

Zusammenstellung
internationaler
Kriterien zur
Bewertung und
Auswahl von
Standorten für die
Endlagerung von
radioaktiven Abfällen
in tiefen geologischen
Formationen



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Zusammenstellung
internationaler Kriterien
zur Bewertung und Auswahl
von Standorten für die
Endlagerung von
radioaktiven Abfällen in tiefen
geologischen Formationen

M. Bork
A. Kindt
G. Nierste
K.-H. Walterscheidt

Januar 2001

Auftrags-Nr.: 551180

Anmerkung:

Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) im Rahmen des Vorhabens 8380-9-1 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muß nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Zur Identifizierung von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen sind in den internationalen Regelwerken und aktuellen Sicherheitsstudien verschiedener Länder Kriterien zur Bewertung und Auswahl möglicher Endlagerstandorte enthalten. Dabei werden neben günstigen und ungünstigen Bedingungen teilweise auch harte Ausschlußkriterien genannt.

Im vorliegenden Bericht wird der Status dieser Kriterienentwicklung dargelegt, sowohl im nationalen Bereich der Länder als auch im übernationalen Rahmen der IAEO und EU. Grundsätzlich besteht internationaler Konsens darüber, welche Kriterien bei der Wahl eines Endlagerstandortes von Bedeutung sind, und welche Verfahren man zur Auswahl der verfügbaren Möglichkeiten anwenden sollte. Die im Bericht enthaltenen tabellarischen Zusammenstellungen fassen die bei der Standortbewertung zu berücksichtigenden geowissenschaftlichen Bedingungen zu verschiedenen Gruppen zusammen, wobei je nach Land oder Organisation teilweise große Unterschiede in der Formulierung und im Detaillierungsgrad erkennbar werden.

Abstract

On the topic of the identification of sites for the final storage of radioactive wastes in deep geological formations, the international regulations and recent safety studies performed by various countries contain criteria for the assessment and selection of possible repository sites. Here, not only favourable and unfavourable conditions but sometimes also rigorous exclusion criteria are specified.

This report describes the status of this development of criteria, both on the national level of the different countries and within the international framework of the IAEA and the EU. In principle, an international consensus exists about which criteria are important in connection with the selection of a repository site and which methods should be applied for the selection of the options available. The compilations in tabular form contained in the report summarise the geoscientific factors that should be considered by selection of sites in form of different groups; here, depending on the country or organisation, big differences can sometimes be identified in the wording and the degree of detail.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Standortbewertung und Standortauswahl	2
2.1	Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO)	2
2.2	Europäische Union (EU)	4
2.3	Deutschland	7
2.4	Finnland	15
2.5	Frankreich	19
2.6	Kanada	24
2.7	Schweden	28
2.8	Schweiz.....	37
2.9	USA.....	41
2.10	Sonstige Länder (China, Großbritannien, Slowakei, Spanien).....	59
3	Tabellarische Zusammenstellung der geowissenschaftlichen Anforderungen	63
3.1	Günstige Standortbedingungen	64
3.2	Ungünstige Standortbedingungen.....	92
3.3	Ausschlußkriterien.....	93
4	Zusammenfassung	99
5	Zum Status quo wichtiger internationaler Endlager-Projekte	106
6	Schlußfolgerungen	109
7	Literaturverzeichnis	112

Anhang: Auszüge aus Regelwerken (Frankreich, USA)

1 Einleitung

Im Februar 1999 hat das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd) eingerichtet und beauftragt, ein Verfahren und Kriterien zur Findung und Bewertung eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen der Bundesrepublik Deutschland zu entwickeln (/BMU 00/).

Ziel einer Standortauswahl ist die Bestimmung eines geeigneten Endlagerstandortes, d.h. eines Standortes, der die gestellten Sicherheitsanforderungen erfüllt, an dem die Sicherheit gut nachgewiesen werden kann, und der auch bezüglich nicht nuklearer Kriterien, wie z.B. Umweltschutz und Raumplanung, Vorteile bietet.

Ob ein Standort als Endlager für radioaktive Abfälle auf dem Festland geeignet ist, hängt von eng miteinander verbundenen Aspekten ab. Diese lassen sich nach /KEG 92/ in zwei Kategorien unterteilen,

- allgemeine Aspekte: Gesichtspunkte des Umweltschutzes, der Stadt- und Landschaftsplanung sowie sozialpolitische und finanzielle Gesichtspunkte,
- spezielle Aspekte: Gesichtspunkte der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes.

Die Bewertungskriterien für die Standortwahl unter Berücksichtigung der allgemeinen Aspekte betreffen alle großen Industrieprojekte und sind nicht auf den kerntechnischen Bereich beschränkt. Einige der wichtigsten betreffen den Umweltschutz, bei dem die Auswirkungen auf

- a) Menschen, Fauna und Flora,
- b) Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- c) Sachanlagen und kulturelles Erbe

zu bewerten sind. Des weiteren gehören dazu die Zugänglichkeit des Standortes, Transportmittel, Infrastruktur, Stand und Aussichten der industriellen Entwicklung und der Beschäftigung, der Umfang einer staatlichen Beteiligung.

Kriterien für die Standortauswahl unter Berücksichtigung der allgemeinen Aspekte werden im vorliegenden Bericht nur nebenbei erwähnt, d.h. nur insoweit, als sie mit den spezifischen Aspekten der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes in einem Zusammenhang stehen.

Neben ihrer Eigenschaft als industrielles Großprojekt muß die Anlage die eingelagerten Radionuklide erforderlichenfalls hinreichend sicher für Millionen von Jahren einschließen. In der Europäischen Union (EU) bilden die „Grundnormen“ /EUR 96/ einen einheitlichen Rahmen für den Strahlenschutz. Für die Wege und Mittel zur Einhaltung dieser Normen sind jedoch die einzelnen Mitgliedsstaaten verantwortlich.

Der Beitrag des Standortes zur radiologischen Sicherheit wird primär durch seine geologischen, hydrogeologischen und geographischen Eigenschaften bestimmt.

Kriterien für die Standortwahl unter Berücksichtigung geowissenschaftlicher Aspekte wie sie in internationalen Regeln, Leit- und Richtlinien sowie Sicherheitsstudien zu finden sind, werden deshalb im vorliegenden Bericht ausführlich behandelt.

Der Bericht stellt in erster Linie den internationalen Status zu diesem Thema dar, er soll aber auch dazu dienen, auf das Vorgehen des Arbeitskreises bezogene Schlußfolgerungen ziehen zu können.

2 Standortbewertung und Standortauswahl

2.1 Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO)

Die IAEO hat in der RADWASS – Publikation „Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Guide No. 111-G-4.1“ /IAE 94/ Richtlinien für die Standortauswahl eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen wie folgt zusammengestellt:

(1) Geologische Beschaffenheit

Die geologische Beschaffenheit eines Endlagerstandortes soll für eine umfassende Charakterisierung zugänglich sein und sollte geometrische, physikalische und chemi-

sche Eigenschaften besitzen, die zusammengenommen den Radionuklidtransport vom Endlagerbereich in die Umgebung während der nötigen Zeitspanne verhindern.

(2) Zukünftige natürliche Veränderungen

Das Wirtsgestein sollte nicht dazu neigen, durch zukünftige geodynamische Vorgänge (Klimaänderungen, Neotektonik, Seismizität, Vulkanismus, Diapirismus) in einem solchen Maße beeinflusst zu werden, daß diese das Einschlußvermögen des Endlager-Gesamtsystems unzulässig beeinträchtigen können.

(3) Hydrogeologie

Die hydrogeologischen Eigenschaften und Beschaffenheiten der geologischen Umgebung sollen dazu neigen, die Grundwasserbewegung innerhalb des Endlagers zu verhindern und sollten einen sicheren Abfalleinschluß für die notwendigen Zeiten begünstigen.

(4) Geochemie

Die physikochemischen und geochemischen Eigenschaften der geologischen und hydrogeologischen Umgebung sollten dazu neigen, die Radionuklidfreisetzung aus dem Endlagerbereich in die Umgebung zu begrenzen.

(5) Ereignisse infolge menschlicher Einwirkungen

Die Standortwahl eines Endlagers sollte unter Berücksichtigung derzeitiger und möglicher menschlicher Aktivitäten am oder in der Nähe des Standortes erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit, daß solche Tätigkeiten das Isolationspotential des Endlagersystems beeinträchtigen und unzulässige Folgen haben können, sollte minimiert werden.

(6) Konstruktion und Auslegungsbedingungen

Die ober- und unterirdischen Standorteigenschaften sollten die Realisierung eines optimierten Konzeptes von oberirdischen Einrichtungen und unterirdischen Arbeiten gestatten sowie die Konstruktion aller Auffahrungen in Einklang mit den einschlägigen Bergbauvorschriften zulassen.

(7) Abfalltransport

Der Standort soll so gewählt werden, daß die Strahlenexposition für die Bevölkerung und die Umweltbelastung durch den Abfalltransport zum Standort innerhalb zulässiger Grenzen liegt.

(8) Schutz der Umgebung

Der Standort soll so gewählt werden, daß die Eigenschaften der Umgebung angemessen geschützt und die möglichen Belastungen auf ein akzeptables Niveau reduziert werden können, unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und natürlicher Umstände.

(9) Nutzung von Grund und Boden

Bei der Wahl von geeigneten Standorten sollten Bodennutzung und Grundbesitz in Verbindung mit möglicher zukünftiger Entwicklung und regionaler Planung in der betroffenen Umgebung berücksichtigt werden.

(10) Gesellschaftliche Auswirkungen

Der Standort sollte so gewählt werden, daß die umfassende gesellschaftliche Auswirkung der Einrichtung eines Endlagersystems am Standort hinnehmbar ist. Nützliche Folgen bei der Einrichtung eines Endlagers in einer Region oder einem Gebiet sollten, wenn immer möglich, vermehrt werden und alle schädlichen gesellschaftlichen Auswirkungen vermieden werden.

2.2 Europäische Union (EU)

In den Mitgliedstaaten der EU gibt es derzeit keine verbindlichen Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers; über die Genehmigung für ein Endlager wird unter Berücksichtigung der einschlägigen nationalen Regeln und Vorschriften je nach Einzelfall entschieden. In einigen Ländern (z. B. Frankreich, Deutschland) sind darüber hinaus Kriterien, Empfehlungen bzw. Leitlinien herausgegeben worden. Einige auf die nukleare Sicherheit bezogenen Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers wurden von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG) in der Serie "Euradwaste" Nr. 6

/KEG 92/ vorgeschlagen. Je nach Kategorie der radioaktiven Abfälle bieten sich demnach an:

- die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen bei allen Abfallkategorien, vor allem bei langlebigen, Alpha- und hochaktiven Abfällen (einschließlich Brennelemente, sofern diese als Abfall gelten),
- die oberflächennahe Endlagerung für kurzlebige, schwach- und mittelaktive Abfälle.

Die nachfolgenden Bewertungskriterien für die Eignung eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen wurden von der KEG vorgeschlagen, um als Grundlage für einen europäischen Konsens zu dienen. Nicht alle dieser Kriterien müssen erfüllt sein; schon bei einer Verknüpfung einiger dieser Kriterien kann ein angemessener Schutz gewährleistet sein, wenn in der Sicherheitsbeurteilung die Einhaltung der Strahlenschutznormen nachgewiesen wird.

(1) Natürliche Barrieren

Wirtsgestein und geologische Formationen oberhalb eines unterirdischen Endlagers sollten die Funktion einer natürlichen Barriere in einem Mehrbarrierensystem übernehmen.

Diese Barrieren können sich langfristig als der wirksamste Schutz gegen die Migration der eingelagerten Nuklide erweisen. Salzstöcke, Tonsedimente und Granitformationen scheinen unter anderem die erforderlichen Einschließungseigenschaften zu bieten.

(2) Stabilität

i) Die Gefahr von Naturkatastrophen, die in absehbarer Zukunft die derzeitigen Standortbedingungen wesentlich beeinflussen können, sollten untersucht und der Nachweis ihrer geringen Wahrscheinlichkeit erbracht werden (s. /KEG 80/).

ii) Der Standort muß ein hohes Maß an Stabilität aufweisen: tektonische Bewegungen sollten nicht vor 10 000 Jahren erwartet werden (oder in diesem Zeitraum keine wesentlichen Phänomene auslösen).

Diese Bewertung wird auf regionaler Ebene vorgenommen und beruht auf einer Prognose der aktuellen Trends und der Erfahrungen aus der Vergangenheit.

iii) Die Erdbebengefährdung sollte gering sein. Die möglichen tektonischen Bewegungen sollten unter dem Wert 7 auf der Richterskala und somit unterhalb einer Intensität von 9 bis 10 auf der modifizierten MSK-Skala liegen.

iv) Der Standort sollte weit genug von geothermischen Besonderheiten und anderen vulkanischen Erscheinungen entfernt sein (d.h. einige Dutzend Kilometer).

(3) Hydrogeologie

i) Wasser ist der wirksamste natürliche Leiter von Radioaktivität. Eine niedrige Grundwasserströmung und/oder adäquate Verdünnungseigenschaften sind, zusammen mit geeigneten Eigenschaften der unterirdischen Gewässer, wesentlich (s. /GOG 87, KEG 80/).

ii) Die Hydrologie der Formation und die Hydrologie des Standortes sollten gewährleisten können, daß am Standort und in der Region sowohl im Falle erwarteter als auch unerwarteter Entwicklungsszenarien nur unbedeutende radiologische Folgeerscheinungen - wenn überhaupt - auftreten (s. /ICR 85/).

iii) Vorrangig berücksichtigt werden sollten Formationen mit großer Homogenität und Kontinuität, also solche mit einfachen Strukturen.

(4) Chemische und geochemische Eigenschaften

Die chemischen und geochemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sollten die Retention der möglicherweise aus dem Endlager freigesetzten Radioelemente begünstigen (s. /PAG 88, KEG 80/).

(5) Mechanische und thermische Eigenschaften

i) Durch die physikalischen Eigenschaften des Gesteins und die geologischen Bedingungen sollte sichergestellt sein, daß die durch den Abfall produzierte Wärme angemessen verteilt wird, ohne die Einschließungseigenschaften der Formation zu beeinträchtigen oder eine unangemessene Erwärmung der darüberliegenden Gesteine/ Sedimente und Wasserkörper zu bewirken.

Dies bedeutet je nach Option eine Beschränkung des thermischen Inventars des Abfalls.

ii) Das mechanische Verhalten des Gesteins sollte einen sicheren Betrieb des Endlagers ermöglichen und sicherstellen, daß eine angemessene Abdichtung der verschiedenen Lagerbereiche und -schächte erreicht werden kann.

(6) Tiefe und Abmessungen des Wirtsgesteins

i) Die geeigneten Abmessungen des Wirtsgesteins hängen von der Endlageroption, dem zu entsorgenden Abfall, der Einlagerkapazität und den geologischen Bedingungen ab.

ii) Die Formation sollte ausreichend tief und groß genug sein, um eine wirksame Isolierung des Endlagers von der Biosphäre zu gewährleisten.

iii) Bei der Tiefe des Endlagers sollten Vorgänge der exogenen Dynamik wie die Erosion der oberflächennahen Gesteine, vor allem bei Sedimentformationen, berücksichtigt werden.

iv) Standort und geologische Bedingungen sollten so beschaffen sein, daß Schwankungen bei der Aushebung des Endlagers seine Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigen.

(7) Bodenschätze

i) Die Formation sollte weit genug von Erz- oder Mineralvorkommen entfernt liegen, da diese möglicherweise später genutzt werden.

ii) Generell sollte eine Formation und ein Standort bevorzugt werden, für die das Risiko des menschlichen Eingreifens minimal ist.

2.3 Deutschland

2.3.1 BMI - Sicherheitskriterien

Standortkriterien sind in Abschnitt 4 der Sicherheitskriterien zur Endlagerung radioaktiver Abfälle /BMI 83/ wie folgt enthalten:

(1) Der Standort ist so auszuwählen, daß die Einhaltung der Schutzziele während des Betriebes, der Stilllegung und der Zeit nach der Stilllegung des Endlagerbergwerkes gewährleistet werden kann.

(2) Topographische Lage

Die topographische Lage ist von untergeordneter Bedeutung für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes.

(3) Bevölkerungsdichte

Die Bevölkerungsdichte in der Umgebung eines Endlagerbergwerkes ist nur im Hinblick auf die übertägigen Anlagen relevant.

(4) Bodenschätze

Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.

(5) Endlagerformation, Deckgebirge und Nebengestein

i) Die Endlagerformation muß aus Gesteinen bestehen, die eine Erstellung und Nutzung von untertägigen Hohlräumen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Endlagerung radioaktiver Abfälle ermöglichen.

ii) Die physikalischen und die chemischen Eigenschaften der Mineralien und Gesteine sowie mögliche Mineralreaktionen unter dem Einfluß der vorgesehenen Einlagerungsgebilde sind zu berücksichtigen.

iii) Deckgebirge und Nebengestein müssen bei Radionuklidfreisetzungen aus dem Endlagerbergwerk dazu beitragen, unzulässige Konzentrationen in der Biosphäre zu verhindern. Daher ist eine hohe Sorptionsfähigkeit für Radionuklide zur Erfüllung der Barrierenfunktion von Deckgebirge und Nebengestein von Vorteil.

iv) Es sind geologische Formationen zu bevorzugen, die auf Beanspruchungen viskoplastisch reagieren bzw. an Bruchflächen keine Wegsamkeiten für unzulässig große Flüssigkeitsmengen entstehen lassen.

(6) Tektonik

Der Standort eines Endlagerbergwerkes soll sich durch geringe tektonische Aktivität auszeichnen und von Bereichen starker tektonischer Aktivität so weit entfernt sein, daß die Integrität des Endlagers durch sie nicht gefährdet wird.

(7) Hydrogeologische Verhältnisse

i) Wasserwegsamkeiten zwischen der Biosphäre und dem im Betrieb befindlichen Endlagerbergwerk stellen einen potentiellen Freisetzungspfad für Radionuklide dar. Solche Wasserwegsamkeiten dürfen bei Endlagerformationen allenfalls so gering sein, daß die Schutzfunktionen der geologischen und technischen Barrierensysteme erhalten bleiben. Mögliche Auswirkungen durch die Einlagerung radioaktiver Stoffe (z.B. Wärmeeintrag) müssen dabei berücksichtigt werden.

ii) Nach der Stilllegung des Endlagerbergwerkes dürfen in den Endlagerformationen vorhandene oder möglicherweise zufließende Wässer oder Salzlösungen nicht bzw. nicht in unzulässigem Umfang in die Biosphäre gelangen.

2.3.2 BGR - Standortkriterien

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat in einer Studie /BGR 94/ die im folgenden aufgeführten wesentlichen Aspekte, die bei der Standortauswahl zu berücksichtigen sind, zusammengestellt. Sie sind ihrem Wesen nach Standortkriterien und zum größten Teil sowohl auf Salz als auch auf kristalline Gesteine anwendbar.

(1) Multibarrierensystem

i) Bei der Standortsuche geht es darum, die natürlichen Bedingungen zu erkunden und darauf das Endlagerkonzept mitsamt seinen Barrieren abzustimmen.

Das Multibarrierenkonzept umfaßt parallel oder redundant wirkende natürliche, geotechnische und technische Barrieren, denen unterschiedliche Aufgaben zukommen.

ii) Anders als im Steinsalz leisten in Kristallingesteinen die technischen und geotechnischen Barrieren den Hauptbeitrag zur Gesamtsicherheit. Sie müssen der regionalen und lokalen geologischen Situation angepaßt werden.

(2) Geographie

i) Die geographischen Verhältnisse in einem anthropogen nicht beeinflussten Gebiet spiegeln das Ergebnis vorangegangener und im besonderen Maße rezenter (d.h. gegenwärtiger) geologischer Vorgänge sichtbar wider. Deren Studium kann daher Prognosen für zukünftige geologische Prozesse erleichtern.

ii) Bei der Anlage eines Endlagers muß in diesem Zusammenhang darauf geachtet werden, daß sich die morphologischen Verhältnisse, wie z.B. Hangneigungen und Zerschneidungsgrad des Reliefs, nicht geodynamisch oder bergtechnisch ungünstig auf das Endlagerbergwerk auswirken können.

iii) Die gewählte Standortregion muß aus diesen Gründen eine ausreichende Flexibilität bei der Wahl der Einlagerungstiefe gewährleisten.

iv) Weiterhin sind die hydrographischen Verhältnisse (Wasserscheiden, Vorfluter, Quellen usw.) zu berücksichtigen, da sie Aufschluß über Wassertransportwege geben.

v) Die Besiedlungsdichte in der Endlagerregion ist bei der Standortplanung ebenfalls zu beachten.

(3) Regionalgeologische Verhältnisse

i) Aus regionalgeologischer Sicht sollte das Endlager in einem annähernd homogenen und wenig gestörten Gesteinskomplex liegen.

ii) Das Wirtsgestein muß eine ausreichende Mächtigkeit und lateral eine hinreichende Erstreckung aufweisen, um die Lokation und Konfiguration des Endlagers auch im Hinblick auf die Langzeitsicherheit flexibel zu gestalten.

iii) Die Mindesteinlagerungstiefe muß so gewählt werden, daß die Wirkung der geologischen Barriere nicht durch Erosionsvorgänge beeinträchtigt werden kann.

iv) Untersuchungen der regionalgeologischen Verhältnisse umfassen Aussagen zur Beschaffenheit des Deckgebirges als ein die geologische Barriere unter Umständen positiv beeinflussender Faktor - wobei das Deckgebirge bei den in Deutschland untersuchungswürdigen Granitregionen meist entfällt - sowie die Beurteilung des Wirtsgesteinskomplexes selbst und seiner Nebengesteine im Rahmen seiner paläogeographi-

schen Entwicklung.

Aus diesen Faktoren können Rückschlüsse auf die geologischen Strukturen und das Langzeitverhalten des betrachteten Komplexes gezogen werden.

v) Es sollte bei der Festlegung der Einlagerungstiefe zusätzlich berücksichtigt werden, daß die Deckgebirgsformationen von einer Mächtigkeit bis 200 Metern von anthropogenen Einflüssen betroffen sein können.

(4) Tektonik

i) Der Endlagerstandort sollte in einer geologisch stabilen Region außerhalb einer potentiell aktiven Störungszone liegen.

Dies setzt bei der Auswahl eine Betrachtung der regionalen tektonischen Aktivitäten während der paläogeographischen Entwicklung voraus und umfaßt sowohl die Bewertung von Faltungen, Tiefenbrüchen, Hebungen, Senkungen usw. als auch die Untersuchung des strukturellen Inventars wie z.B. Klüftung, Schieferung und Schichtung.

ii) Prinzipiell sollten dabei die Einlagerungsstrecken im Wirtsgestein frei von Störungs- und größeren Klüftzonen sein, da diese Bereiche eine erhöhte Wasserwegsamkeit darstellen.

Die Geometrie eines Endlagers in kristallinen Gesteinen wird im wesentlichen durch den Verlauf von signifikanten, auslegungsbestimmenden Diskontinuitäten (Störungen, Klüftzonen, geschieferte Zonen etc.) vorgegeben.

iii) Es ist sicherzustellen, daß die Wirksamkeit der geologischen Barriere durch die erforderlichen Untersuchungen nicht unzulässig beeinträchtigt wird.

Vor dem Auffahren der untertägigen Hohlräume ist es erforderlich, das Wirtsgestein im geplanten Streckenbereich sowohl mit Hilfe zerstörungsfreier geophysikalischer Methoden als auch durch gezielt angesetzte Bohrungen auf größere Heterogenitäten und Einzelklüfte zu untersuchen.

(5) Hydrogeologie

i) Mittels hydrogeologischer Betrachtungen sind in erster Linie die Oberflächen- und Grundwasserverhältnisse in der Endlagerregion und in deren Umfeld zu ermitteln und zu bewerten.

Sie können nur nach umfangreichen und detaillierten Standortuntersuchungen an Ort und Stelle hinreichend genau eingeschätzt werden.

ii) Generell sollte das Wirtsgestein des Endlagers allseitig niedrige Gradienten des regionalen hydraulischen Drucks aufweisen.

iii) Die Durchlässigkeit des Wirtsgesteins sollte gering sein, so daß von günstigen Rückhalteeigenschaften in bezug auf migrierende Radionuklide ausgegangen werden kann.

iv) Auch die das Wirtsgestein umgebenden Nebengesteine sollten nur geringe Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers aufweisen.

v) Die für die Erstellung eines Grundwasserfließmodells erforderlichen Messungen sollten weit über die Endlagerregion hinausgehende Zu- und Abflußgebiete erfassen.

vi) Stratigraphische und strukturgeologische Besonderheiten wie z.B. Gänge, Störungen, Falten u.ä., die sich ungünstig auf die Rückhalteeigenschaften der Gesteine und des Gebirges auswirken können, sind bei der Modellierung und Bewertung des Grundwasserfließsystems zu berücksichtigen. Auch dürfen mögliche Rutschungen, Senkungen etc. nicht zu einer wesentlichen Veränderung des Grundwasserfließsystems führen.

vii) Zwischen dem Endlager und der zu schützenden Umgebung dürfen keine Trinkwasserentnahmestellen liegen. Bei der Einrichtung des Endlagerstandortes sind die vom Gesetzgeber geforderten Entfernungen zu Einzugsgebieten von Wasserfassungen und Quellen zu beachten.

viii) Speziell bei kristallinen Wirtsgesteinen sind die hydrogeochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer ein wesentlicher Faktor.

Ihre Bedeutung, besonders in bezug auf die Materialwahl für die Endlagerbehälter und die zu berücksichtigenden physikochemischen Eigenschaften des Versatzmaterials, kann nur durch detaillierte Messungen vor Ort im Rahmen von Standortuntersuchungen abgeschätzt werden.

(6) Wirtsgesteinseigenschaften

i) Das Wirtsgestein muß möglichst homogen ausgebildet sein und Felseigenschaften besitzen, die für den Bau, Betrieb und Verschluß eines untertägigen Endlagers geeignet sind.

Die mechanischen und physikalischen, insbesondere die thermomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen in großem Maße dessen Eignung als Endlagermedium.

ii) Durch die Erstellung der unterirdischen Strecken darf die Wirkung der geologischen Barriere nicht wesentlich verschlechtert werden.

iii) Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften müssen außerdem ein kontinuierliches Beschicken und Verfüllen der Hohlräume erlauben.

iv) Die thermische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins soll die schadlose Ableitung der Nachzerfallswärme der radioaktiven Abfälle ermöglichen.

Die maximal zulässige Gebirgstemperatur im geplanten Endlagerniveau sollte vor der Einlagerung auf etwa 55 °C begrenzt bleiben, da andernfalls der Aufwand für die Lüftungstechnik unverhältnismäßig hoch werden würde.

v) Der vom Abfall produzierte und zur lokalen Gebirgstemperatur hinzukommende Wärmeeintrag darf selbst bei einem ungünstigen Zusammenwirken geomechanischer, hydrogeologischer und thermischer Eigenschaften des Wirtsgesteins dessen Isolationsfähigkeit nicht herabsetzen.

vi) Thermisch induzierte Klüfte, Mineralumwandlungen oder physikalische Vorgänge, die zum Austritt von Radionukliden aus dem Endlagerbereich führen können, sollten ausgeschlossen sein.

vii) Eine Änderung der geochemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins darf weder zur Verschlechterung der Gesteinseigenschaften führen noch die eingebrachten künstlichen Barrieren beeinträchtigen.

Die geochemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins haben besonders bei der Einschätzung der Langzeitsicherheit eines Endlagers einen Einfluß. So wird das Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins bezüglich freigesetzter Radionuklide nach der Einlagerung wesentlich von dessen geochemischem Verhalten beeinflusst.

(7) Seismizität

Das Endlager sollte in Regionen mit möglichst geringer seismischer Aktivität angelegt werden.

Die Auswirkungen des größtmöglichen Erdbebens in dem betroffenen Areal sollten auf der Basis historischer Erhebungen und unter Einbeziehung der Untersuchung des tektonischen Umfeldes abgeschätzt werden. Dies betrifft besonders die möglichen Änderungen der Durchlässigkeiten im geklüfteten Gebirge nach seismischen Ereignissen.

(8) Rohstoffvorkommen, Bergbau und Infrastruktur

i) Die anthropogene Veränderung und Belastung eines Gebietes ist bei der Wahl eines geeigneten Endlagerstandortes von großer Bedeutung.

Dazu gehören in erster Linie untertägiger Altbergbau, Stauhaltungen und infrastrukturelle Merkmale wie Bevölkerungsdichte, Straßen- und Eisenbahnnetz sowie Gebiete mit Rohstoffvorkommen und Vorkommen von Tiefbohrungen für andere Zwecke als für die Erkundung von Endlagerstandorten.

ii) Um eine spätere Beeinflussung des Endlagers durch Explorationsarbeiten zu verhindern, muß sichergestellt sein, daß keine außergewöhnlichen Bodenschätze sowie Rohstoffvorkommen, die von nationalem Interesse sein könnten, und deren Ausbeutung in absehbarer Zeit möglich erscheint, in der Standortregion vorhanden sind.

Dies trifft besonders auf Vorkommen von Rohstoffen zu, deren Wert den Durchschnittswert anderer, gleich großer Gebiete in ähnlich strukturierten Formationen übersteigt und gilt dabei gleichermaßen für regionale Grundwasservorräte.

2.3.3 BGR-Ausschlußkriterien

Aus den allgemeinen Standortkriterien lassen sich unter dem Aspekt der weiteren Untersuchungswürdigkeit eines Standortes drei Gruppen von Faktoren formulieren: ausschließende, günstige und ungünstige.

