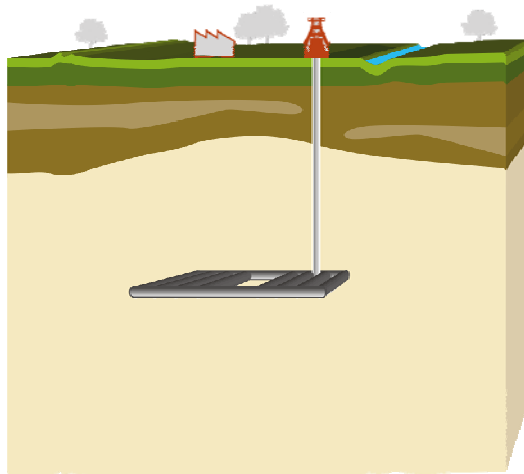


## Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

### Anhang Auslegung

#### Auslegung von Endlagern in geologischen Formationen



**30.09.2008**

**Bearbeiter:**

Minhans, A.

Schmidt, G.

**Braunschweig / Darmstadt  
September 2008**

**Anhang zu GRS-247  
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Besonderheiten der Auslegung von Endlagern in geologischen Formationen .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Auslegung in der Planungsphase .....</b>	<b>8</b>
3.1	Auslegung auf dem Kenntnisstand ohne Erkundung .....	8
3.2	Auslegung auf dem Kenntnisstand mit obertägiger Erkundung .....	11
3.3	Auslegung auf dem Kenntnisstand der untertägigen Erkundung .....	13
3.4	Auslegung in der Phase der Standortcharakterisierung.....	15
<b>4</b>	<b>Auslegung in der Errichtungs- und Betriebsphase eines Endlagers.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Auslegung in der Verschlussphase des Endlagers.....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Stand der Auslegung in Deutschland .....</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>27</b>



## 1 Einleitung

Endlager sind kerntechnische Anlagen, sie unterscheiden sich aber wesentlich von anderen kerntechnischen und industriellen Anlagen. Einerseits nutzen Endlager gegebene natürliche Verhältnisse, um ihren wesentlichen Zweck zu erfüllen. Sie sind daher räumlich an das Vorkommen eines bestimmten Wirtsgesteins und an die Eigenschaften bestimmter geologischer Schichten in ihrer konkreten Ausprägung gebunden. Andererseits ist ein technischer Ausgleich von als nachteilig identifizierten Eigenschaften eines Wirtsgesteins oder eines Standorts je nach Situation nur eingeschränkt oder gar nicht möglich. In die Auslegung eines Endlagers gehen daher sowohl der gewählte Standort und seine konkreten Eigenschaften als auch das technische Konzept ein. Beide Randbedingungen sind daher mit ihrer unterschiedlichen Rolle bei der Auslegung zu berücksichtigen. Diese Besonderheit von Endlagern ist in Kap. 2 näher dargestellt.

Bei der Planung üblicher industrieller Anlagen wird zunächst ein Plan erstellt, der dann in allen Details ausgearbeitet wird; schließlich wird die Anlage wie geplant errichtet, allenfalls werden während der Ausführung einzelne Details verändert und den seit der Planerstellung veränderten Bedingungen angepasst. Der Gesamtvorgang von Konzept und Planung bis zur Inbetriebnahme einer solchen Anlage liegt auch bei einiger Komplexität der Anlage noch innerhalb eines Jahrzehnts. Bei einem Endlager sind aber die meisten Wirtsgestein- und Standorteigenschaften nicht von vornherein bekannt und planbar, sondern erschließen sich erst im Verlauf langjähriger Erkundungstätigkeiten. Dementsprechend ist in unterschiedlichen Phasen der Realisierung eines Endlagers der erreichte Kenntnisstand über Wirtsgestein- und Standorteigenschaften, die damit zusammenhängenden Aspekte der Langzeitsicherheit und die technische Auslegung in enger Abstimmung aneinander anzupassen. Dieser besondere Stufenprozess von Erkundungsfortschritt, technischer Auslegung und Sicherheitsanalyse ist in Kap. 3 detaillierter dargelegt.

Für die Phase der Errichtung und des Betriebs der Anlage sind bei einem Endlager weitere Auslegungsanforderungen zu berücksichtigen. In Kap. 4 sind die während des Betriebs relevanten Auslegungsaspekte zusammengestellt.

Nach längerem Betrieb ist das Endlager zu verschließen. Auch dabei treten noch wichtige Auslegungsfragen auf. Die in dieser Phase relevanten Aspekte werden in Kap. 5 dargestellt.

## 2 Besonderheiten der Auslegung von Endlagern in geologischen Formationen

Zum Verhältnis zwischen der technischen Auslegung und den Wirtsgesteins- bzw. Standorteigenschaften gilt generell, dass die Sicherheitsaspekte Vorrang genießen. Das bedeutet, dass technische Auslegungsmerkmale, wie z. B. die Platzierung der Einlagerungsbereiche in der geologischen Formation oder Einlagerungstechniken für die Abfallbehälter, den sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften der geologischen Formation anzupassen sind.

Um die Abhängigkeit der Endlagerauslegung von den Gegebenheiten der geologischen Formation zu veranschaulichen, ist beispielhaft für das Wirtsgestein Steinsalz in Abb. 1 der Innenaufbau des Salzstocks Gorleben und in Abb. 2 die Platzierung von Einlagerungsfeldern dargestellt.

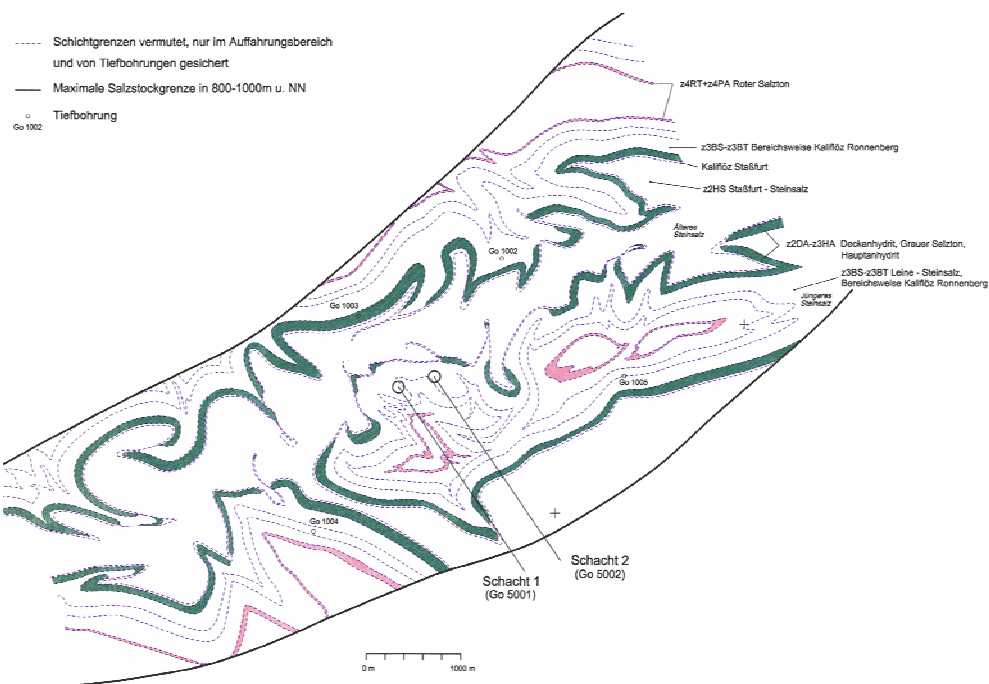


Abb. 1: Innenaufbau des Salzstocks Gorleben, aus /DBE 98/

Der Innenaufbau in Gorleben ist geprägt von der Verfaltung von Salzschiechten, die mit der Entstehung des Salzstocks einherging. Die für die Endlagerung geeigneten älteren Steinsalzpartien wechseln sich mit weniger oder nicht geeigneten Schichten an Kalisalzen, Anhydrit oder Salzton ab. Die technische Auslegung des Endlagers hat diese Verhältnisse zu berücksichtigen und sich dieser Struktur anpassen.

