

**Gegenüberstellung von
Endlagerkonzepten in Salz und
Tongestein (02 E 9511)**

**Abschlussbericht
Hauptband**

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2004

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), vertreten durch den Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung im Forschungszentrum Karlsruhe, durchgeführt (FKZ 02 E 9511). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH oder ihrer Auftraggeber ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

Projektleiter:

**W. Filbert
DBE TECHNOLOGY GmbH**

Bearbeiter:

**P. Amelung
E. Biurrun
W. Bollingerfehr
W. Filbert
N. Müller-Hoeppe
J. Ziegenhagen
DBE TECHNOLOGY GmbH**

**J. Behrens
L. Fleckenstein
M. Hampe
M. Khamis
J. Kutowski
N. Niehues
T. Schwarz
Deutsche Gesellschaft zum
Bau und Betrieb von Endlagern
für Abfallstoffe mbH (DBE)**

**B. Kienzler
A. Bauer
A. Loida
V. Metz
Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Nukleare Entsorgung
(INE)**

**R. Kilger
E. F. Moser
B. Gmal
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH**

**H.-G. Fiederling-Kapteinat
HGF Consulting**

**G. Bracke
W. Müller
Institut für Sicherheitstechnologie
ISTEC**

**W. Fiebiger
M. Schellhorn
Stephan Schmidt KG**

Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST)“ wurde ein Endlagerkonzept im Tongestein entworfen und dem für Steinsalz vorliegenden Konzept gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung konzentrierte sich auf die Bereiche Technik, Sicherheit und Kosten. Dabei wurden die charakteristischen Unterschiede zwischen einem generischen Endlager für hochaktive Abfälle im Salz und einem in Tongestein herausgearbeitet und offene Fragen identifiziert.

In sechs Anlagenbänden (A1 - A6) sind die Ergebnisse des Vorhabens im Detail und im vorliegenden Hauptband zusammenfassend beschrieben. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus sind:

Im Anlagenband A1 (Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton) wurden die veröffentlichten internationalen Überlegungen und Ansätze für Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung fanden dabei die zugrundeliegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweiskonzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierung der Endlager, soweit verfügbar. In allen 4 betrachteten Ländern werden Kernkraftwerke betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist mit dem deutschen vergleichbar. In allen 4 Ländern gibt es ein gemeinsames Auslegungskriterium. Die thermische Auslegung des Endlagers basiert auf einem Temperaturkriterium von max. 100 °C für das Verfüllmaterial Bentonit. Bei höheren Temperaturen verliert dieses Material seine Dichteigenschaften.

In *Belgien* sind je nach Endlagerszenarium sind entweder nur verglaste Abfälle oder verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente werden jeweils einzeln in einen dünnwandigen Overpack endlagergerecht verpackt. Belgien betreibt ein Untertagelabor in Boom-Ton in Mol. Das dort durchgeführte Forschungsprogramm soll die Machbarkeit und die Langzeitsicherheit der Endlagerung in geologischen Formationen demonstrieren. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder für verglaste Abfälle und für ausgediente Brennelemente in einer Teufe von 230 m zwischen 2 Zugangsschächten vor. Das Endlager wird der Neigung der Tonformation 1°- 2° folgend ausgerichtet. Die Einlagerung der Endlagergebäude erfolgt in horizontalen bentonitummantelten Stahlröhren in mit Betonformsteinen ausgebauten runden Strecken. Der Nachweis der Langzeitsicherheit erfolgt schrittweise und iterativ. Hierzu werden Szenarien entwickelt und bewertet. Ausgegangen wird von den Szenarien „normale Entwicklung des Endlagers“ als Referenzszenarium und „gestörte Entwicklung des Endlagers“. Die Sicherheitsbewertung für das Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers beruht auf der Berechnung der Individualdosis einer kritischen Gruppe und auf der Bewertung von Sicherheitsindikatoren. Die Szenarien zur gestörten Entwicklung werden zurzeit untersucht.

Der Betriebsbeginn des Endlagers wird nach 50 – 60 Jahren Abkühlzeit für wärmeentwickelnden HAW und ausgediente Brennelemente für das Jahr 2035 angestrebt.

In der *Schweiz* sind sowohl verglaste Abfälle als auch ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente sollen in massive Endlagerbehälter mit verschweißtem Deckel endlagergerecht verpackt werden. In der Schweiz wird der Opalinuston untersucht. Hierzu wurde am Mont Terri im Kanton Jura ein Unterlagelabor betrieben und der Opalinuston im Züricher Weinland untersucht. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 650 m, erreichbar über einen Schacht und eine Rampe, vor. Die Einlagerungsstrecken werden mit einer Neigung von ca. 7° dem Schichteneinfall der Tonformation folgend errichtet. Die Einlagerung der Endlagergebäude erfolgt in mit Ankern und Netzen gesicherten runden Einlagerungsstrecken. Die Endlagergebäude werden mit Bentonit umgeben. Hinsichtlich des Sicherheitsnachweiskonzepts ist die Einhaltung der Prinzipien der sicheren Endlagerung sowie der Schutzziele zu jeder Stufe des Bewilligungsverfahrens (Rahmen-, Bau-, Betriebs- und Verschlussbewilligung) mit entsprechenden Sicherheitsanalysen nachzuweisen. Mit den Sicherheitsanalysen ist darzulegen, welche Vorgänge und Ereignisse auf das Endlagersystem im Laufe der Zeit einwirken könnten, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen abzuleiten. Vorgänge und Ereignisse mit extremer Unwahrscheinlichkeit und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Konsequenzen haben, sowie absichtliche menschliche Eingriffe in das Endlagersystem brauchen in der Sicherheitsanalyse nicht betrachtet zu werden. Der Betriebsbeginn des Endlagers wird um das Jahr 2050 als erforderlich angesehen.

In *Frankreich* ist die Menge der Abfälle deutlich größer. Je nach dem, wie intensiv wieder aufgearbeitet wird, schwankt je nach Endlagerszenarium der Anteil an endzulagernden verglasten Abfällen bzw. ausgedienten Brennelementen. Verglaster Abfall und ausgediente Brennelemente werden in Primärbehälter verpackt. Die Primärbehälter werden wiederum in Endlagerbehälter (Overpacks) zur Erreichung der Endlagerfähigkeit eingebracht. Seit 1999 wird ein Untertagelabor in Bure (Department Haute-Marne) errichtet. Die Forschungsstätte wird auf der 490 m-Sohle im Callov-Oxford-Ton betrieben. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 485 m vor, die über mehrere Schächte und eine Rampe mit den Tagesanlagen verbunden sind. Die runden Einlagerungsstrecken werden mit einem Metallrohr stabilisiert. In das Metallrohr werden Bentonitringe eingebracht, in denen wiederum ein inneres Metallrohr eingebracht wird. Dieses innere Rohr wird mit Endlagergebäuden befüllt. Im Sicherheitsnachweiskonzept soll durch qualitative und quantitative Sicherheitsanalysen nachgewiesen werden, dass das gewählte Endlagerkonzept den Anforderungen an den Schutz der Menschen und der Umwelt über die gesamte Dauer der Existenz des Endlagers gerecht wird. Dabei wird auch ein Referenzszenarium der ungestörten Entwicklung und ein verändertes Szenarium der gestörten Entwicklung, verursacht durch zerstörende Ereignisse oder Phänomene betrachtet. Für eine Realisierung des geologischen Endlagers liegt noch kein Terminplan vor.

In *Spanien* sind auch hier verglaste Abfälle sowie ausgediente Brennelemente in Overpacks endzulagern. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von 250 m vor, erreichbar über 3 Schächte und eine Rampe. Verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken mit einem Durchmesser von 2,4 m endgelagert. Die Endlagerstrecke wird mit Bentonitblöcken ausgebaut und in die zentrale Position ein Einlagerungsrohr zur Befüllung mit den Endlagergebänden eingebracht. 2010 wird das spanische Parlament auf der Basis bis zu diesem Zeitpunkt erreichter Forschungsergebnisse entscheiden, wie mit den Abfällen verfahren wird. Zu Planungszwecken wird von einer Inbetriebnahme des Endlagers im Jahre 2035 ausgegangen. Die Bestimmung eines Standortes oder die Festlegung einer Wirtsgesteinsformation wird zur Zeit nicht durchgeführt.

Im vorliegenden **Anlagenband A2** erfolgt ein Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton sowie eine Darstellung der Vor- und Nachteile der Wirtsgesteine. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt in fünf Bereichen:

Bergbau in den Wirtsgesteinen Salz und Ton

Der Bergbau im Wirtsgestein Salz ist aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges und der einfachen Herstellbarkeit von Strecken und Kammern und Bohrungen gut beherrschbar. Erfahrungen dazu liegen aus mehr als 100 Jahren Salzbergbau vor. Je nach Kriechrate werden in größeren zeitlichen Abständen Nachschneidemaßnahmen an den Strecken und Kammern durchgeführt, um die erforderlichen Lichtraumprofile einzuhalten. Bohrlöcher zur Wetterführung oder zur Einlagerung von Endlagergebänden lassen sich im Trockenbohrverfahren einfach herstellen. So können Salzbergwerke über viele Jahrzehnte sicher ohne stützenden Ausbau betrieben werden.

Bergbau auf Ton in einer für ein Endlager relevanten Teufe existiert in Deutschland nicht, da abbauwürdige Tonformationen an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden. Eine Untersuchung oberflächennaher Bergwerke bis zu einer Teufe von 80 m zeigte, dass dort ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die Grubenräume erforderlich ist. In der Schachtanlage Konrad im niedersächsischen Salzgitter sind demgegenüber während der Betriebszeit als Eisenerzbergwerk Strecken im Ton in größeren Teufen bergmännisch aufgefahren worden. Es zeigte sich, dass der Ton dort gegen die Feuchtigkeit der Wetter geschützt werden muss. Hierzu reichen ca. 7 cm Spritzbeton mit leichten Bewehrungsmatten zur Stabilisierung aus. Bei ungünstigen geologischen Spannungszuständen kann ein stärkerer, z. B. doppelschaliger, Stahlbetonausbau erforderlich sein. Die durchzuführenden Stabilisierungsmaßnahmen sind formations- und teufenabhängig. Das Bohren in Ton ist mit über Tage eingesetzter Technik nach entsprechenden Anpassungen im Prinzip auch unter Tage möglich. Für die Einlagerung von Endlagergebänden in Bohrlöchern ist im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz jedoch eine Bohrlochverrohrung erforderlich.

Endlagerbehälterkonzepte

Die Anforderungen an die Endlagergebäude leiten sich für die Wirtsgesteinsformationen Salz und Ton aus unterschiedlichen Sicherheitsnachweiskonzepten ab. Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Konzeptführend ist hier die Barrierefunktion der (natürlichen) geologischen Barriere und des Schachtverschlusses. Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen und geotechnischen Barrieren konzeptführend.

Deshalb muss im Wirtsgestein Ton der Endlagerbehälter für einen sehr langen Zeitraum intakt bleiben, d. h. der Behälter muss für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmedium sowie dem Gebirgsdruck standhalten. Als zusätzlicher Effekt ist die mögliche Korrosion der Behälter durch auf der Oberfläche abgelagertem Salz aus dem Siedeeffekt von über 100 °C aufgeheizten Formationswässern zu beachten. Darüber hinaus wird aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Verfüllmaterials Bentonit, dessen Quellfähigkeit bei Temperaturen > 100 °C stark eingeschränkt wird, im Wirtsgestein Ton in der Regel die Belademenge der Endlagergebäude eingeschränkt.

Einlagerungskonzepte und daraus resultierende erforderliche Endlagerflächen

Für einen Vergleich der Endlagerkonzepte können keine realen geologischen Verhältnisse zugrunde gelegt werden, weil keine Standorte benannt und hinreichend erkundet sind. Deshalb werden theoretische Mindestflächen für die Einlagerung der Endlagergebäude anhand von sogenannten Einheitszellen ermittelt und für die beiden Wirtsgesteinsformationen vergleichend gegenübergestellt. Einheitszellen stellen den theoretisch für ein spezifisches Endlagergebäude aufgrund seiner Wärmemenge erforderlichen Endlagerflächenbedarf dar.

Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüsts von 1 657 POLLUX-10 (Zwischenlagerzeit 30 Jahre, Einheitszelle mit 237 m²) für die Streckenlagerung eine Netto-Endlagerfläche von ca. 0,5 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommt für die Bohrlochlagerung von 4778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 15 Jahre, Einheitszelle mit 2 217 m²) eine Netto-Endlagerfläche von ca. 0,051 Mio. m². Damit beträgt der Gesamt-netto-Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlager in Salz ca. 0,55 Mio. m².

Für das Wirtsgestein Ton ist zunächst eine entsprechende Umrechnung erforderlich. Demnach ergibt sich von 1 657 POLLUX-10 in 5 524 POLLUX-3 Gebäude (Zwischenlagerzeit 31 Jahre, Einheitszelle mit 764 m²) aufgrund des Temperaturkriteriums von max. 100 °C. eine Netto-Endlagerfläche von ca. 4,22 Mio. m². Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von 4 778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 40 Jahre, Einheitszelle mit 780 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 0,533 Mio. m². Damit beträgt der Gesamt-netto-Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlagerkonzept in Ton ca. 4,75 Mio. m². Beim Vergleich mit dem Flächenbedarf im Wirtsgestein Salz sind insbesondere die unterschiedlichen Zwischenlagerzeiten zu berücksichtigen.

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern in Ton wurde die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK) untersucht und mit dem Einlagerungskonzept der BSK 3 (enthält die Brennstäbe von 3 DWR-Brennelmenten) für Salz verglichen. Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüsts von 5 524 BSK 3 (Zwischenlagerzeit 10 Jahre, Einheitszelle mit 2 235 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 0,23 Mio. m² benötigt. Im Wirtsgestein Ton wird nach der entsprechenden Umrechnung auf 8 286 BSK 2 (Zwischenlagerzeit 32 Jahre, Einheitszelle mit 2 165 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 4,49 Mio. m² erforderlich. Ein direkter Vergleich mit dem Konzept im Wirtsgestein Salz ist nicht möglich, da im Ton erst nach einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren gegenüber 10 Jahren im Salzkonzept die Brennstabkokillen vom Endlager angenommen werden können.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse zum Vergleich zusammen. Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur von 100 °C und den geringeren möglichen Bohrloch-tiefen ist ein deutlich höherer Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton erforderlich.

Endlagerkonzept	Streckenlagerung		Bohrlochlagerung		
	POLLUX-10	POLLUX-3	HAW-Kokillen	BSK 3	BSK 2
Im Wirtsgestein Salz [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	0,5/(30)	-	0,051/(15)	0,23/(10)	-
Im Wirtsgestein Ton [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	-	4,22/(31)	0,533/(40)	-	4,49/(32)

Vergleich der erforderlichen Endlagerflächen in Salz und Ton

Verfüll- und Verschlusskonzept

Ein Vergleich der Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in Salz und Ton zeigt, dass die wesentlichen Unterschiede in dem Material bestehen, das zur Verfüllung der Strecken und Kammern genommen wird. Während beim Endlager in Salz das bei der Auffahrung der Strecken anfallende Salzgrus genommen wird, müssen beim Endlager in Ton die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt und ins Endlager transportiert werden. Die Einbringtechnologie in Strecken und Kammern dafür unterscheidet sich ebenfalls wesentlich. Salzgrus wird mit entsprechender Fördertechnik (Blas- oder Schleuderversatz) ohne zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen eingebracht. Bentonit und Bentonit/Sand - Gemische müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert in die Strecken und Kammern respektive Bohrlöchern einbebaudet werden.

Hinsichtlich der Schachtverfüllung und -verschlüsse sind die Unterschiede deutlich geringer. In beiden Endlagerkonzepten werden setzungsarme Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschotter eingebracht, auf die der Schachtverschluss in ähnlicher Auslegung (Widerlager und Dichtelemente) an entsprechender Stelle im oberen Bereich der Wirtsgesteinsformation eingebaut wird.

Relativer Kostenvergleich

Ein Kostenvergleich zwischen den Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz und im Wirtsgestein Ton ist aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes beider Konzepte nur relativ möglich. Verglichen werden können die aus den Wirtsgesteineigenschaften und Einlagerungskonzepten entstehenden zusätzlichen Kostenfaktoren.

Zusätzlich zu den Tagesanlagen für ein Endlagerkonzept im Salz ist beim Endlager in Ton für das Verfüllmaterial Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemische ein eigener Logistikstrang zu installieren. Dieser umfasst auch die Herstellung und Lagerhaltung von Bentonitformsteinen für die Streckenlagerung und die Vorbereitung von Endlagergebänden mit Bentonit-Umhüllungen. Ein weiterer Kostenfaktor ist in dem erforderlichen qualitätsgesicherten Einbringen von im Vergleich zum Salzgrus teurem Verfüllmaterial Bentonit zu sehen.

Bei der Schachtförderung und dem Streckentransport sind à priori keine größeren Kostenunterschiede zwischen beiden Wirtsgesteinen bei der einzusetzenden Maschinenteknik erkennbar. Jedoch wirkt sich die deutlich höhere Anzahl von Endlagerbehältern für ein Endlager im Ton auf die Betriebs- und Instandhaltungskosten aus.

Der Errichtungs- und Unterhaltungsaufwand für ein Grubengebäude im Wirtsgestein Ton liegt deutlich über dem im Wirtsgestein Salz. Die Gründe hierfür sind einerseits in den erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für die Grubenbaue im Ton an sich und

andererseits in der Größe des Grubengebäudes (Faktor 8 – 9) zu sehen. Gegenüber dem Salzkonzzept ist auch der Schacht bis in den Schachtsumpf auszubauen.

Im vorliegenden **Anlagenband A3** der Studie wurden zum Thema Sicherheit in der Betriebsphase der betriebliche Strahlenschutz, die Kritikalitätsfrage beim Endlagerkonzept in Ton und Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase untersucht. Ergänzend ist eine erste Abschirmrechnung für eine bentonitummantelte HAW-Kokille durchgeführt worden.

Betrieblicher Strahlenschutz

Die Untersuchungen zu erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen, Strahlenexposition des Betriebspersonals sowie möglichen Störfallauswirkungen ergaben eine grundsätzliche Unabhängigkeit des betrieblichen Strahlenschutzes von der geologischen Formation, in die eingelagert werden soll. Eine Ausnahme bildet für den Ton der in den Berechnungen zur Strahlenexposition des Betriebspersonals zu berücksichtigende, noch unbekannt Anteil rückgestreuter Neutronen am Wirtsgestein.

Kritikalitätsbetrachtung für die Betriebsphase eines Endlagers in Ton

Im Rahmen einer generischen Kritikalitätsanalyse für die Betriebsphase eines Endlagers für bestrahlte Kernbrennstoffe in einer Tonformation wurde als relevantes Störfallszenarium der Absturz einer Brennstabkokille BSK-2 in ein 50 m tiefes Bohrloch untersucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine ungeflutete Anordnung von Brennstäben in der BSK 2 würde immer unterkritisch bleiben. Um Kritikalität zu erreichen, muss ein Überfluten der Brennstabanordnung mit Wasser oder einem gleichwertigen Moderator unterstellt werden.
- Bei Berücksichtigung des Kokillenmantels als konzentrisch in der Bohrlochmitte positioniertes Rohr - als Modell für die wahrscheinlichste Anordnung nach dem Absturz - bleibt das System immer unterkritisch. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass sich in diesem Fall nicht hinreichend viele Brennstäbe im reaktivsten mittleren Brennstababstand anordnen können.
- Wird dagegen hypothetisch der leere Behälter getrennt von den Brennstäben angeordnet, führt dies zu annähernd gleichen Multiplikationsfaktoren wie ohne Berücksichtigung des Behälters und ermöglicht rechnerisch kritische Anordnungen.
- Fällt als Folge eines angenommenen Störfalls Ton in das Bohrloch und füllt dieser die freien Zwischenräume aus, steigt der Multiplikationsfaktor zwar an, bleibt aber im unterkritischen Bereich, da der Ton im Vergleich zu Wasser schlecht moderiert. Selbst bei wassergesättigtem Ton bleibt die Anordnung unterkritisch.

Die Ergebnisse enthalten hohe Konservativitäten. Die unterstellte Wasserflutung, ist ein zweiter unterstellter, vom Absturz unabhängiger Störfall, der über die Anforderungen des Störfallprinzips der Kritikalitätssicherheit hinausgeht. Konservativ ist weiterhin das zur Vereinfachung angenommene reguläre Brennstabgitter bei reaktivstem mittlerem Abstand der Brennstäbe und der relativ niedrige mittlere Abbrand mit 20 GWd/tSm. Geht man von einer ungefluteten gleichmäßigen Verteilung der Brennstäbe über den gesamten Bohrlochquerschnitt aus, so ist die Anordnung weit unterkritisch.

Vergleich der Safeguardskonzepte in Salz und Tongestein

Ein Vergleich der Safeguards-Konzepte für Endlager in Salz und Tongestein zeigt auf, dass bei angenommenem ähnlichen Gesteinsverhalten auch Art und Funktion der Safeguards-Maßnahmen sich ähneln.

Aufgrund des Verformungsverhaltens der Wirtsgesteine Ton und Salz kann festgehalten werden, dass das bereits vorliegende deutsche Safeguards-Konzept für ein Endlager in Salz auch auf Tonformationen übertragbar ist. Die weitere Betrachtung der Endlagergebäude und der Betriebsabläufe hat gezeigt, dass die zusätzliche Verpackung der Brennstabkille mit einem Bentonitmantel eine eindeutige Identifikation der BSK erschwert. Damit ist die lückenlose Verfolgung dieses Endlagergebäudes durch die Anlagen- und Gebäudeteile des Endlagers nur indirekt über eine Kennung am Traggestell für BSK 2 und Bentonitmantel möglich.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Langzeitsicherheit -

Im **Anlagenband A4** wurden zum Thema Sicherheit in der Nachbetriebsphase, die Langzeitsicherheit, die Kritikalitätsfrage beim Endlagerkonzept in Ton und Salz und Safeguardsmaßnahmen untersucht.

Die Untersuchungen zur Langzeitsicherheit zeigten, dass Endlagerkonzepte in Salz und Ton hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine vergleichbare Sicherheitstrategie aufweisen. Die Endlagerkonzepte basieren im Unterschied z. B. zu Endlagerkonzepten im Granit auf einer langfristig einschlusswirksamen geologischen Barriere.

Im Falle des Wirtsgesteins Salz findet zwangsläufig eine maßgebliche Verdünnung der radionuklidbelasteten Salzlösung statt, da diese bei einem störfallbedingten Austritt aus dem Salzstock als gesättigte Salzlösung vorliegt. Gesättigte Salzlösungen werden von der Biosphäre unverdünnt nicht aufgenommen. Bzgl. der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre ergeben sich keine Unterschiede für Endlagerkonzepte im Salz und Ton, da Biosphärenmodelle auf Grundlage der Nutzung von Wasser und Boden sowie Verzehrsgewohnheiten regulativ festgelegt sind.

Die wesentlichen Unterschiede der Wirtsgesteine Salz und Ton im Hinblick auf Langzeitsicherheitsfragen beziehen sich auf das Nahfeld. Den dort herrschenden unterschiedlichen Bedingungen wird durch entsprechend angepasste technische Endlagerkonzepte Rechnung getragen, so dass für beide Wirtsgesteine langfristig ein hinreichendes Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss diese Unterschiede abbilden, wobei der derzeitige wissenschaftlich/technische Kenntnisstand im Ton deutlich weniger weit fortgeschritten ist als im Salz.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Kritikalitätssicherheit -

Es wurden Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein für folgende Szenarien durchgeführt:

- Mechanische Veränderungen in den Endlagergebinden
- Leckage von Behältern, Eindringen von Wasser bzw. Lauge
- Korrosion und Auflösung der Behälterstruktur, Vermischen von Kernbrennstoff mit dem Wirtsgestein
- Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern durch Fließbewegung
- Auflösung, Migration und Ablagerung von Kernbrennstoff nach dem Beispiel einer geologischen Lagerstättenbildung
- Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg sowie Anreicherung von Plutonium
- Moderationseigenschaften
- Einlagerung von MOX

Es zeigte sich, dass für das vorgegebene Kernbrennstoffinventar auch unter Annahme von sehr unwahrscheinlichen Szenarien eine Kritikalität in beiden Wirtsgesteinen und für alle bisherigen Einlagerungskonzepte ausgeschlossen werden kann.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Safeguardsaspekte -

Die Untersuchungen zu den Safeguardsaspekten zeigten, dass der für das Endlagerkonzept angenommene Tonstein sich hinsichtlich seiner Verformungseigenschaften ähnlich verhält wie Steinsalz. Damit unterliegt auch dieses Wirtsgestein langfristig starkem Konvergenzverhalten. Nach einer sofortigen Verfüllung der Einlagerungshohlräume um oder über den Endlagergebinden in Strecken und Bohrlöchern, sorgt die natürliche Konvergenz dafür, dass das Versatzmaterial kompaktiert und die Gebinde eingeschlossen werden. Es wird davon ausgegangen, dass in einem Endlager in Tongestein wie im Salz ein vollständiger Einschluss der Endlagergebinde möglich ist. Somit kann wie für ein Endlager im Salz die Überwachung in der Nachbetriebsphase auf eine Überwachung der Erdoberfläche über dem verfüllten und geschlossenen Endlager beschränkt werden. Dazu zählen Luftbildaufnahmen, Satellitenbilder oder örtliche Begehungen. Im Rahmen weiterführender Forschungen ist dabei zu untersuchen, ob neue

geophysikalische Methoden zur Überwachung des Endlagers von über Tage weiterführende Ergebnisse liefern können. Durch Studien könnte dies analysiert werden und, falls diese zu positiven Ergebnissen führen, durch in-situ Versuche auf ihre Anwendungsfähigkeit überprüft werden.

Die nicht geplante aber denkbare Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter ist sowohl im Salz als auch im Ton aufgrund des genannten Konvergenzverhaltens des Gebirges sehr aufwändig und würde nicht unbemerkt erfolgen können. Dazu wäre nach Beendigung des Endlagerbetriebes die Wiederauffahrung des Grubengebäudes oder die Errichtung eines neuen Endlagerbergwerkes erforderlich.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Geochemie -

Im **Anlagenband A6** wurden die geochemischen Grundlagen zu Tonsedimenten und Evaporiten zusammengestellt, die Auswirkungen der Betriebsphase eines Endlagerbergwerkes auf das Tongebirge untersucht und die Nachbetriebsphase eines Endlagers in Ton betrachtet.

Der Betrieb eines Bergwerkes erfordert eine Bewetterung des Grubengebäudes, wodurch eine Abkühlung des Gebirges hervorgerufen und feuchte, sauerstoffhaltige Luft in die untertägigen Hohlräume eingeführt wird. Des Weiteren beeinflussen die bergmännischen Arbeiten die gebirgsmechanische Situation, wodurch Ausbau- bzw. Stützmaßnahmen erforderlich sind. Hierzu müssen unterschiedliche wasserhaltige Baustoffe eingesetzt werden. Die Störung des ursprünglichen geochemisch/mineralogischen Gebirgszustandes kann chemische Reaktionen hervorrufen, von denen sowohl das Gebirge als auch die eingebrachten Baustoffe betroffen sein können. Zur Gewährleistung des Grundwasserschutzes und des radiologischen Schutzzieles sind Anforderungen an die Permeabilität und die Sorptionskapazität der Baustoffe zu entwickeln. Des Weiteren sind Grenzwerte beispielsweise für den Sulfidanteil und den Feuchtegehalt herzuleiten. Aufgrund der möglichen Folgereaktionen von Sulfiden, vor allem bei Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff, ist dem im Endlagerbereich verbleibenden Sauerstoffgehalt eine besondere Beachtung zu schenken. Vorteilhaft ist die Verwendung hydraulisch abbindender Baustoffe, da hierdurch im Hinblick auf die Rückhaltung toxischer Stoffe und Radionuklide ein günstiges chemisches Milieu geschaffen wird. Hierbei ist besonders der hohe pH-Wert und das Bindungspotential für Kohlendioxid hervorzuheben.

Zu begrenzen sind ferner die Mengen an organischem Material bzw. des organischen Anteils der einzusetzenden Baustoffe sowie von Metall, da die hieraus mögliche resultierende Gasbildung Transportprozesse im Gebirge fördert.

Soweit die erforderlichen Vorkehrungen bzw. Maßnahmen getroffen wurden, kann ausgeschlossen werden, dass in der Betriebsphase chemisch/mineralogische Prozesse ablaufen, die die Langzeitsicherheit eines Endlagers signifikant beeinflussen könnten. Die Betriebszeit eines Endlagers im Ton, die mit ca. 70 Jahren angenommen wird, ist zu kurz, dass im größeren Umfang Transport und/oder Diffusionsprozesse stattfinden können. Stofftransporte, insbesondere im Verbund mit der Wärmeentwicklung durch die eingebrachten radionuklidhaltigen Abfälle sind jedoch Voraussetzung für umfangreichere chemisch/mineralogische Prozesse.

Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens

Im **Anlagenband A5** erfolgt ein Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/ Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens.

In Deutschland ist die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen unumstritten. Aufgrund ihrer für die Endlagerung günstigen Eigenschaften können als potentielle Wirtsgesteine neben kristallinen Gesteinen die Tone/Tonsteine der Unterkreide und der jurassische Opalinuston sowie die Steinsalze des Zechsteins benannt werden. Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen hinsichtlich der Mächtigkeit und Tiefenlage (> 100 m Mächtigkeit und < 1.500 m Tiefenlage) erfüllen die Zechsteinsalze in der Norddeutschen Senke und die Unterkreide-Tone im Niedersächsischen Becken (NSB). Diesen Mindestanforderungen entspricht - jedoch regional viel stärker begrenzt - auch der Opalinuston, der im Süddeutschen Molassebecken durch Bohrungen aufgeschlossen ist.

Die epirogenetisch-paläogeographischen Entwicklungen der Untersuchungsgebiete werden geschildert und die Unterschiede der Wirtsformationen in Bezug auf Lithologie und Mineralogie sowie die daraus resultierenden Konsequenzen wie z. B. die Bildung von Kohlenwasserstoffen herausgearbeitet.

Zur thermischen Beeinflussung der Wirtsgesteine infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, das Verhalten des Endlagersystems in beherrschbaren Grenzen zu halten. Sowohl in Bezug auf den Bergbau als auch auf die radiologische Sicherheit in der Betriebs- und Nachbetriebsphase ergab sich ein Grenzwert für die zulässige Maximaltemperatur im Salinar von 200 °C und im Ton von 100 °C. Dieses bedingt für Tonformationen eine längere Zwischenlagerzeit der Endlagerbehälter, ein anderes Endlagerlayout mit erhöhtem Platzbedarf sowie ein angepasstes Behälterkonzept. Die längerfristige oberirdische Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle ist nicht nur aus Gründen der Sicherheit und des Strahlenschutzes nachteilig, sondern verursacht auch vermeidbare Kosten.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einleitung	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik	3
3	Vergleich der Wirtsgesteine Tone/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens	5
3.1	Norddeutsche Senke	5
3.2	Niedersächsisches Becken	7
3.3	Süddeutsches Molassebecken	10
3.4	Temperaturumfeld der Gesteine	11
4	Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton	15
4.1	Belgien	15
4.1.1	Behälterkonzepte und -materialien	17
4.1.2	Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall	20
4.1.3	Einlagerungskonzepte	21
4.1.4	Endlagerauslegung/-technik	22
4.1.4.1	Endlagerung verglaster HAW	22
4.1.4.2	Endlagerung ausgedienter Brennelemente	24
4.1.5	Verfüll- und Verschlusskonzept	27
4.1.6	Auffahrtechnik	28
4.1.7	Sicherheitsnachweiskonzept	29
4.1.7.1	Temperaturkriterium	29
4.1.7.2	Bewertung der Langzeitsicherheit	31
4.1.8	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	32
4.1.9	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	33
4.2	Schweiz	34
4.2.1	Endlagerbehälter für HAW und MAW aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente	36
4.2.2	Einlagerungskonzepte	39
4.2.3	Endlagerauslegung/-technik	40
4.2.3.1	Einlagerungstechnologie	42
4.2.3.2	Verfüll- und Verschlusskonzept	43
4.2.3.3	Auffahrtechnik	43
4.2.3.4	Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik	44
4.2.4	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	44
4.2.5	Sicherheitsnachweiskonzept	44
4.2.6	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	45
4.3	Frankreich	46
4.3.1	Behälterkonzepte und -materialien	50

4.3.1.1	Behälter für Abfallkategorie CU - Brennelemente	51
4.3.1.2	Behälter für Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle	53
4.3.2	Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall	56
4.3.3	Einlagerungskonzepte	56
4.3.4	Endlagerauslegung/-technik	58
4.3.4.1	Endlagerung verglaster HAW (Abfallkategorie C)	58
4.3.4.2	Endlagerung Abfallkategorien CU1 und CU2 (ausgedienter Kernbrennstoff)	60
4.3.4.3	Einlagerungstechnologie	62
4.3.5	Verfüll- und Verschlusskonzept	63
4.3.6	Auffahrttechnik und Errichtung der Einlagerungsstrecken bzw. –zellen	64
4.3.7	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	65
4.3.8	Sicherheitsnachweiskonzept	65
4.3.9	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	67
4.4	Spanien	67
4.4.1	Behälterkonzepte und -materialien	69
4.4.1.1	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	70
4.4.1.2	Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle	71
4.4.1.3	Abschirmbehälter	72
4.4.2	Radiologische und thermische Basisdaten	74
4.4.3	Endlagerkonzept	75
4.4.4	Verfüll- und Verschlusskonzepte	76
4.4.5	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	76
4.4.6	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	76
5	Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz	79
5.1	Bergbau im Salz	79
5.2	Abfallmengenszenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998	81
5.3	Behälterkonzepte	83
5.4	Einlagerungskonzepte	86
5.5	Endlagerflächenbedarf bei der Aktualisierung des Konzepts - „Endlager Gorleben“-	87
5.6	Anforderungen an Verfüllmaßnahmen und -materialien sowie Verschlussmaßnahmen	88
5.7	Verfüll- und Verschlusskonzept	89
6	Endlagerkonzept im Wirtsgestein Ton	93
6.1	Bergbau im Ton	93
6.2	Abfallmengenszenarium – Stand 2002	96
6.3	Behälterkonzepte	97
6.4	Einlagerungskonzepte	103
6.4.1	Streckenlagerung	104
6.4.2	Bohrlochlagerung	104
6.5	Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton	107
6.5.1	POLLUX-3 Endlagergebäude	107

6.5.2	HAW-Kokillen	110
6.5.3	BSK 2 Endlagergebinde	112
6.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	113
6.6.1	Internationale Verfüll- und Verschlusskonzepte	113
6.6.2	Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien	115
6.6.3	Verfüll- und Verschlussmaterialien	117
6.6.4	Verschlusskonzept für Modellendlager im Norddeutschen Becken und im Süddeutschen Molassebecken	118
6.6.5	Auswahl der geeigneten Bentonitart	120
6.6.5.1	Vergleich zwischen Natrium (Na)- und Calcium (Ca)-Bentonit	121
6.6.5.2	Festlegung auf Ca-Bentonit	125
6.7	Konzept der Streckenverfüllungen und -verschlüsse	126
6.8	Konzept der Schachtverfüllung und des Schachtverschlusses	127
6.8.1	Schachtverschluss für das Modell Süddeutsches Molassebecken (Opalinuston)	128
6.8.2	Schachtverschluss für das Niedersächsische Becken (Unterkreide Tone)	129
6.9	Auswirkungen der Betriebsphase eines Endlagerbergwerks auf das Tongebirge	129
7	Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton	133
7.1	Bergbau in den Wirtsgesteinen	133
7.2	Endlagerbehälterkonzepte	133
7.3	Erforderliche Endlagerflächen	135
7.4	Verfüll- und Verschlusskonzept	139
7.5	Kosten	139
8	Sicherheit in der Betriebsphase	141
8.1	Betrieblicher Strahlenschutz	141
8.2	Gegenüberstellung des betrieblichen Strahlenschutzes für Endlagerung in Salz oder Tongestein	142
8.2.1	Strahlenschutzmaßnahmen	143
8.2.2	Strahlenexposition des Betriebspersonals	143
8.2.3	Störfälle	144
8.2.4	Zusammenfassung	145
8.3	Kritikalitätsbetrachtung für die Betriebsphase eines Endlagers in Ton	146
8.4	Vergleich der Safeguards-Konzepte für Endlager in Salz und Tongestein	147
9	Sicherheit in der Nachbetriebsphase	151
9.1	Langzeitsicherheit	151
9.1.1	Standortunabhängige Schutzziele	151
9.1.1.1	Nachweiszeiträume	151
9.1.1.2	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Nachweiszeiträumen	152

9.1.2	Standortunabhängige Sicherheitskriterien für die Langzeitsicherheitsanalyse	152
9.1.2.1	Konventionelles Schutzziel Senkung/Hebung Tagesoberfläche	152
9.1.2.2	Konventioneller Grundwasserschutz	152
9.1.2.3	Radiologischer Schutz der Biosphäre	154
9.1.2.4	Zusammenfassung zu den standortunabhängigen Sicherheitskriterien	154
9.1.3	Abfallinventar	155
9.1.4	Methodische Vorgaben hinsichtlich potentieller Endlagerentwicklungen	155
9.1.5	Standortspezifische Grundlagen für den Langzeitsicherheitsnachweis	156
9.1.6	Zusammenfassung zu den standortspezifischen Randbedingungen, dem technischen Endlagerkonzept und der Szenarienanalyse	157
9.2	Kritikalitätssicherheit	157
9.2.1	Methodik zur Bewertung der Kritikalitätssicherheit	158
9.2.2	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	158
9.3	Safeguardsaspekte	162
9.4	Geochemie	162
9.4.1	Tonsedimente und Evaporite - Beschreibung ihres chemisch/ mineralogischen Stoffbestandes und charakteristischer Materialeigenschaften	163
9.4.2	Betrachtung der Nachbetriebsphase eines Endlagerbergwerks im Ton	165
10	Auswertung der Untersuchungsergebnisse	169
10.1	Zusammenfassende Bewertung	169
10.2	Offene Fragestellungen und Untersuchungsbedarf	186
11	Literaturverzeichnis	191
12	Abbildungsverzeichnis	203
13	Tabellenverzeichnis	207
14	Abkürzungsverzeichnis	209
15	Verzeichnis der Anlagenbände	211

1 Einleitung

Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salz werden in der Bundesrepublik Deutschland seit mehr als 30 Jahren durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden von 1985 bis 1993 sowohl Demonstrationsvorhaben als auch systemanalytische Arbeiten zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente durchgeführt. In den Demonstrationsversuchen wurden technische Komponenten entwickelt und erprobt. Die Systemanalyse Mischkonzept (SAM) /1-1/ und die Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK) /1-2/ dienten dazu, für unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen vollständige Entsorgungssysteme zu erarbeiten und hinsichtlich Sicherheit, technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Ende der 90er Jahre wurde spezifisch für den Standort Gorleben auf Basis der bis dahin bekannten Erkundungsergebnisse und einer präzisierten Abfallprognose bis 2080 eine Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben /1-3/ erarbeitet. Insofern liegen Untersuchungs- und Planungsergebnisse für ein Endlager im Salz in einem hinreichenden Tiefgang vor, der für eine vergleichende Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in anderen geologischen Formationen erforderlich ist.

Mit der Entscheidung der Bundesregierung neben dem Endlagermedium Salz auch andere geologische Formationen auf ihre Eignung als Wirtsgestein für radioaktive Abfälle zu untersuchen, ergibt sich auch die Notwendigkeit, grundlegende konzeptionelle Ansätze für ein generisches Endlager in nichtsalinarem Gestein zu entwickeln.

Zielsetzung des nachfolgend beschriebenen Vorhabens ist es, die Grundlagen für eine Gegenüberstellung eines generischen Endlagers im Salz und eines im Tongestein unter vergleichbaren Randbedingungen zu schaffen. Dazu sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Konzepte herauszuarbeiten und ihre Auswirkungen in Bezug auf Sicherheit, technische Machbarkeit und Kosten zu analysieren.

Ausgehend von dieser allgemeinen Zielsetzung wurden umfangreiche Planungen und Untersuchungen durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse in einem zusammenfassenden Hauptband und 6 Anlagenbänden (A1 – A6) dargestellt.

Die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für ein Endlager im Tongestein wurden für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt (Anlagenband 1) /1-4/.

Der Vergleich von technischen Endlagerkonzepten für Salz und Ton erfolgte in den Bereichen Bergbau, Endlagerbehälterkonzepte, erforderliche Endlagerflächen, Verfüll- und Verschlusskonzept sowie Kosten (Anlagenband 2) /1-5/.

Betrachtungen zur Sicherheit in der Betriebsphase wurden thematisch für den betrieblichen Strahlenschutz, hinsichtlich der Kritikalität beim Endlagerkonzept im Ton und für Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase durchgeführt (Anlagenband 3) /1-6/.

Betrachtungen zur Sicherheit in der Nachbetriebsphase wurden hinsichtlich Langzeitsicherheit, Kritikalitätssicherheit und Safeguardsaspekten durchgeführt (Anlagenband 4) /1-7/.

Ein Vergleich der Wirtsgesteine Ton/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens schließen das Vorhaben ab (Anlagenband 5) /1-8/.

Die Unterschiede im chemisch/mineralischen Stoffbestand und damit die Materialeigenschaften der Wirtsgesteine Salz und Ton, charakterisieren auch die Art und Weise des Langzeitsicherheitsnachweises (Anlagenband 6) /1-9/.

Das wesentliche Kriterium für die Auslegung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ist die zulässige Maximaltemperatur von der Kontaktfläche zwischen Endlagerbehälter und Wirtsgestein bzw. Versatzmaterial. Dies hat entscheidende Auswirkungen auf den erforderlichen Flächenbedarf und damit zusammenhängend auf die zu erwartenden Kosten. In Kapitel 7 sind dazu Ergebnisse in einer vergleichenden Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten für das Wirtsgestein Ton und Salz dargestellt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

In Deutschland wurden seit ca. 30 Jahren umfangreiche FuE-Arbeiten im Labor und in situ zur Endlagerung von wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfällen im tiefen geologischen Untergrund durchgeführt, die sich vorwiegend auf das Endlagermedium Salz konzentrierten. Grundlegende und wesentliche in situ-Versuche wurden von Mitte der 60er Jahre ab im Forschungsbergwerk Asse durchgeführt. Die Asse steht für Forschungszwecke nicht mehr zur Verfügung und wird zurzeit stillgelegt. Das FuE-Programm des Bundes war so angelegt, dass die Ergebnisse der laufenden Vorhaben spätestens nach Abschluss der Erkundung des Salzstockes Gorleben vorliegen sollten. Im Rahmen einer Vorstudie fasste das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie 1979 den bis dahin vorliegenden Kenntnisstand zur Direkten Endlagerung zusammen. In dem auf diesen Ergebnissen aufbauenden Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt Andere Entsorgungstechniken wurde in den Jahren 1981 bis 1984 ein technisches Konzept für die Direkte Endlagerung entwickelt und ein umfassender Vergleich der beiden Entsorgungswege mit und ohne Wiederaufarbeitung angestellt. Die Bundesregierung entschied auf Grundlage der dabei erzielten Ergebnisse, die Arbeiten zur Direkten Endlagerung bis zur Anwendungsreife weiterzuführen.

Im Zusammenhang mit der Eignungsbewertung des Salzstockes in Gorleben wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz 1998 ein Konzept für das Endlager Gorleben mit dem Titel „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ /2-1/ erstellt. Es beinhaltet neben der Beschreibung des Standortes eine auf dem damaligen Abfallmengengerüsten aufbauende vorkonzeptionelle Planung des Endlagers. Darin werden alle technischen und sicherheits-technischen Aspekte sowie Fragen der Genehmigungssituation und der Endlagerkosten betrachtet.

Neben diesen, auf das Wirtsgestein Salz ausgerichteten FuE-Arbeiten und Planungen, werden seit Anfang der 80er Jahre Untersuchungen durchgeführt, die dazu dienen, den Kenntnisstand hinsichtlich der Eignung von Kristalin als Wirtsgestein zu erweitern. In diesem Zusammenhang beteiligten sich deutsche Institutionen und Firmen an den wiss. Programmen der NAGRA (1983) im Felslabor Grimsel und der SKB (1995) im Untertagelabor Äspö.

Eine Ausarbeitung, in der erstmals ein generisches Endlager im Salz einem generischen Endlager im Hartgestein unter vergleichbaren Randbedingungen gegenübergestellt wurde, mit dem Ziel charakteristische Unterschiede herauszuarbeiten und deren Auswirkungen zu analysieren, ist 1997 durch die GEISHA-Studie /2-2/ des Forschungszentrums Karlsruhe erstellt worden.

Die NEA-Arbeitsgruppe „Clay Club“, die sich mit der Messung und dem grundlegenden Verständnis von Grundwasserströmungen durch tonhaltige Formation beschäftigt hat,

hat in einer Veröffentlichung /2-3/ die Ergebnisse einer entsprechenden Literatursichtung zusammengestellt. Dort sind die verfügbaren Informationen, sowie wesentliche Zusammenhänge zwischen mikro- und makroskopischen Phänomenen von Tonmineralien zusammengestellt.

Eine Ausarbeitung, in der ein generisches Endlager im Tongestein einem solchen in Salzformationen gegenübergestellt wird, um charakteristische Unterschiede hinsichtlich Sicherheit, Technik, Kosten etc. herauszuarbeiten, wurde in der Bundesrepublik Deutschland bisher nicht erstellt. Dieses Defizit wird mit den durchgeführten Untersuchungen weitgehend behoben, insbesondere um Entscheidungsträgern eine fachliche Basis für künftige Weichenstellungen in der Endlagerplanung zu liefern.

3 Vergleich der Wirtsgesteine Tone/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens

In Deutschland ist die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen unumstritten. Aufgrund ihrer für die Endlagerung günstigen Eigenschaften können als potentielle Wirtsgesteine neben kristallinen Gesteinen die Tone/Tonsteine der Unterkreide und der jurassische Opalinuston sowie die Steinsalze des Zechsteins benannt werden.

Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen /3-1/ hinsichtlich der Mächtigkeit und Tiefenlage (> 100 m Mächtigkeit und < 1.500 m Tiefenlage) erfüllen die Zechsteinsalze in der Norddeutschen Senke und die Unterkreide-Tone im Niedersächsischen Becken (NSB) bzw. Niedersächsischen Tektogen. Diesen Mindestanforderungen entspricht - jedoch regional viel stärker begrenzt - auch der Opalinuston, der im Süddeutschen Molassebecken durch Bohrungen aufgeschlossen ist.

Im Anlagenband 5 werden die epirogenetisch-paläogeographischen Entwicklungen der Untersuchungsgebiete geschildert und die Unterschiede der Wirtsformationen in Bezug auf Lithologie und Mineralogie sowie die daraus resultierenden Konsequenzen wie z. B. die Bildung von Kohlenwasserstoffen herausgearbeitet.

Die Zechstein Salze der Staßfurt-Folge, der Opalinuston (Dogger α) und die Unterkreide-Tone sind Sedimente mariner Ablagerungsräume. Diese Ablagerungsräume sind als Epikontinentalmeere zu beschreiben, die durch Schwellen/Barrieren von offenen Ozeanen getrennt waren. Nur zur Zeit des Zechsteins kam es zu einer stärkeren Verdunstung von Meereswasser und zur Ausscheidung von Salzen. Auffallend sind hohe Sedimentationsraten für die untersuchten Ablagerungsräume.

3.1 Norddeutsche Senke

Die Pompeckj'sche Scholle und das Niedersächsische Becken (NSB) bilden im Nordwesten Deutschlands die geologischen Hauptstrukturen der Norddeutschen Senke (siehe Abbildung 3-1). Dort sind mächtige, evaporitische Gesteinsfolgen, in einigen Fällen 1.000 m und mächtiger, zur Zeit des Rotliegenden, des Zechstein und der Oberjura abgelagert worden.

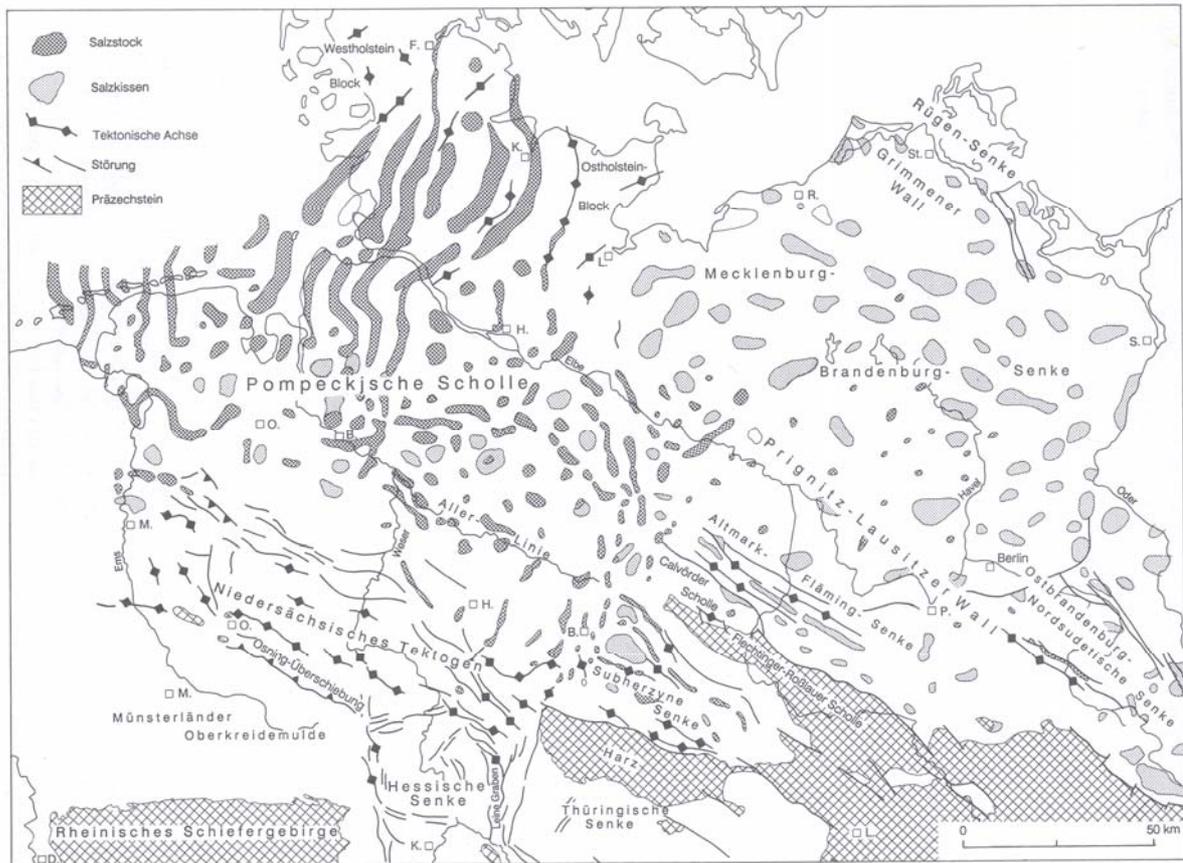


Abbildung 3-1: Tektonische Gliederung der Norddeutschen Senke mit der Pompeckj'sche Scholle und dem Niedersächsischen Tektogon im Nordwesten Deutschlands /3-2/

Da die Wirtsgesteinseigenschaften der Rotliegend- und Oberjura-Salinare durch eine enge Salz-Tonstein-Sandstein-Anhydrit-Wechselagerung stark eingeschränkt sind, werden sie als weniger untersuchungswürdig eingestuft. In dieser Studie wurden nur die Zechstein-Salinare betrachtet.

Die Zechstein-Salinare, die auf der Pompeckj'schen Scholle und nur im Ostteil des NSB flächenhaft verbreitet sind, weisen in der Staßfurt-Folge Steinsalzlager mit einer Mächtigkeit von bis zu 800 m (das Staßfurt Hauptsalz, z2HS) auf. Geringmächtigere Steinsalzlager sind in der Leine-Folge zu finden.

Der Innenaufbau von Salzstöcken ist nach allen Erfahrungen hoch komplex. Infolge halokinetischer Prozesse wurden die zunächst noch im intakten Verband über der Staßfurt- und Leine-Folge (z2 und z3) lagernden, jüngeren Folgen (z4 – z7) mit angehoben, was zum Zerreißen und Zerblocken ihrer mehr elastisch und nicht fließend reagierenden nicht-chloridischen Schichtglieder führte. Dabei entstanden äußerst komplizierte Lagerungsformen, deren Faltenachsen aufgrund der Geometrie der Diapire jede

beliebige Richtung einnehmen können. Häufig ist jedoch im Kern von Salzstöcken und Salzkissen das sehr reine, homogene Steinsalz der Staßfurt-Folge mit einem erheblichen Mächtigkeitsanstieg zusammengefloßen. Diese Kernbereiche weisen in vertikaler Richtung einige Kilometer Höhe sowie eine große laterale Ausdehnung auf. Als negativ ist zu bewerten, wenn der interne Aufbau eines Salzstockes durch starke Beimengungen nicht-halitischen Materials (Tonstein-Mittel, Anhydrite, Kalisalze) und Salinare des höheren Zechstein (z4 - z7) gestört ist.

Eine nennenswerte Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Substanz im Wirtsgestein Salz ist aufgrund des vernachlässigbaren Gehaltes an organischen Bestandteilen und fehlender Feuchtigkeit nicht zu erwarten.

Eine Vorerkundung eines Standortes im Salzgestein ist allein an Hand von geophysikalischen Verfahren nicht möglich. Die komplizierte Innentektonik kann nur durch Tiefbohrungen aufgeklärt werden, da sie geophysikalisch nicht zu orten ist. Da um jede Tiefbohrung ein Sicherheitspfeiler gelegt werden muss, ist die Anzahl der Bohrungen zu gering, um eine genaue Kenntnis über die interne Struktur eines Salzstockes zu erhalten. Die Innentektonik kann daher nur durch bergmännisches Auffahren von Schächten und Strecken in einem späteren Erkundungsstadium aufgelöst werden.

3.2 Niedersächsisches Becken

Die Unterkreide-Tone sind im Niedersächsischen Becken weitverbreitet. Das NSB ist ein relativ kleines Becken mit einer durchschnittlichen Breite von 80 km und einer Länge von etwa 280 km. Südlich der Linie Braunschweig-Peine-Hannover-Neustadt-Rhaden-Bentheim sind die Unterkreide-Tone oberflächennah aufgeschlossen. Sie erreichen durch Bohrungen nachgewiesene Teufenlagen von bis zu 2.000 m und treten in einzelnen Unterkreide-Stufen mit Mächtigkeiten von bis zu 500 m auf.

Aufgrund unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten und lithologischer Wechsel ist das NSB in einen Westteil (Raum Rheine-Bentheim-Meppen-Groningen), einen Zentralteil (Raum Osnabrück-Bielefeld-Minden-Vechta-Sulingen) und einen Ostteil (Raum Hannover-Braunschweig) unterteilt. Die Grenzen der einzelnen Teilbecken verlaufen etwa entlang der Flüsse Ems und östlich der Weser (siehe Abbildung 3-2). Ab der Unterkreidestufe Hauterive ist diese deutliche Dreiteilung nicht mehr vorhanden. Das zentrale und östliche Teilbecken wird zum Ostabschnitt zusammengefasst, wohingegen der westliche Teil weiterhin als Westabschnitt bezeichnet werden kann.



Abbildung 3-2: West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens /3-3/.

Die Lagerung der Unterkreide-Schichten ist annähernd horizontal bei einer flachen Topographie. Im Ostteil des Beckens sind die Lagerungsverhältnisse im Bereich der Salzkissen, Salzstöcke und Diapirrandmulden komplizierter. In Annäherung an den Nordrand (Weser-Ems-Linie) und an den Südrand (Weser- und Wiehengebirgs-Flexur) treten Bruchstrukturen innerhalb des NSB auf. Der Sedimentationsraum ist im Westteil und Ostteil durch Schwellen und Becken stark gegliedert, woraus erhebliche Mächtigkeitsschwankungen resultieren können. Im Ostteil wird dieses durch Salzkissen- und Salzstockbildung hervorgerufen.

Zur Zeit der Unterkreide wirkte das NSB als stark absinkender Randtrog gerade zu als Sedimentfalle, so dass bis zu 2.000 m mächtige Sedimente abgelagert wurden. Es konnten im NSB auch von anderen Systemen bekannte, laterale Faziesunterschiede festgestellt werden. Eine sandige Randfazies ist häufig von einer mergelig-tonigen Beckenfazies zu unterscheiden. Da auf dem mitteleuropäischen Festland („Rheinische Masse“) neben oberkarbonischen Kaolintonsteinen hauptsächlich Sandsteine anstanden, die abgetragen wurden, ist die sandige Litoral(Strand-)fazies am Südrand des Beckens besonders stark entwickelt. Sie fehlt am Nordrand des Beckens oder tritt sehr zurück, da hier quarzlieferndes Ursprungsmaterial nicht anstand.

Für jede einzelne stratigraphische Einheit der Unterkreide (Wealden – Alb) konnten Tone nachgewiesen werden, die die an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m erfüllen. Anzumerken ist, dass aufgrund Stufen übergreifender, tektonischer Ruhephasen die lithologische Varianz der Tonsteine z. T. sehr gering ist. Das Wirtsgestein ist also nicht stratigraphisch festgelegt, sondern auf eine tonige Fazies, die Stufen übergreifend sein kann. Die Valangin-, Hauterive-, Ober-Apt- und Alb-Tone der Beckenfazies sind im allgemeinen stofflich homogener aufgebaut als die Wealden-, Barrême-, Unter-Apt Tone und dadurch verhältnismäßig einfach zu charakterisieren. Kennzeichnend für die Blättertone des Wealden, Barrême, und Unter-Apt sind hohe Gehalte an Pyrit und organischen Kohlenstoffen, die auf das anoxische Bildungsmilieu dieser Sedimente hinweisen. In diesen Unterkreide-Stufen sind ausreichend organische Kohlenstoffe für eine Kohlenwasserstoff-Genese vorhanden, der Muttergesteinscharakter ist mit gut bis sehr gut zu bezeichnen. Das Kohlenwasserstoffpotential ist hoch. Die Blättertonsteine des Wealden haben, wie mehrere Erdöllagerstätten im westlichen und zentralen Teil des NSB belegen, zweifellos zur Erdölbildung beigetragen. Aufgrund des Auftretens abbauwürdiger Ressourcen (Kohlenwasserstoffvorkommen) tritt ein Nutzungskonflikt auf. Ein unabsichtliches menschliches Eindringen auch in weiterer Zukunft ist nicht auszuschließen. Die thermische Reifung der Barrême und Unter-Apt Blättertone ist noch nicht weit fortgeschritten. Sie hat gerade die beginnende Ölbildung erreicht, wie die Elementarverhältnisse der Kerogen-Typen zeigen.

In den Unterkreide-Tonen, die bis zu 5 % und mehr organische Bestandteile enthalten, kann eine Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile für die Endlagerung von Bedeutung sein. Jedoch stehen die organischen Bestandteile der Tone sicher nicht vollständig einer mikrobiellen Zersetzung in Kohlendioxid und/oder Methan zur Verfügung. Die „thermische oder mikrobiologische“ Vorgeschichte der organischen Substanz beeinflusste die Rate und Menge einer möglichen Gasbildung.

In seismischen Profilen sind die Unterkreide-Stufen, wenn keine lithologischen Wechsel vorliegen, schwer zu unterscheiden, so dass eine großräumige Geometrie einzelner Stufen durch geophysikalische Messverfahren kaum zu erfassen ist. Es ist ein erheblicher Forschungsaufwand zu betreiben, um eine räumliche Analyse von Ton- und Siltstein-Folgen durchzuführen sowie die geophysikalische Erkundungsmethodik zu verbessern.

3.3 Süddeutsches Molassebecken

Erdgeschichtlich ist das Süddeutsche Molassebecken mit dem darin enthaltenen Opalinuston als ein geologisch einfaches, tektonisch verhältnismäßig ruhiges Gebiet am Rand des Einflussbereiches der Alpen zu bezeichnen (siehe Abbildung 3-3).

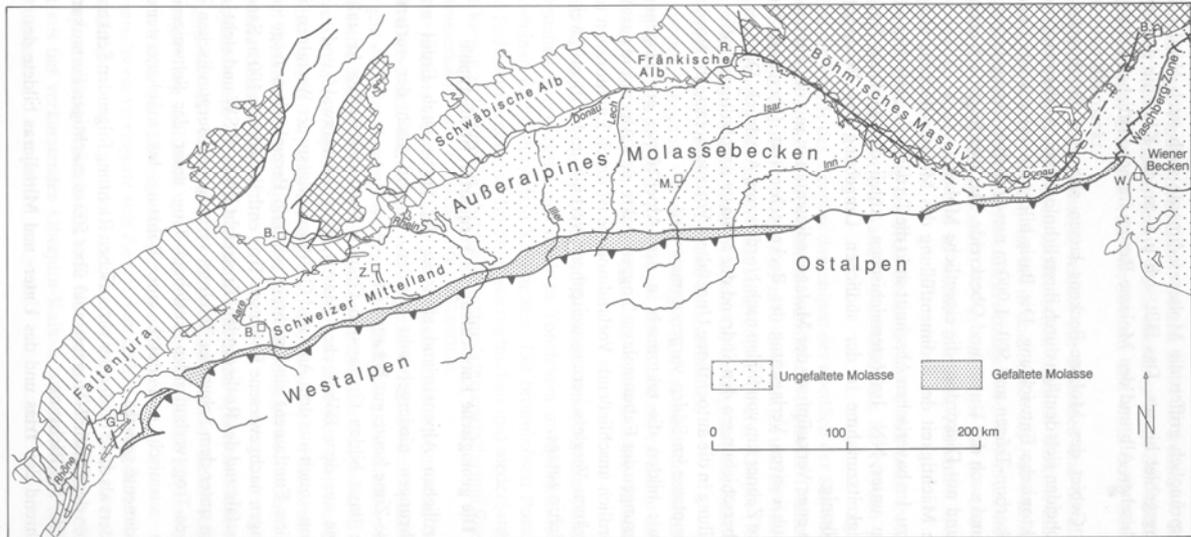


Abbildung 3-3: Geologische Übersichtskarte der Molasse-Zone (Außer-alpines Molassebecken auf dem Gebiet von Deutschland = Süddeutsches Molassebecken) /3-2/.