Potentiell untersuchungswürdige Gesteinsvorkommen werden anhand der günstigen bzw. ungünstigen Standortkriterien einer näheren Betrachtung und Wichtung unterzogen.

Die Ausgrenzung nicht untersuchungswürdiger Standorte erfolgt zuvor anhand der ausschließenden Faktoren.

Nach /BGR 94/ können die geowissenschaftlichen Ausschlußkriterien zweifach untergliedert werden in:

(1) Geogen bedingte Faktoren:

i) Tektonisch und seismisch aktive Zonen (Lineamente und Erdbebenzonen ab Zone 1 nach DIN 4149 (Intensitätsgrad $\geq 7^\circ$ der MSK-64-Skala nach MEDVEDJEV, SPONHEUER, KARNIK)),

ii) hohe Verwerfungsdichte,

iii) starke und diskontinuierliche Vertikal- und Horizontalbewegungen,

iv) intensiver vorhandener oder zu erwartender Magmatismus.

(2) Geotechnisch-ingenieurgeologische Faktoren:

i) Nicht ausreichende Größe des Kristallinkomplexes (ausgehend von der geforderten Fläche für den Bereich des eigentlichen Endlagers -Nahbereich mit 1 bis 2 km²- und der Lage von etwa 500 m Tiefe im Wirtsgestein sollte die Mindestfläche 10 km² und die Mindestbreite eines Einzelkomplexes 3 km betragen),

ii) intensiver Bergbau, sowohl unter- als auch übertage, bei relativ kleinen Kristallinvorkommen sowie Vorbehaltsgebiete für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe,

iii) Wechsel in den Gesteinseigenschaften verschiedener Kristallinarten, die die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins negativ beeinflussen.

2.4 Finnland

In den nordischen Endlagerkriterien /SKI 93/ werden Standortanforderungen behandelt (s. Schweden, Kap. 2.7.1). Darüber hinaus sind allgemeine Kriterien und Empfehlungen für die Standortwahl eines geologischen Endlagers für abgebrannte Brennelemente in der Veröffentlichung /POS 99/ enthalten. Wesentliche Kriterien werden im nachfolgenden aus dieser projektbezogenen Sicherheitsstudie zusammengestellt, ohne irgendeine Rangordnung festlegen zu wollen. Es ist jedoch offensichtlich, daß der

Langzeitsicherheit und der öffentlichen Akzeptanz dabei eine hervorragende Bedeutung zufallen.

(1) Endlagerkonzept und Standortauswahl

i) Über die Gesteinseigenschaften des Endlagerstandortes sollten von vornherein keine detaillierten Kriterien festgelegt werden, da ein auf dem Prinzip des Multibarrierensystems beruhendes Endlagersystem in seiner Anwendung an viele geologischen Formationen angepaßt werden kann.

Allgemeine Kriterien hinsichtlich der Gesteinseigenschaften in bezug auf die Standortauswahl eines Endlagers wurden bereits Ende der 70er und 80er Jahre entwickelt /NEA 77, DOE 82, IAE 89-89a/.

ii) Die geologischen Eigenschaften des Endlagerstandortes sollten als Ganzes günstig in bezug auf die Isolation der endgelagerten radioaktiven Stoffe gegenüber der Umwelt sein.

Unter günstigen Eigenschaften werden stabile mechanische und chemische Verhältnisse verstanden, bei denen die technischen Barrieren effizient wirken, und deren Wirksamkeit so lang wie möglich erhalten bleibt.

iii) Hinsichtlich der geologischen Eignung eines Standortes sind bei der Standortauswahl u.a. von Bedeutung: Topographie, Stabilität des Wirtsgesteins, Größe und Homogenität der Endlagerformation, Tiefe des Endlagers, Zerklüftung des Wirtsgesteins, Anfall und Beweglichkeit des Grundwassers, Vorhandensein von natürlichen Ressourcen.

iv) Faktoren, die auf keine Eignung als Endlagerstandort hinweisen, können z.B. die Nähe von explorierbaren natürlichen Ressourcen und ungewöhnlich hohe Felsspannungen sein.

(2) Langzeitsicherheit

i) Stabile geologische Situation: Größere Bruchzonen oder explorierbare Erz- oder Mineralvorkommen sollten am Endlagerstandort nicht vorkommen.

Die geologische Situation ist durch langsam ablaufende hydrogeologische und geochemische Prozesse charakterisiert. Mögliche Faktoren die eine Veränderung bewirken könnten, sollten hinreichend gut bekannt sein.

ii) Geeignetes geochemisches Umfeld: Die technischen Barrieren sollen ihre spezifischen Eigenschaften möglichst lange beibehalten.

Das geochemische Umfeld ist durch Bedingungen wie Sauerstofffreiheit, niedriger Eh-Wert, pH-Wert nahe bei neutral und geringe Sulfidkonzentration charakterisiert. Der Salzgehalt des Grundwassers darf nicht zu groß sein (TDS-Wert unter 100 g/l).

iii) Geeignete hydrogeologische Situation: Das Grundwasserangebot und die Grundwasserzirkulation soll ausreichend gering sein.

Die hydrogeologische Situation ist durch einen kleinen hydraulischen Gradienten und niedrige hydraulische Leitfähigkeiten der Gesteine charakterisiert.

iv) Geeignete geomechanische Situation: Der Endlagerbereich soll ausreichend tief in Festgesteinen angelegt werden können.

Die geomechanischen Eigenschaften sind hinreichend geringe Gebirgsspannung sowie ein günstiges Verhältnis der Gebirgsspannung gegenüber der Gesteinsfestigkeit.

(3) Baubarkeit

i) Geeignete felsmechanische Situation: Das Endlager soll mit üblichen Konstruktionsmethoden angelegt werden können und ohne besondere technische Maßnahmen eine gute Stabilität des unterirdischen Einlagerungsbereichs vorweisen.

Diese Art von Umgebung ist dadurch charakterisiert, daß ein genügendes Volumen von geeignetem Felsgestein in der geplanten Tiefe vorliegt, damit die Einlagerungstrecken in dieser Tiefe angelegt werden können.

ii) Bei Festgesteinen von geringwertiger Klassifikation sind bei Errichtung und Betrieb des Endlagers besondere Vorkehrungen, Stützungen und Verfugungen erforderlich. Daraus resultierende zusätzliche Ungewißheiten müssen bei der Bewertung der Langzeitsicherheit berücksichtigt werden. Schlimmstenfalls könnten Stabilitätsprobleme eine Endlagerung unmöglich machen.

iii) Bei der Positionierung der Endlagerstätte sollte eine gewisse Flexibilität gegeben sein.

(4) Möglichkeiten der Erweiterung

i) Es sollte eine Erweiterung der Endlagerstätte möglich sein.

Dies könnte erforderlich sein, falls später die Handhabung und Einlagerung einer größeren Anzahl von Brennelementen als bisher bei den derzeitigen Kraftwerkseinheiten vorgesehen, erfolgen muß.

ii) Durch Untersuchungen von der Oberfläche aus sollte eine Charakterisierung von größeren Felsvolumina vorgenommen werden, um dadurch das Auffinden von Felsbereichen zu ermöglichen, die für eine Erweiterung in Frage kommen.

(5) Betrieb des Endlagers

i) Der Standort sollte so gewählt sein, daß das Endlager entsprechend den Sicherheitsanforderungen geplant, errichtet und betrieben werden kann.

Solange noch kein Verschuß des Endlagers erfolgt ist, hängt die Betriebssicherheit der Anlage mehr von der Auslegung und Konstruktion als von den Standorteigenschaften ab.

ii) Der Standort sollte unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Notwendigkeit und Art des Transports der verbrauchten Brennelemente gewählt werden.

Der Transport der Brennelemente bildet einen integralen Bestandteil der Betriebsphase des Endlagers. Die Transportsicherheit hängt im wesentlichen von den Transportbehältern ab.

(6) Soziale Akzeptanz

Widersprüche oder Konflikte aufgrund des Endlagerprojektes sollten auf ein angemessenes Maß minimiert oder reduziert werden.

Dies kann dadurch erreicht werden, daß die Charakterisierung hinsichtlich der Standorteigenschaften, der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers in Zusammenarbeit mit der betreffenden Gemeinde und deren Einwohner erfolgt.

(7) Bodennutzung und Umweltbelastung

Das Endlager sollte in einem Landschaftsgebiet mit einem für seinen zukünftigen Betrieb geeigneten Nutzungsplan liegen.

Das Landschaftsgebiet kann für keine anderen Zwecke genutzt werden. Verkehr und Transport zur Anlage erhöhen die bisherige Umweltbelastung.

(8) Infrastruktur

Für das Endlager sollten geeignete Verkehrsverbindungen sowie städtische, ingenieurmäßige und industrielle Versorgungsnetze vorhanden sein.

(9) Kosten

Der Standort sollte auch unter Berücksichtigung anfallender Kosten ausgewählt werden.

Die Errichtungs- und Betriebskosten der Anlage (einschließlich Transport) sind je nach Lage des Standortes unterschiedlich. Ein entscheidender Faktor bei der Kostenermittlung ist die Ungewißheit bei den Untergrundeigenschaften des Endlagers.

2.5 Frankreich

2.5.1 Endlagerrichtlinie RFS No III. 2. f

In den französischen Grundsatzregeln zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /RFS 91/ werden die geologischen Standortanforderungen unterteilt in wesentliche (essentiels) und wichtige (importants) Kriterien (s. Anhang (1)). Zu den wesentlichen gehören die der Stabilität und Hydrologie. Die Kriterien beruhen auf den Empfehlungen einer französischen Sachverständigengruppe (s. Kap. 2.5.2), die in einem wissenschaftlichen Bericht (Goguel-Studie „Endlagerung von radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen - Technische Kriterien zur Standortwahl“ /GOG 87/) veröffentlicht wurden.

1. Wesentliche Kriterien

(1) Stabilität

i) Die Stabilität der Wirtsgesteinsformation muß so sein, daß eventuelle Änderungen der Ausgangsbedingungen infolge möglicher geodynamischer Einwirkungen (Eiszeiten, Erdbeben und neotektonische Bewegungen) hinsichtlich der Endlagersicherheit zulässig bleiben.

ii) Insbesondere sollte die Stabilität (einschließlich einer begrenzten und vorhersehbaren Entwicklung) für einen Zeitraum von wenigstens 10 000 Jahren nachgewiesen werden.

(2) Hydrogeologie

i) Die Hydrogeologie des Standorts muß sich durch eine sehr geringe Durchlässigkeit der Wirtsfornation und geringe Grundwasserbewegungen auszeichnen.

ii) Ein kleiner regionaler hydraulischer Gradient sollte auch für die Formationen um die Wirtsfornation herum bevorzugt in Betracht gezogen werden.

2. Wichtige Kriterien

(1) Mechanische und thermische Eigenschaften

i) Es sollten günstige thermomechanische Eigenschaften hinsichtlich einer Verträglichkeit der Abfälle mit den Materialien der geologischen Barrieren vorliegen.

ii) Das Umfeld der Lagerung muß so gewählt werden, daß Hohlräume für die Einlagerung geschaffen werden können, die während der Befüllung nicht wieder neu bearbeitet werden müssen.

(2) Geochemische Eigenschaften

Es sollten günstige geochemische Eigenschaften hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf Änderungen der technischen Barrieren vorliegen.

Geochemische Eigenschaften bestimmen maßgeblich die Rückhalteeigenschaften von eventuell freigesetzten Radionukliden.

(3) Mindesttiefe

Der Standort muß so gewählt werden, daß ein großer Abstand von der Erdoberfläche als Schutz vor Erosion (insbesondere infolge einer Eiszeit), Erdbeben und „normalen“ menschlichen Einwirkungen sichergestellt ist.

Die Mächtigkeit der durch diese Ereignisse beeinträchtigten Schichten beträgt etwa 150 bis 200 Meter.

(4) Bodenschätze

Der Standort muß so gewählt werden, daß Gebiete mit bekannten oder zu erwartenden außergewöhnlichen unterirdischen Bodenschätzen vermieden werden.

2.5.2 Goguel-Studie

Die in der Goguel-Studie „Endlagerung von radioaktiven Abfällen in geologischen Formationen - Technische Kriterien zur Standortwahl“ /GOG 87/ entwickelten Standortkriterien für die Auswahl eines Standortes folgen der vorgegebenen abgestuften Rangfolge:

1. Wesentliche Merkmale (critères essentiels)

(1) Hydrogeologie

i) Es wird von dem Prinzip einer minimalen Grundwasserströmung ausgegangen, die durch sehr kleine Durchlässigkeiten des Wirtsgesteins und sehr kleine regionale hydraulische Gradienten gekennzeichnet ist.

ii) Die Kenntnis über die regionale hydrogeologische Situation muß ständig vertieft werden und für jeden Schritt der Sicherheitsanalyse auch überprüfbar sein.

iii) Die Erstellung eines Strömungsmodells setzt voraus, daß die hydrogeologischen Messungen für einen großen Bereich des Endlagerstandortes repräsentativ sind.

(2) Geologische Stabilität

i) Es muß ein gewisser Grad der Konsolidierung des Endlagerstandortes nachgewiesen sein bezüglich bestimmter geologischer Ereignisse bzw. Prozesse (wie Erdbeben, Vereisung, tektonische Vertikal- und Horizontalbewegungen, Reaktivierung von Störungen u. a.), so daß dieser keine entscheidende Veränderung bezüglich seiner Sicherheit erfährt.

ii) Dieser Nachweis sollte für jeden Standort qualitativ und quantitativ geführt werden und zwar aus der Kenntnis der erdgeschichtlichen Entwicklung und der Kenntnis der regionalen Geologie.

2. Wichtige Merkmale (critères importants)

(1) Mechanische Gesteinseigenschaften (Felsmechanik)

i) Sie bestimmen primär die Durchführbarkeit des Endlagers in einer bestimmten Gebirgseinheit und damit die Sicherheit des Endlagers sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachbetriebsphase. Die Konzeption, Errichtung und Ausgestaltung des Endlagers erlaubt daher keine schablonenhafte Vorgehensweise.

ii) Durch die Wahl der Gebirgseinheit muß ausgeschlossen sein, daß es während der Betriebsphase des Endlagers infolge von gebirgsmechanischen Bewegungen zu einem Ereignis kommt, das eine Sanierung des Endlagers erforderlich macht.

(2) Geochemische Eigenschaften (Geochemie)

i) Die geochemischen Eigenschaften des Gestein-Wasser-Systems spielen eine entscheidende Rolle für die Langzeitsicherheit eines Endlagers, da sie die Stabilität der künstlichen Barrieren beeinflussen und die Phänomene der Radionuklidretention steuern.

ii) Die Kenntnis der grundlegenden geochemischen Mechanismen und die zu beachtenden Randbedingungen für die Durchführung von Vorort - Untersuchungen müssen eine qualitative Beschreibung des geochemischen Systems ermöglichen, um die Bedingungen des Radionuklidtransportes zu erfassen.

iii) Hauptzielrichtung muß die Standortuntersuchung sein, wobei diese, unter Berücksichtigung der experimentellen Vorschriften und genau geführter Untersuchungsprotokolle, die Anpassung an die Erfordernisse der quantitativen Modellierung und die Besonderheiten des Systems ermöglichen soll.

iv) Eine hierzu angepaßte Methodik muß verwendet werden und zur Verfügung stehen.

(3) Tiefenlage

i) Der Standort muß so gewählt sein, daß durch die Tiefenlage des Endlagers die geologische Barriere die Einschlußwirkung garantiert.

ii) Durch Prozesse/Ereignisse wie Erosion (insbesondere infolge einer Eiszeit), Erdbeben oder durch menschliche Eingriffe in das Endlager darf die Einschlußwirkung der geologischen Barriere nicht verändert werden.

iii) Eine durch die genannten Auswirkungen beeinflusste Zone kann bis in eine Tiefe von 150 bzw. 200 m angenommen werden.

(4) Bodenschätze

Der Standort sollte nicht in Gesteinshorizonten liegen, in denen wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten liegen bzw. vermutet werden.

(5) Wärmeeffekte

i) Vom Wärmeverhalten des Wirtsgesteins hängt sehr entscheidend die thermomechanische Entwicklung des Endlagerstandortes ab, die über den Wärmeeintrag des Abfalls beeinflusst werden kann. Von daher ist der Einfluß des Wärmeeintrags auf die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins, in Abhängigkeit der Art des Abfalls und seiner Lagerung, mit Hilfe der gekoppelten Modellierung thermischer und mechanischer Vorgänge zu untersuchen.

ii) Obgleich thermomechanische Prozesse gut bekannt sind, sollten für jede Gesteinsart während der Standorterkundung spezielle Untersuchungen durchgeführt werden, um entsprechende physikalische Gesteins-/Gebirgsparameter zu ermitteln und ihren Einfluß auf bestimmte Phänomene zu bestimmen.

iii) Die mineralogische Untersuchung des Wirtsgesteins, insbesondere auch die Mineralphasenveränderung unter Wärmeeinfluß sollte verstärkt untersucht und modelliert werden, wobei das Verhalten der Tonminerale besonders studiert werden sollte.

3. Günstige Faktoren (facteurs favorables)

(1) Verdünnung am Aufpunkt

Entsprechend des Prinzips der Limitierung der Individualdosis soll der Standort begünstigt werden, an dessen Aufpunkt ein hoher Grundwasserstrom existiert, um eine hohe Verdünnung der freigesetzten Radionuklide beim Eintritt in die Biosphäre zu garantieren.

(2) Entfernung zum Aufpunkt

Es ist darauf zu achten, daß die Fließwege in der Geosphäre lang sind, um durch die Retardation den Nuklidtransport zu verzögern und die Möglichkeit der erhöhten Nuklid-sorption an der Gesteins-/Mineraloberfläche zu nutzen.

(3) Vernünftige Tiefenlage

Für die Tiefenlage des Endlagers soll eine Wahlmöglichkeit gegeben sein, so daß nicht die größtmögliche Tiefe ausgewählt werden muß, sondern eine Tiefenzone, die aufgrund ihrer lithologischen Ausbildung die genannten Kriterien erfüllt.

2.6 Kanada

2.6.1 Ausschlußkriterien für die Standortwahl

In Kanada werden Anforderungen zum Umweltschutz in einer Reihe von Dokumenten (Codes of Practice) gestellt, die sogenannte „bewährte Praktiken“ zum Umweltschutz für die verschiedenen Phasen von Standortwahl, Planung, Konstruktion, Betrieb und Stilllegung einer kerntechnischen Anlage beschreiben. Diese Codes werden unter der Federführung des Umweltministers in Abstimmung mit einer staatlich-industriellen Arbeitsgruppe erstellt, haben aber keine gesetzliche Wirkung. Der Umweltcode über die Phase der Standortwahl (Environment Canada 1987) /EPS 87/ enthält Kriterien, die schädliche Umweltauswirkungen minimieren sollen. Diese Kriterien sind als Dreistufenkonzept entwickelt worden, beginnend mit den allgemeinen Eignungs- oder Ausschlußkriterien in der Phase I bis zu den sehr detaillierten Auswahlkriterien für den Standort in Phase III.

Die Kriterien haben etwa den Charakter von Beurteilungsgrößen, wie sie in Umweltverträglichkeitsprüfungen gefordert werden. Ihre Betrachtung wird daher an dieser Stelle zurückgestellt.

2.6.2 Die AECB-Richtlinie R-72

Das AECB - Richtliniendokument R-72 trägt den Titel „Regulatory Guide - Geological Considerations in Siting a Vault for Underground Disposal for High-Level Radioactive Waste" /AEC 87/. Es beschreibt die allgemeinen Eigenschaften eines Endlagers und behandelt einige grundsätzliche Ziele und Anforderungen.

(1) Ein wirksames Endlagersystem für radioaktive Abfälle, bestehend aus technischen und natürlichen Barrieren, soll

i) die radioaktiven Substanzen isolieren und zurückhalten, um einen möglichst vollständigen radioaktiven Zerfall zu gewährleisten,

ii) die Mobilität flüchtiger Radionuklide einschränken, damit vor der Rückkehr zur Biosphäre eine längere Zeit für den radioaktiven Zerfall verbleibt und

iii) den Kontakt des Menschen mit dem Abfall einschränken.

(2) Des Weiteren müssen bei der Entwicklung eines Endlagerkonzeptes für radioaktive Abfälle die folgenden grundsätzlichen Anforderungen berücksichtigt werden:

i) Das Endlagersystem und dessen Komponenten müssen in der Lage sein, Störungen, welche aufgrund vorhersehbarer natürlicher Ereignisse in der Nähe der Lagerstätte auftreten können, derart zu beherrschen, daß der Risikobeitrag für die Bevölkerung aufgrund der Radionuklidfreisetzung infolge solcher Störungen zulässig ist.

ii) Die Endlagerung soll passiv sein, das heißt, sie soll so erfolgen, daß die Verpflichtungen für zukünftige Generationen, für die weitere sichere Isolierung des Abfalls zu sorgen, minimiert werden.

(3) Als **geologische Kriterien** werden für einen geeigneten Standort vorgeschrieben:

i) Das Wirtsgestein und geologische System soll solche Eigenschaften haben, daß ihr Zusammenwirken die Mobilität und Freisetzung von radioaktivem Material erheblich einschränkt.

ii) Es sollte eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür bestehen, daß das Wirtsgestein als Rohstoffquelle abgebaut wird.

iii) Der Standort sollte in einem Gebiet liegen, das geologisch stabil ist und wahrscheinlich auch zukünftig stabil bleibt.

iv) Das Wirtsgestein und das geologische System sollten fähig sein, Spannungen ohne nennenswerte Strukturverformungen, Risse oder Brüche in den natürlichen Barrieren zu widerstehen.

v) Die Ausdehnung des Wirtsgesteins sollte so groß sein, daß der Einlagerungsraum im tiefen Untergrund und ausreichend fern von geologischen Diskontinuitäten liegen kann.

2.6.3 Wünschenswerte (technische) Standorteigenschaften

Als wünschenswerte Standorteigenschaften werden im Sicherheitsbericht der AECL /AEC 94/ genannt:

(1) Stabilität, Seismizität/Erbebenrisiko.

i) Erdbebenzone 0 oder 1.

ii) Kein Anzeichen von postglazialer Verwerfung.

iii) Entfernt von rezenter seismischer Aktivität, seismisch aktiven Verwerfungen, größeren strukturellen Kontaktzonen oder größeren Verwerfungszonen.

(2) Lagerstätten/Landnutzung

i) Entfernt von vorhandenen Bergwerken, möglichen Lagerstätten und Explorationsgebieten.

ii) Keine bekannten derzeitigen wertvollen Mineralstätten oder möglicherweise zukünftigen Lagerstätten.

iii) Keine wertvollen landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen Ressourcen oder Erholungsgebiete.

(3) Geologische Eigenschaften

i) Großvolumiger Kristallinkomplex (vorzugsweise Plutonit) mit gleichförmigen Eigenschaften.

ii) Gute Aufschlußverhältnisse des Gesteinskomplexes.

iii) Nur wenige größere strukturelle Besonderheiten im Gesteinskomplex erkennbar.

(4) Hydrologie und hydrologische Eigenschaften

i) Geringes regionales topographisches Gefälle und geringes lokales topographisches Höhenrelief.

ii) Regionale Hochlandlage.

(5) Grad der Zerklüftung im Gesteinskomplex

i) Großer Abstand zwischen größeren strukturellen Besonderheiten im Gesteinskomplex, wie beispielsweise Verwerfungen und Verwerfungszonen.

ii) Wenige Zerklüftungen, Zerklüftungszonen oder Verwerfungen im Gesteinskomplex zwischen den größeren Hauptmerkmalen.

(6) Oberfläche und Umweltempfindlichkeit

Geringe Umweltempfindlichkeit und geringer Umweltwert.

2.7 Schweden

2.7.1 Standortkriterien

Im Hauptabschnitt der nordischen Endlagerkriterien /SKI 93/ werden Standortanforderungen in den Abschnitten Standortgeologie, Tiefe des Endlagers und Gestaltung des Endlagers behandelt.

(1) Standortgeologie

Der Standort sollte gute natürliche Bedingungen für einen Gesamteinschluß und die Isolation der radioaktiven Substanzen aufweisen. Demnach sollte ein idealer Standort

i) hydrogeologische Eigenschaften haben, welche geringe Grundwasserbewegung innerhalb der Endlagers, lange Grundwasserfließzeiten von der Lagerzone zur Biosphäre und günstige Verdünnungseigenschaften aufweisen,

ii) geochemische Eigenschaften haben, die zu einer geringen Korrosionsrate des Behältermaterials, zu einer geringen Auflösungsrate der Abfallmatrix und auch zu geringer Löslichkeit und zu effektivem Rückhaltevermögen für die freigesetzten radioaktiven Substanzen beitragen,

iii) in einem Gebiet geringer tektonischer und seismischer Aktivität liegen,

iv) so gewählt sein, daß die Nähe von solchen natürlichen Rohstoffen gemieden werden, welche nicht ganz leicht aus anderen Quellen gewonnen werden können.

(2) Tiefe des Endlagers

Das Endlager sollte

i) in einer ausreichenden Tiefe liegen, um die Abfallgebinde vor äußeren Ereignissen und Prozessen zu schützen und menschliche Eingriffe zu erschweren,

ii) in einer Gesteinsformation liegen, die groß genug ist, um den Endlagerbereich und eine Zwischenzone unterzubringen.

(3) Gestaltung des Endlagers

Die Ausbildung des Endlagerbereichs sollte so erfolgen, daß

- i) der Temperaturanstieg infolge der Wärmeproduktion der Abfallgebinde auf einem angemessenen niedrigen Wert bleibt,
- ii) das Ausmaß der geochemischen Störungen infolge des eingelagerten Abfalls gering bleibt,
- iii) die Zunahme der Zerklüftung infolge der Endlagerkonstruktion oder des eingelagerten Abfalls begrenzt bleibt,
- iv) der eingelagerte Abfall hinsichtlich Kernspaltung unterkritisch bleibt, auch langfristig.

2.7.2 Standortauswahl

Die Prozedur zur Errichtung und Inbetriebnahme des geplanten HAW-Endlagers in Schweden umfaßt die vier Einzelschritte:

- Allgemeine Untersuchungen, Standortauswahl und Vorbereitung von Standortuntersuchungen,
- vertiefende Standortuntersuchungen,
- Errichtung des Endlagers zur Versuchseinlagerung,
- Versuchsbetrieb.

Für die Standortauswahl werden die Standortkriterien zu folgenden Kriteriengruppen zusammengefaßt: Sicherheit, Technologie, Land und Umwelt, soziale Aspekte.

Das Vorgehen bei der Standortauswahl wird gestuft durchgeführt. In einem ersten Schritt werden auf der Basis allgemein vorliegender Kenntnisse - und insbesondere unter Berücksichtigung der beiden letzten Kriteriengruppen - potentielle Standortbereiche ausgewählt.

(1) **Günstige Bedingungen** zur Auffindung geeigneter Gebiete /SKB 94/ sind dabei:

i) Die Auswahl eines Wirtsgesteins, das für sonstige Nutzungen und Ressourcen von geringer Bedeutung ist.

ii) Ausreichend große Wirtsgesteinsausdehnungen mit geringen Großklüften.

iii) Geringe dem Vorhaben entgegenstehende Landnutzung und Umweltinteressen.

iv) Positive lokale Interessen.

v) Eine gute verfügbare Infrastruktur.

Der erste Schritt der Standortauswahl zur Identifizierung von zu favorisierenden Standorten wird nach /SKB 94/ ohne eine Standortdatenerhebung durchgeführt und beruht auf öffentlich zugänglichem Datenmaterial.

(2) Als **ungünstige Standortbedingungen**, die es zu vermeiden gilt, werden genannt:

i) Abnorme Grundwasserchemie.

ii) Stark heterogene Wirtsgesteinsverhältnisse und schwer interpretierbare Standortgeologie.

iii) Bekannte Deformationszonen und post-glaziale Störzonen.

iv) Ausgeprägte Quellgebiete für das Grundwasser.

v) Bereiche möglicher Prospektionen.

(3) **Günstige Standortbedingungen** sind dagegen:

i) Reduzierende Verhältnisse im Grundwasser.

ii) Normale Grundwasserchemie.

iii) Homogene Verhältnisse im Wirtsgestein, gute Interpretierbarkeit der Standortverhältnisse.

iv) Geringe Klüftigkeit und geringe bis moderate Kluftdichte.

v) Geringe Grundwasserausstrommungen.

vi) Für Schweden normale Bedingungen bezüglich der Gebirgsspannung; günstige Spannungseigenschaften und gute Wärmeleitfähigkeiten des Gebirges.

(4) Als **Ausschlußkriterien** gelten:

i) Extreme Grundwasserchemie wie z.B. oxidierende Verhältnisse.

ii) Wirtschaftlich interessante Rohstoffvorkommen.

iii) Mehrere engständige wasserführende Klufzonen.

iv) Extreme gebirgsmechanische Eigenschaften.

Der iterative Prozeß der Standortsuche und Standortauswahl wird in vier Phasen durchgeführt:

Phase 1: Allgemeine Studien

Diese werden landesweit auf der Basis öffentlich zugänglicher Materialien und unter Zugrundelegung der oben aufgeführten Kriterien und Faktoren geführt.

Phase 2: Machbarkeitsstudien

Es werden Machbarkeitsstudien für 5 bis 10 potentielle Standorte geführt, deren Auswahl auf obigen Kriterien basieren und für die ein positives Interesse der entsprechenden Regionen vorliegt.

