende durch Gesetz den ausgewählten Standort festlegen wird und
- Fragen der Finanzierung und der Organisation.

Da das Gesetzesvorhaben auf jeden Fall Belange der Länder berührt, muss es sowohl im Bundestag als auch im Bundesrat behandelt werden. Ein erfolgreiches Gesetzesvorhaben dieser Art setzt voraus, dass bereits im Vorfeld entsprechende Diskussionen in beiden Gremien erfolgt sind (z. B. zeitlich parallel zum zweiten Schritt).

- Gemeinsamer Beschluss der Ministerpräsidentenkonferenz und der Bundesregierung

Weil die auf der Grundlage der Ergebnisse der Phase II in Phase III stattfindende Feststellung geeigneter Endlagerstandorte 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 einem 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" anschließen.

Da die Entscheidung über den zweckmäßigen Weg jedoch Sache der Bundesregierung selbst ist, verzichtet der AkEnd auf eine Prioritätensetzung zwischen den Alternativen.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Zitierte Literatur

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

AKEND (2001): 2. Zwischenbericht, Stand: August 2001, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.

AKEND (2002): "Auswirkungen des Ein-Endlager-Konzeptes auf die Entwicklung und Durchführung des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte", Arbeitspapier des AkEnd, 16.01.2002.

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), letzte Änderung durch Gesetz vom 22. April 2002 (BGBl. I., 2002, Nr. 26).

BMI - Bundesministerium des Innern (1980): „Beschluss der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke“ vom 28. September 1979. Bundesanzeiger, Nr. 58, 22.03.1980.

BMI - Bundesministerium des Innern (1983): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk; GMBI. 1983, S. 220.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2000): Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000.

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

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.
- NRC - US Nuclear Regulatory Commission (2000): Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories, 10 CFR Part 60, Federal Register 2000.
- OECD/IAEA - Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency (2000): Uranium 1999 Resources, Production and Demand.
- STRLSCHV - STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (2001): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, 2001)
- 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).

8.2 Zuarbeit zum AkEnd im Auftrag des BfS

- APPEL, D. & HABLER, W. (2001): 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. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. Datenbank „Gebirgsdurchlässigkeit“.
- BORK, M., KINDT, A., NIERSTE, G. & WALTERSCHEIDT, K.-H. (2001): Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. GRS-A-2834.
- BRÄUER, V. & JENTZSCH, G. (2001): Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. Bericht an den AkEnd.
- BRASSER, TH. & BREWITZ, W (2002): Anwendbarkeit der Indikatoren „teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt“ für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung „keine oder langsame Grundwasserbewegung“. GRS-A-2956.
- CLAUSER, C. et al. (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe.
- IFOK - Institut für Organisationskommunikation (2002): Endbericht, Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Los 2, in Zusammenarbeit mit Institut für ökologische Raumentwicklung und Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, 2002.
- 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.
- JENTZSCH, G. (2002): Temperaturempfindlichkeit der Gesteine.
- LARUE, J. et al. (2001): Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung „günstige hydrochemische Bedingungen“. GRS-A-2939.
- LENNARTZ, H.-A., MUSSEL, C. (2002): Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Standortauswahl für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Abschlussbericht Nr. 84 580 300, WIBERA Wirtschaftsberatung AG.
- LUX, K.-H. (2002a): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten"
- LUX, K.-H. (2002b): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen, Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen"
- LUX, K.-H. (2002c): Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen, Teil B: Weiterführende rechnerische Untersuchungen"
- NAGRA - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle; Colenco Power Engineering & Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2002): Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten. Schlussbericht.
- 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.
- STOLLE, M. (2002): Ergebnisse der repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Bericht im Rahmen der fachlichen Unterstützung des AkEnd durch das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), 2002.

A Anhang

A.1 Mitglieder des AkEnd

Dr. Detlef Appel

PanGeo-Geowissenschaftliches Büro, Hannover

Jahrgang 1943

Detlef Appel studierte Geologie in Hannover und Wien. Von 1971 bis 1981 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hannover, wo er 1979 promovierte. Seit 1981 ist er als selbständiger Berater und Gutachter im Bereich "Umweltbezogene Geowissenschaften" tätig. Seine Arbeitsschwerpunkte sind konzeptioneller und objektbezogener Grundwasser- und Bodenschutz, Umweltverträglichkeits-Beurteilungen, Deponiestandorte, Altlasten und Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Dr. Bruno Baltes

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln

Jahrgang 1944

Bruno Baltes studierte Maschinenbau, Fachrichtung Kerntechnik, an der Technischen Hochschule Aachen, wo er 1977 promovierte. Seit 1977 ist er Mitarbeiter der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mit dem Arbeitsschwerpunkt Sicherheit - insbesondere Langzeitsicherheit - von Endlagern für radioaktive Abfälle. Er ist Leiter der Abteilung "Endlagerung" im Bereich "Entsorgung" der GRS.