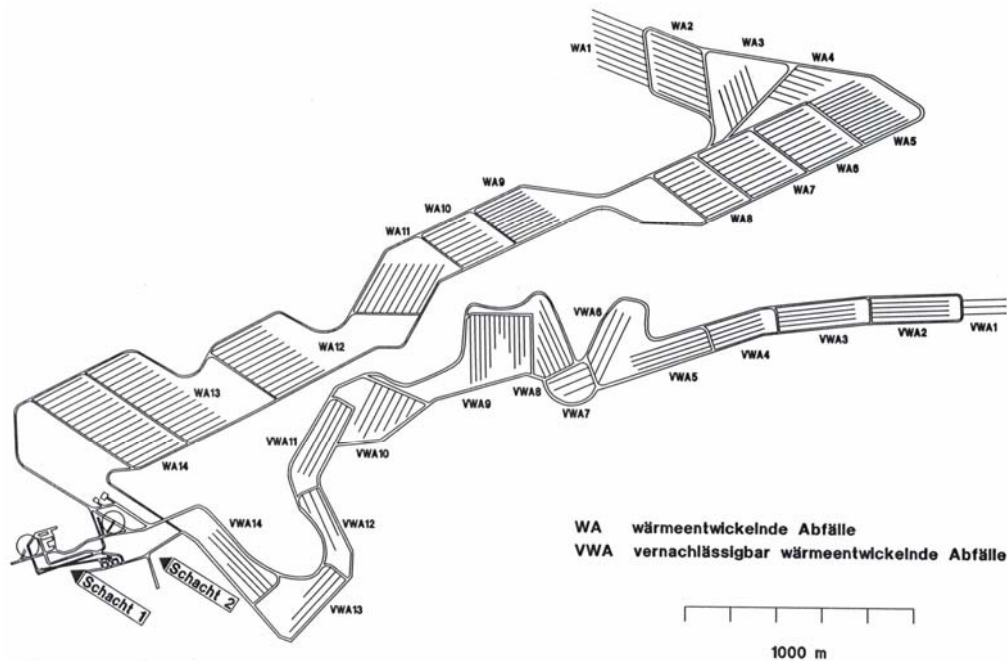
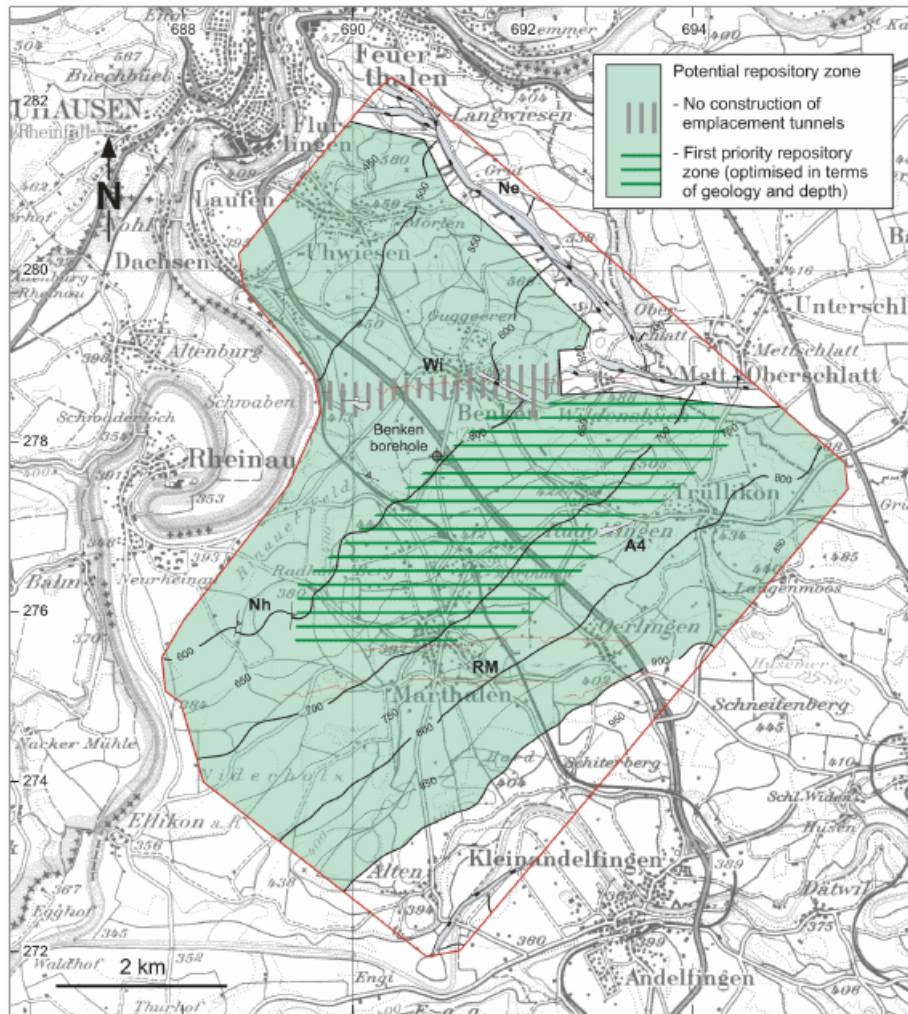


Abb. 2: Platzierung von Einlagerungsfeldern im Salzstock Gorleben, aus /DBE 98/

Als Beispiel für die Anpassung der Endlagerauslegung an die gegebenen geologischen Verhältnisse beim Wirtsgestein Tonstein ist in Abb. 3 die vorgeschlagene Platzierung der Endlagerbereiche im Rahmen des Entsorgungsnachweises Benken (Schweiz) dargestellt. Der gesamte grün gefärbte Bereich („Potential Repository Zone“) wurde mittels einer 3d-seismischen Erkundung untersucht, wobei die genaue Lage der in der Abbildung fein eingezeichneten geologischen Störungen (z. B. Neuhausen „Nh“, A4) und Flexuren (z. B. Wildensbach „Wi“, Rafz-Marthalen „RM“) aufgeklärt wurden.

In den vorgegebenen geologischen Verhältnissen wird die Endlagerzone so platziert, dass ausreichende Abstände zu Störungszonen eingehalten werden. Daraus resultiert eine Priorität für die Platzierung, die in Abb. 3 in horizontalen grünen Balken markiert ist. Für die Erstellung von Einlagerungsbereichen völlig ungeeignete Zonen, in Abb. 3 mit vertikalen grauen Balken markiert, sind zu meiden.

Beide Beispiele zeigen den zentralen Einfluss der geologischen Standortbedingungen auf die Auslegung. Dieser Einfluss ist bei allen Wirtsgesteinen und Standortverhältnissen gegeben, wobei die Einflüsse auf unterschiedlichen Effekten basieren können und von unterschiedlicher Gewichtung sein können.