Der geologisch einfache Bau Süddeutschlands zeigt sich im generell flachen (mit ca. 5° nach \pm SE) Einfallen der mesozoischen Schichten unter die keilförmig mächtiger werdende Molasse. In der Tertiärzeit setzte im Zuge der alpidischen Gebirgsbildungen eine Intensivierung der tektonischen Vorgänge ein, die mit vulkanischen Aktivitäten verknüpft waren. Jedoch ist der tertiäre Vulkanismus vornehmlich an den Oberrheingraben und die ihn begleitenden Strukturen gebunden.

Südlich der Schwäbischen Alb weist der Opalinuston die geforderte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m auf. Dort ist er in einer Tiefenlage von 300 m unter der Geländeoberfläche durch Bohrungen aufgeschlossen. Der Opalinuston hat eine beachtliche laterale Ausdehnung, ist großräumig als ausgesprochen homogen anzusehen und dadurch verhältnismäßig einfach zu charakterisieren. In der Vertikalen ist eine mikropaläontologische Gliederung nach /3-4/ möglich, allerdings ist die lithologische Heterogenität eher untergeordnet und hat daher abschätzbare, oft nur geringe Konsequenzen auf die wichtigsten Gesteinseigenschaften.

Eine nennenswerte Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Substanz ist im Opalinuston aufgrund des vernachlässigbaren Gehaltes an organischen Bestandteilen nicht zu erwarten.

In seismischen Profilen ist der Opalinuston aufgrund seines physikalischen Kontrastes zu den Rahmengesteinen (Jurensis-Mergel und Dogger β -Sandsteinen) stets klar erkennbar, so dass seine grossräumige Geometrie durch geophysikalische Messverfahren gut zu erfassen ist.

3.4 Temperaturumfeld der Gesteine

Vom hochaktivem Abfall wird ein zeitlich beschränkter Temperaturimpuls ins Wirtsgestein ausgehen. Zur thermischen Beeinflussung der Wirtsgesteine infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, das Verhalten des Endlagersystems in beherrschbaren Grenzen zu halten. Sowohl in Bezug auf den Bergbau als auch auf die radiologische Sicherheit in der Betriebs- und Nachbetriebsphase ergab sich ein Grenzwert für die zulässige Maximaltemperatur im Salinar von 200 °C und im Ton von 100 °C. Die tatsächlichen Maximaltemperaturen ergeben sich aus der Dauer der Zwischenlagerzeiten bzw. der Abkühlzeit der radioaktiven Abfälle.

Im Salinar sind bei 200 °C z. B. die infolge des Salzkriechens zu erwartenden Verformungsraten noch beherrschbar /3-5/ und es wird kein Kristallwasser aus der Salzformation freigesetzt /3-6/.

Bei Tonformationen als Wirtsgestein darf die maximale Temperatur 100 °C nicht übersteigen, da nur so bei den zu Beginn herrschenden, ungesättigten Verhältnissen eine Wasserdampfbildung reduziert werden kann /3-7/. Unter gesättigten Bedingungen bewirken Temperaturen höher als 100 °C keine Wasserdampfbildung, da bei Drücken über 2 MPa der Siedepunkt von Wasser oberhalb einer Temperatur von 600 °C liegt, eine Temperatur die nicht erreicht wird. Zudem ist Ton unter hohen Temperaturen mineralogischen Veränderungen unterworfen, wodurch die Quellfähigkeit, die Plastizität, die Durchlässigkeit und die Sorptionseigenschaft z. B. durch die Illitsierung von Smektiten negativ beeinflusst werden.

Dieses bedingt für Tonformationen eine längere Zwischenlagerzeit, ein anderes Endlagerlayout mit erhöhtem Platzbedarf sowie ein angepasstes Behälterkonzept. Die längerfristige oberirdische Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle ist nicht nur aus Gründen der Sicherheit und des Strahlenschutzes nachteilig, sondern verursacht auch vermeidbare Kosten.

An der Grenzfläche Endlagergebäude und Verfüllmaterial (z.B. Bentonit) mit dem Wirtsgestein Ton wird eine Maximaltemperatur von 90 °C erwartet. Zur Abschätzung der Konsequenzen wäre es von Vorteil, wenn das Wirtsgestein Ton im Verlaufe seiner Versenkungsgeschichte diese Temperatur bereits erfahren hätte. Beim Salzgestein werden bei einer Maximaltemperatur von 200 °C keine Veränderungen der Gesteinseigenschaften erwartet.

Die Bestimmung des Inkohlungsgrades des organischen Materials ist eine Möglichkeit, um Anhaltspunkte über die thermische Geschichte von Sedimentgesteinen zu erhalten. Der Inkohlungsgrad wird mit Hilfe mikroskopischer Reflexionsmessungen an Vitriniten ermittelt.

Die Temperatur und die Zeit sind die physikalischen Größen, die den Inkohlungsablauf im Wesentlichen beeinflussen. Nicht nur ein sich abkühlender Intrusivkörper, sondern Krustenhebungen und -senkungen tragen zu immerwährenden Änderungen in den Reaktionstemperaturen der organischen Substanz bei. Die mit der Hebung verbundene Abkühlung eines Teilchens verzögert oder stoppt sogar die Reaktion, während sich bei einer Absenkung die stetige Temperaturzunahme durch Erhöhung des Inkohlungsgrades auswirkt. Wegen der zeitlichen Abhängigkeit der Inkohlungsreaktionen ist eine schnelle Anpassung an eine höhere Reaktionstemperatur nicht möglich, so dass die Zeitdauer, die ein organisches Partikel unter der Einwirkung einer bestimmten Temperatur verbracht hat, eine gewichtige Rolle spielt.

Bei steigender Inkohlung nimmt der Reflexionsgrad des Vitriniten irreversibel zu /3-8/. Der Beginn des Ölfensters, also der thermokatalytischen Produktion von flüssigen Kohlenwasserstoffen, entspricht einer Vitrinit-Reflexion von 0,5 – 0,6 %.

Ein ausreichend mächtiges Vitrinitreflexionsprofil erlaubt die Rekonstruktion von Temperaturgradienten zur Zeit der Inkohlung und damit eine Abschätzung der maximalen Versenkungstiefe und des zu dieser Zeit herrschenden Wärmeflusses.

Eine Abschätzung der Temperaturgeschichte des Opalinustons und der Unterkreide-Tone an Hand von Vitrinitreflexionen erfolgt im Rahmen des Projektes GENESIS. In diesem Vorhaben wird untersucht, inwieweit der Wärmeeintrag durch die Einlagerung radioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle in Einlagerungsfelder in einer Tonformation die Verformung von Hohlräumen sowie deren thermische Verhältnisse des Endlagers beeinflusst.

Reflexionsmessungen an Vitriniten liegen für die Ablagerungen der salinaren Ausscheidungsfolgen nicht vor. Jedoch erlauben geologische und geochemische Kriterien laut /3-5/ eine Abschätzung der maximalen Temperaturen, die in der geologischen Vergangenheit auf Salzgesteine eingewirkt haben.

Die Bildung der Salzkissen- und Salzdiapirstrukturen (geologische Kriterien) begann in Norddeutschland bei Deckgebirgsmächtigkeiten von etwa 400 – 600 m und primären Mächtigkeiten des Zechsteinsalinars von schätzungsweise 1.000 m. Die Salinarbasis dürfte zu Beginn der Salzkissenbildung bei 1.400 – 1.500 m gelegen haben, wobei die Temperaturen im Salinar auf 50 - 60 °C geschätzt werden /3-9/. Im südlichen Leinetal rechnet man für die Kalisalzlager bei etwa 2.000 m Gesteinsüberdeckung mit einer Temperatur von 73 °C. Gegenwärtig beträgt die Temperatur der Salzgesteine in 5.000 m Tiefe etwa 180 °C. Es ist kaum anzunehmen, dass die heute bis in 1.000 m Tiefe vorkommenden Salzgesteine sich ursprünglich einmal in Tiefen > 2.000 m befunden haben /3-10/.

Aufgrund von geochemischen Kriterien lassen sich Hinweise auf die Bildungstemperaturen von Salzgesteinen aus Mineralassoziationen mit MgSO₄-Verbindungen ableiten. Kainit wird bei Temperaturen > 83 °C instabil unter Bildung von Sylvin, Kieserit und Langbeinit. Hierbei kann es sich um Reaktionen handeln, die ohne (Thermometamorphose) und mit (Lösungsmetamorphose) Zufuhr von Lösungen stattfinden. Beispielsweise könnte das aus etwa 45 % Kieserit, 25 % Sylvin und 30 % Halit bestehende „Flockensalz“ im Kaliflöz Hessen (K1H) des Werra-Fulda-Kalireviers durch einen kombinierten Vorgang von Thermo- und Lösungsmetamorphose bei 83 °C entstanden sein /3-9/.

In den Grubenbauen der Salzbergwerke treten verschiedentlich Lösungen auf, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung (Haupt- und Nebenbestandteile) als Reste von Metamorphoselösungen interpretiert werden müssen. Hierzu gehören konzentrierte MgCl₂-Lösungen, wie sie in den Salzstrukturen der Lagerstättenbezirke Magdeburg-Halberstadt und Südhannover nachgewiesen worden sind. Ein Beispiel ist eine Lösung aus der Grube Neustaßfurt, deren Zusammensetzung im quinären System bei 25 °C etwa dem Punkt Z (Sättigung an Bischofit) entspricht. Bisher ist primärer Bischofit nicht mit Sicherheit in deutschen Zechsteinlagerstätten nachgewiesen worden. Es ist theoretisch denkbar, die Entstehung der Lösung in Verbindung zu bringen mit einer inkongruenten Carnallitzersetzung in NaCl-gesättigter Lösung bei ≤140 °C und anschließender Abkühlung der Lösung unter Kristallisation von Carnallit und Bischofit /3-9/. Temperaturen von ≤140 °C könnten in Tiefen > 2.000 m vorgelegen haben. Es ist nicht auszuschließen, dass die heute in 800 – 1.000 m Tiefe vorkommenden konzentrierten MgCl₂-Lösungen aus größeren Tiefen aufgestiegen sind. Damit entfällt aber auch die Möglichkeit, aus den Bildungstemperaturen der konzentrierten MgCl₂-Lösungen die maximalen Temperaturbelastungen für die gegenwärtigen Speichergesteine dieser Salzlösungen zu rekonstruieren.

In diesem Zusammenhang ergibt sich die Frage, ob beispielsweise der Ronneberg-Carnallit mit über 99 % Carnallit (Hemelinger Carnallit) im Grubenfeld Salzdetfurth und der sekundäre Bischofit aus Vienenburg auf eine Lösungsmetamorphose von Carnallit bei Temperaturen von ca. 140 °C zurückzuführen sind /3-10/. Es ist interessant, dass

sekundärer Carnallit in größeren Mengen besonders im subherzynen Becken auftritt /3-9/.

Aus den genannten geologischen und geochemischen Kriterien lässt sich ableiten, dass die bis in 1.000 m Tiefe vorkommenden Salzgesteine in der geologischen Vergangenheit großräumig Temperaturen bis höchstens $90\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ausgesetzt waren /3-10/.

4 Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton

Im Anlagenband 1 „Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton“ werden die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für ein Endlager im Tongestein für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung finden dabei die zugrunde liegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweiskonzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierbarkeit der Endlager. Vertiefende Angaben, u. a. zu den Untertagelaboren und Arbeitsprogrammen, sind dem Anlagenband 1 zu entnehmen.

4.1 Belgien

Der belgische Nuklearsektor besteht hauptsächlich aus sieben KKW-Blöcke in Doel and Tihange mit einer Gesamtleistung von 5,7 GW_e, zwei Betriebe für die Produktion von UO₂- bzw. MOX- Brennelementen (Franco-Belge de Fabrication de Combustible International und Belgonucleaire), der zentralen Verarbeitungsanlage für radioaktive Abfälle – Belgoprocess sowie der 1974 stillgelegten Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic.

Die Verarbeitung und Konditionierung aller anfallenden radioaktiven Abfälle wird mit Ausnahme der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff in Belgien durchgeführt. Der ausgediente Kernbrennstoff wird von Cogema wiederaufgearbeitet und die dabei anfallenden radioaktiven Abfälle werden nach Belgien rückgeführt.

Die gegenwärtige Nuklearpolitik Belgiens sieht die Errichtung von zwei Endlagern vor - ein oberflächennahes Endlager für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver radioaktiver Abfälle und ein geologisches Endlager für hoch- und mittelaktive langlebige radioaktive Abfälle.

Ende 1993 hat die belgische Regierung entschieden, dass sowohl die Wiederaufarbeitung, als auch die direkte Endlagerung von ausgedientem Kernbrennstoff als gleichwertige Optionen für die Endlagerung zu betrachten sind. 1998 wurde von der belgischen Regierung ein Moratorium für die Fortführung der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff verhängt.

Seit Mitte der 70er Jahre werden in Belgien Untersuchungen zur Eignung von tiefen Tonformationen für die Endlagerung von hoch- und mittelaktiven radioaktiven Abfällen durchgeführt. Als Referenzformation für die Endlagerung hoch- und mittelaktiver und langlebiger radioaktiver Abfälle wurde die Tertiär - Boom - Tonformation am Standort

Mol-Dessel ausgewählt, wo seit 1984 das Untertagelabor HADES (High-Activity Disposal Experimental Site) in Betrieb ist.

Die Ergebnisse der Endlagerforschung, insbesondere basierend auf den Arbeiten im HADES, wurden von ONDRAF/NIRAS 1989 in dem Bericht SAFIR 1 (Safety Assessment and Feasibility Interim Report) zusammengefasst. Auf dieser Grundlage wurde von der belgischen Regierung entschieden, weitere intensive Forschungsarbeiten zur Endlagerung in der Referenzformation Boom-Ton in Mol-Dessel durchzuführen. Dabei wurde empfohlen, eine weitere Tonformation, die Ypres-Ton Formation am Standort Doel, als Alternativformation zu untersuchen. Erste Studien dieser Formation am Standort Doel wurden 1997/1998 durchgeführt. Die Ergebnisse der zweiten Etappe der Endlagerforschung 1990 – 2000 wurden in dem Bericht SAFIR 2 zusammengefasst /4-1/, /4-2/.

Das belgische Endlagerkonzept berücksichtigt zwei Optionen der Kernbrennstoffstrategie:

- Wiederaufarbeitung des gesamten anfallenden Kernbrennstoffes – Referenzszenarium

Hierbei werden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Gebindeanzahlen und -volumen berücksichtigt.

Herkunft	Gebindeanzahl	Volumen per Gebinde [m ³]	Gesamtvolumen [m ³]
BE-Wiederaufarbeitung (Kokillen)	3.915	0,180	705
Strukturteile und technologische Abfälle (CSD-C Kokillen)	6.410	0,180	1.154
Verfestigte flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	1.501	0,070	105
Verfestigte flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	700	0,195	137
Feste Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	160	0,195	31
Gesamt	12.686		2.132

Tabelle 4-1: Belgien - Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“

Hierzu kommen weiterhin noch ca. 70 tSM MOX-BE zur direkten Endlagerung.

- Einstellung der Wiederaufarbeitung nach Auslaufen der derzeit geltenden Verträge mit der Cogema und direkte Endlagerung des übrigen ausgedienten Kernbrennstoffes

Hierbei werden die in Tabelle 4-2 aufgeführten Gebindezahlen und -volumen berücksichtigt.

Herkunft	Gebindeanzahl	Volumen per Gebinde [m ³]	Gesamtvolumen [m ³]
BE-Wiederaufarbeitung (Kokillen)	420	0,180	76
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Doel 1 u. 2)	1.669	0,326	544
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Tihange 1 u. 2, Doel 3)	4.780	0,444	2.122
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Tihange 2, Doel 4)	3.266	0,517	1.689
MOX-Kernbrennstoff	144	0,444	64
Strukturteile und technologische Abfälle (CSD-C Kokillen)	820	0,175	144
Verfestigte flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	1.501	0,070	105
Verfestigte flüssige Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	700	0,195	137
Feste Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic	160	0,195	31
Gesamt	13.460		4.912

Tabelle 4-2: Belgien – Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Direkte Endlagerung“

4.1.1 Behälterkonzepte und -materialien

Für die Option der direkten Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes wurden Konzepte für die Zwischenlagerung und Konditionierung der Brennelemente einschließlich MOX-Brennelemente entwickelt /4-3/. Die Konzeption des Endlagerbehälters ist auf der Abbildung 4-1 gezeigt. Es ist vorgesehen, jeweils ein Brennelement in einem dünnwandigen Behälter endzulagern.



Abbildung 4-1: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Der Behälter soll aus Austenitstahl AISI 316 L mit einer Wandstärke von 9,53 mm gefertigt werden. Im Behälter befindet sich ein Gestell für die Positionierung des Brennelementes. Der Behälterdeckel wird mit dem Behälterkörper nach Beladung mit einem Brennelement verschweißt. Im Deckel befindet sich eine Öffnung, durch die der verbleibende Hohlraum des mit dem Brennelement beladenen Behälters mit Sand verfüllt wird. Die Deckelöffnung wird anschließend mit einem Stopfen verschlossen, der mit dem Deckel verschweißt wird. Der Behälter ist an der Außenwand mit Rollen ausgerüstet, die den Transport innerhalb des Einlagerungsrohrs im Endlager erleichtern.

Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen der Brennelemente der belgischen Kernkraftwerke wird die Länge der Endlagerbehälter unterschiedlich sein. Nach den vorliegenden Angaben /4-1/ kann die maximale Länge eines Behälters bei 5,1 m liegen.

In /4-2/ sind folgende Daten des geplanten Endlagerbehälters für die Brennelemente der KKW Tihange 1/2 und Doel 3 aufgeführt:

- Material: Austenitstahl AISI 316L
- Außendurchmesser: 356 mm
- Gesamtdurchmesser
(einschließlich Transportrollen): 490 mm
- Höhe: 4475 mm
- Volumen innen: 0,331 m³
- Transportvolumen: 0,444 m³

Alle Behälter mit HAW sollen in einen wasserdichten HAW-Endlagerbehälter verpackt werden /4-2/, /4-4/. Dieser Endlagerbehälter wird neben der Bentonitverfüllung der Einlagerungsstrecken als die entscheidende technische Barriere betrachtet /4-5/. So soll die Integrität des Behälters mindestens für die sogenannte Heizperiode - Zeit, in der die Aufwärmung des Nahfeldes mehr als 10 K gegenüber der Temperatur der ungestörten Formation beträgt - erhalten bleiben. Die Zeitdauer dieser Periode wird für verglaste Abfälle mit ca. 300 Jahren und für ausgediente Brennelemente mit ca. 2000 Jahren angegeben /4-1/, /4-6/.

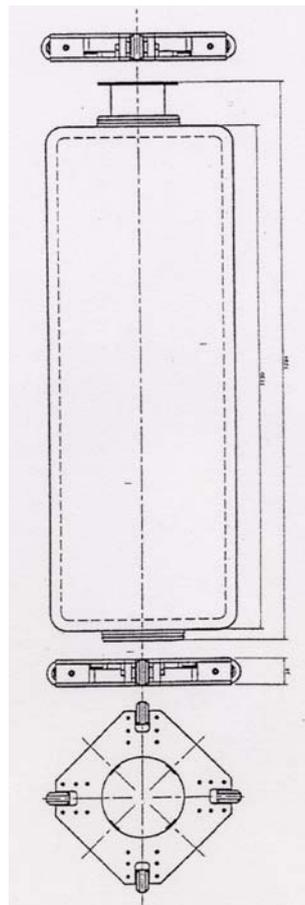


Abbildung 4-2: Endlagerbehälter für Primärbehälter mit verglasten HAW

Zum Einsatz in diesen Behältern sind folgende Gebinde vorgesehen

- HAW- und CSD-C-Kokillen

Da die Wiederaufarbeitung auch bei der COGEMA stattfindet, ist die HAW-Kokille identisch mit der in Kapitel 5.3 beschriebenen /4-1/, /4-5/.

Die Kenndaten des HAW-Endlagerbehälters sind folgende /4-1/, /4-5/, /4-6/:

- Material Austenitstahl AISI 316L hMo
- Außendurchmesser 520 mm
- Wandstärke 30 mm
- Länge 1580 mm
- Mittlere Gesamtmasse 1000 kg

Die Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials ist mit 15 W/m K angegeben.

Der Behälter ist an den Enden mit jeweils vier Rollen im Abstand von 90° ausgerüstet, zur Führung dienen und das Einbringen in das Einlagerungsrohr im Endlager erleichtern (s. Abbildung 4-2). An einem Ende des Behälters ist ein Haltekopf montiert.

4.1.2 Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall

In Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 sind die Gebinde für beide Szenarien mit Wärmeleistungen ≥ 20 W zum Zeitpunkt der Konditionierung aufgeführt.

Herkunft	Gebindeanzahl	Wärmeleistung per Gebinde [W]
BE-Wiederaufarbeitung (Kokillen)	3.915	602
Strukturteile und technologische Abfälle (CSD-C-Kokillen)	6.410	20
Demontage Leistungsreaktoren (MAW)	2.075	176

Tabelle 4-3: Belgien - Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“

Hierzu kommt weiterhin noch der Wärmeeintrag aus ca. 70 tSM MOX-BE

Herkunft	Gebinde- anzahl	Wärmeleistung per Gebinde [W]
BE-Wiederaufarbeitung (Kokillen)	420	602
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Doel 1 u. 2)	1.669	188
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Tihange 1 u. 2, Doel 3)	4.780	188
Ausgedienter UO ₂ -Kernbrennstoff (Tihange 2, Doel 4)	3.266	188
MOX-Kernbrennstoff	144	905
Strukturteile und technologische Abfälle (CSD-C Kokillen)	820	20
Demontage Leistungsreaktoren (MAW)	2.075	176

Tabelle 4-4: Belgien – Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Direkte Endlagerung“

4.1.3 Einlagerungskonzepte

Seit den 70iger Jahren wurden in Belgien verschiedene Endlagerkonzepte in geologischen Formationen betrachtet. Dabei vollzog sich eine Entwicklung von der in anfänglichen Studien betrachteten Bohrlochlagerung (PAGIS) zur Streckenlagerung /4-4/. Die gegenwärtige Referenzkonzeption geht von einer Endlagerung in Strecken in einem geologischen Endlager in einer Boom-Ton-Formation am Standort Mol-Dessel aus. Dieses Konzept liegt der nachfolgenden Beschreibung zu Grunde.

Entsprechend den zwei Optionen des Kernbrennstoffkreislaufes sieht auch das Endlagerkonzept zwei Optionen vor:

- Endlagerung der HAW aus der Wiederaufarbeitung aller ausgedienter Brennelemente (Referenzoption) sowie der übrigen Abfälle;
- Direkte Endlagerung der Brennelemente und Endlagerung der verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gemäß den bestehenden Verträgen sowie der übrigen Abfälle.

Als Randbedingung für die Endlagerung gilt für beide Optionen „Die maximale Temperatur im Verfüllmaterial auf Tonbasis, das als technische Barriere eingesetzt wird, darf bei wärmeentwickelnden Abfällen 100 °C nicht überschreiten“ /4-6/. Die Einhaltung dieser Randbedingung kann durch folgende Faktoren gewährleistet werden:

- Dauer der Abkühlzeit der HAW bzw. ausgedienten Brennelemente
- Abstand zwischen den Containern in der Einlagerungsstrecke
- Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. durch das Layout des Endlagers
- Thermische Eigenschaften des Nahfeldes

Aus thermischen Berechnungen wurde bestimmt, dass die o. g. Randbedingung für das Referenzendlager für verglaste HAW bei einer maximalen Wärmeleistung pro Behälter von 400 W eingehalten werden kann, was einer Abkühlzeit vor Endlagerung von 60 Jahren entspricht /4-6/.

4.1.4 Endlagerauslegung/-technik

Das vorgesehene Endlager besteht aus einem Streckennetz in der Mitte der Boom-Ton-Formation in einer Teufe von ca. 230 m /4-1/. Der Zugang zum Endlager wird durch zwei Schächte gebildet, die in einem Abstand von ca. 400 m angeordnet sind. Der Innendurchmesser der Schächte beträgt ca. 6 m. Untertage sind die Schächte an der Basis mit einer Verbindungsstrecke mit einem Durchmesser von 2 m und einer Länge von 400 m verbunden. Die Verbindungsstrecke stellt gleichzeitig den Fluchtweg dar. Von den Schächten gehen beidseitig rechtwinklig zur Verbindungsstrecke zwei Hauptstrecken mit einem Durchmesser von 3,5 m ab. Diese Hauptstrecken bilden den Zugang zu dem Endlagerfeld für verglaste HAW und ausgedienten Kernbrennstoff auf der einen Seite von den Schächten und zu dem Endlagerfeld für LILW auf der anderen Seite. Die Anordnung des Endlagers folgt der Neigung der Tonformation, die ca. 1 bis 2° beträgt.

Die Auswahl der Durchmesser der Schächte und der Strecken erfolgte auf der Grundlage praktischer, technischer, ökonomischer und sicherheitsrelevanter Erwägungen.

4.1.4.1 Endlagerung verglaster HAW

Die Planung für das Referenzendlager für verglaste HAW geht von 3915 (s. Tabelle 4-1) einzulagernden Behältern aus. Diese Anzahl schließt die vorhandenen 420 Behälter ein, die aus den bestehenden Verträgen zur Wiederaufarbeitung resultieren sowie 3495 Behälter, die bei einer Aufhebung des Moratoriums produziert werden würden. Falls Belgien die Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes nicht wieder-

aufnehmen sollte, werden die bereits vorhandenen Behälter mit verglasten HAW zusammen mit den Brennelementbehältern endgelagert.

Die Endlagerung der Behälter mit verglasten HAW erfolgt in acht Strecken mit einem Durchmesser von 2,70 m und einer Länge von ca. 800 m (Abbildung 4-3). Die Einlagerungsstrecken liegen rechtwinklig zu den Hauptstrecken und werden von diesen in drei Felder geteilt. Die Felder außerhalb der Hauptstrecken sind jeweils 200 m lang und zwischen den Hauptstrecken 400 m. Der Abstand der ersten Strecke von der Verbindungsstrecke beträgt 100 m und der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken 40 m. Dieser Abstand wurde gewählt, um die mittlere Temperaturerhöhung der Wirtsformation auf 6 °K zu begrenzen. Diese Temperaturerhöhung wurde von ONDRAF/NIRAS festgelegt, da keine entsprechenden Vorschriften existieren. Die Gesamtfläche der Einlagerungsfelder umfasst 0,224 km² und das Hohlraumvolumen ca. 39.000 m³.

Die Einlagerungsstrecken werden mit vorgefertigten Betonelementen mit einer Stärke von ca. 25 cm ausgebaut. Die betonierten Einlagerungsstrecken werden mit vorgefertigten, vorkompaktierten Bentonitblöcken in einer Stärke von 70 cm ausgebaut. In der Mitte des Bentonitausbaus wird das so genannte Endlagerrohr mit einem Außendurchmesser von 508 mm montiert, das aus einzelnen Segmenten wasserdicht zusammengeschnitten wird. Das Einlagerungsrohr wird aus Austenitstahl mit einer Wandstärke von 10 mm gefertigt. In das Einlagerungsrohr werden die Endlagerbehälter ohne Zwischenraum einer hinter dem anderen eingebracht. Das Einbringen der Endlagerbehälter erfolgt fernbedient.

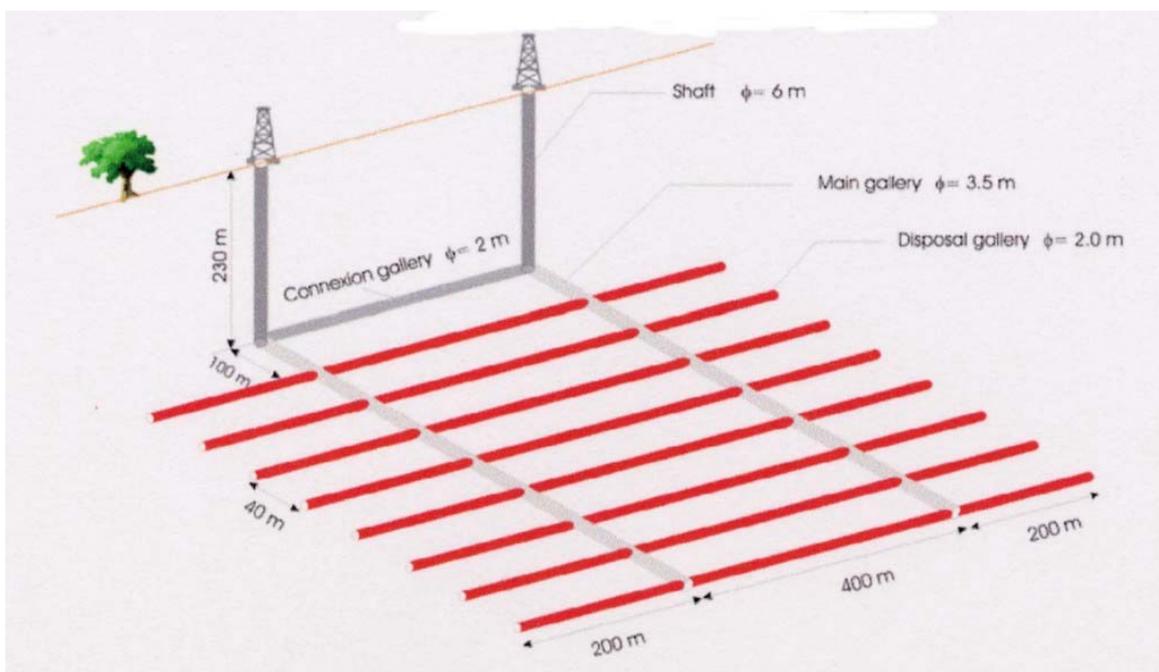


Abbildung 4-3: Endlager für verglaste HAW /4-2/

Vor dem Einbringen der Endlagerbehälter wird der Bentonit ausbau zwischen Beton ausbau und Endlagerrohr bis zur Sättigung gewässert. Um den Quelldruck des Bentonits am Austritt in die Hauptstrecken aufzunehmen, wird der Ringspalt an den Hauptstrecken verschlossen. Die Einlagerungsrohre werden am Austritt in die Hauptstrecken mit Gleittüren versehen, die den Strahlenschutz des Personals während des Betriebes gewährleisten /4-1/, /4-4/. Nach Füllung eines Einlagerungsrohres wird dieses verschlossen.

4.1.4.2 Endlagerung ausgedienter Brennelemente

Das Grundprinzip des Endlagers ist an das Konzept des Endlagers für verglaste HAW angelehnt. Berücksichtigt werden dabei die größere Länge der Endlagerbehälter (5 m anstelle 1,6 m) sowie die längere Abkühlzeit der Behälter im Endlager. Die Hauptunterschiede sind:

- Der Winkel zwischen den Hauptstrecken und den Einlagerungsstrecken wurde von 90° auf 45° reduziert, um das Einbringen der Behälter in das Endlagerrohr zu ermöglichen.
- Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken wurde auf 110 m erhöht, um eine mittlere Erwärmung der Wirtsgestein um 6° einzuhalten.
- Die Anzahl der Behälter wurde an die Wärmefreisetzung per Meter Einlagerungsstrecke angepasst.

Abbildung 4-4 zeigt einen Schnitt einer Einlagerungsstrecke für verglaste HAW.

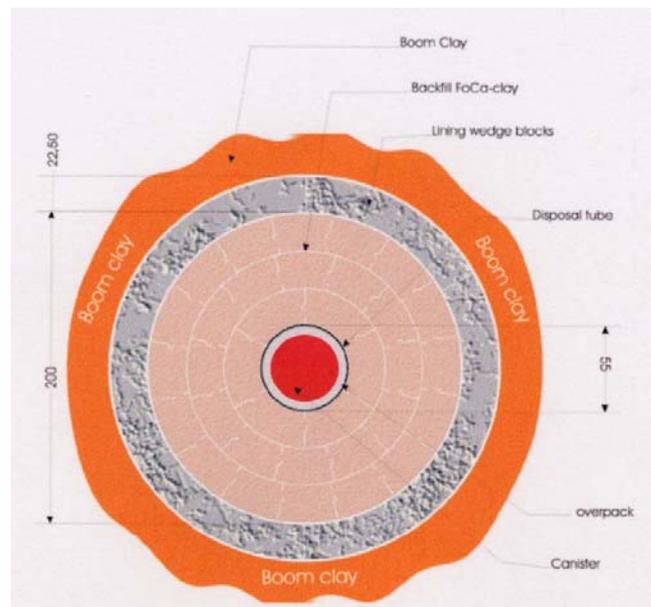


Abbildung 4-4: Schnitt einer Endlagerungsstrecke für verglaste HAW /4-2/

Das Endlagerkonzept für ausgediente Brennelemente ist auf der Abbildung 4-5 gezeigt /4-1/.

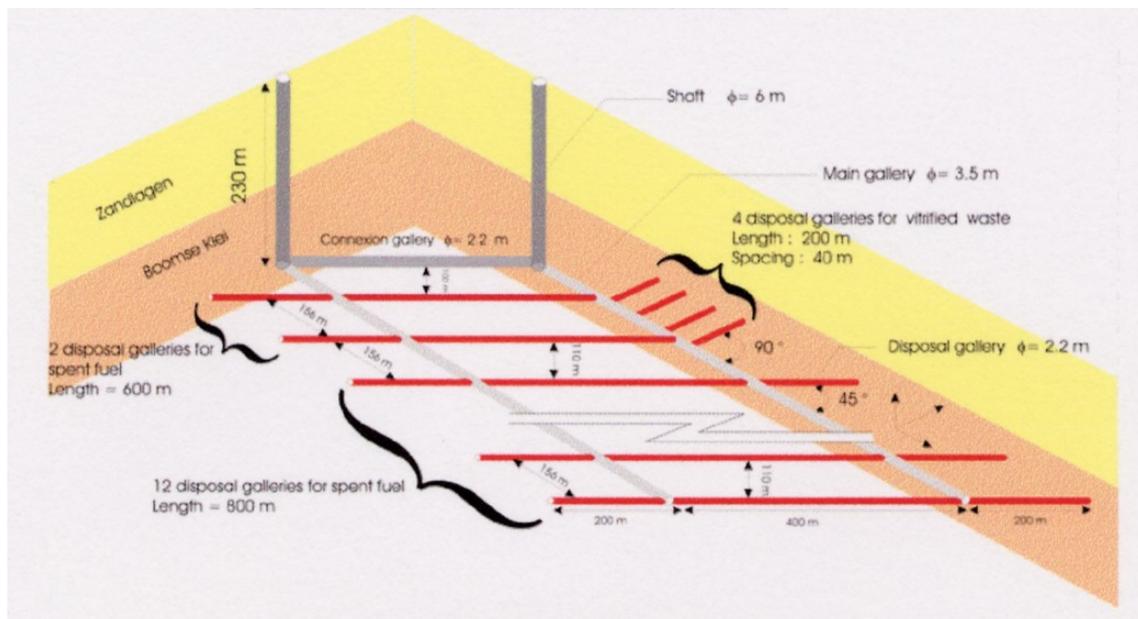


Abbildung 4-5: Endlager für ausgediente Brennelemente

Im Endlager sind vier Einlagerungsstrecken mit einer Länge von je 200 m für die bereits vorhandenen verglasten HAW vorgesehen, die wie die Einlagerungsstrecken für das HAW Endlager aufgebaut sind.

Zwei Einlagerungsstrecken mit einer Länge von je 600 m und 12 Einlagerungsstrecken mit einer Länge von je 800 m sind für die Endlagerung der Behälter mit ausgedienten Brennelementen vorgesehen. Die Einlagerungsfelder umfassen eine Gesamtfläche von ca. 1,3 km² und ein Gesamthohlraumvolumen von ca. 80.000 m³.

Die Einlagerungsstrecken für ausgediente Brennelemente haben einen Durchmesser von 2,7 m. Nach Betonausbau mit vorgefertigten Elementen werden in die Einlagerungsstrecken jeweils vier Endlagerrohre in quadratischer Anordnung eingebaut. Der Hohlraum zum Betonausbau und zwischen den vier Einlagerungsrohren wird mit Bentonitformsteinen verfüllt (Abbildung 4-6).

Bei Einlagerung von ausgedienten MOX-Brennelementen wird jeweils ein Einlagerungsrohr in der Mitte der Strecke angeordnet (Abbildung 4-7).

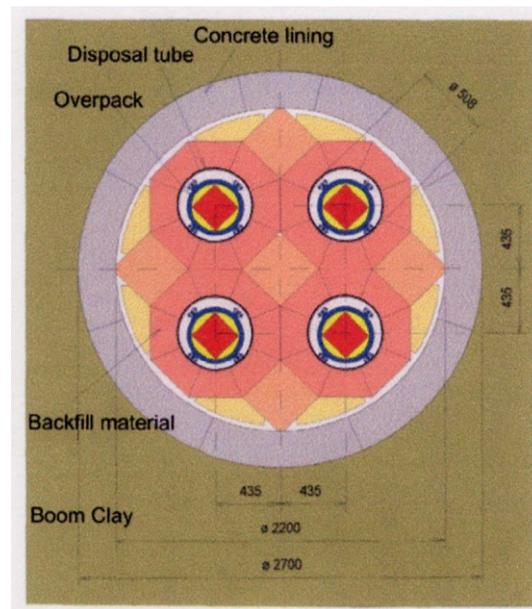


Abbildung 4-6: Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /4-2/

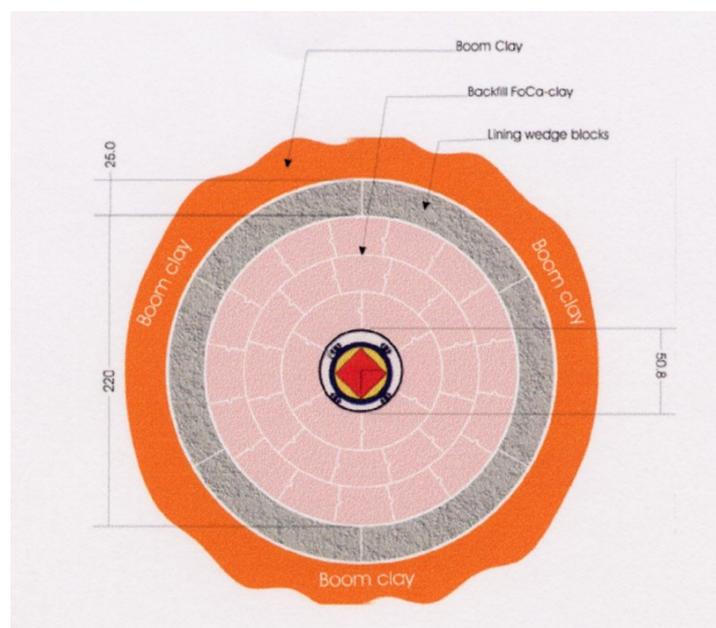


Abbildung 4-7: Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente MOX-Brennelemente /4-2/

4.1.5 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept des Endlagers in einer Boom-Ton-Formation sieht vor, dass die Bentonitverfüllung des Hohlraumes zwischen dem Betonausbau der Einlagerungsstrecken und dem Einlagerungsrohr ein wesentlicher Bestandteil des technischen Barrierensystems ist. Die wesentlichsten Funktionen dieser Barriere sind:

- Die Gewährleistung einer optimalen Wärmeabführung von den Behältern
- Rückhaltung von Radionukliden

Als Verfüllmaterial kommen vorgefertigte Elemente aus einem Gemisch von 60% Fo-Ca-Ton, 35% Sand und 5% Graphit zum Einsatz /4-1/, /4-6/. Durch den Graphitzusatz wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials wesentlich erhöht.

Die Verfüllung der Hauptstrecken und der Verbindungsstrecke soll mit einem Ton-Sand-Gemisch erfolgen. Anschließend werden die Strecken versiegelt. Für die Hauptstrecken sind dabei zwei wasserdichte Verschlussbauwerke vorgesehen, die hintereinander angeordnet werden.

An den Schachtverschluss werden folgende Hauptanforderungen gestellt:

- Die Permeabilität sollte der der Wirtsformation entsprechen. Etwas höhere Werte können zulässig sein, wenn die Sicherheitsanalysen zeigen, dass auch unter diesen Bedingungen die Dosis-Kriterien bzw. Risikokriterien eingehalten werden.
- Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht ist eine wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses.
- Der Verschluss des Schachtes soll den maximal zu erwartenden Gas- und Wasserdrücken in der Endlagertiefe widerstehen.
- Der Schachtverschluss muss den durch die Konvergenz der Wirtsformation hervorgerufenen Spannungen widerstehen können.
- Die minimale Standzeit des Verschlusses soll zwischen einigen Tausend Jahren bis zu 100.000 Jahren liegen.

4.1.6 Auffahrtechnik

Bezüglich der Errichtungstechnologie des belgischen Endlagers liegen noch keine Informationen vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei der Errichtung und insbesondere bei der Erweiterung des Untertagelabors in Mol Erfahrungen gesammelt wurden, die bei der Errichtung des Endlagers zum Einsatz kommen könnten. Deshalb wird im weiteren eine kurze Beschreibung dieser horizontalen Auffahrtechniken gegeben /4-1/, /4-7/, /4-8/.

Für das Auffahren der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten wurde deshalb eine Vollschnittmaschine (Abbildung 4-8) gewählt. Die maximale zulässige Schnittleistung wurde mit 2 m pro Tag bestimmt. Das Überschneiden des Profils wurde auf max. 3 cm begrenzt. Der Ausbau der Strecke erfolgte sofort nach dem Auffahren mit Beton-elementen im so genannten Keilblocksystem (Abbildung 4-9). In /4-1/ ist vermerkt, dass in einem Endlager ein weiterer Ausbau der Strecken mit Stahl erforderlich ist, da die Keilblocktechnologie keine Verbindungen mit Querschlägen zulässt, bzw. eine andere Ausbautechnologie für die Hauptstrecken gewählt wird.

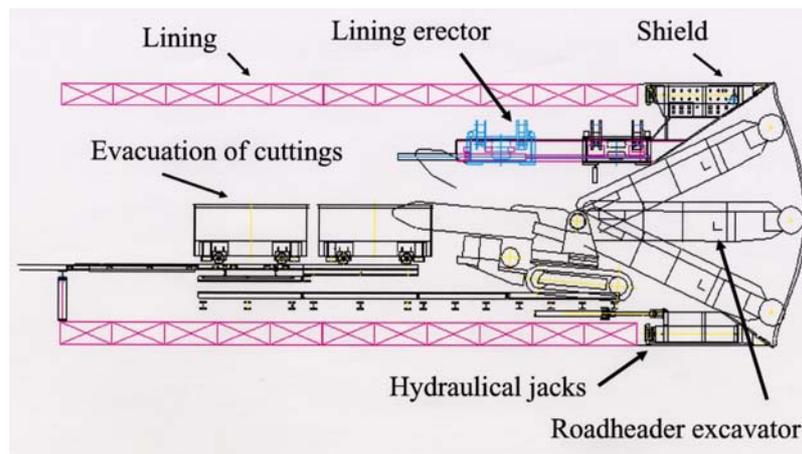


Abbildung 4-8: Untertagelabor HADES–Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /4-9/

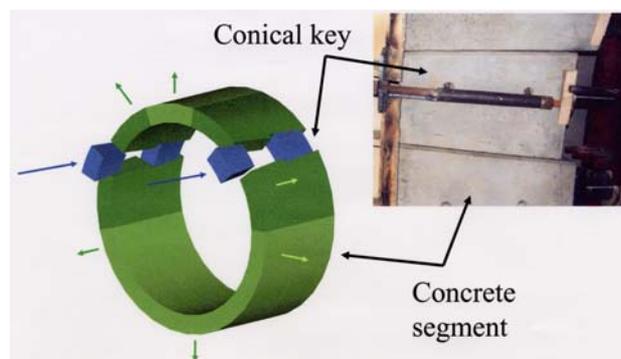


Abbildung 4-9: Keilblocksystem für den Streckenausbau /4-9/

4.1.7 Sicherheitsnachweiskonzept

Studien zur Sicherheitsbewertung der geologischen Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen in einer Tonformation werden in Belgien seit ca. 30 Jahren durchgeführt /4-1/. Die wesentlichsten Schritte dabei waren:

- PAGIS (1988) Entwicklung einer Methodik für die Sicherheitsbewertung eines tiefen Endlagers und erste Bewertung der radiologischen Auswirkungen
- PACOMA (1990) Ergänzung der PAGIS Ergebnisse
- Aktualisierung 1990 (1992) Aktualisierung der Ergebnisse der früheren Studien auf der Grundlage neuer Daten aus dem belgischen Kernenergieprogramm und den durchgeführten Untersuchungen
- Ausgedienter Kernbrennstoff (1995) Erste Sicherheitsbewertung der direkten Endlagerung unter Nutzung der Ergebnisse der Studie von 1992
- EVEREST (1996) Systematische und quantifizierte Analyse der verschiedenen Unsicherheiten und deren relative Bedeutung für eine Sicherheitsanalyse

Im SAFIR Bericht ist das Hauptaugenmerk auf die Sicherheitsbewertung der Endlagerung der drei Abfallkategorien mit den höchsten Aktivitäten gelegt worden: verglaster HAW, ausgedienter Kernbrennstoff und Hüll- sowie Strukturteile.

4.1.7.1 Temperaturkriterium

Eine wesentliche Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung der festgelegten Temperaturkriterien für das Verfüllmaterial bzw. die Wirtsgesteinsformation. In der ersten Phase der Konzeptentwicklung in Belgien wurde als Temperaturkriterium festgelegt, dass die Temperatur des Boom-Tons 100 °C nicht überschreiten darf. Diese Festlegung resultierte aus verschiedenen Überlegungen, wie

- Keine Dampfbildung bei nichtgesättigten Bedingungen
- Reduzierung der Umwandlung von Mineralen, insbesondere der Illitisierung des Smectits

Die Konsequenz dieser Temperaturfestlegung ist, dass an der Grenze Einlagerungsrohr – Verfüllung höhere Temperaturen , bis zu 150 °C, auftreten können /4-6/. In der Folgezeit wurde dieses Kriterium kritisch bewertet und im Ergebnis der Analysen ein neues Temperaturkriterium festgelegt:

Die maximale Temperatur im Verfüllmaterial auf Tonbasis, dass als technische Barriere für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle eingesetzt wird, darf 100 °C nicht überschreiten /4-6/.

Die Hauptargumente für diese Festlegung sind:

- Vermeidung einer möglichen Verdampfung von Wasser, das in Poren an einzelnen Stellen zwischen Endlagerrohr und Verfüllmaterial auch nach Sättigung des Bentonits bei atmosphärischen Druck vorhanden sein könnte;
- Verminderung einer Mineralumwandlung und Illitisation
- Verminderung der Wirkung von Kombinationseffekten von thermischen, hydrologischen, mechanischen, mineralogischenphysikalischen und chemischen sowie Transportprozessen;
- Verringerung der Korrosionsrate der Endlagerbehälter;
- Erleichterungen bei der Bestimmung von Kenndaten in Labors;
- Die Migration von Radionukliden bei hohen Temperaturen ist nur sehr gering erforscht. Die Vorhersage des Verlaufes komplexer Prozesse ist bei hohen Temperaturen mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Die Anfälligkeit von Meßsystemen, die bei Experimenten oder für das Endlagermonitoring eingesetzt werden, ist bei niedrigeren Temperaturen geringer.

Zur Bestimmung der Bedingungen, unter denen dieses neue Kriterium bei der Referenzauslegung des Endlagers im Boom-Ton in Mol-Dessel eingehalten werden kann, wurden entsprechende thermische Berechnungen für verglaste HAW durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung im Boom-Ton, im Betonausbau und im Einlagerungsrohr sowie durch Konvektion im Zwischenraum zwischen Endlagerbehälter und Einlagerungsrohr erfolgt. Folgende Wärmeleitfähigkeiten, (s.

Tabelle 4-5) wurden den Berechnungen zugrunde gelegt:

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/m K]
Einlagerungsrohr und Endlagerbehälter Austenitstahl AISI 316	15,0
Verfüllung (Referenzmischung)	2,0
Betonausbau (Blockkeilausbau)	0,9
Ton-Wirtsgesteinsformation (Boom-Ton)	1,69

Tabelle 4-5: Wärmeleitfähigkeit der Barrieren

Die Berechnungen ergaben, dass eine Mindestabklingzeit von ca. 60 Jahren eingehalten werden muss, um dem o. g. Temperaturkriterium genügen zu können. Die Wärmeleistung eines einzelnen Behälters beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 400 W /4-6/. Bezogen auf das konzipierte Endlagerfeld bzw. die Einlagerungsstrecken ergibt sich eine maximale zulässige Wärmebelastung von ca. 100 kW/ha /4-10/ bzw. 250 W/m.

4.1.7.2 Bewertung der Langzeitsicherheit

Die Bewertung der Langzeitsicherheit des Endlagers ist durch ein schrittweises und iteratives Herangehen gekennzeichnet. Die Methodologie der Langzeitsicherheitsbewertung umfasst folgende Hauptschritte:

- Entwicklung von Szenarien
 - Bestimmung der FEP
 - Beschreibung der Szenarien

- Bewertung der Szenarien
 - Konzeptmodellierung
 - Mathematische und numerische Modellierung
 - Berechnung der Auswirkungen, einschließlich Analyse von Unsicherheiten und der Sensibilität
 - Interpretation der Ergebnisse und Zuverlässigkeitsanalyse basierend auf qualitativen und quantitativen Argumenten

Es werden zwei Gruppen von Szenarien betrachtet:

- Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers oder Referenzszenarium, welches alle FEP umfasst, die sicher oder fast sicher eintreten können und so die zu erwertende Verkettung von Ereignissen und Prozessen beschreiben, die unvermeidlich zu Strahlenbelastungen in einer sehr langen Zeitspanne führen;

- Szenarium einer gestörten Entwicklung des Endlagers, das sich mit störenden Ereignissen und Prozessen befasst, die obwohl gewöhnlich unwahrscheinlich, bei ihrem Eintreten trotzdem signifikanten Einfluss auf das Endlagersystem haben können und eine Strahlenbelastung verursachen können.

Die Entwicklung der Szenarien orientiert sich am entsprechenden NEA FEP-Katalog, der 134 generische FEPs erfasst. Von diesen wurden in Belgien 60 FEPs ausgewählt durch Eliminierung von FEPs, die für das belgische Endlagerkonzept nicht zutreffen und solchen, die ausschließlich die Biosphäre betreffen. Die so bestimmten FEPs wurden in die Kategorien Naturphänomene, Anthropologie Aktivitäten und Effekte direkt verknüpft mit der Existenz der Abfälle und des Endlagers sowie Unterkategorien eingeteilt /4-1/.

Das Szenarium der normalen Endlagerentwicklung beschreibt qualitative die vorausgeschauten Funktion des Endlagersystems, basierend auf den bei den Sicherheitsanalysen berücksichtigten Komponenten. Nach /4-1/ wurde bei den Langzeit-Sicherheitsanalysen kein Kredit genommen von den sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Primärverpackungen, der Einlagerungsrohre, der Verfüllung der Endlagerstrecken und dem Betonausbau der Endlagerstrecken. Bei der Bewertung der effektiven Mächtigkeit der Tonbarriere wurde die Störungszone berücksichtigt. Des Weiteren geht das Szenarium davon aus, dass die Migration der Radionuklide durch den Ton erfolgt hauptsächlich durch molekulare Diffusion und nur zu einem sehr geringen Anteil durch Advektion erfolgt. Die Sorption von Radionukliden im Ton wird berücksichtigt und auch die Verdünnung und Dispersion in den wasserführenden Schichten sowie eine Sorption durch Minerale im Grundwasser. Drei Mechanismen für das Austreten von Radionukliden in die Biosphäre werden betrachtet:

- Abfluss von Grundwasser in Flüsse oder andere Oberflächengewässer,
- Verunreinigung von Boden durch Grundwasser und
- Grundwassergewinnung.

Bei der Betrachtung der Grundwassergewinnung wurde von sehr konservativen Annahmen ausgegangen.

4.1.8 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

Die gegenwärtig bekannte Terminvorstellungen für die Errichtung eines Endlagers in einer tiefen Tonformation in Belgien geht von folgenden Eckpunkten aus /4-11/, /4-12/:

- 50 - 60 Jahre Abkühlung des wärmeentwickelnden HAW bzw. der ausgedienten Brennelemente in einem Zwischenlager

- Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf Basis des SAFIR 2 Berichtes bis ca. 2010, anschließend
- Entscheidung der belgischen Regierung zum Endlagerkonzept und Endlagerstandort
- Erarbeitung eines vorläufigen Sicherheitsberichtes bis ca. 2015, anschließend
- Genehmigungsverfahren
- Baubeginn frühestens 2025
- Betriebsbeginn ca. 2035.

4.1.9 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des belgischen Referenzendlagers in Boom-Ton liegen zusammengefasst folgende Informationen vor /4-1/:

Von ONDRAF/NIRAS wurde eine Methodologie für die Kostenabschätzung entwickelt. Diese beruht auf einer analytischen and parametrischen Schätzung der Grundkosten und der Anwendung von Koeffizienten, die den Grad der Unsicherheiten der Grundkostenschätzungen berücksichtigen sollen.

Bisher hat ONDRAF/NIRAS detaillierte Kostenabschätzungen nur für ein Endlager für verglasten HAW und ausgediente Brennelemente vorgenommen, da für den Endlager teil für LILW noch kein Konzept vorliegt. Es wurde allerdings berücksichtigt, dass höchstwahrscheinlich ein gemeinsames Endlager für die genannten Abfallkategorien errichtet wird. Tabelle 4-6 zeigt die Ergebnisse der Kostenabschätzungen für die zwei Endlageroptionen - Komplette Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes und Direkte Endlagerung der ausgedienten Brennelemente.

Die in der Tabelle 4-6 aufgeführten Kostenabschätzungen berücksichtigen nicht die Kosten für bisher geleistete FuE-Arbeiten, die für die Zeit von 1974 bis 2000 mit 150 Mio. € zu Preisen aus dem Jahr 2000 bewertet werden.

Die Unsicherheitskoeffizienten wurden nach der Methode von EPRI (Electric Power Research Institute) abgeschätzt.

Endlagerphase	Komplette Wiederaufarbeitung			Direkte Endlagerung		
	Grundkosten Mio. €	Koeffizient	Schätzkosten Mio. €	Grundkosten Mio. €	Koeffizient	Schätzkosten Mio. €
Errichtung	190	1,95	371	430	2,40	1032
Betrieb	63	1,95	371	53	2,70	144
Schließung	36	2,38	85	106	3,00	318
Gesamt	289		578	589		1494

Tabelle 4-6: Kostenabschätzung für ein Endlager in Boom-Ton (Stand 1997, Preise, Stand 2000) /4-1/

4.2 Schweiz

In der Schweiz fällt der überwiegende Teil der radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb der fünf Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 3,2 Gw_e an.

Die Verarbeitung und Konditionierung aller anfallenden radioaktiven Abfälle wird mit Ausnahme der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff in der Schweiz durchgeführt. Zur Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes bestehen gegenwärtig Verträge mit Frankreich und Großbritannien über die Wiederaufarbeitung von insgesamt 1000 t. Die dabei anfallenden radioaktiven Abfälle werden in die Schweiz zurückgeführt.

Die gegenwärtige Nuklearpolitik der Schweiz sieht die Errichtung von zwei Endlagern vor - ein geologisches Endlager für die Endlagerung schwach- und mittelaktiver radioaktiver Abfälle und ein geologisches Endlager für hochaktive radioaktive Abfälle und ausgedienten Kernbrennstoff.

Seit Ende der 60er Jahre werden in der Schweiz Untersuchungen zur Eignung von tiefen geologischen Formationen für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen durchgeführt. In einer ersten Phase wurde im Rahmen des Projektes Kristallin die Endlagerung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz untersucht. Mit dem „Projekt Gewähr 1985“ konnte die generelle Eignung des Gesteins nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Endlagerforschung wurden 1985 in dem Bericht zum „Projekt Gewähr 1985“ zusammengefasst. Dieser Bericht sollte als Entsorgungsnachweis für die radioaktiven Abfälle der Schweiz dienen. Der Schweizer Bundesrat beurteilte 1988 die Ergebnisse des Projektes Gewähr wie folgt /4-13/:

- Für schwach- und mittelaktive Abfälle ist der Entsorgungsnachweis erbracht.
- Für hochaktive Abfälle und langlebige α -haltige Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ist der Sicherheitsnachweis im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht; hingegen besteht noch kein Standortnachweis für ein Endlager.
- Aus bautechnischer Sicht bestehen keine Bedenken gegen die Erstellung eines Endlagers.

Gleichzeitig wurde vom Bundesrat die Ausdehnung der Untersuchungen auf Sedimentgesteine gefordert. Von der Nagra wurden dazu Gesteinsformationen der Unteren Süßwassermolasse und des Opalinuston untersucht und der Opalinuston als perspektivische Gesteinsformation ausgewählt. Die seit 1997 laufenden Untersuchungen des Opalinuston im Zürcher Weinland haben die Erwartungen an den Standort bestätigt. Ende 2002 soll für diese Formation und diesen Standort der Entsorgungsnachweis für HAW und langlebige α -haltige Abfälle fertiggestellt sein.

Für Eignungsuntersuchungen des Opalinuston für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurde am Mont Terri, Kanton Jura, ein Untertagelabor errichtet. Die Forschungsarbeiten dieses Labors werden mit breiter internationaler Beteiligung, darunter auch deutsche Organisationen, durchgeführt.

1999 wurde vom Schweizer Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation eine Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) eingesetzt, die bezüglich der Endlagerkonzepte der Schweiz u. a. zu folgenden Schlussfolgerungen kam:

- An der Oberfläche gelegene Abfalllager und tiefe Dauerlager werden dem Ziel der Langzeitsicherheit ebenfalls nicht gerecht.
- Geologische Endlagerung ist die einzige Methode zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen der Langzeitsicherheit (bis zu mehr als 100 000 Jahren) entspricht.
- Die gesellschaftlichen Anforderungen an die Abfalllagerung orientieren sich am Prinzip der Reversibilität. Die EKRA hat daher das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung entwickelt, das Endlagerung und Reversibilität verbindet.

Die EKRA hat in ihrem Abschlussbericht bezüglich der Endlagerung von HAW/LL-ILW in einer Tonformation empfohlen:

„Das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston ist grundsätzlich sowohl für die geologische Endlagerung als auch für eine kontrollierte Langzeitlagerung geeignet. Nach Vorliegen des Entsorgungsnachweises sind die Standortcharakterisierung voranzutreiben und die Lagerplanung und Standorterkundung an die Hand zu nehmen.“

Dem Endlagerkonzept der Schweiz für hochaktive radioaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle liegen folgende Abfallmengen (siehe Tabelle 4-7) bei Annahme einer 40-jährigen Betriebsdauer der bestehenden Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitung von 1.000 t ausgedienten Kernbrennstoffs gemäss den bestehenden Verträgen zugrunde :

Abfallart	Langlebige mittelaktive Abfälle [m ³]	Hochaktive Abfälle [m ³]
Aus der Wiederaufarbeitung	2000	130
Direkte Endlagerung Uran- und MOX-Brennelemente		4000
Insgesamt	2000	4130

Tabelle 4-7: Abfallmengengerüst HAW und LL-ILW

Nach /4-4/ sind folgende Mengen an HAW/LL-ILW endzulagern:

- ca. 700 Container mit verglasten HAW
- ca. 2000 tSM direkte Brennelemente-Endlagerung
- ca. 700 m³ LL-ILW

Die Endlagerkonzeption geht von einer mindestens 40-jährigen Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle aus.

4.2.1 Endlagerbehälter für HAW und MAW aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente

Zum Behälterkonzept liegen nur vereinzelte Informationen vor. In einer älteren Veröffentlichung /4-14/ sind folgende Daten zu den Behältern für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung angegeben:

- HAW-Kokille
 - Länge: 1850 mm
 - Außendurchmesser: 350 mm
 - Wandstärke: 6 mm
 - Gewicht des verglasten Abfalls: 380 kg
 - Gesamtgewicht: 500 kg
 - Behältermaterial: Austenitstahl (24% Cr, 12% Ni)

- Behälter für Strukturteile und Endstücke
 - Länge: 2000 mm
 - Außendurchmesser: 1100 mm
 - Wandstärke: 100 mm
 - Aktivitätsinventar: 8500 Ci
 - Behältermaterial: Beton

- Filtrierrückstände
 - Länge: 1000 mm
 - Außendurchmesser: 800 mm
 - Wandstärke: 100 mm
 - Aktivitätsinventar: 100 000 Ci
 - Behältermaterial: Beton

Die HAW-Kokillen sollen in einem verlorenen Abschirmbehälter endgelagert werden (Abbildung 4-10).

Als Material für den mit Blei abgeschirmten HAW-Endlagerbehälter wurden Titan, oder Tantal, Hasteloy B bzw. Austenitstahl (Stahl 1.4439) angegeben. Die endgültige Auswahl des Materials soll entsprechend den standortspezifischen Randbedingungen erfolgen.

Nach /4-4/ sollen die Primärcontainer mit verglasten HAW bzw. ausgedienten Brennelementen in massive Endlagerbehälter aus Stahl bzw. Kupfer mit verschweißtem Deckel gepackt werden. Die Standfestigkeit der Stahlcontainer wird mit 1000 Jahre bewertet /4-15/, die der Kupferbehälter mit 10^5 Jahren /4-16/. Der Außendurchmesser eines Stahl-Endlagerbehälters ist in /4-17/ mit 940 mm angegeben.

Weiterhin sollen die Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente als zylindrische Stahlbehälter ausgebildet werden, mit einer Mindestwandstärke von 0,15 m, einer Länge von ca. 5 m und einem Durchmesser von ca. 1 m. In einen Endlagerbehälter ist beabsichtigt, entweder 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente zu verpacken.