Dr. Volkmar Bräuer

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover

Jahrgang 1953

Volkmar Bräuer studierte Geologie an der technischen Universität Karlsruhe und promovierte in diesem Fach an der Universität Hannover. Seit 1983 ist er für die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR, in Hannover tätig.

Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Aufstellung von Auswahl- und Eignungskriterien bei der Standortsuche für ein Endlager. Er war Projektleiter der Arbeiten der BGR im Schweizer Felslabor Grimsel und er leitete die Untersuchungen zur Endlager-Standort-Suche in kristallinen Gesteinen in Deutschland. Seit 1997 ist er Koordinator des Endlagerprojektes Gorleben. Von 1995 bis 1997 war Volkmar Bräuer zum Bundesministerium für Wirtschaft in Bonn abgeordnet und als Referent für nukleare Entsorgung bei der Vorbereitung der damaligen Konsensgespräche zwischen der Bundesregierung und der Opposition beteiligt.

Prof. Dr. Wernt Brewitz

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig

Jahrgang 1940

Wernt Brewitz studierte Geologie an der Technischen Universität Clausthal mit den Schwerpunkten Montangeologie und Lagerstättenkunde. Von 1969 bis 1977 war er als Explorations- und Bergbaugeologe im südlichen Afrika tätig. Während dieser Zeit promovierte er an der TU Clausthal. Danach ging er als wissenschaftlicher Mitarbeiter zur Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF) und war Projektleiter der im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung- und Technologie durchgeführten Eignungsanalyse "Schachanlage Konrad" zur Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Von 1988 bis 1995 war Wernt Brewitz Mitglied der kollegialen Leitung des GSF-Instituts für Tieflagerung. Seit 1995 ist er Leiter des Fachbereichs

Endlagersicherheitsforschung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit.

Er arbeitet in verschiedenen internationalen Ausschüssen als Sachverständiger mit, unter anderem bei der Kernenergieagentur (NEA), der OECD. An der experimentellen Forschung in ausländischen Untertagelabors im Granit und Tongestein ist er direkt beteiligt.

Prof. Dr. Klaus Duphorn

Universität Kiel, Professor i.R.

Jahrgang 1934

Klaus Duphorn studierte Geologie/Paläontologie in Jena – bis zum Diplom – und Würzburg, wo er 1962 promovierte. Von 1962 bis 1974 war er als Quartärgeologe für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung und als Wirtschaftsgeologe für

die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe tätig. Anschließend übernahm er eine Professur an der Universität Kiel. Seit 1998 ist er emeritiert. Klaus Duphorn leitete zwei Arbeitsgruppen zur Erkundung des Endlagerstandortes Gorleben und gab mehrere sicherheitsgeologische Gutachten über diesen Standort ab – so 1983 für die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1988 für die SPD Niedersachsens und 1993 für das Niedersächsische Umweltministerium. Er war als endlagergeologischer Sachverständiger Teilnehmer an mehreren politischen Anhörungen im Ausschuss für Umweltfragen des Niedersächsischen Landtages, im Innenausschuss und im Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit des Deutschen Bundestages.

Rainer Gömmel

GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Forschungsbergwerk Asse, Remlingen

Jahrgang 1951

Rainer Gömmel studierte Mathematik und Physik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen/Nürnberg und legte dort seine wissenschaftliche Prüfung für das Höhere Lehramt an Gymnasien ab. Nach Referendariat, Pädagogischer Prüfung und einigen Jahren Unterrichtstätigkeit war er von 1985 bis 1995 für die Öffentlichkeitsarbeit des GSF-Instituts für Tief Lagerung verantwortlich. Aus diesem Institut ging das GSF-Forschungsbergwerk Asse hervor. Neben der Öffentlichkeitsarbeit für diese Dienstleistungseinrichtung sind Dokumentation und Information seither Schwerpunkte seiner Tätigkeiten.

Heinz-Jörg Haury

GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg

Jahrgang 1945

Heinz-Jörg Haury war von 1965 bis 1967 an der Universität in München, Abteilung Radiochemie, beschäftigt. 1972 beendete er das Studium als Wirtschaftsingenieur mit einem Fachhochschulabschluss. Seit 1972 ist er Leiter der Abteilung Öffentlichkeitsarbeit am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit in Neuherberg, Deutschland. Er ist bzw. war Mitglied in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien.

Während dieser Zeit arbeitete er auch als freiberuflicher Journalist (Bild der

Wissenschaft, verschiedene Tageszeitungen) und ist in der Erwachsenenbildung engagiert.