Phase 3: Standortuntersuchungen von übertage

Aus den vorhergehenden Studien werden zwei Standorte kondensiert, für die eingehende Standortuntersuchungen durchgeführt werden. Die Untersuchungen werden von übertage durchgeführt; es werden standortspezifische Sicherheitsanalysen und Umweltverträglichkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Phase 4: Detaillierte Standortcharakterisierung

Es werden detaillierte Standortuntersuchungen von über- und untertage zur Charakterisierung des Standortes durchgeführt. Sicherheitsanalysen sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen auf der Basis standortspezifischer Daten und einer konkreten Endlagerauslegung werden zur Entscheidung über die Errichtung eines Endlagers herangezogen.

2.7.3 Anforderungen an das Wirtsgestein des Endlagers KBS-3

Im April 2000 wurde von SKB ein technischer Bericht über geowissenschaftliche Eignungsfaktoren und Kriterien zur Standortauswahl und Standortbewertung im Kristallin veröffentlicht /SKB 00/. Die in diesem Bericht dargelegten Anforderungen des Betreibers an das Wirtsgestein gehen z.T. über die 1993 von SKI geforderten nordischen Endlagerkriterien und die 1994 von SKB aufgestellten Standortauswahlkriterien hinaus. Basis dieser Anforderungen ist ein Endlager vom Typ KBS-3, in dem die abgebrannten Brennelemente in Kupferbehälter eingeschlossen sind, die in einer Tiefe von 400 - 700 m umgeben von Bentonitblöcken im kristallinen Grundgebirge eingelagert werden. Den Anforderungen liegen die schwedischen Gesetze und Bestimmungen zugrunde.

Der Bericht analysiert, wie die verschiedenen geologischen Bedingungen, geomechanischen, thermischen, hydrogeologischen und chemischen Eigenschaften sowie die Transporteigenschaften des Gebirges die Funktionen des tiefen Endlagers beeinflussen. Diese Anforderungen oder günstigen Bedingungen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf einzelne Eigenschaften (Parameter) des Wirtsgesteins definiert. Parameter, die verwendet werden können, um festzustellen, ob Anforderungen oder günstige Bedingungen erfüllt sind, werden geowissenschaftliche Eignungsindikatoren genannt. Um während einer Standorterkundung bestimmen zu können, ob Anforderungen und günstige Bedingungen für einen gegebenen Parameter erfüllt sind, werden Kriterien formuliert, die auf Größen basieren, die im Verlauf Standortauswahlverfahrens bestimmt werden können.

(1) Anforderungen an das Wirtsgestein

Im folgenden werden die Anforderungen an das Gestein oder an die Positionierung des tiefen Endlagers im Gebirge aufgeführt.

i) Das Wirtsgestein darf kein Erzpotalential aufweisen, d. h. es darf keine so wertvollen Minerale enthalten, die es rechtfertigen könnten, jene zukünftig in Hunderten von Metern Tiefe abzubauen.

ii) Regionale Abscherzonen sollen vermieden werden. Es können jedoch sogenannte "tektonische Linsen" in den Nähe von regionalen plastischen Abscherzonen existieren, in denen das Grundgestein homogen und relativ unberührt ist.

iii) Es muß möglich sein, das Endlager mit Rücksicht auf die Kluffzonen am Standort zu positionieren. Einlagerungstunnel und Einlagerungshohlräume für Behälter dürfen nicht durch größere regionale und lokale Kluffzonen hindurchführen oder zu nahe an ihnen positioniert werden. Einlagerungshohlräume dürfen identifizierte kleinere lokale Kluffzonen nicht kreuzen.

iv) Festigkeit, Kluffgeometrie und Anfangsbeanspruchungen des Gebirges dürfen nicht so geartet sein, daß sich innerhalb des Einlagerungsbereichs große Stabilitätsprobleme um Tunnel oder Einlagerungshohlräume herum ergeben können. Dies wird mittels einer geomechanischen Analyse geprüft, wobei die Tunnelgeometrie, die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des intakten Gesteins, die Geometrie des Kluffsystems sowie die anfänglichen Gesteinsbeanspruchungen in die Analyse eingehen müssen.

v) Das unbeeinflusste Grundwasser in der Tiefe des Endlagers darf keinen gelösten Sauerstoff enthalten. Die Abwesenheit von Sauerstoff wird durch negatives Eh, das Auftreten von Fe (II) oder das Auftreten von Sulfid angezeigt.

vi) Der Salzgehalt (*TDS = Total Dissolved Solids*, Summe der gelösten Feststoffe) des Grundwassers darf in der Tiefe des Endlagers 100 g/l nicht überschreiten.

(2) Günstige Bedingungen

Zusätzlich zu den oben genannten Anforderungen gibt es eine große Anzahl von günstigen Bedingungen, d. h. Bedingungen, die wünschenswert sind und die bei der Positionierung des Endlagers im Gestein berücksichtigt werden sollten. Ausschließlich auf die schwedische konzeptionelle Vorgehensweise der Bewertung zugeschnittene Bedingungen werden nicht aufgeführt.

i) Da es schwierig sein kann vorherzusagen, in welchem Ausmaß verschiedene Gesteine und Mineralstoffe zukünftig von Nutzen sein werden, ist das tiefe Endlager vorzugsweise in verbreitet auftretenden Gesteinsarten einzurichten.

ii) Eine geringe Anzahl von kleineren lokal begrenzten Kluffzonen verbunden mit einer geringen Kluffdichte ist zu bevorzugen.

iii) Es ist allgemein von Vorteil, wenn die anfänglichen Gebirgsbeanspruchungen in der geplanten Endlagertiefe nicht von jenen abweichen, die im schwedischen kristallinen Grundgebirge normalerweise vorkommen.

iv) Das intakte Gestein sollte vorzugsweise Festigkeits- und Verformungseigenschaften aufweisen, die für schwedisches Grundgebirge normal sind, da die Erfahrung gezeigt hat, daß es möglich ist, Arbeiten in solchem Grundgebirge mit guten Ergebnissen durchzuführen.

v) Der Wärmeausdehnungskoeffizient sollte vorzugsweise für schwedisches Grundgebirge normale Werte aufweisen (d. h. innerhalb einer Bandbreite von 10^{-6} bis 10^{-5} K^{-1}) und sich zwischen den Gesteinsarten im Endlagerbereich nicht merklich unterscheiden.

vi) Das Gestein sollte eine höhere Wärmeleitfähigkeit als $2,5 \text{ W}/(\text{m}, \text{K})$ aufweisen. Geothermische Anomalien sollten gemieden werden. Die geogene Temperatur in beabsichtigten Endlagertiefe sollte weniger als $25 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen.

vii) Es ist von Vorteil, wenn ein großer Teil des Gebirges in der Einlagerungszone einen hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert (K) aufweist, der geringer ist als 10^{-8} m/s .

viii) Kluffzonen, die während der Errichtung des Endlagers passiert werden müssen, sollten nur eine niedrige Durchlässigkeit aufweisen. Die Transmissivität (T) sollte unter $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ liegen. Darüber hinaus sollten sie aus bautechnischer Sicht nicht problematisch sein.

ix) Es ist von Vorteil, wenn der lokale hydraulische Gradient in Endlagertiefe niedriger ist als 1%, noch niedrigere Werte liefern keinen zusätzlichen Vorteil.

x) Das unbeeinflusste Grundwasser in Endlagertiefe sollte einen pH-Wert im Bereich von 6-10, eine niedrige Konzentration von organischen Verbindungen ($[\text{DOC}] < 20 \text{ mg/l}$), eine niedrige Kolloidkonzentration (weniger als $0,5 \text{ mg/l}$), niedrige Ammoniumkonzentrationen, einen gewissen Kalzium- und Magnesiumgehalt ($[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] > 4 \text{ mg/l}$) sowie geringe Konzentrationen an Radon und Radium aufweisen.

xi) Vorzugsweise sollte eine wesentliche Verzögerung von wichtigen Radionukliden in der Geosphäre stattfinden.

xii) Es ist wünschenswert, daß die Matrixdiffusion und die Matrixporosität des Gesteins nicht viel niedriger liegen als die Wertebereiche, die im Sicherheitsreport SR 97 analysiert worden sind. Die Eindringtiefe der Matrixdiffusion sollte mindestens einen Zentimeter übersteigen.

Zusätzlich zu den oben erwähnten günstigen Bedingungen, die direkt mit den Eigenschaften des Gesteins in Verbindung stehen, gibt es günstige Bedingungen, welche die Charakterisierung des Standorts erleichtern:

xiii) Gebiete, in denen eine biologische Vielfalt oder schützenswerte Arten bedroht sein könnten sowie andere Gebiete, die wichtige Wasserquellen, Nutzböden oder Ackerland darstellen oder darstellen können, sollten für die Errichtung von oberirdischen Anlagen eines Endlagers gemieden werden. (Gesetzlich geschützte Gebiete sind zu meiden.)

xiv) Vorzugsweise sollte das Grundgebirge mit wenigen Gesteinsarten homogen und regelmäßig geklüftet sein; wobei eine geringe Variation bei der mineralischen Zusammensetzung, wie im Gneis, keinen Nachteil bedeutet.

Generell führen erfüllte günstige Bedingungen zu größeren Sicherheitsfaktoren, einfacheren Untersuchungen oder einer einfacheren Errichtung des Endlagers mit niedrigeren Kosten. Alle günstigen Bedingungen müssen nicht erfüllt sein, damit ein Standort für ein tiefes Endlager genehmigt werden kann. "Schlechtere" Werte für bestimmte Parameter können durch "bessere" Werte für andere kompensiert werden.

(3) Auswahl von Gebieten für Standorterkundungen

Anforderungen und günstige Bedingungen, die das Gestein betreffen, sollten natürlich weitestgehend dazu genutzt werden, um Kriterien für die Auswahl von Standorten für

Standorterkundungen zu formulieren. Normalerweise existieren nach Fertigstellung einer generellen Machbarkeitsstudie für die Standorterkundung gute Kenntnisse der Bedingungen an der Erdoberfläche, während die Kenntnis der Bedingungen im tiefen Gestein sehr beschränkt ist. Kriterien können deshalb normalerweise nur für die folgenden Eignungsindikatoren formuliert werden:

i) Nach Fertigstellung einer generellen Machbarkeitsstudie werden weiterführende Studien und Untersuchungen nur für Gebiete durchgeführt, von denen nicht angenommen wird, daß sie ein Potential für das Vorkommen von Erz oder industriell verwertbaren Mineralstoffen aufweisen und die als homogen und als aus weitläufig auftretenden Gesteinsarten bestehend angesehen werden.

ii) Während der standortspezifischen Machbarkeitsstudie wird ein Gebirgsblock ausgewählt und so angepaßt, daß ein tiefes Endlager mit einer ausreichenden Randzone in Bezug auf regionale plastische Abscherzonen positioniert werden kann und daß die regionalen Klüftzonen in der Machbarkeitsstudie interpretierbar sind.

iii) Gesetzlich geschützte Gebiete werden gemieden, und Bereiche für weitere Untersuchungen werden so gewählt, daß sie nur wenige entgegenstehende Interessen (z. B. eine Wasserquelle) in sich vereinigen und der Oberflächenteil mit geringer Wirkung auf das oberflächennahe Ökosystem angepaßt werden kann.

iv) Gebiete mit einem unzureichend hohen topographischen Gefälle auf einer regionalen Skala (größer als 1%) werden verworfen.

Die Machbarkeitsstudien identifizieren auf diese Art Gebiete, die ein hohes Potential besitzen, die geeigneten Bedingungen aufzuweisen. Jedoch sind weitere Standorterkundungen (mittels Tiefbohrungen) notwendig, um dies zu überprüfen. Gleichzeitig zeigt die Untersuchung der generischen Wissensbasis über das schwedische kristalline Grundgebirge im SR 97, daß gute Aussichten bestehen sollten, Standorte in Schweden zu finden, die allen Anforderungen und den meisten der günstigen Bedingungen genügen.

(4) Ausschlußkriterien

Die folgenden Kriterien sind von solcher Bedeutung, daß bei ihrer Nichterfüllung eine weitere Standorterkundung entfällt und ein anderer Standort gewählt werden sollte:

i) Werden große Vorkommen an erzhaltigen oder industriell verwertbaren Mineralstoffen innerhalb des Endlagerbereichs entdeckt, sollte der Standort verworfen werden.

ii) Wenn ein Mindestabstand des Endlagers von 10 Metern zu größeren lokalen Zonen und von 100 Metern zu regionalen Zonen nicht einzuhalten ist, kann das Endlager in Bezug auf regionale Abscherzonen, regionale Kluffzonen oder lokale größere Kluffzonen nicht in einer vernünftigen Weise positioniert werden. Das wäre z.B. der Fall, wenn das Endlager in eine sehr große Anzahl von Einzelteilen zerteilt werden müßte. Der Standort ist dann für ein Endlager ungeeignet.

iii) Wenn das Endlager nicht auf eine Art konfiguriert werden kann, bei der weitreichende und generelle Stabilitätsprobleme vermieden werden können, ist der Standort ungeeignet und sollte verworfen werden.

iv) Mindestens einer der Indikatoren negative Eh-Werte, Auftreten von Fe^{2+} oder Auftreten von Sulfid muß durch die Ergebnisse der Messungen der geogenen Grundwasserzusammensetzung in Endlagertiefe erfüllt sein. Kann keiner der Indikatoren die Abwesenheit von gelöstem Sauerstoff eindeutig anzeigen, ist eine gründlichere chemische Untersuchung erforderlich. Wenn auch diese weiteren Untersuchungen keine sauerstofffreien Bedingungen anzeigen, ist der Standort zu verwerfen.

v) Die Messung des totalen Salzgehalts (*TDS = Total Dissolved Solids*, Summe der gelösten Feststoffe) des Grundwassers in entsprechender Endlagertiefe muß Werte ergeben, die unter 100 g/l liegen.

vi) Außer diesen unmittelbar ausschließenden Kriterien kann die Eignung des Standorts bezweifelt werden, wenn ein großer Anteil der Gebirgsmasse des Blockes zwischen den Kluffzonen einen hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert von größer als 10^{-8} m/s aufweist. Eine hohe Durchlässigkeit des Gebirges erfordert eine lokale Feinanpassung des Endlagers, wenn den Sicherheitsfaktoren entsprochen werden soll.

2.8 Schweiz

Nach Abschnitt 7.3 der schweizerischen **Endlagerrichtlinien** HSK- R-21 /HSK 93/ ist eine geeignete Standortwahl eine wesentliche Voraussetzung dafür, daß für ein geologisches Endlager die Sicherheit erreicht und der entsprechende Nachweis erbracht werden kann. Im einzelnen wird ausgeführt:

- Neben den Kriterien für die Langzeitsicherheit sind auch solche für die Sicherheit der Bau- und Betriebsphase sowie raumplanerische Aspekte zu berücksichtigen.
- Hinsichtlich der Langzeitsicherheit sind die Anforderungen an die Standort- und Wirtgesteinseigenschaften aus der Art der endzulagernden Abfälle abzuleiten.
- Im Hinblick auf den voraussagenden Sicherheitsnachweis sind räumlich und zeitlich gut prognostizierbare Verhältnisse zu bevorzugen.

Nach der schweizerischen **Sicherheitsstudie** zur Standortwahl /NAG 93/ werden bei der Standortbeurteilung Kriterien der Langzeitsicherheit, der technischen Machbarkeit, des Umweltschutzes und der Raumplanung angewandt. Die Einzelkriterien werden dabei wie folgt zusammengefaßt:

(1) Geometrie des Wirtsgesteins

Das Raumangebot an Wirtsgestein muß für die Erstellung des Endlagers ausreichend sein. Zusätzlich sollte genügend Raumreserve vorhanden sein, um möglichen – erst beim Stollenvortrieb erkannten – einschränkenden Gesteinsstrukturen durch geeignete Anlage der Endlagerkavernen ausweichen zu können.

(2) Hydrogeologische Situation

Darunter wird insbesondere die Wasserdurchlässigkeit des Wirtsgesteins und möglicher Störungszonen, hydraulische Gradienten und die Länge und Verteilung der Wasserfließwege verstanden. Dieses Kriterium ist besonders wichtig, weil radioaktive Stoffe aus dem Endlager in die Biosphäre nur gelangen können, wenn sie im Grundwasser gelöst und mit diesem transportiert werden.

(3) Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit

Wesentlich ist die Vermeidung einer Freilegung des Endlagers in ferner Zukunft durch Erosion (z.B. durch Gletscher) der schützenden Gesteinsschichten.

(4) Menschliches Eindringen

Versehentliches Eindringen in die Endlagerzone durch künftige Generationen ist vor allem dann denkbar, wenn die Ausbeutung von Bodenschätzen den engeren Lagerbe-

reich tangieren würde oder wenn das Endlager im Bereich potentieller Transportwege (z.B. Tunnel) liegt.

(5) Spezielle Aspekte der Langzeitsicherheit

Jedes Wirtsgestein und jeder potentielle Standort weist Besonderheiten, vor allem der hydrogeologischen Situation auf, die unter diesem Kriterium behandelt werden.

(6) Gesamtbeurteilung der Langzeitsicherheit

Zusammenfassende Beurteilung der vorgenannten Punkte, d.h. ein Gesamturteil zur sicherheitsmäßigen Eignung des Standortes.

(7) Explorierbarkeit, Kenntnisstand

Standortspezifische Erkundungsmöglichkeiten des Wirtsgesteins für die Abklärung relevanter Sicherheitsfragen. Je besser der Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Standortwahl ist, um so kleiner wird das Risiko, daß bei der weiteren Abklärung durch den Stollenvortrieb und beim Endlagerbau unerwünschte Eigenschaften der Geosphäre vorgefunden werden.

(8) Referenzprojekte im Ausland

Möglichkeit, von ausländischen Erfahrungen beim Sicherheitsnachweis, bei der Standortwahl und beim Bau und Betrieb eines Endlagers zu profitieren. Diese ist um so besser, je mehr die geo- und hydrogeologische Situation der ausländischen Projekte der eigenen (hier: schweizerischen) ähnelt.

(9) Bautechnische Aspekte

Gesteinseigenschaften, welche die Erstellung des Endlagers beeinflussen, z.B. die Standfestigkeit des Gesteins und seine geochemischen Eigenschaften.

(10) Versiegelung der Zugänge

Wirtsgesteinsspezifische Möglichkeiten zum Verschuß und zur Versiegelung von Endlagerabschnitten und des Endlagerzugangs, mögliche wirtsgesteinsspezifische Beeinträchtigung der Versiegelungszonen.

(11) Standortbezogene technische Aspekte

Erschwerung oder Beeinträchtigung des Betriebs durch äußere Gefahren im Bereich der Portalzone durch Überschwemmungen, Lawinen etc.

(12) Erdbebenrisiko

Beurteilung der Auswirkungen von Erdbeben auf die Sicherheit des Endlagers. Zu beachten ist, daß unterirdische Bauten aus physikalischen Gründen durch Erdbeben kaum beansprucht werden, insbesondere wenn sie verfüllt sind (Fehlen von freischwingenden Massen).

(13) Verkehrserschließung, Transportaspekte

Entfernung von den Abfallerzeugern bzw. Zwischenlagern, Erschließung des Standorts durch Schiene und Straße, spezielle zufahrtsbedingte Probleme.

(14) Klimabedingte Behinderungen

Beurteilung von klimabedingten Erschwernissen und Hindernissen für den Bau und Betrieb des Endlagers, zum Beispiel durch Schneefall in topographisch höheren Lagen.

(15) Kollision mit anderen Nutzungen

Beeinträchtigung spezieller Nutzungen, insbesondere des Abbaus von Bodenschätzen, Beeinträchtigung der Erholungsfunktion der unmittelbaren Umgebung durch den Hauptzugang und oberirdische Lageranlagen.

(16) Lufthygiene

Zusätzliche Luftschadstoffemissionen während der Bau- und Betriebsphase, insbesondere Beeinträchtigung von Wohngebieten etc.

(17) Lärm

Beurteilung der zusätzlichen Lärmbelastung während Bau- und Betrieb des Endlagers, standortspezifische Möglichkeiten zur Lärmvermeidung.

(18) Grundwasser

Beurteilung möglicher Veränderungen von Qualität und Quantität des Grundwassers in der Bauphase. Der notwendige Aufwand für Schutzmaßnahmen kann standortabhängig sein.

(19) Oberflächenwasser

Es gelten dieselben Bemerkungen wie zum Grundwasser.

(20) Boden, Land- und Forstwirtschaft

Verlust an nutzbarem Boden, Beeinträchtigung der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung, notwendige Rodungen.

(21) Fauna, Flora

Wirkung der Anlage auf Lebensräume von Tieren und auf Artenreichtum und Artenhäufigkeit von Pflanzen, Jagdgebiete, Schutzgebiete, geschützte Arten.

(22) Landschaftsschutzgebiete, Landschaftsbild, Siedlungsbild

Beurteilung der Auswirkungen des Portalstandorts auf die Landschaft und das Siedlungsbild, unter Berücksichtigung der Schutzgebiete und Schutzinventare.

(23) Raumplanung

Die Kompatibilität mit der Raumplanung ist ein nur wenig standortabhängiges Kriterium. Da alle Portalstandorte außerhalb von Industriebauzonen liegen, muß für den Portalbereich in jedem Fall eine Spezialzone geschaffen werden.

2.9 USA

In den USA hat man verschiedene Gesteine für ein nationales Endlager für hochradioaktive Abfälle (HLW) in Betracht gezogen und dafür jeweils umfangreiche generische und standortbezogene Untersuchungen vorgenommen. Im Jahr 1987 bestimmte allerdings der amerikanische Kongreß durch den Nuclear Waste Policy Admendments Act,

daß eine Eignungsuntersuchung als zukünftiges HLW - Endlager einzig am Tuff-Standort Yucca Mountain durchzuführen sei.

2.9.1 EPA-Richtlinien 40 CFR 191

Um die Zuverlässigkeit in der Langzeitsicherheit eines Endlagers zu vergrößern, sollen nach den Festlegungen der amerikanischen Umweltbehörde EPA in 40 CFR 191 /EPA 99/ u.a. Standorte mit Rohstoff- und Trinkwasserquellen gemieden werden; im einzelnen wird hierzu bestimmt:

Standorte, an denen bergbaulicher Mineralabbau erfolgte, für die eine begründete Erwartung für eine Ausbeutung von seltenen oder leicht zugänglichen Rohstoffen besteht oder an denen eine signifikante Konzentration von einem Rohstoff vorliegt, der nicht häufig aus anderen Quellen erhältlich ist, sollen bei der Standortwahl für ein Endlager gemieden werden.

Rohstoffe, die berücksichtigt werden sollten, schließen alle Mineralien, Rohöl und Naturgas, wertvolle geologische Formationen und solches Grundwasser ein, welches entweder unersetzlich ist, weil keine vernünftige alternative Trinkwasserquelle für eine tatsächlich vorhandene Bevölkerung existiert, oder welches für den Erhalt eines einzigartigen und sensiblen Ökosystems lebenswichtig ist.

Solche Standorte sollten nicht für die Abfallendlagerung entsprechend dieses Regelteils genutzt werden, es sei denn, daß die Vorteile günstiger Standorteigenschaften den Nachteil eines größeren Risikos der zukünftigen Zerstörung übertreffen.

2.9.2 Die NRC-Richtlinien 10 CFR 60

Die Standortkriterien in § 60.122 der NRC - Richtlinien /NRC 00/ beziehen sich im wesentlichen auf die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen am Standort (s. Anhang (2)). Sie unterscheiden zwischen günstigen Bedingungen, die im geologischen Gesamtsystem möglichst gegeben sein sollten, sowie potentiell nachteiligen Bedingungen, die möglichst nicht vorhanden sein sollten. In Zusammenhang mit den technischen Barrieren kann im geologischen Gesamtsystem aber auch eine potentiell nachteilige Bedingung zulässig sein, wenn in Untersuchungen nachgewiesen wird, daß sie keinen signifikanten Einfluß auf die Sicherheit des Gesamtsystems Endlager hat.

1. Günstige Bedingungen

Als günstige Bedingungen, die im geologischen Gesamtsystem möglichst gegeben sein sollten, werden z. B. genannt:

(1) Art, Dauer und Intensität der quartären tektonischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomorphologischen Prozesse (oder einer dieser Prozesse), die am Standort wirksam waren, sollten derart gewesen sein, daß - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall zu isolieren, nicht beeinträchtigt oder durch o.g. Prozesse sogar verbessert wird.

(2) Bei Lagerung in der gesättigten Zone sollten als hydrogeologische Bedingungen vorliegen:

i) Geringe horizontale und vertikale Permeabilität des Wirtsgesteins.

ii) Abwärtsgerichteter oder überwiegend horizontaler hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und den unmittelbar benachbarten hydrogeologischen Einheiten.

iii) Geringe vertikale Permeabilität und niedriger hydraulischer Gradient zwischen Wirtsgestein und den benachbarten hydrogeologischen Einheiten.

(3) Geochemische Bedingungen, welche

i) die Fällung oder Sorption der Radionuklide fördern,

ii) die Bildung von Partikeln, Kolloiden, anorganischen oder organischen Komplexen verhindern, welche die Mobilität der Radionuklide erhöhen oder

iii) den Transport von Radionukliden durch diese Partikel, Kolloide und Komplexe verhindern.

(4) Mineralparagenesen, die unter den thermischen Bedingungen der Einlagerung unverändert bleiben oder sich so ändern, daß sie die gleiche oder eine erhöhte Fähigkeit haben, die Ausbreitung der Radionuklide zu verhindern.

(5) Standortbedingungen, die Einlagerungstiefen von mindestens 300 m zulassen.

(6) Eine geringe Bevölkerungsdichte in der Umgebung und ein nach Verschuß kontrolliertes Gebiet, das fernab von Bevölkerungszentren liegt.

(7) Transportzeiten für das Grundwasser entlang des schnellsten Transportweges für Radionuklide von der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung, die vor der Einbringung der Abfälle deutlich 1 000 Jahre übersteigen.

2. Möglicherweise ungünstige Bedingungen

Es werden möglicherweise ungünstige Bedingungen angenommen, falls nachfolgende Gegebenheiten für das Kontrollgebiet nach Verschuß (bei Lagerung in gesättigter Zone) charakteristisch sind oder die Isolierung innerhalb des kontrollierten Gebietes beeinträchtigt wird:

(1) Ein Potential für ein Überfluten unterirdischer Anlagen, entweder als Ergebnis einer Veränderung des Wasserzuflusses im Bereich von Niederungen bzw. Gelände-Depressionen oder infolge des Versagens von bestehenden oder geplanten künstlichen Wasserrückhaltungen an der Oberfläche.

(2) Ein Potential für vorhersehbare menschliche Aktivität mit ungünstigen Auswirkungen auf den Grundwasserfluß, wie z.B. Grundwasserentnahme, extrem hohe Bewässerung, Einbringung von Flüssigkeiten unter die Erdoberfläche, Wasserspeicherung durch unterirdisches Einpumpen, militärische Aktivität oder Bau von großen oberirdischen Wasserrückhaltungen.

(3) Ein Potential für natürliche Ereignisse wie Erdbeben, Absenkungen oder vulkanische Aktivität in solchem Ausmaß, daß große Wasserzuströme entstehen könnten, die das regionale Grundwassersystem verändern und sich dadurch ungünstig auf die Funktion des geologischen Lagers auswirken.

(4) Strukturveränderungen, wie z.B. Hebungen, Senkungen, Faltungen oder Verwerfungen, die sich ungünstig auf das regionale Grundwassersystem auswirken könnten.

(5) Ein Potential für Veränderungen der hydrologischen Bedingungen, die den Radionuklidtransport in die erreichbare Umgebung beeinflussen würden, wie z.B. Änderungen im hydraulischen Gradienten, in der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von Wässern im geklüfteten Gebirgskörper, der Speicherkapazität, der hydraulischen Leit-

fähigkeit, Änderungen im natürlichen Nachfließen, dem potentiometrischen Niveau und Änderungen der Abflußstellen.

(6) Ein Potential für Veränderungen der hydrologischen Bedingungen aufgrund vorhersehbarer klimatischer Veränderungen.

(7) Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein, einschließlich chemischer Zusammensetzung, hoher Ionenstärke oder Eh-pH-Bereiche, welche die Löslichkeit oder chemische Reaktionsfähigkeit des technischen Barrierensystems erhöhen können.

(8) Geochemische Prozesse, die die Sorption der Radionuklide verringern, zu einer Verminderung der Gesteinsstabilität führen oder sich ungünstig auf das technische Barrierensystem auswirken.

(9) Nicht reduzierende Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein.

(10) Augenscheinliche Lösungsprozesse, z.B. infolge erhöhter Wasserzügigkeit im Bereich von Trümmergesteinen (Brekziengänge; „breccia pipes“), das Vorhandensein von Lösungshohlräumen oder Laugennestern.

(11) Strukturveränderungen wie z.B. Hebungen, Senkungen und Faltungen im Quartär.

(12) Erdbeben, die in der Vergangenheit stattgefunden haben und die, wenn sie sich wiederholen, erhebliche Auswirkungen auf den Standort haben könnten.

(13) Auf Korrelationen zwischen Erdbeben und tektonischen Prozessen und Eigenschaften basierende Anzeichen, daß sich entweder die Häufigkeit oder die Stärke von Erdbeben erhöhen könnten.

(14) Häufigere Erdbeben oder Erdbeben größerer Stärke als es für die Region, in der sich die geologische Struktur befindet, typisch ist.