Reproduced by permission of the Federal Office for Topography (BA034965)

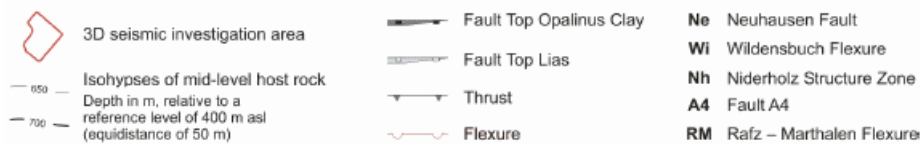


Fig. 4.2-5: Potential area for a repository in Opalinus Clay in the Zürcher Weinland

The area chosen for the reference repository is ~ 8 km<sup>2</sup> and is marked with green horizontal lines.

Abb. 3: Beispiel für eine prioritäre Platzierung der Endlagerzone bei Tonstein im Untersuchungsgebiet, aus /NAG 02c/

Es findet also eine Abwägung statt, wie das Endlager technisch so ausgelegt werden kann, dass die höchst mögliche Sicherheit erreicht wird, aber gleichzeitig die technische und betriebliche Umsetzung realisierbar bleibt und der technische und wirtschaftliche Aufwand optimiert wird.



Dabei verfeinern sich die Kenntnisse über den Aufbau der geologischen Formation mit fortschreitender Erkundung des Standorts. Die fortschreitende Erkundung erstreckt sich dabei nicht nur auf die Phasen bis zur rechtlichen Zulassung eines Endlagers. Auch im laufenden Betrieb wird die Detailkenntnis über den Aufbau kleinräumiger Strukturen im Endlagerbereich noch wachsen. Die technische Auslegung der untertägigen Anlage Endlager passt sich daher idealerweise diesem Kenntnisstand an.

### **3 Auslegung in der Planungsphase**

Die Auslegung eines Endlagers beginnt in der Planungsphase. In der Planungsphase wird weiter unterschieden nach der Auslegung auf dem Kenntnisstand ohne vorherige Erkundungen (Kap. 3.1), mit erfolgter obertägiger Erkundung (Kap. 3.2) und mit untertägiger Erkundung (Kap. 3.3). Mit der erfolgten Standortcharakterisierung, als Vorbereitung des Langzeitsicherheitsnachweises, verfeinert sich die Auslegung weiter (Kap. 3.4).

#### **3.1 Auslegung auf dem Kenntnisstand ohne Erkundung**

Vor einer Entscheidung über das Wirtsgestein und ohne Erkundung von Standorten bzw. von Standortregionen liegen zunächst nur allgemeine Informationen über generelle Eigenschaften des Wirtsgesteins vor. In dieser Phase befinden sich Länder, die mit ihrer Endlagerplanung gerade beginnen und die ersten Schritte auf diesem Gebiet einleiten (z. B. die Niederlande, Japan oder Südkorea). Im Hinblick auf Wirtsgestein- und regionale Standorteigenschaften kann auf die Ergebnisse aus Untersuchungen zurückgegriffen werden, die aus anderem Anlass bereits vorliegen (z. B. auf der allgemeinen wissenschaftlichen Kenntnis über den geologischen Aufbau von Schichtungen und Regionalstrukturen, aus früheren Arbeiten zur Prospektierung von potentiellen Bodenschätzen, aus dem Abbau von Bodenschätzen in ähnlichen oder auch in benachbarten geologischen Formationen, aus obertägigen Erkundungen zu allgemeinen wissenschaftlichen Zwecken).

Das Detailbild über den Aufbau der Wirtsgesteininformation und von potentiellen Standortregionen ist in dieser Phase auf einem sehr allgemeinen Niveau bekannt. Als Beurteilungskriterien sind in dieser Phase Ausschlusskriterien<sup>1</sup> anzuwenden, um von vorn herein offensichtliche und besonders ungünstige geologische Verhältnisse zu vermeiden. Entsprechend diesem Kenntnisstand erfolgt die Auslegung eines Endlagers in dieser Phase in geologischer Hinsicht auf einem sehr allgemeinen Niveau (z. B. in Form eines Prinzipaufbaus der Anlage, ohne detaillierte Platzierung und Auslegung von Einzelheiten).

---

<sup>1</sup> Beispiele für Ausschlusskriterien: Großräumige Vertikalbewegungen, aktive Störungszonen, seismische Aktivität, vulkanische Aktivität. Siehe Kapitel 4.1.2, S. 84f in /AKE 02/>

Diese erste Auslegung beruht ferner noch auf einer Reihe von Annahmen, die auf Basis der allgemein verfügbaren Kenntnisse (z. B. auf Basis allgemein wissenschaftlicher Kenntnisse über die erwarteten geologischen Verhältnisse, aus Explorationsbohrungen oder Tunnelbauten an anderen Orten, aber in gleichen geologischen Verhältnissen) vernünftigerweise getroffen werden können. Ob diese genauso am gewählten Standort vorliegen, kann erst später verifiziert werden.

Trotzdem hat die Auslegung schon auf diesem Kenntnisniveau ihren Sinn. Denn schon in dieser Phase müssen eine Reihe von Merkmalen identifiziert werden, von denen abhängt, ob und unter welche konkreteren Randbedingungen ein Endlager an dieser Stelle realisierbar wäre. Im weiteren Verlauf der verfeinerten Auslegung sind wichtige Annahmen zu identifizieren und bei der späteren Erkundung in jedem Fall zu verifizieren. Beispiele für solche Merkmale sind

- der aus Abfallarten und –mengen herleitbare ungefähre Flächen- und Raumbedarf des Endlagers,
- die aus der Art der endzulagernden Abfälle zu erkennende Wärmemenge, die durch eine entsprechende Größe und Gestaltung des Endlagerbergwerkes beherrscht werden muss,
- das Gesamtinventar des Endlagers, und
- aus Schutzüberlegungen und bergtechnischer Erfahrung ableitbare notwendige Sicherheitsabstände zu geologischen Formationsgrenzen.

Die Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle hängt davon ab, welche Abfallarten und –mengen endgelagert werden sollen. Die wärmeentwickelnden Abfälle umfassen im Wesentlichen abgebrannte Brennelemente, verglaste hoch- und mittelradioaktive Abfälle sowie gegebenenfalls weitere Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Das Bundesamt für Strahlenschutz erstellt regelmäßig Prognosen, welche Mengen der jeweiligen Abfallarten für Deutschland zu erwarten sind /BFS 08/. Gemäß den derzeitigen Prognosen des Bundesamtes für Strahlenschutz werden in Deutschland bis 2040 insgesamt ca. 22.000 m<sup>3</sup> wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle anfallen.

Die Auslegung des Endlagers hängt bei einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle von den zu beherrschenden Wärmemengen der eingebrachten Abfälle ab. Je nach Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins ergeben sich hier unterschiedliche Randbedingungen, die zu beachten sind. Durch die Einbringung der gesamten Wärmemenge und

die langsam fortschreitende Erwärmung der Endlagerformation, insbesondere nach deren Verschluss, kann es zu thermisch induzierten Spannungen kommen, da sich das Gebirge ausdehnt. Diese Spannungen bauen sich bei der Abkühlungsphase langsam wieder ab. Durch den Spannungsauf- und -abbau können jedoch Risse entstehen, wodurch die Intaktheit der geologischen Barriere gestört werden kann. Der gesamte Wärmeeintrag durch die eingelagerten Abfälle in ein Endlager ist deswegen zu begrenzen.