Prof. Dr. Detlev Ipsen

Universität Kassel

Jahrgang 1945

Studium der Soziologie, Psychologie und Volkskunde in München, Wien und Mannheim. Studium der Statistik und Methoden der empirischen Sozialforschung in Ann Arbor (USA) und Colchester (GB). Promotion und Assistententätigkeit in Mannheim. Seit 1979 Professor für Stadt- und Regionalsoziologie am Fachbereich Stadtplanung - Landschaftsplanung an der GhK, Universität Kassel.

Prof. Dr. Klaus Kühn

Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

Jahrgang 1938

Klaus Kühn studierte Bergbau an der Technischen Universität Clausthal und promovierte dort 1968. Seit 1965 arbeitet er auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle im GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. Von 1973 bis 1995 leitete er das GSF-Institut für Tieflagerung. In dieser Zeit legte er Grundsteine für deutsch-amerikanische Gemeinschaftsprojekte auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Seit 1995 ist er verstärkt in Forschung und Lehre an der TU Clausthal - wo er 1989 zum Honorar-Professor ernannt wurde - tätig.

Klaus Kühn war von 1983 bis 1998 Mitglied der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) für das Fachgebiet Endlagerung. Er war Mitglied in zahlreichen internationalen Gremien, so unter anderem in Kommissionen und Ausschüssen der Internationalen Atom-Energie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA), der Kernenergie-Agentur (Nuclear Energy Agency, NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) und der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG).

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch

Friedrich-Schiller-Universität, Jena

Jahrgang 1946

Gerhard Jentzsch ist Geophysiker. Er hat an der TU Clausthal studiert und promoviert, war danach 10 Jahre an der FU Berlin, wo er sich für das Fach Geophysik habilitierte. 1987 nahm er einen Ruf auf eine Professur für Angewandte Geophysik an die Universität Bonn an und wechselte danach über die TU Clausthal (1990) im Jahr 1996 an die Friedrich-Schiller-Universität Jena. Die wissenschaftlichen Interessen sind breit gefächert, konzentrieren sich aber im weitesten Sinne auf die Umweltforschung: Erdbeben, Vulkanismus, Schwerefeld, Klima, aber auch Altlastenerkundung.

Gerhard Jentzsch arbeitete mit im Ausschuss "Endlagerung" des Beirats für Fragen des Kernenergieausstiegs des Niedersächsischen Umweltministeriums und war im Zusammenhang mit der Beurteilung der Erdbebengefährdung für kerntechnische Anlagen in Deutschland wiederholt gutachterlich tätig.

Jürgen Kreusch

Gruppe Ökologie e.V., Hannover

Jahrgang 1952

Jürgen Kreusch studierte Geologie mit den Schwerpunkten Ingenieur- und Hydrogeologie sowie Geophysik in Marburg und Hannover, wo er 1982 seine Diplomprüfung ablegte. Seit 1980 ist er Mitarbeiter der Gruppe Ökologie e.V. in Hannover. Jürgen Kreusch ist gutachterlich und beratend tätig. Schwerpunkte seiner Arbeiten sind die Deponierung chemisch-toxischer und radioaktiver Abfälle, der Umgang mit Altlastenstandorten, hydrogeologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen sowie Umweltverträglichkeits-Studien für große Infrastrukturmaßnahmen.

Prof. Dr. Karl-Heinz Lux

Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

Jahrgang 1948

Karl-Heinz Lux studierte Bauingenieurwesen an der Universität Hannover, wo er 1977 über "Tunnelbau im Lockergestein" promovierte. 1983 habilitierte er sich mit einer Arbeit über Salzkavernenbau und wurde zum Privatdozenten für das Fachgebiet Geomechanik ernannt. 1986 folgten der Ruf an die Technische Universität Clausthal und die Ernennung zum Professor.

Karl-Heinz Lux vertrat in Lehre und Forschung die Fachgebiete "Gebirgsmechanik" und "Geomechanik in Bergbau, Tunnelbau und Deponietechnik" am Institut für Bergbau der Technischen Universität Clausthal und die Abteilung "Abfallbehandlung und Deponietechnik" am CUTEC-Institut in Clausthal. 1992 erhielt er einen Ruf auf die Professur für Felsmechanik/Felsbau an der Bergakademie TU Freiberg, den er ablehnte. 1993 wurde er in den "Endlagerausschuss" des Niedersächsischen Umweltministeriums berufen. 1995 erhielt er einen Ruf der Technischen Universität Clausthal auf die Professur "Deponietechnik". Seit 1997 ist er Inhaber der Professur "Deponietechnik und Geomechanik" am Institut für Aufbereitung und Deponietechnik der Technischen Universität Clausthal.