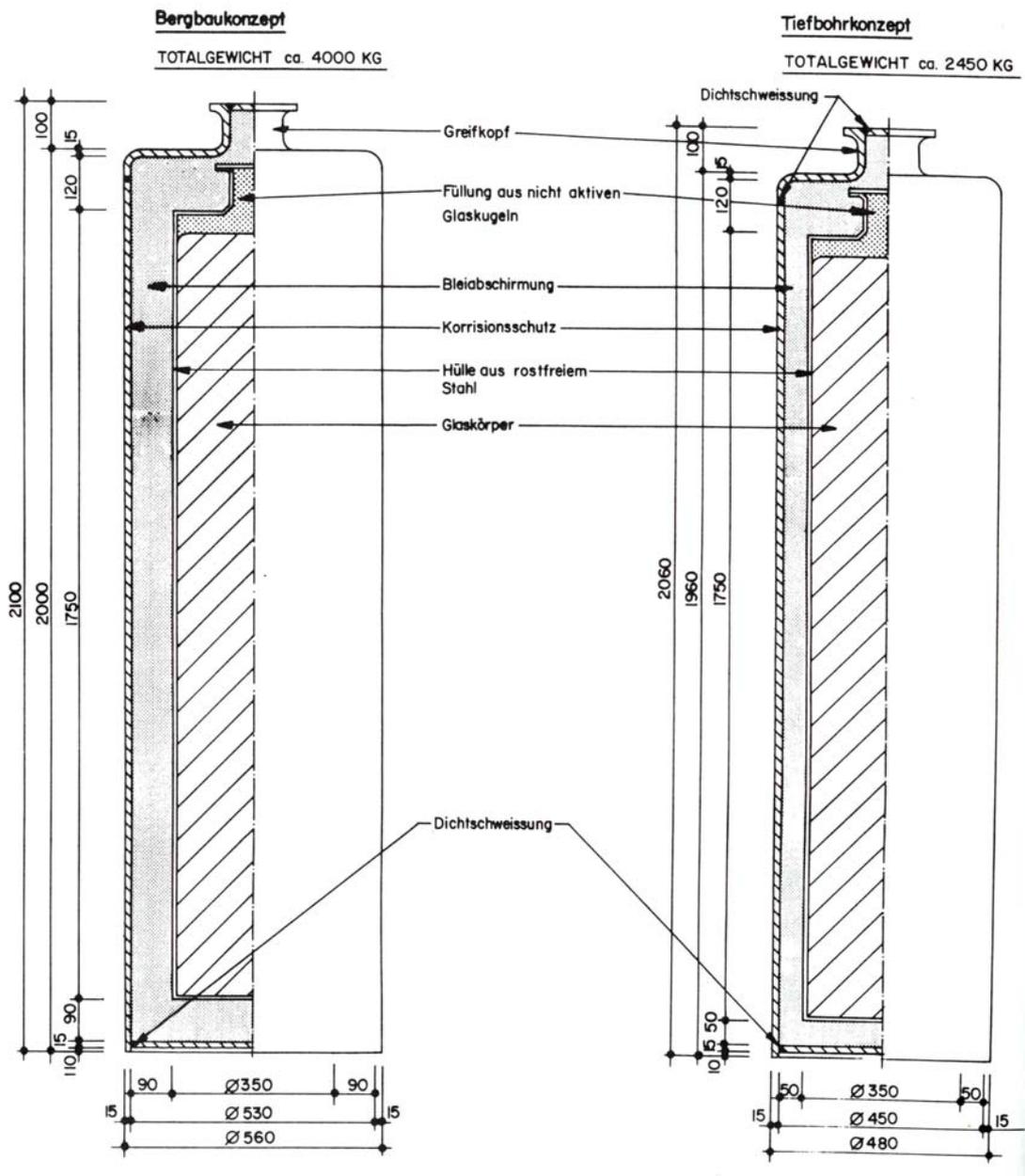


Abbildung 4-10: HAW-Kokille in Endlagerabschirmbehälter

4.2.2 Einlagerungskonzepte

Für die Endlagerung in Ton wurde der Opalinuston im Zürcher Weinland ausgewählt. In dieser Region verlaufen die sedimentären Ablagerungen meist horizontal und die Mächtigkeit des Opalinustons beträgt zwischen 100 und 120 m. Mit einer Bohrung wurde die Opalinustonformation in Teufen von 540 m bis 652 m festgestellt. Die Permeabilität des Opalinuston sowie der sedimentären Schichten 100 m unter- und oberhalb des Tons wurde mit 10^{-13} m/s bestimmt. Die bisherigen Spannungsmessungen haben gezeigt, dass bei der Errichtung eines Endlagers keine größeren Schwierigkeiten zu erwarten sind /4-18/.

In /4-19/ sind folgende weitere Kenndaten für den Opalinuston angegeben:

- Rohdichte, kg/m ³ :	2400
- Dichte, kg/m ³ :	2700
- Einachsige Druckfestigkeit, MN/m ² :	15
- Zugfestigkeit (Biegefestigkeit), MN/m ² :	-
- Innerer Reibungswinkel:	28°
- Kohäsion, MN/m ²	4,5
- Elastizitätsmodul, MN/m ² :	5000
- Querdehnungszahl	2,8
- Quelldruck, MN/m ² :	2
- Wärmekapazität	
• Bei 20°, Ws/kgK	2.3x10 ³
• Bei 85°, Ws/kgK	2,3x10 ³
- Wärmeleitfähigkeit, W/mK	1,25
- Wärmedehnungskoeffizient, K	10x10 ⁻⁶

Die Gebirgstemperatur wird mit 34 °C in 800 m Teufe angegeben.

Ausgehend von dem von der EKRA entwickelten Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung, das Endlagerung und Reversibilität verbindet, sieht das derzeitige Schweizer Endlagerkonzept die Errichtung folgender Endlagerelemente vor:

- Erprobungsendlager – eine zweite Generation eines Untertagelabors
- Pilotendlager – ein kleines Endlagerfeld, das hydraulisch vollständig vom Hauptendlager getrennt ist, das repräsentative Abfallarten des Hauptlagers enthält und mit einem permanenten Monitoring ausgerüstet ist.
- Hauptendlager – Einlagerungsfelder für die radioaktiven Abfälle, die nach Einlagerung unmittelbar verfüllt werden.

Eine Prinzipdarstellung dieser Konzeption ist auf Abbildung 4-11 /4-20/ gezeigt.

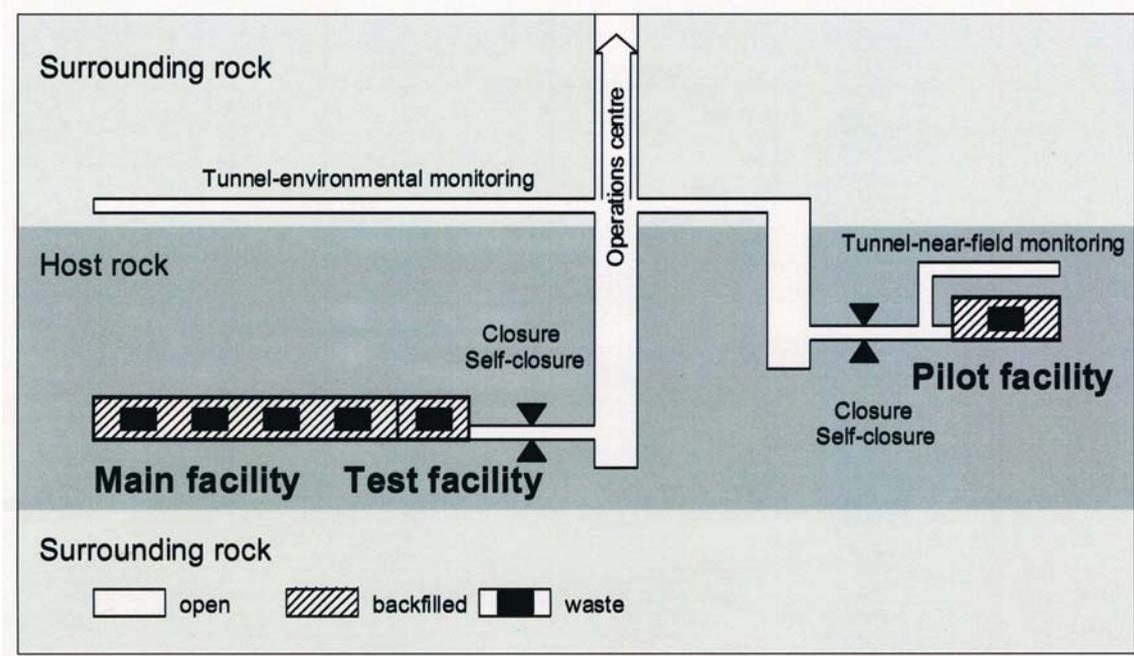


Abbildung 4-11: Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung

4.2.3 Endlagerauslegung/-technik

Basierend auf diesem Prinzipkonzept wurde in der Schweiz ein Endlagerkonzept im Opalinuston entwickelt, das in Abbildung 4-12 dargestellt ist /4-16/. Das prinzipielle Layout des Endlagers ist in /4-21/ gezeigt.

Die Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen ist im Hauptfeld vorgesehen. Das Hauptfeld besteht aus den Einlagerungsstrecken mit einem Durchmesser von ca. 2,5 m und einer Länge von 800 m, die zwischen der Transportstrecke und der sogenannten Errichtungstrecke angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 40 m. Die Einlagerungsstrecken gehen in einem Winkel von 60° von der Transportstrecke ab und sind längs der horizontalen Hauptspannungen des Wirtsgesteins orientiert. Die Neigung der Einlagerungsstrecken beträgt ca. 7°. Das Endlager ist in der Mitte der Opalinustonschicht in einer Tiefe von ca. 650 m angeordnet. Das unterirdische Endlager ist über eine Rampe und einen Schacht mit der Oberfläche verbunden. Die Rampe mit einer Neigung von 12,5° verläuft diagonal über das Hauptfeld und mündet in der unterirdischen Umladestation sowie dem Erprobungsendlager. Der Verlauf der Rampe erlaubt die Installation von Messeinrichtungen an ausgewählten Punkten oberhalb des Endlagerfeldes. Die Rampe wird in der ersten Phase für die Errichtung des Endlagerbergwerkes genutzt.

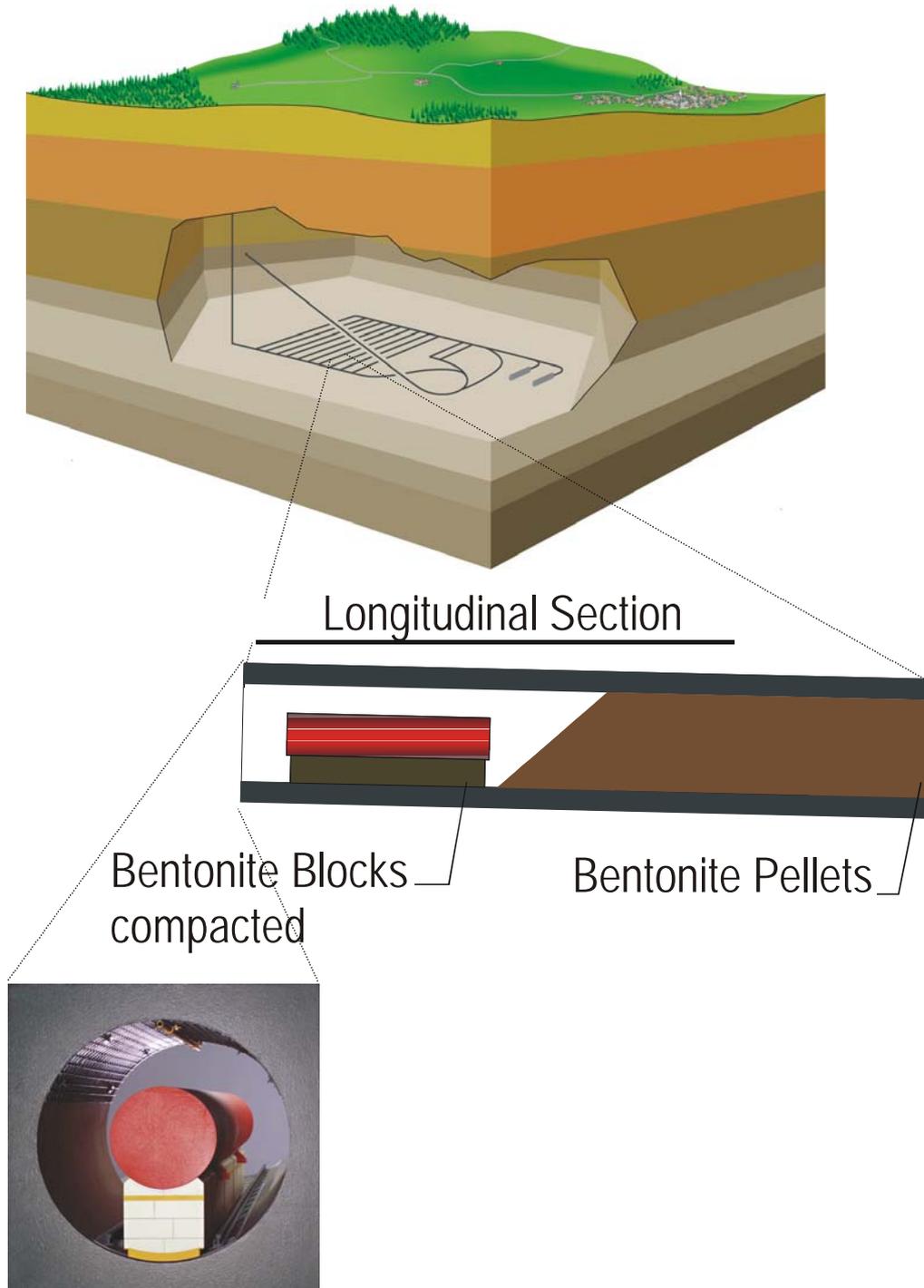


Abbildung 4-12: Endlager für HAW/ILW im Opalinuston

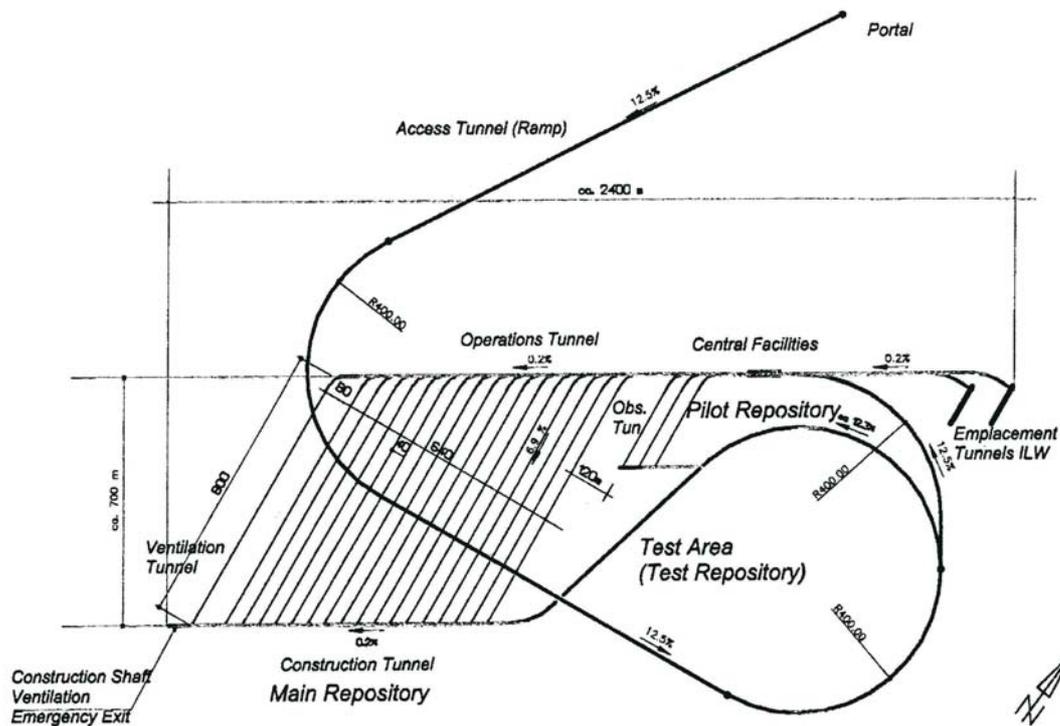


Abbildung 4-13: Layout des Endlagers im Opalinuston

Mit Beginn der Einlagerung wird die Rampe ausschließlich für den Transport der Abfallgebinde genutzt. Die zur Einlagerung parallele Errichtung weiterer Einlagerungsstrecken erfolgt über die Errichtungsstrecke und den Schacht. Gleichzeitig wird mit Beginn der Einlagerung die Verbindung zwischen Transportstrecke und Errichtungsstrecke verschlossen und diese Verbindungsstrecke nur noch für die Wetterführung genutzt. Der Schacht dient gleichzeitig als Wetterschacht und Notausgang.

Vor der Errichtung der Einlagerungsstrecken im Hauptfeld wird das Pilotendlager errichtet. Dieses besteht aus zwei kurzen Einlagerungsstrecken und einer Kontrollstrecke. Diese Strecken sind von beiden Seiten zugänglich und mit Messgeräten ausgestattet.

4.2.3.1 Einlagerungstechnologie

Der Ablauf der Einlagerung der HAW-Abfallgebinde ist wie folgt vorgesehen /4-21/:

Die Anlieferung der Gebinde erfolgt hauptsächlich über den Schienenweg und in Ausnahmefällen über die Strasse zu den Tagesanlagen. Nach Eingangskontrolle werden die Gebinde in endlagerspezifische Transport- bzw. Abschirmcontainer umgeladen und mit einer Zahnradbahn über die Rampe nach Untertage zur Umladestation transpor-

tiert. Hier werden die Gebinde aus den Transport- bzw. Abschirmbehälter auf einen speziellen Einlagerungswagen umgeladen. Der mit einer Seilwinde abgesicherte ferngesteuerte Einlagerungswagen transportiert das Abfallgebilde zusammen mit dem Untergestell aus kompaktierten Bentonitblöcken zum Einlagerungsort und platziert diese in der Einlagerungsstrecke. Danach wird der Einlagerungswagen mittels der Winde aus der Strecke herausgezogen. Anschließend erfolgt die Verfüllung mit Bentonitgranulat. Danach kann das nächste Gebinde eingelagert werden.

4.2.3.2 Verfüll- und Verschlusskonzept

Die Verfüllung des verbleibenden Hohlraumes nach Platzierung eines Containers mit dem Unterbau aus Bentonitblöcken soll mit Bentonitgranulat erfolgen. Dazu wird ein spezieller Wagen in der Umladestation mit Granulat beladen und in die Einlagerungsstrecke verfahren, wo der Hohlraum so verfüllt wird, dass zwischen Granulat und Streckendecke ein freier Raum für die Bewetterung verbleibt. Nach dem das letzte Gebinde in einer Einlagerungsstrecke verbracht wurde, wird der verbliebene Hohlraum unter der Streckendecke mittels einer Rückfülleitung an der Streckendecke pneumatisch verfüllt. Die gefüllte Strecke soll dann mit einem Betonpropfen verschlossen werden, wobei alternative Lösungen untersucht werden.

Die Bentonitblöcke unter den Gebinden sind aus hochkompaktiertem Bentonit gefertigt, mit einer Trockendichte von $1,75 \text{ t/m}^3$. Das Bentonitgranulat hat eine Trockendichte der einzelnen Granulatkörner von $2,2 \text{ t/m}^3$, so dass die mittlere Trockendichte der Rückfüllung ca. $1,5 \text{ t/m}^3$ beträgt.

Als Rohmaterial für die Rückfüllung soll ein Smektit-reicher Montmorillonitton verwendet werden. Die Rückfüllung der Zugangsstrecken, der Rampe und des Schachtes soll nach einem längeren zur Zeit nicht definierten Zeitraum nach Beendigung der Einlagerung erfolgen.

Für die Rückfüllung der Zugangsstrecken soll ein Bentonit-Sand-Gemisch (20/80 oder 30/70) eingesetzt werden.

4.2.3.3 Auffahrtechnik

Zur vorgesehenen Auffahrtechnik liegen keine Informationen vor. In /4-21/ wird dargelegt, dass die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, dass für die Strecken mit einem Durchmesser von 2,5 m kein Streckenausbau erforderlich ist. Es sollen lediglich Anker und Netze für den Arbeitsschutz eingesetzt werden. Alle anderen Strecken, einschließlich der Einlagerungsstrecken für ILW sollen mit konventionellen Mitteln – Anker und Spritzbeton gesichert werden.

4.2.3.4 Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Zum Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik liegen keine Informationen vor.

4.2.4 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

Detaillierte Daten zur Planung und Realisierung des Endlagers liegen nicht vor. In /4-17/ ist angegeben, dass das Endlager um 2050 erforderlich sein wird.

4.2.5 Sicherheitsnachweiskonzept

Entsprechend der Gesetzgebung der Schweiz und den entsprechenden Richtlinien sind dem Sicherheitsnachweiskonzept folgende Grundsätze zu Grunde zu legen /4-22/.

Prinzipien der Endlagerung

Prinzip 1: Die Endlagerung radioaktiver Abfälle darf nur eine geringe zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung zur Folge haben.

Prinzip 2: Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist der Schutz der Umwelt so zu gewährleisten, dass die Artenvielfalt nicht gefährdet und die Nutzung von Bodenschätzen nicht unnötig eingeschränkt wird.

Prinzip 3: Die Risiken für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz dürfen auch im Ausland und in Zukunft nicht höher sein, als sie in der Schweiz heute zulässig sind.

Prinzip 4: Die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren zu gewährleisten.

Prinzip 5: Allfällige Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen eines Endlagers oder Rückholung der Abfälle dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen.

Prinzip 6: Die Vorsorge für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle ist eine Aufgabe, die der heutigen nutznießenden Gesellschaft zukommt und die nicht auf künftige Generationen überwältzt werden darf.

Schutzziele

Schutzziel 1: Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0,1 mSv überschreiten.

Schutzziel 2: Das aus einem verschlossenen Endlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.

Schutzziel 3: Nach dem Verschluss eines Endlagers sollen keine weiteren Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein. Das Endlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können.

Die Einhaltung der Prinzipien der Endlagerung sowie der Schutzziele ist zu jeder Stufe des Bewilligungsverfahrens (Rahmen-, Bau-, Betriebs- und Verschlussbewilligung) mit entsprechenden Sicherheitsanalysen nachzuweisen.

Mit den Sicherheitsanalysen ist darzulegen, welche Vorgänge und Ereignisse auf das Endlagersystem im Laufe der Zeit einwirken könnten, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen abzuleiten. Vorgänge und Ereignisse mit extremer Unwahrscheinlichkeit und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Konsequenzen haben, sowie absichtliche menschliche Eingriffe in das Endlagersystem brauchen in der Sicherheitsanalyse nicht betrachtet zu werden.

In /4-23/ ist ein Weg zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einer kristallinen Formation dargelegt. Dieses Nachweiskonzept geht von einem Vergleich eines radiotoxischen Index (RTI) für natürliche Gesteinsformationen und des RTI eines Endlagers unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls sowie der Rückhaltewirkung der technischen und natürlichen Barrieren aus.

Zum Sicherheitsnachweiskonzept für ein Endlager im Opalinuston liegen derzeit keine Informationen vor. Es ist zu erwarten, dass mit dem bereits erwähnten Entsorgungsnachweis OPA das Sicherheitsnachweiskonzept vorliegen wird.

4.2.6 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des Schweizer Endlagers in Opalinuston liegen keine Informationen vor.

4.3 Frankreich

In Frankreich sind z. Z. 59 Kernkraftwerksblöcke an 19 Standorten in Betrieb mit einer installierten Gesamtbruttoleistung von 65 952 MWe. Der Anteil der Kernenergie an der Gesamtstromerzeugung beträgt ca. 75 % /4-24/. Mit Ausnahme des schnellen Brutreaktors Phenix sind alle in Betrieb befindlichen KKW mit Druckwasserreaktoren ausgerüstet /4-25/. Davon sind

- 34 Reaktoren mit einer Leistung von je 900 MWe, von denen in 19 Reaktoren MOX-Brennelementen eingesetzt sind;
- 20 Reaktoren mit einer Leistung von je 1300 MWe und
- 5 Reaktoren mit einer Leistung von je 1450 MWe.

Insgesamt 11 Kernkraftwerke wurden bisher stillgelegt, darunter Leistungsreaktoren der aufgegebenen Reaktorlinie mit Gas-Graphit-Reaktoren, Test- und Prototypanlagen sowie der schnelle Brutreaktor Super Phenix. Im Ergebnis einer Periodischen Sicherheitsüberprüfung hat die französische nukleare Aufsichtsbehörde DGSNR im Jahre 2002 für die 34 KKW mit 900 MWe Reaktoren, die in den Jahren 1977 - 1988 in Betrieb gegangen sind, den Weiterbetrieb für weitere 10 Jahre genehmigt.

In Frankreich sind alle Einrichtungen des Kernbrennstoffkreislaufes vorhanden, darunter die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague mit zwei Produktionslinien, Anlagen zur Urananreicherung sowie Anlagen zur Fertigung von Uran- und MOX-Brennelementen.

In Frankreich werden hochaktive oder langlebige Abfälle (HAW) als Abfallkategorie C – ausgedienter Kernbrennstoff, oder bereits konditionierte Abfälle aus der Wiederaufarbeitung klassifiziert /4-26/. Die Abfälle enthalten hochaktive Spaltprodukte und Aktinide mit einer signifikanten Wärmeentwicklung.

Die in der Literatur veröffentlichten Daten der vorhandenen und künftigen radioaktiven Abfälle Frankreichs einschließlich des ausgedienten Kernbrennstoffes weisen z. T. recht erhebliche Abweichungen von einander aus (s. Anlagenband 1).

ANDRA veröffentlicht folgende Daten zum radioaktiven Abfall Frankreichs, die sowohl die gegenwärtigen vorhandenen Abfallmengen als auch eine Vorschau, einschließlich Stilllegungsabfälle, umfassen /4-25/:

Den Daten der Tabelle 4-8 liegt folgendes Szenario 1 zugrunde:

- 40 Jahre Betrieb der KKW;
- Gesamtmenge des ausgedienten Kernbrennstoffes ca. 40.000 tSM (Uranoxid-, MOX- und wiederaufbereiteter Uranbrennstoff);
- Der gesamte Uranoxidbrennstoff wird wiederaufbereitet, einschließlich bis zur Stilllegung der bestehenden KKW. Die Verwendung des im Kernbrennstoff enthaltenen Plutoniums ist offen.
- Ausgedienter MOX-Brennstoff (ca. 100 t/a ab 1995) und der ausgediente Uranbrennstoff werden nicht wiederaufbereitet.

Abfallkategorie	TOTAL	Bemerkungen
HAW Verglaste Spaltprodukte	5.000 m ³	Davon Marcule – 500 m ³ und La Hague – 4.500 m ³
Ausgedienter Kernbrennstoff	3.500 t (Schwermetall)	Anteile: 2.650 t MOX und 850 t Uranbrennelemente

Tabelle 4-8: Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 1)

Bei einem Szenario 2, wo jedes Jahr nur soviel Uranoxidbrennstoff wiederaufbereitet wird, wie Plutonium für die MOX-Brennstoffproduktion erforderlich ist, und dann erfolgreicher Wiederaufarbeitung zur Stilllegungszeit der KKW ergibt sich folgendes Mengengerüst, siehe Tabelle 4-9, /4-25/, /4-27/:

Abfallkategorie	Total	Bemerkungen
ILW-LL	56.000 m ³	
HAW Verglaste Spaltprodukte	3.500 m ³	
Ausgedienter Kernbrennstoff	15.000 t	Davon: 2.650 t MOX und 850 t Uranbrennstoff

Tabelle 4-9: Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 2)

Von der CEA wurde der Anfall von HAW - ca. 5.000 m³ bis 2020 veröffentlicht /4-28/:

Nach /4-29/ werden für die Beschreibung des radioaktiven Inventars an hochaktiven und sowie langlebigen radioaktiven Abfälle ca. 60 Abfallströme berücksichtigt, die aus den COGEMA Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague und Marcoule, den CEA-Forschungszentren, und den EDF Kernkraftwerken resultieren. Sowohl die vorhandenen Abfallgebände als auch der künftige Abfallanfall von dem Betrieb der französischen KKW sowie der Wiederaufarbeitungsanlagen werden berücksichtigt. Die Gesamtmenge des ausgedienten Kernbrennstoffes bei einer angenommenen Betriebszeit der KKW von 40 Jahren wird auf ca. 45.000 t eingeschätzt. Das Inventar wird wie folgt angegeben (s. Tabelle 4-10), /4-25/:

Abfallart	Inventar	Abfallgebäude	
		Anzahl der Gebinde	Volumen m ³
1. Verglaster HAW (Kategorie C)	Verglaste Abfälle von CEA Marcoule (PIVER) und COGEMA Marcoule (AVM) (C0) Gegenwärtige verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C1) Künftige verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C2) UOX/MOX verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C3) Verglaste Plutoniumabfälle von COGEMA La Hague (C4)	Von ca. 41.000 bis ca. 131.000	Von ca. 2.500 bis ca. 7.000
2. Ausgedienter Kernbrennstoff	UOX und URE (Wiederaufarbeitungs-uran) (CU1) MOX (CU2)		Von ca. 11.000 bis ca. 75.000

Tabelle 4-10: ANDRA - Vorläufiges Inventar an HAW/langlebigen radioaktiven Abfällen

Die Tabelle 4-11 zeigt die relativ große Unsicherheit zum Inventar, das in ein geologisches Endlager zu verbringen wäre. Ungeachtet dessen, zeigen die verfügbaren Daten zur vorgesehenen Kapazität eines geologischen Endlagers in Frankreich, dass die anfallenden Abfallmengen in einem Endlager verbracht werden können (s. Kapitel 4.3.3).

HAW (Abfallkategorie C) m ³	Ausgedienter Kern- brennstoff	Literaturquelle
5.000	3.500 t	/4-25/
6.000	-	/4-26/
5.000	-	/4-28/
2.500 – 7.000	11.000 – 75.000 m ³	/4-29/
5.000	10.000 m ³	/4-30/
5.000	7.700 t	/4-31/

Tabelle 4-11: Literaturangaben zum Aufkommen an HAW und ausgedientem Kernbrennstoff in Frankreich

In /4-32/ wird ein Mengengerüst für die einzulagernden Abfallströme für zwei Szenarien angegeben, wobei eine Betriebszeit der KKW von 40 Jahren und eine durchschnittliche Elektroenergieerzeugung von 400 TWh/a der KKW zu Grunde gelegt ist.

Szenarium 1 Wiederaufarbeitung des gesamten ausgedienten Kernbrennstoffes von den gegenwärtig bestehenden Kernkraftwerken

Szenarium 2 Wiederaufarbeitung von Uranoxidbrennelementen bis zum Jahre 2010 und dann direkte Endlagerung

Bei diesen Szenarien sind folgende Mengen an Kernbrennstoff wiederaufzuarbeiten:

- Szenarium 1

Uranoxid-Brennelemente	41.500 tSM
Natururanoxid-Brennelemente	800 tSM
MOX-Brennelemente	2.700 tSM

- Szenarium 2

Uranoxid-Brennelemente	16.000 tSM
------------------------	------------

Entsprechend dieser Szenarien ergeben sich die in Tabelle 4-12 aufgeführten Mengen an endzulagernden Abfällen. Diese Daten liegen den weiteren Betrachtungen zu Grunde.

	Szenarium 1 totale Wiederaufarbeitung		Szenarium 2 Wiederaufarbeitung bis 2010 und dann direkte Endlagerung	
Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle				
Gebindetyp*	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³
C0	4080	710	4080	710
C1	5040	910	5040	910
C2	50	10	4800	860
C3	13320	2400	0	0
C4	13250	2390	0	0
Gesamt C Verglaste Abfälle	35740	6420	13920	2480
Abfallkategorie CU – ausgediente Brennelemente				
Gebindetyp*	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³
CU1 Uranoxid-BE u. Natururanoxid-BE	0	0	13500	67500
CU2 MOX-BE	0	0	4000	8000
Gesamt CU Brennelemente	0	0	17500	75500
Total	177130	58230	150970	123390

* Beschreibung der Gebinde s. Kap. 4.3.1

Tabelle 4-12: Endlagerinventar

4.3.1 Behälterkonzepte und -materialien

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht eine Vielzahl von Behältertypen vor, die nach ausgewählten Kriterien für die verschiedenen Abfallarten bestimmt wurden /4-29/, /4-32/. Die Hauptkriterien sind folgende:

- Physikalisch-chemische Kenndaten der Abfälle
 - Abfallart
 - Material der Matrix und Behältermaterial
 - Inhalt an organischen Substanzen
- Art der Konditionierung der Abfälle

- Kritikalität – Anteil an Spaltmaterial in den Abfällen
- Wärmeerzeugung
- Gaserzeugung
- Geometrie und Gewicht der Gebinde

4.3.1.1 Behälter für Abfallkategorie CU - Brennelemente

Tabelle 4-13 zeigt die Primärbehälter für die verschiedenen Brennelemente.

Abfallart	Bezeichnung des Primärbehälters	Erläuterung
EDF Brennelemente	CU1	Uranoxid- und Natururanoxid-BE
	CU2	MOX-BE
CEA Brennelemente	CU3.1	BE und gemischte Brennstoffproben (EL4, OSIRIS, RAPSODIE, SCARABEUS, SILOE...)
	CU3.2	CELESTIN-BE
	CU3.3	BE von Transportanlagen

Tabelle 4-13: Primärbehälter für Abfallkategorie Brennelemente (Abfallkategorie CU)

Daten zu den Abmessungen der Brennelemente-Primärbehälter liegen nicht vor.

Für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente sollen entsprechend der unterschiedlichen Länge der Brennelemente der Reaktoren 900 MW und 1300 MW zwei verschiedene Typen eingesetzt werden. Es werden jeweils vier Stück in einen Behälter verpackt. Das Gewicht der gefüllten Primärbehälter (ohne Behältergewicht) beträgt 2660 kg bzw. 3100 kg. Die Primärbehälter sollen mit Helium gefüllt werden, um die Wärmeabgabe von den Brennelementen zu erhöhen.

Die MOX-Brennelemente werden einzeln verpackt. Das Gewicht der MOX-Brennelemente beträgt 660 kg.

Die Gasentwicklung der Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente eines Behälters beträgt insgesamt ca. 4720 l. Die Gasentwicklung der MOX-Brennelemente wird untersucht.

Zu den übrigen in Tabelle 4-13 aufgeführten Primärbehältern liegen keine Informationen vor.

Die Primärbehälter mit den ausgedienten Brennelementen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden. Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Ausschluss eines Kontaktes der Brennelemente mit Wasser in der Periode, wo die Temperatur der Behälter über 80 °C liegt. Die Endlagerbehälter sind aus unlegiertem Stahl hergestellt. Die Wandstärke der Behälter wurde so ausgewählt, dass sie wasserdicht über eine Zeit von ca. 10 000 Jahren verbleiben und einem isotropischen Druck von 19 MPa widerstehen. Damit soll gleichzeitig die Möglichkeit einer Rückholung der Endlagerbehälter gewährleistet werden.

Die BE-Endlagerbehälter bestehen aus zwei Teilen – dem zylindrischen Gehäuse und einem Deckel mit Konstruktionselementen für die Handhabung der Behälter (s. Abbildung 4-14). Es wird noch untersucht, ob der Behältermantel und Boden in einem Stück gefertigt werden oder der Boden wie der Deckel eingeschweißt wird. Die Höhe der Endlagerbehälter ist der Höhe der zwei Primärbehältertypen angepasst und beträgt zwischen 4880 mm und 5630 mm. Der Durchmesser der Endlagerbehälter beträgt 1200 mm. Die Wandstärke der Endlagerbehälter soll 110 mm betragen. Der beladene Endlagerbehälter hat eine Masse von ca. 100 t bei einem Eigengewicht von ca. 60 t.

Der Behältermantel ist an beiden Enden mit Stützgleitern mit einer Höhe von 50 mm und im mittleren Teil mit Führungsgleitern mit einer Höhe von 10 mm für den Luftkissentransport der Behälter versehen. Die Gleiter sind aus einem keramischen Material hergestellt.

In den Endlagerbehältern befindet sich ein Einsatz, der folgende Funktionen hat:

- Aufnahme des Außendruckes auf den Endlagerbehälter
- Beherrschung der Kritikalität
- Fixieren der Brennelemente bei minimalen freien Volumen
- Unterstützung der Wärmeabgabe von den Brennelementen an die Umgebung.

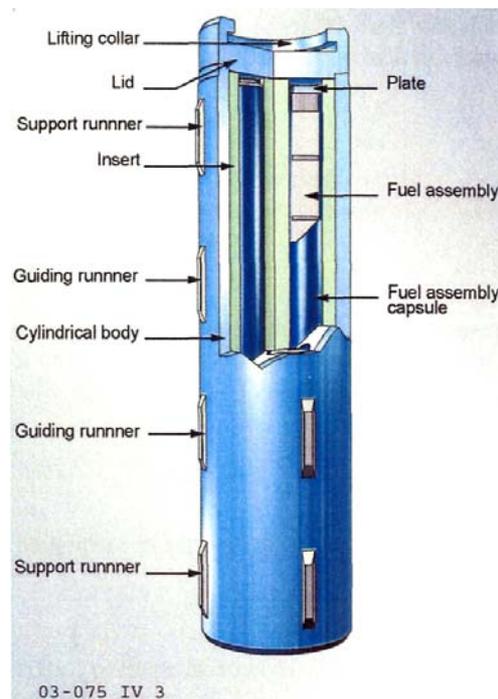


Abbildung 4-14: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Der Einsatz ist wie der Behälter zylindrisch und in zylindrische Abteilungen unterteilt, die für die Aufnahme der Primärbehälter mit den Brennelementen bestimmt sind. Im Falle der Verpackung von Brennelementen ohne Primärbehälter, ist der Einsatz in quadratische Abteilungen unterteilt. Der Abstand zwischen den Unterteilungen beträgt 45 mm für Primärbehälter und 120 mm für Brennelemente ohne Primärbehälter. Endlagerbehälter mit Brennelementen ohne Primärbehälter werden mit Helium gefüllt.

4.3.1.2 Behälter für Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle

In der Tabelle 4-14 ist eine Auswahl von Primärbehältertypen für verglaste Abfälle aufgeführt. Tabelle 4-15 zeigt die Hauptkennndaten dieser Behälter. Alle Behälter sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit einem verschweißten Deckel verschlossen und sind wasserdicht. Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter beträgt ca. 500 kg.

Abfallart	Bezeichnung des Primärbehälters	Erläuterung
Verglaste Abfälle	C1	Gegenwärtige Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid- BE-Wiederaufarbeitung
	C2	Künftig vorgesehene Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid-BE-Wiederaufarbeitung
	C3	Verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und MOX-BE-Wiederaufarbeitung
	C4	Verglaste Abfälle mit Pu-Gehalt aus der BE-Wiederaufarbeitung

Tabelle 4-14: Primärbehälter für verglaste Abfälle (Abfallkategorie C)

Behältertyp	Max. Außenhöhe mm	Max. Außendurchmesser mm	Max. Innenvolumen l
C1 bis C4	1.338	430	175

Tabelle 4-15: Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden (Abbildung 4-15). Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Schutz der verglasten Abfälle vor einem Kontakt mit Wasser. Darüber hinaus haben diese Endlagerbehälter einen sicheren Einschluss der Abfälle für eine Zeitspanne zu sichern, in der die Aktivität der kurz- und mittellebigen Radionuklide dominierend ist. Der Schutz der Glasmatrix vor Faktoren, die eine signifikante Veränderung der Matrix hervorrufen könnten, wenigstens in der Zeit, in der die Abfälle noch eine signifikante Restwärmeentwicklung aufweisen ist eine weitere Funktion der Endlagerbehälter. Durch die im Verhältnis zu den Primärbehältern größere Oberfläche der Endlagerbehälter wird die Wärmeabgabe an die Umgebung erhöht.

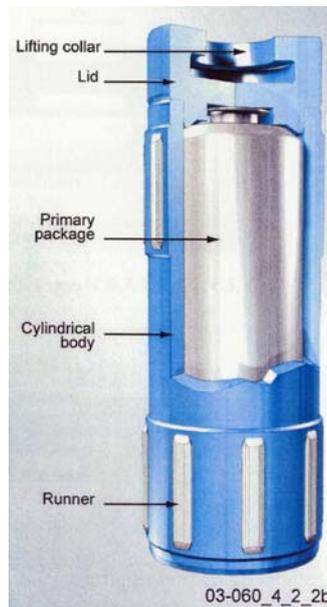


Abbildung 4-15: Endlagercontainer für verglasten HAW

Die Endlagerbehälter sollen aus nichtlegiertem Stahl der Marke P235 hergestellt werden. Die minimale Wandstärke der Behälter wurde mit 55 mm bestimmt, um eine Standfestigkeit der Behälter gegen Korrosion und sicheren Einschluss der Abfälle für 1000 Jahre zu sichern. Dabei wurde von einer maximalen Temperatur von 100 °C und einem Druck von 12 MPa ausgegangen.

Alle Endlagerbehälter sind mit keramischen Gleitern versehen. Abmessungen und Massen des Endlagerbehälters für verglaste Abfälle der Typen C1 - C4 sind in Tabelle 4-16 dargestellt.

Endlagerbehälter	Primärbehälter	Außendurchmesser mm	Länge mm	Masse kg
1	C1, C2, C3, C4	590	1649	1970

Tabelle 4-16: Abmessungen und Masse des gefüllten Endlagerbehälters für verglaste Abfälle (C1 - C4)

4.3.2 Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall

Die Wärmeentwicklung eines Behälters mit Uranoxid- und Natururanoxid-BE beträgt nach 60 Jahren Abklingzeit nach Ausladung aus dem Reaktor ca. 1400 W (900 MW-Reaktoren) bzw. 1600 W (1300 MW-Reaktoren) und fällt nach 1000 Jahren auf ca. 180 W ab. Die Wärmeentwicklung eines Behälters mit einem MOX-Brennelement beträgt nach 60 Jahren Abklingzeit ca. 1300 W und verringert sich auf ca. 200 W nach 1000 Jahren.

Tabelle 4-17 zeigt die Restwärmentwicklung und die festgelegte Zwischenlagerzeit der Gebinde nach ihrer Herstellung.

Behälter	Restwärmeleistung			Festgelegte Zwischenlagerzeit Jahre
	W/Gebinde			
	Bei Herstellung	Nach 60 Jahren	Nach 100 Jahren	
C1	2000	470	230	60
C2	2250	490	235	60
C3	2500	590	320	70
C4	2500	630	340	70

Tabelle 4-17: Restwärmentwicklung und Zwischenlagerzeit der Primärbehälter mit verglasten Abfällen

4.3.3 Einlagerungskonzepte

Für die Endlagerung hochaktiver Abfälle werden sowohl Granit- als auch Tonformationen betrachtet. Seit 1992 werden Arbeiten zur Endlagerkonzeption durchgeführt. Geologische Erkundungsarbeiten laufen seit 1994 /4-32/. 1997 wurden generische Endlagerkonzepte für drei Standorte (Tonformation in Meuse/Haute-Marne sowie Gard und Granitformation in Vienne) vorgelegt. Die weiteren Arbeiten mündeten in die Entwicklung von vorläufigen Endlagerkonzepten, die die Ergebnisse von ersten Sicherheitsbewertungen, insbesondere bezüglich der Gebinde und der technischen Barrieren berücksichtigten. Im Dezember 1998 wurde von der französischen Regierung die Errichtung eines Untertagelabors in der Tonformation Meuse/Haute-Marne beschlossen. Die für eine Tonformation am o. g. Standort entwickelte Endlagerkonzeption wird im weiteren beschrieben.

Die Tagesanlagen des Endlagers sollen eine Fläche von ca. 50 bis 100 ha und die Untertageanlage von ca. 1.500 bis 3.000 ha einnehmen. Abbildung 4-16 zeigt einen Ausschnitt des schematischen Layouts des Endlagers /4-29/. Die Endlagerung soll in

einer Teufe von ca. 485 m erfolgen. Die Verbindung zwischen Unter- und Übertage erfolgt durch vier Schächte und eine Rampe, die in einer sogenannten Schachtzone angeordnet sind, die sich am Rand der Einlagerungsfelder befindet.

Die Schächte mit einem Durchmesser zwischen 8 m und 11,5 m haben folgende Bestimmung:

- Schacht mit einem Durchmesser von 11,5 m für den Transport der Abfallgebände nach Untertage und ggf. von Untertage nach Übertage
- Schacht mit einem Durchmesser von 8,50 m für Personaltransport und kleinerer Ausrüstungen
- Ventilationsschacht mit einem Durchmesser von 10 m unterteilt in drei Sektionen – Allgemeine Abwetter, Abwetter vom Abfalltransportschacht, Abzug von Rauch bei Feuer
- Bergbauschacht mit einem Durchmesser von 10 m (soll zu einem späteren Zeitpunkt errichtet werden)

Die Rampe mit einem Durchmesser von 8,50 m dient als Notausgang, für die Förderung des gebrochenen Materials nach Übertage sowie für den Transport von Ausrüstungen und Material.

Des weiteren besteht ein Rohr von Untertage nach Übertage mit einem Durchmesser von 3 m für die Frischwetterversorgung der Rampe, Transport von Beton u. a.

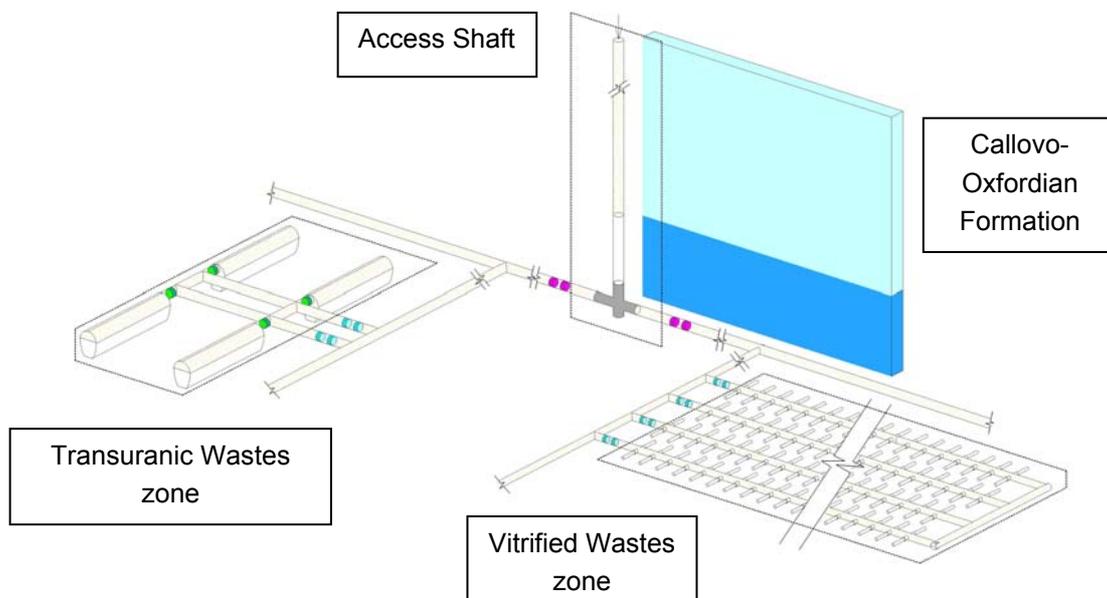


Abbildung 4-16: Schematisches Layout des Endlagers (Ausschnitt)

Der Schacht für den Abfallgebindertransport ist ausschließlich für den Transport der Schutzcontainer mit Abfallgebinden nach Untertage und den Transport der leeren Schutzcontainer nach Übertage bestimmt. Dieser Schacht ist mit einer Förderanlage für 110 t Nutzlast ausgerüstet bei einer Fördergeschwindigkeit von 1 m/s. Die maximale Leistung der Förderanlage soll 31 Gebinde Typ B (LLW-ILW), 16 Gebinde Typ C und 4 Gebinde CU pro Woche betragen.

Die Rampe verläuft spiralförmig unter einer Steigung von 15 %. Jede Spiralwindung bildet ein Quadrat mit einer Länge der geraden Streckenabschnitte von 80 m und einem Kurvenradius von ca. 10 m. Jede Windung ist mit einem kurzen Blindtunnel für das Vorbeilassen des Gegenverkehrs versehen.

Für die Endlagerung Untertage sind vier Endlagerzonen vorgesehen, jeweils eine für die Abfallkategorien B, C (verglaste Abfälle), Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente, MOX-Brennelemente. Die Zonen sind räumlich getrennt voneinander im Bergwerk angeordnet, um eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Abfallkategorien zu vermeiden und einen flexiblen Ablauf der Einlagerung der Gebinde in die verschiedenen Zonen zu gewährleisten. Jede Endlagerzone ist in Endlagerfelder eingeteilt, in denen die Endlagerstrecken angeordnet sind. Endlagerzonen, Endlagerfelder und Endlagerstrecken sind über ein Netz von Transportstrecken verbunden.

4.3.4 Endlagerauslegung/-technik

4.3.4.1 Endlagerung verglaster HAW (Abfallkategorie C)

Die verglasten Abfälle werden in der entsprechenden Zone endgelagert. Zur Vermeidung einer gegenseitigen Beeinflussung der verschiedenen Abfallarten dieser Kategorie ist die Endlagerzone in ca. 10 Endlagerfelder eingeteilt.

Das erste Endlagerfeld ist für die verglasten Abfälle der Kategorie C0 (PIVER, Umo R7, AVM) vorgesehen, die die geringste Wärmeleistung der Abfallkategorie verglaste Abfälle aufweisen. Da für die Kategorie C0 Endlagerbehälter mit zwei verschiedenen Abmessungen vorgesehen sind, werden für diese Abfälle Endlagerstrecken mit zwei unterschiedlichen Durchmessern errichtet, um das verbleibende freie Volumen zu verringern.

Die Abfallgebinde werden rückholbar eingelagert. Der Einlagerungsablauf und die Verschlussaktivitäten werden deshalb schrittweise durchgeführt. Aufgrund der Forderung, eine Rückholbarkeit zu sichern, muss das Einlagerungskonzept so gestaltet werden, dass parallel sowohl der Transport von Gebinden zum Einlagerungsort, die Einlagerung der Gebinde, Auffahrung neuer Endlagerstrecken, Instandhaltung, Monitoring, als auch Verschlussarbeiten und Rückholung von Gebinden durchgeführt werden können. Die Rückholbarkeit wird durch den Einsatz von Endlagercontainern mit einer langen

Standfestigkeit gegenüber Korrosion und Druck, die Konstruktion der Endlagerstrecken und deren entsprechenden Ausbau sowie Instandhaltung gewährleistet.

Ein Endlagerfeld besteht aus zwei Flügeln, an deren beiden Seiten vier parallele s. g. Servicestrecken angeordnet sind. Die Servicestrecken sind kreisförmig, mit einem Durchmesser von 10 m. Zwischen zwei Endlagerfeldern ist der Durchmesser der Servicestrecken auf einer Länge von ca. 50 m verringert. Diese Streckenabschnitte sind für den Verschluss vorgesehen.

Von den Servicestrecken verlaufen rechtwinklig drei s. g. Handhabungsstrecken zu den Flügeln des Endlagerfeldes. Diese Strecken sind elliptisch aufgeföhren mit einer Breite von 8,60 m wobei am Zugang zu den Einlagerungsstrecken die Breite auf 9,40 m erhöht ist. Die Handhabungsstrecken sind durch Querschläge verbunden. Die Einlagerung der Gebinde erfolgt von den Handhabungsstrecken. Aus Gründen des Einlagerungsbetriebes ist die Länge der Handhabungsstrecken auf ca. 600 m begrenzt. Der Abstand zwischen den Handhabungsstrecken beträgt 100 m.

Von den Handhabungsstrecken gehen zu beiden Seiten die Einlagerungszellen ab. Der Abstand zwischen den Achsen der Einlagerungszellen beträgt zwischen 8,5 m und 13,5 m in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde. Die Enden der Einlagerungszellen sind 20 m voneinander entfernt. In einem Flügel des Endlagerfeldes sind zwischen 150 bis 200 Einlagerungszellen angeordnet.

Eine typische Einlagerungszelle stellt ein horizontales blindes Bohrloch mit einem Durchmesser von 700 mm und einer Länge von ca. 40 m dar (Abbildung 4-17). Das Bohrloch ist in zwei Abschnitte unterteilt, dem Bohrlochkopf und dem Einlagerungsabschnitt.

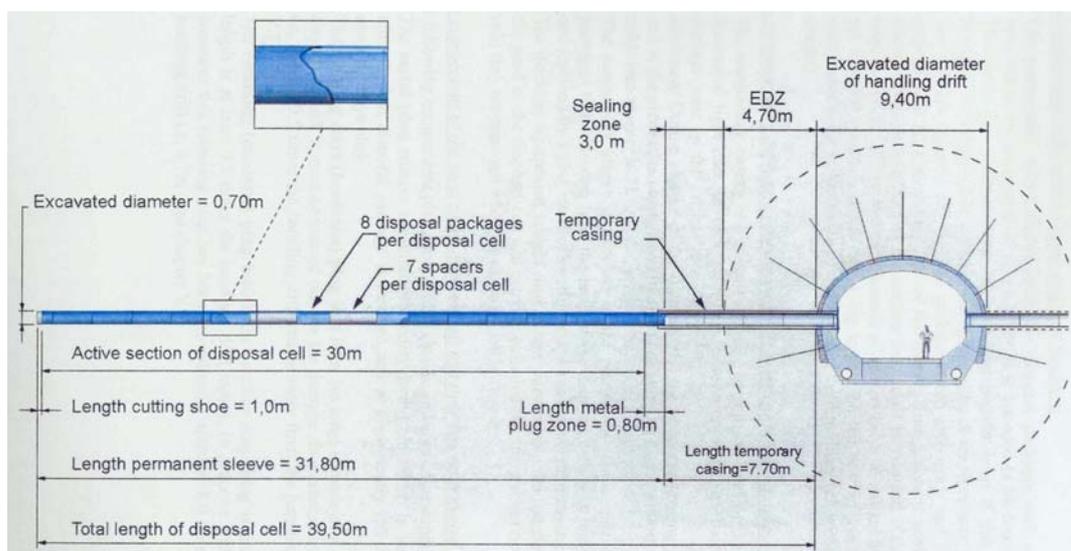


Abbildung 4-17: Einlagerungszelle für verglasten HAW

Der Bohrlochkopf ist während des Einlagerungsbetriebes mit zwei Metallrohren bestückt, die beim Verschluss des Bohrloches entfernt werden. Eines der Rohre stellt den zeitweiligen Ausbau des Bohrloches dar, das andere zeitweilige Rohr bildet den Anschluss zum Einlagerungsrohr. Der Verschluss erfolgt mit einem Metallpfropfen und einem Bentonit-Beton-Stopfen. Der Metallstopfen ist mit einer Keramikschicht überzogen, um galvanische Effekte beim Kontakt mit dem Gleitrohr zu vermeiden. Gleichzeitig wird dadurch seine Entfernung bei einer eventuellen Rückholung der Gebinde erleichtert.

Der Einlagerungsabschnitt mit einer Länge von ca. 30 m ist mit einem verlorenen Metallrohr mit einem Innendurchmesser von 620 mm oder 685 mm und einer Wandstärke von 25 mm bestückt. Das Rohr wird aus Kohlenstoffstahl gefertigt und ist für eine Standzeit von ca. 100 Jahren ausgelegt.

Die Abfallgebände werden im Einlagerungsrohr durch Abstandhalter voneinander getrennt. Der Abstandhalter ist ein mit Sand gefüllter Behälter mit den gleichen Abmessungen wie die Endlagerbehälter.

4.3.4.2 Endlagerung Abfallkategorien CU1 und CU2 (ausgedienter Kernbrennstoff)

Die Endlagerung erfolgt in den entsprechenden Endlagerzonen. Dabei wird den Anforderungen an eine Rückholbarkeit in Analogie zu den verglasten Abfällen entsprochen. Die maximale Temperatur des Tones darf 90 °C nicht überschreiten. Das Layout der Endlagerungszone sowie der Einlagerungsfelder entspricht dem für verglaste Abfälle.

Die Handhabungsstrecken haben einen Durchmesser von 10,7 m, der am Zugang zu den Einlagerungszellen auf 13 m erhöht ist. Der Abstand zwischen den Handhabungsstrecken beträgt zwischen 11 m und 117 m.

In einem Flügel eines Endlagerfeldes sind 80 bis 125 Einlagerungszellen angeordnet. Die Einlagerungszellen stellen horizontale Bohrungen dar mit einem Durchmesser von 3200 mm für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente (Kategorie CU1) und 2600 mm für MOX-Brennelemente (Kategorie CU2). Die Länge der Bohrlocher beträgt 43 m bzw. 46 m. Insgesamt sind 32 bzw. 35 Bohrlocher für die Einlagerung der Gebinde vorgesehen. Der Abstand zwischen den Bohrlochachsen beträgt zwischen 22,5 m und 24 m in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde. Der Abstand zwischen den Enden der Bohrlocher beträgt 20 m. Abbildung 4-18 zeigt das Layout einer Einlagerungszelle für ausgediente Brennelemente.

Das Bohrloch ist mit einem Metallrohr verkleidet, das aus 2 m langen Metallringen zusammengesetzt ist. Die Wandstärke des Metallrohres beträgt 30 mm (CU1) bzw. 25 mm

(CU2). Das Metallrohr ist perforiert, um einen Zutritt von Feuchtigkeit und damit die Sättigung des Bentonitpuffers zu ermöglichen. Die Perforierung ist so minimal wie möglich gehalten, um die mechanische Standfestigkeit möglichst gering zu beeinflussen.

In das Metallrohr wird eine Bentonitauskleidung eingebracht, die aus zylindrischen Bentonitringen zusammengesetzt wird. Die Abmessungen dieser Bentonitringe sind:

- Wandstärke 800 mm
- Außendurchmesser 2990 mm bzw. 2386 mm
- Innendurchmesser 1390 mm bzw. 786 mm
- Ringlänge 500 mm

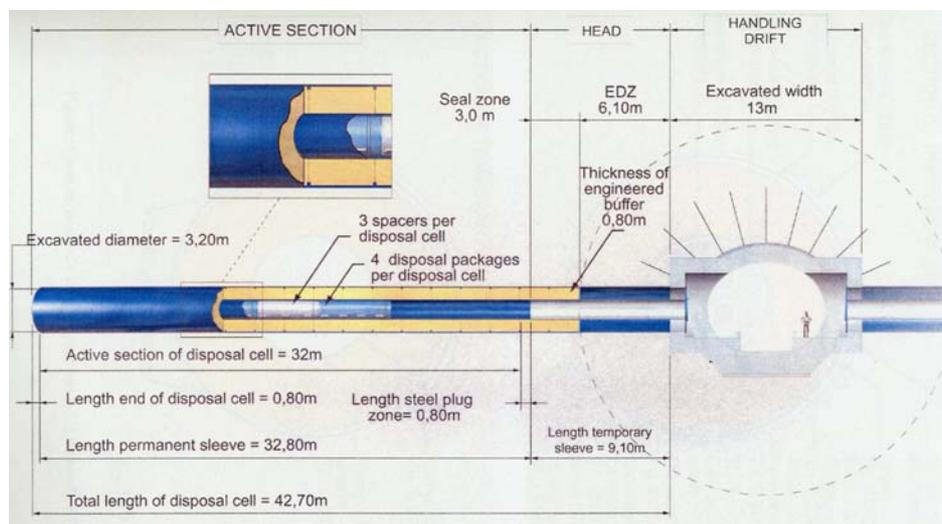


Abbildung 4-18: Einlagerungszelle für ausgedienten Kernbrennstoff

Die Bentonitringe werden vor dem Einbringen mittels Metallbänder zu Paketen aus jeweils vier Ringen zusammengepackt. Die Bentonitringe werden aus einer Mischung mit 70 % Bentonit und 30 % Sand gefertigt. Die Hauptkenndaten der Bentonitringe sind folgende:

- Durchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s
- Wärmeleitfähigkeit $> 1,5$ W/m/°C (gesättigt)
- Quelldruck ca. 3 MPa

Im Innern der Bentonitauskleidung befindet sich das Einlagerungsrohr aus dem gleichen Kohlenstoffstahl, aus dem die Endlagerbehälter gefertigt werden, mit einem Innendurchmesser von 1320 mm bzw. 716 mm und einer Wandstärke von 25 mm. Die

Standfestigkeit des Rohres bezüglich Korrosion und Druck soll 1000 Jahre erhalten bleiben. Das Metallrohr wird aus ca. 6 m langen Rohrstücken zusammenschweißt.

Die Metallverkleidung und die Bentonitringe im Kopfteil des Bohrloches sind die gleiche wie für den Einlagerungsteil, mit der Ausnahme, dass die Metallverkleidung in dem Bereich des künftigen Betonverschlussstopfens nicht perforiert ist. Es ist wie bei den Zellen für verglaste Abfälle ein Metallpfropfen vorgesehen.

In einer Endlagerzelle werden 3 bis 4 BE-Gebinde eingelagert. Zwischen den BE-Gebinden werden Abstandshalter in Analogie zu den Zellen mit verglasten Abfällen eingebracht.

4.3.4.3 Einlagerungstechnologie

Die Endlagergebilde werden aus Strahlenschutzgründen in geschützte Transfercontainer verpackt, mit denen diese bis zum Einlagerungsort transportiert werden. Ein Einlagerungszyklus umfasst folgende Schritte:

- Beladen des Transfercontainers in den Tagesanlagen
- Befördern des beladenen Transfercontainers nach Untertage
- Transport Untertage zum Einlagerungsort
- Einlagern des Gebindes

Die Transfercontainer sind für den Transport eines einzelnen Endlagercontainers bzw. -behälters bestimmt. Die Transfercontainer für Gebinde der Abfallkategorie B (LLW-LL, ILW-LL) verfügen über eine seitliche Tür zum Be- und Entladen und sind mit einem Tragerahmen versehen. Dieser Tragerahmen ist für alle drei Typen der Transfercontainer der gleiche, wodurch die Handhabungstechnik weitestgehend vereinheitlicht werden kann.

Die Transfercontainer für verglaste Abfälle und Brennelemente sind im Unterschied zu den Kategorie B-Containern mit einem Mechanismus für das Einladen der Gebinde in den Transfercontainer und das Einlagern in die Endlagerzelle versehen.

Die Transfercontainer mit den Abfallgebinden werden mit einem gummibereiften Transportfahrzeug durch eine Luftschleuse zum Förderkorb transportiert und auf zwei Stützen abgesetzt. Diese Stützen sind gleichzeitig als Stoßdämpfer ausgelegt. Die Förderung nach Untertage erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 1m/s. Am Förderort werden die Transfercontainer auf ein gummibereiftes Transportfahrzeug umgeladen, mit dem sie durch die Luftschleuse am Förderort zum Einlagerungsort transportiert werden.

Das Transportfahrzeug ist mit einer Hubplattform ausgerüstet und wird elektrisch mittels einer Schleppleitung angetrieben. Entsprechend den unterschiedlichen Abmessungen der Transfercontainer kommen drei Typen von Transportfahrzeugen zum Einsatz, die sich hauptsächlich in ihrer Länge unterscheiden. Darüber hinaus soll ein Transportfahrzeug der gleichen Grundkonzeption aber ausgerüstet mit einem speziellen Mechanismus für das Andocken an die Einlagerungszellen eingesetzt werden.