Eine zweite thermische Begrenzung ergibt sich aus der Einhaltung von Maximaltemperaturen an der Grenzfläche zwischen Abfall und Wirtsgestein. Damit wird verhindert, dass zu hohe Temperaturen irreversible chemische Veränderungen im Gestein bewirken, die zu Gefährdungen der Sicherheit führen können. Übliche Maximaltemperaturen sind bei Steinsalz 200°C und bei Tonstein 100°C. Die Einhaltung der Maximaltemperatur wirkt sich auf die Bestimmung der zulässigen Packungsdichte der Abfälle aus, was wiederum Einfluss hat auf das notwendige Mindestvolumen des Endlagers.

Eine weitere thermische Begrenzung gilt für das Verfüllmaterial zwischen Abfallbehälter und Wirtsgestein. Auch hier ist - je nach Material – der Wärmeeinwirkung zu begrenzen. Nach /DBE 07/ darf bei der Verwendung von Bentonit bezüglich der thermischen Auslegung eine Grenztemperatur von 100° C nicht überschritten werden. Dieses hat Auswirkung auf das Behälterdesign und auf die Auswahl des Verfüllmaterials.

Die Auslegung des Endlagers ergibt wichtige Randbedingungen und Parameter für die Langzeitsicherheitsanalyse. Schon in diesem frühen Schritt der Planungsphase ist eine erste orientierende Analyse der Langzeitsicherheit erforderlich, die auf einem generischen Kenntnissniveau erfolgt. Dafür müssen aber Grundzüge der Auslegung des Endlagers ebenfalls festgelegt werden.

Erforderliche regulatorische Regelungen für die Auslegung in dieser Phase beziehen sich einerseits auf die allgemeinen Anforderungen bei der Endlagerung (z. B. die Zielsetzung des Einschlusses und der Isolation der Abfälle, der Wartungsfreiheit eines Endlagers nach seinem Verschluss, das Risikokonzept bei der Endlagerung, übergreifende Schutzziele, etc.). Andererseits sind Regulierungen auf dem Gebiet des Auswahlverfahrens einschließlich der dabei anzuwendenden Auswahl- und Eignungskriterien sinnvoll, um einen transparenten und fairen Auswahlprozess durchführen zu können. Bei beiden Regelungsbereichen (allgemeine Anforderungen, Standortauswahl)

wäre darauf zu achten, dass der geforderte Detaillierungsgrad dem Erkenntnisstand entspricht.

Auf internationaler Ebene sind Regeln nur für die allgemeinen Anforderungen an die Endlagerung explizit ausgearbeitet worden. Allgemeine Anforderungen an die Endlagerung sind in den Safety Requirements der IAEA /IAE 06a/ festgelegt. Sie definieren auf allgemeiner Ebene radiologische Ziele bei der Endlagerung (z. B. das Dosisziel von 0,3 mSv/a) und enthalten Anforderungen auf administrativ-rechtlicher Ebene und zum Verfahrensmanagement, zu Sicherheitsanforderungen an ein Endlager und zu sicherheitsbezogenen Auslegungsprinzipien (Multiple Safety Functions, Einschluss, Isolierung, etc.). Für die Wirtsgestein- und Standortauswahl sind international keine expliziten Maßstäbe festgelegt, da die geologischen Bedingungen zu uneinheitlich sind. Die Regeln bleiben daher generalisierend und zeigen eher Möglichkeiten auf, z.B. /IAE 94/. Andere internationale Dokumente berichten über Erfahrungen aus dieser Planungsphase z.B. /IAE 97/.

### **3.2 Auslegung auf dem Kenntnisstand mit obertägiger Erkundung**

Mit der obertägigen Erkundung einer Standortregion wird in der nächsten Phase der Detailgrad der Kenntnisse über eine Reihe von Wirtsgestein- und Standorteigenschaften größer. Mit den heute verfügbaren Methoden der obertägigen Erkundung und aus einer begrenzten Anzahl geeignet platzierter Bohrungen sind bereits viele Standorteigenschaften zugänglich, die die Auslegung des potentiellen Endlagers bestimmen und die Unschärfe in den ursprünglichen Annahmen wesentlich verringern. So sind je nach Auflösung der Erkundungsmethode beispielsweise erkennbar: räumliche Ausdehnung der Formation, Schichtaufbau von Deckgebirge und Wirtsgestein, größere geologische Störungen.

Aus diesen Kenntnissen lassen sich die ursprünglich sehr generischen Vorstellungen über die Auslegung des Endlagers wesentlich verfeinern und zu großen Teilen an die geologischen Standorteigenschaften anpassen. Die Auslegung hat daher in dieser Phase bereits einige standortspezifische Elemente und der erreichte Erkundungsstand ist für die abschließende Bewertung nach Ausschlusskriterien<sup>2</sup> geeignet. Mit der Er-

---

<sup>2</sup> Ausschlusskriterien gemäß /AKE 02/: Großräumige Vertikalbewegungen, aktive Störungszonen, seismische Aktivität, vulkanische Aktivität.

kundung werden bereits viele Einzelbeobachtungen bzw. –daten erfasst, die für die später erfolgende Standortbewertung und für Standortvergleiche erforderlich werden. Vollständig sollte zum Ende dieser Phase die Beurteilung nach Mindestanforderungen<sup>3</sup> möglich sein. Die Auslegung wird in dieser Phase noch verschiedene Varianten aufweisen, z. B. eine Vorzugsvariante und Alternativvarianten.

Die Auslegung steht auch in dieser Phase in einem engen Zusammenhang mit der weiter zu führenden und weiter zu detaillierenden Sicherheits- und Langzeitsicherheitsanalyse. Es ist aufgrund des noch nicht sehr hoch entwickelten Detailgrads der Auslegung zwar nicht unbedingt zwingend, für diese Phase eine eigenständige Langzeitsicherheitsanalyse anzufertigen. Da sich der Stand von Wissenschaft und Technik auch auf dem Gebiet der Langzeitsicherheitsanalyse relativ rasch weiter entwickelt, wird dies aber in den meisten Ländern praktisch so gehandhabt. Die Analyse nimmt entsprechend der Auslegung bereits standortspezifische Erkundungsdaten mit auf und die Modellierung erfolgt auf Grundlage des aktuelleren Kenntnisstands mit größerer Detailtiefe. Als Beispiel für die Auslegung eines Endlagers und für die Langzeitsicherheitsanalyse auf diesem Grad der Detaillierung können die vorgelegten Unterlagen der NAGRA über das Projekt Opalinuston zum Entsorgungsnachweis, /NAG 02a/ /NAG 02b/ und /NAG 02c/, oder das Dossier Argile der ANDRA zur Endlagerung in Tonstein /AND 05/ genannt werden.

Internationale Anforderungen speziell für diese Phase der obertägigen Endlagererkundung sind nur auf sehr allgemeiner Ebene und qualitativ-beschreibend als Empfehlung definiert. Indirekt lassen sich die „Safety Design Principles“ des IAEA-Sicherheitsstandards WS-R-4 (Paragrafen 3.25 bis 3.35) /IAE 06a/ heranziehen, die allgemeine Vorgaben zum Mehrbarriersystem und zur Isolationsfähigkeit festlegen. Im entsprechenden Safety Guide /IAE 94/ werden die in Tab. 1 genannten Anforderungen an Standorte gestellt.