(15) Nachweis von vulkanischer Aktivität seit Beginn des Quartärs.

(16) Nachweis extrem starker Erosion während des Quartärs.

(17) Auftreten von natürlichen Rohstoffen am Standort, bereits identifiziert oder als Vorkommen zu vermuten, derart, daß

- i) die wirtschaftliche Nutzung gegenwärtig oder in absehbarer Zukunft möglich ist, oder
- ii) solche Materialien einen größeren Brutto- oder Nettowert haben als im Durchschnitt in anderen Regionen ähnlicher Größe, die repräsentativ für die geologische Struktur sind.

(18) Untertage - Bergbau für Bodenschätze am Standort.

(19) Bohrungen zu anderen Zwecken am Standort.

(20) Gesteins- oder Grundwasserbedingungen, die aufwendige technische Maßnahmen bei der Auslegung oder Konstruktion der unterirdischen Anlage oder beim Verschuß von Bohrlöchern oder Schächten erfordern würden.

(21) Geomechanische Eigenschaften, die keine Konstruktion von unterirdischen Hohlräumen zulassen, die nach dem endgültigen Verschuß stabil bleiben würden.

2.9.3 Die DOE-Richtlinien 10 CFR 960

Das US Energieministerium (Department of Energy, DOE) hat spezielle technische Richtlinien für die Standortauswahl (s. Anhang (3)) herausgegeben /DOE 00/. Neben Eignungsvoraussetzungen werden dabei günstige und möglicherweise ungünstige Bedingungen, die z.T. über die Anforderungen von EPA und NRC hinausgehen, sowie Ausschlusskriterien formuliert.

1. Eignungsvoraussetzungen

Unter Bezugnahme auf die Anforderungen der EPA in 40 CFR 191 und die Bedingungen des CFR 10 Part 60 der NRC müssen folgende grundsätzliche Eignungsvoraussetzungen (qualifying conditions) in der Nachbetriebsphase vorliegen:

(1) Geohydrologie

Die gegenwärtige und zu erwartende geohydrologische Situation eines Standortes soll mit dem sicheren Einschluß und der Isolierung des Abfalls kompatibel sein.

(2) Geochemie

Die gegenwärtigen und zu erwartenden geochemischen Eigenschaften eines Standortes sollen mit dem sicheren Einschluß und der Isolierung des Abfalls unter Berücksichtigung möglicher chemischer Wechselwirkungen zwischen den Radionukliden, dem Wirtsgestein und den Grundwasserverhältnissen kompatibel sein.

(3) Gesteinseigenschaften

Die gegenwärtigen und zu erwartenden Eigenschaften des Einlagerungsbereichs und seiner erreichbaren Umgebung sollen geeignet sein, sich an die thermischen, mechanischen und durch Strahlung hervorgerufenen Beanspruchungen anzupassen, die bei Errichtung, Betrieb und Verschluß sowie den vorhersehbaren Wechselwirkungen zwischen den Abfällen, dem Wirtsgestein, dem Grundwasser und den technischen Barrieren erwartet werden.

(4) Klimaveränderungen

Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der die zukünftigen klimatischen Bedingungen und die Erosionsprozesse voraussichtlich zu keiner unzulässigen (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzung führen.

Zur Voraussage der wahrscheinlichen klimatischen Bedingungen in der Zukunft wird das DOE die globalen, regionalen und standortspezifischen klimatischen bzw. die tektonischen und geomorphologischen Bedingungen während des Quartärs betrachten.

(5) Erosion

Der Standort soll erlauben, die Untertage-Einrichtungen in einer solchen Tiefe zu platzieren, daß Erosionsprozesse, die sich auf der Oberfläche auswirken, voraussichtlich zu keiner unerlaubten (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzung führen.

Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit möglicherweise zerstörerischer Erosionsprozesse wird das DOE klimatische, tektonische, und geomorphologische Anzeichen von Erosionsraten und -abläufen der geologischen Struktur während des Quartärs betrachten.

(6) Lösungsprozesse

Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der subterrane Lösungsprozesse keine unerlaubte (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzung bewirken.

Zur Ermittlung wahrscheinlicher Lösungsprozesse innerhalb der geologischen Struktur am Standort wird das DOE die bestehenden Lösungsprozesse innerhalb der Struktur, die während des Quartärs entstanden sind, betrachten und auch charakteristische Lösungserscheinungen oder Lösungsmerkmale anderenorts, sofern als in Frage kommend identifiziert.

(7) Tektonik

Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der zukünftige tektonische Prozesse oder Ereignisse zu keinen unerlaubten (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzungen führen können.

Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von möglicherweise zerstörerischen tektonischen Prozessen oder Ereignissen wird das DOE die strukturellen, stratigraphischen, geophysikalischen und seismischen Anzeichen für Art, Umfang und Intensität tektonischer Prozesse und Ereignisse in der geologischen Struktur während des Quartärs betrachten.

(8) Menschliche Eingriffe

Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der Aktivitäten am Standort oder in seiner Umgebung durch zukünftige Generationen den Einschluß und die Isolierung des Abfalls wahrscheinlich nicht beeinträchtigen.

(9) Ressourcen

Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der nach aller Wahrscheinlichkeit keine Bodenschätze (einschließlich Grundwasser für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung) genutzt werden, so daß eine unzulässige (größer als von NRC und EPA zugelassene) Freisetzung von Radionukliden nicht zu erwarten ist.

(10) Besitz und Kontrolle

Der Standort soll in einer Gegend liegen, für das DOE Besitz, Rechte und Zugangskontrolle erhalten kann, die für potentielle oberirdische und unterirdische Aktivitäten erforderlich sind.

2. Günstige Bedingungen

(1) Geohydrologie

i) Transportzeiten für das Grundwasser entlang aller Transportwege für Radionuklide aus der gestörten Zone in die erreichbare Umgebung, die vor der Einbringung der Abfälle mehr als 10 000 Jahre betragen.

ii) Art, Dauer und Intensität der quartären hydrologischen Prozesse innerhalb der geologischen Struktur haben - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - auf die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall in den nächsten 100 000 Jahren zu isolieren, keinen Einfluß oder wenn, dann nur einen günstigen.

iii) Der Standort hat stratigraphische, strukturelle und hydrologische Eigenschaften derart, daß das hydrogeologische System leicht beschrieben und mit ausreichender Sicherheit modelliert werden kann.

iv) Bei der Endlagerung in der gesättigten Zone sollte mindestens eine der folgenden Bedingungen vor der Einbringung der Abfälle vorliegen:

- Niedrige hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgestein und der unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.
- Abwärtsgerichteter oder überwiegend horizontaler hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und den unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.
- Niedriger hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und zwischen Wirtsgestein und den unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.
- Hoch wirksame Porosität zusammen mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit im Gestein entlang der Wege, auf denen Radionuklide in die erreichbare Umgebung transportiert werden können.

(2) Geochemie

i) Art, Dauer und Intensität der quartären geochemischen Prozesse innerhalb der geologischen Struktur haben - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - auf die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall in den nächsten 100 000 Jahren zu isolieren, keinen Einfluß oder wenn, dann nur einen günstigen.

ii) Geochemische Bedingungen, welche

- die Fällung oder Diffusion in die Gesteinsmatrix und die Sorption von Radionukliden fördern,
- die Bildung und den Transport von Partikeln, Kolloiden, anorganischen oder organischen Komplexen verhindern oder
- die Mobilität der Radionuklide hemmen.

iii) Mineralparagenesen, die, wenn sie den erwarteten Endlagerbedingungen unterworfen sind, unverändert bleiben oder die Mineralparagenesen so verändern, daß sie die gleiche oder erhöhte Fähigkeit besitzen, den Radionuklidtransport zu verlangsamen.

iv) Eine Kombination der erwarteten geochemischen Bedingungen und der Fließgeschwindigkeit des Wassers im Wirtsgestein derart, daß innerhalb von 1 000 Jahren weniger als 0,001 Prozent des gesamten Aktivitätsinventars pro Jahr im Endlager gelöst wird.

v) Jede Kombination von geochemischen und physikalischen Verzögerungsprozessen, welche die vorausgesagte maximale gesamte Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung um einen Faktor 10 vermindert, im Vergleich mit der vorausgesagten Grundwasserlaufzeit ohne eine solche Verzögerung.

(3) Gesteinseigenschaften

i) Ein Wirtsgestein von ausreichender Mächtigkeit und seitlicher Ausdehnung, das genügend Flexibilität in der Wahl der Tiefe, der Konfiguration und der Lage des Endlagers zuläßt, um die Isolierung des Abfalls sicherzustellen.

ii) Ein Wirtsgestein mit hoher thermischer Leitfähigkeit, niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder geeignetem Formänderungsvermögen, um Brüche, induziert durch Bau, Betrieb und Verschluß des Endlagers oder durch Wechselwirkungen zwischen Abfall, Wirtsgestein, Grundwasser und technischen Barrieren, zu verschließen.

(4) Klimaveränderungen

i) Ein Oberflächenwassersystem mit erwarteten klimatischen Veränderungen in den nächsten 100 000 Jahren derart, daß die Isolierung des Abfalls nicht nachteilig beeinflusst wird.

ii) Eine geologische Situation, in der klimatische Veränderungen während des Quartärs wenig Wirkung auf das hydrologische System gehabt haben.

(5) Erosion

i) Standortbedingungen, die es erlauben, den Abfall in einer Tiefe von mindestens 300 Metern einzulagern.

ii) Eine geologische Situation, in der vergangene quartäre Erosionsprozesse mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-4} voraussichtlich in den nächsten 10 000 Jahren zu keiner Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung führen.

iii) Standortbedingungen, die ein Zutagetreten des Abfalls in den ersten eine Million Jahren nach Verschluß des Endlagers nicht erwarten lassen.

(6) Lösungsprozesse

Keine Anzeichen von Lösungsprozessen im Wirtsgestein während des Quartärs.

(7) Tektonik

Art, Dauer und Intensität von eruptiven Aktivitäten und tektonischen Prozessen (z.B. Hebungen, Senkungen, Faltungen oder Verwerfungen), die im Gesteinskörper während des Quartärs stattfanden, haben bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-4} in den ersten 10 000 Jahren nach Verschluß, eine Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung zu bewirken.

(8) Ressourcen

i) Keine bekannten Bodenschätze, die derzeit oder in absehbarer Zukunft von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind.

ii) Grundwasser, befrachtet mit 10 000 ppm oder mehr an gelösten Feststoffen, entlang aller möglichen Wege, auf denen Radionuklide aus dem Wirtsgestein in die erreichbare Umgebung gelangen können.

(10) Besitz und Kontrolle

Alle Nutzungsrechte an gegenwärtigem Eigentum und Verwaltung von Land sowie alle Rechte betreffs der Erdoberfläche und des Untergrundes liegen beim DOE.

3. Möglicherweise ungünstige Bedingungen:

(1) Geohydrologie

i) Erwartete Änderungen der hydrogeologischen Bedingungen, z.B. Änderungen im hydraulischen Gradienten, in der hydraulischen Leitfähigkeit, in der effektiven Porosität sowie im Grundwasserfluß durch das Wirtsgestein und seine es umgebende hydrogeologische Einheit, bewirken - im Vergleich zur ungestörten Standortsituation - einen signifikanten Anstieg in der Freisetzung der Radionuklide in die erreichbare Umgebung.

ii) Das Vorhandensein von Grundwasserentnahmestellen entlang der Grundwasserpfade im Wirtsgestein und seiner erreichbaren Umgebung, die unmittelbar zur landwirtschaftlichen Bewässerung oder zum menschlichen Verzehr geeignet sind.

iii) Das Vorhandensein von stratigraphischen oder strukturellen Merkmalen im geologischen System, wie z.B. Horste, Schwellen, Verwerfungen, Scherungszonen, Faltungen, Lösungserscheinungen oder Laugennester, die zu Schwierigkeiten bei der Charakterisierung oder Modellierung der geologischen Gesamtsituation führen.

(2) Geochemie

i) Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein, welche die Widerstandsfähigkeit des technischen Barrierensystems gegenüber Lösungsprozessen oder chemischer Reakti-

vität in einem solchen Ausmaß beeinflussen könnten, daß die erwartete Leistungsfähigkeit des Endlagers beeinträchtigt wird.

ii) Geochemische Prozesse oder Bedingungen, die die Sorption der Radionuklide vermindern oder die Festigkeit des Gesteins herabsetzen könnten.

iii) Oxidierende Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein vor der Einbringung der Abfälle.

(3) Gesteinseigenschaften

i) Gesteinsbedingungen, die technische Maßnahmen erfordern könnten, die über die nach Stand der Technik verfügbare Technologie für Bau, Betrieb und Verschuß des Endlagers hinausgehen, um den Einschluß und die Isolierung des Abfalls zu gewährleisten.

i) Ein Potential für Phänomene wie thermisch induzierte Brüche, Hydratation oder Dehydratation von Mineralbestandteilen, Laugenbewegung oder andere physikalische, chemische oder strahleninduzierte Effekte, die den Einschluß und die Isolierung des Abfalls beeinflussen könnten.

iii) Eine Kombination von geologischer Struktur und geochemischen sowie thermischen Eigenschaften und hydrologischen Bedingungen im Wirtsgestein und seiner erreichbaren Umgebung derart, daß die vom Abfall produzierte Wärme die Isolationsfähigkeit des Wirtsgesteins, verglichen mit der Standortsituation vor Einbringung der Abfälle, erheblich herabsetzen kann.

(4) Klimaveränderungen

i) Anhaltspunkte dafür, daß der Grundwasserspiegel in den nächsten 10 000 Jahren weit genug ansteigen könnte, um ein zuvor ungesättigtes Wirtsgestein mit unterirdischen Einrichtungen in einen wassergesättigten Zustand zu versetzen.

ii) Anhaltspunkte dafür, daß klimatische Veränderungen in den nächsten 10 000 Jahren Störungen im hydraulischen Gradienten, in der hydraulischen Leitfähigkeit, in der effektiven Porosität oder im Grundwasserfluß durch das Wirtsgestein und seine erreichbare Umgebung verursachen könnten, so daß diese Veränderungen zu einem wesentlichen Anstieg der Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung führen.

(5) Erosion

i) Eine geologische Situation mit extrem hoher Erosion im Quartär.

ii) Eine geologische Situation, in der Art, Dauer und Intensität der geomorphologischen Prozesse im Quartär die Fähigkeit des Lagers, den Abfall in den ersten 10 000 Jahren nach Verschuß zu isolieren, ungünstig beeinflussen könnten.

(6) Lösungsprozesse

i) Anzeichen von Lösungsprozessen im geologischen Gesamtsystem z.B. infolge erhöhter Wasserzügigkeit im Bereich von Trümmergesteinen (Brekziengänge; „breccia pipes“), das Vorhandensein von Lösungshohlräumen, signifikante Volumenverminderung des Wirtsgesteins oder der umgebenden Gesteinsfolgen oder struktureller Zusammenbruch, so daß eine hydraulische Verbindung entstehen könnte, die zu einem Verlust der Abfallisolierung führt.

(7) Tektonik

i) Anzeichen für aktive Faltungsvorgänge, für Verwerfungsprozesse, für Diapirismus, für Hebungen, Senkungen oder für andere tektonische Prozesse sowie für eine eruptive Aktivität im geologischen Gesamtsystem während des Quartärs.

ii) Historische Erdbeben im geologischen Gesamtsystem von solcher Magnitude und Intensität, daß sie, sollten sie erneut auftreten, den Einschluß und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigen könnten.

iii) Anzeichen, basierend auf Korrelationen zwischen Erdbeben und tektonischen Prozessen bzw. Bewegungen, daß entweder die Häufigkeit oder die Stärke der Erdbeben im geologischen Gesamtsystem zunehmen könnte.

iv) Häufigeres Auftreten von Erdbeben oder Erdbeben größerer Stärke als sie repräsentativ sind für die Region, in der sich das geologische Gesamtsystem befindet.

v) Ein Potential für natürliche Phänomene wie z.B. Erdrutsche, Senkungen oder vulkanische Aktivität von solchem Ausmaß, daß große oberflächliche Wasserrückhaltungen entstehen könnten, die eine Änderung des regionalen Grundwassersystems bewirken.

vi) Ein Potential für tektonische Deformationen, wie z.B. Hebungen, Senkungen, Verwerfungen oder Faltungen derart, daß das regionale Grundwassersystem ungünstig beeinflußt werden könnte.

(8) Ressourcen

Hinweise auf das Vorkommen natürlicher Rohstoffe am Standort, ob bereits identifiziert oder möglicherweise zu erwarten, derart, daß

- ein wirtschaftlicher Abbau in absehbarer Zukunft möglich ist, oder daß
- solche Materialien einen größeren Brutto-/Nettowert bzw. ein höheres wirtschaftliches Potential besitzen als im Durchschnitt in anderen Regionen ähnlicher Größe, die repräsentativ für die geologische Struktur sind.

ii) Anzeichen von Untertage-Bergbau oder Ressourcenabbau am Standort, wenn dadurch der Einschluß und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigt werden könnte.

iii) Anzeichen von Bohrungen am Standort zu anderen Zwecken als zur Bewertung des Endlagerstandorts bis zu Tiefen, die den Einschluß und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigen könnten.

iv) Anzeichen für ein ausgedehntes Vorkommen an natürlichen Materialien, die aus anderen Quellen nicht in dem Ausmaß zur Verfügung stehen.

v) Ein Potential für vorhersehbare menschlichen Aktivitäten, wie z. B. Grundwasserentnahme, extensive Bewässerung, Einbringung von Flüssigkeiten unter die Erdoberfläche, militärische Aktivitäten oder Bau von großen oberirdischen Wasserrückhaltungen, die Teile des Grundwassersystems ungünstig verändern könnten, welche wichtig für die Isolierung des Abfalls sind.

(9) Besitz und Kontrolle

Zu erwartende Landbesitz-Konflikte, die nicht durch freiwillige Verkaufsverhandlungen, einvernehmliche Übertragung des Besitzrechtes von Behörde zu Behörde oder durch staatliche Enteignungsprozesse gelöst werden können.

4. Ausschlußkriterien bezüglich der Nachverschlußphase

Nach DOE sollte ein Standort ausgeschlossen werden, wenn

(1) Geohydrologie

vor Einbringung der Abfälle eine Grundwasserlaufzeit aus der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung von weniger als 1 000 Jahren zu erwarten ist, entlang aller Wege für möglichen und signifikanten Radionuklidtransport.

(2) Erosion

die Standortbedingungen es nicht erlauben, alle unterirdischen Teile des Endlagers in mindestens 200 m Tiefe unterhalb der direkt darüber liegenden Erdoberfläche zu plazieren.

(3) Lösungsprozesse

es wahrscheinlich ist, daß während der ersten 10 000 Jahre nach Verschluß aktive Lösungsprozesse, abgeleitet aus der geologischen Vorgeschichte, zu einem Verlust der Abfallisolierung führen würden.

(4) Tektonik

basierend auf der geologischen Vorgeschichte während des Quartärs zu erwarten ist, daß Art, Dauer und Intensität von Faltungsvorgängen oder anderen Erdbewegungen im Untergrund so sind, daß wahrscheinlich ein Verlust der Abfallisolierung eintritt.

(5) Ressourcen

i) signifikante Wege zwischen der projektierten unterirdischen Anlage und der erreichbaren Umgebung durch frühere Erkundung, Bergbautätigkeit oder Abbau zum Zwecke der kommerziellen Nutzung am Standort geschaffen wurden, oder

ii) durch derzeitige oder in der Zukunft wahrscheinliche Aktivitäten ein unbeabsichtigter Verlust der Abfallisolierung erwartet werden könnte, und zwar infolge eines Abbaus von heutzutage als wertvoll geltenden natürlichen Mineralrohstoffen, die gegenwärtig außerhalb des Überwachungsbereiches gewonnen werden.

5. Ausschlußkriterien bezüglich der Vorverschußphase

Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn

(1) Bevölkerungsdichte

i) irgendeine oberirdische Anlage eines Endlagers in einer stark besiedelten Region liegen würde, oder

ii) irgendeine oberirdische Anlage eines Endlagers an eine Region mit einer Bevölkerung von nicht weniger als 1 000 Personen pro Quadratmeile gemäß der jüngsten U.S.-Volkzählung angrenzen würde, oder

iii) DOE kein Notfallschutzprogramm entwickeln könnte, das den Anforderungen der DOE Order 5500.3 (betreffe Notfallplanung für Kernkraftwerke und andere Anlagen) und verwandten Richtlinien oder den Kriterien für die Notfallplanung der NRC (10 CFR 60, Subpart I) entspricht.

(2) Installationen und Operation außerhalb des Standorts

nukleartechnische Anlagen oder Aktivitäten militärischer Art in seiner unmittelbaren Nachbarschaft zu erwarten sind, die unverträglich sind mit Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschuß oder Stilllegung eines Endlagers.

(3) Umweltqualität

i) während Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschluß oder Stilllegung eines Endlagers kein angemessener Schutz der Umwelt in der betroffenen Region bestehen oder keine Milderung von absehbaren Umweltschäden auf ein akzeptables Maß erreicht werden könnte, unter Berücksichtigung planmäßiger, technischer, sozialer, wirtschaftlicher Faktoren und Umwelteinflüsse.

ii) irgendein ein Teil des Überwachungsbereiches oder von Versorgungsanlagen des Endlagers innerhalb der Grenzen eines Teiles des Nationalparksystems oder anderer nationaler Schutzgebiete (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) liegen würden.

iii) unvereinbare Konflikte zwischen der Existenz des Überwachungsbereiches oder von Versorgungsanlagen des Endlagers mit der zuvor bestimmten Nutzung zur Erhaltung von Ressourcen eines Teiles des Nationalparksystems oder anderer nationaler Schutzgebiete (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) und den National Forest Lands sowie anderer ähnlich wichtiger staatlicher Schutzgebiete, die zur Zeit der Verordnung des Gesetzes zur Erhaltung von Ressourcen erklärt wurden, bestehen würden.

(4) Sozioökonomischen Auswirkungen

Errichtung, Betrieb oder Verschluß eines Endlagers die Qualität oder die Quantität von Wasser aus bedeutenden Hauptquellen oder Rückhaltungen außerhalb des Standortes, die gegenwärtig für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung geeignet sind, erheblich beeinträchtigen würden, und solche Eingriffe nicht durch angemessene Maßnahmen kompensiert oder gemildert werden können.

(5) Gesteinseigenschaften

die Gesteinseigenschaften derart sind, daß die Aktivitäten, die mit Errichtung, Betrieb oder Verschluß eines Endlagers einhergehen, voraussichtlich ein erhebliches Risiko für die Gesundheit und Sicherheit des Personals darstellen, unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Abmilderung durch Einsatz von herkömmlich verfügbarer Technologie.

(6) Hydrologie

es, basierend auf erwarteten Grundwasserbedingungen, wahrscheinlich ist, daß technische Maßnahmen, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen, zum Bau von Erkundungsschächten oder zur Errichtung, Betrieb oder Verschuß eines Endlagers benötigt werden.

(7) Tektonik

es, basierend auf erwarteter Art, Dauer und Intensität von Faltungsvorgängen oder anderen Bewegungen der Erdkruste, wahrscheinlich ist, daß technische Maßnahmen, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen, zur Erkundung benötigt werden.

2.10 Sonstige Länder (China, Großbritannien, Slowakei, Spanien)

1. China

In China /WIT 96/ werden als Grundsätze der Standortbewertung für die HLW - Endlagerung betrachtet, daß unter Berücksichtigung natürlicher und zivilisationsbedingter Einwirkungen die Langzeitsicherheit (100 000 Jahre) des Endlagers gewährleistet werden kann und daß der eingelagerte radioaktive Abfall davon abgehalten werden kann, in die Biosphäre einzudringen und menschlichen Lebewesen Schaden zuzufügen. Es werden insbesondere sozialpolitische und naturgegebene Faktoren bei der Standortbewertung berücksichtigt. Detaillierte und genaue technische Anforderungen und Grenzwerte wurden für die natürlichen Faktoren bisher jedoch noch nicht ausgearbeitet.

1. Als **soziale Gesichtspunkte** werden in Betracht gezogen:

- i) Die Verteilung der Nuklearindustrie in China.
- ii) Die Ressourcen an Fauna und Flora, die potentiellen Ressourcen an Mineralien.
- iii) Die Einstellung der Öffentlichkeit und der lokalen Behörden.
- iv) Die Anforderungen der nationalen Gesetze zum Umweltschutz.
- v) Die Durchführbarkeit von Konstruktion und Betrieb des Lagers.

2. Als **natürliche Faktoren** werden in Betracht gezogen:

i) Natürliche geographische Gegebenheiten, einschließlich der Topographie, des Klimas, der Hydrologie usw.

ii) Geologische Gegebenheiten, einschließlich der Stabilität der Erdkruste (Erdbeben, aktive Verwerfungen usw.).

iii) Gebirgsspannung und Wärmefluß im Gebirge, Art des Wirtsgesteins, hydrologische Verhältnisse und ingenieurwissenschaftliche Einschätzung der geologischen Situation.

2. Großbritannien

Anforderungen an die Standortauswahl sind in einer Veröffentlichung über die Endlagerung hochaktiver fester radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen /GRA 76/ enthalten, mit Schwerpunkt auf geologische Aspekte. Als wesentliche Punkte werden genannt:

(1) Bei der Standortauswahl sind bestehende technische Bauten wie Bergwerke und Dämme ebenso wie Bohrungen zu berücksichtigen.

(2) Innerhalb eines vorgeschlagenen Bereiches von 15 km um das Endlager sollen technische Aktivitäten ausgeschlossen werden, die Bodeninstabilitäten hervorrufen können (z. B. Bergbau, Tunnelbau, Bau großer Dämme, Explorationsbohrungen).

(3) Klimatische Auswirkungen im Bereich des Endlagergebietes sind bei der Standortauswahl zu berücksichtigen (z. B. durch Eiszeiten, Meeresspiegelveränderungen, isostatische Bewegungen).

(4) Gebiete mit potentiell nutzbaren Rohstofflagerstätten sollten nicht für die Endlagerung berücksichtigt werden.

(5) Das Wirtsgestein sollte für die Aufnahme eines Endlagers geeignete mineralogische und petrographische Eigenschaften, ausreichende Ausdehnung und eine ausreichende Tiefe und Mächtigkeit besitzen.

(6) Die thermische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins soll die Ableitung der Nachzerfallswärme der hochaktiven Abfälle sicherstellen.

(7) Die möglichen physikalisch-chemischen Reaktionen im Bereich der Einlagerungszone (Abfallprodukt - Abfallbehälter - Wirtsgestein) sollen nur zu minimaler Korrosion des Abfallbehälters führen.

(8) Das Wirtsgestein sollte günstige Rückhalteeigenschaften in Bezug auf migrierende Radionuklide besitzen.

(9) Die hydrogeologischen Verhältnisse sollten derart sein, daß Voraussagen über mögliche Freisetzungspfade von der Einlagerungszone zur Oberfläche sowie mögliche Transferzeiten gemacht werden können. Grundwasserzirkulationen sollten im Bereich des Endlagers vernachlässigbar gering sein und die Fließlinien nicht zu klüftigem Grundgebirge oder potentiell Aquifer führen.

(10) Die tektonischen Verhältnisse im Bereich des Endlagers sollten nicht zu hohen seismischen Aktivitäten führen.

3. Slowakei

In der Slowakei /WIT 96/ wurde der Prozeß der Standortfindung für ein LILW - Endlager in vier Schritte unterteilt.

- Im ersten Schritt werden ungeeignete Gebiete aufgrund bestimmter Ausschlußkriterien verworfen.
- Im zweiten Schritt werden die verbliebenen akzeptablen Gebiete entsprechend ihrer ländlichen Nutzung, möglicher Wasserreserven sowie seismischer und geologischer Kriterien weiter reduziert.
- Im dritten Schritt werden einige der dann noch verbliebenen bestgeeigneten möglichen Standorte aufgrund vergleichender Betrachtungen bezüglich Bevölkerung, wirtschaftlicher Möglichkeit, Transport, Ökologie und öffentlicher Akzeptanz beurteilt.
- Im abschließenden vierten Schritt erfolgt eine umfassende Untersuchung der nach Schritt drei noch verbliebenen geeignetsten Standorte durch nochmalige Anwendung der Kriterien der vorangegangenen Schritte und einem zusätzlichen Faktor bezüglich der korrosiven Eigenschaften des Bodens.

4. Spanien

Das in Spanien für den Strahlenschutz und die nukleare Sicherheit zuständige Gremium (CSN) veröffentlichte in 1985 nachfolgende Sicherheitskriterien für die Standortvorauswahl von Endlagern für radioaktive Abfälle /NEA 91/:

(1) Form und Größe des Wirtsgesteins sollten geeignet sein, dem Endlagerbereich und einer genügend großen Schutzzone um diesen Bereich Raum zu geben, um die Isolation des Abfalls sicherzustellen.

(2) Der Einlagerungsbereich soll in einem Gesteinskörper gelegen sein, dessen Gesteinseigenschaften und dessen Tiefe mit den Abfallkategorien und der Menge des zu lagernden Abfalls im Einklang stehen.

(3) Der Standort soll so gelegen sein, daß der Zustand der geologischen Formationen charakterisiert werden kann, um eine Identifikation und Auswahl der Bedingungen zu erlauben, die möglicherweise schädlich oder günstig für den Endlagerstandort und die Abfallisolierung sein können.