Die weiteren Abläufe für die verschiedenen Abfallkategorien sind im Anlagenband 1 beschrieben.

4.3.5 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht im wesentlichen drei Elemente vor /4-32/:

- Verschluss der Einlagerungszellen
- Verschluss von Strecken und Schächten
- Rückfüllung der Hohlräume außerhalb der Einlagerungszellen.

Für verglaste Abfälle und Brennelemente sieht das Verschlusskonzept folgende Schritte vor:

Die Einlagerungszelle wird mit einem Metallstopfen verschlossen. Dieser Stopfen hat die Funktion einer Strahlenschutzbarriere während der Verschlussarbeiten. Die Stärke des Metallstopfens beträgt ca. 350 mm um die Einhaltung der Strahlenschutznormen für Gamma-Strahlung zu gewährleisten. Der Stopfen ist mit einer Keramikschiicht versehen, um eine Kontaktkorrosion zu vermeiden und die Rückholbarkeit der Brennelementbehälter zu erleichtern. Die Zeitdauer der Schutzfunktion dieses Stopfens wird auf ca. 100 Jahre bewertet.

Anschließend wird die zeitweilige Stahlauskleidung im Anfangsbereich der Zelle entfernt, die für den Einlagerungsbetrieb erforderlich war und ein Bentonitstopfen mit einer Stärke von ca. 3 m eingebracht, der bis zur EDZ der Handhabungsstrecke reicht. Dieser Bentonitstopfen hat die Hauptbarrierefunktion in diesem Bereich der Einlagerungszelle, die dieser für eine Zeitspanne von 1000 bis 10^6 Jahren wahrnehmen soll.

Der restliche Bereich der Einlagerungszelle bis zur Handhabungsstrecke wird mit Beton ausgegossen. Dieser Betonverschluss hat in der Anfangsphase die Funktion, eine Verformung des Bentonitstopfens zu verhindern und dient nach der Sättigung des Bentonits als mechanischer Einschluss des Bentonits und Permeabilitätsbarriere. Die Zeitdauer der Barrierenwirkung dieses Verschlusses wird auf ca. 10^6 Jahre bewertet.

Die Handhabungsstrecke wird mit einem Gemisch auf Zementbasis verfüllt. Dämme in den Transportstrecken sollen gleichfalls aus einem Material auf Zementbasis errichtet werden. Die Verfüllung der übrigen Hohlräume soll mit Aushubmaterial erfolgen.

4.3.6 Auffahrtechnik und Errichtung der Einlagerungsstrecken bzw. –zellen

Zur Auffahrtechnik liegen nur begrenzte Informationen vor.

Abfallkategorie B

Das Auffahren der Strecken und der Einlagerungsstrecken für die Abfallkategorie B soll mit Teilschnittmaschinen erfolgen. Das ausgebrochene Material wird mit Schaufelladern auf Dieselfahrzeuge verladen und zu einem Zwischenlagerplatz Untertage abtransportiert. Von dort erfolgt der Transport nach Übertage mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

Nach jeweils 0,80 m Aushub wird der aufgefahrene Abschnitt mit 10 cm Spritzbeton befestigt und eine Stahlverkleidung eingebracht. Nach Fertigstellung einer Strecke und einer bestimmten Zeit für das Setzen des Wirtsgesteinsmaterials erfolgt der Endausbau mit Beton, der mit Hilfe vorgefertigter Verschalung vor Ort eingebracht wird.

Das Auffahren der Einlagerungsstrecken erfolgt in Etappen. Zuerst wird die obere Streckenhälfte aufgefahren und mit Spritzbeton und Stahlauskleidung befestigt. Dann erfolgen das Auffahren und Befestigen der unteren Streckenhälfte. Anschließend wird die Streckensohle betoniert und dann die Streckenwände und die First.

Abfallkategorie C (verglaste Abfälle) und CU (Brennelemente)

Das Auffahren und der Ausbau der Strecken erfolgen wie oben beschrieben. Für die Erstellung der Einlagerungszellen sollen Mikro-Tunnelbohrmaschinen eingesetzt werden, die die Zellen von der Handhabungsstrecke aus auffahren. Der Ausbau der Bohrungen erfolgt mit perforierten Stahlrohren in Abschnitten von jeweils 2 m, die mittels Leitblechen zueinander zentriert werden. Die einzelnen Rohrabschnitte werden verschweißt. Alternative Varianten für das Zusammenfügen der Rohrabschnitte (z. B. Kupplung) werden untersucht.

Anschließend erfolgt der Ausbau mit vorgefertigten Bentonitringen. Dazu werden Bentonitringe gepresst, die eine Dichte von ca. 2 g/cm³ haben. Ein Ring hat ein Gewicht von ca. 5 t. Jeweils vier Ringe werden mittels sechs Stahlbolzen oder –seile zu einem Paket zusammengefügt. Dadurch wird zum einen der verbleibende Abstand zwischen den Ringen gegenüber der Einzelmontage Vorort wesentlich verringert und zum anderen die Montagezeit Untertage verkürzt. Die Ringanzahl per Paket wird durch das mögliche Transport- und Handhabungsgewicht bestimmt. Die Bentonitringe werden mittels

Luftkissentransport platziert. Anschließend wird das Einlagerungsrohr aus Kohlenstoffstahl aus 6 m langen Schüssen eingebaut.

4.3.7 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

Für die Realisierung eines geologischen Endlagers liegt noch kein Terminplan vor. ANDRA hat 2005 einen Bericht über die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Endlagerung in Ton an die Regierung einzureichen, die auf dieser Grundlage das weitere Vorgehen entscheidet.

4.3.8 Sicherheitsnachweiskonzept

Eine ausführliche Beschreibung des Sicherheitsnachweiskonzeptes der ANDRA ist in /4-32/ gegeben.

Mit den Sicherheitsanalysen soll nachgewiesen werden, ob das gewählte Endlagerkonzept den Anforderungen an den Schutz der Menschen und der Umwelt über die gesamte Dauer der Existenz des Endlagers gerecht wird. Für diesen Nachweis werden sowohl qualitative als auch quantitative Sicherheitsanalysen vorgenommen.

Ziel der qualitativen Analysen ist es, solche Ereignisse zu identifizieren, die zu Störungen des Endlagers führen können und deren Wahrscheinlichkeit sowie Bedeutung für die Sicherheit zu bewerten. Die Grundprinzipien dieser Analysen sind für die Bewertung der Betriebssicherheit und der Langzeitsicherheit die gleichen.

Für die Betriebsphase konzentriert sich die Sicherheitsbewertung im wesentlichen auf die konstruktiven Elemente des Endlagers und die Betriebsbedingungen. Die Analyse wird auf der Grundlage einer Liste möglicher Ereignisse nuklearen und konventionellen Charakters durchgeführt. Dabei werden die zu betrachtenden Ereignisse in Kategorien eingeteilt (mechanische, chemische, Brand, biologische, natürliche Umwelt, industrielles Umfeld, Mensch).

Der Hauptpunkt für die Langzeitsicherheitsbetrachtung ist es, die Situationen zu identifizieren, bei denen die geologische Barriere versagt und zu prüfen, ob die technischen Barrieren die sicherheitsrelevanten Konsequenzen eines solchen Ereignisses begrenzen können. Dazu wird auf der Grundlage einer phänomenologischen Analyse der Endlagersituationen und der funktionellen Endlageranalyse eine Liste denkbarer Störungen aufgestellt. Diese Liste wird in Form von Fehlerbäumen aufgebaut, um eine Rangfolge der Störungen und ein gemeinsames Auftreten von Störungen zu identifizieren. Auf dieser Grundlage werden dann Szenarien für die quantitativen Sicherheitsanalysen erstellt.

Es werden zwei Kategorien von Szenarien betrachtet:

- Das Referenzszenarium - das die wahrscheinlichste künftige Entwicklung des Endlagersystems betrachtet und
- die veränderten Szenarien, die Abweichungen von dem Referenzszenarium betrachten, die durch zerstörende Ereignisse oder Phänomene verursacht werden.

Die quantitative Analyse hat das Ziel, die Funktion des Endlagers an Hand von quantitativen Kennwerten, insbesondere der Strahlenexposition, zu bewerten. Aufgrund der Komplexität des Endlagersystems sowie der großen Anzahl von Phänomenen, die in diesem System auftreten können, ist eine vereinfachte Darstellung dieser Phänomene für die Sicherheitsanalysen erforderlich. An die Modelle für die Sicherheitsbewertung werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Modelle dürfen solche Phänomene nicht vernachlässigen, die zu einer Unterbewertung der berechneten Exposition führen können.
- Es müssen konservative Parameter für die bestimmenden Phänomene verwendet werden.
- Die Modelle müssen, wenn auch in vereinfachter Form, auf Daten basieren, die auf identifizierten Prozessen oder physikalischen Aspekten beruhen
- Die Modelle müssen durch eine komplexe phänomenologische Darstellung untermauert sein, die die getroffenen Vereinfachungen und angenommenen pessimistischen Parameter abstützt.

Bei der qualitativen Lang-Zeit-Sicherheitsanalysen wurden folgende Ereignisse betrachtet:

- Tiefe Wasserbrunnen
- Bohrungen von der Oberfläche in eine Lagerstrecke
- Temperaturerhöhung aufgrund von Klimaveränderungen
- Maximal mögliches Erdbeben
- Ausbeutung von Geothermalquellen

Von diesen Ereignissen wurden Bohrungen in eine Lagerstrecke als abdeckendes Ereignis bewertet.

4.3.9 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

In /4-33/ wurde eine Kosteneinschätzung des französischen Endlagersystems vorgenommen, dessen Gesamtkosten mit 17,6 Mrd. € bewertet wurden. Davon entfallen auf Endlager für LL-ILW, HAW und ausgedienten Kernbrennstoff ca. 14,5 Mrd. €. In diesen Kosten sind die Kosten der Untertagelabors, die ausschließlich der Forschung für die geologische Endlagerung der o. g. radioaktiven Abfälle bestimmt sind, enthalten. Werden diese Kosten herausgerechnet, ergeben sich ca. 13,1 Mrd. € als Kosten des geologischen Endlagers. Tabelle 4-18 zeigt eine Übersicht über die Kosten des Endlagersystems Frankreichs für radioaktive Abfälle.

Endlager	Abfallart	Kosten Mrd. €
Standortunabhängige Forschung		Keine Angaben
Untertagelaboratorien	Forschung für HAW/SF	1,43
La Manche	LLW/ILW-SL	0,89
L'Aube	LLW/ILW-SL	2,17
Geol. Endlager	LLW/ILW-LL, HAW, SF	13,1
Gesamt		17,59

Tabelle 4-18: Kosten des französischen Endlagersystems

4.4 Spanien

In Spanien fällt der überwiegende Teil der radioaktiven Abfälle beim Betrieb der neun KKW-Blöcke des Landes an, die sich an sieben Standorten befinden.

Des weiteren fallen radioaktive Abfälle aus der Stilllegung des in den neuen KKW-Blöcken nicht enthaltenen Kernkraftwerkes Vandellós I, ein mit Natururan betriebener Gas-Graphitreaktor französischer Bauart mit einer Leistung von 500 MWe an.

Die Grundstrategie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist das Verbringen der schwach- und mittelaktiven Abfälle in das Oberflächenendlager El Cabril und der hochaktiven Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes in ein geologisches Endlager. Bezüglich der Endlagerung hochaktiver Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes ist gemäß /4-34/ folgendes festgelegt:

- Bis zum Jahre 2010 wird keine Entscheidung bezüglich des endgültigen Managements der hochaktiven Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes getroffen. Zu diesem Zeitpunkt wird das Parlament den technischen Fortschritt auf diesem

Gebiet sowie die Ergebnisse der bis dahin durchgeführten Forschungsarbeiten einschätzen und eine entsprechende Entscheidung treffen. Zu Planungszwecken kann von einem Inbetriebnahmetermin für ein Endlager um 2035 ausgegangen werden.

- Es werden keine weiteren Aktivitäten zur Standortbestimmung für ein Endlager unternommen.

Ausgehend von der o. g. politischen Entscheidung, beschränken sich die Untersuchungen zur Endlagerung auf die Entwicklung generischer Endlagerkonzepte, vorrangig in Ton und Granit.

In Spanien wird nur noch die Option „Direkte Endlagerung“ für die Entsorgung der ausgedienten Brennelemente verfolgt.

Entsprechend /4-34/ sind folgende Mengen an hochaktiven radioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen endzulagern /4-35/, /4-36/:

Abfallkategorie	Menge	Menge
	30 Jahre KKW Betriebszeit	40 Jahre KKW Betriebszeit
DWR-BE	8640 Stck.	11 502 Stck.
SWR-BE	6471 Stck.	8364 Stck
Verglaste HAW	50 Container (ca. 8,5 m ³)	50 Container (ca. 8,5 m ³)
Mittelaktive Stilllegungsabfälle	4200 m ³	4200 m ²

Tabelle 4-19: Spanien - Inventar eines geologischen Endlagers

Für die Planung eines geologischen Endlagers wird anstelle der verschiedenen Typen ausgedienter Brennelemente ein Referenzbrennelement definiert, dessen Daten als einhüllende die technischen Merkmale aller Brennelemente repräsentativ abdecken. Der Referenzbrennelement ist ein DWR 17 x 17 BE der Firma Westinghouse.

Unter der Annahme, dass ein DWR-Brennelement einem Äquivalent von drei SWR-Brennelementen entspricht, sind bei 30 Jahren Betriebszeit 10.797 und bei 40 Jahren 14.290 DWR-Referenz-BE endzulagern. Für die Endlagerplanung wurden davon ausgehend insgesamt 20.000 endzulagernde Brennelemente angenommen (1.600 DWR-BE und 84.000 SWR-BE), was insgesamt 14.400 DWR-Referenz-BE entspricht.

Damit geht Spanien für die Planung eines geologischen Endlagers von folgendem Inventar an hoch- und mittelaktiven radioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen aus (s. Tabelle 4-20)

ABFALLKATEGORIE	MENGE
DWR-Referenz-BE	20.000 Stck.
Verglaste HAW	50 Container (ca. 8,5 m ³)
ILW-Stillegungsabfälle	4.200 m ³

Tabelle 4-20: Planungsgrundlage für ein geologisches Endlager in Spanien

4.4.1 Behälterkonzepte und -materialien

Das spanische Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Ton sieht nach den vorliegenden Angaben /4-35/4-36/4-37/ die Nutzung der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Behälter für ausgediente Brennelemente, verglaste Abfälle sowie langlebige Abfälle vor. Insbesondere die Endlagerbehälter für wärmeerzeugende Abfälle müssen im spanischen Endlagerkonzept für Ton eine Reihe von Anforderungen, welche die Basis der Auslegung darstellen, sicher erfüllen. Insbesondere müssen sie:

- Dispersion von Radionukliden unter Normalbedingungen und bei allen denkbaren Störfällen sicher verhindern
- Mechanische Integrität bei allen denkbaren Störfällen gewährleisten
- Ausreichende Strahlungsabschirmung entweder durch Selbstabschirmung oder mit Hilfe eines wiederverwendbaren Abschirmbehälters gewährleisten, um eine sichere Handhabung zu ermöglichen
- Ausreichende konventionelle Sicherheit in der normalen Handhabung und unter Störfallbedingungen gewährleisten (Fall, Feuer, Explosion)
- Als wichtiges Element im Safeguardskonzept eine eindeutige Identifizierung erlauben
- Subkritikalität des enthaltenen spaltbaren Materials gewährleisten

Des Weiteren hat der Behälter als Teil des Multibarrierensystems, auch Funktionen im Bezug zur Langzeitsicherheit des Endlagers, und zwar:

- Gewährleistung eines vollständigen, sicheren Einschlusses des endgelagerten Abfalls für eine Zeitspanne von mindestens 1000 Jahren. Dafür sind unbedingte Voraussetzungen:
 - Eine stringente Qualitätssicherung bei der Herstellung und beim Verschließen durch Schweißen

- Ausreichende mechanische Festigkeit, um unter den Bedingungen des Endlagers der kombinierten Belastung durch Gebirgsdruck, Quelldruck des Bentonits sowie thermisch induzierte Spannungen zu widerstehen
- Ausreichende Korrosionsfestigkeit unter Endlagerbedingungen
- Ausschluss von ungünstigen Wechselwirkungen mit anderen Barrieren

4.4.1.1 Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Der Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente wurde auf der Basis von Optimierungen bezüglich der thermischen Last im Behälter, des Layouts der Einlagerungsfelder sowie der thermischen Belastung der Nahfeldbarrieren, der Wirtsgesteine und der Nebengesteine ausgelegt. Diese Optimierungen führten zu einem Behälter mit einer maximalen thermischen Last von 1200 Watt, was einer Beladung mit 4 Referenzbrennelementen (DWR) entspricht. Alternativ kann der Behälter auch mit 12 SWR-Brennelementen beladen werden.

Der Behälter, im spanischen Programm als „Kapsel“ bezeichnet, hat eine zylindrische Form mit 70 cm Innendurchmesser und 4,30 m Innenlänge. Die Wandstärke des Zylinders beträgt 10 cm, die des Behälterbodens und -deckels 12 cm. Der Behälter gewährleistet die Unterkritikalität des Brennstoffsinventars sowie für mindestens 1000 Jahren den vollständigen Einschluss der Radionuklide. Als Behältermaterial wurde Karbonstahl ausgewählt, der Resthohlraum innerhalb des Behälters wird mit Glaskügelchen vollständig verfüllt (s. Abbildung 4-19). Beladen mit 4 Referenzbrennelementen wiegt der Behälter ca. 15 Tonnen. Dieses Gewicht setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- | | |
|------------------|-----------|
| - Leere Kapsel | ca. 9,3 t |
| - Brennelemente | ca. 2,7 t |
| - Glasverfüllung | ca. 3 t |

Es werden insgesamt 3,600 Behälter benötigt, um die 14,400 Referenzbrennelemente endzulagern, die im Rahmen des Fünften Nationalen Entsorgungsplans /4-34/ genannt werden.

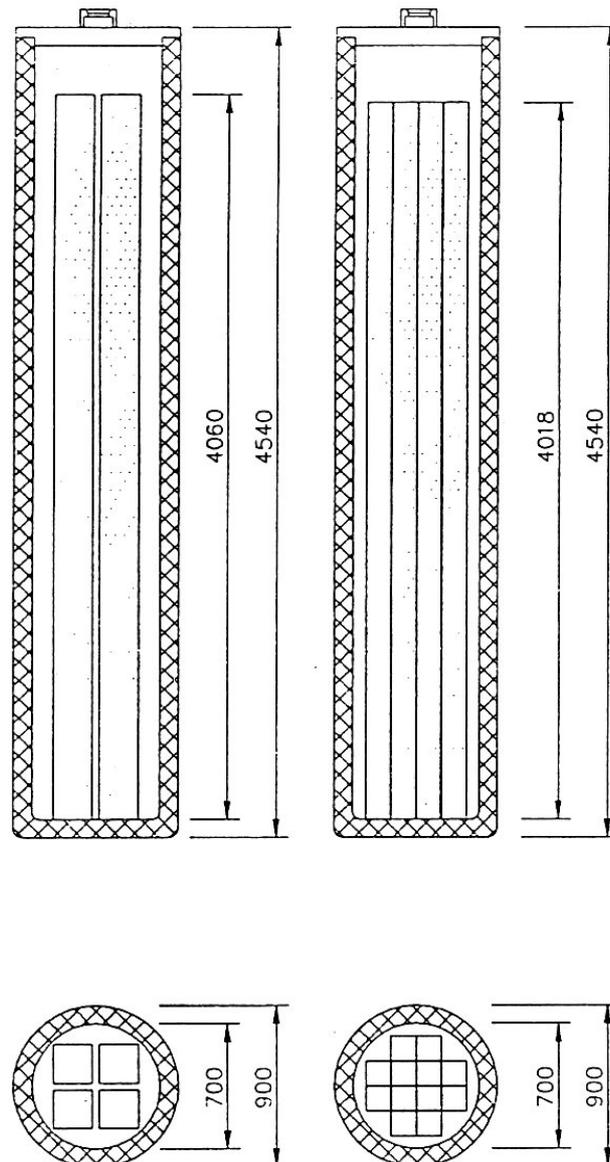


Abbildung 4-19: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente für die Endlagerung in Ton in Spanien

4.4.1.2 Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle

Der Behälter für die Endlagerung der Kokillen mit verglastem Abfall aus der Wiederaufarbeitung der Vandellós I Brennelemente entspricht im wesentlichen dem Behälter für ausgediente DWR und SWR Brennelemente. Er kann drei Cogema-Kokillen auf-

nehmen. Der verbleibende Hohlraum wird mit Glaskügelchen verfüllt. Abbildung 4-20 stellt diesen Behälter dar.

Die Wärmeleistung der spanischen Kokillen mit verglasten hochaktiven Abfällen ist identisch mit der der deutschen Kokillen und wird daher hier nicht gesondert aufgeführt.

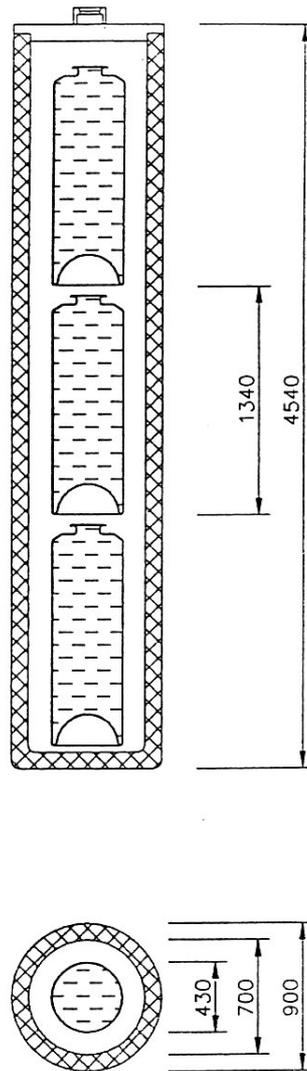


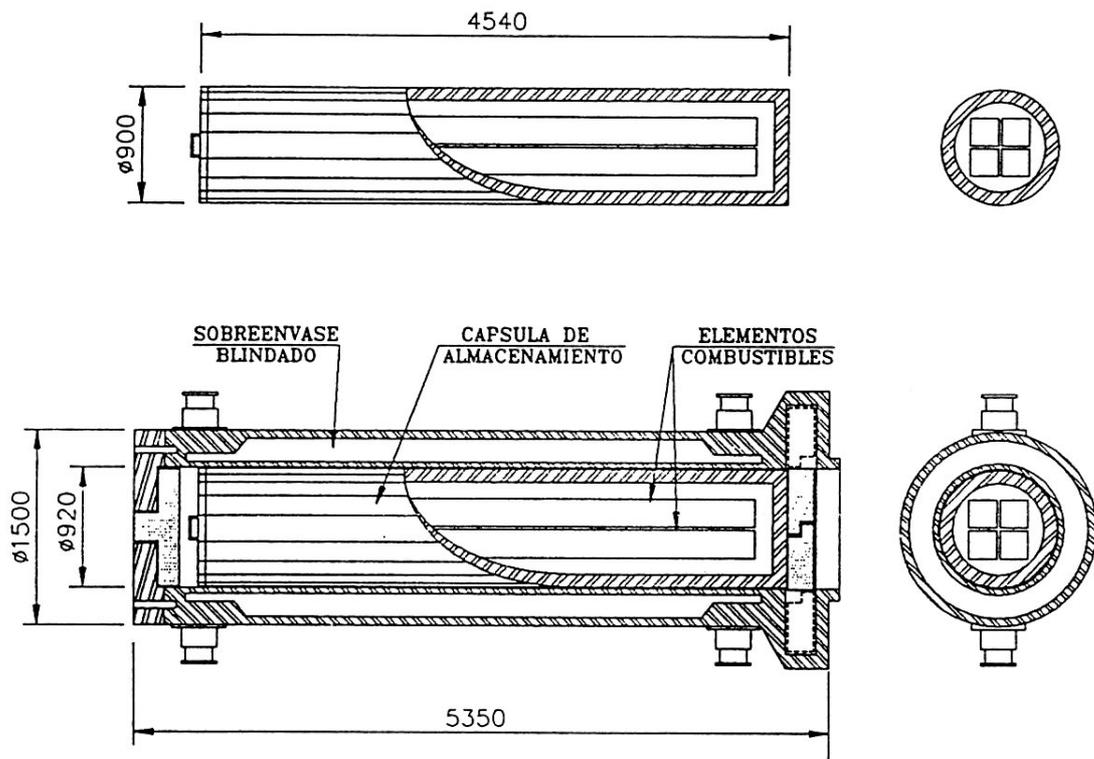
Abbildung 4-20: Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle für die Endlagerung in Ton in Spanien

4.4.1.3 Abschirmbehälter

Aufgrund der hohen Ortsdosisleistung der radioaktiven Strahlung um die Brennelementbehälter können diese im Endlager nur innerhalb eines Abschirmbehälters ge-

handhabt werden. Die spanische ENRESA hat in ihrem Endlagerkonzept hierfür die Nutzung eines wiederverwendbaren Abschirmbehälters vorgesehen. Dieser wird in allen Handhabungsvorgängen benutzt, wird aber bei der unmittelbaren Einlagerung des Endlagerbehälters unter Tage entladen und zur Wiederverwendung zur Tagesoberfläche zurücktransportiert.

Der Abschirmbehälter hat eine Wanddicke von insgesamt 29 cm, zusammengesetzt aus 14 cm Stahl zur Abschirmung der β - und γ -strahlung und 15 cm Neutronenabschirmung. Damit wird sichergestellt, dass die Ortsdosisleistung an der Behälteroberfläche den Auslegungswert von 0,2 mSv/h nicht überschreitet. Dieser Wert entspricht 1/10 des von der IAEA für Transportbehälter empfohlenen Wertes von 2 mSv/h. Ein Schnitt durch den Abschirmbehälter und den Endlagerbehälter wird in Abbildung 4-21 gezeigt.



Ü

Übersetzung:

Sobreenvase Blindado = Abschirmbehälter

Cápsula de Almacenamiento = Endlagerkapsel

Elementos Combustibles = Ausgediente Brennelemente

Abbildung 4-21: Endlagerbehälter und Abschirmbehälter für den Transport von Endlagerbehältern nach Untertage bei der Endlagerung in Ton in Spanien

Der Abschirmbehälter ist dafür ausgelegt, die Nachzerfallswärme eines Brennelementbehälters oder eines Behälters für verglaste Abfälle unter Einhaltung einer Temperaturgrenze von 50 °C an der freien Oberfläche unter Naturkonvektionsbedingungen abzuführen. Das Eigengewicht des Abschirmbehälters beträgt etwa 36 t, so dass sich für den beladenen Abschirmbehälter ein Transportgewicht von 51 t ergibt.

4.4.2 Radiologische und thermische Basisdaten

Die Nachzerfallswärme des Referenzbrennelementes, mit 4,1% Anfangsanreicherung und 40.000 MWd/tU Abbrand /4-35/ als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme ist in der Tabelle 4-21 dargestellt.

Diese Nachzerfallswärme wurde als Basis für die thermische Endlagerauslegung genutzt. Die maximale Behälterbeladung, die Abstände zwischen Behältern in einer Einlagerungsstrecke sowie die Abständen zwischen Strecken wurden anhand dieser Daten ermittelt.

ZEIT [A]	LEISTUNG [W]	ZEIT [A]	LEISTUNG [W]
Entladung	813.600	1000	26,27
1	4.726	2500	11,90
5	971,3	5000	8,88
10	630,0	10000	6,36
25	438,3	25000	2,92
50	286,9	50000	1,27
75	201,2	75000	0,7
100	150,8	100000	0,45
200	80,3	500000	0,23
500	45,2	1000000	0,19

Tabelle 4-21: Wärmeleistung eines Referenzbrennelementes als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme

4.4.3 Endlagerkonzept

Das spanische generische Endlagerkonzept für Tongestein sieht die Endlagerung in einer Teufe von ca. 250 m vor. Abbildung 4-22 zeigt das Layout des Endlagers /4-35/4-36/.

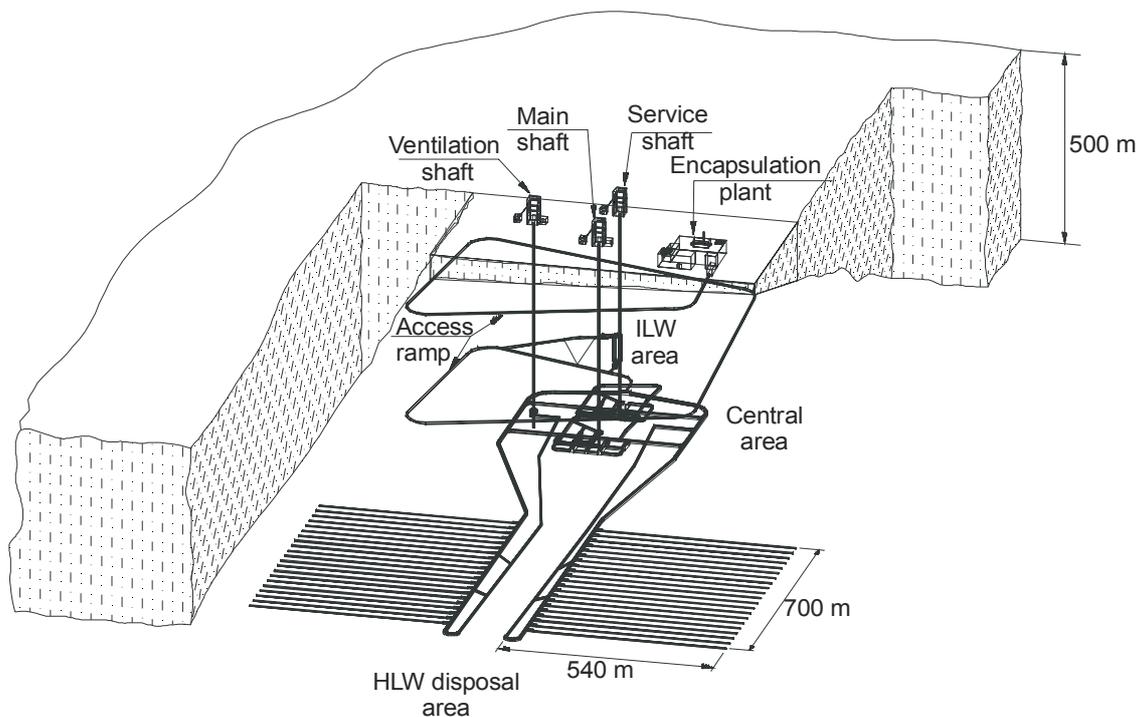


Abbildung 4-22: Spanien - Endlager-Layout

Der Zugang zum Endlager erfolgt über drei Schächte und eine Rampe. Die Rampe mit einem Durchmesser von ca. 6 m und einer Länge von 2800 m ist für den Transport der Abfallgebinde nach Untertage bestimmt.

Hochaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken von ca. 500 m und einem Durchmesser von 2,40 m eingelagert. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 35 m und zwischen den Endlagerkapseln 2 m, um die festgelegte Grenztemperatur des Verfüllmaterials von 100 °C nicht zu überschreiten.

Es wird abschnittsweise jeweils für die Einlagerung einer Endlagerkapsel der ringförmige Ausbau der Einlagerungsstrecke mit Bentonitblöcken vorgenommen, in die das Einlagerungsrohr installiert wird. Das Einlagerungsrohr mit einem Innendurchmesser von 92 cm und einer Wandstärke von 1,5 cm soll aus Stahl gefertigt werden. Die Wände dieses Rohres sind perforiert. Mit einem hydraulischen Schieber wird eine Endlagerkapsel eingebracht. Anschließend werden in das Einlagerungsrohr Bentonitblöcke installiert, die den festgelegten Abstand zur nächsten Endlagerkapsel gewährleisten.

4.4.4 Verfüll- und Verschlusskonzepte

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht folgendes vor /4-35/4-36/4-37/ (s. Abbildung 4-23):

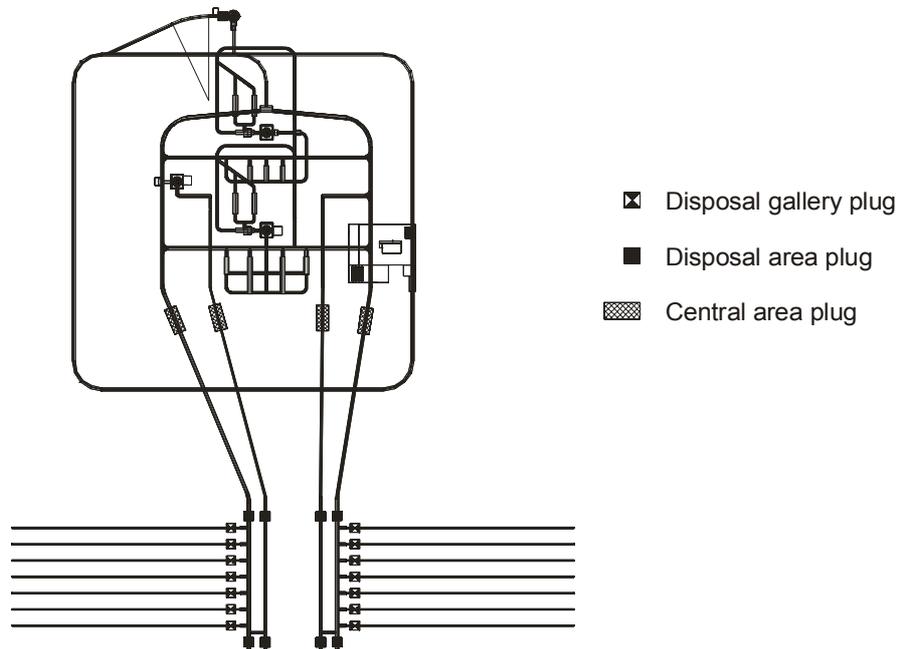
- Die einzelnen Einlagerungsstrecken für HAW und ausgediente Brennelemente sollen mit einem Damm aus 6 m Bentonitblöcken und 3 m Beton verschlossen werden.
- Für jedes Einlagerungsfeld sind weitere Dämme vorgesehen.
- Der Zentralbereich selber wird mit weiteren Dämmen verschlossen.
- Die Einlagerungsstrecken im Zentralteil werden ebenfalls mit Dämmen verschlossen.
- Alle weiteren Endlagerzugänge wie die Schächte und die Rampe werden ebenso verschlossen

4.4.5 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

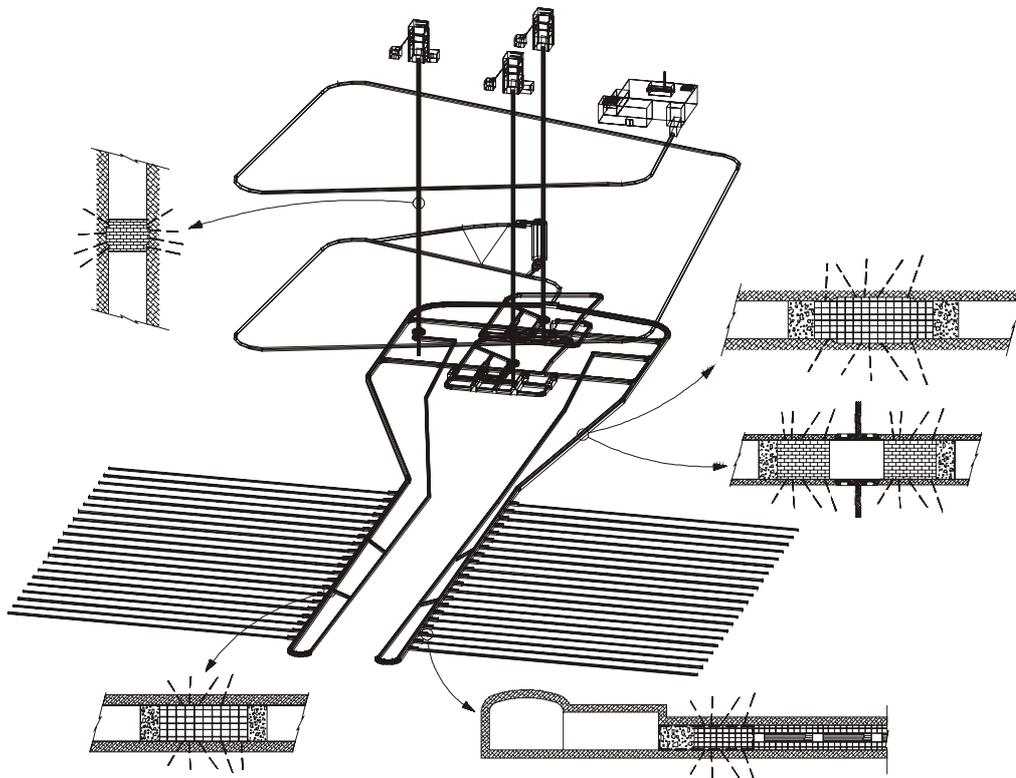
Detaillierte Daten zur Planung und Realisierung des Endlagers liegen nicht vor.

4.4.6 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung eines spanischen Endlagers liegen keine Informationen vor.



Anordnung von Verschlüssen



Konfiguration der Verschlüsse

Abbildung 4-23: Spanien - AGP Granit - Verschlusskonzept

5 Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz

Im Abschlussbericht „Aktualisierung des Konzeptes – Endlager Gorleben“ 1998 /5-1/ wurde ein Endlagerkonzept im Wirtsgestein Salz umfangreich beschrieben. Als Grundlage dienten dazu die im Rahmen der Novellierung der Endlagervorausleistungsverordnung verwendeten Abfallerhebungsdaten von 05/97. Danach wurden keine weiteren umfassenden Endlagerplanungen für wärmeentwickelnde Abfälle seitens BfS durchgeführt. Im Folgenden werden die Grundzüge des deutschen Endlagerkonzeptes im Wirtsgestein Salz zusammenfassend dargestellt. Weitere Details können dem Anlagenband 2 entnommen werden.

5.1 Bergbau im Salz

Salz ist ein mineralischer Rohstoff, der seit jeher von besonderer Bedeutung für den Menschen war. Das zunächst nur zu Ernährungszwecken geförderte Salz ist heute wichtiger Grundstoff der Chemie und der Kunstdüngerherstellung. Nachdem Justus von Liebig den Wert der Kalisalze für die landwirtschaftliche Düngung erkannt hatte, begann 1861 die Entwicklung der Kaliindustrie.

Seit mehr als 100 Jahren wird Tiefbergbau auf Salzmineralien in Deutschland durchgeführt. Die heutzutage aktiven Bergwerke stehen mehrheitlich seit 100 Jahren in der Gewinnung. Aufgrund der Entwicklung des Weltmarktes musste eine Vielzahl von Bergwerken geschlossen werden. Kali wird heute noch an 6 Standorten - (Werra-Gebiet (Hessen-Thüringen), Zielitz (Sachsen-Anhalt), Sigmundshall (Niedersachsen) und Neuhaus (Hessen)) abgebaut. In Betrieb befindliche Salzbergwerke sind in Borth (NRW), Braunschweig-Lüneburg (Niedersachsen) und Bernburg (Sachsen-Anhalt) zu finden. Das Bergwerk Niedersachsen Riedel, das die bis heute größte Abbauteufe (1525 m) erreicht hatte, wurde 1996 aus der Produktion genommen.

Die Herstellung untertägiger Hohlräume im Salz erfolgt entweder durch Bohren und Sprengen oder durch Fräsen mit sogenannten Teilschnittmaschinen. Die Standfestigkeit des Gebirges nach Auffahren von Strecken oder Kammern erlaubt es, auf einen Ausbau wie in der Steinkohle oder Ton zu verzichten (Abbildung 5-1). Wenn Strecken und Kammern über lange Zeiten genutzt werden sollen, werden üblicherweise nur Anker und Netze gegen Steinfall aus der Firste gesetzt (Abbildung 5-2). Da Salz auch viskoplastische Eigenschaften hat, ist während des Bergwerkbetriebes in regelmäßigen Abständen das Profil der Strecken und Kammern nachzuschneiden bzw. zu berauben (Abbildung 5-3). So lassen sich Bergwerke über viele Jahrzehnte offen halten und betreiben.

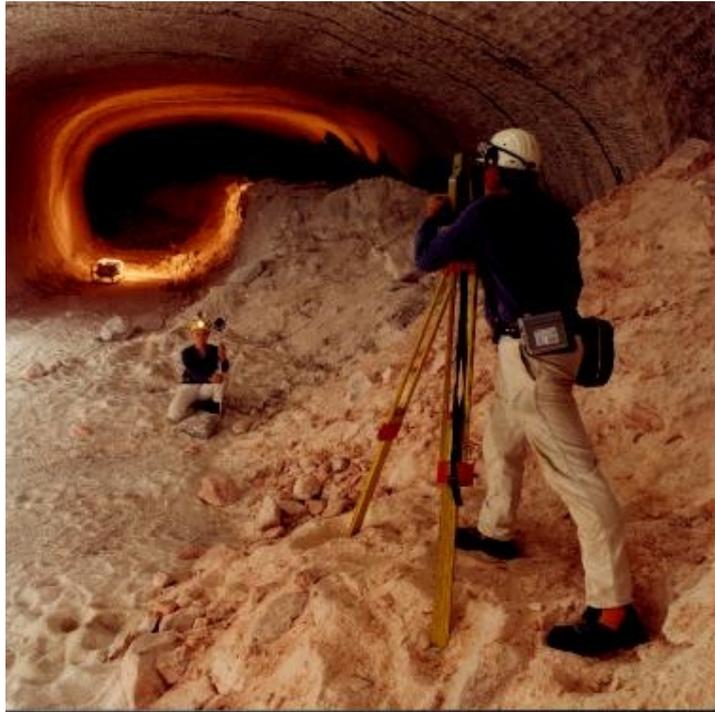


Abbildung 5-1: Strecke im Salz



Abbildung 5-2: Kfz-Werkstatt mit Anker und Netzen



Abbildung 5-3: Beraubung der Firste

Das Bohren im Salz ist ein gängiges Verfahren, um Bohrlöcher für unterschiedliche Zwecke zu erstellen, z. B. Erkundungs- oder Bewetterungsbohrungen. Die übliche Bandbreite der Bohrungsdurchmesser liegt zwischen 38 – 1400 mm.

5.2 Abfallmengenzenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998

Der Anfallzeitpunkt der einzulagernden radioaktiven Abfälle, die Zeitdauer des Anfalls, die zu erwartenden Volumina und die Art der entsprechenden Endlagergebäude sind entscheidend für die Auslegung eines Endlagers. Darauf aufbauend kann ein Endlagerkonzept entwickelt werden, das alle Phasen eines Endlagers wie Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung erfasst.

Basis für das verwendete Endlagerkonzept waren die Daten des o. g. Abfallmengenregister über den kumulierten Bestand und die Prognosen des zukünftigen Anfalls aller Arten von radioaktiven Abfällen. Hierzu wurden Informationen zur Verfügung gestellt, über die Art der Abfälle, die jeweiligen Mengen, die Konditionierungsform sowie für wärmeerzeugende verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente die Nachzerfallswärme als Funktion der Zeit.

Nach Angaben der Industrie entstehen aus den Wiederaufarbeitungsverträgen mit COGEMA und BNFL die in Tabelle 5-1 genannten Mengen an wärmeentwickelnden Abfall.

	Verglaster HAW (Kokillen)	CSD-C-Kokillen	aus Entlademenge tSM
COGEMA	2.800	max. 7.000	4.584
BNFL	700	-	884
Summe	3.500	7.000	5.468

Tabelle 5-1: Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfall aus Wiederaufarbeitung

Nach weiteren Angaben der Industrie sollten bis zum Jahr 2040 insgesamt eine Entlademenge von 24.030 t SM aus allen Kernkraftwerken anfallen. Unter Berücksichtigung der 5.536 t SM incl. 68 t SM des KKW Stade ohne Abfallrücknahme, die wieder aufgearbeitet werden, sowie zusätzlicher 634 t SM von den Energiewerken Nord (EWN), ergibt sich eine Masse von 19.128 t SM für das Basis-Szenarium. Diese wird unter Vernachlässigung der unterschiedlichen Brennelementtypen in eine Anzahl von Endlagergebinden umgerechnet und aufgerundet. In Tabelle 5-2 ist die Anzahl der erforderlichen Gebinde für die Direkte Endlagerung von 19.128 t SM in Abhängigkeit vom gewählten Gebindetyp aufgeführt. Die Behälter werden in einer Konditionierungsanlage mit den Stäben der Brennelemente beladen. Die Kopf- und Fußstücke sowie die Abstandshalter können in CSD-C-Kokillen verpackt werden.

Endlagergebinde	POLLUX-8-DWR	POLLUX-10-DWR	Endlagerbüchse-3 BE (heute BSK 3)
Masse pro Gebinde	4,3 t SM	5,4 t SM	1,6 t SM
Anzahl der Gebinde	4.449	3.543	11.955

Tabelle 5-2: Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung nach Gebindealternativen

Diese Werte für die Gebindeanzahl wurden für die weitere vorkonzeptionelle Planung zur Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben zugrunde gelegt.

5.3 Behälterkonzepte

Mit der Novelle des Atomgesetzes im Jahre 1994 wurde die Direkte Endlagerung von Brennelementen in Deutschland als ein möglicher Entsorgungsnachweis gesetzlich festgeschrieben. Aktive endlagerfähige Gebinde für diesen Entsorgungsweg sind bisher weltweit noch nicht hergestellt worden. Technisch erprobt werden soll diese Konditionierungsform der bestrahlten Brennelemente zur Herstellung endlagerfähiger Gebinde erstmalig in der Pilotkonditionierungsanlage (PKA), die am Standort des Zwischenlagers in Gorleben errichtet wurde.

In der PKA werden die Brennelemente in ihre Stäbe, Endstücke und sonstige Strukturteile zerlegt. Die Stäbe werden in speziell für die Direkte Endlagerung konzipierte Behälter eingefüllt und durch Aufschweißen eines Deckels fest eingeschlossen. Das zugrunde gelegte Referenzkonzept ist die Verbringung der Endlagergebände in ein Endlager in einer Salzformation.

Für die derzeit in Betracht gezogenen Einlagerungskonzepte bei der Direkten Endlagerung wurden zwei Behälter- bzw. Gebindetypen entwickelt: der vollabgeschirmte POLLUX-Behälter für die Streckenlagerung und die in ihren Abmessungen einer verlängerten Glaskokille entsprechende Brennstabkokille (BSK) für die Bohrlochlagerung.

Der POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter (s. Abbildung 5-4) mit einer max. Masse von 65 t wurde zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus 10 DWR-U-Brennelementen bzw. 30 SWR-BE entworfen.

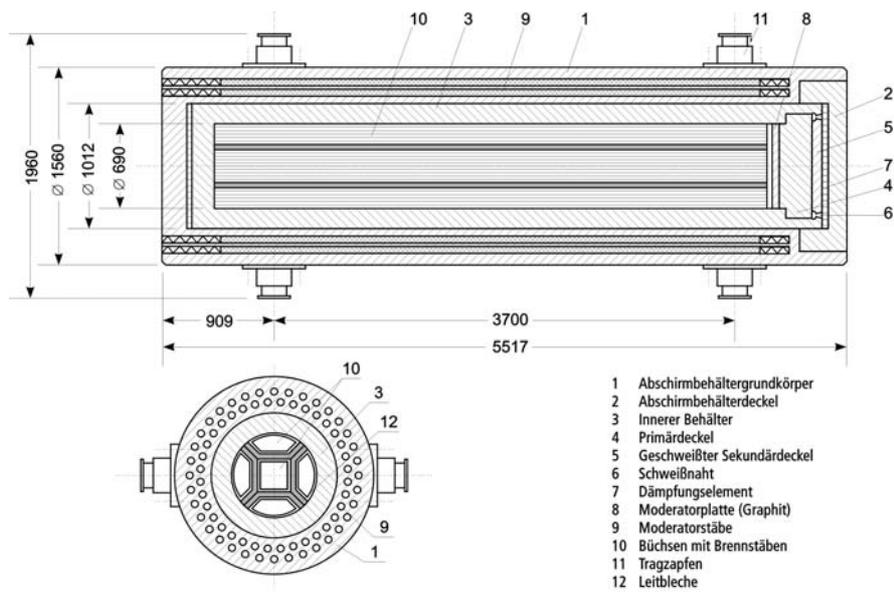


Abbildung 5-4: POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter /5-2/

Die Brennstabkokille 3, (s. Abbildung 5-5) mit einer max. Masse von 5,2 t wurde als Alternative zum POLLUX-System zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus drei DWR-Brennelementen oder 9 SWR-Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen) entworfen. Die Geometrie des Behälters (mit Ausnahme der Länge) korrespondiert weitgehend zur HAW-Kokille. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern. Hinzu kommen HAW-Kokillen für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle, CSD-C-Kokillen für Technologieabfälle der WA und für BE-Hülsen sowie Strukturteile.

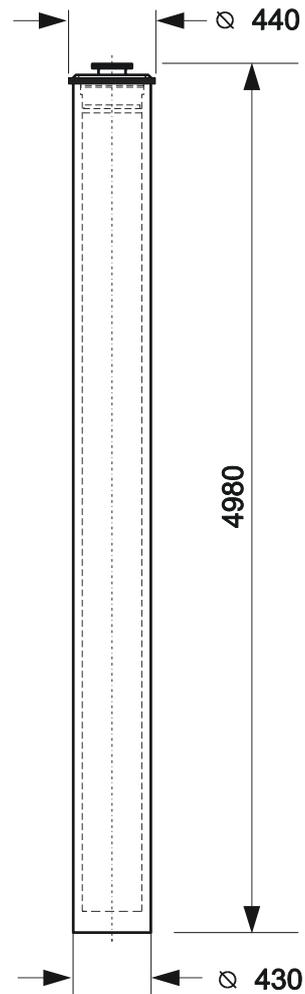


Abbildung 5-5: Brennstabkokille 3 (BSK 3)

Die beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehende wässrige Spaltprodukt-Lösung wird aufkonzentriert und in einem keramischen Schmelzer mit Glasfritte zu einem Borosilikatglasprodukt verarbeitet. Die flüssige Glasschmelze wird dann in einen Edelstahlbehälter mit 5 mm Wandstärke abgefüllt, der wiederum mit einem Deckel verschweißt wird. Eine sogenannte COGEMA-HAW-Kokille (s. Abbildung 5-6) enthält das Äquivalent von ca. 1,67 tSM.

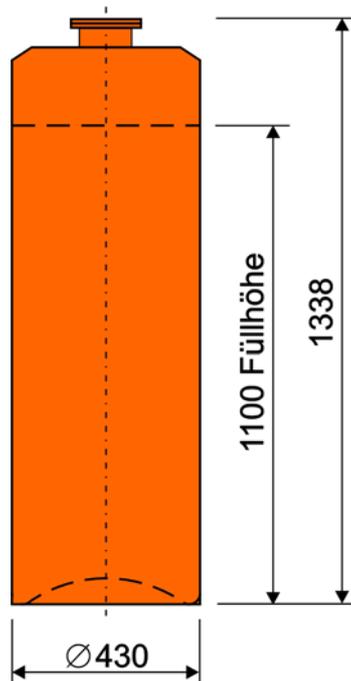


Abbildung 5-6: COGEMA-HAW-Kokille

5.4 Einlagerungskonzepte

In dem Bericht „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ /5-1/ wurden drei verschiedene Einlagerungskonzepte für wärmeentwickelnde Abfälle untersucht.

Beim ersten Konzept (Variante 1), einer Kombination von Strecken- und Bohrlochlagerung, werden die ausgedienten Brennelemente in POLLUX-8-Behältern auf der 870 m-Sohle (Einlagerungssohle) in Strecken eingelagert. Die HAW- und CSD-C-Kokillen werden in 300 m tiefe vertikale Bohrlöcher verbracht. Variante 1 ist die Zusammenführung des ursprünglichen BfS-Konzepts /5-3/ der reinen Bohrlochlagerung von hochaktiven Abfällen bei ausschließlicher Wiederaufarbeitung mit der Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente aus den Ergebnissen der FuE-Arbeiten zur direkten Endlagerung.

Das zweite Konzept (Variante 2) sieht eine reine Bohrlochlagerung vor. Dabei werden sowohl ausgediente Brennelemente, konditioniert in Form von Endlagerbüchsen (sogenannte Brennstabkokillen), als auch HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefe vertikale Bohrlöcher, eingelagert. Die entsprechenden Bohrungen werden von der Sohle der Einlagerungsstrecke aus gestoßen.

Das dritte Konzept (Variante 3) ist dem ersten Konzept ähnlich. Die ausgedienten Brennelemente werden bei diesem Konzept auch in Strecken eingelagert. Die HAW- und CSD-C-Kokillen werden in 30 m statt in 300 m tiefe Bohrlöcher eingebracht.

5.5 Endlagerflächenbedarf bei der Aktualisierung des Konzepts - „Endlager Gorleben“-

Ausgehend vom aufgestellten Mengengerüst, den Randbedingungen für Abbrand und Zwischenlagerzeit der wärmeentwickelnden Abfälle sowie den Einlagerungskonzepten lassen sich Belegungsabschätzungen für das Grubengebäude durchführen.

Aufgrund der geologischen Verhältnisse können vor Erkundung nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrl Lochdurchmesser, -länge und -abstand sowie der Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Der Sicherheitspfeiler zur nördlichen und zur südlichen Richtstrecke muss doppelte Richtstreckenbreite aufweisen. Die Größe und Ausrichtung der Felder muss sich dem wechselnden Schichtstreichen und den unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten anpassen.

Aufgrund der Temperaturfeldberechnungen für die betrachteten Einlagerungskonzepte ergeben sich die folgenden beispielhaften Aufteilungen der Felder (s. Abbildung 5-7) und die entsprechende Sohlenanzahl. Die Fläche der nutzbaren Einlagerungsfelder umfasst 855.000 m².

Im Konzept Bohrlochlagerung von HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefen Bohrlöchern sowie Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (Variante 1) sind die Felder WA 1 und Teile von WA 2 für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen vorgesehen, da die Einlagerungsbohrlöcher von der Beschickungssohle (Teufe 870 m) bis zu einer Teufe von ca. 1.200 m reichen. Bei Zugrundelegung der Referenz-Zwischenlagerzeit von 30 Jahren können im nordöstlichen Teil des Salzstock auf der Basis des von der BGR entwickelten Arbeitsmodells Gorleben (erwartete geologische Struktur) ca. 70 % der anfallenden POLLUX-8-Behälter bei einer durchschnittlichen Einlagerung von 234 Behältern pro Feld untergebracht werden. Falls im Rahmen der untertägigen Erkundung mehr geeignete Endlagerfläche identifiziert wird, können alle Endlagergebände auf einer Sohle untergebracht werden.

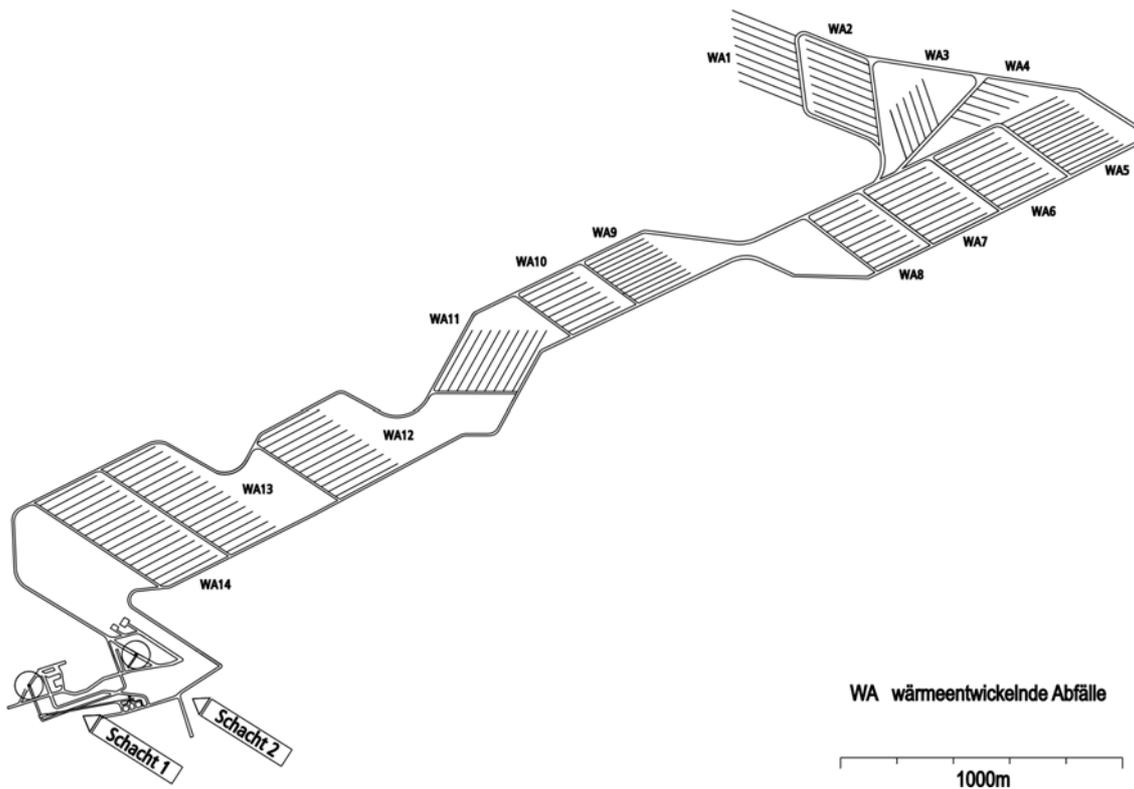


Abbildung 5-7: Feldaufteilung für wärmeentwickelnde Abfälle

5.6 Anforderungen an Verfüllmaßnahmen und -materialien sowie Verschlussmaßnahmen

Aus der Nutzung des Endlagerbergwerkes im Wirtsgestein Salz (z. B. Änderung des Primärspannungszustandes durch Auffahren der Gruben Hohlräume, Wärmeeintrag ins Gebirge durch Einlagerung von hochaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen) lassen sich die maßgeblichen Szenarien ableiten und Art und Umfang der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen entscheidend bestimmen.

In der Nachbetriebsphase lassen sich

- die Zuflüsse von Wässern aus dem Neben- und Deckgebirge
- begrenzte Zuflüsse aus Reservoirs im Salzstock

nicht sicher ausschließen. Aufgrund intensiver vorlaufender Erkundungen sind diese Szenarien in der Betriebsphase nicht zu erwarten und werden daher zurzeit nicht weiter berücksichtigt.

Allgemeine Anforderungen an die Verfüllung des Endlagerbergwerkes und an Verschlussmaßnahmen sind in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle /5-4/ aufgeführt. Darüber hinaus gilt die Strahlenschutzverordnung und u. a. das dort ausgewiesene Minimierungsgebot, aus dem entsprechende Sicherheitsvorkehrungen abzuleiten sind.

Neben diesen allgemeinen Anforderungen lassen sich folgende Einzelanforderungen an die Verfüllmaßnahmen, -materialien und die Verschließbauwerke herleiten.

- Während oder nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ist der verbleibende Hohlraum in den Einlagerungsräumen mit geeignetem Versatzmaterial zu verfüllen
- Bei anderen untertägigen Hohlräumen, die abgeworfen werden, ist ebenso zu verfahren
- Mit Abfällen befüllte und mit Versatzmaterial verfüllte Teile der Einlagerungsfelder sowie vollständig versetzte Felder werden abgeworfen
- Die Anzahl offener Einlagerungsräume ist zu minimieren
- Die Offenhaltungszeiten der Einlagerungsräume sind so kurzzeitig wie möglich zu halten und nach der jeweiligen Benutzung zu verschließen

5.7 Verfüll- und Verschlusskonzept

Es ist vorgesehen, das bei der Streckenauffahrung gewonnene Haufwerk aus Salzgrus als Versatzmaterial zu verwenden. Untersuchungen im Rahmen von FuE-Vorhaben haben die grundsätzliche Eignung dieses Material aufgezeigt /5-5/. Das Korngerüst eines aus Salzhaufwerk geschütteten Versatzkörpers wirkt mechanisch stabilisierend, indem es der Konvergenz einen mit der Zeit zunehmenden Widerstand leistet. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit zunehmender Kompaktion zu. Mit einem Porenanteil von anfänglich 35 % reduziert es von Beginn an das Aufnahmevermögen von Fluiden. Im Einlagerungsbetrieb dient es als Abschirmmaterial. Detaillierte Nachweise zu Erfüllung der einzelnen Anforderungen sind im Zuge der weiteren Planungen für das Endlager noch zu erbringen.

Die Verfüllung von verbliebenen Hohlräumen nach der Einlagerung von Abfallbinden erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

- Die Einlagerung erfolgt im Rückbau und beginnt an der äußeren Markscheide des Grubengebäudes im östlichen Teil des Salzstockes. Jeweils parallel zum Einlagerungsbetrieb werden die danach benötigten Einlagerungsstrecken aufgefahren. Das dabei anfallende Haufwerk steht als Versatzmaterial zum Verfüllen der bei der Einlagerung verbleibenden Hohlräume zur Verfügung. Für die Aufbereitung des Haufwerkes ist ein Bunker mit Brech- und Siebanlage unter Tage installiert.

Die für die Einlagerung benötigten Strecken und Bohrlöcher werden erst kurz vor Beginn der Nutzung aufgeföhren und nach erfolgter Einlagerung wieder verfüllt und verschlossen. Dadurch wird die Offenhaltungszeit aller Hohlräume weitgehend minimiert.

- Die betrieblichen Abläufe im Endlager sehen Verkehrswege für den Transport von Gebinden einerseits und von Haufwerk andererseits sowie die Gliederung in mehrere Einlagerungsfelder vor. Die Einlagerungsfelder sind zwischen zwei Richtstrecken angeordnet. In der nördlichen Richtstrecke erfolgt gleisgebunden der Gebindeftransport und der Haufwerkstransport zum Versetzten der Strecken. Der Haufwerkstransport aus der Streckenaufföhierung wird in der südlichen Richtstrecke zum Bunker durchgeführt.
- Bei der Auswahl der Verfüllverfahren und Versatztechnik sind die Abmessungen der Strecken und Kammern und die Einlagerungstechniken zu berücksichtigen.