---

<sup>3</sup> Mindestanforderungen gemäß /AKE 02/: Durchlässigkeit und Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Mindest- und Maximaltiefe des Endlagerbergwerks, Flächen- und Raumverfügbarkeit, Gebirgsschlagsausschluss, Langzeit-Einschlussfähigkeit.

Tab. 1: Standortanforderungen gemäß Safety Guide 111-G-4 1 der IAEA (Zusammenstellung nach /IAE 94/)

Para	Thema	Anforderung(en)
404	Geologische Bedingungen	Zugänglichkeit für Standortcharakterisierung, Unterbindung des Transports von Radionukliden in die Umwelt
408	Künftige natürliche Entwicklungen	künftige geodynamische Phänomene sollen die Isolationseigenschaften des Gesamtsystems nicht unakzeptabel beeinträchtigen
412	Hydrogeologie	Einschränkung der Grundwasserbewegung innerhalb des Endlagers, Unterstützung der Isolationseigenschaften
416	Geochemie	Begrenzung der Freisetzung von Radionukliden
420	Menschliche Eingriffe	Minimierung von Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen
425	Bau und ingenieurtechnische Auslegung	Entwurf für ober- und untertägige technische Einrichtungen machbar, Einhaltung von bergbaulichen Regeln
429	Abfalltransport	Auswirkung der Strahlenbelastung für die Öffentlichkeit und auf die Umwelt bleibt innerhalb akzeptierter Grenzwerte
432	Schutz der Umwelt	angemessener Schutz der Umwelt, Auswirkungen angemessen ausgleichbar
435	Flächeninanspruchnahme	Landnutzung und Eigentum berücksichtigen im Hinblick auf künftige Nutzungen und regionale Planungen
438	Soziale Auswirkungen	nur akzeptable soziale Auswirkungen, Förderung günstiger und Minimierung ungünstiger sozialer Wirkungen

Die Anforderungen sind eher als Möglichkeiten und Empfehlungen formuliert, eine Quantifizierung oder Detaillierung erfolgt nicht. In /BOR 01/ sind entsprechende Standortanforderungen in einer Reihe wichtiger Länder untersucht. Es wird festgestellt, dass diese sehr unterschiedlich detailliert vorliegen, sich im Verbindlichkeitsgrad unterscheiden und durchgängig nicht quantitativ formuliert sind. Insofern unterscheiden sich die AkEnd-Kriterien /AKE 02/ vom internationalen Üblichen, da sie überwiegend quantitative Einordnungen vorgeben.

### 3.3 Auslegung auf dem Kenntnisstand der untertägigen Erkundung

In der Phase der untertägigen Erkundung verfeinert sich stufenweise die Kenntnis über den Aufbau der Strukturen innerhalb des Wirtsgesteins bis zu einem Grad, die eine recht gut aufgelöste Auslegung des späteren Grubengebäudes und der Übersicht zur Gestaltung der später vorgesehenen Einlagerungsbereiche gestattet.

Der Detailgrad der Auslegung muss für eine zuverlässige Aussage über die grundsätzliche Eignung von Wirtsgestein und Standort geeignet sein, daher sind in dieser Phase alle technischen, geologischen und die Langzeitentwicklung betreffenden Fragen vorrangig zu klären, die mögliche Einschränkungen der Eignung zur Folge haben könnten. Hierzu gehören, mit unterschiedlicher Gewichtung<sup>4</sup>:

- kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau,
- günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich,
- gute räumliche Charakterisierbarkeit,
- gute Prognostizierbarkeit,
- günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen,
- geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten,
- gute Gasverträglichkeit,
- gute Temperaturverträglichkeit,
- hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden,
- günstige hydrochemische Verhältnisse.

Ein Teil der genannten allgemeinen Anforderungen (Abwägungskriterien) bildet sich im rechnerischen Ergebnis einer Langzeitsicherheitsanalyse ab (z. B. der Transport durch Grundwasser, das Rückhaltevermögen, die hydrochemischen Verhältnisse), ein weiterer Teil bildet sich nur in der zugehörigen Unsicherheitsbandbreite (z. B. die Prognostizierbarkeit, die Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten) des Ergebnisses ab und ein weiterer Teil bildet sich in einer solchen Analyse nur indirekt oder in qualitativer Form ab (z. B. die Gasverträglichkeit, die Charakterisierbarkeit).

Sowohl die internationalen (Abschnitte 3.42 und 3.43 in WS-R-4 /IAE 06/) als auch die im Entwurf vorliegenden nationalen Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für radioaktive Abfälle (Abschnitte 1.6 und 1.7 in /GRS 07/) sehen eine schrittweise Sicherheitsbewertung vor. Der Abschluss der untertägigen Erkundung eines Standorts und

---

<sup>4</sup> Kriterien und Gewichtung gemäß /AKE 02/.



der dann bevorstehende Übergang zur Standortcharakterisierung stellt einen solchen Schritt dar, zu dem eine Langzeitsicherheitsanalyse in jedem Fall sinnvoll ist, weil

- die Erkenntnisse aus der Erkundung in einer umfassenden Langzeitsicherheitsanalyse ganzheitlich und in allen fachlichen Zusammenhängen abgebildet werden können,
- mit diesem Schritt regulatorische und politische Entscheidungen verknüpft sind und die sicherheitsbezogenen Aspekte, einschließlich der noch verbleibenden Unsicherheiten und ihren Auswirkungen, mit einer umfassenden Sicherheitsanalyse sinnvoll ermittelt und kommuniziert werden können, und
- die Ergebnisse bei der Meinungsbildung in der Fach-Community ebenso wie im gesellschaftlich-politischen Kontext eine Rolle spielen und daher klare, anschauliche Beschreibungen des erreichten Kenntnisstands und der verbleibenden Unsicherheiten und ihrer Einordnung notwendig sind.

Typischerweise ist für die Sicherheitsanalyse in dieser Phase auch eine unabhängige Überprüfung durch die für die Endlagersicherheit zuständigen Behörden vorzusehen (/IAE 06a/ Abschnitt 3.44, /GRS 07/ Abschnitt 1.7). Die dafür vorgesehenen rechtlichen Regelungen sind länderspezifisch festgelegt, in Deutschland stehen entsprechende Regelungen aus. Zusätzlich zum jeweiligen nationalen Instrumentarium zur Überprüfung der Sicherheitsanalyse in dieser Phase kommen auch internationale Reviews (z.B. durch OECD/NEA-Expert-Reviews oder IAEA Peer Reviews) in Frage, die vom jeweiligen Betreiber oder auf nationaler Ebene initiiert sein können (z.B. /NEA 04/).

Am Ende dieser Phase muss die technische Auslegung des Endlagers soweit ausgearbeitet sein, dass die charakteristischen technischen Merkmale abgeleitet werden können und die Sicherheitsanalyse auf den entsprechenden technischen Angaben aufbauen kann. Für die Langzeitsicherheitsanalyse sensitive technische Parameter des Endlagers müssen mit der notwendigen Detailtiefe und Aussagesicherheit ermittelt sein, während andere technische Parameter noch mit größeren Bandbreiten oder Unsicherheiten ermittelt oder mittels plausiblen Annahmen geschätzt vorliegen können.