(4) Das Endlager sollte innerhalb einer tektonisch stabilen geologischen Formation gelegen sein, um für die notwendige Zeit die Schutzziele des Endlagers zu erfüllen; deshalb müssen aktive tektonische Strukturen und mögliche Verwerfungen gemieden werden.

(5) Das Endlager sollte in einer derartigen Zone gelegen sein, daß für alle Erdbewegungen bei möglichen Beben in dieser Zone gezeigt werden kann, daß sie keine unzulässigen Wirkungen auf die Abfallisolierung haben.

(6) Bei der Standortvorauswahl sollten Gebiete mit anomal hohem geothermischen Gradienten oder mit erkennbarer rezenter vulkanischer Aktivität gemieden werden.

(7) Die Eigenschaften des Standortes und seiner Umgebung sollten für die insgesamt günstig sein.

(8) Die geochemischen und physikochemischen Eigenschaften der geologischen Umgebung, in der der Standort gewählt wird, sollte so sein, daß die Mobilität des Nuklidtransports begrenzt wird.

(9) Die geotechnischen Eigenschaften der Standorte sollen die grundsätzlichen Endlagerziele nicht ungünstig beeinflussen. Geotechnische Stabilität soll unter Berücksichtigung gegenseitiger Beeinflussung von technischen Einrichtungen, radioaktiven Abfällen, Gebirge und möglichen Gebirgsbewegungen gewährleistet werden.

(10) Die Endlagereinrichtungen, sowohl oberflächennaher als auch tief gelegener Endlager, sollten nicht durch irgendeinen oberirdischen Prozeß oder ein Ereignis betroffen werden, die zu unzulässigen Auswirkungen auf die führen können.

(11) Der Standort soll vorwiegend in Gebieten mit geringer Bevölkerungsdichte gewählt werden, um

- städtische und industrielle Gebiete ebenso wie Erholungsgebiete und deren erwartetes Wachstum und zukünftige Entwicklung zu berücksichtigen
- zu erreichen, daß die besagten Gebiete den Schutzziele der Endlagerung nicht widersprechen.

(12) Der Standort sollte so gewählt werden, daß Gebiete mit derzeit natürlichen Rohstoffen gemieden werden, ebenso wie Gebiete mit vorhersehbarer zukünftigen Nutzen, deren Ausbeutung als Resultat einen ungünstigen Effekt auf die Abfallisolierung hätte. Die Notwendigkeit eines Endlagers an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit sollte mit dem Nutzen und Wert der Rohstoffe für jetzt und für die Zukunft abgewogen werden.

(13) Das Endlager sollte so gewählt werden, daß keine signifikanten ungünstigen Veränderungen der Umgebungsbedingungen verursacht werden.

3 Tabellarische Zusammenstellung der geowissenschaftlichen Anforderungen

In Kapitel 2 dieses Berichtes wurde der Status der - der GRS verfügbaren - internationalen Palette an Kriterien zur Auswahl und Bewertung von Endlagerstandorten aus Regelwerken und anderen Unterlagen dargestellt. Hierbei handelt es sich vor allem um geowissenschaftliche Kriterien. Neben konkret ausformulierten Anforderungen liegen häufig nur allgemeine Umschreibungen der Eigenschaften vor.

Die aus Regelwerken (wie z.B. Sicherheitskriterien, Richtlinien, Standards und dergleichen) entnommenen Anforderungen werden durch Kennzeichnung der entsprechenden Literaturquelle mit einem (*) hervorgehoben. Da nicht aus Rechtsnormen (wie z.B. Gesetze und Verordnungen) stammend, sind diese Anforderungen zwar rechtlich ebenso unverbindlich wie die aus den projektbezogenen Sicherheitsstudien, sie besitzen jedoch einen Beweiswert für den allgemein anerkannten technisch-wissenschaftlichen Kenntnisstand. Je stärker der Staat an der Regelerarbeitung beteiligt war (siehe USA), desto größer ist der Beweiswert dafür, daß dieser Stand von Wissenschaft und Technik auch tatsächlich wiedergegeben wurde.

Eine Besonderheit liegt bei den nordischen Ländern vor: hier haben die Strahlenschutzorganisationen der nordischen Länder Dänemark, Finnland, Island, Norwegen und Schweden die grundlegenden Sicherheitskriterien für die Endlagerung in einem sogenannten „Flagbook“ /SKI 93/ aufgestellt.

3.1 Günstige Standortbedingungen

Unter günstigen Standortbedingungen werden die Parameter verstanden, die aus geowissenschaftlicher Sicht als positiv für die Endlagerstandortwahl einzuschätzen sind. In den folgenden Tabellen werden die nur in den allgemeinen Umschreibungen implizit enthaltenen Anforderungen länder- bzw. organisationsspezifisch bevorzugt Stichworten zugeordnet, während die konkreten Anforderungen in ausformulierter, z.T. aber vereinfachter Form explizit aufgeführt werden. Die günstigen Standortbedingungen werden nach Themenbereichen zusammengefaßt.

Tabelle 3.1-1 : Geologie

Tabelle 3.1-2 : Wirtsgestein

Tabelle 3.1-3 : Hydrogeologie

Tabelle 3.1-4 : Geochemie

Tabelle 3.1-5 : Sonstige Eigenschaften

Tabelle 3.1-1: Geologie

Günstige Standortbedingung:	Organisation/Land
<p>Begrenzung der Radionuklidfreisetzung</p> <p>Die geologischen Verhältnisse an einem Endlagerstandort sollten insgesamt eine Ausbreitung von Radionukliden aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre über lange Zeiträume verhindern.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.1</p> <p>(1) Die geologische Beschaffenheit eines Endlagerstandortes soll für eine umfassende Charakterisierung zugänglich sein und sollte geometrische, physikalische und chemische Eigenschaften besitzen, die zusammengenommen den Radionuklidtransport vom Endlagerbereich in die Umgebung während der nötigen Zeitspanne verhindern.</p>	<p>IAEO /IAE 94/ (*)</p>
<p>2.4 (1)</p> <p>iii) Hinsichtlich der geologischen Eignung eines Standortes sind bei der Standortauswahl u.a. von Bedeutung: Topographie, Stabilität des Wirtsgesteins, Größe und Homogenität der Endlagerformation, Tiefe des Endlagers, Zerklüftung des Wirtsgesteins, Anfall und Beweglichkeit des Grundwassers, Vorhandensein von natürlichen Ressourcen.</p>	<p>Finnland /POS 99/</p>
<p>2.7.3 (2)</p> <p>xii) Es ist wünschenswert, daß die Matrixdiffusion und die Matrixporosität des Gesteins nicht viel niedriger liegen als die Wertebereiche, die im Sicherheitsreport SR 97 analysiert worden sind. Die Eindringtiefe der Matrixdiffusion sollte mindestens einen Zentimeter übersteigen.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>

Tabelle 3.1-1: Geologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung:	Organisation/Land
<p>Geodynamische Vorgänge</p> <p>Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2 (2)</p> <p>ii) Der Standort muß ein hohes Maß an Stabilität aufweisen: größere tektonische Bewegungen sollten nicht vor 10 000 Jahren erwartet werden (oder in diesem Zeitraum keine wesentlichen Phänomene auslösen).</p> <p>iii) Die Erdbebengefährdung sollte gering sein. Die mögliche seismische Aktivität sollte unter dem Wert 7 auf der Richterskala und somit unterhalb einer Intensität von 9 bis 10 auf der modifizierten MSK-Skala liegen.</p> <p>iv) Der Standort sollte weit genug von geothermischen Besonderheiten und anderen vulkanischen Erscheinungen entfernt sein (d.h. einige Dutzend Kilometer).</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.1</p> <p>(6) Der Standort eines Endlagerbergwerkes soll sich durch geringe tektonische Aktivität auszeichnen und von Bereichen starker tektonischer Aktivität so weit entfernt sein, daß die Integrität des Endlagers durch sie nicht gefährdet wird.</p>	<p>Deutschland /BMI 83/ (*)</p>
<p>2.3.2</p> <p>(3) Aus regionalgeologischer Sicht sollte das Endlager in einem annähernd homogenen und wenig gestörten Gesteinskomplex liegen.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.3.2 (4)</p> <p>i) Der Endlagerstandort sollte in einer geologisch stabilen Region außerhalb eines potentiell aktiven Störungsbereichs liegen. Dies setzt bei der Auswahl eine Betrachtung der regionalen tektonischen Aktivitäten während der paläogeographischen Entwicklung voraus und umfaßt sowohl die Bewertung von Faltungen, Tiefenbrüchen, Hebungen, Senkungen usw. als auch die Untersuchung des strukturellen Inventars wie z.B. Klüftung, Schieferung und Schichtung.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>

Tabelle 3.1-1: Geologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung:	Organisation/Land
<p>Geodynamische Vorgänge</p> <p>Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.7.1 (1)</p> <p>iii) Das Endlager sollte in Regionen mit geringer tektonischer und seismischer Aktivität liegen.</p>	<p>Schweden /SKI 93/ (*)</p>
<p>2.7.3 (2)</p> <p>xiv) Vorzugsweise sollte das Grundgebirge mit wenigen Gesteinsarten homogen und regelmäßig geklüftet sein; wobei eine geringe Variation bei der mineralischen Zusammensetzung, wie im Gneis, keinen Nachteil bedeutet.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.5.1.1 (1)</p> <p>i) Die Stabilität des Standorts muß so sein, daß eventuelle Änderungen der Ausgangsbedingungen infolge möglicher geodynamischer Einwirkungen (Eiszeiten, Erdbeben und neotektonische Bewegungen) hinsichtlich der Endlagersicherheit zulässig bleiben.</p> <p>ii) Insbesondere sollte die Stabilität (einschließlich einer begrenzten und vorhersehbaren Entwicklung) für einen Zeitraum von wenigstens 10 000 Jahren nachgewiesen werden.</p>	<p>Frankreich /RFS 91/ (*)</p>
<p>2.9.2.1</p> <p>(1) Art, Dauer und Intensität der quartären tektonischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomorphologischen Prozesse, die am Standort wirksam waren, sollten derart sein, daß - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall zu isolieren, nicht beeinträchtigt wird oder sich sogar durch o.g. Prozesse verbessert.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>
<p>2.9.3.2</p> <p>(7) Art, Dauer und Intensität von eruptiven Aktivitäten und tektonischen Prozessen (z.B. Hebungen, Senkungen, Faltungen oder Verwerfungen), die in der geologischen Gesamtsituation während des Quartärs stattfanden, haben bei Fortsetzung in die Zukunft eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-4} in den ersten 10 000 Jahren nach Verschuß, um zu einer Radionuklidfreisetzung in die Umgebung zu führen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-1: Geologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung:	Organisation/Land
<p>Geodynamische Vorgänge</p> <p>Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.6.3</p> <p>iii) Der Standort sollte in einem Gebiet liegen, das nicht von rezenter seismischer Aktivität betroffen ist und keine größeren strukturellen Kontaktzonen oder Verwerfungen aufweist.</p>	<p>Kanada /AEC 87/ (*)</p>

Tabelle 3.1-1: Geologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Erosion</p> <p>Die Tiefenlage des Endlagers muß so gewählt werden, daß die Integrität der geologischen Barriere nicht durch Erosionsprozesse an der Erdoberfläche beeinträchtigt wird.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2 (6)</p> <p>iii) Bei der Tiefe des Endlagers sollten Vorgänge der exogenen Dynamik wie die Erosion der oberflächennahen Gesteine, vor allem bei Sedimentformationen, berücksichtigt werden.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.2 (3)</p> <p>iii) Die Mindesteinlagerungstiefe muß so gewählt werden, daß die Wirkung der geologischen Barriere nicht durch Erosionsvorgänge beeinträchtigt werden kann.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.5.2.2 (3)</p> <p>i) Der Standort muß so gewählt sein, daß durch die Tiefenlage des Endlagers die geologische Barriere die Einschlußwirkung sicherstellt.</p> <p>ii) Durch Prozesse/Ereignisse wie Erosion (insbesondere infolge einer Eiszeit), Erdbeben oder durch menschliche Eingriffe in das Endlager darf die Einschlußwirkung der geologischen Barriere nicht verändert werden.</p>	<p>Frankreich /GOG 87/</p>
<p>2.9.3.1</p> <p>(5) Der Standort soll erlauben, die Untertage-Einrichtungen in einer solchen Tiefe zu plazieren, daß Erosionsprozesse, die sich auf der Oberfläche auswirken, voraussichtlich zu keiner unerlaubten (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzung führen. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit möglicherweise zerstörerischer Erosionsprozesse wird das DOE klimatische, tektonische und geomorphologische Anzeichen von Erosionsraten und -abläufen in der geologischen Struktur während des Quartärs in Betracht ziehen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-1: Geologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>klimate Auswirkungen</p> <p>Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der die zukünftigen klimatischen Bedingungen voraussichtlich die Integrität des Endlagerstandortes nicht beeinträchtigen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.10.1</p> <p>i) Um einen Endlagerstandort als geeignet ausweisen zu können, müssen natürlich-geographische, einschließlich topographische, klimate, hydrologische usw. Faktoren in Betracht gezogen werden.</p>	<p>China /WIT 96/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(3) Klimate Auswirkungen im Bereich des Endlagergebietes sind bei der Standortwahl zu berücksichtigen (z.B. durch Eiszeiten, Meeresspiegelveränderungen).</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>
<p>2.9.3.1</p> <p>(4) Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der die zukünftigen klimate Bedingungen und die Erosionsprozesse voraussichtlich zu keiner unzulässigen (größer als von NRC und EPA zugelassen) Radionuklidfreisetzung führen. Zur Voraussage der wahrscheinlichen klimate Bedingungen in der Zukunft wird das DOE die globalen, regionalen und standort-spezifischen klimate bzw. die tektonischen und geomorphologischen Bedingungen während des Quartärs in Betracht ziehen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>
<p>2.9.3.2 (4)</p> <p>i) Es bestehen günstige Voraussetzungen, wenn ein Oberflächen-wassersystem so gestaltet ist, daß die erwarteten klimate Veränderungen in den nächsten 100 000 Jahren die Isolierung des Abfalls nicht nachteilig beeinflussen.</p> <p>iii) Es bestehen günstige Voraussetzungen, wenn eine geologische Situation bestehen würde, in der klimate Veränderungen während des Quartärs wenig Wirkung auf das hydrologische System in der Einlagerungstiefe gehabt haben.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>geodynamische Vorgänge</p> <p>Eine ausreichende Stabilität der Wirtsformation gegenüber geodynamischen Einwirkungen (Eiszeiten, Erdbeben und neotektonische Bewegungen) muß gewährleistet sein.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.1</p> <p>(2) Das Wirtsgestein sollte nicht dazu neigen, durch zukünftige geodynamische Vorgänge (Klimaänderungen, Neotektonik, Seismizität, Vulkanismus, Diapirismus) in einem solchen Maße beeinflusst zu werden, daß diese das Einschlußvermögen des Endlageresamtsystems unzulässig beeinträchtigen können.</p>	<p>IAEO /IAE 94/ (*)</p>
<p>2.5.1.1 (1)</p> <p>i) Eine ausreichende Stabilität der Wirtsformation gegenüber geodynamischen Einwirkungen wie z. B. Eiszeiten, Erdbeben und neotektonische Bewegungen muß gegeben sein.</p>	<p>Frankreich /RFS 91/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Barrierefunktion</p> <p>Wirtsgestein, Nebengestein und Deckgebirge sollen die Funktion natürlicher Barrieren in einem Mehrbarrierensystem übernehmen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2</p> <p>(1) Wirtsgestein und geologische Formationen oberhalb eines unterirdischen Endlagers sollten die Funktion einer natürlichen Barriere in einem Mehrbarrierensystem übernehmen.</p> <p>Diese Barrieren können sich langfristig als der wirksamste Schutz gegen die Migration der eingelagerten Radionuklide erweisen.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3 (5)</p> <p>i/iii) Endlagerformation, Deckgebirge und Nebengestein müssen bei Radionuklidfreisetzungen aus dem Endlagerbergwerk dazu beitragen, unzulässige Radionuklid-Konzentrationen in der Biosphäre zu verhindern. Daher ist eine hohe Sorptionsfähigkeit für Radionuklide zur Erfüllung der Barrierefunktion von Endlagerformation, Deckgebirge und Nebengestein von Vorteil.</p>	<p>Deutschland /BMI 83/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Ausdehnung des Wirtsgesteins</p> <p>Form und Größe des Wirtsgesteins sollen geeignet sein, dem Endlagerbereich - sowie einer genügend großen Schutzzone um diesen Bereich - Raum zu geben und genügend Flexibilität hinsichtlich Konfiguration und Auslegung des Endlagers besitzen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2 (6)</p> <p>i) Die geeigneten Abmessungen des Wirtsgesteins hängen von der Endlageroption, dem zu entsorgenden Abfall, der Einlagerungskapazität und den geologischen Bedingungen ab.</p> <p>ii) Die Formation sollte ausreichend tief und groß genug sein, um eine wirksame Isolierung des Endlagers von der Biosphäre zu gewährleisten.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.2 (3)</p> <p>ii) Das Wirtsgestein muß eine ausreichende Mächtigkeit und lateral eine hinreichende Erstreckung aufweisen, um die Lokation und Konfiguration des Endlagers auch im Hinblick auf die Langzeitsicherheit flexibel zu gestalten.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(5) Das Wirtsgestein sollte eine für die Aufnahme eines Endlagers ausreichende Ausdehnung, Tiefe und Mächtigkeit besitzen.</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>
<p>2.6.2 (3)</p> <p>v) Die Ausdehnung des Wirtsgesteins sollte so groß sein, daß der Einlagerungsraum im tiefen Untergrund und ausreichend fern von geologischen Diskontinuitäten liegen kann.</p>	<p>Kanada /AEC 87/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Ausdehnung des Wirtsgesteins</p> <p>Form und Größe des Wirtsgesteins sollen geeignet sein, dem Endlagerbereich - sowie einer genügend großen Schutzzone um diesen Bereich - Raum zu geben und genügend Flexibilität hinsichtlich Konfiguration und Auslegung des Endlagers besitzen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.7.1 (2)</p> <p>Das Endlager sollte</p> <p>i) in einer ausreichenden Tiefe liegen, um die Abfallgebände vor äußeren Ereignissen und Prozessen zu schützen und menschliche Eingriffe zu erschweren,</p> <p>ii) in einer Gesteinsformation liegen, die groß genug ist, um den Endlagerbereich und eine Sicherheitszone unterzubringen.</p> <p>2.7.2 (1)</p> <p>ii) ausreichend große Wirtsgesteinsausdehnungen mit geringen Großklüften haben.</p>	<p>Schweden /SKI 93/ (*)</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>ii) Regionale Abscherzonen sollen vermieden werden. Es können jedoch sogenannte "tektonische Linsen" in den Nähe von regionalen plastischen Abscherzonen existieren, in denen das Grundgestein homogen und relativ unberührt ist.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.8</p> <p>(1) Das Raumangebot im Wirtsgestein muß für die Erstellung des Endlagers ausreichend sein. Zusätzlich sollte genügend Raumreserve vorhanden sein, um möglichen – erst beim Stollenvortrieb erkannten – einschränkenden Gesteinsstrukturen durch geeignete Anlage der Endlagerkavernen ausweichen zu können.</p>	<p>Schweiz /NAG 93/</p>
<p>2.10.4.</p> <p>(1) Form und Größe des Wirtsgesteins sollten geeignet sein, dem Endlagerbereich und einer genügend großen Schutzzone um diesen Bereich Raum zu geben, um die Isolation des Abfalls sicherzustellen.</p>	<p>Spanien /NEA 91/ (*)</p>
<p>2.9.3.2 (3)</p> <p>i) Ein Wirtsgestein sollte von ausreichender Dicke und seitlicher Ausdehnung sein, so daß genügend Flexibilität in der Wahl der Tiefe, der Konfiguration und der Lage des Endlagers besteht, um die Isolierung des Abfalls sicherzustellen.</p>	<p>USA DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Geomechanik</p> <p>Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften der geologischen Gegebenheiten sollen einen sicheren Bau, Betrieb und Verschluß eines Endlagers gewährleisten.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2 (5)</p> <p>ii) Das mechanische Verhalten des Gesteins sollte einen sicheren Betrieb des Endlagers ermöglichen und sicherstellen, daß eine angemessene Abdichtung der verschiedenen Lagerbereiche und -schächte erreicht werden kann.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.2 (6)</p> <p>i) Das Wirtsgestein muß möglichst homogen ausgebildet sein und Felseigenschaften besitzen, die für den Bau, Betrieb und Verschluß eines untertägigen Endlagers geeignet sind. Die mechanischen, insbesondere die thermomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen in großem Maße dessen Eignung als Endlagermedium.</p> <p>ii) Durch die Erstellung der unterirdischen Strecken darf die Wirkung der geologischen Barriere nicht wesentlich verschlechtert werden.</p> <p>iii) Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften müssen außerdem ein kontinuierliches Beschicken und Verfüllen der Hohlräume erlauben.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.5.2.2 (1)</p> <p>i) Die mechanischen Gesteinseigenschaften (Felsmechanik) bestimmen primär die Durchführbarkeit des Endlagers in einer bestimmten Gebirgseinheit und damit die Sicherheit des Endlagers sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachbetriebsphase. Die Konzeption, Errichtung und Ausgestaltung des Endlagers erlaubt daher keine schablonenhafte Vorgehensweise.</p> <p>ii) Durch die Wahl der Gebirgseinheit muß ausgeschlossen sein, daß es während der Betriebsphase des Endlagers, infolge von gebirgsmechanischen Bewegungen zu einem Ereignis kommt, das eine Sanierung des Endlagers erforderlich macht.</p>	<p>Frankreich /GOG 87/</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Geomechanik</p> <p>Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften der geologischen Gegebenheiten sollen einen sicheren Bau, Betrieb und Verschluß eines Endlagers gewährleisten.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>iv) Festigkeit, Kluftgeometrie und Anfangsbeanspruchungen des Gebirges dürfen nicht so geartet sein, daß sich innerhalb des Einlagerungsbereichs große Stabilitätsprobleme um Tunnel oder Einlagerungshohlräume herum ergeben können. Dies wird mittels einer geomechanischen Analyse geprüft, wobei die Tunnelgeometrie, die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des intakten Gesteins, die Geometrie des Kluftsystems sowie die anfänglichen Gesteinsbeanspruchungen in die Analyse eingehen müssen.</p> <p>2.7.3. (2)</p> <p>ii) Eine geringe Anzahl von kleineren lokal begrenzten Kluftzonen verbunden mit einer geringen Kluftdichte ist zu bevorzugen.</p> <p>iii) Es ist allgemein von Vorteil, wenn die anfänglichen Gebirgsbeanspruchungen in der geplanten Endlagertiefe nicht von jenen abweichen, die im schwedischen kristallinen Grundgebirge normalerweise vorkommen.</p> <p>iv) Das intakte Gestein sollte vorzugsweise Festigkeits- und Verformungseigenschaften aufweisen, die für schwedisches Grundgebirge normal sind, da die Erfahrung gezeigt hat, daß es möglich ist, Arbeiten in solchem Grundgebirge mit guten Ergebnissen durchzuführen.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Thermische Eigenschaften</p> <p>Das Wirtsgestein soll über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen. Die Integrität des Wirtsgesteins soll durch einen Wärmeeintrag aus dem Einlagerungsbereich nicht beeinträchtigt werden.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2 (5)</p> <p>i) Durch die physikalischen Eigenschaften des Gesteins und die geologischen Bedingungen sollte sichergestellt sein, daß die durch den Abfall produzierte Wärme angemessen verteilt wird, ohne die Einschließungseigenschaften der Formation zu beeinträchtigen oder eine unangemessene Erwärmung der darüberliegenden Gesteine/Sedimente und Wasserkörper zu bewirken. Dies bedeutet je nach Option eine Beschränkung des thermischen Inventars des Abfalls.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.2 (6)</p> <p>i) Die mechanischen und physikalischen, insbesondere die thermo-mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen in großem Maße dessen Eignung als Endlagermedium.</p> <p>iv) Die thermische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins soll die schadlose Ableitung der Nachzerfallswärme der radioaktiven Abfälle ermöglichen.</p> <p>Die maximal zulässige Gebirgstemperatur im geplanten Endlagerniveau sollte vor der Einlagerung auf etwa 55 °C begrenzt bleiben, da andernfalls der Aufwand für die Lüftungstechnik unverhältnismäßig hoch werden würde.</p> <p>v) Der vom Abfall produzierte und zur lokalen Gebirgstemperatur hinzukommende Wärmeeintrag darf selbst bei einem ungünstigen Zusammenwirken geomechanischer, hydrogeologischer und thermischer Eigenschaften des Wirtsgesteins dessen Isolationsfähigkeit nicht herabsetzen.</p> <p>vi) Thermisch induzierte Klüfte, Mineralumwandlungen oder physikalische Vorgänge, die zum Austritt von Radionukliden aus dem Endlagerbereich führen können, sollten ausgeschlossen sein.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(6) Die thermische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins soll die Ableitung der Nachzerfallswärme der hochaktiven Abfälle sicherstellen.</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Thermische Eigenschaften</p> <p>Das Wirtsgestein soll über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen. Die Integrität des Wirtsgesteins soll durch einen Wärmeeintrag aus dem Einlagerungsbereich nicht beeinträchtigt werden.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.7.1. (3)</p> <p>i) Der Temperaturanstieg infolge der Wärmeproduktion der Abfallgebirge sollte auf einem angemessen niedrigen Wert bleiben.</p>	<p>Schweden /SKI 93/ (*)</p>
<p>2.7.3 (2)</p> <p>v) Der Wärmeausdehnungskoeffizient sollte vorzugsweise für schwedisches Grundgebirge normale Werte aufweisen (d. h. innerhalb einer Bandbreite von 10^{-6} bis 10^{-5} K^{-1}) und sich zwischen den Gesteinsarten im Endlagerbereich nicht merklich unterscheiden.</p> <p>vi) Das Gestein sollte eine höhere Wärmeleitfähigkeit als $2,5 \text{ W/(m, K)}$ aufweisen. Geothermische Anomalien sollten gemieden werden. Die geogene Temperatur in beabsichtigten Endlagertiefe sollte weniger als 25 °C betragen.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.5.2.2 (5)</p> <p>i) Vom Wärmeverhalten des Wirtsgesteins hängt sehr entscheidend die thermomechanische Entwicklung des Endlagerstandortes ab, die über den Wärmeeintrag aus dem Abfall beeinflusst werden kann. Von daher ist der Einfluß des Wärmeeintrags auf die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins, in Abhängigkeit der Art des Abfalls und seiner Lagerung, mit Hilfe der gekoppelten Modellierung thermischer und mechanischer Vorgänge zu untersuchen.</p> <p>ii) Obgleich thermomechanische Prozesse gut bekannt sind, sollten für jede Gesteinsart während der Standorterkundung spezielle Untersuchungen durchgeführt werden, um entsprechende physikalische Gesteins/Gebirgsparameter zu ermitteln und ihren Einfluß auf bestimmte Phänomene zu bestimmen.</p> <p>iii) Die mineralogische Untersuchung des Wirtsgesteins, insbesondere auch die Mineralphasenveränderung unter Wärmeeinfluß sollte verstärkt untersucht und modelliert werden, wobei das Verhalten der Tonminerale besonders studiert werden sollte.</p>	<p>Frankreich /GOG 87/</p>

Tabelle 3.1-2: Wirtsgestein (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Thermische Eigenschaften</p> <p>Das Wirtsgestein soll über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen. Die Integrität des Wirtsgesteins soll durch einen Wärmeeintrag aus dem Einlagerungsbereich nicht beeinträchtigt werden.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.9.3.1</p> <p>(3) Die gegenwärtigen und zu erwartenden Eigenschaften des Wirtsgesteins und seiner Umgebung sollen geeignet sein, sich an die thermischen, mechanischen und durch Strahlung hervorgerufenen Beanspruchungen anzupassen, die bei Errichtung, Betrieb und Verschluß des Endlagers sowie bei den vorherrschenden Wechselwirkungen zwischen den Abfällen, dem Wirtsgestein, dem Grundwasser und den technischen Barrieren erwartet werden.</p> <p>2.9.3.2 (3)</p> <p>ii) Ein Wirtsgestein, sollte sich auszeichnen durch hohe thermische Leitfähigkeit, niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder geeignetes Formänderungsvermögen, um Wegsamkeiten, induziert durch Bau, Betrieb und Verschluß des Endlagers oder durch Interaktionen zwischen Abfall, Wirtsgestein, Grundwasser und technischen Barrieren, zu verschließen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-3: Hydrogeologie