An die Verfülltechnik werden folgende Anforderungen gestellt:

- Erreichen einer hohen Anfangsdichte des Versatzes
- firstbündiger Einbau
- Hohlraumminimierung im Versatz zwischen oder seitlich der Behälter
- Gewährleistung der visuellen Kontrolle des Versatzfortschrittes
- hohe Flexibilität durch leichte Umsetz- und Handhabbarkeit der Geräte
- leistungsfähiger Versatzbetrieb (Durchführung eines Versatzzyklus innerhalb einer Schicht)
- geringe Störanfälligkeit - hohe Verfügbarkeit
- Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Bei der Auswahl der Verfülltechnik sind weiterhin zu beachten:

- Zu verfüllendes Volumen
- Länge der zu verfüllenden Abschnitte
- Transportmöglichkeiten (z. B. Nutzung vorhandener Gleise)
- Zeitlicher Ablauf der Einlagerung der Abfallgebände in Abhängigkeit vom faktischen Mengengerüst der verschiedenen Gebindetypen

Ausgehend von den o. g. Anforderungen und Randbedingungen kommen für die Verfülltechniken der einzelnen Hohlräume im Einlagerungsbereich als auch in den übrigen Strecken und Kammern der Blasversatz, der Schleuderversatz und in größeren Strecken und Hohlräumen der Schüttversatz in Betracht. Da bei der Verfüllung der verbleibenden Hohlräume mit trockenem Salzgrus eine starke Staubentwicklung zu erwarten ist, sind Maßnahmen zur Einhaltung der Anforderungen des Arbeitsschutzes und zur Minimierung der Staubbelastung in den Abwettern zu ergreifen. Dazu gehört eine Entstaubungsanlage, über die die Abwetter bei Versatzbetrieb in Verbindung mit der saugenden Sonderbewetterung geführt werden.

6 Endlagerkonzept im Wirtsgestein Ton

Nach den Empfehlungen des Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd) /6-1/ zum Endlagermedium Ton soll die Teufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ≥ 300 m liegen und die vorhandene Mächtigkeit ≥ 100 m sein. Nach einem Zwischenbericht der BGR /6-2/ sind dafür geeignete Tonformationen in der Unterkreide, im Dogger und im Lias zu finden.

Als Datenbasis für die Berechnungen zur thermischen Auslegung des Endlagerkonzeptes wurden folgende Annahmen festgelegt:

Teufe der

vorgesehene Einlagerungssohle: 500 m

Daten zum Ton: Übernahme der Daten vom Unterlagelabor in Bure (Frankreich)

Die Teufe der Einlagerungssohle von 500 m wurde aus Vergleichbarkeitsgründen mit internationalen Konzepten gewählt. Die Daten zu den Materialeigenschaften des Tons wurden vom Untertagelabor Bure übernommen aufgrund der zum Bearbeitungszeitpunkt noch nicht in vergleichbarer Qualität zu Verfügung stehenden Daten von deutschen Standorten.

Das technische Endlagerkonzept wird im Folgenden unter Berücksichtigung und Beschreibung der möglichen Tonformationen, der Kenntnisse zur Streckenauffahrung und Bohrlöcherstellung in Ton, der Ergebnisse der thermischen Auslegungsberechnungen zur erforderlichen Feldgröße für POLLUX-Behälter, alternativ Brennstabkokillen und HAW-Kokillen sowie einer Auswertung der Ergebnisse dargestellt. Weitere Details können dem Anlagenband 2 entnommen werden.

6.1 Bergbau im Ton

Es hat sich gezeigt, dass in Deutschland nur noch wenige Tiefbaue, in denen in Teufen zwischen ca. 15 bis 80 m Ton für industrielle Zwecke abgebaut und gefördert wird, existieren. Erfahrungen aus diesem Bereich können nur bedingt auf ein Endlager im Wirtsgestein Ton übertragen werden. Zu erkennen ist aber, dass ein hochwertiger Ausbau in Bereichen, die für eine längere Nutzung vorgesehen sind, erforderlich ist. Grundsätzlich ist Tongestein vor Feuchtigkeitseinwirkungen zu schützen. Erfahrungen über das Auffahren und die Unterhaltung von Strecken im Tongestein in Teufen zwischen 340 m (Abbildung 6-1, Abbildung 6-2, Abbildung 6-3) und gut 1.000 m liegen hingegen auf der Schachtanlage KONRAD vor.

Für die Herstellung von Strecken im Tongestein in großen Teufen zwischen 500 und 1.500 m wird eine gebirgsschonende Auffahrmethode mit Teil- oder Vollschnittmaschinen empfohlen. Als Sofortsicherung ist aufgrund der hohen Wasserempfindlichkeit von Tonen ein Ankerausbau mit einer Spritzbetonkonsolidierungsschicht (ca. 7 cm) an Stößen und Firste einzusetzen. In Abhängigkeit von den geomechanischen Gegebenheiten des Gebirges und der Streckenform kann minimal ein einschaliger, armierter Spritzbetonausbau mit Sohlenschluss oder maximal ein zweischaliger, armierter Spritzbetonausbau mit Sohlenschluss erforderlich sein. Weiterhin können gebirgsstabilisierende Maßnahmen durch Injektion von Silikatharzen ausgeführt werden.

Die Untersuchungen der Herstellbarkeit von Einlagerungsbohrlöchern in Ton durch Übertragung gängiger Bohrverfahren von über Tage auf unter Tage ergab eine grundsätzliche Anwendbarkeit für das Endlagerkonzept im Ton. Das anzuwendende Verfahren ist letztendlich von der gewählten Tonformation abhängig.

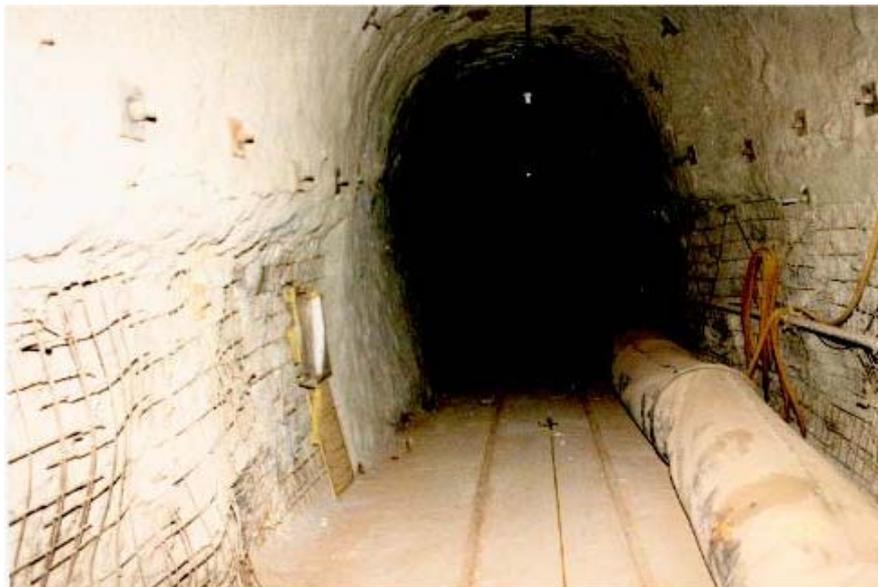


Abbildung 6-1: Schachanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe – 343 m) mit Anker-/ Spritzbetonausbau



Abbildung 6-2: Schachtanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe – 541 m) mit geschraubten Stahlbögen und Anker-/Spritzbetonausbau in der Firste

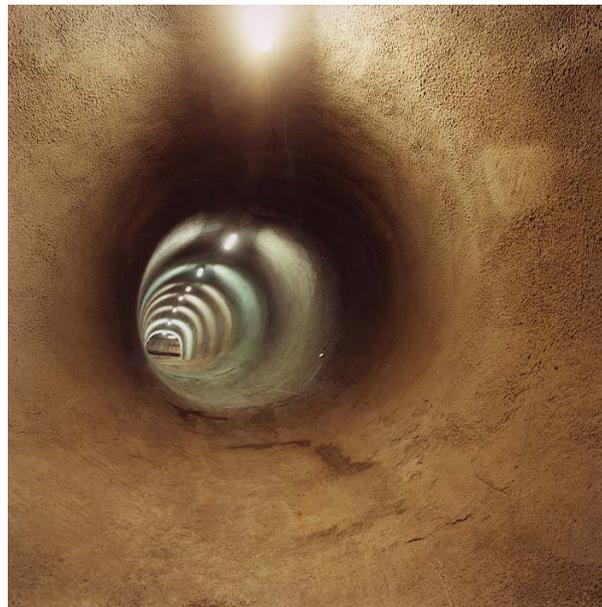


Abbildung 6-3: Zweischaliger, bewehrter und wasserundurchlässiger Spritzbetonausbau im Dogger in ca. 1000 m Teufe

6.2 Abfallmengenszenarium – Stand 2002

Im Jahr 1999 waren in Deutschland 19 Leichtwasserreaktoren mit einer Leistung von etwa 22 GWe brutto in Betrieb. Der Betreiber des KKW Mülheim-Kärlich hat sich in der am 11.06.2001 unterschriebenen Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen verpflichtet, den Genehmigungsantrag für das KKW Mülheim-Kärlich zurückzuziehen. Damit geht das bisher durch Gerichtsentscheidung stillgelegte Kraftwerk nicht wieder in Betrieb.

Mit dem „Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“ und der damit verbundenen Änderung des Atomgesetzes – AtG /6-3/ vom 22. April 2002 verringerten sich die zukünftig zu erwartenden Abfallmengen. Für die Untersuchungen für ein Endlagerkonzept in Ton wird im Folgenden diese verringerte Abfallmenge angenommen.

Mit Inkrafttreten der Atomgesetznovelle gelten zurzeit für die weiteren Planungen die in Tabelle 6-1 aufgeführten gegenüber dem in Kap. 6.2 aufgeführten „Abfallmengenszenarium Konzept Endlager Gorleben – Stand 1998“ verringerten Abfallmengen /6-4/

	Abfallgebinde-Volumina m³
Verglaste Abfälle	860
Verpackte Brennelemente	16.373
CASTOR THTR	1.974
CASTOR MTR2	128
BNFL 560 I-Fass	2.808
Summe	22.143

Tabelle 6-1: Prognostizierte Abfallgebinde-Volumina für wärmeentwickelnde Abfälle bis zum Jahr 2030

16.373 m³ verpackte Brennelemente entsprechen einem Abfallaufkommen von 8.947 t SM. Unter Berücksichtigung dieses Gebindeaufkommens ergeben sich die in Tabelle 6-2 zusammengestellten Gebindeanzahlen /6-5/.

Herkunft Behältertyp	COGEMA BNFL	WAK	BNFL	LWR-BE incl. Mox	THTR/ AVR	VKTA/ FRMII
Verglaster HAW (Kokillen)	4.778	130	-	-	-	-
CSD-C Kokillen	8.764	-	-	-	-	-
560 I-Fässer	-	-	2.052	-	-	-
POLLUX-10- Behälter	-	-	-	1.657	-	-
THTR/AVR- Castoren	-	-	-	-	459	-
VKTA/FRMII	-	-	-	-	-	51

Tabelle 6-2: Gebindeanzahl wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von der Herkunft

Grundlage zur Erstellung des Technischen Endlagerkonzeptes in Ton ist das dargestellte Abfallmengengerüst. Für die Erstausslegung des Technischen Endlagerkonzeptes werden HAW-Kokillen, POLLUX-Behälter und Brennstabkokillen berücksichtigt. Die im späteren beschriebenen thermomechanischen Auslegungsrechnungen ergaben aufgrund der Grenztemperatur von 100 °C die Erfordernis, den Inhalt des POLLUX-Gebindes auf die Stäbe dreier Brennelemente und den Inhalt des BSK-Gebindes auf die Brennstäbe zweier Brennelemente zu reduzieren. In Tabelle 6-3 sind die entsprechenden Behältermengen dargestellt.

Endlagergebilde	POLLUX-3-DWR oder BSK 2		HAW-Kokille
tSM pro Gebinde	1,6	1,08	-
Masse pro Gebinde [t]	ca. 38	ca. 4	ca. 0,5
Anzahl der Gebinde	5.524	8.286	4.778

Tabelle 6-3: Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung (POLLUX-3-DWR oder BSK 2) und Anzahl der HAW-Kokillen

6.3 Behälterkonzepte

International anerkanntes Prinzip bei der Errichtung eines Endlagers für radioaktiver Abfälle ist das Mehrbarrierenkonzept. In dem Mehrbarrierenkonzept, das als das Konzept zur Gewährleistung der Schutzziele (Schutz von Mensch und Umwelt vor den Auswirkungen ionisierender Strahlung) anerkannt ist, wird unterschieden zwischen technischen Barrieren (Abfallmatrix, Abfallbehälter, Versatz, Abschlussbauwerke für

Kammern, Bohrlöchern, Strecken und Schächten) sowie natürlichen (geologischen) Barrieren (Wirtsgestein und seine Umgebung aus Deck- und Nebengebirge).

Die langfristige Schutzfunktion (Erhaltung der Barriereneigenschaften und Erhaltung der langfristig sicheren Lagerungsbedingungen für die Endlagerbehälter) muss von der geologischen Barriere, also vom Wirtsgestein und in Ergänzung auch vom Deck- und Nebengebirge übernommen werden.

Art und Umfang der technischen Barrieren sind stark abhängig von dem gewählten Endlagerkonzept und dem verfügbaren Wirtsgestein. Wesentlicher Bestandteil der technischen Barrieren sind die Behälter, in denen die radioaktiven Abfälle endgelagert werden. Diese Behälter haben die grundsätzliche Funktion über einen längeren Zeitraum einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten und einen Zutritt von Wasser, von dem Radionuklide aus den Abfällen herausgelöst und in die Biosphäre transportiert werden können, auszuschließen.

Wesentliche Faktoren, die die Konstruktion der Endlagerbehälter bestimmen, sind:

- Art der Konditionierung der Abfälle (Einschluss in eine Glasmatrix, Zementierung, komplette Brennelemente oder gezogene Brennstäbe, Verwendung von Primärbehältern, etc.)
- Aktivitätsinventar der Abfälle (HAW, ILW, LLW, langlebige Radionuklide, kurzlebige Radionuklide)
- Wärmeerzeugung der Abfälle
- Wirtsgesteinsformation des Endlagers
- System der übrigen technischen Barrieren
- Schutzziele, denen die Endlagerbehälter entsprechen sollen, wie z. B.
 - Erhalt der Integrität der Behälter bei definierten Störfällen während des Einlagebetriebs, wie Fall und Feuer
 - Einhaltung von Leckraten bezüglich des Austrittes von Gasen
 - Erhalt der Integrität der Behälter über lange Zeiträume (Korrosionsfestigkeit, Druckfestigkeit etc.)

Die Einhaltung der Schutzziele ist in den Sicherheitsbewertungen für die Einzelbarrieren und das Endlager insgesamt nachzuweisen.

Aufgrund der o. g. Faktoren weisen die in Anlagenband 2 beschriebenen Endlagerbehälter verwendet in den Endlagerkonzepten der europäischen Länder wesentliche Unterschiede in ihrer konstruktiven Auslegung auf.

Die Auswahl der Endlagerbehälter für ein generisches Endlager in Ton wird von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt, die aus den unterschiedlichen Anforderungen an die Behälter in den verschiedenen Phasen des Endlagerbetriebes und in der Nachbar-

triebsphase resultieren. Mit den Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase ist nachzuweisen, dass die Endlagerbehälter ihre Funktion im Gesamtsystem der technischen und geologischen Barrieren erfüllen.

Es gibt Anforderungen an die Endlagerbehälter, die nicht von der Wirtsgesteinsformation abhängen. Hierzu können die nachfolgenden gerechnet werden /6-7/:

- Die ausgewählten Werkstoffe müssen stabil sein gegenüber der radioaktiven Strahlung aus dem Abfallinventar
- Aus Gründen der betrieblichen Sicherheit müssen sie möglichst große Abschirmwirkung haben oder ein innerbetrieblicher Transportbehälter muss diese Aufgabe übernehmen
- Die ausgewählten Materialien müssen in ausreichender Menge zu vertretbaren Kosten verfügbar sein, und zwar zum Teil über viele Jahrzehnte
- Die Behälterwerkstoffe müssen längerfristig korrosionsbeständig sein sowohl im Normalbetrieb als auch unter Störfallbedingungen
- Die technische Herstellung des Endlagerbehälters muss sicher und reproduzierbar zu den geforderten Qualitätsmerkmalen sein

Aus diesen Anforderungen aber auch aus den zusätzlich formationsspezifischen Anforderungen wurden bisher international nur metallische Werkstoffe für Endlagerbehälter abgeleitet.

In Auswertung der im Anlagenband 1 betrachteten Endlagerkonzepte verschiedener europäischer Länder sowie der thermischen Berechnungen im Anlagenband 2 müssen bei der Auswahl der Endlagerbehälter in Tongestein eine Reihe spezifischer Anforderungen berücksichtigt werden:

- Bezüglich der Langzeitsicherheit bestehen Unterschiede bei der Endlagerung in Salz und Ton. Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschusses durch das Salzgestein. Deshalb ist die Barrierenfunktion der (natürlichen) geologischen Barriere (Wirtsgestein) und des Schachtverschlusses konzeptführend. Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen und geotechnischen Barrieren konzeptführend.
- Aus langzeitsicherheitstechnischen Gründen muss der Endlagerbehälter für eine sehr lange Zeit intakt bleiben, d. h. die Behälter müssen für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmilieu sowie dem Gebirgsdruck standhalten.

- Die Temperatur an der Behälteroberfläche darf 100 °C nicht überschreiten, um Siedeeffekte zu vermeiden. Der Siedeeffekt kann zu einer Anreicherung von Salz an der Oberfläche der Behälter führen, wodurch Korrosionseffekte hervorgerufen werden können, die schwer zu analysieren sind. Des Weiteren wird bei Temperaturen über 100 °C die Barrierenwirkung des die Behälter umgebenden Bentonits beeinträchtigt.

Für die Materialauswahl und die Konstruktion der Endlagerbehälter im Tongestein ergibt sich daraus folgendes:

- Aufgrund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters mit ausgedienten Brennelementen bzw. der BSK mit gezogenen Brennstäben erfolgen.
- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz von korrosionsfesten Stählen bzw. durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierten Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkokillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe und HAW-Kokillen ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Ausgehend von den o. g. Anforderungen kann gefolgert werden, dass für die Endlagerung in Ton die für die Endlagerung in Salz vorgesehene Endlagerbehälter vom Typ Pollux, die Brennstabkokille für Brennstäbe sowie HAW-Kokillen grundsätzlich eingesetzt werden können. Dabei sind Anpassungen entsprechend den spezifischen Anforderungen für die Endlagerung in Ton erforderlich.

Für die direkte Endlagerung bedeutet dies, einen modifizierten Pollux-Behälter mit verringertem Durchmesser entsprechend der gegenüber dem Salz geringeren Beladung vorzusehen. Für den HAW kann der Einsatz der für die Endlagerung in Salz vorgesehenen HAW-Kokillen evtl. in einem Overpack erfolgen. Für die Einlagerungskonzeptalternative Bohrlochlagerung von gezogenen Brennstäben kann der Einsatz von Brennstabkokillen (BSK 2) für die Brennstäbe aus zwei Brennelementen erfolgen. In Abbildung 6-4 ist ein POLLUX-Endlagerbehälter mit verringerter Beladung (Brennstäben aus 3 BE) dargestellt.

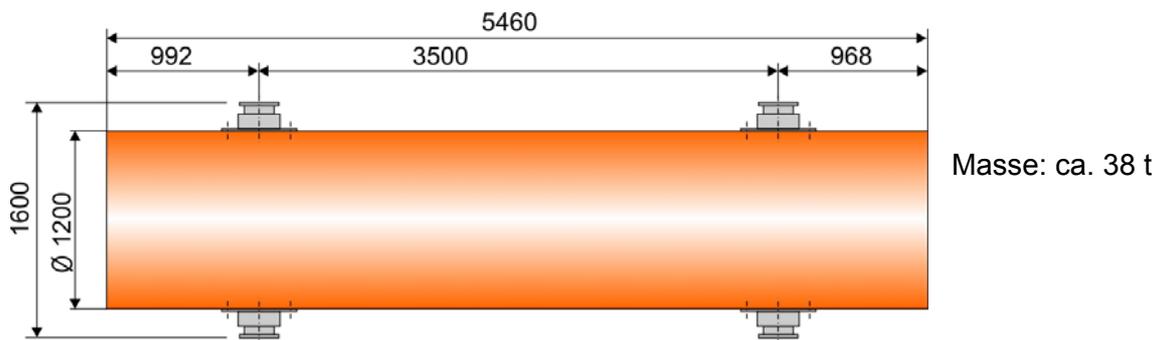


Abbildung 6-4: POLLUX-3 - Endlagerbehälter

Der Außendurchmesser 1.200 mm sowie die Länge 5.460 mm sind eine grobe Abschätzung. Der endgültige Außendurchmesser sowie die endgültige Länge werden von der noch zu ermittelnden tatsächlich erforderlichen Abschirmdicke des Behältermantels bestimmt.

Als Endlagergebilde für die Bohrlochlagerung wurde im ersten Ansatz eine bentonitmantelte HAW-Kokille (siehe Abbildung 6-5), eingestellt in einen geschlitzten ausführbaren Transport- und Einlagerungskorb, konzipiert. Dieses Gebilde hat den Vorteil, dass eine qualitätsgesichert hergestellte Bentonitschale mit der HAW-Kokille zusammen als eine Einheit in das Bohrloch eingebracht werden kann. Der innerbetriebliche Transport des Endlagergebildes erfolgt mit einem speziellen Transferbehälter.

Die endgültige Dimensionierung der Bentonithülle aufgrund der Anforderungen aus langzeitsicherheitlichen Betrachtungen hat noch zu erfolgen.

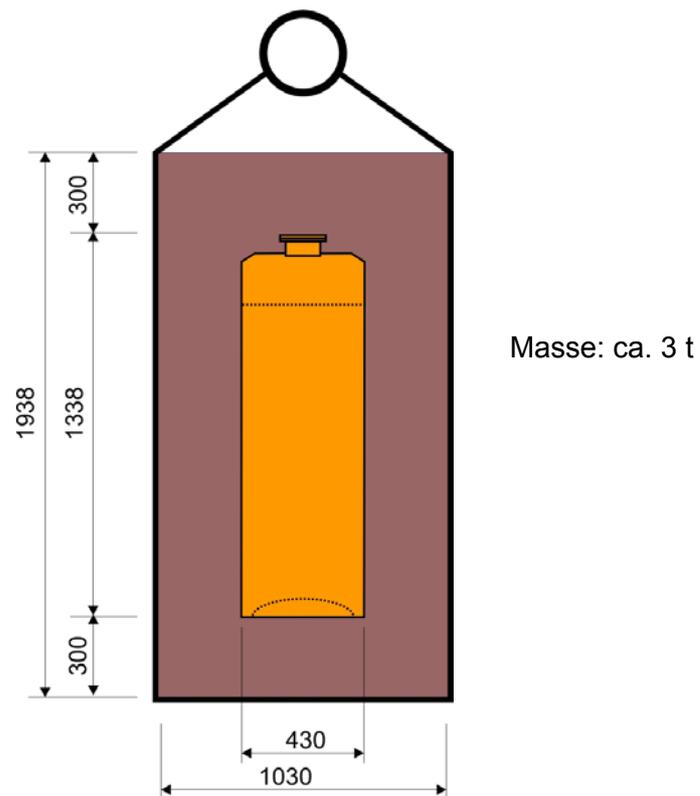


Abbildung 6-5: Bentonitummanteltes Endlagergebinde HAW-Kokille

Die in Anlagenband 2 dargestellten radiologischen und thermischen Daten für hochaktiven Abfall wurden auch für das Endlager in Ton zugrundegelegt.

Zur Endlagerung von Brennstabkokillen in Bohrlöchern wurde ein ähnliches Gebinde wie zur Endlagerung von HAW-Kokillen konzipiert (siehe Abbildung 6-6).

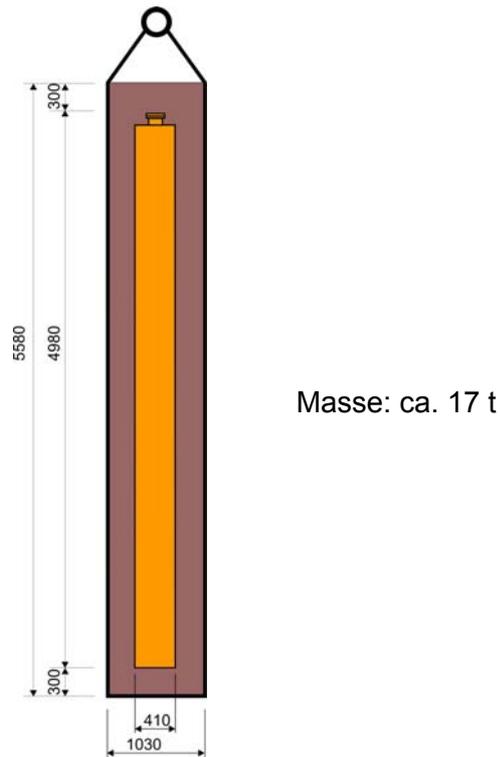


Abbildung 6-6: Bentonitummanteltes Endlagergebinde

In den folgenden Abschnitten werden die Methodik, die Annahmen und Grundlagen sowie die Ergebnisse thermischer Auslegungsberechnungen für ein Gesamtendlager dargestellt. Dabei werden die vorher beschriebenen Endlagerbehälter mit dem entsprechenden radioaktiven Abfall eingesetzt.

6.4 Einlagerungskonzepte

Vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Ausnutzung der Endlagerkapazität wurde für HAW- und BSK-Kokillen eine Bohrlochlagerung vorgesehen. Bei einer Formationsmindestmächtigkeit von 100 m wurde als nutzbare Bohrlochlänge ca. 55 m ermittelt unter Berücksichtigung von vorläufigen Sicherheitsabständen zur Formationsgrenze, nicht nutzbarer Bohrlochlänge, Bohrlochstopfen und der Höhe der Überfahrungsstrecken. Mit den Ergebnissen später durchzuführender, spezieller Untersuchungen zu den Sicherheitsabständen und den Ergebnissen aus technischen Planungen ist diese Annahme zu verifizieren bzw. anzupassen.

Für die Einlagerung ausgedienter Brennelemente ist die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern vorgesehen. Alternativ dazu wurde das Verbringen von Brennstäben in sogenannten Brennstabkokillen in Bohrlochern untersucht mit der Zielrichtung einer optimalen Ausnutzung des verfügbaren Wirtsgesteins.

6.4.1 Streckenlagerung

Ausgehend vom geschätzten Durchmesser (1,20 m) eines POLLUX-3-Endlagerbehälters ist eine einhüllende Schale aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile dienen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 6-7).

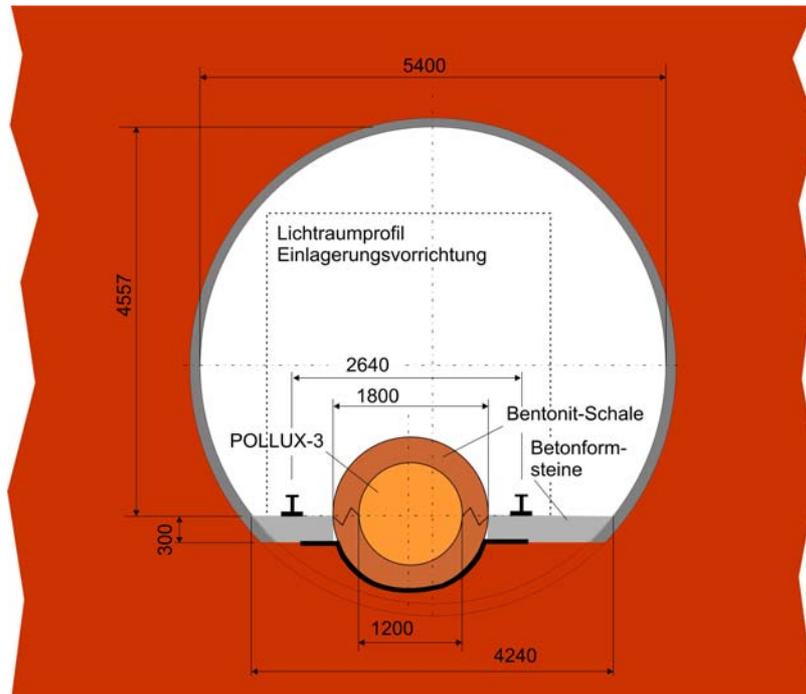


Abbildung 6-7: Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke für POLLUX-3

Nach der Einlagerung und dem Abdecken des POLLUX-3 durch formgepresste Bentonitfertigteile werden die Schienen und die Betonfertigteile entfernt und der Resthohlraum versetzt.

6.4.2 Bohrlochlagerung

Für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen ist ausgehend vom Durchmesser 43 cm auch hier eine einhüllende Schale aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile dienen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 6-8).

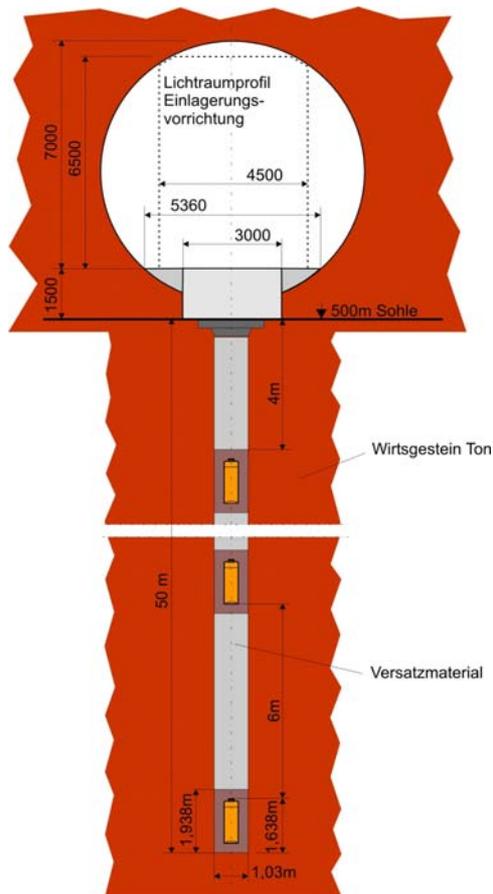


Abbildung 6-8: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für HAW-Kokillen

Für die Bohrlochlagerung von BSK 2-Kokillen ist ausgehend vom Durchmesser 41 cm auch hier eine einhüllende Schale aus 30 cm dickem Bentonit vorgesehen. Auf die Sohle gelegte Betonfertigteile dienen als Fundament für ein schienengebundenes Einlagerungssystem (siehe Abbildung 6-9).

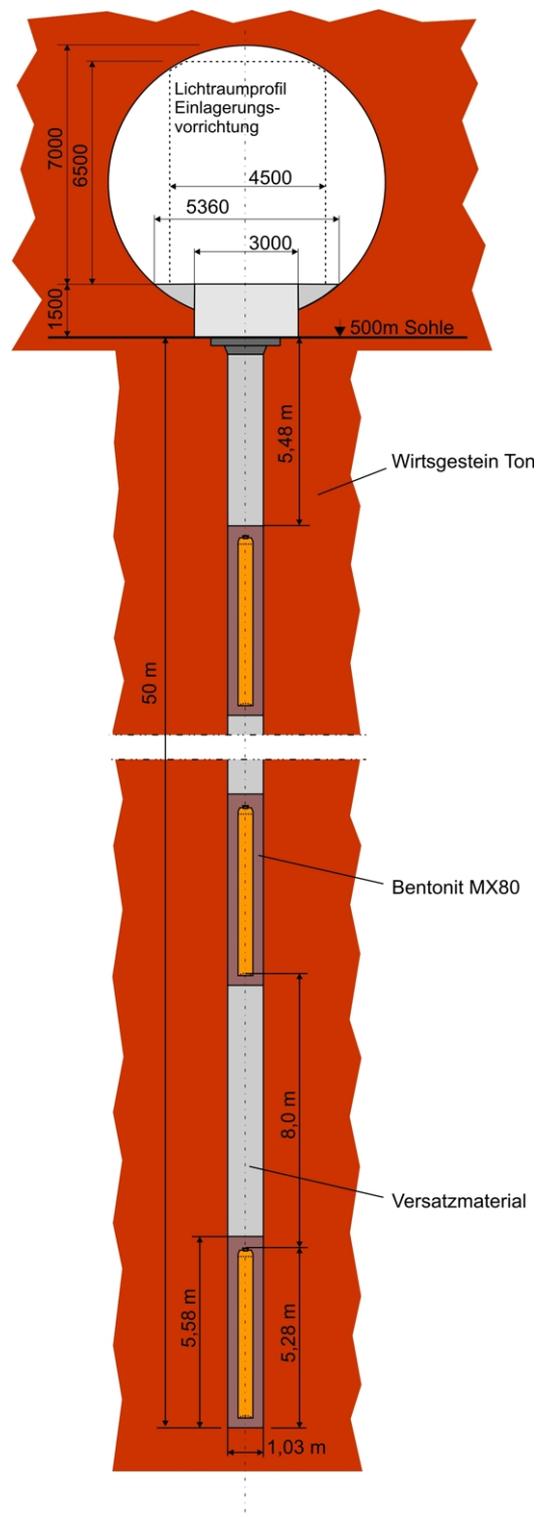


Abbildung 6-9: Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für BSK 2

6.5 Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton

Ausgehend vom aufgestellten Mengengerüst, den Randbedingungen für Abbrand und Zwischenlagerzeit der wärmeentwickelnden Abfälle sowie den Einlagerungskonzepten lassen sich Belegungsabschätzungen für das Grubengebäude durchführen.

Aufgrund der geologischen Verhältnisse können vor Erkundung nur die geometrischen Grunddaten der Einlagerungsfelder wie Streckenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge und -abstand sowie der Behälterzwischenraum vorgegeben werden. Die Größe und Ausrichtung der Felder muss sich dem wechselnden Schichtstreichen und den unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten anpassen.

Größenbestimmend für ein reales Einlagerungsfeld sind bergbauliche und langzeitsicherheitliche sicherheitstechnische Anforderungen hinsichtlich notwendiger Sicherheitsabstände. Im ersten Entwurf getroffene Annahmen zu den Sicherheitsabständen sind bei Weiterverfolgung des Konzeptes zu verifizieren bzw. anzupassen.

Kriterium der Auslegung ist, dass im Bentonit, der als 30 cm starkes technisches Barrierematerial die Füllung des Bohrlochringraumes bildet, eine Auslegungstemperatur von 100 °C nicht überschritten werden soll, um die Integrität der Abdichtung zu gewährleisten.

Aufgrund der Temperaturfeldberechnungen für die betrachteten Einlagerungskonzepte ergeben sich die im folgenden aufgeführten beispielhaften Aufteilungen der Felder für die unterschiedlichen Abfallgebände.

6.5.1 POLLUX-3 Endlagergebände

Aufgrundlage der Untersuchungen in Anlagenband 2 zur Wärmeleistung, Berechnungsmodell, Wärmequelle, Zwischenlagerzeit, Behälterabstand und Streckenabstand können für die Streckenlagerung von POLLUX 3 Behältern unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfiguration folgende geometrische Parameter angegeben werden, für die die Auslegungstemperatur (100 °C) bei einer Zwischenlagerzeit von 31 Jahren nicht überschritten wird:

- Behälterabstand $d = 20$ m
- Streckenabstand $a_s = 30$ m.



Abbildung 6-11: Endlager für POLLUX-3

6.5.2 HAW-Kokillen

Auf Grundlage der Untersuchungen im Anlagenband 2 zur Wärmeleistung, Berechnungsmodell, Wärmequelle, Zwischenlagerzeit, Behälterabstand und Bohrlochabstand können für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfiguration folgende geometrische Parameter angegeben werden

- Behälterabstand $d = 6 \text{ m}$ bei 7 Behältern pro Bohrloch
- Bohrlochabstand $a_b = 30 \text{ m}$ bzw. Streckenabstand $a_s = 26,0 \text{ m}$.

Die Fläche einer Einlagerungszelle (ein Bohrloch und umgebendes Wirtsgestein) ergibt sich zu:

$$A_0 = a_b \cdot a_s$$

$$A_0 = 30 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ m} = 780 \text{ m}^2$$

Für die Einlagerung einer Abfallmenge von 4 778 HAW-Kokillen sind somit 683 Einlagerungsbohrlöcher erforderlich. Der erforderliche Flächenbedarf eines Einlagerungsfeldes kann daher mit $663 \cdot 780 \text{ m}^2 \approx 0,53 \text{ km}^2$ abgeschätzt werden.

Zum Entwurf des Konzeptes „Einlagerung von HAW-Kokillen in Bohrlöchern“ wurde die im Folgenden beschriebene Startkonfiguration festgelegt. Ein Einzelfeld (Abbildung 6-12) wurde im Entwurf als ein Feld mit 36 parallelen Einlagerungsstrecken definiert. Die zu überprüfenden Sicherheitsabstände zu den Richtstrecken wurden mit ca. 50 m angenommen. Der Abstand vom Einlagerungsstreckenende bis zum nächsten Querschlag wurde mit ca. 34 m angenommen.

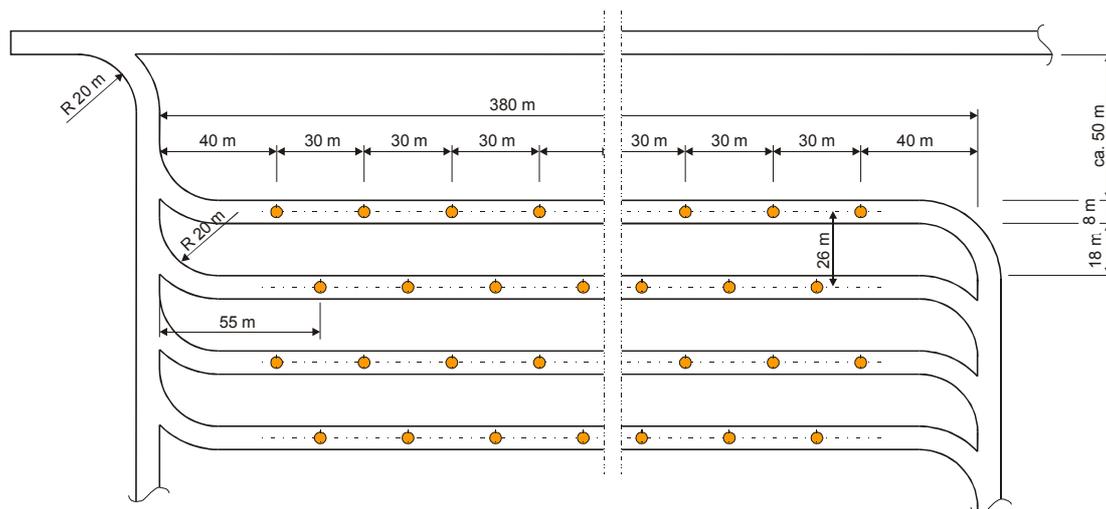


Abbildung 6-12: Bohrlochbeschickungsstrecken für HAW

In Abbildung 6-13 ist ein theoretischer Gesamtendlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen im Ton dargestellt. Unter Berücksichtigung der Einzelfeldmaße und der bergbaulichen Gesichtspunkte ergeben sich ca. 0,9 km² erforderliche Fläche. Hierin wurde wiederum die erforderliche Fläche für den Infrastrukturbereich nicht berücksichtigt.

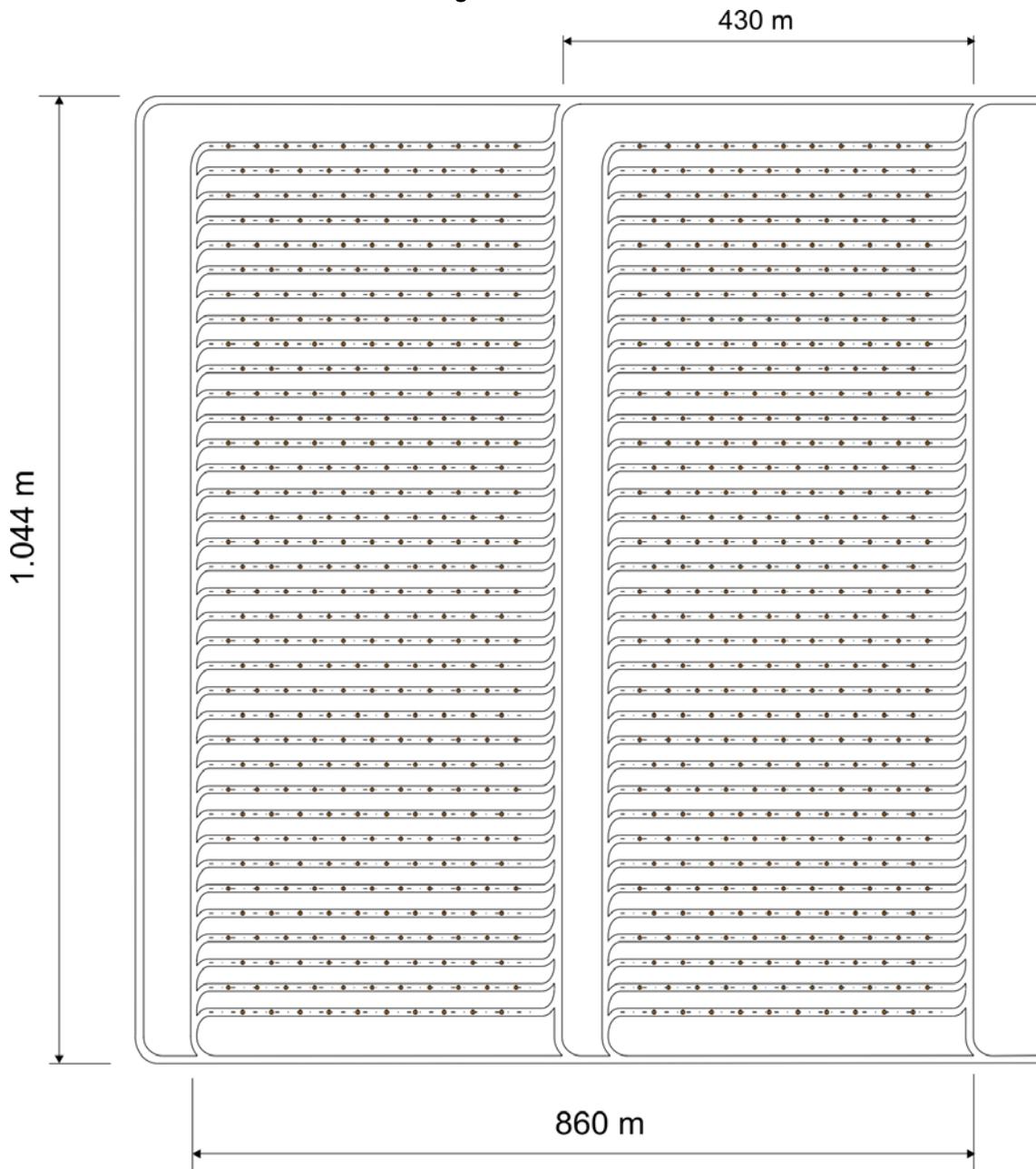


Abbildung 6-13: Einlagerungsbereich für HAW-Kokillen

6.5.3 BSK 2 Endlagergebäude

Auf Grundlage der Untersuchungen im Anlagenband 2 zur Wärmeleistung, Berechnungsmodell, Wärmequelle, Zwischenlagerzeit, Behälterabstand und Bohrlochabstand können für die Bohrlochlagerung von BSK 2 Brennstabkokillen unter Annahme der gewählten Einlagerungskonfiguration folgende geometrische Parameter angegeben werden

- Behälterabstand $d = 8$ m bei 4 Behältern pro Bohrloch
- Bohrlochabstand $a_b = 50$ m bzw. Streckenabstand $a_s = 43,3$ m.

Die Fläche einer Einlagerungszelle (ein Bohrloch und umgebendes Wirtsgestein) ergibt sich zu

$$A_0 = a_b \cdot a_s$$

$$A_0 = 50 \text{ m} \cdot 43,3 \text{ m} = 2\,165 \text{ m}^2$$

Für die Einlagerung einer Abfallmenge von 8 947 t SM sind ca. 8 286 BSK 2 Endlagergebäude sowie 2 072 Einlagerungsbohrlöcher erforderlich. Der erforderliche Flächenbedarf eines Einlagerungsfeldes kann daher mit $2\,072 \cdot 2\,165 \text{ m}^2 = 4,5 \text{ km}^2$ abgeschätzt werden.

Zum Entwurf des dritten Konzeptes (Konzeptvariante) „Einlagerung von gezogenen Brennstäben ausgedienter Brennelemente in Brennstabkokillen in Bohrlöchern“ wurde die im Folgenden beschriebene Startkonfiguration festgelegt.

Ein Einzelfeld (s. Abbildung 6-14) wurde im Entwurf als ein Feld von 36 parallelen Einlagerungsstrecken definiert. Die zu überprüfenden Sicherheitsabstände zu den Richtstrecken wurden mit ca. 50 m angenommen. Der Abstand vom Einlagerungsstreckenende bis zum nächsten Querschlag wurde mit ca. 34 m angenommen. In Abbildung 6-15 ist ein theoretischer Gesamtendlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen im Ton dargestellt. Unter Berücksichtigung der Einzelfeldmaße und der bergbaulichen Gesichtspunkte ergeben sich ca. 5,7 km² erforderliche Fläche. Hierin wurde wiederum die erforderliche Fläche für den Infrastrukturbereich nicht berücksichtigt.



Abbildung 6-15: Einlagerungsbereich für BSK 2

In Abhängigkeit von dem natürlichen geologischen Angebot an potentiellen Wirtsgesteinen (Steinsalz, kristalline Gesteine und Ton) werden in einigen Ländern tonige Gesteinsformationen als Wirtsgesteine bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen und untersucht. Die einzelnen nationalen Endlagerkonzepte dafür sind jedoch unterschiedlich weit fortgeschritten und reichen von generellen Machbarkeitsstudien unter den länderspezifischen Bedingungen (Spanien) bis zur Auswahl von konkreten Standorten (Benken in der Schweiz) und den Betrieb von untertägigen Versuchseinrichtungen (Mol in Belgien, Bure in Frankreich und Mont Terri in der Schweiz).

Für ein Endlager in Tonformationen stellen die Abfallbehälter eine technische Barriere dar. Sie werden von den Verfüllmaterialien umgeben, die den Hohlraum zwischen Abfallbehälter und Wirtsgestein ausfüllen. In den nachfolgend aufgeführten internationalen Verfüllkonzepten (s. a. Anlagenband 1) werden Bentonite, z. T. auch graphitisiert, oder Bentonit-Quarzsand-Mischungen dafür favorisiert. Als Verschlussmaterial zum Verschluss der künstlich geschaffenen Verbindungswege (Stollen, Schächte, Bohrlöcher) werden Bentonite, Bentonit/Gesteinsmehl-Mischungen, anfallendes Ausbruchsmaterial und Betone betrachtet. Verfüll- und Verschlussmaterialien stellen geotechnische Barrieren dar. Entscheidend für die Qualität der Barrierewirkung insgesamt sind neben der Konditionierung der Abfälle und dem Isolationspotential der Endlagerformation auch die gezielte Einstellung von Verfüll- und Verschlussmaterialien auf Abfallgebinde und Wirtsgestein bzw. zu erwartende Formationswässer.

6.6.2 Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien

Die ausreichende Rückhaltung der Nuklide durch das Mehrbarrierensystem wird an den radiologischen Schutzziele gemessen wie sie von der Internationalen Atomenergie-Organisation /6-7/ formuliert, in dem „Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“ festgelegt /6-8/ und von der Europäischen Gemeinschaft übernommen wurden /6-9/. Allen Schutzziele voran steht die dauerhafte Isolierung radioaktiver Abfälle von der Biosphäre, um Mensch und Umwelt zu schützen. Zukünftige Generationen sollen zudem nicht mehr als „zumutbar“ durch die Auswirkung der Endlagerung belastet oder verpflichtet werden.

Der Verfüllung und dem Verschluss eines Endlagers fällt die Aufgabe zu, die Integrität der durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzten, geologischen Barriere wieder herzustellen und das Endlager vor dem unbeabsichtigten Zutritt von Personen zu sichern. Die geotechnischen Barrieren bilden dabei eine bedeutende hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall. Angestrebt wird nicht allein ein vollständiger Einschluss der Endlagerbehälter, sondern auch eine ausreichende Rückhaltung bzw. die Verzögerung des Transports der im Versagensfall aus den Behältern freigesetzten Radionuklide. Durch die geotechnischen Barrieren soll

über sehr lange Zeiträume der Transport durch Konvektion ausgeschaltet sowie der Schadstofftransport durch Diffusion eingegrenzt werden. Weiterhin soll der Transport von korrosiven Substanzen zum Endlagerbehälter minimiert sowie ein günstiges chemisches Umfeld bezüglich der Korrosionsraten gewährleistet werden.

Vorraussetzung hierfür ist allerdings, dass die geotechnischen Barrieren eine Dauerhaftigkeit und Robustheit gegenüber Veränderungsprozessen aufweisen, so dass die Eigenschaften des Materials nicht durch äußere Einflüsse wie z. B. Lösungszusammensetzung oder hohe Temperaturen im Nahfeld des Endlagerbehälters beeinträchtigt werden. Die Robustheit ergibt sich einerseits aus der Materialwahl und Dimensionierung der Barrieren, und andererseits aus der Verwendung eines Systems von mehreren gestaffelten, passiven Sicherheitsbarrieren aus Hohlraum-, Strecken- und Schachtverfüllung bzw. -verschluss, die den Verzicht auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen zulassen.

Die einzelnen Barrieren sollen in ihrer Art und Beschaffenheit verschieden und so bemessen sein, dass eine vorhergesehene oder unvorhergesehene Schwächung einer Barriere durch die Rückhaltewirkung der anderen Barrieren aufgefangen wird. Die Barrieren wirken zeitlich gestaffelt. Im Idealfall können durch den sicheren Einschluss, den die geotechnische und geologische Barriere gewährleisten sollen, potentiell korrosive Fluide im Falle eines Flüssigkeitszutritts den Endlagerbehälter nicht erreichen. Solange der Endlagerbehälter dicht ist, ist die Rückhaltewirkung des Glaskörpers (HAW) oder des Brennstoffs (POLLUX-3/BSK 2) ungeschmälert gewährleistet und andere Barrieren werden nicht beansprucht. Erst nach Versagen der Endlagerbehälter kommt das Abfallglas respektive Brennstoff in Kontakt mit Wasser, und die langsame Freisetzung durch Auflösung kann beginnen. Mit dem Beginn der Auflösung kommt dann die Rückhaltewirkung der Barriere zum Tragen. Für viele Nuklide wird der Diffusionsfluss durch das Erreichen der Löslichkeitsgrenze an der Innenseite der Barriere stark eingeschränkt. Der Grossteil der Radionuklide zerfällt bereits im Abfallglas respektive in den Brennstäben oder in der Barriere. Erst nach einem Durchbruch der Nuklide durch die geotechnische Barriere kommt die Rückhaltewirkung der Geosphärenbarriere ins Spiel.

Durch die Verfüllung und den Verschluss soll mechanisch eine gebirgsstützende Wirkung erzielt werden. Um langfristig eine Ausweitung der Auflockerungszone um die Hohlräume zu vermeiden, muss ein Verschluss auch langfristig den Gebirgsdruck aufnehmen können. Jedoch ist darauf zu achten, dass bei Verwendung von quellfähigen Materialien keine zu hohen Quelldrücke entstehen, die zum Aufbrechen des Wirtsgesteins führen.

An die Verfüll- und Verschlussmaterialien werden folgende allgemeine Anforderungen gestellt, so wie sie auch für ein kanadisches Endlager gefordert werden /6-10/.

- Die Materialien müssen in entsprechenden Mengen von gleicher Qualität/Eigenschaft verfügbar sein.
- Die Materialien müssen verarbeitbar sein und mit verfügbarer Technologie eingebaut werden können.
- Die Materialien sollen eine hohe thermische Leitfähigkeit in Übereinstimmung mit anderen Materialanforderungen haben
- Die Materialien sollen ein prognostizierbares Langzeitverhalten haben

Für die verschiedenen Verfüll- und Verschlussmaterialien werden darüber hinaus folgende technische Anforderungen definiert.

- Vollständige Umhüllung eines jeden Behälters
- Verhindern der Bewegung und chemische Modifikation des Grundwassers in Behälternähe, so dass die Behälterkorrosion begrenzt wird
- Verzögerung der Bewegung von Nukliden bis in den Bereich der Diffusion durch Verbesserung der Sorptionseigenschaften und durch Veränderung der Grundwassereigenschaften
- Bei Bentoniten Temperatur auf 100° C begrenzen, um die Bildungsrate von Smekтите/Illit-Transformationen zu minimieren und Dampf Bildung zu verhindern
- Entwicklung eines Quelldrucksanstieges bei zutretendem Grundwasser, so dass alle Poren geschlossen sind oder Bereiche mit geringerer Dichte kompaktiert werden

In vergleichbarer Weise werden Anforderungen an Materialien zum Füllen von Lücken und an Beton- und Injektionsmaterialien gestellt. Damit soll erreicht werden, dass mit abgestuften Anforderungen an die vorgesehenen Materialien eine vollständige Verfüllung aller Hohlräume erreicht und Verfüll- und Verschlusselemente auch in der vorgegebenen Position gehalten werden.

6.6.3 Verfüll- und Verschlussmaterialien

Bei den in Anlagenband 2 beschriebenen internationalen Verfüll- und Verschlusskonzepten erfüllen offensichtlich Bentonite und Bentonit-Zuschlagsstoff-Gemische die Anforderungen an Verfüll- und Verschlussmaterialien am ehesten. Bentonite weisen günstige physiko-chemische Eigenschaften in Bezug auf Abdichtaufgaben auf, wie z. B. hohe Quellfähigkeit und niedrige Permeabilität sowie gute Sorptionsfähigkeit für Radionuklide. In der Literatur werden als Verfüll- und Verschlussmaterialien zwei Bentonite unterschiedlicher Ausgangszusammensetzung beschrieben, Natrium- (Na-) und Calcium- (Ca-) Bentonit. Diese werden in Anlagenband 2 einander gegenübergestellt und hinsichtlich der zu erwartenden Verhältnisse in potenziellen Endlagerregionen (Opalinuston in Süddeutschland und Unterkreide-Tone im Norddeutschen Becken) bewertet.

6.6.4 Verschlusskonzept für Modellendlager im Norddeutschen Becken und im Süddeutschen Molassebecken

In beiden Modellgebieten wurde ein mechanisch stabiler Tonstein/toniger Mergel als Einlagerungshorizont ausgewählt. Insofern gelten für beide Modellendlager ähnliche Randbedingungen hinsichtlich der Auswahl des Verfüll- und Verschlusskonzeptes sowie der entsprechenden Materialien.

Das Grubengebäude ist durch zwei im Deckgebirge ausgebaute und wasserdichte Schächte erschlossen. Die Einlagerungsfelder bestehen aus parallelen Strecken, die von Querschlägen abzweigen. Diese wiederum zweigen von den Haupttransportstrecken, den Richtstrecken ab. Zeitnah zur Einlagerung der Abfälle erfolgt das weitere Auffahren der Zugangs- und Einlagerungsstrecken.

Das Verfüllkonzept sieht eine Einhüllung der Behälter mit Bentonit sowie eine Verfüllung der Strecken mit Bentonit-Sand-Gemischen vor. Der Einbau des Bentonitverfüllmaterials erfolgt jedoch unterschiedlich für die Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern und für die Bohrlochlagerung von HAW-respektive BSK 2-Kokillen. In beiden Fällen werden hochverdichtete, gepresste Bentonit-Bausteine als direkte Umhüllung der Endlagerbehälter verwendet (s. Kap. 6.3).

Bei der Streckenlagerung werden vorgefertigte ca. 30 cm starke Halbschalen aus Bentonit hergestellt, die zum Einen vor der Einlagerung von POLLUX-Behältern mittels perforierter Stahlschale in eine entsprechend ausgefräste Mulde gelegt werden. Zum anderen wird ein eingelagerter POLLUX-Behälter mit der zweiten Bentonit-Halbschale bedeckt. Die Länge der Halbschalen sollte möglichst der des POLLUX-Behälters entsprechen. Im Rahmen weiterer Planungen ist zu prüfen, ob kürzere Elemente handhabungstechnische Vorteile aufzeigen. Dabei ist auch zu prüfen, ob die Stirnflächen der POLLUX-Behälter ebenso mit vorgepressten Bentonit-Formsteinen abzudecken sind, oder ob eine Verfüllung, wie sie für den restlichen Streckenhohlraum vorgesehen ist, ausreicht. Dort ist der Einsatz einer Schüttung aus einem Bentonit-Sand-Gemisch vorgesehen. Die Dimensionierung der 30 cm starken Halbschalen ist durch gezielte Untersuchungen zu belegen. Dabei sind sowohl mechanische, hydraulische und thermische Kriterien als auch fertigungstechnische Aspekte zu berücksichtigen.

HAW- und BSK-2 Kokillen werden in vertikale 50 m tiefe Bohrlöcher eingelagert. Auch hier erhalten die Endlagerbehälter eine umhüllende Bentonitschicht. Mit Blick auf qualitätsgesicherte Eigenschaften in unmittelbarer Behälternähe wird die Bentonitumhüllung aus vorgefertigten, genormten Bentonitringen bereits bei der Herstellung des einzulagernden Gebindes mittels eines perforierten Stahlzylinders um die Kokille gepackt (s. Kap. 6.3). Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Bentonitringdicke von 30 cm an-

genommen. Damit wird die Kokille allseitig mit Bentonit umgeben. Die Endlagerbohrung wird kurzfristig vor dem Beginn der Einlagerung passgenau hergestellt, so dass kein weiterer Ringraum zwischen Bohrlochwand und Endlagergebilde verfüllt werden muss. Der oberste Abschnitt des Bohrloches wird vollständig mit Bentonitblöcken verschlossen. Mit dieser Vorgehensweise soll sichergestellt werden, dass die Kokillen durch quellfähiges Bentonitmaterial gegen zutretende Wässer und Lösungen geschützt sind. Der Bentonit quillt bei Kontakt mit Wässern und Lösungen und wird dadurch weitergehend impermeabel.

Die Strecken über den Bohrlöchern werden wie die Einlagerungsstrecken für POLLUX-Behälter vollständig mit Versatzmaterial aus einem Bentonit-/Sand-Gemisch verfüllt. Das Mischungsverhältnis ist dabei entsprechend den Standortanforderungen im Rahmen weiterer Planungen festzulegen. Zum Einen soll der Sandanteil aus thermischen und mechanischen Gründen möglichst hoch sein, zum anderen soll dieser Anteil aus hydraulischen Gründen möglichst klein bleiben, um eine geringe Permeabilität zu erreichen. Das Material wird mit Transportfahrzeugen in die Strecken gefahren und dort mittels Ladefahrzeugen und Verdichtungsgeräten eingebaut. Besondere Maßnahmen sind für die Verdichtungen im Firstbereich anzuwenden.

Damit definierte Zustände entstehen, die in einem rechnerisch zu führenden Sicherheitsnachweis eindeutig bewertet werden können, und um schädigende Auswirkungen auf die Bentonitumschließung (z. B. Tolerierung einer Opferschicht) zu vermeiden, wurde für die Auslegung die Randbedingung formuliert, dass die Temperatur im Bereich des Bentonits an keiner Stelle 100 °C überschreiten darf (s. a. Kap. 3.4).

Aus thermischen Gesichtspunkten kann eine bessere Wärmeleitung durch Einsatz von Zusatzstoffen, z. B. Graphit, erreicht werden. Durch diese sogenannte Graphitisierung des Bentonits kann die notwendige Zwischenlagerzeit eines Behälters reduziert und/oder der Abstand der Behälter zueinander verringert werden. Je nach Optimierungsgrad muss gegebenenfalls der Abstand der Einlagerungsbohrlöcher vergrößert werden, um das Temperaturkriterium einzuhalten. Korrosionsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Graphit keinen Einfluss auf die Korrosion von Austenitstahl hat /6-11/.

Eine weitere Reduzierung der Zwischenlagerzeit kann durch eine den Behälter allseitig umschließende Sandschicht und der damit verbundenen Vergrößerung der wärmeabgebenden Kontaktfläche zum Bentonit erreicht werden. In der Sandschicht ist zum Erhalt einer geringen Porosität mit kleinen Porendurchmesser vor allem eine hohe Packungsdichte erforderlich. Kornform, -oberfläche und Korngrößenverteilung beeinflussen die Packungsdichte im wesentlichen Umfang. Bezüglich der Kornform haben gerundete Körner mit glatter Oberfläche beste Voraussetzungen für eine optimale Packungsdichte. Die Packungsdichte eines Einkornsystems kann durch die Anzahl der Berührungspunkte (Koordinationszahl K_z) beschrieben werden. In der Praxis werden in

Gleichkorn-Kugelhauwerk maximal 10 % der Kugeln in dichtesten Packungslagen ($K_z = 12$) geordnet sein (d. h. mittlere K_z ca. 8). Die Koordinationszahl eines geschütteten Hauferkes kann durch direktes Einwirken von Schütteln und Stoßen erhöht werden. Eine weitere Steigerung der Packungsdichte ist durch Kombination verschiedener Einkornsysteme möglich.

Das Schlupfkornprinzip sorgt für hohe Packungsdichten in binären (2 Kornklassen) und ternären (3 Kornklassen) Mischungen. Die Kornklassen werden dabei so gewählt, dass die kleineren Körner jeweils durch die Poren der jeweils größeren Körner „hindurchschlüpfen“ und damit diese ausfüllen können. Für das binäre Gemisch sollte das Durchmesser Verhältnis kleine : große Körner ca. 1 : 50 betragen. Das Verhältnis der Volumenanteile ist abhängig von der Koordinationszahl der großen Körner. Für eine Koordinationszahl von 8 besteht die optimale Mischung aus ca. 70 % grober und ca. 30 % feiner Körner. Damit sind in der Praxis Porositäten von ca. 20 bis 25 % erreichbar /6-12/.

6.6.5 Auswahl der geeigneten Bentonitart

Für einen effektiven Einsatz von Bentonit als Versatzmaterial in der Endlagerung ist es erforderlich, dass das Material über sehr lange Zeiträume (> 10.000 Jahre) /6-13/ stabil bleibt. Innerhalb einer solchen Zeitspanne darf das Versatzmaterial weder seine günstigen, für seine Funktion als Barriere wichtigen Eigenschaften wie Sorptionsfähigkeit oder Abdichtung durch Quellung verlieren, noch durch die herrschenden Umgebungsbedingungen wie den Kontakt mit hochkonzentrierten Lösungen nachteilig beeinflusst oder gar zerstört werden.