### **3.4 Auslegung in der Phase der Standortcharakterisierung**

Ist ein Standort auf Basis der bisher beschriebenen Erkundungsschritte gewählt bzw. bestätigt, besteht die Aufgabenstellung in der nächsten Phase in der Zusammenstel-

lung aller für einen Zulassungsantrag erforderlichen Nachweise, wozu u.a. auch die Nachweisführung über die Langzeitsicherheit gehört. Von den durchzuführenden Untersuchungen her geht es um die Charakterisierung des ausgewählten Standorts und um den abschließenden Nachweis seiner Eignung. Die in diesem Nachweis verwendeten Parameter müssen gut abgesichert sein. Ihre Varianz muss bekannt sein und berücksichtigt werden. Unsicherheiten müssen über konservative Herangehensweisen abgedeckt werden. Insgesamt muss die Robustheit nachgewiesen werden.

Gleichzeitig muss die technische Auslegung erfolgen. Diese muss so ausgearbeitet vorliegen, dass im Zulassungsverfahren für alle relevanten technischen Einrichtungen des Endlagers und für alle vorgesehenen technischen Verfahrensschritte die Realisierbarkeit nach Stand der Technik und insbesondere ihre sicherheitstechnische Durchführbarkeit nachgewiesen wird. Die dieser Nachweistiefe entsprechenden technischen Details müssen festgelegt sein, wozu in der Regel konzeptionelle Planungen und entsprechende Rahmenangaben ausreichend sind. Planungen in einer Detailtiefe, wie sie z. B. für die Fertigung technischer Einrichtungen notwendig wären, sind in der Phase noch nicht sinnvoll und für den Nachweis nicht notwendig. Es ist zu beachten, dass der Nachweis der grundsätzlichen technischen Realisierbarkeit der einzelnen technischen Einrichtungen bzw. der technischen Verrichtungen einen zeitlichen F&E-Vorlauf benötigt, daher ist es erforderlich, die jeweiligen Nachweisführungen rechtzeitig zu beginnen.

Die technische Detailauslegung des Endlagers geht in dieser Phase unmittelbar in wichtige und häufig auch sensitive Bereiche der Langzeitsicherheitsanalyse ein, z. B. das Einlagerungskonzept und die Behälterkennzahlen in die Modellierung des Nahfelds. Insofern ist eine enge Abstimmung zwischen den Notwendigkeiten in der Langzeitsicherheitsanalyse und dem Detaillierungsgrad der technischen Auslegung im Verlauf der Standortcharakterisierung sinnvoll.

Internationale Anforderungen an die Auslegung in dieser Phase der Realisierung sind in /IAE 06/ formuliert:

- Die Auslegung muss so gewählt werden, dass die Schadstoffe langfristig eingeschlossen werden. Sie muss mit den physikalischen und chemischen Verhältnissen im Wirtsgestein kompatibel sein. Die Anlage und das Engineering müssen die Sicherheit in der langen Betriebsphase garantieren (para 3.57).

- Die Auslegung soll die vorhandenen günstigen geologischen Eigenschaften optimal nutzen, z. B. durch Platzierung der Einlagerungsbereiche in besonders gut geeigneten Gesteinsbereichen, und die günstigen Eigenschaften durch eine geeignete Platzierung von Schächten und Verschlüssen erhalten und fördern (para 3.58).
- Wegen der langen Zeiträume, über die Vorhersagen über das Langzeitverhalten von Materialien erforderlich sind, sind Maßnahmen zur Erhöhung des Vertrauens in solche Prognosen notwendig. Dazu sollen Untersuchungen natürlicher Vorgänge mit langen Zeithorizonten sowie an Gegenständen und Bauten mit hohem Alter herangezogen werden. Ferner sollen notwendige technische Fertigungsschritte für Endlagerbehälter und Verschlüsse in Versuchsanlagen, z. B. in Untertagelabors, erprobt und demonstriert werden, um das notwendige Vertrauen zu gewinnen (para 3.59).

Nationale Anforderungen an die Auslegung in dieser Phase betreffen /GRS 07/

- die Eignung des Standorts, die bereits bei der Feststellung der Standorteignung behandelt wurde und in der jetzigen Phase weiter vertieft und verifiziert wird,
- Abfälle und Behälter: ihre Form (fest oder verfestigt), ihre thermischen Eigenschaften und ihren hermetischen Einschluss zur sicheren Handhabung in der Einlagerungsphase /RSK 08/ bzw. ggfs. darüber hinaus für einen festzulegenden Zeitraum (z. B. über 1.000 Jahre in /GRS 07/ bzw. 500 Jahre in /BMU 08/),
- das Endlagerbergwerk: Schachtansatzpunkte und Schachtausbau, Standfestigkeit und Isolationsvermögen der Grubenbaue und die Standsicherheit als Folge der Einlagerung (z. B. Gas- und Wärmeeinwirkung),
- die Planung des eigentlichen Endlagerbetriebs (zu dieser Anforderung siehe unten in Kapitel 4).

Derzeit ist die Standortcharakterisierung für Endlager mit hochradioaktiven Abfällen international nur im Fall Yucca Mountain, USA, bis zur Antragstellung /DOE 08/ fortgeschritten, so dass ergänzende praktische Erfahrungen mit der Auslegung in dieser Phase lediglich aus diesem Verfahren herangezogen werden können. Entsprechende Darstellungen des Engineering sind verfügbar /DOE 02/ und verdeutlichen die engen Zusammenhänge zwischen betrieblichen, geologischen, sicherheitstechnischen und die Langzeitsicherheit betreffenden Aspekten.

#### **4 Auslegung in der Errichtungs- und Betriebsphase eines Endlagers**

Mit der Beantragung und der Genehmigung eines Endlagers sind die wesentlichen Auslegungsmerkmale der Anlage in sicherheitstechnischer und in technischer Hinsicht festgelegt. Es ist damit abschließend geprüft, dass die beantragte Auslegung von der technischen, bergtechnischen, betrieblich-sicherheitstechnischen Seite und von der Langzeitsicherheit her sicher errichtet und betrieben werden kann. Ferner ist nachgewiesen, dass das Endlager nach Beendigung des Betriebs sicher verschlossen werden kann.

Anforderungen an die Auslegung in der Phase der Errichtung sind überwiegend bereits in der Planungsphase vorzubereiten. Speziell für die Errichtungsphase ist im internationalen Regelwerk /IAE 06/ gefordert, dass vermeidbare Eingriffe in die geologische Barriere vermieden werden sollen und dass für das Überlappen zwischen der Errichtung untertägiger Lagerhöhlräume und der gleichzeitigen Einlagerung von Abfällen in andere Lagerhöhlräume für beide Tätigkeiten die Sicherheit zu garantieren ist. Für die Betriebsphase sind überwiegend nicht die Auslegung betreffende Anforderungen angesprochen. Lediglich die Übereinstimmung des Betriebs mit den der Auslegung zugrunde liegenden Randbedingungen und erhöhte Anforderungen an die Dokumentation sind mit Auslegungsmerkmalen verknüpft.

Im Entwurf der Sicherheitsanforderungen für ein Endlager /GRS 07/ wird für die Errichtung die Einhaltung der bereits in Kap.3 dargestellten Merkmale gefordert, die sich wesentlich auf die Planungsphase beziehen.