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Geringe Grundwasserbewegung</p> <p>Der Endlagerstandort soll eine (vernachlässigbar) geringe Grundwasserbewegung innerhalb des Wirtsgesteins aufweisen und über lange Grundwasserfließzeiten von der Einlagerungszone bis in die Biosphäre verfügen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.3.2 (5)</p> <p>ii/iv) Das Wirtsgestein und die umgebenden Nebengesteine sollen eine geringe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers aufweisen.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.5.2.3</p> <p>(2) Es ist darauf zu achten, daß die Fließwege in der Geosphäre lang sind, um durch die Retardation den Nuklidtransport zu verzögern und die Möglichkeit der erhöhten Nuklidsorption an der Gesteins-/Mineraloberfläche zu nutzen.</p>	<p>Frankreich /GOG 87/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(9) Voraussagen über mögliche Freisetzungspfade von der Einlagerungszone zur Oberfläche sowie mögliche Transferzeiten sollten gemacht werden können. Grundwasserzirkulationen sollten im Bereich des Endlagers vernachlässigbar gering sein und die Fließlinien nicht zu klüftigem Grundgebirge oder potentiellem Aquifer führen.</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>
<p>2.7.1 (1)</p> <p>i) Der Standort sollte geringe Grundwasserbewegung innerhalb des Endlagers, lange Grundwasserfließzeiten von der Lagerzone zur Biosphäre und günstige Verdünnungseigenschaften aufweisen.</p>	<p>Schweden /SKI 93/ (*)</p>
<p>2.9.2.1</p> <p>(7) Transportzeiten für das Grundwasser entlang des schnellsten Transportweges für Radionuklide von der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung sollen vor Einbringung der Abfälle mehr als 10 000 Jahre betragen.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-3: Hydrogeologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Geringe Grundwasserbewegung</p> <p>Der Endlagerstandort soll eine (vernachlässigbar) geringe Grundwasserbewegung innerhalb des Wirtsgesteins aufweisen und über lange Grundwasserfließzeiten von der Einlagerungszone bis in die Biosphäre verfügen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.9.3.2 (1)</p> <p>i) Transportzeiten für das Grundwasser entlang des schnellsten Transportweges für Radionuklide von der Einlagerungszone in die erreichbare Umgebung sollen vor der Einbringung der Abfälle mehr als 10 000 Jahre betragen.</p> <p>2.9.3.2 (2)</p> <p>iv) Aufgrund der gegebenen Kombination von Grundwasser-Fließgeschwindigkeit im Wirtsgestein und den erwarteten geochemischen Vorgängen darf in den ersten 1 000 Jahren der Nachbetriebsphase jährlich nur weniger als 0,001 Prozent des vorhandenen Radionuklidinventars gelöst werden.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-3: Hydrogeologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Hydraulischer Gradient, niedrige hydraulische Leitfähigkeit</p> <p>Die hydrogeologische Situation eines Endlagerstandortes soll durch einen allseits niedrigen hydraulischen Gradienten und eine niedrige hydraulische Leitfähigkeit gekennzeichnet sein.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.3.2 (5)</p> <p>ii) Generell sollte das Wirtsgestein des Endlagers allseitig niedrige Gradienten des regionalen hydraulischen Drucks aufweisen.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.4 (2)</p> <p>iii) Eine geeignete hydrogeologische Situation liegt vor, wenn die Grundwasserzirkulation ausreichend gering ist. Die hydrogeologische Situation ist durch einen kleinen hydraulischen Gradienten und eine niedrige hydraulische Leitfähigkeit charakterisiert.</p>	<p>Finnland /POS 99/</p>
<p>2.7.3. (2)</p> <p>ix) Es ist von Vorteil, wenn der lokale hydraulische Gradient in Endlagertiefe niedriger ist als 1%, noch niedrigere Werte liefern keinen zusätzlichen Vorteil.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.9.2.1 (2)</p> <p>i) Es soll eine geringe vertikale Permeabilität und ein niedriger hydraulischer Gradient zwischen Wirtsgestein und den benachbarten hydrogeologischen Einheiten vorherrschen.</p> <p>ii) Es soll ein abwärtsgerichteter oder überwiegend horizontaler hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und den unmittelbar benachbarten hydrogeologischen Einheiten vorherrschen.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>
<p>2.9.3.2 (1)</p> <p>iv) Bei der Endlagerung in der gesättigten Zone soll mindestens eine der folgenden Bedingungen vor der Einbringung der Abfälle vorliegen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - niedrige hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins und der unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten; - hohe Gesteinsporosität zusammen mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit im Gestein. 	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-3: Hydrogeologie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Permeabilität/Durchlässigkeit</p> <p>Die hydrogeologischen Bedingungen sollen durch eine geringe Permeabilität der Wirtsformation gekennzeichnet sein.</p>	<p>Deutschland, Finnland, Frankreich, Kanada, Schweden, USA</p>
<p>2.5.1 (2)</p> <p>i) Die Hydrogeologie des Standortes muß sich durch eine sehr geringe Durchlässigkeit der Wirtsformation und geringe Grundwasserbewegungen auszeichnen.</p>	<p>Frankreich /RFS 91/ (*)</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>iii) Es muß möglich sein, das Endlager mit Rücksicht auf die Kluffzonen am Standort zu positionieren. Einlagerungstunnel und Einlagerungshohlräume für Behälter dürfen nicht durch größere regionale und lokale Kluffzonen hindurchführen oder zu nahe an ihnen positioniert werden. Einlagerungshohlräume dürfen identifizierte kleinere lokale Kluffzonen nicht kreuzen.</p> <p>2.7.3 (2)</p> <p>vii) Es ist von Vorteil, wenn ein großer Teil des Gebirges in der Einlagerungszone einen hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert (K) aufweist, der geringer ist als 10^{-8} m/s.</p> <p>viii) Kluffzonen, die während der Errichtung des Endlagers passiert werden müssen, sollten nur eine niedrige Durchlässigkeit aufweisen. Die Transmissivität (T) sollte unter 10^{-5} m²/s liegen. Darüber hinaus sollten sie aus bautechnischer Sicht nicht problematisch sein.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.9.2.1</p> <p>(2) Die hydrogeologischen Bedingungen in gesättigten Zonen sollen eine geringe horizontale und vertikale Permeabilität der Wirtsformation aufweisen.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>
<p>2.9.3.2 (1)</p> <p>iv) Bei Einbringung in der gesättigten Zone soll eine hohe Gesteinsporosität zusammen mit einer niedrigen hydraulischen Leitfähigkeit im Gestein entlang der Wege, auf denen Radionuklide in die Umgebung transportiert werden können, vorliegen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-4: Geochemie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Begrenzung der Radionuklidfreisetzung</p> <p>Die physikochemischen, geochemischen und hydrogeologischen Eigenschaften der geologischen Barrieren sollen eine Radionuklidfreisetzung aus dem Endlagerbereich in die Umgebung begrenzen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Schweden, Schweiz, USA</p>
<p>2.1</p> <p>(4) Die physikochemischen und geochemischen Eigenschaften der geologischen und hydrogeologischen Umgebung sollten dazu neigen, die Radionuklidfreisetzung aus dem Endlagerbereich in die erreichbare Umgebung zu begrenzen.</p>	<p>IAEO /IAE 94/ (*)</p>
<p>2.2</p> <p>(4) Die chemischen und geochemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sollten die Retention der möglicherweise aus dem Endlager freigesetzten Radioelemente begünstigen.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.7.3 (2)</p> <p>xi) Vorzugsweise sollte eine wesentliche Verzögerung von wichtigen Radionukliden in der Geosphäre stattfinden.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.9.3.2 (2)</p> <p>v) Günstig ist jede Kombination von geochemischen und physikalischen Verzögerungsprozessen, die die vorausgesagte maximale gesamte Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung im Vergleich mit der vorausgesagten Grundwasserlaufzeit ohne eine solche Verzögerung um einen Faktor 10 vermindert.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>
<p>2.9.2.1</p> <p>(4) Günstig sind Mineralparagenesen, die, wenn sie den erwarteten Endlagerbedingungen unterworfen sind, unverändert bleiben oder die Mineralparagenesen so verändern, daß sie die gleiche oder eine erhöhte Fähigkeit besitzen, den Radionuklidtransport zu verlangsamen.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-4: Geochemie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Hydro- bzw. geochemische Eigenschaften</p> <p>Die hydro- und geochemischen Bedingungen in der geologischen Struktur des Endlagerstandortes sollen freigesetzte Radionuklide isolieren bzw. die Sorption von Radionukliden fördern sowie die Bildung und den Transport von organ./anorgan. Komplexen, Partikeln und Kolloiden verhindern.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Schweden, Schweiz, USA</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>v) Das unbeeinflusste Grundwasser in der Tiefe des Endlagers darf keinen gelösten Sauerstoff enthalten. Die Abwesenheit von Sauerstoff wird durch negatives Eh, das Auftreten von Fe (II) oder das Auftreten von Sulfid angezeigt.</p> <p>2.7.3.(2)</p> <p>x) Das unbeeinflusste Grundwasser in Endlagertiefe sollte einen pH-Wert im Bereich von 6-10, eine niedrige Konzentration von organischen Verbindungen ($[DOC] < 20 \text{ mg/l}$), eine niedrige Kolloidkonzentration (weniger als 0,5 mg/l), niedrige Ammoniumkonzentrationen, einen gewissen Kalzium- und Magnesiumgehalt ($[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] > 4 \text{ mg/l}$) sowie geringe Konzentrationen an Radon und Radium aufweisen.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.9.3.1</p> <p>(2) Unter Berücksichtigung möglicher chemischer Wechselwirkungen zwischen den Radionukliden, dem Wirtsgestein und den Grundwasserhältnissen sollen die gegenwärtigen und zu erwartenden hydrochemischen Eigenschaften eines Standortes einen sicheren Einschluß und die Isolierung des Abfalls ermöglichen.</p> <p>2.9.3.2 (2)</p> <p>i) Geochemische Prozesse innerhalb der geologischen Endlager-Struktur sollen auf die Fähigkeit, den Abfall in den nächsten 100 000 Jahren zu isolieren, keinen Einfluß haben (oder wenn, dann nur einen günstigen). Maßstab für eine Prognose in die Zukunft sind die geochemischen Bedingungen, die in der jüngeren Vergangenheit (seit Beginn des Quartärs) wirksam waren.</p> <p>iv) Die Kombination der erwarteten geochemischen Bedingungen und der Fließgeschwindigkeit des Wassers im Wirtsgestein sind derart, daß innerhalb von 1 000 Jahren weniger als 0,001 Prozent des gesamten Aktivitätsinventars im Endlager pro Jahr gelöst wird.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-4: Geochemie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Hydro- bzw. geochemische Eigenschaften</p> <p>Die hydro- und geochemischen Bedingungen in der geologischen Struktur des Endlagerstandortes sollen freigesetzte Radionuklide isolieren bzw. die Sorption von Radionukliden fördern sowie die Bildung und den Transport von organ./anorgan. Komplexen, Partikeln und Kolloiden verhindern.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Schweden, Schweiz, USA</p>
<p>2.9.2.1</p> <p>(3) Günstig im geologischen Gesamtsystem sind geochemische Bedingungen, welche</p> <p>i) die Fällung oder Sorption der Radionuklide fördern,</p> <p>ii) die Bildung von Partikeln, Kolloiden, anorganischen oder organischen Komplexen verhindern, oder</p> <p>iii) den Transport von Radionukliden durch diese Partikel, Kolloide und Komplexe verhindern.</p>	<p>USA /NRC 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-4: Geochemie (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Wechselwirkung mit technischen Barrieren</p> <p>Das geochemische Umfeld soll bewirken, daß eine geringe Auflösungsrate der Abfallmatrix und eine geringe Korrosionsrate des Behältermaterials sowie keine negativen Auswirkungen auf sonstige technische Barrieren erwartet werden kann.</p>	<p>Deutschland, Finnland, Schweden</p>
<p>2.3.1 (5)</p> <p>ii) Die physikalischen und die chemischen Eigenschaften der Gesteine sowie mögliche Mineralreaktionen unter Einfluß der Einlagerungsgebände sind zu berücksichtigen.</p>	<p>Deutschland /BMI 83/ (*)</p>
<p>2.4 (2)</p> <p>ii) Günstig ist ein geeignetes geochemisches Umfeld, in dem die technischen Barrieren ihre spezifischen Eigenschaften möglichst lange beibehalten. Das geochemische Umfeld ist durch Bedingungen wie Sauerstofffreiheit, niedriger Eh-Wert, pH-Wert nahe bei neutral und geringe Sulfidkonzentration charakterisiert. Der Salzgehalt des Grundwassers darf nicht zu groß sein (TDS-Wert unter 100 g/l).</p>	<p>Finnland /POS 99/</p>
<p>2.7.1 (1)</p> <p>ii) Günstig sind geochemische Eigenschaften, die eine geringe Korrosionsrate des Behältermaterials, eine geringe Zersetzungsrate der Abfallmatrix, eine geringe Löslichkeit und ein effektives Rückhaltevermögen für die freigesetzten radioaktiven Substanzen bewirken.</p>	<p>Schweden /SKI 93/ (*)</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>vi) Der Salzgehalt (<i>TDS = Total Dissolved Solids</i>, Summe der gelösten Feststoffe) des Grundwassers darf in der Tiefe des Endlagers 100 g/l nicht überschreiten.</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>

Tabelle 3.1-5: Sonstige Eigenschaften

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Menschliche Eingriffe</p> <p>Es soll ein Standort bevorzugt werden, der in der Vergangenheit keiner unzulässigen anthropogenen Veränderung unterworfen war und für den das Risiko menschlichen Eingreifens - auch für zukünftige Generationen - minimal ist.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.1</p> <p>(4) Die Standortwahl eines Endlagers sollte unter Berücksichtigung derzeitiger und möglicher zukünftiger menschlicher Aktivitäten am oder in der Nähe des Standortes erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit, daß solche Tätigkeiten das Isolationspotential des Endlagersystems beeinträchtigen und unzulässige Folgen haben können, sollte minimiert werden.</p>	<p>IAEO /IAE 94/ (*)</p>
<p>2.2 (7)</p> <p>ii) Generell sollte eine Formation und ein Standort bevorzugt werden, für die das Risiko des menschlichen Eingreifens minimal ist.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.2 (8)</p> <p>i) Die anthropogene Veränderung und Belastung eines Gebietes ist bei der Wahl eines geeigneten Endlagerstandortes von großer Bedeutung. Dazu gehören in erster Linie untertägiger Altbergbau, Stauhaltungen und infrastrukturelle Merkmale wie Bevölkerungsdichte, Straßen- und Eisenbahnnetz sowie Gebiete mit Rohstoffvorkommen und Vorkommen von Tiefbohrungen für andere Zwecke als für die Endlagerstandorterkundung.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(1) Bei der Standortauswahl sind bestehende technische Bauten wie Bergwerke und Dämme ebenso wie Bohrungen zu berücksichtigen.</p> <p>(2) Innerhalb eines vorgeschlagenen Bereiches von 15 km um das Endlager sollen technische Aktivitäten ausgeschlossen werden, die Bodeninstabilitäten hervorrufen können (z. B. Bergbau, Tunnelbau, Bau großer Dämme, Explorationsbohrungen).</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>
<p>2.9.3</p> <p>(8) Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der oder in deren Umgebung Aktivitäten zukünftiger Generationen den Einschluß und die Isolierung des Abfalls wahrscheinlich nicht beeinträchtigen.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

Tabelle 3.1-5: Sonstige Eigenschaften (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Rohstoffvorkommen/Bodenschätze</p> <p>Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.2</p> <p>(7) Die Endlagerformation sollte weit genug von Erz- oder Mineralvorkommen entfernt liegen, da diese möglicherweise später genutzt werden.</p>	<p>EU /KEG 92/ (*)</p>
<p>2.3.1</p> <p>(4) Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.</p>	<p>Deutschland /BMI 83/ (*)</p>
<p>2.3.2 (5)</p> <p>vii) Bei der Einrichtung des Endlagerstandortes sind die vom Gesetzgeber geforderten Entfernungen von Einzugsgebieten von Wasserfassungen und Quellen zu beachten.</p> <p>2.3.2 (8)</p> <p>ii) Um eine spätere Beeinflussung des Endlagers durch Explorationsarbeiten zu verhindern, muß sichergestellt sein, daß keine außergewöhnlichen Bodenschätze sowie Rohstoffvorkommen, die von nationalem Interesse sein könnten, und deren Ausbeutung in absehbarer Zeit möglich erscheint, in der Standortregion vorhanden sind. Dies trifft besonders auf Vorkommen von Rohstoffen zu, deren Wert den Durchschnittswert anderer, gleich großer Gebiete in ähnlich strukturierten Formationen übersteigt und gilt dabei gleichermaßen für regionale Grundwasservorräte.</p>	<p>Deutschland /BGR 94/</p>
<p>2.5.2</p> <p>(4) Der Standort muß so gewählt werden, daß Gebiete mit bekannten oder zu erwartenden außergewöhnlichen unterirdischen Bodenschätzen vermieden werden.</p>	<p>Frankreich /RFS 91/ (*)</p>
<p>2.5.2.2</p> <p>(4) Der Standort sollte nicht in Gesteinshorizonten liegen, in denen wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten vorkommen bzw. vermutet werden.</p>	<p>Frankreich /GOG 87/</p>

Tabelle 3.1-5: Sonstige Eigenschaften (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Rohstoffvorkommen/Bodenschätze</p> <p>Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.7.2 (1)</p> <p>i) Wichtig ist die Auswahl eines Wirtsgesteins, das für sonstige Nutzungen und Ressourcen von geringer Bedeutung ist.</p>	<p>Schweden /SKB 94/</p>
<p>2.7.3 (1)</p> <p>i) Das Wirtsgestein darf kein Erzpotalential aufweisen, d. h. es darf keine so wertvollen Minerale enthalten, die es rechtfertigen könnten, jene zukünftig in Hunderten von Metern Tiefe abzubauen.</p> <p>2.7.3 (2)</p> <p>i) Da es schwierig sein kann vorherzusagen, in welchem Ausmaß verschiedene Gesteine und Mineralstoffe zukünftig von Nutzen sein werden, ist das tiefe Endlager vorzugsweise in verbreitet auftretenden Gesteinsarten einzurichten.</p> <p>xiii) Gebiete, in denen eine biologische Vielfalt oder schützenswerte Arten bedroht sein könnten sowie andere Gebiete, die wichtige Wasserquellen, Nutzböden oder Ackerland darstellen oder darstellen können, sollten für die Errichtung von oberirdischen Anlagen eines Endlagers gemieden werden. (Gesetzlich geschützte Gebiete sind zu meiden.)</p>	<p>Schweden /SKB 00/</p>
<p>2.10.2</p> <p>(4) Gebiete mit potentiell nutzbaren Rohstofflagerstätten sollten nicht für die Endlagerung berücksichtigt werden.</p>	<p>Großbritannien /GRA 76/ (*)</p>
<p>2.6.3 (2)</p> <p>i) Das Endlager soll entfernt von vorhandenen Bergwerken, möglichen Lagerstätten und Explorationsgebieten liegen.</p> <p>2.6.2 (3)</p> <p>ii) Es soll eine geringe Wahrscheinlichkeit bestehen, daß das Wirtsgestein als Rohstoffquelle abgebaut wird.</p>	<p>Kanada /AEC 94/</p> <p>Kanada /AEC 87/ (*)</p>

Tabelle 3.1-5: Sonstige Eigenschaften (Fortsetzung)

Günstige Standortbedingung	Organisation/Land
<p>Rohstoffvorkommen/Bodenschätze</p> <p>Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.</p>	<p>IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA</p>
<p>2.10.4</p> <p>(12) Der Standort sollte so gewählt werden, daß Gebiete mit derzeit natürlichen Rohstoffen gemieden werden, ebenso wie Gebiete mit vorhersehbarem zukünftigen Nutzen, dessen Ausbeute einen ungünstigen Effekt auf die Abfallisolierung verursachen würde. Die Notwendigkeit eines Endlagers an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit sollte mit dem Nutzen und Wert der Rohstoffe für jetzt und für die Zukunft abgewogen werden.</p>	<p>Spanien /NEA 91/ (*)</p>
<p>2.9.1</p> <p>Standorte, an denen Mineralabbau erfolgte, wo eine begründete Erwartung für die Ausbeutung von seltenen/leicht zugänglichen Rohstoffen oder wo eine signifikante Konzentration eines Rohstoffs vorliegt, der nicht häufig aus anderen Quellen erhältlich ist, sollen bei der Standortwahl für ein Endlager gemieden werden.</p> <p>Solche Standorte sollten nicht für die Abfallendlagerung genutzt werden, es sei denn, daß die Vorteile günstiger Standorteigenschaften den Nachteil eines größeren Risikos der zukünftigen Zerstörung über treffen.</p>	<p>USA /EPA 99/ (*)</p>
<p>2.9.3.1</p> <p>(1) Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der Bodenschätze, einschließlich Grundwasser für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung aller Wahrscheinlichkeit nicht zu einem Anstieg von Aktivitäten führen, die eine unzulässige (größer als von NRC und EPA zugelassen) Freisetzung der Radionuklide bewirken.</p> <p>2.9.3.2 (9)</p> <p>i) Es liegen günstige Bedingungen vor, wenn keine bekannten Bodenschätze, die in absehbarer Zukunft von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind, vorhanden sind.</p>	<p>USA /DOE 00/ (*)</p>

3.2 Ungünstige Standortbedingungen

Unter ungünstigen Standortbedingungen werden die Kriterien genannt, die den Bau, Betrieb und Verschluß eines Endlagers einschränken könnten. Es sind nur die Bedingungen ausgewiesen worden, die sich nicht im Umkehrschluß aus den günstigen Standortbedingungen ergeben. Diese Bedingungen werden nach ihrer Herkunft zusammengefaßt.

Tabelle 3.2-1: USA /NRC 00/ (*)

Ungünstige Standortbedingung	
Kosten	2.9.2.2 (20) Gesteinseigenschaften oder Grundwasserbedingungen, die aufwendige technische Maßnahmen bei der Auslegung oder Konstruktion der unterirdischen Anlage oder beim Verschluß von Bohrlöchern oder Schächten erfordern würden.

Tabelle 3.2-2: USA /DOE 00/ (*)

Ungünstige Standortbedingung	
Machbarkeit	2.9.3.3 i) Gesteinseigenschaften, die technische Maßnahmen erfordern könnten, die über die nach dem Stand der Technik verfügbare Technologie für Bau, Betrieb und Verschluß des Endlagers hinausgehen .

3.3 Ausschlußkriterien

Unter Ausschlußkriterien werden alle Kriterien erfaßt, die als unvereinbar mit der Anlage eines Endlagerstandortes gelten. Diese ausschließenden Parameter werden ebenfalls nach ihrer Herkunft zusammengefaßt.

Tabelle 3.3-1: Deutschland /BGR 94/

Tabelle 3.3-2: Schweden /SKI 94, SKB 00/

Tabelle 3.3-3: USA /DOE 00/ (*)

Tabelle 3.3-1: Deutschland /BGR 94/

Ausschlußkriterium	
<p>Geogen bedingte Faktoren</p>	<p>2.3.3 (1)</p> <p>i) Tektonisch und seismisch aktive Zonen (Lineamente und Erdbebenzonen ab Zone 1 nach DIN 4149 (Intensitätsgrad $\geq 7^\circ$ der MSK-64-Skala)),</p> <p>ii) hohe Verwerfungsdichte,</p> <p>iii) starke und diskontinuierliche Vertikal- und Horizontalbewegungen,</p> <p>iv) intensiver vorhandener oder zu erwartender Magmatismus.</p>
<p>Geotechnisch-ingenieurgeologisch bedingte Faktoren</p>	<p>2.3.3 (2)</p> <p>i) Nicht ausreichende Größe des Kristallinkomplexes (ausgehend von der geforderten Fläche für den Bereich des eigentlichen Endlagers – Nahbereich mit 1 bis 2 km² - und der Lage von etwa 500 m Tiefe im Wirtsgestein sollte die Mindestfläche 10 km² und die Mindestbreite eines Einzelkomplexes 3 km betragen),</p> <p>ii) intensiver Bergbau, sowohl unter- als auch übertage, bei relativ kleinen Kristallinvorkommen sowie Vorbehaltsgebiete für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe,</p> <p>iii) Wechsel in den Gesteinseigenschaften verschiedener Kristallinarten, welche die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins negativ beeinflussen.</p>

Tabelle 3.3-2: Schweden /SKB 94, SKB 00/

Ausschlußkriterium	
<p>Geologie/</p> <p>Hydrogeologie</p>	<p>2.7.3 (3)</p> <p>iv) Hohes topographisches Gefälle.</p> <p>2.7.3 (3)</p> <p>vi) Hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert des Gebirges in der Einlagerungszone $> 10^{-8}$ m/s.</p> <p>2.7.2 (4)</p> <p>Mehrere engständige wasserführende Klüftzonen.</p> <p>2.7.3 (4)</p> <p>ii) Mindestabstand des Endlagers zu großen lokalen Klüftzonen 10 m, zu regionalen Klüftzonen 100 m.</p>
<p>Wirtsgestein</p>	<p>2.7.2 (4) / 2.7.3 (4) iii)</p> <p>Extreme gebirgsmechanische Eigenschaften.</p>
<p>Geochemie</p>	<p>2.7.2 (4)</p> <p>Extreme Grundwasserchemie wie z.B. oxidierende Verhältnisse.</p> <p>2.7.3 (4)</p> <p>v) Salzgehalt im Grundwasser < 100 g/l.</p>
<p>Sonstige Eigenschaften</p>	<p>2.7.2 (4) / 2.7.3 (4) i)</p> <p>Wirtschaftlich interessante Rohstoffvorkommen.</p>

Tabelle 3.3-3: USA /DOE 00/ (*)

Ausschlußkriterium	
Geohydrologie	<p>2.9.3.4</p> <p>(1) Es sind bereits vor Einlagerung der Abfälle Grundwasserlaufzeiten von weniger als 1 000 Jahren entlang aller möglichen Wege, auf denen Radionuklidtransport in nennenswertem Umfang vom Endlagerbereich bis in die erreichbare Umgebung stattfinden kann, zu erwarten.</p>
Erosion	<p>2.9.3.4</p> <p>(2) Die Standortbedingungen erlauben es nicht, alle Teile des Endlagers in mindestens 200 m Tiefe unterhalb der direkt darüber liegenden Erdoberfläche zu plazieren.</p>
Lösungsprozesse	<p>2.9.3.4</p> <p>(3) Es sind Lösungsprozesse während der ersten 10 000 Jahre nach Verschuß wahrscheinlich, die - wie man aus der geologischen Vorgeschichte ableiten kann - zu einem Verlust der Abfallisolierung führen.</p>
Tektonik	<p>2.9.3.4</p> <p>(4) Es ist aufgrund der geologischen Vorgeschichte des Standortes während des Quartärs zu erwarten, daß durch Art, Dauer und Intensität von Bewegungen der Erdkruste ein Verlust der Isolierung des Abfalls wahrscheinlich ist.</p> <p>2.9.3.5</p> <p>(7) Aufgrund der geologischen Standortbedingungen (Art, Dauer und Intensität von Bewegungen der Erdkruste) ist es erforderlich, schon bei der Erkundung technische Maßnahmen zu bedenken, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen.</p>
Ressourcen	<p>2.9.3.4 (5)</p> <p>i) Es ist aufgrund von Erkundungs- oder Bergbautätigkeit oder Abbau zum Zwecke einer kommerziellen Nutzung von Rohstoffen zu erwarten, daß signifikante Wege zwischen dem projektierten Endlager und der Umgebung geschaffen wurden.</p> <p>ii) Es ist ein unbeabsichtigter Verlust der Abfallisolierung durch gegenwärtigen und zukünftigen Abbau heute wertvoller natürlicher Mineralrohstoffe, die außerhalb des Überwachungsbereiches vorkommen, zu erwarten.</p>

Tabelle 3.3-3: USA /DOE OO/ (*) (Fortsetzung)

Ausschlußkriterium	
Bevölkerungsdichte	<p>2.9.3.5 (1)</p> <p>i) Eine stark besiedelte Region ist nicht für die Anlage (auch nicht für Teile einer Anlage) eines oberirdischen Endlagers vorzusehen.</p> <p>ii) Die Anlage (auch nicht Teile einer Anlage) eines oberirdischen Endlagers darf nicht an eine Region mit einer Bevölkerung von mehr als 1 000 Personen pro Quadratmeile gemäß der jüngsten U.S.-Volkszählung angrenzen.</p> <p>iii) DOE kann kein Notfallschutzprogramm entwickeln, das den Anforderungen der DOE Order 5500.3 (betreffe Notfallplanung für Kernkraftwerke und andere Anlagen) und verwandten Richtlinien oder den Kriterien für die Notfallplanung der NRC (10 CFR 60, Subpart I) entspricht.</p>
Installationen und Operation außerhalb des Standorts	<p>2.9.3.5</p> <p>(2) Es sind nukleartechnische Anlagen oder Aktivitäten militärischer Art in der unmittelbaren Nachbarschaft eines Endlagerstandortes zu erwarten, die unverträglich sind mit Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschluß oder Stilllegung eines Endlagers.</p>
Umweltqualität	<p>2.9.3.5 (3)</p> <p>i) Es besteht während Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschluß oder Stilllegung eines Endlagers kein angemessener Schutz der Umwelt in der betroffenen Region und es kann keine Milderung von absehbaren Umweltschäden auf ein akzeptables Maß bei Berücksichtigung planmäßiger, technischer, sozialer, wirtschaftlicher Faktoren und Umwelteinflüssen erreicht werden.</p> <p>ii) Ein Teil des Überwachungsbereiches oder der Endlager-Versorgungseinrichtungen würden partiell innerhalb der Grenzen eines Nationalparksystems oder anderer nationaler Schutzgebiete (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) liegen.</p> <p>iii) Es bestehen zur Zeit der Verordnung des Gesetzes zur Erhaltung von Ressourcen unvereinbare Konflikte zwischen dem Überwachungsbereich oder den Endlager-Versorgungseinrichtungen und der designierten Nutzung zur Erhaltung von Ressourcen eines Teiles des Nationalparksystems oder anderen nationalen Schutzgebieten (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) und den National Forest Lands sowie anderen ähnlich wichtigen staatlichen Schutzgebieten.</p>

Tabelle 3.3-3: USA /DOE OO/ (*) (Fortsetzung)

Ausschlußkriterium	
Sozioökonomische Auswirkungen	<p>2.9.3.5</p> <p>(4) Errichtung, Betrieb oder Verschuß eines Endlagers beeinträchtigen erheblich die Qualität oder die Quantität von Wasser aus Hauptentnahmestellen oder Rückhaltungen außerhalb des Standortes, die gegenwärtig für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung geeignet sind, und es besteht keine Möglichkeit, solche Beeinträchtigungen durch angemessene Maßnahmen zu kompensieren oder zu mildern.</p>
Gesteinseigenschaften	<p>2.9.3.5</p> <p>(5) Die Gesteinseigenschaften sind so beschaffen, daß Aktivitäten, die mit Errichtung, Betrieb oder Verschuß des Endlagers einhergehen, voraussichtlich ein erhebliches Risiko für die Gesundheit und Sicherheit des Personals darstellen. Die herkömmliche, verfügbare Technologie kann dieses Risiko nicht mindern.</p>
Hydrologie	<p>2.9.3.5</p> <p>(6) Aufgrund der erwarteten Grundwasserbedingungen ist es wahrscheinlich, daß technische Maßnahmen, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen, zum Bau von Erkundungsschächten oder zur Errichtung, Betrieb oder Verschuß des Endlagers benötigt werden.</p>

4 Zusammenfassung

Weltweit haben verschiedene Länder und auch ländervereinigende Organisationen Kriterien zur Bewertung, Auswahl und Identifizierung von Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle verfaßt.