Die Dauerhaftigkeit des Versatzmaterials hängt von den geochemischen Reaktionen ab, die zwischen dem eingebrachten Abfall, der Verglasung desselben, den Abfallbehältern, dem kompaktierten und losen Barrierematerial, dem umgebenden Wirtsgestein und den vorhandenen Wässern auftreten. Die Entwicklung der Porenwasserchemie in einem Endlager ist von entscheidender Bedeutung für die Vorhersage der Löslichkeiten von Radionukliden, um deren Verhalten beim Auswandern aus dem Endlager in die Umgebung voraussagen zu können. Untersuchungen gehen davon aus, dass die Porenwasserchemie in einem Endlager von der Ausgangszusammensetzung des Bentonites, den Ionen-Eintritt und dem Formationswasserzutritt während der Sättigung und den später stattfindenden Reaktionen zwischen diesen bestimmt wird. Die wichtigsten schnell löslichen Komponenten in natürlichen Bentoniten sind Karbonate und Sulfate zusammen mit Pyrit unter oxidierenden Bedingungen. Ionen-Austauschvorgänge, so wird erwartet, treten zwischen den Kationen im Bentonit und im Wasser auf. Dabei nehmen thermodynamische Modelle an, dass chemische Prozesse so langsam ablaufen, dass sie in Kurzzeit-Laborexperimenten gar nicht in Erscheinung treten.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich Bentonite mit einem hohen Reinheitsgrad an Montmorillonit als Versatzmaterial am besten geeignet sind, da eine Alteration von akzessorischen Mineralphasen in hochkonzentrierten Lösungen zu erwarten ist. Die Alteration kann zu einer Änderung der Lösungsschemie führen, freiwerdende Elemente können mit anderen Komponenten des Barriersystems wechselwirken, was die Vorhersage der Entwicklung des Systems erschwert. Der hohe Montmorillonit-Gehalt verspricht weiterhin eine große absolute Kationenaustauschfähigkeit und sehr gutes Quellvermögen.

In der Literatur werden zwei Bentonite unterschiedlicher Ausgangszusammensetzung beschrieben, der Natrium- (Na-) und Calcium- (Ca-) Bentonit, die im Folgendem gegenübergestellt und hinsichtlich der zu erwartenden Verhältnisse für den Opalinuston in Süddeutschland und die Unterkreide-Tonen im Norddeutschen Becken bewertet werden. Aktivierte Bentonite scheiden aufgrund der nicht nachweisbaren Langzeitstabilität (fehlende Analoga) gegenüber hochmineralisierten Formationswässern aus. Neben der Langzeitstabilität muss auch die Genehmigungsfähigkeit betrachtet werden, daraus resultieren folgende abgeleitete Randbedingungen:

- Die Gesamtmenge des eingesetzten Bentonits muss aus einer Lagerstätte stammen. Es muss sich um ein Handelsprodukt ausreichender Verfügbarkeit und mit gesicherter Qualität handeln.
- Die Lieferfähigkeit in konstanter Qualität muss über lange Zeiträume nachgewiesen werden.
- Das Material muss naturbelassen und ohne künstliche (zusätzliche) Beimengungen sein.

6.6.5.1 Vergleich zwischen Natrium (Na)- und Calcium (Ca)-Bentonit

Die Einflüsse und Veränderungen auf z. B. eine Bentonit-Barriere oder das Wirtsgestein treten mit großer Sicherheit gleichzeitig auf (z. B. Erhöhung des Porenwasserdruckes durch Temperaturerhöhung) Porenwasserdruckanstieg durch Gasentwicklung als Folge der Behälterkorrosion bei paralleler Veränderung des Eh/pH und Änderung der Konzentrationsverhältnisse). Die resultierenden komplexen Bedingungen und Verhältnisse sind bislang in den wenigsten Fällen hinreichend untersucht bzw. bewertet worden.

Es muss daraufhin gewiesen werden, dass das in großem Umfang vorliegende Datenmaterial zur Rheologie, Hydraulik und Stoffretardation von Tonmaterial nicht repräsentativ ist für den Kontakt mit den zu erwartenden, hochmineralisierten NaCl-Lösungen unterschiedlicher Art und unterschiedlichem Mischungsgrad. Die durch NaCl-Lösungen hervorgerufenen Beeinflussungen der Materialeigenschaften, sind im Vergleich mit anderen möglichen Zutrittslösungen (Wasser, MgCl₂-Lösungen im Wirts-

gestein Steinsalz), am stärksten ausgeprägt. Daher haben die mit NaCl-Lösungen ermittelten Parameter einen konservativen Charakter.

Hydraulische Leitfähigkeit bzw. Quellung/Schrumpfen

Es gibt aber bisher nur wenig experimentelle Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Formationswässern und Bentonit. Sie beziehen sich ausschließlich auf Na-Bentonit (MX-80). Generell geht man davon aus, dass sich bei Salzwasser im Vergleich zu Reinwasser die hydraulische Leitfähigkeit um ca. eine bis zwei Zehnerpotenzen erhöht. Dies wird auf eine Verringerung der Zwischenabstände zurückgeführt. Bei der Betrachtung der Durchlässigkeit ist im Hinblick auf den untertägigen Einsatz die Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen. Nach /6-14/ ergibt eine Temperatursteigerung von 20 °C auf 70 °C eine 3 bis 7fache Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit, da die Viskosität des Wassers abnimmt und das adsorbierte Wasser beweglicher wird.

Im gering verdichteten Zustand und gegenüber Wasser wird einwertiger Na-Bentonit hinsichtlich der osmotischen Prozesse aufgrund der höheren Ionenkonzentration zwischen den Tonteilchen durch einen größeren osmotischen Druck als Ca-Bentonit charakterisiert. Während bei Belegung mit zweiwertigen Kationen die Wasseraufnahme in der Zwischenschicht auf vier Schichten begrenzt ist, können in der Na⁺-belegten Zwischenschicht praktisch beliebig viele Wasserschichten (bis zur Ablösung der Tonplättchen voneinander) eingebaut werden /6-15/. Die dickere Doppelschicht der Na-Bentonite reduziert den Fluidfluss durch den Ton.

Durch die höhere Quellfähigkeit des Na-Montmorillonites ergeben sich höhere Quelldrücke und niedrigere hydraulische Leitfähigkeiten für Na-Bentonit gegenüber Ca-Bentonit (bei vergleichbaren Montmorillonitgehalten). Das Kriterium der minimalen hydraulischen Leitfähigkeit gegenüber Wasser erfüllen Na-Bentonite.

Die Abgabe bzw. Aufnahme von Zwischenschichtwasser der Bentonite ist bis zu einem Temperaturbereich von 200°C reversibel. Bei Na-Bentoniten geht die Quellbarkeit nach einer Dampfbehandlung irreversibel verloren /6-12/. /6-17/ untersuchte den Quelldruck von verdichteten teilgesättigtem Na-Bentonit-Sand-Mischungen nach Dampfbehandlung bei 200 °C und abschließender Abkühlung. Als Ergebnis ergab sich eine Abnahme des Quelldruckes um mehr als eine Größenordnung. Analoge Untersuchungen für Ca-Bentonite liegen nicht vor.

Aus technologischen Gründen wird der Einsatz von hochkompaktierten Bentonitblöcken beim Verfüllen und Verschließen von Bohrungen und Strecken betrachtet. In /6-18/ wurden die Quelldrücke von hochverdichteten MX-80 (Na-) Bentoniten und Calcigel (Ca-Bentonit) mit Trockendichten von $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ untersucht. In diesem Verdichtungsbereich weist Ca-Bentonit (trotz kleinerem Montmorillonitgehaltes) gegenüber Na-Bentonit höhere Quelldrücke auf. Bei hoher Verdichtung tritt aufgrund

des begrenzten Ausdehnungsvermögens (geringer Porenraum) die osmotische Quellung in den Hintergrund. Die möglichen Quellvorgänge beruhen auf der intrakristallinen Quellung. Da Ca^{2+} und Mg^{2+} höhere Hydratisierungsenergien haben als Na^+ weist in dem Fall Ca-Bentonit auch größere Quelldrücke auf. Aufgrund der höheren Quelldrücke nähert sich die hydraulische Leitfähigkeit des Ca-Bentonits den optimalen Werten des Na-Bentonits an.

Ähnliches ist festzustellen in Bezug auf die Einwirkung von konzentrierten Salzlösungen, die laut /6-19/ in Form einer hochmineralisierten Lösung des Na-Cl-(SO₄)-Typ's zu erwarten ist. Auch hier zeigt Ca-Bentonit höhere Quelldrücke gegenüber Na-Bentonit. Quelldruckuntersuchungen haben ergeben /6-20/, dass bei Einwirkung von konzentrierten Salzlösungen ein Ca-Bentonit gegenüber einem Na-Bentonit höhere Quelldrücke zeigt.

Ca^{2+} als Zwischenschichtkation bewirkt eine höhere Quellung als Na^+ . Bei einem Wassergehalt von 25 % entspricht der Natriumgehalt im Zwischenschichtwasser einer 3 N Salzlösung (175,2 g/l NaCl). Eine gesättigte NaCl-Lösung enthält ca. 350 g/l. Mit zunehmenden Salzgehalt in der Porenlösung verringert sich der Konzentrationsunterschied und damit der Anteil der osmotischen Quellung. Daraus ist ersichtlich, dass gegenüber vollständig (bzw. nahezu) gesättigten Salzlösungen kaum osmotische Vorgänge zu erwarten sind und Quelldrücke sich nur aufgrund der Hydratisierung der Kationen entwickeln können. Systematische Untersuchungen über den Einfluss der Art und der Konzentration von Elektrolyten in den Porenwässern liegen nicht vor. Unabhängig von der Art der Porenflüssigkeit ist beim Calcigel (Ca-Bentonit) ein Anstieg des Quelldruckes mit Erhöhung der reduzierten Trockendichte zu verzeichnen.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass Smektiten unter Einfluss von salinaren Lösungen eine geringere Quellfähigkeit aufweisen als salzfreie Bentonite. Cl-haltige Porenwässer aus dem Wirtgestein (Formationswässer) können also langfristig einen solchen chemischen Zustand für die Bentonit-Barriere einleiten und quasi in-situ die Quelleigenschaften reduzieren /6-21/.

Bei Calcigel bilden sich viele kleine Risse, während bei SPV Volclay sich wenige breite Risse entwickeln. Durch diese Rissbildung ist eine signifikante Veränderung aller Materialeigenschaften der geotechnischen Barriere zu erwarten /6-22/.

Festigkeitseigenschaften

Durch die deutliche geringere Aufweitung des Schichtabstands im Ca-Bentonit weist dieser über 50 % kleinere Plastizitätszahlen als Na-Bentonit auf /6-22/. Eine hohe Plastizität garantiert eine langzeitige innere Bruchfreiheit bei gleichzeitigem engem Kontakt mit dem Nachbargestein. Ob Na-Bentonit (höchster Plastizitätsindex) oder Ca-Bentonit (hoher Quelldruck, geringe Dispergierung) bevorzugt eingesetzt werden, hängt jeweils von den konkreten Bedingungen ab.

Als Erosionsbeständigkeit wird der Widerstand eines Tones gegenüber einer Wasserströmung verstanden. Wird die Dispersion als Mechanismus der Erosion akzeptiert, so muss berücksichtigt werden, dass Na-Bentonite unter Wasseraufnahme und in salzarmen Lösungen, abhängig vom Grad ihrer Zementation, bis zum vollständigen oder teilweisen Zerfallen (Desintegration) der Smektitteilchen quellen. Ca-Bentonite dispergieren nicht. Daraus kann für letztere eine höhere Erosionsbeständigkeit abgeleitet werden. Auch hohe pH-Werte begünstigen die Dispersion. Die Art und die Konzentration der Kationen sowohl in der Porenlösung als auch im erodierendem Medium hat einen Einfluss auf die Dispersion. Laut /6-23/ neigt der Ton zu Dispersion, wenn die Konzentration von Na und anderer Kationen (Ca, Mg) im Porenfluid hoch ist (60 % der Gesamtkationenkonzentration). Wenn die Kationenkonzentration im erodierenden Fluid hoch ist (hochsalinare Formationswässer), wird die Dispersion durch Segregation der Tonpartikel eingeschränkt.

Chemische Stabilität und Sorption

Wird der Bentonit als Abdichtstoff einer neuen Umgebung ausgesetzt, müssen sich neue Gleichgewichte einstellen. Danach bilden sich unter Langzeitbedingungen durch Kaliumzutritt aus Montmorillonit Illit-Smektit-Wechselagerungen. Dieser Prozess ist beim Ca-Bentonit langsamer als beim Na-Bentonit /6-24/. Für Na-Bentonite besteht eine bevorzugte Selektivität für K^+ , welche unter bestimmten Bedingungen zu einer Fixierung und letztendlich auch zur Illitisierung von Smektit führen kann /6-15/.

In hochkompaktierten Bentoniten gibt es im Intergranularraum unter Beibehaltung des ursprünglichen Aufbaus der Montmorillonitpartikel ein Bentonitgel, dessen Dichte durch die Porengröße bestimmt wird. Ca-Bentonite haben keine stabile physikalische Form bei Dichten, die tiefer liegen als $1,6 \text{ g/cm}^3$ aufgrund der in Poren bestehenden Möglichkeit der Gelbildung. Ca-Bentonite zeigen keine Quellung bei Einbaudichten unterhalb $1,6 \text{ g/cm}^3$ /6-25/.

Für das Rückhaltevermögen im Sinne der Materialanforderung ist die Sorptionskapazität eine wesentliche Kenngröße. Montmorillonite besitzen eine hohe spezifische Oberfläche sowie hohe Kationenaustauschkapazitäten. Unter Langzeitbedingungen ist ein Ca-Bentonit stabiler. Ein Na-Bentonit wandelt sich bei Zutritt von Ca^{2+} -Ionen in die Ca-Form um /6-26/. Doch auch im Ca-Bentonit können Zwischenschichtionen bei Einwir-

kung gesättigter NaCl-Lösung ersetzt werden. Dieser Austausch erfolgt aufgrund des Konzentrationsgradienten bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes und ist damit begrenzt /6-12/.

6.6.5.2 Festlegung auf Ca-Bentonit

Die endgültige Materialauswahl (Na- oder Ca-Bentonit) kann nur am konkreten Projekt bzw. Einsatzort und den dort auftretenden Fluiden erfolgen, wobei auch Gesichtspunkte wie Einbau des Materials, dessen Nachbehandlung usw. berücksichtigt werden müssen.

Eine Vielzahl von Experimenten (z. B. Wechselwirkungen zwischen Formationswässern und Bentonit) wurde ausschließlich an Na-Bentoniten durchgeführt. Analoge Untersuchungen an Ca-Bentoniten wurden nicht durchgeführt. Jedoch muss die Frage nach der Eignung von Na- oder Ca-Bentoniten aus gegenwärtiger Sicht bei den zu erwartenden hochmineralisierten, NaCl-dominierten (Süddeutschland) bzw. Na-Ca-Mg-Cl-Formationswasser-Typen (Norddeutschland) zugunsten von Ca-Bentonit ausfallen. Hinsichtlich der Eigenschaften wie Permeabilität und Quellvermögen, Festigkeit, Rückhaltevermögen u.a.m. lässt sich aber feststellen, dass bei den zu erwartenden hydrochemischen Verhältnissen keine großen Unterschiede zwischen Ca- und Na-Bentonit zu erwarten sind, die eine Bevorzugung des einen oder anderen Smektit-Typs rechtfertigt. Viele Eigenschaften dieser beiden Bentonittypen gleichen sich im verdichteten bzw. hochverdichteten Zustand an. Jedoch muss daraufhin gewiesen werden, dass der Ca-Bentonit nur mit einer Einbaudichte von oberhalb $1,6 \text{ g/cm}^3$ zu verwenden ist, da sonst keine signifikante Quellung zu beobachten ist.

Abgesehen davon, dass Na-Smektite in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Ca im Formationswasser (speziell in den Formationswässern Norddeutsches Becken) sowie so in die Ca-Form umgewandelt werden, sind Ca-Montmorillonite nach den vorliegenden Daten chemisch stabiler einzuschätzen. Diese höhere Stabilität scheint wohl unter Bedingungen niedriger als auch höherer pH-Werte gegeben. Weiterhin ist der Prozess der Illitisierung unter Langzeitbedingungen durch Kaliumzutritt und der daraus resultierende Verlust des Quellvermögens beim Ca-Bentonit langsamer als beim Na-Bentonit, da für Na-Bentonite eine bevorzugte Selektivität für K^+ besteht.

Alle in Frage kommende Bentonite werden in Lagerstätten gewonnen und stehen somit ausreichend zur Verfügung. Vorteil des Ca-Bentonits (Calcigel, früher Montigel) ist allerdings, dass dieser in Bayern, in der Gegend von Moosburg und Landshut produziert und vertrieben wird. Der Transportaufwand und die Kosten wären ungleich niedriger als beim Bezug von großen Mengen Na- (MX-80) Bentonit aus Amerika oder Kanada. Dieses könnte auch ein Grund dafür sein, das in den spanischen, französischen und belgischen Verfüll- und Verschlusskonzepten Ca-Bentonite, die in benachbarten bzw.

nationalen Lagerstätten vorkommen, aufgrund der kostengünstigeren Verfügbarkeit betrachtet werden.

6.7 Konzept der Streckenverfüllungen und -verschlüsse

Beim Bau eines Endlagers fallen in der Bauphase erhebliche Volumina an Ausbruchmaterial an. Da sicher nicht von einer sofortigen praktischen Verwendung des Ausbruchmaterials als Verschlussmaterial auszugehen ist, stellt die Vorhaltung ein Problem dar. Aufgrund der Zusammensetzung z. B. des Opalinustons ist bei einer Aufhaltung mit schnell fortschreitender Verwitterung an der Luft (zusätzlich Sonneneinstrahlung, Niederschlagswasser usw.) zu rechnen. Im Opalinuston stellen Pyrit und das organische Material die einzigen relativ schnell oxidierbaren und gleichzeitig mengenmäßig signifikanten Bestandteile dar. Es muss durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Qualität des Materials durch die Lagerhaltung nicht allzu stark verschlechtert.

Die drastischen Änderungen der Milieubedingungen, Zufuhr von Luftsauerstoff und Wasser, führen zur Oxidation des Pyrits, der nur unter reduzierenden Bedingungen stabil ist. Dabei entstehen Sulfat-, Eisen- und Wasserstoff-Ionen, die das vorherrschende reduzierende Milieu des Tonsteins nachhaltig verändern. Die Menge an Eisen- und Sulfat-Ionen, die freigesetzt werden, hängt von der Verfügbarkeit von Sauerstoff ab. Um chemisch-physikalische Veränderungen des Tons z. B. durch Auswaschungen zu vermeiden, wären zusätzlich großflächige Auffahrungen unter Tage, ein geeigneter Deponieplatz oder die Errichtung eines Bauwerks für die Lagerung erforderlich. Je nach Einsatzort und den daraus resultierenden Anforderungen an das Material ist eine gewisse Aufbereitung erforderlich, d. h. eine Zugabe anderer Materialien wie Ton, Bentonit, Quarzsand oder auch eine Zugabe gleichen Materials aber mit definierter Kornabstufung.

Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung des Unterkreide Mergels können derzeit noch nicht gemacht werden. Jedoch müssen in sämtlichen Verwendungsfällen von Ausbruchmaterial ausgedehnte Vorversuche zur Eignungsklä rung durchgeführt werden. Letztlich ist es eine Frage der Kostenoptimierung, ob ein entsprechend den Anforderungen gelagertes Ausbruchmaterial oder aber ein entsprechendes Material von einem anderen Abbaustandort verwendet wird.

Im Konzeptvorschlag wird aus technologischen und geochemischen Gründen auf den Einsatz von Wirtsgesteinsmaterial, das bei der Auffahrung anfällt, verzichtet. Die Streckenverschlüsse werden als hydraulische Barrieren sowie als stützender Versatz ausgelegt. Sie sollen in der Lage sein, einen eventuellen Wasserzutritt in den verfüllten Lagerbereich zu verzögern oder was kaum zu erwarten ist, ein Ausfließen potenziell kontaminierter Wässer aus dem Lagerbereich zu verhindern.

In den Einlagerungsstrecken sind schüttfähige Bentonitmaterialien erforderlich. Als Hauptparameter zur Bemessung der Bentonitdichtelemente sind die erforderliche Bentonittrockendichte und das notwendige Verhältnis von Länge : Radius des Dichtelementes zu nennen. Dabei ist die Dichtereduzierung des Bentonits bei möglichem Quellvolumen zu berücksichtigen.

Der Bentonit wird lufttrocken, d. h. ohne Flüssigkeitszugabe eingebaut, um ein nachteiliges Vorquellen auszuschalten. Die Überwachung der Einbauqualität erfolgt hinsichtlich der Einbaufeuchte des Bentonits ($w < 10\%$) und der Trockendichte im gesamten Hohlraumquerschnitt. Aufgrund des Selbstheilungseffektes nach Flüssigkeitszutritt werden Inhomogenitäten und Imperfektionen ausgeglichen /6-20/. Um ungesättigte Bereiche des Bentonitdichtelementes vor schlagartigen Belastungsdrücken abzuschirmen, müssen Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische vorgeschaltet werden, die im Korngrößenspektrum so abgestuft sind, dass eine stufenweise Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt. Auf diese Weise werden schon bei geringen Flüssigkeitsdrücken gesättigte Bereiche ausgebildet, die als „Schutzschicht“ die reine Bentonitdichtung abschirmt. Der Bentonit erhält die Möglichkeit Flüssigkeit aufzunehmen und durch den Quellvorgang die vorhandenen Poren zu schließen. Damit wird eine Aktivierung der Dichtfunktion erreicht /6-27/.

Weiterhin muss aufgrund der Tiefenlage, verstärkt im Konzept für den Opalinuston, auf Bentonit-Quarzsand-Gemische sowie Schotterkiespackungen zurückgegriffen werden. Dadurch wird eine Verbesserung der Stütz- und Tragfunktion durch eine Verringerung des Kriechens gegenüber reinem Bentonit sowie eine Senkung der Kosten erzielt.

Um die Eigenschaften des Bentonits möglichst wenig zu beeinträchtigen, werden wegen potentiell störender Einflüsse zementgebundene Werkstoffe z. B. die Betonauskleidung im Bereich der Verschlüsse beseitigt. Zementierte/betonierte Strukturelemente zum Lastabtrag sind erst in größerer Entfernung zu den Abfallbehältern z.B. in den Zugangs- oder Erkundungsstrecken einzusetzen. Ferner wird die Auflockerungszone des unmittelbar anstehenden Fels (Wirtsgestein) auf einer Tiefe von ca. 0,5 – 1,0 m entfernt.

6.8 Konzept der Schachtverfüllung und des Schachtverschlusses

Der Schachtverfüllung kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie im Schacht die direkte Verbindung zwischen Endlagerbereich und Biosphäre endgültig und dauerhaft verschließt. Diese Verwahrungssäulen bestehen aufgrund der hydrologischen Verhältnisse und des erforderlichen hohen Sicherheitsniveau generell aus einer oberen Deckgebirgsabdichtung gegenüber Süßwasser und einer unteren Abdichtung im Bereich des Wirtsgesteins gegenüber hochmineralisierten Formationswässern.

Da sich das süddeutsche vom norddeutschen Endlagermodell hinsichtlich der Teufenlage des Wirtsgesteins und in der lithologischen Ausbildungen des Deckgebirges unterscheidet, werden an die Dichtelemente und besonders an den Lastabtrag der Schachtverfüllung abweichende, hohe Anforderungen gestellt. Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht sowie die Dichtigkeit gegen maximal zu erwartende Gas- und Wasserdrücke in der Endlagerteufe sind weitere wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses. Die Positionierung von Dichtelementen erfolgt zur Verminderung von Auflockerungen zwischen setzungstabilen Widerlagern, die aus langzeitstabilen Material aufgebaut sind. Auch hier müssen dem Bentonitdichtelement abgestufte Bentonit-Zuschlagstoff-Gemische (mit unterschiedlichen Bentonitgehalten und Bentonittrockendichten) vorgeschaltet werden, um ungesättigte Bereiche des Dichtelementes vor schlagartigen Belastungsdrücken abzuschirmen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass lange Dichtelemente aus trocken eingebautem Bentonit nach Flüssigkeitszutritt durch den sich entwickelnden Quelldruck und die Wandreibung einen Lastabtrag des Dichtelementes gegenüber axialen Flüssigkeitsdrücken entwickeln.

6.8.1 Schachtverschluss für das Modell Süddeutsches Molassebecken (Opalinuston)

Die Geologie und Stratigraphie Süddeutschlands ist dank zahlreicher Untersuchungen gut erforscht und dokumentiert. Die regionale Analyse der aus zahlreichen Tiefbohrungen praktisch lückenlos bekannten Gesteinsabfolge zeigt, dass der geologische Aufbau dem der Nordschweiz (Untersuchungsgebiet der Nagra) entspricht. Die Jura-Ablagerungen (Opalinuston mit Rahmengesteinen) entstanden in der schwäbischen, generell tonreichen Beckenfazies, die in der Nordschweiz und Süddeutschland dominiert. Die jüngsten Ablagerungen stellen die tertiären Molasseschichten (Sandsteine, Mergel, Tone und Tonsteine) dar, die mit entsprechenden tektonischen Vorgängen der entstehenden Alpen korreliert werden können.

Der Nagra-Konzeptvorschlag für den Schachtverschluss kann aufgrund des fast identischen geologischen Aufbau des Deckgebirges und Wirtsgesteines übernommen werden, jedoch muss in der Auslegung berücksichtigt werden, dass aufgrund der größeren Tiefenlage des Opalinustons in Süddeutschland (ca. 800 m unter Geländeoberkante) abweichende mechanische Verhältnisse zu erwarten sind. Damit spielt der Lastabtrag eine größere Rolle bei der Schachtverfüllung als im Konzept der Nagra.

Für den Schachtverschluss wird ein mehrschichtiges Verschlussbauwerk aus natürlichen Materialien vorgesehen. Zwei Widerlager werden aus Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten zum Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit her-

gestellt. Die Widerlager werden zum einen oberhalb der Opalinuston-Formation bis unterhalb des Schachtröhrenfundamentes und zum anderen im Schachtsumpf bis über den Stollenabgang zum Endlager hinaus angeordnet. Die Verfüllung des unteren Widerlagers wird gegen Auslaufen in die vom Schacht abzweigenden Stollen durch entsprechend verdichtete Vorschüttungen gesichert. Zwischen diesen beiden Widerlagern befindet sich ein mehrere Zehnermeter langes Dichtelement aus hochkompaktierten Bentonit. Vor dem Einbau wird eine mögliche Auflockerungszone um die Schachtröhre entfernt und der verbleibende Querschnitt mit Bentonit gefüllt.

6.8.2 Schachtverschluss für das Niedersächsisches Becken (Unterkreide Tone)

Die Geologie des östlichen Niedersächsischen Beckens (Bereich des Endlagermodells) und die petrographische Ausbildung der Unterkreide-Schichten ist durch zahlreiche Veröffentlichungen bekannt. Das Wirtsgestein kann als ein toniger Mergel beschrieben werden. Das Deckgebirge bilden ebenfalls überwiegend Mergel sowie untergeordnet plastische Tone.

Durch den geringeren Überlagerungsdruck der aus der Tiefenlage des Endlagermodells von 300 – 400 m resultiert, muss der Schachtverschluss im Vergleich zum Modell Süddeutsches Molassebecken geringeren Belastungen widerstehen, die durch die Konvergenz der Wirtsgesteinsformation und des Deckgebirges hervorgerufen werden. Da die petrographische Ausbildung und damit die Permeabilität des Deckgebirges von der des Wirtsgesteins nicht signifikant abweicht, sind hohe Anforderung an die Dichtigkeit über die gesamte Verfüllsäule des Schachtes gestellt. Aufgrund der zu erwartenden gleichmäßigen, hydrochemischen Verhältnisse über die Gesamtlänge des Schachtes kann eine obere Deckgebirgsabdichtung gegenüber Süßwasser wegfallen. Deshalb wird für den gesamten Schacht eine Verfüllsäule aus speziell abgestuften Calcigel-Granulaten und -Briketts vorgesehen. Zusätzlich ist ein Dichtelement im Bereich des Wirtsgesteins zu erstellen.

Im Rahmen weiterer alternativer Planungen ist zu prüfen, ob die gleiche Abdichtwirkung aus einer Kombination von Schotterkiesschüttung mit Asphalt-/Bitumenfüllung in den Porenräumen und einer Kerndichtung im Endlagerhorizont erreichbar ist.

Eine wirtschaftliche Betrachtung der Alternativen wird dann für eine Entscheidung ausschlaggebend sein.

6.9 Auswirkungen der Betriebsphase eines Endlagerbergwerks auf das Tongebirge

Ein Grubengebäude wird üblicherweise durch mindestens zwei zumindest im Deckgebirge ausgebaute wasserdichte Schächte erschlossen. Das Erstellen des Grubengebäudes ist mit einer Druckentlastung und damit mit einer Bildung von Auflockerungszonen im Umfeld der untertägigen Hohlräume verbunden. Bergmännisch erstellte Hohlräume müssen durch Einbauten und Stützmaßnahmen (z. B. Anker und Spritzbeton) gesichert werden. Die Art der Einbauten und der Stützmaßnahmen ist u. a. abhängig von den Gesteinseigenschaften, der gebirgsmechanischen Situation, z. B. den Spannungszuständen sowie der Ausbildung (Größe und Form) der Hohlräume.

Im Anlagenband 6 sind die zu betrachtenden Rahmenbedingungen während der Betriebsphase eines Bergwerkes und mögliche chemische Prozesse qualitativ beschrieben. Die Endlagerung der Abfallgebinde findet kontinuierlich während der Betriebsphase des Endlagers statt, ebenso der Verschluss der Einlagerungsbereiche. Die hieraus resultierenden Einflüsse auf das Endlager werden jedoch im Kontext mit der Betrachtung der Nachbetriebsphase in Kapitel 9.4 diskutiert.

Aufgrund der bergmännischen Erstellung der untertägigen Hohlräume sowie der Erfordernisse der Bergbautätigkeiten (z. B. Bewetterung) sowie des Einbringens von Baustoffen wird das chemisch/mineralogische Milieu des Wirtsgesteins mannigfaltig beeinflusst. Im Folgenden werden diese Faktoren näher beschrieben.

Als Folge der Auffahrung untertägiger Hohlräume tritt eine Drucksenkung in den angrenzenden Gebirgsbereichen auf. Die Veränderungen des primären Spannungszustandes verursacht die Entstehung dilatanter Gebirgsbereiche. Die Drucksenkung ist abhängig von der Teufenlage des jeweiligen Hohlraumes, darüber hinaus beeinflussen die Größe (Dimensionen), die Form der untertägigen Hohlräume und die Durchführung von Sicherungs- bzw. Stützmaßnahmen (Ausbau) das Ausmaß der Entstehung dilatanter Gebirgsbereiche.

Die ursprüngliche Gebirgstemperatur wird während der Betriebsphase beeinflusst durch

- die Bewetterung der untertägigen Hohlräume sowie die Verwendung von Druckluft,
- das Einbringen von Baustoffen und Wasser und
- das Einlagern wärmeentwickelnder Abfälle.

Mit der Bewetterung gelangt Luft in das Bergwerk, deren Feuchtigkeit variiert. Bei niedrigen Luftfeuchtigkeiten kann in Abhängigkeit der Zugänglichkeit und der Gebirgspermeabilität Porenlösung des Gebirges verdunsten, während die gelösten Salze kristallisieren. Dieser Effekt tritt bereits bei relativ hohen Luftfeuchtigkeiten auf, da die Porenlösungen eine geringe Salinität aufweisen und damit eine hohe Gleichgewichtsfeuchte. Als Folge der Verdunstung ist mit zunehmender Porosität ein Dichteanstieg und eine Volumenabnahme des Gesteins festzustellen.

Während der Betriebsphase, insbesondere im Verlauf der Stilllegung des Endlagers werden Baustoffe in das Grubengebäude eingebracht. Die Menge der Baustoffe ist abhängig von der gebirgsmechanischen Situation (Stabilisierungsmaßnahmen), vom Abfallinventar (Erstellung von Permeationsbarrieren, Baustoffbestandteile der Abfallgebäude) sowie vom Gesamtvolumen der untertägigen Hohlräume (Verfüllmaßnahmen).

Die Verfüll- und Verschlussmaterialien müssen mineralogisch und geochemisch kompatibel mit dem Wirtsgestein sein. In Folge des Einbringens der Baustoffe dürfen die Eigenschaften des Wirtsgesteins nicht geschädigt werden. Falls möglich, sollte im Hinblick auf die Rückhaltung der Radionuklide eine Verbesserung des chemisch/mineralogischen Milieus im Endlagerbereich eintreten. In Betracht kommende Baustoffe werden im Anlagenband 6, Kapitel 3, beschrieben.

Reaktionen, die in der Betriebsphase auftreten können, beruhen auf den unterschiedlichen chemischen Milieus der folgenden „Endlagerkomponenten“:

- Wirtsgestein
- Baustoffe
- Bentonit (Einsatz z. B. als Sorptions- und Permeationsbarriere)

Die Reaktionen erfordern grundsätzlich einen Stoffaustausch (Lösung, Gas) und damit Stoffaustauschprozesse im signifikanten Umfang. Reaktionen der eingelagerten Abfallgebäude werden während der Betriebsphase ausgeschlossen.

7 Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton

Im Folgenden werden die Technischen Endlager-Konzepte im Wirtsgestein Salz und Ton verglichen sowie Vorteile und Nachteile dargestellt.

7.1 Bergbau in den Wirtsgesteinen

Der Bergbau im Wirtsgestein Salz ist aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges und der einfachen Erstellbarkeit von Strecken und Kammern gut beherrschbar. Je nach Kriechrate sind in größeren zeitlichen Abständen Nachschneidemaßnahmen an den Strecken und Kammern erforderlich, um die erforderlichen Lichtraumprofile einzuhalten.

Bergbau auf Ton in einer für ein geologisches Endlager relevanten Teufe existiert in Deutschland nicht, da abbauwürdige Tonformationen an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden. Eine Untersuchung oberflächennaher Bergwerke bis zu einer Teufe von 80 m zeigte, dass schon dort ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die Grubenräume erforderlich ist. In der Schachanlage Konrad bei Salzgitter sind Strecken im Ton in größeren Teufen errichtet worden. Es zeigte sich, dass der Ton gegen die Feuchtigkeit der Wetter geschützt werden muss. Hierzu reichen ca. 7 cm Spritzbeton mit leichter Bewehrung zur Stabilisierung aus. Bei ungünstigen geologischen Spannungszuständen, wie bei der Wasserhaltung auf der 1.000 m-Sohle in der Schachanlage Konrad kann ein doppelschaliger Stahlbetonausbau erforderlich sein. Die durchzuführenden Stabilisierungsmaßnahmen sind im allgemeinen formations- und teufenabhängig. Das Bohren in Ton ist mit über Tage eingesetzter Technik nach entsprechenden Anpassungen auch unter Tage möglich. Für die Einlagerung von Endlagergebinden in Bohrlöchern ist im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz eine Bohrlochverrohrung erforderlich.

7.2 Endlagerbehälterkonzepte

Bezüglich der Langzeitsicherheit bestehen Unterschiede bei der Endlagerung in Salz und Ton:

- Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Konzeptführend ist hier die Barrierefunktion der (natürlichen) geologischen Barriere und des Schachtverschlusses.
- Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen Barrieren konzeptführend.

Für das Wirtsgestein Ton muss dem gemäß im Unterschied zum Wirtsgestein Salz der Endlagerbehälter für einen sehr langen Zeitraum intakt bleiben, d. h. die Behälter müssen für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmedium sowie dem Gebirgsdruck standhalten.

Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Bentonits, dessen Quellfähigkeit bei Temperaturen $> 100\text{ °C}$ stark eingeschränkt wird, ist es erforderlich, im Wirtsgestein Ton in der Regel die Belademenge der Endlagergebände zu verringern.

Als weiterer Effekt ist die mögliche Korrosion der Behälter durch auf der Oberfläche abgelagertem Salz aus dem Siedeeffekt von über 100 °C aufgeheizten Formationswässern zu nennen.

Hinsichtlich Materialauswahl und Konstruktion der Endlagerbehälter im Wirtsgestein Ton ergeben sich daraus folgende Aussagen:

- Aufgrund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters bzw. der BSK mit gezogenen Brennstäben von ausgedienten Brennelementen erfolgen.
- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz korrosionsfester Stähle bzw. durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierter Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der dadurch mögliche Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkokillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Daraus kann gefolgert werden, dass die in Deutschland konzipierten Endlagergebände für Salz grundsätzlich auch in Ton einsetzbar sind.

7.3 Erforderliche Endlagerflächen

Zurzeit sind die Abstände der Einlagerungsfelder untereinander nicht bestimmbar und es liegen keine konkreten Daten zur Geologie vor. Deshalb werden die erforderlichen Einlagerungszellen für die Endlagerung in den Wirtsgesteinen Salz und Ton als Basis für eine theoretische Mindestflächenbetragsermittlung genommen und miteinander verglichen. Unberücksichtigt bleiben dabei Flächen für Infrastrukturbereiche und sonstige für den Endlagerbetrieb notwendige bergbauliche Flächen.

Im Wirtsgestein Salz sind unter Zugrundelegung des Mengengerüsts 2002 (vgl. Kapitel 6.2) von ca. 1 657 POLLUX-10 entsprechend ca. 2 082 POLLUX-8 mit einer Referenzzwischenlagerzeit von 30 Jahren und einer Einheitszelle von 237 m² eine Endlagerfläche von ca. 0,5 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen mit 15 Jahren Zwischenlagerzeit und einer Einheitszelle von 2 217 m² bei 2156 Kokillen/Bohrloch und insgesamt 4778 HAW-Kokillen eine Endlagerfläche von ca. 0,051 Mio. m². Der gesamte Endlagerflächenbedarf für das Endlagerkonzept Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen liegt somit bei ca. 0,55 Mio. m².

Im Wirtsgestein Ton sind nach der erforderlichen Umrechnung von 1 657 POLLUX-10 in 5 524 POLLUX-3-Gebinde mit einer Zwischenlagerzeit von 31 Jahren und einer Einheitszelle von 764 m² eine Endlagerfläche von ca. 4,22 Mio. m² erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen mit 40 Jahren Zwischenlagerzeit und einer Einheitszelle von 780 m² bei 7 Kokillen/Bohrloch und insgesamt 4 778 HAW-Kokillen eine Endlagerfläche 0,533 Mio. m². Beim Vergleich des Flächenbedarfs für die HAW-Kokillen sind die unterschiedlich langen Zwischenlagerzeiten zu berücksichtigen. Der gesamte Endlagerflächenbedarf für das Konzept Streckenlagerung von POLLUX-Behältern und Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen in Ton liegt somit bei ca. 4,75 Mio. m². In Abbildung 7-1 ist die Gesamtfläche für ein Endlager im Ton dargestellt. In ersten Ansätzen werden dabei auch die bergbaulichen Erfordernisse berücksichtigt, wobei die Größe des Infrastrukturbereichs noch nicht festgelegt wurde.

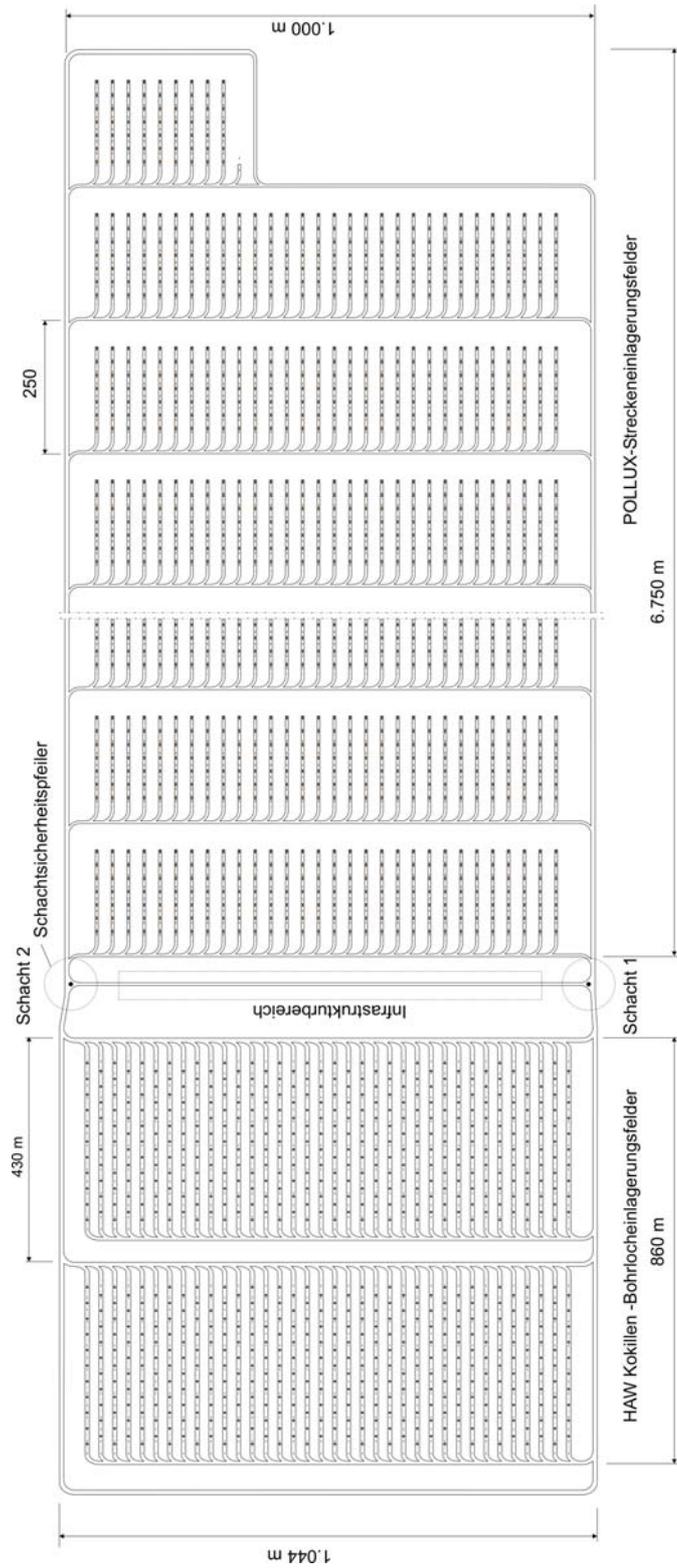


Abbildung 7-1: Endlager in Ton – POLLUX-3 Streckeneinlagerung und HAW-Kokillen Bohrlochlagerung

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern wurde die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen untersucht. Im Wirtsgestein Salz sind unter Zugrundelegung des o. g. Mengengerüsts ca. 5 524 BSK 3 mit einer Referenzzwischenlagerzeit von 10 Jahren bei 54 BSK 3/Bohrloch und einer Einheitszelle von 2 235 m² eine Endlagerfläche von 0,23 Mio. m² erforderlich. Im Wirtsgestein Ton sind nach der notwendigen Umrechnung von 5 524 BSK 3 in 8 286 BSK 2 mit einer Zwischenlagerzeit von 32 Jahren und einer Einheitszelle von 2 165 m² bei 4 BSK 3/Bohrloch eine Endlagerfläche von 4,49 Mio. m² erforderlich.

Auch hier ist kein direkter Konzeptvergleich möglich, da im Ton die BSK-Kokillen erst nach einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren gegenüber 10 Jahren im Salzkonzept vom Endlager angenommen werden können.

In Abbildung 7-2 ist die Gesamtfläche für ein Endlager im Ton für HAW-Kokillen und BSK 2-Kokillen dargestellt. In ersten Ansätzen sind die bergbaulichen Erfordernisse berücksichtigt, wobei auch dort die Größe des Infrastrukturbereichs noch nicht festgelegt wurde.

Tabelle 7-1 fasst die Ergebnisse zum Endlagerauslegungsvergleich Salz-Ton zusammen. Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur von 100 °C und den geringeren möglichen Bohrlochtiefen ist ein deutlich höherer Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton gegeben.

Endlager- konzept	Streckenlagerung		Bohrlochlagerung		
	POLLUX-8	POLLUX-3	HAW- Kokillen	BSK 3	BSK 2
Wirtsgestein					
Salz					
• Endlagerfläche[Mio. m ²]	0,5	-	0,051	0,23	-
• Zwischenlagerzeit [a]	30	-	15	10	-
Ton					
• Endlagerflächen [Mio. m ²]	-	4,22	0,533	-	4,49
• Zwischenlagerzeit [a]	-	31	40	-	32

Tabelle 7-1: Wirtsgesteins- und konzeptabhängig erforderliche Endlagerflächen

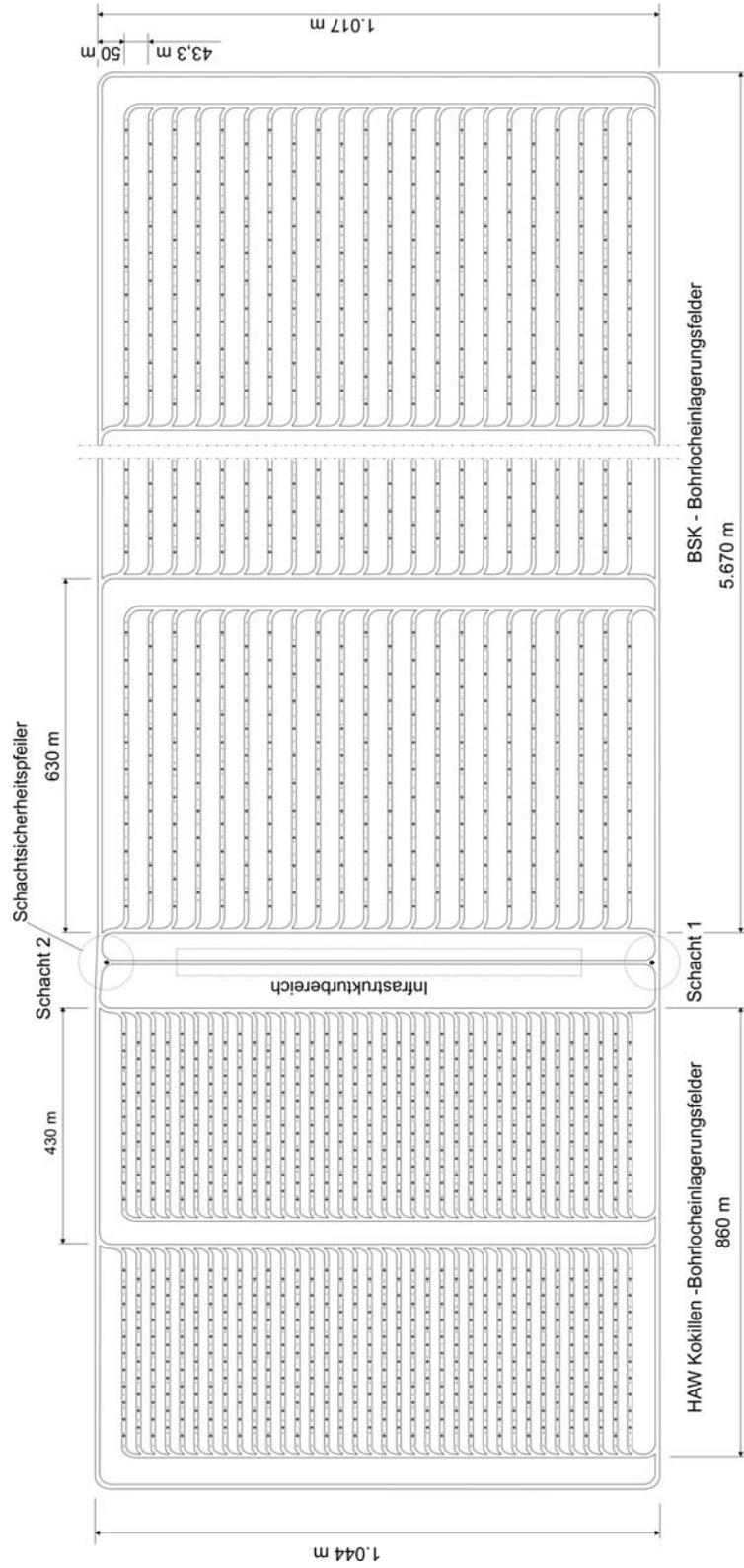


Abbildung 7-2: Endlager in Ton – HAW-Kokillen und BSK-2-Bohrlochlagerung

7.4 Verfüll- und Verschlusskonzept

Ein Vergleich der Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in Salz und Ton zeigt, dass die wesentlichen Unterschiede in dem Material bestehen, das zur Verfüllung der Strecken und Kammern genutzt wird. Während beim Endlager in Salz das bei der Auf-fahrung der Strecken anfallende Salzgrus genommen wird, müssen beim Endlager in Ton die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt und ins Endlager transportiert werden. Die Einbringtechnologie in Strecken und Kam-mern dafür unterscheidet sich ebenfalls wesentlich. Salzgrus wird mit entsprechender Fördertechnik (Blas- oder Schleuderversatz) ohne zusätzliche Verdichtungsmaßnah-men eingebracht. Bentonit und Bentonit/Sand – Gemische müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert in die Strecken und Kammern respektive Bohrlöchern eingebaut werden.

Hinsichtlich der Schachtverfüllung und -verschlüsse sind die Unterschiede deutlich geringer. In beiden Fällen werden setzungsarme Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschot-ter eingebracht, auf die der Schachtverschluss in ähnlicher Auslegung (Widerlager und Dichtelemente) an entsprechender Stelle im oberen Bereich der Wirtsgesteinsformati-on eingebaut wird.

7.5 Kosten

Ein Kostenvergleich zwischen den Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz und Ton ist aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes beider Konzepte nur relativ mög-lich. Verglichen werden können die aus den Wirtsgesteineigenschaften und Einlage-rungskonzepten entstehenden zusätzlichen Kostenfaktoren.

– Tagesanlagen

Für ein Endlager in Ton ist zusätzlich zu den Tagesanlagen, wie sie für ein Endla-ger im Salz konzipiert wurden, für das Verfüllmaterial Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemische ein eigener Logistikstrang zu installieren. Dieser umfasst auch die Her-stellung und Lagerhaltung von Bentonitformsteinen für die Streckenlagerung und die Vorbereitung von Endlagergebinden mit Bentonit Umhüllungen.

– Schachtförderung und Streckentransport

Für die Schachtförderung und den Streckentransport sind größere Kostenunter-schiede zwischen beiden Wirtsgesteinen bei der einzusetzenden Maschinenteknik zurzeit nicht erkennbar.

– Endlagererrichtung

Der Errichtungs- und Erhaltungsaufwand des Grubengebäudes im Wirtsgestein Ton liegt deutlich über dem im Wirtsgestein Salz. Die Gründe hierfür sind einerseits in den erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für den Ton und andererseits in der 8 - 9fachen Größe des Grubengebäudes zu sehen. Im Ton ist der Schacht bis in den Schachtsumpf auszubauen. Hierauf kann im Salz verzichtet werden. Dort reicht der Schachtausbau von der Geländeoberfläche bis in den Top des Salzstockes. Ein weiterer Kostenfaktor ist in dem erforderlichen qualitätsgesicherten Einbringen des vergleichsweise teuren Verfüllmaterials Bentonit zu sehen.

8 Sicherheit in der Betriebsphase

Im Anlagenband 3 „Sicherheit in der Betriebsphase“ /8-1/ werden Betrachtungen thematisch für den betrieblichen Strahlenschutz, hinsichtlich der Kritikalität beim Endlagerkonzept im Ton und für Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase durchgeführt. Als eine erste Grundlage für die Einlagerungstechnologie wird im Rahmen des Strahlenschutzes weiterhin eine Abschirmrechnung für eine mit Bentonit ummantelte HAW-Kokille durchgeführt.

8.1 Betrieblicher Strahlenschutz

In den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /8-2/ sind Grundsätze formuliert, die unabhängig davon gelten, in welcher geologischen Formation die radioaktiven Stoffe gelagert werden. Die für den Betrieb eines Endlagers geltenden Schutzziele werden durch das Atomgesetz (AtG) /8-3/ und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /8-4/ vorgegeben. Darüber hinaus sind alle übrigen einschlägigen Vorschriften zu beachten. Das wesentliche Schutzziel der Strahlenschutzgesetzgebung ist nach § 1 des Atomgesetzes:

- Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu schützen.

In § 6 StrlSchV sind die zum Erreichen des o. a. Schutzzieles dienenden Strahlenschutzgrundsätze formuliert, danach ist

- jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt zu vermeiden
- jede Strahlenexposition oder Kontamination von Personen oder der Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalles auch unterhalb der in dieser Verordnung festgelegten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.

Maßnahmen zur Verwirklichung oben genannter Schutzziele und Grundsätze sind in den bereits erwähnten "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" aufgeführt. Hierzu gehören unter anderem:

- die Standortauswahl zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit
- das Mehrbarrierenkonzept, bestehend aus Abfallform, Verpackung, Versatz, Endlagerformation, Deckgebirge/Nebengestein
- die Anwendung anerkannter Regeln der Technik bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers.

Weitere aus Sicht des Strahlenschutzes zu beachtende Vorschriften sind z. B.:

- die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) /8-5/
- Empfehlungen von Expertengruppen wie z. B. der Strahlenschutzkommission (SSK)
- Regeln, Normen, Beschlüsse
- wie z. B. die sicherheitstechnischen Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA), die Normen des Deutschen Institutes für Normung (DIN), die Bestimmungen der Berufsgenossenschaften und anderer Fachorganisationen und die Weisungsbeschlüsse der TÜV-Leitstellen bei der VdTÜV.

Neben diesen aus Strahlenschutzsicht zu beachtenden Vorschriften sind natürlich auch die bergrechtlichen und wasserrechtlichen und sonstige Bestimmungen anzuwenden. Die hier aufgeführten Schutzziele, Grundsätze und Vorschriften werden bereits bei der Planung berücksichtigt. Während des Betriebes wird die Einhaltung der Schutzziele und Grundsätze durch Maßnahmen des betrieblichen Strahlenschutzes sichergestellt. In der Nachbetriebsphase werden die Schutzziele durch die getroffene Standortauswahl und das angewandte Mehrbarrierenkonzept erreicht.

Im Rahmen des betrieblichen Strahlenschutzes werden folgende Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen durchgeführt, die im wesentlichen den Maßnahmen bei der Endlagerung im Salz entsprechen.

Hierzu zählen:

- Einteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche
- Gebindeeingangskontrolle des Strahlenschutzes
- Kontaminationsüberwachung
- Überwachung der Ortsdosis und Ortsdosisleistung
- Überwachung von Wetter und Raumluft
- Personenüberwachung
- Emissions- und Immissionsüberwachung

8.2 Gegenüberstellung des betrieblichen Strahlenschutzes für Endlagerung in Salz oder Tongestein

Im Folgenden werden die für Strahlenschutzmaßnahmen, die Strahlenexposition des Betriebspersonals und für Störfälle die Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede gegenübergestellt und in der Zusammenfassung bewertet.

8.2.1 Strahlenschutzmaßnahmen

Die Strahlenschutzmaßnahmen sind im wesentlichen die gleichen. Unterschiede resultieren lediglich daraus, welche Art von Abfällen behandelt werden, welche Endlagergebinde oder Transportbehälter zur Anwendung kommen und welche Endlagervariante vorgesehen ist.

Werden z. B. nur dichtumschlossene Endlagerbehälter verwendet, die hohe Dichtigkeitsanforderungen erfüllen, so dass aus ihnen im bestimmungsgemäßen Betrieb keine radioaktive Stoffe freigesetzt werden können und im Störfall die Störfallplanungswerte eingehalten werden, dann braucht z. B. bei der Wetter- und Raumluftüberwachung und bei der Kontaminationsüberwachung weniger Aufwand betrieben zu werden, zumal dann, wenn durch die Eingangskontrolle des Strahlenschutzes eine mögliche Oberflächenkontamination der Transportbehälter und Endlagergebinde erkannt und beseitigt wird.

Der Umfang der Strahlenschutzmaßnahmen richtet sich aber auch nach dem vorgesehenen Mengengerüst. Mengenunterschiede können sich z. B. auf die Personalplanung des Strahlenschutzes und auf den vorzuhaltenden Geräteumfang auswirken. Die hier geschilderten Unterschiede resultieren aber nicht aus der unterschiedlichen geologischen Formation, in der die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. In jedem Fall und unabhängig von der vorliegenden geologischen Formation sind alle in den Kapiteln 2.1 bis 2.7 des Anlagenbandes 3 aufgeführten Strahlenschutzmaßnahmen durchzuführen.

8.2.2 Strahlenexposition des Betriebspersonals

Die Strahlenexposition des Betriebspersonals hängt davon ab, wie die Betriebsabläufe gestaltet sind, welche Gebindemengen pro Jahr eingelagert werden und welche Abschirm- und Automatisierungsmaßnahmen bei den einzelnen Tätigkeiten vorgesehen sind.

So befinden sich im hier betrachteten Fall z. B. die Kokillen bis zum Erreichen der Umladezelle im Typ B(U) Transportbehälter und nach der Umladezelle bis zur Einlagerung im innerbetrieblichen Transferbehälter. Beide Behälter sind so ausgelegt, dass die Direktstrahlung außerhalb der Behälter bestimmte Werte, z. B. die in der Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn festgelegten Grenzwerte, unterschreitet. Zu Zeitpunkten, in denen sich die Endlagergebinde nicht in den Transportbehältern befinden, sind andere Maßnahmen vorgesehen. So geschehen die Umladevorgänge vom Typ B(U) Transportbehälter in den internen Transferbehälter fernbedient in der Umladezelle, wobei die Abschirmwirkung der Umladezellenwandung vom Wandmaterial und von der Wanddicke abhängt. Hier wurde angenommen, dass die Wandung so ausgelegt wurde, dass außerhalb der Umladezelle die Ortsdosisleistung kleiner als 5 $\mu\text{Sv/h}$ ist. Auch

der Einlagerungsvorgang selbst läuft fernbedient ab und der Transferbehälter wird im Kopfbereich durch eine Abschirmhaube zusätzlich abgeschirmt.

Die Strahlenexposition des Betriebspersonals hängt demnach nicht davon ab, in welcher geologischen Formation die radioaktiven Abfälle eingelagert werden, sondern vielmehr davon, welche Betriebsabläufe notwendig sind (wie werden die Abfälle angeliefert, z. B. bereits endlagergerecht im Endlagerbehälter oder müssen sie noch umgeladen werden oder müssen sogar noch Konditionierungsarbeiten durchgeführt werden), wie viele Endlagerbehälter pro Jahr gehandhabt werden und welchen Aufwand man an Abschirmmaßnahmen, an Automatisierungsmaßnahmen und an Maßnahmen im Hinblick auf Fernbedienung treibt.

Die Strahlenexposition des Betriebspersonals hängt aber auch von der Art des Endlagergebundes insofern ab, ob eine Freisetzung von Radionukliden während des bestimmungsgemäßen Betriebes möglich ist oder nicht, d. h. ob zusätzlich zur Strahlenexposition durch Direktstrahlung eine Strahlenexposition durch Inhalation möglich ist. Für ein Endlager im Tongestein ist die dosiserhöhende Rückstreuung der Neutronen am Ton bzw. am Beton noch zu ermitteln.

Für die Handhabung einer mit 30 cm Bentonit ummantelten HAW-Kokille zeigte sich, dass eine Abschirmung von überschlägig ca. 18 cm Eisen ausreichend ist.

8.2.3 Störfälle

Auch die Störfallauswirkungen hängen nicht davon ab, in welcher geologischen Formation die radioaktiven Abfälle eingelagert werden, sondern eher davon, welches Endlagergebäude bzw. Endlagerkonzept (HAW-Kokille, POLLUX-Behälter oder Brennstabkokille, Streckenlagerung oder Bohrlochlagerung) angewandt wird. Der Unterschied bei der hier zu betrachtenden "Bohrlocheinlagerung" im Tongestein zur Bohrlocheinlagerung im Salz besteht darin, dass bei SEK die Bohrlöcher über 300 m tief sind, was eine entsprechende Absturzhöhe bedingt. Die Absturzhöhe bei der hier vorgesehenen Einlagerung beträgt ca. 50 m, wobei das Endlagergebäude auf eine Schicht Bentonit fällt. Es wird davon ausgegangen, dass das Endlagergebäude vergleichbare Eigenschaften hat wie die HAW-Kokille bei SEK, die bei einem Sturz aus bis zu 13,5 m Höhe ihre Dichtigkeit beibehält. Ein weiterer Unterschied zur Bohrlocheinlagerung bei SEK besteht hier, dass nur dichtverschweißte Endlagerbehälter zugrundegelegt werden, die Einlagerung von MAW-Fässern (z. B. Cogema-Fässer) z. B. nicht betrachtet werden soll. Auch werden hier keine Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung betrachtet.

8.2.4 Zusammenfassung

Aus Sicht des betrieblichen Strahlenschutzes sind die radiologischen Auswirkungen auf die Umgebung im bestimmungsgemäßen Betrieb und im Störfall für ein Endlager in Salz und in Tongestein vergleichbar bis auf die noch unbekannte Neutronenrückstreuung in Tongestein und weisen keine relevanten Unterschiede auf.

Die durchzuführenden Strahlenschutzmaßnahmen sind die gleichen, Unterschiede im Detail resultieren nicht aus der geologischen Formation, in der eingelagert werden soll, sondern aus der Art der Abfälle, dem Mengengerüst und aus der vorgesehenen Endlagerkonzept.

Auch die Strahlenexposition des Betriebspersonals ist unabhängig von der geologischen Formation in der eingelagert werden soll. Sie resultiert daraus, wie die Betriebsabläufe gestaltet werden, welche Abfälle und welches Mengengerüst zu betrachten sind und welchen Aufwand an Abschirmmaßnahmen, an Maßnahmen der Automation und Fernbedienung man treibt.

Die Störfallauswirkungen hängen ebenfalls nicht von der geologischen Formation, in der eingelagert werden soll, ab, sondern von den geplanten Betriebsabläufen, den zu betrachtenden Endlagerbehältern und der zur Anwendung kommenden Endlagerkonzept (z. B. Bohrlochlagerung, Streckenlagerung usw.). Es ist aber standortspezifisch in Tongestein zu überprüfen, inwieweit es durch Grubenwässer zu einer Kontaminationsverschleppung kommen kann.