Zusätzlich sind der Einlagerungsbetrieb und seine Planung geregelt. Wesentlich sind dabei im Hinblick auf die Auslegung die Gliederung nach Einlagerungsfeldern und die Minimierung der Offenhaltung von Einlagerungsbereichen. Diese Forderung führt dazu, dass die Einlagerungsbereiche im Detail erst mit ihrer Auffahrung bekannt werden, während diese vorher auf der Basis zerstörungsfreier Erkundungsmethoden erkundet werden konnten. Dies kann zu geringfügigen Änderungen in der Auslegung der Einlagerungsbereiche Anlass bieten, falls wider Erwarten ungünstige Bedingungen vorgefunden werden. Im Laufe der Errichtung des Endlagers und im Betrieb ist ferner sicher zu stellen, dass die Auslegungsmerkmale, die den Prüfungen und der Genehmigung zugrunde gelegt wurden, eingehalten sind („Überwachung der Auslegungsparameter“).

## **5 Auslegung in der Verschlussphase des Endlagers**

Der Nachbetrieb des Endlagers wird mit seinem Verschluss herbeigeführt. Für die Phase des Verschlusses ist die Detailauslegung der Abschlussbauwerke sowie der Schächte auf dem dann bestehenden Stand von Wissenschaft und Technik erforderlich. Anforderungen an die Materialauswahl und Zuverlässigkeit wurden bereits oben implizit beschrieben. In dieser Phase sind Merkmale der Auslegung die konkrete Materialauswahl und das detaillierte Engineering zur Herstellung der Verschlüsse.

Internationale Anforderungen zur Auslegung in dieser Phase /IAE 06/ sind allgemein gehalten. Sie fordern lediglich, dass die Materialien geeignet sind und die entsprechenden Arbeiten so durchgeführt werden, wie es der Auslegung in der Genehmigungsphase zugrunde lag (para 3.68 in /IAE 06/).

Im Entwurf zu den Sicherheitsanforderungen für Endlager /GRS 07/ wird für die Auslegung der Verschlüsse die Einhaltung des dann geltenden Standes von Wissenschaft und Technik gefordert.

## 6 Stand der Auslegung in Deutschland

In Deutschland werden als potenzielle Wirtsgesteine sowohl Steinsalz als auch Tonstein diskutiert, z.B. /BGR 07a/. Der Stand der Auslegung eines Endlagers in diesen beiden Formationen befindet sich jeweils in der Planungsphase, unterscheidet sich jedoch im Detaillierungsgrad.

### Steinsalz

Untersuchungen im Wirtsgestein Steinsalz werden seit über 30 Jahren durchgeführt. Bis zum Moratorium 2000 fanden standortspezifische Untersuchungen am Salzstock Gorleben statt. Hier wurden neben Erkundungsbohrungen und anderen geologischen, hydrogeologischen und geophysikalischen Untersuchungen Erkundungsschächte und ein Grubengebäude für die Erkundung aufgefahren (siehe z.B. /BGR 08/). Auf Grundlage der im Verlauf der Erkundung gewonnenen Kenntnisse wurden technische Konzepte entwickelt und verfeinert:

1. Basierend auf den Ergebnissen der Vorerkundung des Salzstockes wurde das technische Konzept für ein Endlager in Steinsalz in /PAE 89/ beschrieben und in Teilberichten die Planung der Grubengebäude und der Untertageanlagen erarbeitet.
2. Im Auftrag des BfS wurde 1998 eine aktualisierte Fassung des technischen Konzepts erarbeitet /DBE 98/.

Die technischen Konzepte für Steinsalz und die Auslegung der Tages- und Untertageanlagen sind auch deshalb weit entwickelt, weil aus dem Salzbergbau über die Auslegung und den Betrieb von Untertageanlagen in Salzgestein umfangreiche praktische Erfahrungen aus dem Bergbau vorliegen, die für das Design genutzt werden konnten.

Detaillierte Informationen zu dem Einlagerungskonzept in Steinsalz in Deutschland gibt der Anhang Endlagerbetrieb.

Zurzeit haben die bisher erarbeiteten Konzepte keinen formellen Status, etwa als formelle Unterlage in einem Genehmigungsverfahren. Es bleibt einer zukünftigen Entscheidung vorbehalten, formell das gültige technische Konzept für die Endlagerung in einem deutschen Salzstock festzulegen.

Der bei der Auslegung erreichte Detaillierungsgrad entspricht dem bei der Erkundung gewonnenen Kenntnisstand in Deutschland. Die grundsätzlichen Fragestellungen sind als gelöst einzuordnen. Derzeit werden noch Varianten der Einlagerungstechniken untersucht (Optimierung). Da Deutschland zurzeit das einzige Land ist, in dem die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzstöcken verfolgt wird und der Entwicklungsstand weit fortgeschritten ist, spielt der internationale Austausch bei diesem Wirtsgestein praktisch keine Rolle. Eine weitere Detaillierung der Planungen ist nach erfolgter Eignungsuntersuchung des Standortes erforderlich.

### **Tonstein**

Während im Wirtsgestein Steinsalz also bereits obertägige Standorterkundungen und Erfahrungen aus der fortgeschrittenen untertägigen Charakterisierung vorliegen, gibt es bei der Endlagerung in Tongesteinen in konzeptioneller Hinsicht in Deutschland noch mehr offene Fragen. Auf diesem Gebiet haben in Deutschland weder obertägige noch untertägige Erkundungen stattgefunden. Dennoch ist der international vorliegende Stand der Auslegung fortgeschritten, da Ton und speziell Tonstein in vielen Ländern als Endlager-Wirtsgestein verfolgt werden.

Die vorliegenden Erfahrungen mit der Auslegung in diesem Wirtsgestein stammen daher überwiegend aus internationalen Zusammenhängen:

- Seit vielen Jahren betreiben Belgien, Frankreich und die Schweiz Untertagelabore in Ton und Tonstein und verfügen daher über technische Erfahrung bei der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen in diesem Gestein.
- In Frankreich ist die Entwicklung von Einlagerungskonzepten für Abfallbehälter in Tonstein weit entwickelt /AND 05/.
- Mit der technischen Konzeption, die die NAGRA im Rahmen des Entsorgungsnachweises für die Endlagerung in Tonstein vorgelegt hat, ist auf Basis der obertägigen Erkundung des Wirtsgesteins die Errichtung und der Betrieb eines entsprechenden Endlagers detailliert geplant /NAG 02b/.
- In vielen Ländern wurden Tunnelbaue in Tonsteinformationen errichtet und langfristig betrieben. Die dabei gewonnenen Erfahrungen werden ausgewertet und berücksichtigt.

Die Dokumentation entsprechender Ergebnisse und Erfahrungen in Berichten, die Zusammenarbeit unter deutscher Beteiligung in Untertagelaboren und die Auswertung anderer nicht-endlagerspezifischer Vorhaben sorgen für den entsprechenden Know-How-Transfer. Erste Konzeptorientierte FuE-Vorhaben (z.B. GEIST, GENESIS; ERATO) in Tongesteinen wurden ohne konkreten Standortbezug durchgeführt.

### **Künftige Arbeiten**

Sowohl im Salz als auch in Tongestein sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die Auslegung zu optimieren. Nach dem aktuellen Förderkonzept des BMWi sollen die Arbeiten in Salzgesteinen dabei Priorität besitzen, während parallel versucht wird, den Kenntnisstand in Tongesteinen auf einen möglichst hohen Stand zu bringen /BMW 07/.



## 7 Literatur

Hinweis: Dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur.