Der nationale und internationale Status der Kriterienentwicklung der Länder bzw. Organisationen wie IAEQ, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China und USA ist in Regelwerken oder länderspezifischen Sicherheitsstudien, Regeln, Richt- und Leitlinien oder Übereinkünften veröffentlicht.

Wesentlich ist ein bestehender internationaler Konsens über die Kriterien, die bei der Wahl eines Endlagerstandortes von Bedeutung sind. Entsprechend sind die grundlegenden Anforderungen an langfristig sichere Endlagerstandorte für radioaktive Abfälle weitgehend kongruent.

So ist allen internationalen Ansätzen einer Standortauswahl und entsprechender Kriterienkataloge zur Findung und Bewertung von Standorten gemeinsam, die radioaktiven Abfälle für einen möglichst langen Zeitraum sicher von der Biosphäre zu isolieren. Es sollten Standorte identifiziert werden, die nach Stand von Wissenschaft und Technik diese Anforderungen zu erfüllen vermögen.

Bei Betrachtung der ausgewerteten Regelwerke, Sicherheitsstudien, Leitlinien und Empfehlungen ergeben sich übereinstimmende Anforderungen an die Geologie eines Standortes, an das Wirtsgestein als Endlagermedium im besonderen sowie an die Hydrogeologie und die Geochemie der zur Bewertung anstehenden geologischen Gesteinskomplexe. Sie sind in Tabelle 4-1 zusammengefaßt.

Es wird deutlich, daß es sowohl große Unterschiede in der Formulierung und im Detaillierungsgrad der Kriterien gibt als auch eine Anwendung bzw. Umsetzung der Anforderungen in unterschiedlicher Weise gegeben ist (vgl. Kapitel 5).

In den USA /EPA 99/ und - mit Einschränkung - auch in Frankreich /RFS 91/ sind sowohl genaue regulatorische Festlegungen für einen Standort niedergeschrieben als auch die weiteren Anforderungen übergeordnet formuliert.

In Frankreich gilt in den Grundsatzregeln als wesentliches Kriterium die Stabilität der Wirtsgesteinsformation, die für einen Zeitraum von wenigstens 10 000 Jahren nachzuweisen ist sowie als wichtiges Kriterium eine Einlagerungstiefe der Abfälle von mindestens 150 Metern bis 200 Metern unterhalb einer aus der geologischen Vergangenheit abgeleiteten Mindestmächtigkeit der oberflächennahen Gesteine, als Schutz vor Erosion, Erdbeben und menschlichen Einwirkungen. Grundlage für die französischen Festlegungen war eine Studie geologischer Sachverständiger /GOG 87/, die zwischen 1985 und 1987 erstellt wurde.

Zentrales Kriterium der US-Umweltbehörde /EPA 99/ ist der Langzeitsicherheitsnachweis, der für einen Zeitraum von 10 000 Jahren nach Verschuß des Endlagers zu erbringen ist.

Die Richtlinien der US-Genehmigungsbehörde /NRC 00/, welchen die EPA-Kriterien zu Grunde liegen, konkretisieren darüber hinaus als günstige Bedingungen eine Einlagerungstiefe von mindestens 300 Metern unter Geländeoberfläche und (vor Einbringung der Abfälle) Grundwasserlaufzeiten aus dem Bereich der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung von deutlich mehr als 1 000 Jahren. Als ungünstig werden alle tektonischen, seismischen, vulkanischen, klimatischen, hydrogeologisch-/geochemischen und erosiven Prozesse eingestuft, die die Integrität eines Endlagers in der Zukunft beeinträchtigen könnten. Maßstab sind entsprechende Prozesse, die seit Beginn des Quartärs (vor ca. 1,5 Mio. Jahren) stattgefunden haben.

Das US-Energieministerium hat als Betreiber spezielle technische Richtlinien herausgegeben /DOE 00/, in denen günstige und ungünstige Bedingungen formuliert sind, die über die Anforderungen von EPA und NRC weit hinausgehen. Die DOE-Kriterien stellen auch weltweit die konkretesten Anforderungen an einen Endlagerstandort und sind daher in Tabelle 4-2 nochmals gesondert zusammengefaßt. Die ungünstigen Standortbedingungen lassen sich im wesentlichen im Umkehrschluß aus den günstigen Standortbedingungen ableiten und beinhalten insofern kein Novum an Anforderungen.

Eine Ausnahme bildet die aus quartären Prozessen abgeleitete Annahme von Klimaänderungen, die in den nächsten 10 000 Jahren nach Verschuß eines Endlagers

erwarten läßt, daß ein steigender Grundwasserspiegel ein zuvor ungesättigtes Wirtsgestein in einen gesättigten Zustand versetzen könnte oder daß sich Änderungen im hydraulischen Gradienten, der hydraulischen Leitfähigkeit bzw. im Grundwasserfluß durch das Wirtsgestein ergeben könnten.

Zur Bestimmung von nicht betrachtungswürdigen Standorten sind harte Kriterien festgelegt, nach denen Standorte auszuschließen sind, die Grundwasserlaufzeiten aus dem Bereich der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung von weniger als 1 000 Jahren erwarten lassen, welche keine Einlagerung der Abfälle in mindestens 200 Meter unter Geländeoberfläche zulassen, welche innerhalb der ersten 10 000 Jahre nach Verschuß eines Endlagers Lösungsprozesse annehmen lassen, die zu einem Verlust der Abfallisolierung führen und bei welchen Art, Dauer und Intensität tektonischer, seismischer und vulkanischer Prozesse seit Beginn des Quartärs zukünftig einen Verlust der Abfallisolierung wahrscheinlich machen (vergl. Kapitel 5).

In Schweden wurden vom Betreiber (SKB) in Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde (SKI) ein konkretes Auswahlverfahren und entsprechende Sicherheitskriterien erarbeitet. Die dazu veröffentlichten Richtlinien /SKI 93/ gelten für die Nordischen Länder Dänemark, Finnland, Island, Norwegen und Schweden.

Obschon nicht rechtsverbindlich, sind in den SKI-Empfehlungen die Regeln verankert, nach denen ein Auswahlverfahren durchzuführen ist. Antragstellern steht die Möglichkeit offen, Anforderungen und Kriterien im Rahmen der SKI-Vorgaben mit Maßstäben zu belegen, die sich aus einer Einschätzung der jeweiligen Standortgegebenheiten ableiten lassen. Hier sind jedoch keine größeren Variabilitäten zu erwarten, da in der Regel Kristallingesteine, d.h. Granitformationen, betrachtet werden (Ausnahme: Island).

Die schweizerischen Endlagerrichtlinien /HSK 93/ lassen zu, einen Standort als geeignet einzustufen, wenn die übergeordneten Anforderungen als erfüllt nachgewiesen sind. Neben den Kriterien für die Langzeitsicherheit sind auch solche für die Sicherheit der Bau- und Betriebsphase sowie raumplanerische Aspekte zu berücksichtigen. Bezüglich der Langzeitsicherheit sind die Anforderungen an die Standort- und Wirtsgesteinseigenschaften aus der Art der endzulagernden Abfälle abzuleiten. Im Hinblick auf den voraussagenden Sicherheitsnachweis sind räumlich und zeitlich gut prognostizierbare Verhältnisse zu bevorzugen. Es gibt keine quantitativen oder qualitativen Kriterien.

In gleicher Weise übergeordnet formuliert sind die geowissenschaftlichen Vorgaben und Kriterien der Länder China, Kanada und Spanien.

Die Slowakei stellt ein vier stufiges Programm zur Vorgehensweise bei einer Standort-suche und –findung vor und nennt die im jeweiligen Verfahrensschritt zu berücksichtigenden geologischen, hydrogeologischen, ökologischen, bevölkerungs- und infrastrukturellen Parameter, die zu beachten sind, ohne dazu bemessende Kriterien vorzustellen.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der internationalen Anforderungen (IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA)

Standortbedingung	Anforderung
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Die geologischen Verhältnisse sollten insgesamt eine Ausbreitung von Radionukliden aus dem Endlagerbereich bis in die Biosphäre über lange Zeiträume verhindern. • Der Endlagerstandort soll in einer geologisch stabilen Region mit möglichst geringer tektonischer, vulkanischer und seismischer Aktivität liegen. • Die Tiefenlage des Endlagers muß einen Integritätsverlust der geologische Barriere durch Erosionsprozesse verhindern. • Zukünftige klimatische Bedingungen (z.B. Eiszeiten) sollen nicht die Integrität des Endlagerstandortes beeinträchtigen.
Wirtsgestein	<ul style="list-style-type: none"> • Die Wirtsformation soll gegenüber geodynamischen Einwirkungen (z.B. Erdbeben/neotektonische Bewegungen) stabil sein. • Wirtsgestein, Nebengestein und Deckgebirge sollen die Funktion natürlicher Barrieren in einem Mehrbarrieresystem übernehmen. • Form und Größe des Wirtsgesteins (inklusive einer Schutzzone) sollen genügend Flexibilität hinsichtlich Konfiguration und Auslegung des Endlagers besitzen. • Die gebirgs- und felsmechanischen Eigenschaften sollen einen sicheren Bau, Betrieb und Verschuß eines Endlagers ermöglichen. • Das Wirtsgestein soll über eine gute thermische Leitfähigkeit und einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verfügen.
Hydrogeologie	<ul style="list-style-type: none"> • Der Einlagerungsbereich soll sich durch eine geringe Grundwasserbewegung und das Nebengestein durch lange Grundwasserfließzeiten auszeichnen. • Die hydrogeologische Situation soll durch einen allseits niedrigen hydraulischen Gradienten und eine niedrige hydraulische Leitfähigkeit gekennzeichnet sein. • Die hydrogeologischen Bedingungen sollen durch eine geringe Permeabilität in der Wirtsformation gekennzeichnet sein.
Geochemie	<ul style="list-style-type: none"> • Die physikochemischen und geochemischen Eigenschaften der geologischen und hydrogeologischen Barrieren sollen eine Radionuklidfreisetzung begrenzen.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der internationalen Anforderungen (IAEO, EU, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Schweden, Schweiz, Spanien, China, USA) (Fortsetzung)

Standortbedingung	Anforderung
Geochemie	<ul style="list-style-type: none"> • Die hydro-/geochemischen Bedingungen sollen geeignet sein, Radionuklide zu isolieren, die Sorption von Radionukliden zu fördern sowie die Bildung und den Transport von organ./anorgan. Komplexen, Partikeln und Kolloiden zu verhindern. • Das geochemische Umfeld soll bewirken, daß eine geringe Auflösungsrate der Abfallmatrix und eine geringe Korrosionsrate des Behältermaterials sowie keine negativen Auswirkungen auf sonstige technische Barrieren erwartet werden kann.
Sonstige Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Es soll ein Standort bevorzugt werden, der in der Vergangenheit keiner anthropogenen Veränderung unterworfen war und für den das Risiko menschlichen Eingreifens – auch für zukünftige Generationen - minimal ist. • Bei der Auswahl des Standortes ist die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der DOE-Grenzwerte (/DOE 00/) (*)

Günstige Standortbedingung	Anforderung
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> • Art, Dauer und Intensität von quartären tektonischen, seismischen, oder eruptiven Prozessen beeinflussen mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} in den nächsten 100 000 Jahren die Abfallisolierung nicht. • Die Standortbedingungen lassen ein Zutagetreten des Abfalls in den ersten 1 Mio. Jahren nach Verschluss des Endlagers nicht erwarten.
Wirtsgestein	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsprozesse werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} in den nächsten 10 000 Jahren zu keiner Radionuklidfreisetzung aus dem Einlagerungsbereich in die erreichbare Umgebung führen.
Hydrogeologie	<ul style="list-style-type: none"> • Die Transportzeiten für Radionuklide aus dem Einlagerungsbereich in die erreichbare Umgebung betragen (vor Einbringung der Abfälle) mehr als 10 000 Jahre. • Art, Dauer und Intensität der quartären hydrologischen Prozesse beeinflussen die Abfallisolierung in den nächsten 100 000 Jahren nicht oder begünstigen diese positiv.
Geochemie	<ul style="list-style-type: none"> • Art, Dauer und Intensität der quartären geochemischen Prozesse beeinflussen die Abfallisolierung in den nächsten 100 000 Jahren nicht oder begünstigen diese positiv. • Das Zusammenwirken von geochemischen Bedingungen und der Fließgeschwindigkeit des Wassers im Wirtsgestein lassen innerhalb der nächsten 1 000 Jahre erwarten, daß weniger als 0,001 Prozent/Jahr des gesamten Aktivitätsinventars gelöst wird. • Das Retardationsvermögen verzögert die maximale vorausgesagte Radionuklidfreisetzung aus dem Einlagerungsbereich in die erreichbare Umgebung um einen Faktor 10 aufgrund der geochemischen und physikalischen Bedingungen. (Maßstab ist die vorausgesagte Grundwasserlaufzeit ohne eine solche Verzögerung). • Keine Anzeichen von Lösungsprozessen während des Quartärs.

5 Zum Status quo wichtiger internationaler Endlager-Projekte

In der praktischen Anwendung zeigen Suchverfahren und Kriterien zur Bestimmung von Endlagerstandorten für radioaktive Abfälle weltweit unterschiedliche Erfolge in Findung, Einrichtung und Akzeptanz.

So wurde beispielsweise in New Mexico Ende März 1999 die erste unterirdische Endlagerstätte (Waste Isolation Pilot Plant, WIPP) der USA für transurane Abfälle aus der Kernwaffenproduktion in Betrieb genommen worden. WIPP wurde in einem Salzstock des Delaware-Beckens in etwa 650 m Tiefe angelegt. Von der Entscheidung zum Bau in dieser Region bis zur heutigen Inbetriebnahme sind 25 Jahre vergangen.

Im Falle des WIPP-Endlagers haben sowohl das im Vergleich mehrerer Salzlagerstätten durchgeführte Suchverfahren nach geowissenschaftlichen Kriterien als auch das Einschalten einer Environmental Evaluation Group, wie letztlich auch das Zusammenspiel von politischen und rechtlichen Entscheidungen die Einrichtung des Endlagers ermöglicht.

Anders sieht es aus bei einer Lösung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle aus der US-Kernreaktorenergie-Industrie.

Die Wahl des Tuff-Standortes als vorgesehene Endlagerstätte für stark wärmeentwickelnde Abfälle (Einlagerungstiefe ca. 300 m unter Geländeoberfläche) in Yucca Mountain, Nevada, vor 13 Jahren ist heute umstritten. Die Entscheidung für Yucca Mountain traf der Amerikanische Kongreß 1987, welcher damit ein wissenschaftlich gesteuertes Vergleichs- und Untersuchungsprogramm unterschiedlicher Standorte beendete.

Aus geowissenschaftlicher Sicht steht derzeit vor allem zur Diskussion, eine Standortbewertung zukünftiger Risiken durch eventuell in die Tuff-Formation eindringende Wässer vorzunehmen.

Bei der Erkundung der geologischen Verhältnisse des Yucca Mountain Komplexes wurden Calcite entdeckt, die die Existenz von Wasser in diesem Bereich nachweisen. Warme Wässer zwischen 35 und 75 Grad Celsius haben zur Bildung der Calcite geführt. Zum einen können paläoklimatische Ursachen vorliegen, möglich ist aber auch,

daß vulkanische Tätigkeiten und tektonische Bewegungen das Eindringen der Wässer verursacht haben /BOT 99/.

Noch vor ca. 9 Jahren wurde der Standort als seit mehr als 8 Mio. Jahren trocken eingestuft. Heute vermuten US- und internationale Wissenschaftler ein Entstehungsalter risikoanzeigender Calcite von weniger als 1 Mio. Jahren, das Nevada Nuclear Waste Project Office geht sogar von einem Alter von nur ca. 100 000 Jahren aus.

Damit berühren die neuesten Erkenntnisse bezüglich der quartären Vorgeschichte des Yucca Mountain Komplexes zeitlich direkt die harten DOE-Anforderungen und Kriterien /DOE 00/ und stellen allein vor diesem Hintergrund die Einrichtung des Yucca Mountain-Standortes in Frage (vgl. Kapitel 4).

Im Falle des Yucca Mountain-Standortes wirkte offensichtlich die von außen gegebene und im Verfahren nicht vorgesehene politische Entscheidung einer gesellschaftlich tragfähigen Standortakzeptanz entgegen.

Darüber hinaus ergibt sich aus geowissenschaftlicher Sicht das Problem, eine potentielle Eignungsempfehlung authentisch und nachvollziehbar anhand der festgelegten Anforderungen und Kriterien darzulegen, - bzw. vice versa, das Ausklammern des Yucca Mountain-Standortes als mögliche Endlageroption entsprechend der vorgegebenen Kriterien bekannt zu geben.

In Frankreich wurde das Gesetz über die „Forschung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle Nr. 91-1382“ aus dem Jahr 1991 im Jahr 1992 durch die Einführung einer offiziellen Mitlereinrichtung /LOI 92/ dahingehend erweitert, daß sich Gemeinden als freiwillige Bewerber für die Einrichtung eines Untertagelabors melden können. Der durch diese Regel abgesteckte Rechtsrahmen gestattet es grundsätzlich, ein Untertagelabor später durch einen Parlamentsbeschluß zu einem Endlager zu erweitern.

Von der französischen Regierung wurde 1984 die ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) beauftragt, entsprechende Standorte für ein Untertagelabor zur Validierung der Endlagerung vorzuschlagen. Vorgesehen waren Optionen im Ton, im Granit, im Schiefer und im Salz.

Derzeit werden konkrete Untersuchungen zur Deponierung von stark wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in ca. 500 m unter Geländeoberfläche an einem Tonstandort in Lothringen bei Burre (Départements Meuse et Marne) durchgeführt. Ein weiterer zur Untersuchung geeigneter Standort ist noch vorzuschlagen.

Folgende Faktoren der Standortauswahl scheinen die Akzeptanz zur Errichtung eines Untertagelabors mit der Option zur Einrichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle begünstigt zu haben: Die gesetzliche Rahmgebung inklusive der Regelung des Freiwilligkeitsprinzips, die Gründung einer Mittlereinrichtung zwischen Implementor und allen übrigen Beteiligten, Interessensvertretungen und Gruppierungen, nachvollziehbare geowissenschaftliche Kriterien mit unterschiedlicher Wichtung (critères essentiels, critères importants, critères favorables). Trotz aller Bemühungen war das Verfahren für den Standort in einer Granitformation bisher nicht erfolgreich.

In Schweden betreibt die Swedish Nuclear Fuel and Waste Co. (SKB) seit 1988 ein Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle in Forsmark und ein Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle in Oskarshamn. Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ist ca. für das Jahr 2010 vorgesehen. Derzeit wird in Äspö ein Forschungslabor zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Granit unter dem Meeresspiegelniveau betrieben.

Folgende Faktoren der Standortauswahl scheinen die Akzeptanz zur Etablierung eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle begünstigt zu haben: Das Standortsuchverfahren ist auf öffentliche Akzeptanz ausgerichtet, Offenheit und Transparenz werden groß geschrieben. Von sechs Gemeinden, die sich freiwillig gemeldet haben, sind vier mit der Problematik der Atomenergie vertraut, da sie Standortträger von bestehenden Kernkraftwerken mit vorgegebenen Restlaufzeiten sind. Im Rahmen eines Beteiligungsverfahrens wird bei positivem Beschluß der betroffenen Kommune Geld aus staatlichen Fonds zur Finanzierung einer Endlagereinrichtung zur Verfügung gestellt.

Das finnische Entsorgungskonzept sieht vor, schwach- und mittelradioaktive Abfälle am Standort bestehender Kernkraftwerke endzulagern. So wurde eine oberflächennahe Anlage bei Olkiluoto 1992 und eine weitere bei Loviisa 1996 in Betrieb genommen. Für bestrahlte Brennelemente ist ein spezielles Lager in tiefen geologischen Formationen nach dem schwedischen Konzept geplant.

In Finnland wurde 1987 im Gesetz zur Kernenergie erlassen, daß der erste Schritt zur Einrichtung einer nuklearen Anlage, wozu auch ein Tiefenendlager für hochradioaktive Abfälle zählt, durch eine prinzipielle Entscheidung seitens der Regierung (Decision of Principle, DIP) erfolgt. Am Standort Olkiluoto wurde im Jahr 1999 der Genehmigungsbehörde gleichzeitig mit der Langzeitsicherheitsanalyse ein Antrag auf prinzipielle Entscheidung zur Genehmigung (DIP) einer Einrichtung einer Pilot-Anlage vorgelegt.

Im Falle einer positiven prinzipiellen Entscheidung durch die finnische Regierung beabsichtigt der Antragsteller, die Planung und Konstruktion einer Untertage-Pilotanlage am Standort Olkiluoto noch im Jahr 2000 durchzuführen.

Neben Olkiluoto konzentrieren sich Endlagervorhaben auf drei weitere Standorte, an denen Untersuchungen zur Realisierung einer Einrichtung durchgeführt werden könnten. Wie in Schweden beruht eine Beteiligung am Auswahlverfahren auf Freiwilligkeit; der betroffene Standort erhält finanzielle Unterstützung durch den Staat.

6 Schlußfolgerungen

Schlußfolgerungen mit Blick auf eine Standortfindung mittels Suchverfahren und Kriterien ergeben sich nicht allein aus der Zusammenstellung der international veröffentlichten Anforderungen und Kriterien zur Identifizierung eines Endlagerstandortes für radioaktive Abfälle, sondern auch aus der Betrachtung des Status quo einiger wichtiger internationaler Endlagerstandort-Projekte.

Aus der Zusammenstellung der internationalen Kriterien und der Kurzdarstellung einiger bestehender Endlagerstandort-Projekte läßt sich folgendes Fazit ziehen:

- Grundsätzlich besteht internationaler Konsens darüber, welche Kriterien bei der Wahl eines Endlagerstandortes von Bedeutung sind.
- Übergeordnet formulierte Kriterien lassen Spielräume in der Auslegung zu und begünstigen so die Identifikation eines potentiell geeigneten Standortes.
- In den meisten Ländern existieren keine konkreten Kriterien.

- Es ist den Antragstellern im Zusammenwirken mit der Genehmigungsbehörde überlassen, standortbezogene quantitative Kriterien vorzustellen.
- In den meisten Ländern ist ein Langzeitsicherheitsnachweis von mindestens 10 000 Jahren vorgegeben; die Anforderungen sind prognostisch nachweisbar zu erfüllen.
- Erforderlichenfalls ist eine Isolationswirkung bis in Zeiträume von bis zu 1 000 000 Jahren zu demonstrieren, d.h., die meisten Länder avisieren für hochradioaktive Abfälle eine Isolationswirkung von 1 000 000 Jahren als Langzeitsicherheitsziel.
- In den USA existieren quantifizierte harte Kriterien. Erkennbar am Standort Yucca Mountain stellt sich die Frage, wie konkret (im jeweiligen Verfahrensschritt) Kriterien sein müssen, um zu einer belastbaren nachvollziehbaren Entscheidung gelangen zu können.
- Konkrete Kriterien fordern die konsequente Anwendung heraus und können gegebenenfalls zum „Aus“ eines avisierten Standortes führen.
- Das Streben nach quantitativen und qualitativen Kriterien erhöht die nach außen wirksame Entscheidungsfindung und fördert entsprechend das öffentliche Vertrauen in ein „gerechtes“ Verfahren und Vorgehen.
- Es muß transparent dargestellt werden, mit welchem Informationsgehalt (im jeweiligen Verfahrensschritt) getroffene Entscheidungen gekoppelt sind.
- Informationsdefizite sind darzulegen oder umsetzbar aufzuarbeiten.
- Wesentlich ist eine Wichtung der Kriterien untereinander.
- Nicht geowissenschaftliche Aspekte müssen gleichgewichtig zu den geowissenschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden.
- Die Sicherheit eines Standortes muß vor dem Prinzip der Freiwilligkeit stehen.
- Eine positive sozioökonomische und infrastrukturelle Entwicklung einer betroffenen Region sollte bedacht werden.

- Die Sicherheit eines Standortes muß vor einer politischen Festlegung stehen (es dürfen keine nicht vorgesehenen politischen oder sonstigen Entscheidungen den Verfahrenfortgang unterbrechen).
- Gesetzliche Regelungen sind von Vorteil.

Aus den vorgestellten internationalen Kriterien ist für die Arbeiten des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte abzuleiten:

- Das Vorgehen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte wird durch den internationalen Vergleich bestärkt.
- Der vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte entwickelte Anforderungskatalog stimmt mit dem internationalen Stand übergeordnet formulierter Anforderungen überein.
- Der Arbeitskreis verfolgt den Ansatz, quantitative Kriterien zu entwickeln; dieser Ansatz geht über den internationalen Stand allgemein formulierter Kriterien hinaus.
- In Einzelfällen sind zusätzliche Kriterien aufzustellen, so z.B. bezüglich der Gasbildung.
- Es sollte der „günstigen geologischen Gesamtsituation“ (/BMU 00/) bezüglich ihres hydrogeologischen und hydrochemischen Zustands eine besonders hohe Bedeutung beigemessen werden.
- Es ist anzustreben, die internationalen Regelwerke und Richtlinien auf ihre umweltbezogenen Kriterien hin zu untersuchen und diese zusammenzustellen.
- Der Arbeitskreis wird einen Vorschlag zur Wichtung der einzelnen Kriterien erarbeiten.

7 Literaturverzeichnis

- /AEC 87/ Atomic Energy Control Board (AECB)
Regulatory Guide - Geological Considerations in Siting a Vault for Under-
ground Disposal of High - Level Radioactive Waste
AECB Regulatory Document R -72, 1987
- /AEC 94/ Atomic Energy of Canada Limited (AECL)
Davison et al.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Site screening
and site evaluation technology
Sicherheitsbericht AECL 10713, COG-93-3, June 1994
- /BGR 94/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Bräuer V. et al.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfä-
lle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und
Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen
BGR Hannover, November 1994
- /BMI 83/ Bundesminister des Innern (BMI)
Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Berg-
werk
Bundesanzeiger 35,3 (1983)
- /BMU 00/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Interner Zwi-
schenbericht
Stand: Juni 2000
- /BOT 99/ Botschaft der Bundesrepublik Deutschland
Forschung und Technologie in den USA, Jahresbericht 1998
Washington, 1999

- /DOE 82/ US Department of Energy (DOE)
National Plan for Siting High-Level Radioactive Waste Repositories and
Environmental Assessment
Public Draft, 1982
- /DOE 00/ US Department of Energy (DOE)
General Guidelines for the Recommendation of Sites for Nuclear Waste
Repositories, Final Siting Guidelines
10 CFR Part 960, Federal Register 2000
- /EPA 99/ US Environmental Protection Agency (EPA)
Environmental standards for management and disposal of spent nuclear
fuel, high-level and transuranic radioactive wastes, Final Rule
40 CFR Part 191, Federal Register 1999
- /EPS 87/ Environmental Protection Series (EPS)
Environmental codes of practice for steam electric power generation, Siting
phase
Report EPS 1/PG/2, Environment Canada, March 1987
- /EUR 96/ EURATOM
Richtlinie 96/29/Euratom des Rates der Europäischen Union vom 13. Mai
1996
ABl. Nr. L 159/1, 1996
- /GOG 87/ Goguel, J.
Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques:
Critères techniques de choix des sites, Ber. Minist. De L'Industrie des P. & T.
et du Tourisme
Rapport du groupe de travail présidé par le professeur Goguel, juin 1985 -
Mai 1987
- /GRA 76/ Gray D. et al.
Disposal of highly active, solid radioactive wastes into geological formations
- Relevant geological criteria for the United Kingdom
Report No. 76/12, Rep. Inst. Geol. Sci., 1976

- /HSK 93/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)
Richtlinie für schweizerische Kernanlagen R-21/d: Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
HSK, Villingen, 1993
- /IAE 89/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Guidance for Regulation of Underground Repositories for Disposal of Radioactive Wastes
Safety Series No. 96, Vienna 1989
- /IAE 89a/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes
Safety Series No. 99, Vienna 1989
- /IAE 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Siting of Geological Disposal Facilities
Safety Series No. 111-G-4.1, Vienna 1994
- /ICRP 85/ International Commission for Radiation Protection (ICRP)
Radiological Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste
ICRP - Veröffentlichung 46, 1985
- /KEG 80/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG)
Geological Confinement of Radioactive Waste within the European Community.- A catalogue of geological formations having suitable characteristics for the disposal of radioactive waste
EUR 6891, 1980
- /KEG 92/ Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG)
Endlagerung radioaktiver Abfälle, Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers
Serie „Euradwaste“ Nr.6, EUR 14598, 1992

- /LOI 92/ LOI n° 91 -1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1)
Journal officiell de la République française, 1er janvier 1992, pp 10-12
- /NAG 93/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)
Endlager für kurzlebige Abfälle, Vorbericht zur Standortwahl
Technischer Bericht 93 - 15, Juni 1993
- /NEA 77/ Nuclear Energy Agency (NEA)
Objectives, concepts and strategies for the management of radioactive waste arising from nuclear power programmes
NEA/OECD, Paris 1977
- /NEA 91/ Nuclear Energy Agency (NEA)
Disposal of High-Level Radioactive Wastes, Radiation Protection and Safety Criteria - Proceedings of an NEA Workshop Nov.91
NEA/OECD, Paris 1991
- /NRC 00/ US Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories
10 CFR Part 60, Federal Register 2000
- /PAG 88/ Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS)
EU-Reports 11775 - 11779 , 1988
- /POS 99/ Posiva Oy
The final disposal facility for spent nuclear fuel: Environmental impact assessment report
Helsinki, May 1999
- /RFS 91/ Règle Fondamentale de Sûreté (RFS)
Stockage définitive de déchets radioactifs en formation géologique profonde.
Rule No.III.2.f,1991

- /SKB 94/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
RD & D Programme 92 Supplement. Treatment and final disposal of nuclear waste. Supplement to 1992 programme in response to the Government decision of December 16, 1993
Stockholm, August 1994
- /SKB 00/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)
What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation
Technical Report TR-00-12
Stockholm, April 2000
- /SKI 93/ Statens Kärnkraftinspektion (SKI)
The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden: Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic Criteria
Stockholm 1993
- /WIT 96/ Witherspoon, P.A.
Geological Problems in Radioactive Waste Isolation, Second Worldwide Review, Earth Sciences Division
Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California USA 94720, Sept. 1996

Anhang: Auszüge aus Regelwerken (Frankreich, USA)

(1) Auszug aus der französischen Endlager-Richtlinie RFS No III.2.f (s. Kap.2.5.1)

BASIC SAFETY RULE

Rule No. 111.2.f

Volume 111: Production, monitoring and processing of effluents and waste.