Grundsätzlich ist nach Führung aller Nachweise davon auszugehen, dass bei allen Ereignissen entweder das Ereignis selbst aufgrund der Auslegungsmaßnahmen an der Anlage oder an den Behältern und Endlagergebänden oder aufgrund sonstiger technischer oder administrativer Maßnahmen vermieden werden kann, oder dass eine durch das Ereignis verursachte Freisetzung radioaktiver Stoffe vermieden werden kann.

Dies liegt im wesentlichen daran, dass das Endlagergebäude selbst gasdicht verschweißt ausgelegt ist. Hinzu kommt, dass der außerbetriebliche Transportbehälter (Typ B(U) Transportbehälter) und der innerbetriebliche Transferbehälter so auszulegen sind, dass bei allen in der Anlage möglichen thermischen und mechanischen Lastfällen eine Freisetzung verhindert wird.

8.3 Kritikalitätsbetrachtung für die Betriebsphase eines Endlagers in Ton

Im Rahmen einer generischen Kritikalitätsanalyse zur Betriebsphase eines Endlagers für bestrahlte Kernbrennstoffe in einer Tonformation wird als relevantes Störfallszenario der Absturz einer Brennstabkokille BSK-2 in ein 50 m tiefes Bohrloch untersucht. Als Folge des Aufpralls am Grund des Bohrloches versagt der Behältermantel, wobei ein Teil der Brennstäbe oder alle Brennstäbe aus dem Behälter freigesetzt werden. Ein Hüllrohrversagen der Brennstäbe selbst wird nicht angenommen.

In der Untersuchung wird für verschiedene Anordnungen von Kokille und Brennstäben am Grund des Bohrlochs die Neutronenmultiplikation berechnet. Zusätzlich wird auch ein vom Absturz unabhängiges Überfluten der jeweiligen Anordnung mit Wasser sowie ein Verschütten mit Ton als abhängige Folge des Störfalls betrachtet. Es wird exemplarisch von UO₂-DWR-Brennstäben mit 4 % Anfangsanreicherung und 20 GWd/tSm mittlerem Abbrand ausgegangen. Als Wirtsgestein wurde Opalinuston angenommen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Eine ungeflutete Anordnung würde immer unterkritisch bleiben. Um Kritikalität zu erreichen, muss ein Überfluten der Brennstabanordnung mit Wasser oder einem gleichwertigen Moderator unterstellt werden. Wird der Stahlmantel der Kokille nicht berücksichtigt, sind geflutete hypothetische Verteilungen der Brennstäbe im Bohrloch denkbar, die zu überkritischen Multiplikationsfaktoren führen. Die wesentliche Randbedingung hierfür ist, abgesehen von der Flutung mit Wasser, die Anordnung dieser Brennstäbe in ihrem reaktivsten mittleren Brennstababstand.

Bei Berücksichtigung des Kokillenmantels als konzentrisch in der Bohrlochmitte positioniertes Rohr als Modell für die wahrscheinlichste Anordnung nach dem Absturz bleibt das System immer unterkritisch. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass sich in diesem Fall nicht hinreichend viele Brennstäbe im reaktivsten mittleren Brennstababstand anordnen können.

Wird dagegen hypothetisch der leere Behälter getrennt von den Brennstäben angeordnet, führt dies zu annähernd gleichen Multiplikationsfaktoren wie ohne Berücksichtigung des Behälters und ermöglicht rechnerisch kritische Anordnungen.

Fällt als Folge des Störfalls Ton in das Bohrloch und füllt die freien Zwischenräume aus, steigt der Multiplikationsfaktor zwar an, bleibt aber im unterkritischen Bereich, da der Ton im Vergleich zu Wasser schlecht moderiert. Selbst bei wassergesättigtem Ton bleibt die Anordnung unterkritisch.

Die Ergebnisse enthalten hohe Konservativitäten aufgrund der zusätzlich unterstellten Wasserflutung, was als zweiter unterstellter, vom Absturz unabhängiger Störfall über die Anforderungen des Störfallprinzips der Kritikalitätssicherheit hinausgeht, sowie we-

gen des zur Vereinfachung angenommenen regulären Brennstabgitters bei reaktivstem mittlerem Abstand der Brennstäbe und schließlich des relativ niedrigen mittleren Abbrandes. Geht man von einer ungefluteten gleichmäßigen Verteilung der Brennstäbe über den gesamten Bohrlochquerschnitt aus, so ist die Anordnung weit unterkritisch.

8.4 Vergleich der Safeguards-Konzepte für Endlager in Salz und Tongestein

Bei einem Vergleich der Safeguards-Konzepte für Endlager in Salz und Tongestein fällt auf, dass bei angenommenem ähnlichen Gesteinsverhalten auch Art und Funktion der Safeguards-Maßnahmen sich ähneln. Unterschiede resultieren im Wesentlichen aus den Materialien und Verfahren für die Herstellung der geotechnischen Barrieren im Nahbereich der eingelagerten Endlagerbehälter. Während beim Endlager in Salz der selbstabschirmende POLLUX-Behälter in der Einlagerungsstrecke mit Salzgrus umgeben wird, kommt beim Endlager in Tongestein Bentonit sowohl in kompaktierter Form in direkter Umgebung der Endlagerbehälter als auch in loser Schüttung oder pelletierter Form in den Bohrungen und Strecken zum Einsatz. Damit zusammen hängt auch die im Falle der Brennstabkockille BSK 2 zu berücksichtigende Konditionierung des Endlagergebindes. Der Prozess der „Verpackung“ der Brennstabkockille in einen Bentonitmantel und in ein Tragegestell erfordert zusätzliche Kontrollmaßnahmen bei der Konditionierung. Eine Identifikation der Brennstabkockille ist nach der Verpackung in Bentonit direkt nicht mehr möglich. Dies kann nur mittelbar über eine der „Verpackung“ zugeordnete Kennung am Tragegestell erfolgen. Insofern ist dort ein zusätzlicher Abzweigpfad denkbar, der zusätzliche Überwachungsmaßnahmen und Kontrollen erfordert.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied resultiert aus der Notwendigkeit, dass ein Transferbehälter zum Transport des Endlagergebindes BSK 2 (Brennstabkockille mit Bentonit ummantelt in einem Traggestell) erforderlich wird. Das Be- und Entladen eines solchen Transferbehälters in der Konditionierungsanlage respektive in der Umladestation des Endlagers erfordert zusätzliche Überwachungsmaßnahmen, weil dabei Abzweigungs-Szenarien denkbar sind.

In beiden Endlagerkonzepten ist eine planmäßige Rückholung eingelagerter Endlagergebäude nicht vorgesehen. Falls zu irgend einem Zeitpunkt dennoch überlegt werden sollte, Maßnahmen zur Rückholung einzusetzen, sind Unterschiede aufgrund der Wirtsgesteinseigenschaften festzustellen. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt eine solche Rückholung gedacht ist, erhöht sich dabei unter anderem auch der Aufwand für Kühlungsmaßnahmen während der bergmännischen Wiederauffahrung des verfüllten Grubengebäudes. Der Zeitpunkt, an dem ein Zugang zu den Endlagergebänden möglich ist, wird durch die max. Belastung des Versatzmaterials Bentonits mit 100 °C und

für Salz und Salzgrus mit 200 °C bestimmt. Das bedeutet, dass endgelagerte Behälter aus einem Endlager in Ton früher zurückgeholt werden könnten.

Wie bereits eingangs erwähnt ist der Planungsstand für ein Endlager in Tongestein im Vergleich zu dem in Salz noch deutlich zu vertiefen, bevor belastbare Aussagen zu den Einlagerungstechnologien und den detaillierten Betriebsabläufen gemacht werden können. Insbesondere fehlen vollständige Angaben zu den geologischen Standortgegebenheiten, so dass ein Vergleich mit einem Konzept, das sich auf Erkundungsergebnisse zu einem Standort stützt, nur schwer möglich ist. In /8-6/ wird festgestellt: „Solange kein exakter Standort und auch nicht das endgültige Wirtsgestein sowie das zur Anwendung gelangende standortspezifische Endlagerkonzept (z. B. Rückholbarkeit/Nichtrückholbarkeit, Streckenlagerung/Bohrlochlagerung, Anzahl der Einlagerungssohlen und Schächte/Rampen) bekannt ist, kann aufgrund der nicht bekannten Betriebskonzepte und geologischen Standortgegebenheiten kein Safeguards-Konzept - Vorschlag unterbreitet werden“. Mit den im GEIST-Vorhaben entwickelten und geplanten Ansätzen wird erstmals versucht, eine Auslegung und ein technisches Betriebskonzept für ein Endlager in Tongestein aufzustellen. Ein belastbarer Vergleich von Endlagerkonzepten ist unter diesen Voraussetzungen nur eingeschränkt durchführbar.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die IAEO und EURATOM es für sinnvoll halten, wenn ihre Experten bereits zu Beginn der Endlagerplanungen für einen ausgewählten Standort mit einbezogen werden. Damit könnte von Beginn an auf Safeguardsrelevante Zusammenhänge hingewiesen werden. Aber es ist auch zu beachten, dass die Safeguards-Behörden IAEO und EURATOM die für jedes einzelne Endlager jeweils anzuwendenden Safeguards-Maßnahmen - wie für alle anderen neuen kerntechnischen Anlagen auch - erst kurz vor, während oder häufig erst nach Einlagerungs-/Betriebsbeginn endgültig festlegen. Da es derzeit keinen ausgewählten Standort für ein Endlager in Ton gibt, ist eine Diskussion über Vor- und Nachteile bestimmter Safeguards-Maßnahmen nicht zielführend. Es kann wie in Anlagenband 3 geschrieben nur ein qualitativer Vergleich erfolgen, der sich an standortunabhängigen Merkmalen belegen lässt.

Es kann zusammenfassend festgehalten werden, dass aufgrund der ähnlichen Verformungsverhalten der Wirtsgesteine Ton und Salz das bereits vorliegende deutsche Safeguards-Konzept für ein Endlager in Salz auch auf Tonformationen übertragbar ist. Die weitere Betrachtung der Endlagergebäude und der Betriebsabläufe hat gezeigt, dass die zusätzliche Verpackung der Brennstabkockille mit einem Bentonitmantel eine eindeutige Identifikation der BSK erschwert. Damit ist die lückenlose Verfolgung dieses Endlagergebäudes durch die Anlagen- und Gebäudeteile des Endlagers nur indirekt über eine Kennung am Traggestell für BSK 2 und Bentonitmantel möglich.

Im Zuge weiterführender Studien wäre zu analysieren, ob es Methoden und Verfahren gibt, mit denen durch den Bentonit hindurch Endlagerbehälter (hier: BSK 2) eindeutig

identifiziert werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch eine tiefer gehende Endlagerplanung, mit der die bisher gewählten Behälterkonzepte und die Einbettung dieser Behälter in vorkompaktierten Bentonit bestätigt würden.

Zudem könnte im Rahmen von Studien der mögliche Einsatz von seismischen Überwachungsverfahren, von Luftbildaufnahmen, von Satelliten - gestützter Überwachung und Georadar für die Überwachung eines verfüllten und geschlossenen Endlagers untersucht werden.

9 Sicherheit in der Nachbetriebsphase

Im Anlagenband 4 „Sicherheit in der Nachbetriebsphase“ werden Betrachtungen thematisch zur Langzeitsicherheit, hinsichtlich der Kritikalität beim Endlagerkonzept im Ton und Salz und für Safeguardsmaßnahmen durchgeführt. Im Anlagenband 6 werden weiterhin Betrachtungen zur Geochemie durchgeführt.

9.1 Langzeitsicherheit

9.1.1 Standortunabhängige Schutzziele

Unter standortunabhängigen Schutzzielen werden die Schutzziele behandelt, die unabhängig von einem konkreten Standort und dem für das Endlagersystem gewählten Wirtsgestein nach Schließung des Endlagers weiter betrachtet werden müssen. Häufig wird als standortunabhängiges Schutzziel ausschließlich das radiologische Schutzziel betrachtet. Diese Betrachtung ist unvollständig. So sind z. B. im Falle des Verschlusses des ERAM folgende Schutzziele zu betrachten /9-1/.

- Schutz der Biosphäre vor den radiologischen Beeinträchtigungen aus dem Endlager
- Schutz des Grundwassers vor konventionellen Beeinträchtigungen aus dem Endlager
- Schutz der Tagesoberfläche vor Beeinträchtigungen in Folge des Endlagers (Senkungen, Hebungen)

Mit der Benennung des Schutzziels ist noch keine Aussage über den zu betrachtenden Nachweiszeitraum vorgenommen. Im Falle des radiologischen Schutzziels wurde bereits festgestellt, dass es unbegrenzt gelten soll. Der Nachweis der Einhaltung des Schutzzieles wird jedoch zeitlich begrenzt. Dementsprechend stellen die zu untersuchenden Nachweiszeiträume eine Randbedingung für den Langzeitsicherheitsnachweis dar. Eine vertiefende Darstellung findet sich in Anlagenband 4.

9.1.1.1 Nachweiszeiträume

Betrachtungen zu den Nachweiszeiträumen erfolgten bisher ausschließlich im Hinblick auf die Einhaltung des radiologischen Schutzziels. Die zu untersuchenden Nachweiszeiträume werden ebenfalls als vom gewählten Standort und vom als Endlagermedium gewählten Wirtsgestein unabhängig angesehen. Sie sind jedoch abhängig vom Abfallinventar /9-2/, /9-3/. Aus diesem Grund erfolgt in dieser Betrachtung eine Beschränkung auf wärmeentwickelnde, hochradioaktive, langlebige Abfälle.

9.1.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Nachweiszeiträumen

Als Ergebnis der internationalen Diskussion ist festzuhalten, dass der Nachweiszeitraum für ein Endlager für HAW und BE auf 100.000 bis 1.000.000 Jahre beschränkt ist. Innerhalb dieses Zeitraums werden weitere Unterteilungen vorgenommen, für die unterschiedliche Sicherheitsnachweiskriterien bzw. Sicherheitsindikatoren zu Grunde gelegt werden. Insbesondere die Zeitspanne von bis zu 1.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers gilt als für die Öffentlichkeit von besonderem Interesse. Dieser Zeitraum ist identisch mit dem Zeitraum, der in der Endlagerentwicklung als thermische Phase bezeichnet wird. Die thermische Phase beinhaltet den Zeitraum des wesentlichen Zerfalls der Spaltprodukte und des Abklingens großer Wärmeleistungen. Eine weitere Phase umfasst den Zeitraum bis zum Auftreten extremer Klimawandel (Kaltzeit, Eiszeit). Diesem Zeitraum wird gemäß internationaler Diskussion ein Zeitbereich von 10.000 bis 100.000 Jahre zugeordnet. Er ist gekennzeichnet vom Erhalt des hydrogeologischen Systems.

9.1.2 Standortunabhängige Sicherheitskriterien für die Langzeitsicherheitsanalyse

9.1.2.1 Konventionelles Schutzziel Senkung/Hebung Tagesoberfläche

Im Falle des ERAM wird ein Grenzwert der Senkung von 1 m /9-4/ oder alternativ eine Schiefstellungsrate 1/300 /9-5/ pro Jahrhundert zur Genehmigung gestellt, um die Nutzung der Tagesoberfläche für zukünftige Generationen nicht zu beschränken. Da die Schiefstellungsrate degressiv abnimmt und immer unter dem Grenzwert liegt, wurde im Falle des ERAM dieser Nachweis zeitlich beschränkt auf 1.000 Jahre geführt /9-6/. Allgemein ist auf jeden Fall eine Beschränkung des maximalen Nachweiszeitraums auf den Zeitraum beständiger klimatischer Bedingungen sinnvoll, da die Tagesoberfläche in der Phase extremen Klimawandels derart massiv beeinflusst wird, dass der Einfluss aus dem Endlager vernachlässigt werden kann. Des Weiteren ist auch in einem Endlager für HAW und BE der thermische Einfluss soweit abgeklungen, dass das Maximum thermisch induzierter Hebungen überschritten ist.

9.1.2.2 Konventioneller Grundwasserschutz

Die für den Schutz des Grundwassers geltenden Regelungen sind unabhängig vom Standort des Endlagers oder von der Art des Wirtsgesteins. So sind in der Anlage der Grundwasserverordnung /9-7/ diejenigen Stofffamilien und Stoffgruppen in qualitativer Weise genannt (Listen I und II s. Anlagenband 4), die zu einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder zu einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften führen können.

Grundwasserrelevante Aspekte im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle sind am Beispiel des genehmigten Endlagers Konrad /9-8/ dargestellt. Es wird ausgeführt, dass eine mögliche Besorgnis hinsichtlich der Verunreinigung des Grundwassers zu überprüfen und zu bewerten ist. Dies setzt hinreichend detaillierte, quantitative Angaben voraus. Im ersten Schritt wurden die Inventare organischer und anorganischer nicht-radioaktiver Stoffe quantitativ bestimmt, die in den Listen I und II sowie in weiteren Regelwerke und Empfehlungen /9-9/, /9-10/, /9-11/, /9-12/ aufgeführt sind.

Die Ausbreitung der Schadstoffe über den Wasserpfad in das Grundwasser wurde mit Hilfe von Modellberechnungen unter konservativen Annahmen ermittelt und Prüfwerten bzw. Grenzkonzentrationen gegenübergestellt. Für nachfolgende, im Falle des Endlagers Konrad relevante Stoffe und Verbindungen sind die zu Grunde gelegten Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen für das oberflächennahe Grundwasser angegeben /9-8/, siehe Tabelle 9-1.

Stoff/Verbindung	Cyanid	Ag	As	B	Ba	Be	Mo	Se
Prüfwerte/Grenzkonzentrationen [g/l]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Stoff/Verbindung	Se	Sn	Te	Ti	Tl	U	V	Zn
Prüfwerte/Grenzkonzentrationen [g/l]	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 9-1: Stoffe/Verbindungen und zugehörige Prüfwerte/Grenzkonzentrationen [g/l]

Für den Schutz des Grundwassers sind nicht nur die aus den Abfallgebinden resultierenden, das Grundwasser beeinträchtigenden Stoffe von Bedeutung. So ist im Fall der Stilllegung des ERAM auch das Versatzmaterial Salzbeton zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden die Eluatwerte des Salzbetons bestimmt /9-6/.

Entsprechende Prüfwerte bzw. Grenzkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser sind auch im Falle eines Endlagers für HAW und BE einzuhalten. Welche im Detail maßgebend sind, ist in Abhängigkeit von den in das Endlager eingebrachten Stoffen festzulegen.

9.1.2.3 Radiologischer Schutz der Biosphäre

Im Allgemeinen sind durch nationales Regelwerk die (Mindest)anforderungen zur Gewährleistung des radiologischen Schutzes benannt. Diese Anforderungen, die in Deutschland durch die Strahlenschutzverordnung /9-13/ gegeben sind, werden auch für Endlager für radioaktive Abfälle in der Nachbetriebsphase angewandt. International wird von der ICRP empfohlen /9-14/ die ungestörte und die gestörte Entwicklung des Endlagers unterschiedlich an Hand von Dosis- bzw. Risikokriterien zu bewerten. In Deutschland werden derzeit ausschließlich Dosiskriterien angewandt, so gilt für die Individualdosis der Bevölkerung ein Dosisgrenzwert von 0,3 mSv/a in Verbindung mit dem Minimierungsgebot. Unterhalb der trivialen Dosis von 0,03 mSv/a entfällt auch das Minimierungsgebot. Die Einführung von ergänzenden Sicherheitskriterien wird zur Zeit diskutiert /9-15/, /9-16/.

Alle nationalen Regelwerke fordern jedoch, Analysen durchzuführen, die direkten Bezug nehmen auf die quantitativen Maßstäbe Dosis bzw. Risiko. Dies gilt mindestens bis zum Beginn des Zeitraums extremen Klimawandels.

Zu späteren Zeitpunkten ist die Anwendbarkeit von Dosis- bzw. Risikowerten in der Diskussion. Es besteht jedoch Konsens, dass im Falle ihrer Anwendung sie lediglich Sicherheitsindikatoren darstellen. Weitere Sicherheitsindikatoren werden international diskutiert /9-17/.

- Radiotoxizität außerhalb der Geosphäre [Sv]
- Zeitintegrierter Radiotoxizitätsfluss aus der Geosphäre [Sv]
- Radiotoxizitätskonzentration im Biosphärenwasser [Sv/m³]
- Radiotoxizitätsfluss aus der Geosphäre [Sv/a]
- Relative Aktivitätskonzentrationen im Biosphärenwasser [-]
- Relativer Aktivitätsfluss aus der Geosphäre [-]

Sie sind aufgrund fehlender Bewertungsmaßstäbe und -grundlagen nur sehr eingeschränkt anwendbar.

9.1.2.4 Zusammenfassung zu den standortunabhängigen Sicherheitskriterien

Die angegebenen Sicherheitskriterien und Sicherheitsindikatoren stellen die Bewertungsmaßstäbe für den Nachweis der Sicherheit bzgl. konventioneller und radiologischer Fragestellungen des Langzeitsicherheitsnachweises dar und sind damit wesentliche Randbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis. Sie müssen unabhängig vom gewählten Standort und Endlagermedium eingehalten werden.

9.1.3 Abfallinventar

Das Abfallinventar hängt vom Aufkommen radioaktiver Abfälle ab und gehört daher ebenfalls zu den standortunabhängigen und wirtsgesteinsunabhängigen Randbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis. Die Konditionierung und Verpackung der Abfälle ist jedoch nicht mehr vom gewählten Wirtsgestein unabhängig. Eine Verknüpfung besteht auch zum technischen Endlagerkonzept, das wiederum spezifisch für verschiedene Wirtsgesteine ist. Das Abfallinventar wird deshalb, obwohl im Grundsatz unabhängig vom gewählten Wirtsgestein, meistens im Zusammenhang mit dem Abfallgebilde behandelt und damit als eine wirtsgesteinsspezifische Einheit. Eine Abhängigkeit vom gewählten Standort ist noch nicht zwangsläufig gegeben. So können gleiche Abfallgebilde durchaus an verschiedenen Standorten mit vergleichbarem Wirtsgestein eingelagert werden.

Die Kenntnis des Abfallgebildes stellt eine Randbedingung für den Langzeitsicherheitsnachweis dar. Wie das Abfallgebilde in den Sicherheitsnachweis eingeht, hängt jedoch von den wirtsgesteinsspezifischen Randbedingungen ab und kann auch von den standortspezifischen Randbedingungen abhängen.

9.1.4 Methodische Vorgaben hinsichtlich potentieller Endlagerentwicklungen

International wird von der ICRP empfohlen /9-14/ die gestörte und die ungestörte Entwicklung des Endlagers unterschiedlich an Hand von Dosis- bzw. Risikokriterien zu bewerten. Dabei gilt, dass für Freisetzungen aus einem Endlager in Folge von „allmählichen“ (stetigen) Prozessen die erwartete Jahresdosis für Personen der kritischen Gruppe geringer sein soll als ein oberer Dosisrichtwert. Dieser Dosisrichtwert wird von den nationalen Behörden orientiert an den individuellen Grenzwerten festgelegt, welcher gegenwärtig einer mittleren jährlichen Dosis von 1 mSV bei länger anhaltender Exposition entspricht (Prinzip 5). Das Sicherheitsniveau eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle soll derart sein, dass das vom Endlager ausgehende, vorhergesagte Risiko eines Gesundheitsschadens in einem Jahr für eine Person der kritischen Gruppe in Folge von zerstörerischen (unstetigen) Prozessen, die nicht vom Prinzip 5 erfasst sind, geringer ist, als ein oberer Risikorichtwert, der von den nationalen Behörden orientiert an dem individuellen Risikogrenzwert für Gesundheitsschäden von Eins in Hunderttausend pro Jahr ($10^{-5}/a$) zugeteilt wird. (Prinzip 6).

Derzeit erfolgt für die ungestörte Entwicklung (Normalentwicklung, Referenzfall) des Endlagers der Sicherheitsnachweis auf Grundlage dosisbezogener Grenz- bzw. Richtwerte. Für die gestörte Endlagerentwicklung gelten in einigen Ländern risikobezogene Grenz- bzw. Richtwerte, in anderen erfolgt auch die Bewertung der

gestörten Entwicklung an Hand von Dosisgrenz- bzw. Richtwerten. Letzteres gilt auch in Deutschland /9-13/.

Aus den methodischen Vorgaben hinsichtlich der ungestörten und der gestörten Endlagerentwicklung ergibt sich die Fragestellung, welche FEP und daraus resultierende Szenarien der ungestörten Entwicklung und welche der gestörten Entwicklung eines Endlagers zuzuordnen sind bzw. welche gar nicht mehr zu betrachten sind, da ihr Eintreten hinreichend unwahrscheinlich ist, z.B. $\leq 10^{-8}/a$. Diese Zuordnung hängt wesentlich vom zu betrachtenden Nachweiszeitraum ab, da FEPs und sich daraus ergebende Szenarien, die im Nachweiszeitraum zu erwarten sind, im Rahmen der ungestörten Entwicklung zu behandeln sind.

Daraus ergibt sich, dass aus methodischen Gründen der zu betrachtende Nachweiszeitraum indirekt eine entscheidende Größe zur Definition der Randbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis darstellt.

9.1.5 Standortspezifische Grundlagen für den Langzeitsicherheitsnachweis

Im folgenden sind notwendige, standortspezifische Grundlagen angegeben, die unabhängig vom gewählten Wirtsgestein für den Langzeitsicherheitsnachweis bekannt sein müssen. Wie sie in den Langzeitsicherheitsnachweis eingehen und ob komplexe oder einfache Modelle ausreichend sind, wird an dieser Stelle noch nicht entschieden, da dies wiederum vom gewählten Wirtsgestein und vom technischen Endlagerkonzept abhängt sowie von der bereits angesprochenen Kopplung zwischen Endlagersystem und Grundwasserfluss. Im vorliegenden Fall des Vergleiches von Endlagerkonzepten im Salz und Ton ist der Begriff Wirtsgestein identisch mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich /9-18/.

Ein wesentlicher Unterschied der beiden Wirtsgesteine besteht darin, dass im Salz von einem trockenen Endlager und vom vollständigen dichten Einschluss der radioaktiven Abfälle ausgegangen wird, während im Ton immer von einem feuchten Endlager und einer Freisetzung von Radionukliden ausgegangen wird, wenn auch erst nach langen Zeiträumen des Radionuklidtransportes.

Zu den standortspezifischen Grundlagen zählen:

- das geologische Modell
- das hydrogeologische Modell
- das technische Endlagerkonzept und
- die Szenarienanalyse

Details sind dem Anlagenband 4 zu entnehmen.

9.1.6 Zusammenfassung zu den standortspezifischen Randbedingungen, dem technischen Endlagerkonzept und der Szenarienanalyse

Endlagerkonzepte in Salz und Ton weisen hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine vergleichbare Sicherheitstrategie auf. Die Endlagerkonzepte basieren im Unterschied z. B. zu Endlagerkonzepten im Granit auf einer langfristig einschlusswirksamen geologischen Barriere.

Hinsichtlich des Transportes von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sind Endlagerkonzepte im Salz und Ton methodisch in gleicher Weise zu behandeln. Sie werden an Hand von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung bewertet. Dominant für die Grundwasserbewegung sind dabei standortspezifische Unterschiede, die wirtsgesteinsspezifischen Unterschiede sind von geringerer Bedeutung.

Im Falle des Wirtsgesteins Salz findet zwangsläufig eine maßgebliche Verdünnung der radionuklidbelasteten Salzlösung statt, da diese bei Austritt aus dem Salzstock als gesättigte Salzlösung vorliegt. Gesättigte Salzlösungen werden von der Biosphäre unverdünnt nicht aufgenommen.

Bzgl. der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre ergeben sich keine Unterschiede für Endlagerkonzepte im Salz und Ton, da Biosphärenmodelle auf Grundlage der Nutzung von Wasser und Boden sowie Verzehrgewohnheiten regulativ festgelegt sind.

Die wesentlichen Unterschiede der Wirtsgesteine Salz und Ton beziehen sich auf das Nahfeld. Diesen unterschiedlichen Bedingungen wird durch entsprechend angepasste technische Endlagerkonzepte Rechnung getragen, so dass für beide Wirtsgesteine langfristig ein hinreichendes Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss diese Unterschiede abbilden, wobei der derzeitige wissenschaftlich/technische Kenntnisstand im Ton deutlich weniger weit fortgeschritten ist als im Salz.

9.2 Kritikalitätssicherheit

Die Frage bezüglich einer Kritikalität muss in allen Sicherheitsanalysen für geologische Endlager behandelt werden /9-19/, /9-20/, /9-21/, /9-22/. Während des Betriebs eines Endlagers kann das Auftreten einer Kritikalität durch Einhaltung der Endlagerungsbedingungen (z. B. Begrenzung der Kernbrennstoffmenge in den Behältern etc.) ausgeschlossen werden. Die Frage der Kritikalität im Zusammenhang mit langfristigen Vorgängen in einem Endlager mit angereichertem Uran wurde in der Literatur ausführlich untersucht. Für die Endlagerung von MOX und UO₂ Kernbrennstoffen im Wirtsgestein

Steinsalz wurden im Forschungszentrum Karlsruhe Arbeiten durchgeführt und die Ergebnisse publiziert /9-23/9-24/.

9.2.1 Methodik zur Bewertung der Kritikalitätssicherheit

Kritikalitätsrechnungen (k_{eff} bzw. k_{inf}) für die Nachbetriebsphase werden nicht durchgeführt, sondern ausgehend von publizierten Daten (z. B. Handbuch zur Kritikalität /9-23/9-24/9-25/) wurden die kritikalitätsrelevanten Größen festgestellt und ihre Veränderung im Salz- bzw. Ton-System bewertet (s. detailliert Anlagenband 4).

9.2.2 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Tabelle 9-2 und Tabelle 9-3 sind die durchgeführten Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein zusammengestellt. Es zeigte sich, dass für das vorgegebene Kernbrennstoffinventar auch unter Annahme von sehr unwahrscheinlichen Szenarien eine Kritikalität in beiden Wirtsgesteinen und für alle bisherigen Einlagerungskonzepte ausgeschlossen werden kann.

Völlig verschieden stellt sich die Situation dar, wenn abgebrannte Kernbrennstoffe mit höheren Konzentrationen an ^{235}U und ^{239}Pu betrachtet werden. Als Beispiel wurde ein Vergleich eines Brennstoffs der Zusammensetzung 3,0% ^{239}Pu , 0,8% ^{235}U , ^{238}U Rest auf der Basis der vereinfachenden Gleichungen (3.9) –(3.15) herangezogen. Deshalb sollen die Zahlen in der Tabelle 9-4 nur als relative Werte angesehen werden.

Konzept	Steinsalz		Tongestein	
	POLLUX Streckenlage- rung	BSK 3 Bohrloch (300 m)	POLLUX Streckenlagerung	BSK 2 Tiefe 50 m
Mechanische Veränderungen in den Endlagergebänden	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant siehe A4, Kap. 3.4.1	nicht relevant siehe A4, Kap. 3.4.1
Leckage von Behältern, Eindringen von Wasser bzw. Lauge	Voraussetzung für Kritikalität keine Kritikalität möglich, da hohe Cl-Konzentration	Voraussetzung für Kritikalität keine Kritikalität möglich, da hohe Cl-Konzentration	Voraussetzung für Kritikalität geringe Cl-Konzentration keine Kritikalität möglich, siehe A 4, Kap. 3.4.2	Voraussetzung für Kritikalität geringe Cl-Konzentration keine Kritikalität möglich, siehe A 4, Kap. 3.4.2
Korrosion und Auflösung der Behälterstruktur, Vermischen von Kernbrennstoff mit dem Wirtsgestein	Bildung von Cl-haltigen Korrosionsprodukten K_{inf} Berechnungen durchgeführt	Bildung von Cl-haltigen Korrosionsprodukten	Eisenphasen mit unterschiedlichem Wassergehalt, siehe A 4, Kap. 3.4.3	Eisenphasen mit unterschiedlichem Wassergehalt, siehe A 4, Kap. 3.4.3

Tabelle 9-2: Zusammenfassung der Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein (Teil 1)

Konzept	Steinsalz		Tongestein	
Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern durch Fließbewegung	<p>Advektive Transportprozesse als Funktion der Zeit</p> <p>Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern nicht vorstellbar</p>	<p>Diffusion und advektive Transportprozesse zu langsam</p> <p>Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern nicht vorstellbar</p>	<p>Diffusion und advektive Transportprozesse zu langsam siehe A 4, Kap. 3.4.5</p> <p>Sorption, Ausfällung/Redoxreaktionen und Phasenbildung siehe A 4, Kap. 3.4.6</p>	<p>Diffusion und advektive Transportprozesse zu langsam siehe A 4, Kap.3.4.5</p> <p>Sorption, Ausfällung/Redoxreaktionen und Phasenbildung siehe A 4, Kap. 3.4.6</p>
Auflösung, Migration und Ablagerung von Kernbrennstoff nach dem Beispiel einer geologischen Lagerstättenbildung	nicht relevant	nicht relevant	<p>Für Kernbrennstoffinventar nach A 4, 3.2.2 nicht relevant.</p> <p>Bei MOX durch Bildung von kristallwasserhaltigen Phasen</p>	Für Kernbrennstoffinventar nach A 4, 3.2.2 nicht relevant.
Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg sowie Anreicherung von Plutonium	Kein Prozess vorstellbar, der zur Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg führt. Isotopentrennung nicht möglich.	Kein Prozess vorstellbar, der zur Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg führt. Isotopentrennung nicht möglich.	<p>Kein Prozess vorstellbar, der zur Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg führt.</p> <p>Isotopentrennung nicht möglich.</p> <p>Günstige Moderationsverhältnisse für einige U(VI)- und Pu-Phasen</p>	<p>Kein Prozess vorstellbar, der zur Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischem Weg führt.</p> <p>Isotopentrennung nicht möglich.</p> <p>Günstige Moderationsverhältnisse für einige U(VI)- und Pu-Phasen</p>
Moderationseigenschaften	Neutronenabsorption durch Stahl und Cl	Neutronenabsorption durch Chlorid	Neutronenabsorption durch Stahlbehälter A 4, Tabelle 3-16	A 4, Tabelle 3-16 Ton entspricht Wasser
Einlagerung von MOX	keine Kritikalität möglich, da hohe Cl-Konzentration	keine Kritikalität möglich, da hohe Cl-Konzentration	Günstige Moderationsverhältnisse für einige U(VI)- und Pu-Phasen	

Tabelle 9-3: Zusammenfassung der Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein (Teil 2)

MOX-Konzentration g dm ⁻³	Wasser + MOX 3,0% ²³⁹ Pu, 0,8% ²³⁵ U, ²³⁸ U Rest		MX 80 + MOX 3,0% ²³⁹ Pu, 0,8% ²³⁵ U, ²³⁸ U Rest	
	V _{krit.} / dm ³	M _{krit.} / kg	V _{krit.} / dm ³	M _{krit.} / kg
115			-	-
120			1000	120
125			340	43
130			180	23
150			48	7,2
170			24	3,1
200	-	-	12	2,4
225	400	90		
230	140	32		
240	47	11		
250	25	6.3		
270	12	3.2		

Tabelle 9-4: Vergleich der kritischen Volumina und kritischen Massen für MOX im homogenen Wasser- bzw. Ton-System (MX 80)

Die Tabelle 9-4 zeigt, dass die Absorptions- und Moderationseigenschaften von Ton die Neutronenmoderationsbedingungen begünstigen. Allerdings sind für das Eintreten einer Kritikalität (unter Verwendung des vereinfachten Rechenverfahrens) MOX-Konzentrationen von mindestens 120 Gramm pro Liter erforderlich. Unterstellt man eine Konzentration von ca. 2 Gew. % Pyrit im Ton und unterstellt weiter, dass dieses Pyrit Uran und Plutonium aus dem MOX durch reduktive Ausfällung homogen in das Gestein einbaut, kann die maximale MOX-Konzentration ca. 103 g dm⁻³ betragen. Diese Konzentration liegt ca. 16 % unterhalb der Konzentration, bei welcher nach der Rechnung mit den einfachen Formeln eine Kritikalität nicht ausgeschlossen werden kann. Für Tongestein ist allerdings kein Mechanismus ersichtlich, wie der hierzu nötige Transportprozess ablaufen könnte. In Steinsalz-Systemen sind keine derartigen Kernbrennstoff-Akkumulationen möglich.

9.3 Safeguardsaspekte

Der für das Endlagerkonzept angenommene Tonstein verhält sich hinsichtlich seiner Verformungseigenschaften ähnlich wie Steinsalz. Damit zeigt auch dieses Wirtsgestein langfristig starkes Konvergenzverhalten. Nach einer sofortigen Verfüllung der Einlagerungshohlräume um oder über den Endlagergebänden in Strecken und Bohrlöchern, sorgt die natürliche Konvergenz dafür, dass das Versatzmaterial kompaktiert und die Gebinde eingeschlossen werden. Es wird davon ausgegangen, dass in einem Endlager in Tongestein wie im Salz ein vollständiger Einschluss der Endlagergebände möglich ist. Somit kann wie für ein Endlager im Salz die Überwachung in der Nachbetriebsphase auf eine Überwachung der Erdoberfläche über dem verfüllten und geschlossenen Endlager beschränkt werden. Dazu zählen Luftbildaufnahmen, Satellitenbilder oder örtliche Begehungen. Im Rahmen weiterführender Forschungen ist dabei zu untersuchen, ob neue geophysikalische Methoden zur Überwachung des Endlagers von über Tage weiterführende Ergebnisse liefern können. Durch Studien könnte dies analysiert werden und, falls diese zu positiven Ergebnissen führen, durch in-situ Versuche auf ihre Anwendungsfähigkeit überprüft werden.

Die nicht geplante aber denkbare Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter ist sowohl im Salz als auch im Ton aufgrund des genannten Konvergenzverhaltens des Gebirges sehr aufwändig und würde nicht unbemerkt erfolgen können. Dazu wäre nach Beendigung des Endlagerbetriebes die Wiederauffahrung des Grubengebäudes oder die Errichtung eines neuen Endlagerbergwerkes erforderlich.

9.4 Geochemie

Tonhaltige Sedimente enthalten neben den namensgebenden Tonmineralen beigemengte Mineralphasen, wie Quarz, Feldspat, Carbonate, Schwermminerale sowie organische Substanz, Porenlösung und im geringen Umfang Gase. Ihr Ursprung ist der Eintrag von Verwitterungsprodukten in Sedimentationsbecken, wobei marine und limnische Tone zu unterscheiden sind. Charakteristisch für Tonablagerungen ist die Dominanz feinkörniger bzw. feinkristalliner Mineralpartikel. So werden Tonminerale gewöhnlich als Silikatminerale im Korngrößenbereich $< 2 \mu\text{m}$ definiert.

Marine Evaporite entstehen bei der Evaporation von Meerwasserlösung und bestehen aus charakteristischen Abfolgen von Evaporitmineralen bzw. Gesteinen. Bei fortschreitender Wasserverdunstung aus der Meerwasserlösung kristallisieren die Evaporitminerale in der Reihenfolge zunehmender Löslichkeit. Die Abfolge (progressive Phase) besteht dann aus:

- Carbonatdominierten Sedimenten an der Basis, gefolgt von
- Calciumsulfat-Ablagerungen,
- Steinsalz und
- im Stadium hoher Meerwassereindunstung aus Kalium-Magnesium-Salzen (KMg-Salzen, „Kaliflöze“, z. B. Carnallit).

Wird die eingedunstete Meerwasserlösung durch den Nachfluss von Meerwasser verdünnt, so kristallisieren die Minerale in der Reihenfolge abnehmender Löslichkeit (rezessive Phase). Aus diesem Grund findet man in der Natur häufig, dass sich Steinsalz und Schichten von Anhydrit (CaSO_4) Kaliflöze überlagern. Die Ablagerungen der progressiven und rezessiven Phase bilden einen salinaren Zyklus.

9.4.1 Tonsedimente und Evaporite - Beschreibung ihres chemisch/ mineralogischen Stoffbestandes und charakteristischer Materialeigenschaften

Tonsedimente und Evaporite weisen bereits nach ihrer Definition deutliche stoffliche Unterschiede auf, die bei der Auffahrung eines Bergwerks, der Gebirgserkundung und bei der Konzeption eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle zu berücksichtigen sind. So sind Tonsedimente klastische Sedimente, die von Gemengen feinkristalliner Tone dominiert werden. Die geringe Korngröße beeinträchtigt die visuelle Ansprache des Mineralbestandes, darüber hinaus wird die Mineralidentifizierung und Charakterisierung in Folge der Substitutionsmöglichkeiten in der Kristallstruktur von Tonmineralen erschwert. Der Mineralbestand von Tonsedimenten ist von zahlreichen Faktoren abhängig, wie

- dem Mineralbestand des Detritus, der in das Sedimentationsbecken eingetragen wurde, d.h. von der lithologischen Situation im Umfeld des Sedimentationsbeckens,
- vom Chemismus der Porenlösung, die wiederum abhängig ist vom chemischen Stoffbestand der Lösung im Sedimentationsbecken sowie
- vom Diageneseegrad, der beeinflusst wird durch die Druck- und Temperaturbedingungen, die das Tonsediment im Verlauf der geologischen Entwicklung erfuhr.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge können aus der Tiefenlage und den geologischen Rahmenbedingungen nur eingeschränkt Aussagen zum Stoffbestand und zu den Eigenschaften von Tonsedimenten getroffen werden.

Im Vergleich zu Evaporiten weisen Tonsedimente eine geringere Wärmeleitfähigkeit, größere Permeabilität, Porosität und ein größeres Sorptionsvermögen für gelöste Ionen auf. Im Gegensatz zu den Evaporiten ist es daher im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse erforderlich neben dem Abdichtungseffekt Sorptionseffekte zu berücksichtigen. Problematisch ist, dass bisher keine ausreichende und abgesicherte Datenbasis zur

Verfügung steht, um die komplizierten Mineralreaktionen im Ton und deren Einfluss auf das Sorptionsvermögen geochemisch modellieren zu können.

Evaporite bestehen aus Assoziationen definierter Mineralphasen, die meist bereits visuell oder mittels einfacher Verfahren identifizierbar sind. Ihre Bildung erfolgt nach bekannten Gesetzmäßigkeiten, so dass sehr gut Prognosen zum Stoffbestand und zu den Eigenschaften der Evaporite getroffen werden können. Auch in den großen Homogenbereichen von Evaporitkörpern, wie dem Staßfurt-Steinsalz, das z. B. in den Kernzonen der Salzdiapire Norddeutschlands auftritt, ist aufgrund der gesetzmäßigen Verteilung von Spurenelementen eine eindeutige stratigraphische Einordnung von Evaporitlagen möglich.

Im Hinblick auf die Bewertung der Abdichtungswirkung von Evaporiten ist von Relevanz, dass die Lösungseinschlüsse der Evaporite anhand ihres chemischen Stoffbestandes auf einfachem Wege klassifiziert werden können. Lösungswegsamkeiten und der Einfluss von Metamorphoselösungen und/oder von Lösungen, die im Verlauf der geologischen Geschichte in den Evaporitkörper eindringen sind daher einfach zu erkennen und zu beschreiben. Zur geochemischen Modellierung von Reaktionen liegen ausreichend Befunde und die erforderlichen Daten zur Reaktion innerhalb von Evaporitsystemen zur Verfügung. Evaporitsysteme zeichnen sich durch relativ hohe Reaktionsgeschwindigkeiten aus, so dass ihr Verhalten auf der Basis von Gleichgewichtsbeziehungen herleitbar ist. In Tonformationen liegen chemisch/mineralogische Ungleichgewichte vor, so dass die Reaktionskinetik eine besondere Rolle spielt. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Modellierung zum Transport von Radionukliden oder zum Wärmetransport im Gebirge beim Wirtsgestein Ton aufgrund der Anisotropie zahlreicher Gesteinseigenschaften erschwert werden.

Das Auftreten von Lösungsreservoirien hat einen erheblichen Einfluss auf die Planung und Durchführung von Erkundungsarbeiten, die Ausführung bergmännischer Tätigkeiten und die Bewertung und den Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers. In Evaporiten sind die Lösungen nahezu ausschließlich an charakteristische Gesteinseinheiten gebunden, während in Tonformationen die Lösungen neben dem Porenraum des Tons vor allem in Silt-Sand-Einschaltungen auftreten, die nur sehr eingeschränkt stratigraphisch eingestuft werden können. Während die Lösungen im Ton niedrigsalinar und Mg-arm sind sowie einen pH-Wert um den Neutralpunkt aufweisen, sind die Gebirgslösungen von Evaporiten hochsalinar, Mg-reich und sauer. In beiden Fällen liegen negative Eh-Werte (reduzierende Bedingungen vor). Diese Charakteristika sind im Hinblick auf Korrosionserscheinungen von Baustoffen und Metallen, wie den Endlagergebänden, zu berücksichtigen.

Weitere vertiefende Informationen hinsichtlich Tone und Tongesteine, marine Evaporite sowie Druck- und Temperaturbedingungen im Endlagerbereich sind dem Anlagenband 6 zu entnehmen.

9.4.2 Betrachtung der Nachbetriebsphase eines Endlagerbergwerks im Ton

Die Nachbetriebsphase ist im Rahmen dieses Berichts die Zeitphase nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers, während

- in Folge Konvergenz der Druck im Endlagerbereich auf den ursprünglichen Teufendruck des Gebirges ansteigt,
- aufgrund des Eintrages von Mikroorganismen während der Betriebsphase eine mikrobielle Aktivität vorausgesetzt werden kann,
- die radioaktiven Zerfallsprozesse in den Abfallgebinden wirksam sind,
- die Temperatur im Endlagerbereich in Folge der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges und der eingesetzten Materialien, der radioaktiven Zerfallswärme und ggf. exothermer Reaktionen von Massenbaustoffen ansteigt,
- Stofftransporte (z. B. Lösungs-transport und/oder Diffusion) auftreten und
- der in das Endlager eingebrachte Luftsauerstoff vollständig verbraucht ist.

Die Teufe der Einlagerungssohle eines Endlagers soll im Ton etwa in einer Teufe von 500 m liegen und die minimale und maximale Teufe des Bergwerks soll ca. 300 bzw. 1.500 m entsprechen /9-18/. Der resultierende Druck ergibt sich zu ca. 6,2 MPa (300 m) bzw. 10,3 MPa (500 m) und 30,9 MPa (1.500 m).

In den Teufenbereichen von ca. 300 m, 500 m und 1.500 m kann für das Süddeutsche Molassebecken eine ursprüngliche Gebirgstemperatur zwischen 19 bis 22, 26 bis 34 °C und 61 bis 83 °C angenommen werden. Am Kontakt zwischen Barrierematerial (Bentonit) und Wirtsgestein sind bei wärmeerzeugenden radioaktiven Abfällen Temperaturen bis 95 °C zu erwarten /9-26/. Die hierdurch möglichen chemisch/mineralogischen Reaktionen werden im Folgenden erläutert.

Grundsätzlich können bezüglich der Fixierung oder Immobilisierung von Schadstoffen mehrere Wirkungsmechanismen der Barrieren unterschieden werden. Dies sind die hydraulische Abdichtung (hydraulische Barriere) sowie die Sorption und Bindung der Schadstoffe in chemischen Verbindungen (chemische Barriere). Betrachtet man die hydraulische Abdichtwirkung, so hat die Bildung von Gasen eine besondere Bedeutung, da das resultierende Druckgefälle einen Transport von Radionukliden bewirkt. Der Transport erfolgt dabei durch:

- Lösung der Gase in der Porenlösung mit anschließender Diffusion der gelösten Gase,
- Zweiphasenfluss von Gas und Wasser, sowie
- Gasfluss auf Wegsamkeiten, die ggf. durch hohen Gasdruck gebildet werden.

Prozesse, die im Ton zur Gasbildung führen, können vor allem die thermische und mikrobielle Zersetzung organischer Substanz sowie die Korrosion von Metallen sein. Im Hinblick auf die ersten beiden Prozesse ist ein geringer Anteil organischer Substanz in den zu berücksichtigenden Materialien, der thermisch und/oder mikrobiell zersetzt wird, notwendig.

Das Verhalten und die Wirkung der Gase müssen hinreichend bekannt sein. Daher müssen neben der Menge auch ausreichende Informationen über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die das Ausbreiten der Gase beschreiben, zur Verfügung stehen. Zur Abhängigkeit der Reaktionen der organischen Substanz vom Eh-pH-Milieu können derzeit keine detaillierten Aussagen getroffen werden, während die Korrosionsprozesse relativ gut beschrieben werden können. Im Hinblick auf die Korrosion ist bei der dominierenden Eisenkomponente ein basischer pH-Bereich, reduzierende Bedingungen und eine geringe Salinität, z. B. zum Begrenzen von Komplexbildungsreaktionen wünschenswert. Festzustellen ist, dass im Ton Korrosionsprozesse nicht auszuschließen bzw. zu erwarten sind.

Des Weiteren sind bei der Endlagerung im Ton sämtliche Transportmechanismen von Relevanz, da im Vergleich zum Salz, insbesondere bei plastischen Tonformationen oder Tonsteinen, der Gaseindringdruck deutlich niedriger ist. Bei den zu erwartenden Gasmengen tritt somit zumindest ein Zweiphasenfluss kontaminierter Medien auf.

Im Hinblick auf die Bewertung der hydraulischen Abdichtung sind wesentliche Materialeigenschaften die Permeabilität der technischen und geologischen Barrieren. Aus diesem Grund sind auch chemisch/mineralogische Wechselwirkungen der Barriere zu betrachten, die die Abdichtwirkung, d. h. beispielsweise das Quellvermögen smekthaltiger Materialien reduzieren. In diesem Zusammenhang ist vor allem der Kaliumgehalt der Porenlösungen und die Temperaturerhöhung im Endlagerbereich von besonderer Relevanz (Illitisierung), pH-Eh-abhängige Reaktionen der Mineralphasen (z. B. Ausfällung von Karbonat, Reduktion eisenhaltiger Minerale) sowie der mit Korrosion verbundene Wasserverbrauch der Porenlösung.

Im Gegensatz zur Endlagerung im Salz, bei der die hydraulischen Eigenschaften der geologischen und technischen Barrieren ausschlaggebend sind, hat somit im Ton ebenso die Sorption von Radionukliden und die Ausfällung radionuklidhaltiger Verbindungen (Wirkungsmechanismus chemische Bindung) eine besondere Bedeutung. Dies erfordert eine komplizierte Langzeitsicherheitsanalyse, bei der realistische Materialeigenschaften über die zu betrachtende Zeitphase zu berücksichtigen sind.

Im Hinblick auf die chemische Rückhaltung von Radionukliden sind reduzierende Bedingungen und ein annähernd neutraler pH-Wert bzw. bei Abwesenheit von CO₂ ein alkalischer pH-Wert und eine geringe Salinität (z. B. Komplexbildung) der Porenlösung von Vorteil. Nach dem Verschluss des Endlagers können jedoch die Wechselwirkungen der Materialien und die stattfindenden Reaktionen sowohl das geochemische Milieu als auch die Eigenschaften der chemischen Barrieren beeinflussen. Insbesondere im Ton sind demzufolge komplexe Wechselwirkungen der Mineralphasen, flüssiger und gasförmiger Phasen und deren Reaktionskinetik zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass durch die anoxischen Korrosionsprozesse das geochemische Milieu im Nahfeld auf reduzierende Bedingungen konditioniert wird.

Hierbei ist von Nachteil, dass nach dem derzeitigen Kenntnisstand in Analysen zur hydraulischen Abdichtung zahlreiche Prozesse und ihre Auswirkungen auf das Verhalten der chemischen Barrieren nur qualitativ und ohne Berücksichtigung der umfangreichen Kopplungsmechanismen beschrieben werden können. Während Einzelphänomene untersucht wurden und betrachtet werden können, bleiben in Bezug auf die verschiedenen zu erwartenden Einflüsse noch viele offene Fragen /9-27/. Des Weiteren ist in Bezug auf die Laboruntersuchungen problematisch, dass viele Experimente nicht die physikochemischen Bedingungen eines Endlagers in der Nachbetriebsphase wiedergeben und im Hinblick auf eine Bewertung der Reaktionskinetik nur eingeschränkt nutzbar sind.

Bei einem Vergleich der chemischen Wechselwirkungen im Ton und im Salz ist ferner hervorzuheben, dass

- der Mineralbestand im Ton eine deutliche ausgeprägtere Reaktionsbereitschaft in Abhängigkeit des pH-Eh-Milieus zeigt als Evaporitminerale,
- Mineralassoziationen im Ton (Na-K-Ca-Fe²⁺-Fe³⁺-Mg-Al₂O₃-SiO₂, OH, H₂O etc.) wesentlich komplizierter sind als marine Evaporite (z.B. Hexäres System Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O),
- im Ton das salinare System der Porenlösung gekoppelt ist an das dominierende Silicatsystem der Feststoffphase, während in Evaporiten ausschließlich ein salinares System vorliegt (im Salz ist die Anzahl relevanter Mineralphasen und gelöster Spezies relativ gering /9-28/),
- in Tonen ggf. die vorliegenden Mineralpolytypen (Stapelordnungen), Fehlordnungen, etc. zu berücksichtigen sind, die in Evaporiten vernachlässigt werden können,
- im Ton die Reaktionskinetik eine besondere Rolle spielt, während Salzsysteme meist sehr schnell reagieren und die Wechselwirkungen auf der Basis von Gleichgewichtsbetrachtungen untersucht werden können.

Ein weiteres Problem toniger Sedimente ist, dass viele der vorliegenden Messdaten aufgrund des Einsatzes unterschiedlicher Messverfahren und Auswertemethoden nur

eingeschränkt vergleichbar sind und eine statistische Auswertung, die im Hinblick auf eine Definition oder Spezifikation von Materialeigenschaften erforderlich ist, nur bedingt vorliegt.

Im Hinblick auf die geochemische Modellierung der chemischen Barrierewirkung ist des Weiteren hervorzuheben, dass nach /9-28/ für das Medium Ton thermodynamische Standarddaten wichtiger Festphasen, insbesondere Tonphasen fehlen, so dass Modellrechnungen für Standorte im Ton nur sehr eingeschränkt möglich sind /9-29/. Kinetische Reaktionsdaten zur Auflösung von Mineralphasen sind für Silikate, Feldspäte, Glimmer und einige Verwitterungsprodukte verfügbar. Es wird jedoch von /9-28/ betont, dass bei Tonsystemen die Prozesse sehr langsam und unter Beteiligung metastabiler Phasen ablaufen und die Verfügbarkeit von Oberflächen relevant ist. Diese Größen sind standortspezifisch. Im Anlagenband 6, Anhang 10, sind Stabilitätsdiagramme nach thermodynamischen Daten angegeben.

Es ist daher zusammenzufassen, dass zur Endlagerung im Ton in Deutschland noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, wobei neben dem radiologischen Schutzziel auch der Umwelt-/Grundwasserschutz zu betrachten ist.

Weitere vertiefende Informationen hinsichtlich mikrobieller Aktivität, Einfluss der radioaktiven Zerfallsprozesse, Metallkorrosion und einer Zusammenfassung der Prozesse zur Radionuklidlöslichkeit sind dem Anlagenband 6 zu entnehmen.

10 Auswertung der Untersuchungsergebnisse

10.1 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST)“ wurde ein Endlagerkonzept im Tongestein entworfen und dem für Steinsalz vorliegenden Konzept gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung konzentrierte sich auf die Bereiche Technik, Sicherheit und Kosten. Dabei wurden die charakteristischen Unterschiede zwischen einem generischen Endlager für hochaktive Abfälle im Salz und einem in Tongestein herausgearbeitet und offene Fragen identifiziert.

Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton

Im Anlagenband A1 der Studie wurden zum Thema internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung fanden dabei die zugrundeliegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweiskonzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierbarkeit der Endlager.

Belgien

In Belgien werden 7 Kernkraftwerksblöcke an 2 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist mit dem deutschen vergleichbar. Je nach Endlagerszenarium sind entweder nur verglaste Abfälle oder verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente werden jeweils einzeln in einen dünnwandigen Overpack endlagergerecht verpackt. Belgien betreibt ein Untertagelabor in Boom-Ton im SCK/CEN Nuclear Research Center in Mol. Das dort durchgeführte Forschungsprogramm soll die Machbarkeit und die Langzeitsicherheit der Endlagerung in geologischen Formationen demonstrieren. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder für verglaste Abfälle und für ausgediente Brennelemente in einer Teufe von 230 m zwischen 2 Zugangsschächten vor. Das Endlager wird der Neigung 1°- 2° der Tonformation folgend ausgerichtet. Die Einlagerung der Endlagergebilde erfolgt in horizontalen bentonitummantelten Stahlröhren in mit Betonformsteinen ausgebauten runden Strecken. Die Auslegung erfolgt auf der Basis des Temperaturkriteriums von 100 °C, das im als technische Barriere eingesetzten Verfüllmaterial Bentonit nicht überschritten werden darf. Der Nachweis der Langzeitsicherheit erfolgt schrittweise und iterativ. Hierzu werden Szenarien entwickelt und bewertet. Ausgegangen wird von den Szenarien „normale Entwicklung des Endlagers“ als Referenzszenarium und „gestörte Entwicklung des Endlagers“. Die Sicherheitsbewertung

für das Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers beruht auf der Berechnung der Individualdosis einer kritischen Gruppe und auf die Bewertung von Sicherheitsindikatoren. Die Szenarien zur gestörten Entwicklung werden zurzeit untersucht. Der Betriebsbeginn des Endlagers wird nach 50 – 60 Jahren Abkühlzeit für wärmeentwickelnden HAW und die ausgedienten Brennelemente für das Jahr 2035 angestrebt.

Schweiz

In der Schweiz werden 5 Kernkraftwerksblöcke an 4 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Es sind sowohl verglaste Abfälle als auch ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente sollen in massive Endlagerbehälter mit verschweißtem Deckel endlagergerecht verpackt werden. Seit 1988 wird in der Schweiz als Alternative zum Wirtsgestein Granit der Opalinuston untersucht. Hierzu wurde am Mont Terri, Kanton Jura ein Unterlagelabor parallel zu einem Autotunnel errichtet und der Opalinuston im Züricher Weinland untersucht. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 650 m, erreichbar über einen Schacht und eine Rampe, vor. Die Einlagerungsstrecken werden mit einer Neigung von ca. 7° folgend der Tonformation errichtet. Die Einlagerung der Endlagergebilde erfolgt in mit Ankern und Netzen gesicherten runden Einlagerungsstrecken. Die Endlagergebilde werden mit Bentonit umgeben. Die Auslegung erfolgte auf der Basis der Einhaltung eines 100 °C Kriteriums im Wirtsgestein. Hinsichtlich des Sicherheitsnachweiskonzepts ist die Einhaltung der Prinzipien der Endlagerung sowie der Schutzziele zu jeder Stufe des Bewilligungsverfahrens (Rahmen-, Bau-, Betriebs- und Verschlussbewilligung) mit entsprechenden Sicherheitsanalysen nachzuweisen. Mit den Sicherheitsanalysen ist darzulegen, welche Vorgänge und Ereignisse auf das Endlagersystem im Laufe der Zeit einwirken könnten, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen abzuleiten. Vorgänge und Ereignisse mit extremer Unwahrscheinlichkeit und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Konsequenzen haben, sowie absichtliche menschliche Eingriffe in das Endlagersystem brauchen in der Sicherheitsanalyse nicht betrachtet zu werden. Der Betriebsbeginn des Endlagers wird um das Jahr 2050 als erforderlich angesehen.

Frankreich

In Frankreich werden 59 Kernkraftwerksblöcke an 19 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Die Menge der Abfälle ist deutlich größer. Je nach dem, wie intensiv wieder aufgearbeitet wird, schwankt je nach Endlagerszenarium der Anteil an endzulagernden verglasten Abfällen bzw. ausgedienten Brennelementen. Verglaster Abfall und ausgediente Brennelemente werden in Primärbehälter verpackt. Die Primärbehälter werden wiederum in Endlagerbehälter (Overpacks) zur Erreichung der Endlagerfähigkeit eingebracht. Seit 1999 wird ein Untertagelabor in Bure (Department Haute-Marne) errichtet. Die For-

schungsstätte wird auf der 490 m-Sohle im Callov-Oxford-Ton errichtet. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 485 m verbunden über mehrere Schächte und eine Rampe mit den Tagesanlagen vor. Die runden Einlagerungstrecken werden mit einem Metallrohr stabilisiert. In das Metallrohr werden Bentonitringe eingebracht, in denen wiederum ein inneres Metallrohr eingebracht wird. Dieses innere Rohr wird mit Endlagergebinden befüllt. Auch hier werden zur Auslegung 100 °C als Grenztemperatur angenommen. Im Sicherheitsnachweiskonzept soll durch qualitative und quantitative Sicherheitsanalysen nachgewiesen werden, dass das gewählte Endlagerkonzept den Anforderungen an den Schutz der Menschen und der Umwelt über die gesamte Dauer der Existenz des Endlagers gerecht wird. Dabei wird auch ein Referenzszenarium der ungestörten Entwicklung und ein verändertes Szenarium der gestörten Entwicklung, verursacht durch zerstörende Ereignisse oder Phänomene betrachtet. Für eine Realisierung des geologischen Endlagers liegt zur Zeit noch kein Terminplan vor.

Spanien

In Spanien werden 9 Kernkraftwerksblöcke an 7 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Es sind auch hier verglaste Abfälle sowie ausgediente Brennelemente in Overpacks endzulagern. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von 250 m vor, erreichbar über 3 Schächte und eine Rampe. Verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken mit einem Durchmesser von 2,4 m endgelagert. Die festgelegte Grenztemperatur für das Verfüllmaterial ist 100 °C. Die Endlagerstrecke wird mit Bentonitblöcken ausgebaut und in die zentrale Position ein Einlagerungsrohr zur Befüllung mit den Endlagergebinden eingebracht. 2010 wird das spanische Parlament auf der Basis bis zu diesem Zeitpunkt erreichter Forschungsergebnisse entscheiden, wie mit den Abfällen verfahren wird. Zu Planungszwecken wird von einer Inbetriebnahme des Endlagers im Jahre 2035 ausgegangen. Die Bestimmung eines Standortes oder die Festlegung einer Wirtsgesteinsschicht wird zur Zeit nicht durchgeführt.

Im vorliegenden Anlagenband A2 erfolgt ein Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Salz und Ton sowie eine Darstellung der Vor- und Nachteile der Wirtsgesteine. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt in fünf Bereichen:

Bergbau in den Wirtsgesteinen Salz und Ton

Der Bergbau im Wirtsgestein Salz ist aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges und der einfachen Herstellbarkeit von Strecken und Kammern und Bohrungen gut beherrschbar. Je nach Kriechrate werden in größeren zeitlichen Abständen Nachschneidemaßnahmen an den Strecken und Kammern durchgeführt, um die erforderlichen Lichtraumprofile einzuhalten. Bohrlöcher zur Wetterführung oder zur Einlagerung von Endlagergebinden lassen sich im Trockenbohrverfahren einfach herstellen. So können Salzbergwerke über viele Jahrzehnte sicher ohne stützenden Ausbau betrieben werden.