Michael Sailer

Öko-Institut, Darmstadt

Jahrgang 1953

Michael Sailer studierte Technische Chemie an der Technischen Universität Darmstadt, wo er 1982 sein Diplom ablegte. Seit 1975 befasst er sich mit verschiedenen Fragen der Kernenergie und seit 1980 ist er im Öko-Institut in Darmstadt tätig. Dort baute er den Fachbereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit auf, dessen Koordinator er zur Zeit ist.

Michael Sailer arbeitet seit 1980 überwiegend als Gutachter und Sachverständiger im kerntechnischen Bereich. Schwerpunkte seiner Tätigkeit sind Fragen der Entsorgung und Endlagerung, der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, der Proliferation und Safeguards sowie Fragen zu Nuklearanlagen im benachbarten Ausland und in Osteuropa. Er ist stellvertretender Geschäftsführer des Öko-Instituts. Seit 2001 ist Michael Sailer Vorsitzender der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) des BMU.

Dr. Bruno Thomauske

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter

Jahrgang 1949

Bruno Thomauske studierte Physik und promovierte 1983 mit einem Thema zur Hochenergiephysik. Von 1978 bis 1980 war er am europäischen Kernforschungszentrum CERN (Organisation – früher: Conseil – Européenne pour la Recherche Nucléaire) in Genf tätig. Seit 1983 arbeitet er auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle, zunächst in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, danach im Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Zunächst war er im Bereich des Strahlenschutzes tätig, 1988 wurde er Leiter des Projektes Gorleben. Von 1991 bis 1997 leitete er die Abteilung Projektmanagement für Endlagerprojekte. Im Erörterungstermin zum Endlager Konrad war er Leiter der Delegation des Antragstellers. Seit 1997 leitet Bruno Thomauske den Fachbereich, seit Oktober 1999 die Abteilung “Endlagerprojekte, Betrieb” im BfS.

Ehemalige Mitglieder sind

Prof. Dr. Albert-Günther Hermann (bis Juli 2000),

Dr. Reiner Papp (bis September 2000)

Dr. Klaus-Detlef Closs (bis April 2002)

Dr. Helmut Röthemeyer (bis August 2002)

A.2 Gesprächsrunden und Informationsreisen des AkEnd

Gesprächsrunde	Datum
Gesprächsrunde mit Landtags- abgeordneten von Schleswig-Holstein	19.09.02
Gesprächsrunde in Salzgitter	28.08.02
Gesprächsrunde mit Landtags- abgeordneten von Nordrhein-Westfalen	23.04.02
Gesprächsrunde mit Bundesabgeordneten und Landtagsabgeordneten von Thüringen	18.03.02
Zweite Gesprächsrunde mit Vertretern der Energiewirtschaft	05.03.02
Gesprächsrunde mit Landtags- abgeordneten von Baden-Württemberg	14.01.02
Gesprächsrunde mit Schulklassen	13.11.01
Gesprächsrunde mit dem Nuclear Waste Technical Review Board der USA	16.07.01
Gesprächsrunde mit Vertretern der Standortgemeinden von Zwischenlagern	16.07.01
Informationsreise nach Schweden	18. - 19.06.01
Gesprächsrunde mit Umweltverbänden	10.05.01
Gesprächsrunde mit Vertretern von Gewerkschaften und Kirchenverbänden	04.07.00

Gesprächsrunde	Datum
Gespräch mit Industrieverbänden aus dem Bereich der Kernenergienutzung	16.05.00
Informationsreise in die Schweiz	26. - 29.03.01
Gesprächsrunde mit Umweltverbänden	21.03.00
Gesprächsrunde mit Landtagsabgeordneten von Niedersachsens	25.01.00
Gesprächsrunde mit der Bürgerinitiative Lüchow-Dannenberg	31.08.99

A.3 Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AtG	Atomgesetz
AVR	Atomversuchsreaktor
BE	Brennelemente
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BSK 3	Brennstabkanister 3
CASTOR®	Cask for storage and transport of radioactive material
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DWR	Druckwasserreaktor
EG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
EL	Einlagerungsbereich
ELB 3	Endlagerbüchse 3
EU	Europäische Union
EVO	Energieversorgungsunternehmen
GWL	Grundwasserleiter mit Kontakt zur Biosphäre
FRM-II	Forschungsreaktor München II
HAW	hochradioaktiver Abfall (high active waste)
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection)
IFOK	Institut für Organisationskommunikation
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LAW	schwachradioaktiver Abfall (low active waste)
LWR	Leichtwasserreaktor
MAW	mittelradioaktiver Abfall (medium active waste)
NEA	Nuclear Energy Agency (Organisation der OECD)
NRC	US Nuclear Regulatory Commission
NRW	Nordrhein-Westfalen
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organization for Economic Co-operation and Development)
RFR	Rosendorfer Forschungsreaktor
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.
WG	Wirtsgesteinskörper
WHG	Wasserhaushaltsgesetz