Chapter 2: Solid waste

Section f:

- Determination of the objectives to be adopted in the design and
- construction phases of the creation of a deep geological formation
- radioactive waste repository to ensure safety after the repository has been closed.

Applicability: Disposal of radioactive waste in deep geological formations.

4.4 - The geological barrier - Technical criteria for site selection

The geological barrier must provide, in the long term, adequate radionuclide isolation capability. Its characteristics depend on the disposal site.

The investigations to be conducted at the sites must be guided by strict protocols suited to the requirements of the quantitative modelling and particularities of the site, using the most suitable methods and tools available. Regarding this point, Appendix 1 describes the general orientations for the investigations to be conducted at the sites, both from the surface and in the underground laboratory.

4.4.1 - Essential criteria

These criteria relate to both the stability of the site and its hydrogeology.

Stability

The stability of the site must be such that any changes in the initial conditions due to geological phenomena which may occur (glaciation, earthquakes and neotectonic movements) will be acceptable in terms of the safety of the repository.

In particular, for a period of not less than 10,000 years, stability (covering limited and foreseeable evolution) must be demonstrated.

For each site investigated, these phenomena must be assessed qualitatively and quantitatively with reference to the present situation, the recent past (historic) and above all the more distant past (the Quaternary period and possibly the end of the Tertiary period). This will make it possible to assess the values of the parameters which characterize them and their variation, and to examine their effects. Here it will generally be necessary to consider the regional geological environment of each site.

Hydrogeology

The hydrogeology of the site must be characterized by a very low permeability of the host formation and a low hydraulic head gradient. A low regional hydraulic gradient will also be preferable for the formations surrounding the host formation.

Hydrogeological measurements must be made over an area far wider than that of the repository site so as to be able to construct flow models allowing for movements from the supply zones to the discharge zones. These regional patterns should make it possible to simulate the intensity and the direction of the ground-water movements.

It will be necessary to make allowance for any instances of discontinuity or heterogeneity of which the nature or geometry might significantly reduce the effectiveness of the geological barrier. Such features must be identified and characterized with the greatest care so as to ensure that they are avoided at the site if necessary.

4.4.2 - Important criteria

Mechanical and thermal properties

These determine the feasibility of the repository, i.e. the possibility of designing a repository which does not significantly deteriorate the geological barrier. Furthermore, the repository medium must be chosen so as to allow a design of disposal cavities which do not need to be reworked while being filled.

Studies, particularly with the assistance of modelling of the combined effect of the thermal and mechanical phenomena, must be carried out to investigate the influence of the mode and sequence of the emplacement of the waste on mechanical effects in the repository, in particular the previous cooling time and the storage density of the waste. The specific effects should make it possible to determine the corresponding physical parameters and accurately determine their influence.

Geochemical properties

These play an important role in the long-term safety of a radioactive waste repository as they can affect the deterioration of the artificial barriers and they govern the phenomena of retention of any radionuclides released.

A quantitative description of the geochemical properties of the system must be made by analyzing the transfer conditions of the radionuclides.

Mineralogical analyses of the host formation materials must be carried out and their geochemical evolution modelled as a function of temperature and irradiation. The role of clay minerals must be studied with particular care.

Compliance with a minimum depth requirement

The site must be chosen so that the planned depth of the repository guarantees that the isolation performance of the geological barrier is not significantly affected by the erosion phenomena (particularly after a glaciation), by the effect of an earthquake, or by "normal" intrusion.

It may be assumed that the thickness of the superficial zone liable to be disturbed in this manner is of the order of 150 to 200 metres.

No sterilization of underground resources

For sub-surface management purposes, the site must be chosen to avoid areas where the known or suspected importance is of an exceptional nature.

(2) Auszug aus den NRC-Richtlinien 10 CFR 60 (s. Kap.2.9.2)

10 CFR §60.122 Siting criteria.

[48 FR 28222, June 21, 1983, as amended at 50 FR 29647, July 22, 1985; 61 FR 64269, Dec. 4, 1996]

§60.122 Siting criteria.

(a)(1) A geologic setting shall exhibit an appropriate combination of the conditions specified in paragraph (b) of this section so that, together with the engineered barriers system, the favorable conditions present are sufficient to provide reasonable assurance that the performance objectives relating to isolation of the waste will be met.

(2) If any of the potentially adverse conditions specified in paragraph (c) of this section is present, it may compromise the ability of the geologic repository to meet the performance objectives relating to isolation of the waste. In order to show that a potentially adverse condition does not so compromise the performance of the geologic repository the following must be demonstrated:

(i) The potentially adverse human activity or natural condition has been adequately investigated, including the extent to which the condition may be present and still be undetected taking into account the degree of resolution achieved by the investigations; and

(ii) The effect of the potentially adverse human activity or natural condition on the site has been adequately evaluated using analyses which are sensitive to the potentially adverse human activity or natural condition and assumptions which are not likely to underestimate its effect; and

(iii)(A) The potentially adverse human activity or natural condition is shown by analysis pursuant to paragraph (a)(2)(ii) of this section not to affect significantly the ability of the geologic repository to meet the performance objectives relating to isolation of the waste, or

(B) The effect of the potentially adverse human activity or natural condition is compensated by the presence of a combination of the favorable characteristics so that the performance objectives relating to isolation of the waste are met, or

(C) The potentially adverse human activity or natural condition can be remedied.

(b) *Favorable conditions.* (1) The nature and rates of tectonic, hydrogeologic, geochemical, and geomorphic processes (or any of such processes) operating within the geologic setting during the Quaternary Period, when projected, would not affect or would favorably affect the ability of the geologic repository to isolate the waste.

(2) For disposal in the saturated zone, hydrogeologic conditions that provide:

(i) A host rock with low horizontal and vertical permeability;

(ii) Downward or dominantly horizontal hydraulic gradient in the host rock and immediately surrounding hydrogeologic units; and

(iii) Low vertical permeability and low hydraulic gradient between the host rock and the surrounding hydrogeologic units.

(3) Geochemical conditions that:

(i) Promote precipitation or sorption of radionuclides;

(ii) Inhibit the formation of particulates, colloids, and inorganic and organic complexes that increase the mobility of radionuclides; or

(iii) Inhibit the transport of radionuclides by particulates, colloids, and complexes.

(4) Mineral assemblages that, when subjected to anticipated thermal loading, will remain unaltered or alter to mineral assemblages having equal or increased capacity to inhibit radionuclide migration.

(5) Conditions that permit the emplacement of waste at a minimum depth of 300 meters from the ground surface. (The ground surface shall be deemed to be the elevation of the lowest point on the surface above the disturbed zone.)

(6) A low population density within the geologic setting and a postclosure controlled area that is remote from population centers.

(7) Pre-waste-emplacement groundwater travel time along the fastest path of likely radionuclide travel from the disturbed zone to the accessible environment that substantially exceeds 1,000 years.

(8) For disposal in the unsaturated zone, hydrogeologic conditions that provide

(i) Low moisture flux in the host rock and in the overlying and underlying hydrogeologic units;

(ii) A water table sufficiently below the underground facility such that fully saturated voids contiguous with the water table do not encounter the underground facility;

(iii) A laterally extensive low-permeability hydrogeologic unit above the host rock that would inhibit the downward movement of water or divert downward moving water to a location beyond the limits of the underground facility;

(iv) A host rock that provides for free drainage; or

(v) A climatic regime in which the average annual historic precipitation is a small percentage of the average annual potential evapotranspiration.

(c) *Potentially adverse conditions.* The following conditions are potentially adverse conditions if they are characteristic of the postclosure controlled area or may affect isolation within the controlled area.

(1) Potential for flooding of the underground facility, whether resulting from the occupancy and modification of floodplains or from the failure of existing or planned man-made surface water impoundments.

(2) Potential for foreseeable human activity to adversely affect the groundwater flow system, such as groundwater withdrawal, extensive irrigation, subsurface injection of fluids, underground pumped storage, military activity or construction of large scale surface water impoundments.

(3) Potential for natural phenomena such as landslides, subsidence, or volcanic activity of such a magnitude that large-scale surface water impoundments could be created that could change the regional groundwater flow system and thereby adversely affect the performance of the geologic repository.

(4) Structural deformation, such as uplift, subsidence, folding, or faulting that may adversely affect the regional groundwater flow system.

(5) Potential for changes in hydrologic conditions that would affect the migration of radionuclides to the accessible environment, such as changes in hydraulic gradient, average interstitial velocity, storage coefficient, hydraulic conductivity, natural recharge, potentiometric levels, and discharge points.

(6) Potential for changes in hydrologic conditions resulting from reasonably foreseeable climatic changes.

(7) Groundwater conditions in the host rock, including chemical composition, high ionic strength or ranges of Eh-pH, that could increase the solubility or chemical reactivity of the engineered barrier system.

- (8) Geochemical processes that would reduce sorption of radionuclides, result in degradation of the rock strength, or adversely affect the performance of the engineered barrier system.
- (9) Groundwater conditions in the host rock that are not reducing.
- (10) Evidence of dissolution such as breccia pipes, dissolution cavities, or brine pockets.
- (11) Structural deformation such as uplift, subsidence, folding, and faulting during the Quaternary Period.
- (12) Earthquakes which have occurred historically that if they were to be repeated could affect the site significantly.
- (13) Indications, based on correlations of earthquakes with tectonic processes and features, that either the frequency of occurrence or magnitude of earthquakes may increase.
- (14) More frequent occurrence of earthquakes or earthquakes of higher magnitude than is typical of the area in which the geologic setting is located.
- (15) Evidence of igneous activity since the start of the Quaternary Period.
- (16) Evidence of extreme erosion during the Quaternary Period.
- (17) The presence of naturally occurring materials, whether identified or undiscovered, within the site, in such form that:
- (i) Economic extraction is currently feasible or potentially feasible during the foreseeable future; or
 - (ii) Such materials have greater gross value or net value than the average for other areas of similar size that are representative of and located within the geologic setting.
- (18) Evidence of subsurface mining for resources within the site.
- (19) Evidence of drilling for any purpose within the site.
- (20) Rock or groundwater conditions that would require complex engineering measures in the design and construction of the underground facility or in the sealing of boreholes and shafts.
- (21) Geomechanical properties that do not permit design of underground opening that will remain stable through permanent closure.
- (22) Potential for the water table to rise sufficiently so as to cause saturation of an underground facility located in the unsaturated zone.

(23) Potential for existing or future perched water bodies that may saturate portions of the underground facility or provide a faster flow path from an underground facility located in the unsaturated zone to the accessible environment.

(24) Potential for the movement of radionuclides in a gaseous state through air-filled pore spaces of an unsaturated geologic medium to the accessible environment.

(3) Auszug aus den DOE-Richtlinien 10 CFR 960 (s. Kap.2.9.3)

[Code of Federal Regulations]

[Title 10, Volume 4, Parts 500 to end]

[Revised as of January 1, 1999]

From the U.S. Government Printing Office via GPO Access

[CITE: 10CFR960.4]

TITLE 10--ENERGY

CHAPTER III--DEPARTMENT OF ENERGY

PART 960--GENERAL GUIDELINES FOR THE RECOMMENDATION OF SITES FOR
NUCLEAR WASTE REPOSITORIES--Table of Contents

Subpart C--Postclosure Guidelines

Sec. 960.4 Postclosure guidelines.

The guidelines in this subpart specify the factors to be considered in evaluating and comparing sites on the basis of expected repository performance after closure. The postclosure guidelines are separated into a system guideline and eight technical guidelines. The system guideline establishes waste containment and isolation requirements that are based on NRC and EPA regulations. These requirements must be met by the repository system, which contains natural barriers and engineered barriers. The engineered barriers will be designed to complement the natural barriers, which provide the primary means for waste isolation.

Sec. 960.4-1 System guideline.

(a) *Qualifying Condition.* The geologic setting at the site shall allow for the physical separation of radioactive waste from the accessible environment after closure in accordance with the requirements of 40 CFR part 191, subpart B, as implemented by the provisions of 10 CFR part 60. The geologic setting at the site will allow for the use of

engineered barriers to ensure compliance with the requirements of 40 CFR part 191 and 10 CFR part 60 (see appendix I of this part).

Sec. 960.4-2 Technical guidelines.

The technical guidelines in this subpart set forth qualifying, favorable, potentially adverse, and, in five guidelines, disqualifying conditions on the characteristics, processes, and events that may influence the performance of a repository system after closure. The favorable conditions and the potentially adverse conditions under each guideline are not listed in any assumed order of importance. Potentially adverse conditions will be considered if they affect waste isolation within the controlled area even though such conditions may occur outside the controlled area. The technical guidelines that follow establish conditions that shall be considered in determining compliance with the qualifying condition of the postclosure system guideline. For each technical guideline, an evaluation of qualification or disqualification shall be made in accordance with the requirements specified in subpart B.

Sec. 960.4-2-1 Geohydrology.

(a) *Qualifying condition.* The present and expected geohydrologic setting of a site shall be compatible with waste containment and isolation. The geohydrologic setting, considering the characteristics of and the processes operating within the geologic setting, shall permit compliance with (1) the requirements specified in Sec. 960.4-1 for radionuclide releases to the accessible environment and (2) the requirements specified in 10 CFR 60.113 for radionuclide releases from the engineered-barrier system using reasonably available technology.

(b) *Favorable conditions.* (1) Site conditions such that the pre-waste-emplacment ground-water travel time along any path of likely radionuclide travel from the disturbed zone to the accessible environment would be more than 10,000 years.

(2) The nature and rates of hydrologic processes operating within the geologic setting during the Quaternary Period would, if continued into the future, not affect or would favorably affect the ability of the geologic repository to isolate the waste during the next 100,000 years.

(3) Sites that have stratigraphic, structural, and hydrologic features such that the geohydrologic system can be readily characterized and modeled with reasonable certainty.

(4) For disposal in the saturated zone, at least one of the following pre-waste-emplacment conditions exists:

(i) A host rock and immediately surrounding geohydrologic units with low hydraulic conductivities.

(ii) A downward or predominantly horizontal hydraulic gradient in the host rock and in the immediately surrounding geohydrologic units.

(iii) A low hydraulic gradient in and between the host rock and the immediately surrounding geohydrologic units.

(iv) High effective porosity together with low hydraulic conductivity in rock units along paths of likely radionuclide travel between the host rock and the accessible environment.

(5) For disposal in the unsaturated zone, at least one of the following pre-waste-emplacment conditions exists:

(i) A low and nearly constant degree of saturation in the host rock and in the immediately surrounding geohydrologic units.

(ii) A water table sufficiently below the underground facility such that the fully saturated voids continuous with the water table do not encounter the host rock.

(iii) A geohydrologic unit above the host rock that would divert the downward infiltration of water beyond the limits of the emplaced waste.

(iv) A host rock that provides for free drainage.

(v) A climatic regime in which the average annual historical precipitation is a small fraction of the average annual potential evapotranspiration.

Note: The DOE will, in accordance with the general principles set forth in Sec. 960.1 of these regulations, revise the guidelines as necessary, to ensure consistency with the final NRC regulations on the unsaturated zone, which were published as a proposed rule on February 16, 1984, in 49 FR 5934.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Expected changes in geohydrologic conditions--such as changes in the hydraulic gradient, the hydraulic conductivity, the effective porosity, and the ground-water flux through the host rock and the surrounding geohydrologic units--sufficient to significantly increase the transport of radionuclides to the accessible environment as compared with pre-waste-emplacment conditions.

(2) The presence of ground-water sources, suitable for crop irrigation or human consumption without treatment, along ground-water flow paths from the host rock to the accessible environment.

(3) The presence in the geologic setting of stratigraphic or structural features--such as dikes, sills, faults, shear zones, folds, dissolution effects, or brine pockets--if their presence could significantly contribute to the difficulty of characterizing or modeling the geohydrologic system.

(d) *Disqualifying condition.* A site shall be disqualified if the pre-waste-emplacement ground-water travel time from the disturbed zone to the accessible environment is expected to be less than 1,000 years along any pathway of likely and significant radionuclide travel.

Sec. 960.4-2-2 Geochemistry.

(a) *Qualifying condition.* The present and expected geochemical characteristics of a site shall be compatible with waste containment and isolation. Considering the likely chemical interactions among radionuclides, the host rock, and the ground water, the characteristics of and the processes operating within the geologic setting shall permit compliance with (1) the requirements specified in Sec. 960.4-1 for radionuclide releases to the accessible environment and (2) the requirements specified in 10 CFR 60.113 for radionuclide releases from the engineered-barrier system using reasonably available technology.

(b) *Favorable conditions.* (1) The nature and rates of the geochemical processes operating within the geologic setting during the Quaternary Period would, if continued into the future, not affect or would favorably affect the ability of the geologic repository to isolate the waste during the next 100,000 years.

(2) Geochemical conditions that promote the precipitation, diffusion into the rock matrix, or sorption of radionuclides; inhibit the formation of particulates, colloids, inorganic complexes, or organic complexes that increase the mobility of radionuclides; or inhibit the transport of radionuclides by particulates, colloids, or complexes.

(3) Mineral assemblages that, when subjected to expected repository conditions, would remain unaltered or would alter to mineral assemblages with equal or increased capability to retard radionuclide transport.

(4) A combination of expected geochemical conditions and a volumetric flow rate of water in the host rock that would allow less than 0.001 percent per year of the total radionuclide inventory in the repository at 1,000 years to be dissolved.

(5) Any combination of geochemical and physical retardation processes that would decrease the predicted peak cumulative releases of radionuclides to the accessible

environment by a factor of 10 as compared to those predicted on the basis of ground-water travel time without such retardation.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Ground-water conditions in the host rock that could affect the solubility or the chemical reactivity of the engineered-barrier system to the extent that the expected repository performance could be compromised.

(2) Geochemical processes or conditions that could reduce the sorption of radionuclides or degrade the rock strength.

(3) Pre-waste-emplacement ground-water conditions in the host rock that are chemically oxidizing.

Sec. 960.4-2-3 Rock characteristics.

(a) *Qualifying condition.* The present and expected characteristics of the host rock and surrounding units shall be capable of accommodating the thermal, chemical, mechanical, and radiation stresses expected to be induced by repository construction, operation, and closure and by expected interactions among the waste, host rock, ground water, and engineered components. The characteristics of and the processes operating within the geologic setting shall permit compliance with (1) the requirements specified in Sec. 960.4-1 for radionuclide releases to the accessible environment and (2) the requirements set forth in 10 CFR 60.113 for radionuclide releases from the engineered-barrier system using reasonably available technology.

(b) *Favorable Conditions.* (1) A host rock that is sufficiently thick and laterally extensive to allow significant flexibility in selecting the depth, configuration, and location of the underground facility to ensure isolation.

(2) A host rock with a high thermal conductivity, a low coefficient of thermal expansion, or sufficient ductility to seal fractures induced by repository construction, operation, or closure or by interactions among the waste, host rock, ground water, and engineered components.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Rock conditions that could require engineering measures beyond reasonably available technology for the construction, operation, and closure of the repository, if such measures are necessary to ensure waste containment or isolation.

(2) Potential for such phenomena as thermally induced fractures, the hydration or dehydration of mineral components, brine migration, or other physical, chemical, or

radiation-related phenomena that could be expected to affect waste containment or isolation.

(3) A combination of geologic structure, geochemical and thermal properties, and hydrologic conditions in the host rock and surrounding units such that the heat generated by the waste could significantly decrease the isolation provided by the host rock as compared with pre-waste-emplacment conditions.

Sec. 960.4-2-4 Climatic changes.

(a) *Qualifying condition.* The site shall be located where future climatic conditions will not be likely to lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1. In predicting the likely future climatic conditions at a site, the DOE will consider the global, regional, and site climatic patterns during the Quaternary Period, considering the geomorphic evidence of the climatic conditions in the geologic setting.

(b) *Favorable conditions.* (1) A surface-water system such that expected climatic cycles over the next 100,000 years would not adversely affect waste isolation.

(2) A geologic setting in which climatic changes have had little effect on the hydrologic system throughout the Quaternary Period.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Evidence that the water table could rise sufficiently over the next 10,000 years to saturate the underground facility in a previously unsaturated host rock.

(2) Evidence that climatic changes over the next 10,000 years could cause perturbations in the hydraulic gradient, the hydraulic conductivity, the effective porosity, or the ground-water flux through the host rock and the surrounding geohydrologic units, sufficient to significantly increase the transport of radionuclides to the accessible environment.

Sec. 960.4-2-5 Erosion.

(a) *Qualifying condition.* The site shall allow the underground facility to be placed at a depth such that erosional processes acting upon the surface will not be likely to lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1. In predicting the likelihood of potentially disruptive erosional processes, the DOE will consider the climatic, tectonic, and geomorphic evidence of rates and pat-

terns of erosion in the geologic setting during the Quaternary Period.

(b) *Favorable conditions.* (1) Site conditions that permit the emplacement of waste at a depth of at least 300 meters below the directly overlying ground surface.

(2) A geologic setting where the nature and rates of the erosional processes that have been operating during the Quaternary Period are predicted to have less than one chance in 10,000 over the next 10,000 years of leading to releases of radionuclides to the accessible environment.

(3) Site conditions such that waste exhumation would not be expected to occur during the first one million years after repository closure.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) A geologic setting that shows evidence of extreme erosion during the Quaternary Period.

(2) A geologic setting where the nature and rates of geomorphic processes that have been operating during the Quaternary Period could, during the first 10,000 years after closure, adversely affect the ability of the geologic repository to isolate the waste.

(d) *Disqualifying condition.* The site shall be disqualified if site conditions do not allow all portions of the underground facility to be situated at least 200 meters below the directly overlying ground surface.

Sec. 960.4-2-6 Dissolution.

(a) *Qualifying condition.* The site shall be located such that any subsurface rock dissolution will not be likely to lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1. In predicting the likelihood of dissolution within the geologic setting at a site, the DOE will consider the evidence of dissolution within that setting during the Quaternary Period, including the locations and characteristics of dissolution fronts or other dissolution features, if identified.

(b) *Favorable condition.* No evidence that the host rock within the site was subject to significant dissolution during the Quaternary Period.

(c) *Potentially adverse condition.* Evidence of dissolution within the geologic setting--such as breccia pipes, dissolution cavities, significant volumetric reduction of the host rock or surrounding strata, or any structural collapse--such that a hydraulic intercon-

nection leading to a loss of waste isolation could occur.

(d) *Disqualifying condition.* The site shall be disqualified if it is likely that, during the first 10,000 years after closure, active dissolution, as predicted on the basis of the geologic record, would result in a loss of waste isolation.

Sec. 960.4-2-7 Tectonics.

(a) *Qualifying condition.* The site shall be located in a geologic setting where future tectonic processes or events will not be likely to lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1. In predicting the likelihood of potentially disruptive tectonic processes or events, the DOE will consider the structural, stratigraphic, geophysical, and seismic evidence for the nature and rates of tectonic processes and events in the geologic setting during the Quaternary Period.

(b) *Favorable condition.* The nature and rates of igneous activity and tectonic processes (such as uplift, subsidence, faulting, or folding), if any, operating within the geologic setting during the Quaternary Period would, if continued into the future, have less than one chance in 10,000 over the first 10,000 years after closure of leading to releases of radionuclides to the accessible environment.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Evidence of active folding, faulting, diapirism, uplift, subsidence, or other tectonic processes or igneous activity within the geologic setting during the Quaternary Period.

(2) Historical earthquakes within the geologic setting of such magnitude and intensity that, if they recurred, could affect waste containment or isolation.

(3) Indications, based on correlations of earthquakes with tectonic processes and features, that either the frequency of occurrence or the magnitude of earthquakes within the geologic setting may increase.

(4) More-frequent occurrences of earthquakes or earthquakes of higher magnitude than are representative of the region in which the geologic setting is located.

(5) Potential for natural phenomena such as landslides, subsidence, or volcanic activity of such magnitudes that they could create large-scale surface-water impoundments that could change the regional ground-water flow system.

(6) Potential for tectonic deformations--such as uplift, subsidence, folding, or faulting--that could adversely affect the regional ground-water flow system.

(d) *Disqualifying condition.* A site shall be disqualified if, based on the geologic record during the Quaternary Period, the nature and rates of fault movement or other ground motion are expected to be such that a loss of waste isolation is likely to occur.

Sec. 960.4-2-8 Human interference.

The site shall be located such that activities by future generations at or near the site will not be likely to affect waste containment and isolation. In assessing the likelihood of such activities, the DOE will consider the estimated effectiveness of the permanent markers and records required by 10 CFR part 60, taking into account site-specific factors, as stated in Secs. 960.4-2-8-1 and 960.4-2-8-2, that could compromise their continued effectiveness.

Sec. 960.4-2-8-1 Natural resources.

(a) *Qualifying condition.* This site shall be located such that--considering permanent markers and records and reasonable projections of value, scarcity, and technology--the natural resources, including ground water suitable for crop irrigation or human consumption without treatment, present at or near the site will not be likely to give rise to interference activities that would lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1.

(b) *Favorable conditions.* (1) No known natural resources that have or are projected to have in the foreseeable future a value great enough to be considered a commercially extractable resource.

(2) Ground water with 10,000 parts per million or more of total dissolved solids along any path of likely radionuclide travel from the host rock to the accessible environment.

(c) *Potentially adverse conditions.* (1) Indications that the site contains naturally occurring materials, whether or not actually identified in such form that (i) economic extraction is potentially feasible during the foreseeable future or (ii) such materials have a greater gross value, net value, or commercial potential than the average for other areas of similar size that are representative of, and located in, the geologic setting.

(2) Evidence of subsurface mining or extraction for resources within the site if it could affect waste containment or isolation.

(3) Evidence of drilling within the site for any purpose other than repository-site evaluation to a depth sufficient to affect waste containment and isolation.

(4) Evidence of a significant concentration of any naturally occurring material that is not widely available from other sources.

(5) Potential for foreseeable human activities--such as ground-water withdrawal, extensive irrigation, subsurface injection of fluids, underground pumped storage, military activities, or the construction of large-scale surface-water impoundments--that could adversely change portions of the ground-water flow system important to waste isolation.

(d) *Disqualifying conditions.* A site shall be disqualified if--

(1) Previous exploration, mining, or extraction activities for resources of commercial importance at the site have created significant pathways between the projected underground facility and the accessible environment; or

(2) Ongoing or likely future activities to recover presently valuable natural mineral resources outside the controlled area would be expected to lead to an inadvertent loss of waste isolation.

Sec. 960.4-2-8-2 Site ownership and control.

(a) *Qualifying condition.* The site shall be located on land for which the DOE can obtain, in accordance with the requirements of 10 CFR part 60, ownership, surface and subsurface rights, and control of access that are required in order that potential surface and subsurface activities as the site will not be likely to lead to radionuclide releases greater than those allowable under the requirements specified in Sec. 960.4-1.

(b) *Favorable condition.* Present ownership and control of land and all surface and subsurface rights by the DOE.

(c) *Potentially adverse condition.* Projected land-ownership conflicts that cannot be successfully resolved through voluntary purchase-sell agreements, nondisputed agency-to-agency transfers of title, or Federal condemnation proceedings.