- /AKE 02/     Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd. - Bonn 2002
- /AND 05/     Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile. – Paris 2005
- /BFS 08/     Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Homepage - Abfallmengen / Prognosen. – Abrufbar unter:  
[http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall\\_prognosen.html](http://www.bfs.de/de/transport/endlager/abfall_prognosen.html) am 24.07.2008
- /BGR 07a/    Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen,- Hannover/Berlin 2007
- /BGR 07b/    Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen,- Berlin/Hannover 2007
- /BGR 08/     Homepage der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. – Abrufbar unter <http://www.bgr.bund.de/> am 21.7.2008
- /BMU 08/     Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Entwurf -. – 29.07.2008,  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlage\\_1\\_2008\\_jul\\_entwurf\\_bmu.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlage_1_2008_jul_entwurf_bmu.pdf)

- /BMW 07/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und Forschungszentrum Karlsruhe Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Schwerpunkte zukünftiger FuE Vorhaben bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010), -2007
- /BOR 01/ Bork, M.; Kindt, A.; Nierste, G.; Walterscheidt, K.-H.: Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. – GRS-A-2834, Köln, Januar 2001
- /DBE 98/ DBE: Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ – Abschlussbericht. – Peine, 13.03.1998
- /DBE 07/ DBE Technology: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS. – Abschlussbericht, Peine 2007: Abrufbar unter: <http://www.dbetec.de/fileadmin/dbetec/downloads/Generisches%20Endlager%20im%20Tonstein.pdf> am 24.07.2008
- /DOE 02/ Department of Energy/Office for Civilian Radwaste Management (DOE/OCRWM): Yucca Mountain Science and Engineering Report Rev 1. - DOE/RW-0539-1, Washington Februar 2002, [http://www.ocrwm.doe.gov/documents/ser\\_b/index.htm](http://www.ocrwm.doe.gov/documents/ser_b/index.htm)
- /DOE 08/ Department of Energy/Office for Civilian Radwaste Management (DOE/OCRWM): Yucca Mountain Repository License Application. – DOE/RW-0573, Rev. 0, Las Vegas, June 2008
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefengeologischen Formationen. – Entwurf der GRS, Köln 2007.
- /IAE 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide. – Safety Series No 111-G-4 1, Vienna 1994

- /IAE 97/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Experience in selection and characterization of sites for geological disposal of radioactive waste. - IAEA-TECDOC-991, Vienna 1997
- /IAE 06a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste- Safety Requirements. - IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, Vienna 2006, Abrufbar unter: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1231\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1231_web.pdf) am 24.07.2008
- /IAE 06b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Safety Standards Series for protecting people and the environment, „Classification of Radioactive Waste“. - Draft Safety Guide No. DS 390, Stand 03.07.2006
- /NAG 02a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston. – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - NTB02-02 Wettingen (CH), Dezember 2002.
- /NAG 02b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston. – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - NTB02-03 Wettingen (CH), Dezember 2002.
- /NAG 02c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Project Opalinusclay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). – Nagra Technical report NTB 02-05, Wettingen, 2002.
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency (NEA): Safety of disposal of spent fuel, HLW and long-lived ILW in Switzerland: An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Züricher Weinland. - OECD, 2004

/PAE 89/ Projekt Andere Entsorgungstechniken (PAE): Systemanalyse Mischkonzept. – PAE-Berichte, Karlsruhe 1989

/RSK 08/ Reaktorsicherheitskommission (RSK)/Strahlenschutzkommission (SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“. - Verabschiedet von der RSK auf ihrer 408. Sitzung am 09.05.2008, verabschiedet von der SSK auf ihrer 224. Sitzung am 03.07.2008, 03.07.2008,

<http://www.rskonline.de/downloads/rsksskstellungnahmeendg.pdf>

## 8 Weiterführende Literatur

Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im Literaturverzeichnis.

Bel, J., Bernier, F. (2006): Temperature criterion related to the engineered barriers in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (vitrified waste or spent fuel), NIRAS/ONDRAF und EIG EURIDICE, Belgien.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich – Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter, 2005  
[http://www.bfs.de/transport/publika/endlager/Synthesebericht\\_Endfassung.pdf](http://www.bfs.de/transport/publika/endlager/Synthesebericht_Endfassung.pdf) am 24.07.2008.

Fischer, M. et al. (BGR): Endlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Hannover, August 1995.- Abrufbar unter:  
[http://www.bgr.bund.de/cIn\\_006/nn\\_324940/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR\\_\\_salzstudie.html](http://www.bgr.bund.de/cIn_006/nn_324940/DE/Themen/Geotechnik/Downloads/BGR__salzstudie.html) am 24.07.2008

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz, AtG) vom 23.12.1959, in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 9 Abs. 11 des Gesetzes vom 23. November 2007 (BGBl. I S.2631)". - Neugefasst durch Bek. v. 15.7.1985 I 1565; zuletzt geändert durch Art. 9 Abs. 11 G v. 23.11.2007 I 2631

Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung); BGBl Teil II, Nr. 31,S. 1752, 1998

International Atomic Energy Agency (IAEA): Principles of Radioactive Waste Management: A Safety Fundamental, Safety Series No. 111-F, STI/PUB/989, Vienna, 1995

International Atomic Energy Agency (IAEA): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. - INFCIRC/546, 24 Dec. 1997.- Abrufbar unter:  
<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infirc546.pdf>  
am 24.07.2008

International Atomic Energy Agency (IAEA): The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability. – Wien 2003.- Abrufbar unter:  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf) am  
24.07.2008

Internationale Strahlenschutz-Kommission (ICRP): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. – Annals of the ICRP, Publication 81, 1999 (Elsevier/Pergamon Press, 2000)

Jobmann, M.; Uhlig, L.; Amelung, P.; Billaux, D.; Polster, M.; Schmidt, H.; Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS -. – Abschlussbericht, Peine, März 2007, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb07/541557718.pdf>

Müller-Hoeppe, N; Krone, J.; Biurrun, E;Haverkamp, B.: Safety by Design – the Role of Repository Design within the Safety Case, Technical Meeting on Planning and Design of Geological Repositories, Vienna, 25-27 September 2006, IAEA

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle Wettingen Nagra Technical report 02-03, 2002.

- Papp, R.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein (GEISHA). – Karlsruhe 1997,  
<http://tiborder.gbv.de/psi/DB=2.63/SET=13/TTL=1/CLK?IKT=1016&TRM=GEISHA>
- Pöhler, M.: Entwicklung von Konzepten für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tongestein. – Peine, 10.06.2008,  
[http://www.dbetec.de/uploads/media/oo\\_poehler\\_erato\\_10-11\\_juni\\_2008.pdf](http://www.dbetec.de/uploads/media/oo_poehler_erato_10-11_juni_2008.pdf)
- Reaktor-Sicherheitskommission / Strahlenschutzkommission (RSK/SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien Stellungnahme der Strahlenschutzkommission und der Reaktor-Sicherheitskommission, Bonn 2002.- Abrufbar unter: <http://www.ssk.de/werke/volltext/2002/ssk0221.pdf> am 24.07.2008.
- Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): RSK-Stellungnahme zum Synthesebericht des BfS „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich“, 2006
- Rübel, A., Müller-Lyda, I., Storck, R.: Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung, Gesellschaft für Reaktorsicherheit GRS-203, Braunschweig, 2004
- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001, (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Art. 2 § 3 Abs. 31 G v. 1. 9.2005 I 2618
- Wallner, M, Lux, K.H., Minkley, W. und Hardy, H.R., Jr.: The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt- -Proceedings of the 6th conferences on mechanical behavior of salt „Saltmech6“, Hannover, 22.-25. May 2007