Bergbau auf Ton in einer für ein Endlager relevanten Teufe existiert in Deutschland nicht, da abbauwürdige Tonformationen an der Oberfläche oder oberflächennah ausgebeutet werden. Eine Untersuchung oberflächennaher Bergwerke bis zu einer Teufe von 80 m zeigte, dass dort ein hoher Aufwand für Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen für die Grubenräume erforderlich ist. In der Schachanlage Konrad im niedersächsischen Salzgitter sind demgegenüber aber Strecken im Ton in größeren Teufen bergmännisch aufgefahren worden. Es zeigte sich, dass der Ton dort gegen die Feuchtigkeit der Wetter geschützt werden muss. Hierzu reichen ca. 7 cm Spritzbeton mit leichten Matten zur Stabilisierung aus. Bei ungünstigen geologischen Spannungszuständen kann ein stärkerer, z.B. stahlmattenarmerter, doppelschaliger, Ausbau erforderlich sein. Die durchzuführenden Stabilisierungsmaßnahmen sind formations- und teufenabhängig. Das Bohren in Ton ist mit über Tage eingesetzter Technik nach entsprechenden Anpassungen auch unter Tage möglich. Für die Einlagerung von Endlagergebinden in Bohrlöchern ist im Gegensatz zum Wirtsgestein Salz eine Bohrlochverrohrung erforderlich.

Endlagerbehälterkonzepte

Die Anforderungen an die Endlagergebinde leiten sich für die Wirtsgesteinsformationen Salz und Ton aus unterschiedlichen Sicherheitsnachweiskonzepten ab. Im Wirtsgestein Salz gilt das Prinzip des vollständigen Einschlusses durch das Salzgestein. Konzeptführend ist hier die Barrierefunktion der (natürlichen) geologischen Barriere und des Schachtverschlusses. Bei der Endlagerung im Ton sind die technischen und geotechnischen Barrieren konzeptführend.

Deshalb muss im Wirtsgestein Ton der Endlagerbehälter für einen sehr langen Zeitraum intakt bleiben, d. h. der Behälter muss für lange Zeit einer Korrosion im gesättigten Bentonitmedium sowie dem Gebirgsdruck standhalten. Als zusätzlicher Effekt ist die mögliche Korrosion der Behälter durch auf der Oberfläche abgelagertes Salz aus dem Siedeeffekt von über 100 °C aufgeheizten Formationswässern zu nennen. Darüber hinaus muss aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Bentonits, dessen

Quellfähigkeit bei Temperaturen $> 100\text{ °C}$ stark eingeschränkt wird, im Wirtsgestein Ton in der Regel die Belademenge der Endlagergebinde verringert werden.

Hinsichtlich Materialauswahl und Konstruktion der Endlagerbehälter im Wirtsgestein Ton ergeben sich daraus folgende Aussagen:

- Aufgrund der Temperaturbegrenzung (100 °C) kann nur eine gegenüber der Endlagerung in Salz vergleichsweise geringe Beladung des POLLUX-Behälters bzw. der Brennstabkockille mit gezogenen Brennstäben erfolgen.
- Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz korrosionsfester Stähle oder durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierter Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung auf die Endlagersicherheit auswirken kann.
- Bei Einsatz von Brennstabkockillen für die Endlagerung gezogener Brennstäbe ist zu prüfen, ob diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden müssen, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

Einlagerungskonzepte und daraus resultierende erforderliche Endlagerflächen

Für einen Vergleich der Endlagerkonzepte können keine realen geologischen Verhältnisse zugrunde gelegt werden, weil keine Standorte benannt und hinreichend erkundet sind. Deshalb werden theoretische Mindestflächen für die Einlagerung der Endlagergebinde anhand von sogenannten Einheitszellen ermittelt und für die beiden Wirtsgesteinsformationen vergleichend gegenübergestellt. Einheitszellen stellen den theoretisch für ein spezifisches Endlagergebinde aufgrund seiner Wärmemenge erforderlichen Endlagerflächenbedarf dar.

Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüsts von 1 657 POLLUX-10 (Zwischenlagerzeit 30 Jahre, Einheitszelle mit 237 m^2) für die Streckenlagerung eine Netto-Endlagerfläche von ca. 0,5 Mio. m^2 erforderlich. Hinzu kommt für die Bohrlochlagerung von 4778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 15 Jahre, Einheitszelle mit $2\,217\text{ m}^2$) eine Netto-Endlagerfläche von ca. 0,051 Mio. m^2 . Damit beträgt der Gesamt Netto-Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlager in Salz ca. 0,55 Mio. m^2 .

Im Wirtsgestein Ton wird nach der entsprechenden Umrechnung von 1 657 POLLUX-10 in 5 524 POLLUX-3 Gebinde (Zwischenlagerzeit 31 Jahre, Einheitszelle mit 764 m^2) eine Netto-Endlagerfläche von ca. 4,22 Mio. m^2 erforderlich. Hinzu kommen für die Bohrlochlagerung von 4 778 HAW-Kokillen (Zwischenlagerzeit 40 Jahre, Einheitszelle mit 780 m^2) eine Netto-Endlagerfläche von 0,533 Mio. m^2 . Beim Vergleich mit dem Flä-

chenbedarf im Wirtsgestein Salz sind insbesondere hier die unterschiedlichen Zwischenlagerzeiten zu berücksichtigen. Damit beträgt der Gesamt Netto-Endlagerflächenbedarf für ein solches Endlagerkonzept in Ton ca. 4,75 Mio. m².

Als Alternative zur Streckenlagerung von POLLUX-3-Behältern in Ton wurde die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen untersucht und mit dem Einlagerungskonzept der BSK 3 für Salz verglichen. Im Wirtsgestein Salz wird unter Zugrundelegung des Mengengerüsts ca. 5 524 BSK 3 (Zwischenlagerzeit 10 Jahre, Einheitszelle mit 2 235 m²) eine Netto-Endlagerfläche von 0,23 Mio. m² erforderlich. Im Wirtsgestein Ton wird nach der entsprechenden Umrechnung auf 8 286 BSK 2 (Zwischenlagerzeit 32 Jahre, Einheitszelle mit 2 165 m²) eine Netto Endlagerfläche von 4,49 Mio. m² erforderlich. Ein direkter Vergleich mit dem Konzept im Wirtsgestein Salz ist nicht möglich, da im Ton erst nach einer Zwischenlagerzeit von 40 Jahren gegenüber 10 Jahren im Salzkonzept die Brennstabkokillen vom Endlager angenommen werden können.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse zum Vergleich der erforderlichen Endlagerflächen in Salz und Ton zusammen. Aufgrund der geringeren Auslegungstemperatur von 100 °C und den geringeren möglichen Bohrlochtliefen ist ein deutlich höherer Endlagerflächenbedarf im Wirtsgestein Ton erforderlich.

Endlagerkonzept	Streckenlagerung		Bohrlochlagerung		
	POLLUX-8	POLLUX-3	HAW-Kokillen	BSK 3	BSK 2
Im Wirtsgestein Salz [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	0,5/(30)	-	0,051/(15)	0,23/(10)	-
Im Wirtsgestein Ton [Mio. m ²] (Zwischenlagerzeit [a])	-	4,22/(31)	0,533/(40)	-	4,49/(32)

Vergleich der erforderlichen Endlagerflächen in Salz und Ton

Verfüll- und Verschlusskonzept

Ein Vergleich der Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager in Salz und Ton zeigt, dass die wesentlichen Unterschiede in dem Material bestehen, das zur Verfüllung der Strecken und Kammern genommen wird. Während beim Endlager in Salz das bei der Auffahrung der Strecken anfallende Salzgrus genommen wird, müssen beim Endlager in Ton die Verfüllmaterialien Bentonit und Bentonit/Sand-Gemische separat hergestellt und ins Endlager transportiert werden. Die Einbringtechnologie in Strecken und Kammern dafür unterscheidet sich ebenfalls wesentlich. Salzgrus wird mit entsprechender Fördertechnik (Blas- oder Schleuderversatz) ohne zusätzliche Verdichtungsmaßnahmen eingebracht. Bentonit und Bentonit/Sand - Gemische müssen mit vorgegebener Einbaudichte qualitätsgesichert in die Strecken und Kammern respektive Bohrlöchern eingebaut werden.

Hinsichtlich der Schachtverfüllung und -verschlüsse sind die Unterschiede deutlich geringer. In beiden Fällen werden setzungsarme Verfüllsäulen aus Hartgesteinsschotter eingebracht, auf die der Schachtverschluss in ähnlicher Auslegung (Widerlager und Dichtelemente) an entsprechender Stelle im oberen Bereich der Wirtsgesteinsformation eingebaut wird.

Relativer Kostenvergleich

Ein Kostenvergleich zwischen den Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Salz und im Wirtsgestein Ton ist aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes beider Konzepte nur relativ möglich. Verglichen werden können die aus den Wirtsgesteineigenschaften und Einlagerungskonzepten entstehenden zusätzlichen Kostenfaktoren.

Zusätzlich zu den Tagesanlagen für ein Endlagerkonzept im Salz ist für das Verfüllmaterial Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemischen ein eigener Logistikstrang zu installieren. Dieser umfasst auch die Herstellung und Lagerhaltung von Bentonitformsteinen für die Streckenlagerung und die Vorbereitung von Endlagergebinden mit Bentonit Umhüllungen.

Bei der Schachtförderung und dem Streckentransport sind à priori keine größeren Kostenunterschiede zwischen beiden Wirtsgesteinen bei der einzusetzenden Maschinenteknik erkennbar.

Der Errichtungs- und Unterhaltungsaufwand für ein Grubengebäude im Wirtsgestein Ton wird deutlich über dem im Wirtsgestein Salz liegen. Die Gründe hierfür sind einerseits in den erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen für den Ton an sich und andererseits in der Größe des Grubengebäudes (Faktor 8 – 9) zu sehen. Gegenüber dem Salzkonzept ist auch der Schacht bis in den Schachtsumpf auszubauen. Hierauf kann im Salz verzichtet werden.

Ein weiterer Kostenfaktor ist in dem erforderlichen qualitätsgesicherten Einbringen von vergleichsweise teurem Verfüllmaterial Bentonit zu sehen.

Betrieblicher Strahlenschutz

Im vorliegenden Anlagenband A3 der Studie wurden zum Thema Sicherheit in der Betriebsphase der betriebliche Strahlenschutz, die Kritikalitätsfrage beim Endlagerkonzept in Ton und Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase untersucht. Ergänzend ist eine erste Abschirmrechnung für eine bentonitummantelte HAW-Kokille durchgeführt worden.

Die Untersuchungen zu erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen, Strahlenexposition des Betriebspersonals sowie möglichen Störfallauswirkungen ergaben eine grundsätzliche Unabhängigkeit des betrieblichen Strahlenschutzes von der geologischen Formation, in die eingelagert werden soll. Eine Ausnahme bildet für den Ton der in den Berechnungen zur Strahlenexposition des Betriebspersonals zu berücksichtigende, noch unbekanntem Anteil rückgestreuter Neutronen am Wirtsgestein.

Im Allgemeinen wird der betriebliche Strahlenschutz bestimmt durch Form und Menge der Endlagergebäude, Einlagerungskonzept und zugehörige Betriebsabläufe. Eine erste überschlägige Auslegungsrechnung zur Bestimmung der erforderlichen Abschirmung einer mit 30 cm Bentonit ummantelten HAW-Kokille ergab, dass ca. 18 cm Eisen für den Transportbehälter ausreichend sind.

Kritikalitätsbetrachtung für die Betriebsphase eines Endlagers in Ton

Im Rahmen einer generischen Kritikalitätsanalyse zur Betriebsphase eines Endlagers für bestrahlte Kernbrennstoffe in einer Tonformation wurde als relevantes Störfallszenario der Absturz einer Brennstabkokille BSK-2 in ein 50 m tiefes Bohrloch untersucht. Als Folge des Aufpralls am Grund des Bohrloches versagt der Behältermantel, wobei ein Teil der Brennstäbe oder alle Brennstäbe aus dem Behälter freigesetzt wurden. Ein Hüllrohrversagen der Brennstäbe selbst wurde nicht angenommen. Zusätzlich wurde auch ein vom Absturz unabhängiges Überfluten der jeweiligen Anordnung mit Wasser sowie ein Verschütten mit Ton als abhängige Folge des Störfalls betrachtet. Exemplarisch wurde konservativ von UO₂-DWR-Brennstäben mit 4 % Anfangsanreicherung und 20 GWd/tSm mittlerem Abbrand ausgegangen. Als Wirtsgestein wurde Opalinuston angenommen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine ungeflutete Anordnung würde immer unterkritisch bleiben. Um Kritikalität zu erreichen, muss ein Überfluten der Brennstabanordnung mit Wasser oder einem gleichwertigen Moderator unterstellt werden.
- Bei Berücksichtigung des Kokillenmantels als konzentrisch in der Bohrlochmitte positioniertes Rohr als Modell für die wahrscheinlichste Anordnung nach dem Absturz bleibt das System immer unterkritisch. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass sich in diesem Fall nicht hinreichend viele Brennstäbe im reaktivsten mittleren Brennstababstand anordnen können.
- Wird dagegen hypothetisch der leere Behälter getrennt von den Brennstäben angeordnet, führt dies zu annähernd gleichen Multiplikationsfaktoren wie ohne Berücksichtigung des Behälters und ermöglicht rechnerisch kritische Anordnungen.
- Fällt als Folge des Störfalls Ton in das Bohrloch und füllt dieser die freien Zwischenräume aus, steigt der Multiplikationsfaktor zwar an, bleibt aber im unterkritischen Bereich, da der Ton im Vergleich zu Wasser schlecht moderiert. Selbst bei wassergesättigtem Ton bleibt die Anordnung unterkritisch.

Die Ergebnisse enthalten hohe Konservativitäten aufgrund der unterstellten Wasserflutung, was als zweiter unterstellter, vom Absturz unabhängiger Störfall über die Anforderungen des Störfallprinzips der Kritikalitätssicherheit hinausgeht. Konservativ ist weiterhin das zur Vereinfachung angenommene reguläre Brennstabgitter bei reaktivstem mittlerem Abstand der Brennstäbe und der relativ niedrige mittlere Abbrand. Geht man von einer ungefluteten gleichmäßigen Verteilung der Brennstäbe über den gesamten Bohrlochquerschnitt aus, so ist die Anordnung weit unterkritisch.

Vergleich der Safeguardskonzepte in Salz und Tongestein

Ein Vergleich der Safeguards-Konzepte für Endlager in Salz und Tongestein zeigt auf, dass bei angenommenem ähnlichen Gesteinsverhalten auch Art und Funktion der Safeguards-Maßnahmen sich ähneln. Unterschiede resultieren im Wesentlichen aus den Materialien und Verfahren für die Herstellung der geotechnischen Barrieren im Nahbereich der eingelagerten Endlagerbehälter. Während beim Endlager in Salz der selbstabschirmende POLLUX-Behälter in der Einlagerungsstrecke mit Salzgrus umgeben wird, kommt beim Endlager in Tongestein Bentonit sowohl in kompakterter Form in direkter Umgebung der Endlagerbehälter als auch in loser Schüttung oder pelletierter Form in den Bohrungen und Strecken zum Einsatz. Damit zusammen hängt auch die im Falle der Brennstabkokille BSK 2 zu berücksichtigende Konditionierung des Endlagergebindes. Der Prozess der „Verpackung“ der Brennstabkokille in einen Bentonitmantel und in ein Tragegestell erfordert zusätzliche Kontrollmaßnahmen bei der Kondi-

tionierung. Eine Identifikation der Brennstabkokille ist nach der Verpackung in Bentonit direkt nicht mehr möglich. Dies kann nur mittelbar über eine der „Verpackung“ zugeordnete Kennung am Tragegestell erfolgen. Insofern ist dort ein zusätzlicher Abzweigpfad denkbar, der zusätzliche Überwachungsmaßnahmen und Kontrollen erfordert.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied resultiert aus der Notwendigkeit, dass ein Transferbehälter zum Transport des Endlagergebindes BSK 2 (Brennstabkokille mit Bentonit ummantelt in einem Traggestell) erforderlich wird. Das Be- und Entladen eines solchen Transferbehälters in der Konditionierungsanlage respektive in der Umladestation des Endlagers erfordert zusätzliche Überwachungsmaßnahmen, weil dabei Abzweigungs-Szenarien denkbar sind.

In beiden Endlagerkonzepten (Salz und Tongestein) ist eine planmäßige Rückholung eingelagerter Endlagergebände nicht vorgesehen. Falls zu irgend einem Zeitpunkt dennoch überlegt werden sollte, Maßnahmen zur Rückholung einzusetzen, sind Unterschiede aufgrund der Wirtsgesteinseigenschaften festzustellen. Je nachdem, zu welchem Zeitpunkt eine solche Rückholung gedacht ist, erhöht sich dabei unter anderem auch der Aufwand für Kühlungsmaßnahmen während der bergmännischen Wiederauf-fahrung des verfüllten Grubengebäudes. Der Zeitpunkt, an dem ein Zugang zu den Endlagergebänden möglich ist, wird durch die max. Belastung des Versatzmaterials Bentonits mit 100 °C und für Salz und Salzgrus mit 200 °C bestimmt. Das bedeutet, dass endgelagerte Behälter aus einem Endlager in Ton früher zurückgeholt werden könnten.

Aufgrund des ähnlichen Verformungsverhaltens der Wirtsgesteine Ton und Salz kann festgehalten werden, dass das bereits vorliegende deutsche Safeguards-Konzept für ein Endlager in Salz auch auf Tonformationen übertragbar ist. Die weitere Betrachtung der Endlagergebände und der Betriebsabläufe hat gezeigt, dass die zusätzliche Verpackung der Brennstabkokille mit einem Bentonitmantel eine eindeutige Identifikation der BSK erschwert. Damit ist die lückenlose Verfolgung dieses Endlagergebändes durch die Anlagen- und Gebäudeteile des Endlagers nur indirekt über eine Kennung am Traggestell für BSK 2 und Bentonitmantel möglich.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Langzeitsicherheit -

Im Anlagenband A4 der Studie wurden zum Thema Sicherheit in der Nachbetriebsphase, die Langzeitsicherheit, die Kritikalitätsfrage beim Endlagerkonzept in Ton und Salz und Safeguardsmaßnahmen untersucht.

Die Untersuchungen zur Langzeitsicherheit zeigten, dass Endlagerkonzepte in Salz und Ton hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine vergleichbare Sicherheitstrategie auf-

weisen. Die Endlagerkonzepte basieren im Unterschied z. B. zu Endlagerkonzepten im Granit auf einer langfristig einschlusswirksamen geologischen Barriere.

Hinsichtlich des Transportes von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches für einen hypothetischen Störfall sind Endlagerkonzepte im Salz und Ton methodisch in gleicher Weise zu behandeln. Sie werden an Hand von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung bewertet. Dominant für die Grundwasserbewegung sind dabei standortspezifische Unterschiede, die wirtsgesteinsspezifischen Unterschiede sind von geringerer Bedeutung.

Im Falle des Wirtsgesteins Salz findet zwangsläufig eine maßgebliche Verdünnung der radionuklidbelasteten Salzlösung statt, da diese bei einem störfallbedingten Austritt aus dem Salzstock als gesättigte Salzlösung vorliegt. Gesättigte Salzlösungen werden von der Biosphäre unverdünnt nicht aufgenommen. Bzgl. der Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre ergeben sich keine Unterschiede für Endlagerkonzepte im Salz und Ton, da Biosphärenmodelle auf Grundlage der Nutzung von Wasser und Boden sowie Verzehrgewohnheiten regulativ festgelegt sind.

Die wesentlichen Unterschiede der Wirtsgesteine Salz und Ton im Hinblick auf Langzeitsicherheitsfragen beziehen sich auf das Nahfeld. Den dort herrschenden unterschiedlichen Bedingungen wird durch entsprechend angepasste technische Endlagerkonzepte Rechnung getragen, so dass für beide Wirtsgesteine langfristig ein hinreichendes Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Der Langzeitsicherheitsnachweis muss diese Unterschiede abbilden, wobei der derzeitige wissenschaftlich/technische Kenntnisstand im Ton deutlich weniger weit fortgeschritten ist als im Salz.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Kritikalitätssicherheit -

In der folgenden Tabelle sind die in der vorliegenden Studie durchgeführten Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein zusammengestellt. Es zeigte sich, dass für das vorgegebene Kernbrennstoffinventar auch unter Annahme von sehr unwahrscheinlichen Szenarien eine Kritikalität in beiden Wirtsgesteinen und für alle bisherigen Einlagerungskonzepte ausgeschlossen werden kann.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Safeguardsaspekte -

Die Untersuchungen zu den Safeguardsaspekten zeigten, dass der für das Endlagerkonzept angenommene Tonstein sich hinsichtlich seiner Verformungseigenschaften ähnlich verhält wie Steinsalz. Damit unterliegt auch dieses Wirtsgestein langfristig starkem Konvergenzverhalten. Nach einer sofortigen Verfüllung der Einlagerungshohlräume um oder über den Endlagergebänden in Strecken und Bohrlöchern, sorgt die natür-

liche Konvergenz dafür, dass das Versatzmaterial kompaktiert und die Gebinde eingeschlossen werden. Es wird davon ausgegangen, dass in einem Endlager in Tongestein wie im Salz ein vollständiger Einschluss der Endlagergebände möglich ist. Somit kann wie für ein Endlager im Salz die Überwachung in der Nachbetriebsphase auf eine Überwachung der Erdoberfläche über dem verfüllten und geschlossenen Endlager beschränkt werden. Dazu zählen Luftbildaufnahmen, Satellitenbilder oder örtliche Begehungen. Im Rahmen weiterführender Forschungen ist dabei zu untersuchen, ob neue geophysikalische Methoden zur Überwachung des Endlagers von über Tage weiterführende Ergebnisse liefern können. Durch Studien könnte dies analysiert werden und, falls diese zu positiven Ergebnissen führen, durch in-situ Versuche auf ihre Anwendungsfähigkeit überprüft werden.

Die nicht geplante aber denkbare Rückholung eingelagerter Endlagerbehälter ist sowohl im Salz als auch im Ton aufgrund des genannten Konvergenzverhaltens des Gebirges sehr aufwändig und würde nicht unbemerkt erfolgen können. Dazu wäre nach Beendigung des Endlagerbetriebes die Wiederauffahrung des Grubengebäudes oder die Errichtung eines neuen Endlagerbergwerkes erforderlich.

Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Geochemie -

Im Anlagenband A6 der Studie wurden zum Thema Geochemie die Grundlagen zu Tonsedimenten und Evaporiten zusammengestellt, die Auswirkungen der Betriebsphase eines Endlagerbergwerkes auf das Tongebirge untersucht und die Nachbetriebsphase eines Endlagers in Ton betrachtet.

Die Betriebsphase eines Endlagers kann in mehrere Teilphasen gegliedert werden. Zuerst erfolgt die Auffahrung des Grubengebäudes in Verbund mit geowissenschaftlichen und geotechnischen Untersuchungen. Während der Betriebsphase im engeren Sinne erfolgt die Einbringung der radioaktiven Abfälle und abschließend werden die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen des Grubengebäudes (Stilllegung) durchgeführt. Insbesondere die letzten beiden Teilphasen des Betriebes können sich in Abhängigkeit der Endlagerkonzeption sowie der vorgesehenen Einlagerungs- und Stilllegungsstrategie zeitlich überlappen.

Der Betrieb eines Bergwerkes erfordert eine Bewetterung des Grubengebäudes, wodurch eine Abkühlung des Gebirges hervorgerufen wird und feuchte, sauerstoffhaltige Luft in die untertägigen Hohlräume eingeführt wird. Des Weiteren beeinflussen die bergmännischen Arbeiten die gebirgsmechanische Situation, wodurch Ausbau- bzw. Stützmaßnahmen erforderlich sind. Hierzu müssen, wie ebenso im Rahmen der Stilllegung unterschiedliche wasserhaltige Baustoffe eingesetzt werden.

Die Störung des ursprünglichen geochemisch/mineralogischen Gebirgszustandes kann chemische Reaktionen hervorrufen, von denen sowohl das Gebirge als auch die ein-

gebrachten Baustoffe betroffen sein können. Diese Prozesse werden in diesem Teil des Berichtes qualitativ beschrieben, da für quantitative Angaben ausreichende bzw. detaillierte Informationen zur Endlagerauslegung und der verwendeten Baustoffe nicht in einem hinreichenden Tiefgang vorliegen. Die Identifizierung der Prozesse zeigt, dass

- bei Tonsedimenten ein zügiger Ausbau der untertägigen Hohlräume nicht nur im Hinblick auf die Stabilisierung des Gebirges, sondern ebenso zum Schutz des Wirtsgesteine zu empfehlen ist und
- das Einbringen von Wasser weitestgehend zu reduzieren ist, da hierdurch Stoffreaktionen und -transporte minimiert werden können.

Notwendige Baustoffe können auch dafür genutzt werden, das chemische Milieu im Hinblick auf eine Verbesserung der Radionuklidrückhaltung zu beeinflussen. Auf jeden Fall ist es erforderlich, basierend auf den Sicherheitsnachweiskriterien für ein Endlager, auch Materialanforderungen in Bezug auf deren chemisch/mineralogischen Stoffbestand herzuleiten, die die Verfüll- und Barrierebaustoffe zu erfüllen haben. Hierbei ist insbesondere den folgenden Schutzziele eine besondere Bedeutung zu widmen:

- Arbeitsschutz (konventionelles Schutzziel),
- Grundwasserschutz (konventionelles Schutzziel) sowie
- radiologisches Schutzziel.

Zur Gewährleistung des Grundwasserschutzes und des radiologischen Schutzzieles sind Anforderungen an die Permeabilität und die Sorptionskapazität der Baustoffe zu entwickeln. Des Weiteren sind Grenzwerte beispielsweise für den Sulfidanteil und den Feuchtegehalt herzuleiten. Aufgrund der möglichen Folgereaktionen von Sulfiden, vor allem bei Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff, ist dem im Endlagerbereich verbleibende Sauerstoffgehalt eine besondere Beachtung zu schenken. Vorteilhaft ist die Verwendung hydraulisch abbindender Baustoffe, da hierdurch im Hinblick auf die Rückhaltung toxischer Stoffe und Radionuklide ein günstiges chemisches Milieu geschaffen wird. Hierbei ist besonders der hohe pH-Wert und das Bindungspotential für Kohlendioxid hervorzuheben.

Zu begrenzen sind ferner die Mengen an organischem Material bzw. des organischen Anteils der einzusetzenden Baustoffe sowie von Metall, da die hieraus mögliche resultierende Gasbildung Transportprozesse im Gebirge fördert.

Soweit die erforderlichen Vorkehrungen bzw. Maßnahmen getroffen wurden, kann ausgeschlossen werden, dass in der Betriebsphase chemisch/mineralogische Prozesse ablaufen, die die Langzeitsicherheit eines Endlagers signifikant beeinflussen könnten. Die Betriebszeit eines Endlagers im Ton, die mit ca. 70 Jahren angenommen wird, ist zu kurz, dass im größeren Umfang Transport und/oder Diffusionsprozesse stattfinden

den können. Stofftransporte, insbesondere im Verbund mit der Wärmeentwicklung durch die eingebrachten radionuklidhaltigen Abfälle sind jedoch Voraussetzung für umfangreichere chemisch/mineralogische Prozesse.

Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens

Im vorliegenden Anlagenband 5 der Studie erfolgt ein Vergleich der Wirtsgesteine Ton/ Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens.

In Deutschland ist die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen unumstritten. Aufgrund ihrer für die Endlagerung günstigen Eigenschaften können als potentielle Wirtsgesteine neben kristallinen Gesteinen die Tone/Tonsteine der Unterkreide und der jurassische Opalinuston sowie die Steinsalze des Zechsteins benannt werden.

Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen hinsichtlich der Mächtigkeit und Tiefenlage (> 100 m Mächtigkeit und < 1.500 m Tiefenlage) erfüllen die Zechsteinsalze in der Norddeutschen Senke und die Unterkreide-Tone im Niedersächsischen Becken (NSB). Diesen Mindestanforderungen entspricht - jedoch regional viel stärker begrenzt - auch der Opalinuston, der im Süddeutschen Molassebecken durch Bohrungen abgeschlossen ist.

Die epirogenetisch-paläogeographischen Entwicklungen der Untersuchungsgebiete werden geschildert und die Unterschiede der Wirtsformationen in Bezug auf Lithologie und Mineralogie sowie die daraus resultierenden Konsequenzen wie z. B. die Bildung von Kohlenwasserstoffen herausgearbeitet.

Zur thermischen Beeinflussung der Wirtsgesteine infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, das Verhalten des Endlagersystems in beherrschbaren Grenzen zu halten. Sowohl in Bezug auf den Bergbau als auch auf die radiologische Sicherheit in der Betriebs- und Nachbetriebsphase ergab sich ein Grenzwert für die zulässige Maximaltemperatur im Salinar von 200 °C und im Ton von 100 °C.

Dieses bedingt für Tonformationen eine längere Zwischenlagerzeit, ein anderes Endlagerlayout mit erhöhtem Platzbedarf sowie ein angepasstes Behälterkonzept. Die längerfristige oberirdische Zwischenlagerung der radioaktiven Abfälle ist nicht nur aus Gründen der Sicherheit und des Strahlenschutzes nachteilig, sondern verursacht auch vermeidbare Kosten.

Die Zechstein Salze der Staßfurt-Folge, der Opalinuston (Dogger α) und die Unterkreide-Tone sind Sedimente mariner Ablagerungsräume. Diese Ablagerungsräume sind als Epikontinentalmeere zu beschreiben, die durch Schwellen/Barrieren von offenen Ozeanen getrennt waren. Nur zur Zeit des Zechsteins kam es zu einer stärkeren Verdunstung von Meereswasser und zur Ausscheidung von Salzen. Auffallend sind hohe Sedimentationsraten für die untersuchten Ablagerungsräume.

Norddeutsche Senke

Die Pompeckj'sche Scholle und das NSB bilden im Nordwesten Deutschlands die geologischen Hauptstrukturen der Norddeutschen Senke. Dort sind mächtige, evaporitische Gesteinsfolgen, in einigen Fällen 1.000 m und mächtiger, zur Zeit des Rotliegenden, des Zechstein und der Oberjura abgelagert worden.

Da die Wirtsgesteinseigenschaften der Rotliegend- und Oberjura-Salinare durch eine enge Salz-Tonstein-Sandstein-Anhydrit-Wechselagerung stark eingeschränkt sind, werden sie als weniger untersuchungswürdig eingestuft. In dieser Studie wurden nur die Zechstein-Salinare betrachtet.

Die Zechstein-Salinare, die auf der Pompeckj'schen Scholle und nur im Ostteil des NSB flächenhaft verbreitet sind, weisen in der Staßfurt-Folge Steinsalzlager mit einer Mächtigkeit von bis zu 800 m (das Staßfurt Hauptsalz, z2HS) auf. Geringmächtigere Steinsalzlager sind in der Leine-Folge zu finden. Von geologischen und geochemischen Kriterien lässt sich ableiten, dass die bis in 1.000 m Tiefe vorkommenden Salzgesteine in der geologischen Vergangenheit großräumig Temperaturen bis höchstens $90\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ ausgesetzt waren.

Der Innenaufbau von Salzstöcken ist nach allen Erfahrungen hoch komplex. Infolge halokinetischer Prozesse wurden die zunächst noch im intakten Verband über der Staßfurt- und Leine-Folge (z2 und z3) lagernden, jüngeren Folgen (z4 – z7) mit angehoben, was zum Zerreißen und Zerblocken ihrer mehr elastisch und nicht fließend reagierenden nicht-chloridischen Schichtglieder führte. Dabei entstanden äußerst komplizierte Lagerungsformen, deren Faltenachsen aufgrund der Geometrie der Diapire jede beliebige Richtung einnehmen können. Häufig ist jedoch im Kern von Salzstöcken und Salzkissen das sehr reine, homogene Steinsalz der Staßfurt-Folge mit einem erheblichen Mächtigkeitsanstieg zusammengefloßen. Diese Kernbereiche weisen in vertikaler Richtung einige Kilometer Höhe sowie eine große laterale Ausdehnung auf. Als negativ ist zu bewerten, wenn der interne Aufbau eines Salzstockes durch starke Beimengungen nicht-halitischer Materials (Tonstein-Mittel, Anhydrite, Kalisalze) und Salinare des höheren Zechstein (z4 - z7) gestört ist.

Eine nennenswerte Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Substanz im Wirtsgestein Salz ist aufgrund des vernachlässigbaren Gehaltes an organischen Bestandteilen und fehlender Feuchtigkeit nicht zu erwarten.

Eine Vorerkundung eines Standortes im Salzgestein ist allein an Hand von geophysikalischen Verfahren nicht möglich. Die komplizierte Innentektonik kann nur durch Tiefbohrungen aufgeklärt werden, da sie geophysikalisch nicht zu orten ist. Da um jede Tiefbohrung ein Sicherheitspfeiler gelegt werden muss, ist die Anzahl der Bohrungen zu gering, um eine genaue Kenntnis über die interne Struktur eines Salzstockes zu erhalten. Die Innentektonik kann daher nur durch bergmännisches Auffahren von Schächten und Strecken in einem späteren Erkundungsstadium aufgelöst werden.

Niedersächsisches Becken (NSB)

Die Unterkreide-Tone sind im Niedersächsischen Becken weitverbreitet. Das NSB ist ein relativ kleines Becken mit einer durchschnittlichen Breite von 80 km und einer Länge von etwa 280 km. Südlich der Linie Braunschweig-Peine-Hannover-Neustadt-Rhaden-Bentheim sind die Unterkreide-Tone oberflächennah aufgeschlossen. Sie erreichen durch Bohrungen nachgewiesene Teufenlagen von bis zu 2.000 m und treten in einzelnen Unterkreide-Stufen mit Mächtigkeiten von bis zu 500 m auf.

Aufgrund unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten und lithologischer Wechsel ist das NSB in einen Westteil (Raum Rheine-Bentheim-Meppen-Groningen), einen Zentralteil (Raum Osnabrück-Bielefeld-Minden-Vechta-Sulingen) und einen Ostteil (Raum Hannover-Braunschweig) unterteilt. Die Grenzen der einzelnen Teilbecken verlaufen etwa entlang der Flüsse Ems und östlich der Weser. Ab der Unterkreidestufe Hauterive ist diese deutliche Dreiteilung nicht mehr vorhanden. Das zentrale und östliche Teilbecken wird zum Ostabschnitt zusammengefasst, wohingegen der westliche Teil weiterhin als Westabschnitt bezeichnet werden kann.

Die Lagerung der Unterkreide-Schichten ist annähernd horizontal bei einer flachen Topographie. Im Ostteil des Beckens sind die Lagerungsverhältnisse im Bereich der Salzkissen, Salzstöcke und Diapirrandmulden komplizierter. In Annäherung an den Nordrand (Weser-Ems-Linie) und an den Südrand (Weser- und Wiehengebirgs-Flexur) treten Bruchstrukturen innerhalb des NSB auf. Der Sedimentationsraum ist im Westteil und Ostteil durch Schwellen und Becken stark gegliedert, woraus erhebliche Mächtigkeitsschwankungen resultieren können. Im Ostteil wird dieses durch Salzkissen- und Salzstockbildung hervorgerufen.

Zurzeit der Unterkreide wirkte das NSB als stark absinkender Randtrog gerade zu als Sedimentfalle, so dass bis zu 2.000 m mächtige Sedimente abgelagert wurden. Es konnten im NSB auch von anderen Systemen bekannte, laterale Faziesunterschiede festgestellt werden. Eine sandige Randfazies ist häufig von einer mergelig-tonigen Beckenfazies zu unterscheiden. Da auf dem mitteleuropäischen Festland („Rheinische Masse“) neben oberkarbonischen Kaolintonsteinen hauptsächlich Sandsteine anstanden, die abgetragen wurden, ist die sandige Litoral(Strand-)fazies am Südrand des

Beckens besonders stark entwickelt. Sie fehlt am Nordrand des Beckens oder tritt sehr zurück, da hier quarzlieferndes Ursprungsmaterial nicht anstand.

Für jede einzelne stratigraphische Einheit der Unterkreide (Wealden – Alb) konnten Tone nachgewiesen werden, die die an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m erfüllen. Anzumerken ist, dass aufgrund Stufen übergreifender, tektonischer Ruhephasen die lithologische Varianz der Tonsteine z. T. sehr gering ist. Das Wirtsgestein ist also nicht stratigraphisch festgelegt, sondern auf eine tonige Fazies, die Stufen übergreifend sein kann. Die Valangin-, Hauterive-, Ober-Apt- und Alb-Tone der Beckenfazies sind im allgemeinen stofflich homogener aufgebaut als die Wealden-, Barrême-, Unter-Apt Tone und dadurch verhältnismäßig einfach zu charakterisieren. Kennzeichnend für die Blättertone des Wealden, Barrême, und Unter-Apt sind hohe Gehalte an Pyrit und organischen Kohlenstoffen, die auf das anoxische Bildungsmilieu dieser Sedimente hinweisen. In diesen Unterkreide-Stufen sind ausreichend organische Kohlenstoffe für eine Kohlenwasserstoff-Genese vorhanden, der Muttergesteinscharakter ist mit gut bis sehr gut zu bezeichnen. Das Kohlenwasserstoffpotential ist hoch. Die Blättertonsteine des Wealden haben, wie mehrere Erdöllagerstätten im westlichen und zentralen Teil des NSB belegen, zweifellos zur Erdölbildung beigetragen. Aufgrund des Auftretens abbauwürdiger Ressourcen (Kohlenwasserstoffvorkommen) tritt ein Nutzungskonflikt auf. Ein unabsichtliches menschliches Eindringen auch in weiterer Zukunft ist nicht auszuschließen. Die thermische Reifung der Barrême und Unter-Apt Blättertone ist noch nicht weit fortgeschritten. Sie hat gerade die beginnende Ölbildung erreicht, wie die Elementarverhältnisse der Kerogen-Typen zeigen.

In den Unterkreide-Tonen, die bis zu 5 % und mehr organische Bestandteile enthalten, kann eine Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Bestandteile für die Endlagerung von Bedeutung sein. Jedoch stehen die organischen Bestandteile der Tone sicher nicht vollständig einer mikrobiellen Zersetzung in Kohlendioxid und/oder Methan zur Verfügung. Die „thermische oder mikrobiologische“ Vorgeschichte der organischen Substanz beeinflusste die Rate und Menge einer möglichen Gasbildung.

In seismischen Profilen sind die Unterkreide-Stufen, wenn keine lithologischen Wechsel vorliegen, schwer zu unterscheiden, so dass eine großräumige Geometrie einzelner Stufen durch geophysikalische Messverfahren kaum zu erfassen ist. Es ist ein erheblicher Forschungsaufwand zu betreiben, um eine räumliche Analyse von Ton- und Siltstein-Folgen durchzuführen sowie die geophysikalische Erkundungsmethodik zu verbessern.

Süddeutsches Molassebecken

Erdgeschichtlich ist das Süddeutsche Molassebecken mit dem darin enthaltenen Opa-linuston als ein geologisch einfaches, tektonisch verhältnismäßig ruhiges Gebiet am

Rand des Einflussbereiches der Alpen zu bezeichnen. Der geologisch einfache Bau Süddeutschlands zeigt sich im generell flachen (mit ca. 5° nach ± SE) Einfallen der mesozoischen Schichten unter die keilförmig mächtiger werdende Molasse. In der Tertiärzeit setzte im Zuge der alpidischen Gebirgsbildungen eine Intensivierung der tektonischen Vorgänge ein, die mit vulkanischen Aktivitäten verknüpft waren. Jedoch ist der tertiäre Vulkanismus vornehmlich an den Oberrheingraben und die ihn begleitenden Strukturen gebunden.

Südlich der Schwäbischen Alb weist der Opalinuston die geforderte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m auf. Dort ist er in einer Tiefenlage von 300 m unter der Geländeoberfläche durch Bohrungen aufgeschlossen. Der Opalinuston hat eine beachtliche laterale Ausdehnung, ist großräumig als ausgesprochen homogen anzusehen und dadurch verhältnismäßig einfach zu charakterisieren. In der Vertikalen ist eine mikropaläontologische Gliederung möglich, allerdings ist die lithologische Heterogenität eher untergeordnet und hat daher abschätzbare, oft nur geringe Konsequenzen auf die wichtigsten Gesteinseigenschaften.

Eine nennenswerte Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Substanz ist im Opalinuston aufgrund des vernachlässigbaren Gehaltes an organischen Bestandteilen nicht zu erwarten.

In seismischen Profilen ist der Opalinuston aufgrund seines physikalischen Kontrastes zu den Rahmengesteinen (Jurensis-Mergel und Dogger β-Sandsteinen) stets klar erkennbar, so dass seine grossräumige Geometrie durch geophysikalische Messverfahren gut zu erfassen ist.

10.2 Offene Fragestellungen und Untersuchungsbedarf

Die bisherige Bearbeitung des Vergleichs eines Endlagerkonzeptes in Salz zu einem Endlagerkonzept in Ton, lässt für den Ton Defizite in mehreren Bereichen erkennen.

Ton hat im Unterschied zu den Wirtsgesteinen Salz und Granit ein gänzlich anderes Materialverhalten hinsichtlich thermo-mechanischer Einflüsse. Dazu kommt, dass Tonsteine selber hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften eine große Bandbreite überdecken. Tone sind in weicher, plastischer Form ebenso anzutreffen, wie auch in harter, spröder Form. So ist zum Beispiel im weichen Tonstein (vgl. Boom Clay) mit einem erheblichen Maß an Strecken- bzw. Hohlraumausbauten zu rechnen, die in dieser Form in den anderen Wirtsgesteinen nicht erforderlich sind. Zur Langzeitstabilisierung der Tonoberflächen gegen die Luftfeuchtigkeit der Wetter ist eine Spritzbetonauskleidung vorzusehen.

Bedenkt man die bereits vorhandenen oder geplanten Ausbauten in den Untertage-lagers in Tonformationen im europäischen Ausland, den großen Raumbedarf eines End-lagers sowie die erhöhte Verformbarkeit des Wirtsgesteins Ton bei hohen Temperatu-ren, so ist die Notwendigkeit einer detaillierten Untersuchung des Endlagerkonzeptes hinsichtlich der genannten Faktoren gegeben. Insbesondere im Vergleich zu dem Salzkonzept ist mit einem signifikant größeren Raumbedarf bei vergleichbarer Abfall-menge bzw. Wärmeeintrag zu rechnen. Alternativ dazu wäre davon auszugehen, dass die Beladung der Behälter oder die Zwischenlagerzeit signifikant erhöht werden müss-te. Da Tonformationen auf Grund des sedimentären Ursprungs in der Regel eine we-sentlich höhere flächige Ausdehnung als Mächtigkeit besitzen und Tonsteine eine ge-ringe Wärmeleitfähigkeit besitzen, ist langfristig mit einem höheren Wärmefluss in Rich-tung Hangenden und Liegenden zu rechnen als innerhalb der Formation. Dies kann z. B. zu Höhenveränderungen der Tagesoberfläche führen.

Zu untersuchen ist, inwieweit der erhebliche Wärmeeintrag durch die Einlagerung ra-dioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle in Einlagerungsfelder in einer Tonformation die Verformung von Strecken und Hohlräumen sowie deren thermische Verhältnisse wäh-rend der Betriebsphase des Endlagers beeinflusst. Auszugehen ist von einer realitäts-nahen zeitlich gestaffelten Einlagerung basierend auf dem aktualisierten Abfallauf-kommen und der entsprechenden Anlieferungsrate. Dabei sollte insbesondere die un-terschiedliche thermische bzw. thermomechanische Wirkung einer senkrechten Bohr-lochlagerung gegenüber der einer horizontalen Streckenlagerung im Tongestein detail-liert untersucht und der jeweilige Mindestraumbedarf ermittelt werden.

Ergänzend sollte der Druckaufbau durch korrosionsbedingte Bildung von Wasserstoff-gas unter den erhöhten Temperaturbedingungen abgeschätzt und der Einfluss auf die mechanische Entwicklung quantifiziert werden. In diesem Zusammenhang sollte u. a. abgeschätzt werden, welche Gasbildungsraten nötig sind, um einen relevanten Ein-fluss auf die mechanische Entwicklung zu verursachen. Als Bewertungsgrundlage soll-te hier der kritische Gasdruck dienen, dessen Erreichen ohnehin vermieden werden soll, um die Integrität der technischen Barriere nicht zu gefährden.

Die Berechnungen sind auf der Basis aktueller Stoffgesetze und Parameter inklusive ihrer Variationsbreiten durchzuführen. Auf Untersuchungen über Materialeigenschaften aus Mol, Mont Terri und Bure kann direkt zurückgegriffen werden. Im Rahmen der Va-riationsbreiten sind Mindestabstände von Behältern, Strecken, Bohrlöchern sowie die Entfernung zum Infrastrukturbereich zu ermitteln, so dass ein übermäßiger thermischer oder thermo-mechanischer Einfluss vermieden werden kann. Beispielsweise dürfen bestimmte Temperaturbedingungen (bei entsprechendem Druck) nicht überschritten werden, um Entgasungen, Schrumpfungen und damit Erhöhungen der Permeabilität des Wirtsgesteins zu vermeiden.

Auf Basis der Berechnungen ist eine vertiefte Grubengebäudeplanung für die Einlagerung durchzuführen, die auf dem entwickelten Konzept beruht. Gemäß einem aktualisierten Abfallaufkommen ist der Raumbedarf des möglichen Endlagers zu bestimmen und auf dieser Basis eine Kostenabschätzung für die unterschiedlichen Konzepte der Bohrloch- und Streckenlagerung durchzuführen.

Die Datengrundlage für Tongesteine, die als potentielle Endlagerwirtsgesteine dienen könnten ist in Deutschland gering. Für eine bessere Entscheidungsfindung hinsichtlich der Endlagerung sind standortbezogene Daten notwendig.

Als Teilziele können definiert werden:

- Auswahl von Referenzmodellgebieten auf Basis der AkEnd-Richtlinien und auf Basis der geologischen Situationen (Lithologie und Mineralogie)
- Aktualisierung von Stoffgesetzen zum thermomechanischen Verhalten von Tongesteinen in bestehenden Computerprogramme basierend auf erfolgte Untersuchungen in Tonformationen im Europäischen Ausland.
- Rechnerische Ermittlung der thermischen Entwicklung eines Endlagers in einer Tonformation und Ermittlung des Mindestraumbedarfs bei Zugrundelegung einer Auslegungstemperatur von 100 °C.
- Erstellung eines Endlager-Layouts auf Basis der Raumbedarfsermittlung für Bohrlochlagerung und Streckenlagerung.
- Quantifizierung des Einflusses des Druckaufbaus durch Gasbildung bei hohen Temperaturen auf die mechanische Entwicklung der Formation.
- Basierend auf den Untersuchung zum thermomechanischen Gesteinsverhalten sollte rechnerisch geprüft werden, inwieweit die Standsicherheit des geplanten Grubengebäudes während der Betriebsphase (Zeitraum 50 - 100 Jahre) gewährleistet werden kann.

Um belastbare Aussagen hinsichtlich Sicherheit, Technik und Kosten etc. aufstellen zu können, sind weitergehende Planungen und Auslegungen hinsichtlich Erkundungsverfahren, Einlagerungstechniken, Behälterkonzepte und Verfüll- und Verschleißmaßnahmen erforderlich.

Als weitere Teilziele im technischen Bereich lassen sich folgende Aufgaben definieren.

- Zusammenstellung und Bewertung des Standes von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Verfahren zur Suche und Erkundung eines Endlagerstandortes im Tonstein hinsichtlich notwendigem FuE-Bedarf.
- Erarbeitung, Zusammenstellung und Bewertung des Standes von Wissenschaft und Technik zur Herstellung von Schächten, Strecken und Einlagerungsbohrungen im Tonstein hinsichtlich notwendigem FuE-Bedarf.
- Entwicklung eines vertieften Endlagerreferenzkonzeptes in Tonsteinsoll auf Basis modellhafter Standortdaten unter Berücksichtigung von thermischen Berechnungen, Grubengebäudeplanungen, Transport- und Einlagerungstechnologien sowie Verfüll- und Verschlusskonzepten.
- Erarbeitung und Zusammenstellung eines Datensatzes für einen modellhaften Referenzstandort im Tonstein in Deutschland anhand von internationalen Erfahrungen und nationalen Voruntersuchungen zu möglichen Endlagerstandorten.
- Abschätzen der erforderlichen Zeitdauern und Kosten für Planung, Herstellung und Betrieb eines solche Referenzendlagers im Tonstein.

11 Literaturverzeichnis

- /1-1/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht, DEAB T30, DBE, Peine, Januar 1990
- /1-2/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, DEAB (02 E 8201), Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB, T59, DBE, Peine, 1995
- /1-3/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998
- /1-4/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 1, Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-5/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 2, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-6/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 3, Sicherheit in der Betriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-7/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 4, Sicherheit in der Nachbetriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-8/ Amelung, P., Kutowski, J.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 5, Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-9/ Engelhardt, J., Amelung, P.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 6, Geochemie, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /2-1/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998
- /2-2/ Papp, R.: GEISHA-Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Hartgestein, FZK Karlsruhe, 1997
- /2-3/ NEA/AEN - Report CC-96-1: "Water, Gas and Solute Movement Through Argillaceous Media" OECD, Paris 1996

- /3-1/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd - Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Dezember 2002
- /3-2/ Walter, R.: Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart, Stuttgart 1995
- /3-3/ Kemper, E.: The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany; In: The Boreal Lower Cretaceous: the proceedings of an International organisation, vol. 5, 327 – 344, Liverpool 1973
- /3-4/ Schmidt, R.: Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger a) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg: [Thesis] – Planetary Stratigraphy, Ser. E (Earth), 1: 110 S., 3 Taf., 15 Abb.; Tübingen 1996
- /3-5/ Hunsche, U. & SCHULZE, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz; Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 8/9 1994
- /3-6/ Köster, R. & Bechthold W.: Thermische und thermomechanische Effekte bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen; Atomwirtschaft 1982
- /3-7/ Bel, J. & Bernier, F.: Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HLW); Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 2001
- /3-8/ Tissot, B. P. & Welte, D. H.: Petroleum formation and occurrence. A new approach to oil and gas exploration, Springer 1984
- /3-9/ Jaritz, W.: Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands; Geol. Jb., A 10, 77 S., Hannover 1973
- /3-10/ Herrmann, A. G.: Geochemische Prozesse in marinen Salzablagerungen: Bedeutung und Konsequenzen für die Endlagerung radioaktiver Substanzen in Salzdiapiren; Z. dt. geol. G., 131, 433 – 459, 1 Abb., 2 Tab., Hannover 1980
- /3-11/ Braitsch, O.: Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten; 232 S., Springer-Verlag, Berlin – Göttingen – Heidelberg 1962
- /4-1/ ONDRAF/NIRAS “Technical overview of the SAFIR 2 report”, NIROND 2001-05 E, December 2001
- /4-2/ ONDRAF/NIRAS “SAFIR 2 Report”, NIROND 2001-06 E; December 2001
- /4-3/ Ch. Cosemans, A. DeGoeyse “The Belgian Nuclear Waste Inventory”, NIRAS/ONDRAF, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998

- /4-4/ J. B. Grupa and others “Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report”, EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000
- /4-5/ B. Kursten, F. Druyts, P. Van Iseghem, „Methodology in corrosion testing of container materials for radioactive waste disposal in a geological clay repository“, Proceedings ASME 2001
- /4-6/ J. Bel, F. Bernier “Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HAW), Proceedings ASME 2001
- /4-7/ Bernier, F. & Neerdael, B. (1996): Overview of in-situ thermomechanical experiments in clay: Concept, results and interpretation.- Engineering Geology 41 (1996), p. 51 – 64
- /4-8/ SCK/CEN (1996): Hades – Tour Guide Notebook.-4th Edition, February 1996.
- /4-9/ J. Verstricht, M. Demarche, D. De Bruyn, „Extension of the underground research facility for real-scale demonstration“, Proceedings Tucson 2001
- /4-10/ F. Bernier “The extension of the HADES URF and associated R&D work”, Topical Day, Mol, Belgium, May 21, 2002
- /4-11/ G. Volckaert, EC concerted action Retrievability – SCK contribution, Brussel 23-24 June 1998 (unveröffentlicht)
- /4-12/ A. Sneyers, G. Volckaert, B. Neerdael “The Belgian research, development and demonstration program on the geological disposal of long-lived and high-level radioactive waste and spent fuel in a clay formation: Status and trends”, Proceedings, Tucson, 2001
- /4-13/ Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA); Schlussbericht; Bern, Januar 2000
- /4-14/ J. B. Grupa and others “Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report”, EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000
- /4-15/ 1999 McKinley I.G., Russell Alexander W., Integration of TRU disposal studies in Switzerland, Proceedings WM’02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson
- /4-16/ CROP “Swiss Country Annex for WP1 Design and construction of engineered barriers”
- /4-17/ www.nagra.ch/english/lager/lagerhaa.htm
- /4-18/ Fritschi M., Zuidema P., Status of the Swiss radioactive waste disposal programme; Proceedings, ASME 1999

- /4-19/ NAGRA, Projektstudie für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in tiefliegenden geologischen Formationen sowie für die Zwischenlagerung; Technischer Bericht 80-02; Dezember 1980
- /4-20/ M. Hugli, Alternative Options for the management of radioactive waste in Switzerland; Nirex Waste Management Options Workshop, 12/13th June 2002
- /4-21/ A. Nold "The Swiss HAW/ILW repository in Opalinus clay, programme, layout and emplacement of spent fuel canisters", Proceedings DisTec 2000, Berlin
- /4-22/ HSK-Richtlinie R-21 Nov. 1993, Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- /4-23/ P.A. Smith, J. W. Schneider, P. Zuidema „Use of graphical presentational techniques and insight models to illustrate the roles of the different barriers in repository safety and place model-chain results in perspective”, Proceedings, ASME 1999
- /4-24/ atw, Heft 10, Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Oktober 2002, S. 637-638
- /4-25/ ANDRA; Rapport de la Mission sur la Méthodologie de l'Inventaire des Déchets Radioactifs; Tome II, Annexe 7 « Des Ordres de Grandeur »; 11 mai 2000
- /4-26/ <http://www.sfen.fr>
- /4-27/ <http://www.andra.fr>
- /4-28/ <http://www.cea.fr>
- /4-29/ CROP Project; Andra WP1 und WP2; Annexe, 13. August 2001
- /4-30/ M. Allegre, Nuclear Waste Management, 1999, S. 51-73
- /4-31/ Ch. Bateille, R. Galley, L'aval du cycle nucléaire- Tome I : Etude Générale, - Rapport de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques N° 492, Paris, 1998
- /4-32/ ANDRA, Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, December 2001
- /4-33/ P. Drasdo „Kosten der Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Schriften des energiewirtschaftlichen Instituts Bd 58, München 2001
- /4-34/ Fifth General Radioactive Waste Plan. Text Approved by the Cabinet Meeting Held on 31th July 1999. Ministerio de Industria y Energía, Spain, 1999
- /4-35/ Proyecto AGP Almacenamiento Geológico Profundo Fase 2. AGP Arcilla – Concept de Referencia. Doc. 48-1P-M-OOA-01, April 1997

- /4-36/ CROP (European Commission's Cluster Repository Project), Country Annex for WP 1, Spain
- /4-37/ AGP Granito. Concepto de Referencia, 48-1P-M-00E-01, Informe Final, 1997
- /5-1/ Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ Abschlussbericht, 9G/211311/BB/BY/0003/00 vom 13.03.1998
- /5-2/ H. Spilker; Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany, Proceedings DisTec 1998, Hamburg, September 1998
- /5-3/ Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichts über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben vom Mai 1983, Salzgitter, April 1990, ET-2/90
- /5-4/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Rdschr. D. BMI vom 20.04.1983 – RS – AGK3 – 51579/2
- /5-5/ Schrimpf, C.: Thermische Simulation der Streckenlagerung. Abschlußbericht zur Phase II, DEAB T37 , Peine, Juli 1991
- /6-1/ Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd - Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Dezember 2002
- /6-2/ Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M., Krull, P.: Geowissenschaftliche Mindestanforderungen im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Überprüfung der Anwendbarkeit bei Tongesteinsvorkommen in Deutschland; BGR, Berlin
- /6-3/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz – AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814), Neufassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Gesetz vom 22. April 2002 (BGBl. I S. 1351)
- /6-4/ Brennecke, P., Kugel, K.: Bundesamt für Strahlenschutz; Abfall radioaktiver Abfälle in Deutschland, Abfallerhebung für das Jahr 2000; BfS-SE 02/04, Salzgitter, April 2004

- /6-5/ Standortunabhängige Einlagerungsplanung auf der Basis der Schachtförderkapazität einer 85 t-Schachtförderanlage, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, Peine, September 2001, unveröffentlicht
- /6- 6/ Papp R. GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salzgestein und Hartgestein Projektträger des BMBF für Entsorgung Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1997, FZKA - PTE Nr. 3
- /6-7/ IAEA – International Atomic Energy Agency: The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 – F, IAEA, Vienna, 1995
- /6-8/ IAEA – International Atomic Energy Agency: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management, Vienna, 05.09.1997
- /6-9/ ÜBEREINKOMMEN: 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, 1997
- /6-10/ Ontario Power Generation (OPG): Nuclear Waste Management, Report No: 06819-REP-01200-10115-R00, September 2003
- /6-11/ ONDRAF/NIRAS “SAFIR 2 Report”, NIROND 2001-06 E, December 2001
- /6-12/ Erhardt, K.: Entwicklung und Eigenschaftsuntersuchung von schüttfähigen Bentonit-Zuschlagstoff- und Bentonitgemischen für den untertägigen Einsatz als Dichtmaterial, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2001
- /6-13/ BMU: Endlagerung radioaktiven Abfalls. In BMU Aktuell. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2001
- /6-14/ Pusch, R.: Permeability of highly compacted bentonit. SKBF / KBS Teknisk Rapport 81-09, 1981, SKB, Stockholm, Schweden, 1981
- /6-15/ Lagaly G.: Reaktionen der Tonminerale. In Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt (ed. K. Jasmund und G. Lagaly), pp. 89-167. Steinkopff Verlag, 1993

- /6-16/ Couture, R.A.: Rapid increase in permeability and porosity of bentonite-sand-mictures due to alteration by water vapor. In: Jantzen (Ed.): Scientific Basis for Nuclear Waste Management VIII. Mat. Res. Soc., Vol. 44, 1985
- /6-17/ Oscarson, D.W., Dixon, P.A. & Gray, M.N.: Clay longevity studies for the Canadian Nuclear fuel waste Management Program, Workshop on artificial clay barriers for high level waste repositories, Lund, 1988
- /6-18/ Bucher, F., Spiegel, U.: Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten, Technischer Bericht, 84-18, Nagra, Schweiz, 1984
- /6-19/ Hölting, B.: Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 121, 19-44, 1970
- /6-20/ Sitz, P., Keßler, J. & Schmidt, W.: Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (Literaturstudie); Nagra-Technischer Bericht/Schweiz 93-37, 1992
- /6-21/ Honty, M., Uhlík, P., Sucha, V., Caplovicova, M., Francú, J., Clauer, N. & Biron, A.: Smectite-to-illitealteration in salt-bearing bentonites (The East Slovak Basin). Clays and Clay Minerals, Vol. 52, 533-551, 2004
- /6-22/ Engelhardt, I.: Experimental and Numerical Investigations with Respect to the Material Properties of Geotechnical Barriers; Dissertation der Geowissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2004
- /6-23/ Meyer, D. & Howard, J.J.: Evaluation of Clays and Clay Minerals for Application to Repository Sealing. Technical Report ONWI-486, Battelle Memorial Institut, Columbus, Ohio, 1983
- /6-24/ Köckritz, V.; Sitz, P.; Behrend, J.; Gruner, M.: Tone, Asphalte, Quellzemente als Materialien für Verschlußbauwerke Arbeitsgespräch "Verschlußbauwerke für untertägige Hohlräume", Freiberg, 27. und 28. 5. 1993, Manuskript und andere Materialien zu Vorträgen und Diskussionen, 1993
- /6-25/ Pusch, R. & Svemar, Ch.: CROP – a project for comparative description of national concepts for disposal of radioactive waste; in: Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Workshop Proceedings, Oxford, UK, 2002
- /6-26/ Kokotov, J.A.: Ionenaustauscher und Ionenaustausch; Leipzig, 1984
- /6-27/ Sitz, P., Gruner, M. & Rumphorst, K.: Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar; Kali und Steinsalz Nr. 3, S. 6 – 13, 2003

- /8-1/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 3, Sicherheit in der Betriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /8-2/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 -RS-AGK3-515790/2 -
- /8-3/ Gesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie und den Schutz gegen die Gefahren (Atomgesetz AtG) vom 15.07.1985 (BGBl. I, 5. 1565), zuletzt geändert d. Art 8 des Gesetzes vom 06.01.2004 (BGBl. I, S. 2)
- /8-4/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, 5. 1714) mit Berichtigung vom 22.04.2002 (BGBl. I, 5. 1459), zuletzt geändert d. Art. 2 der Verordnung vom 18. Juni 2002 (BGBl. I, S. 1869, (1903))
- /8-5/ Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) vom 30.06.1993, (GMBI. Nr. 29 5. 502), ergänzt um die Anhänge B und C vom 20.12.1995 (GMBI. 1996, Nr. 9/10, 5. 195)
- /8-6/ H.-H. Remagen; B. Richter; H. Kranz; G. Stier-Friedland: Internationale Kernmaterialüberwachung (Safeguards) bei der Direkten Endlagerung in relevanten geologischen Formationen Deutschlands, Berlin 2002
- /9-1/ Ranft, M; Wollrath, J.: Timescales in the long-term safety assessment of the Morsleben repository, Germany, in: The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories, OECD/NEA Workshop Proc., Paris, France, 16-18. April 2002
- /9-2/ Ehrlich, D.; Schulze, H.: Vergleich der Endlagerung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle in tiefen geologischen Schichten, Strahlenschutzpraxis 4, 2003
- /9-3/ Pieper et al.: Vergleich Untertagedeponien – Endlager Vergleichende Untersuchungen zu Gefährdungspotential, Deponiesicherheit und regulatorischen Anforderungen bei der Endlagerung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-2002-599, März 2002
- /9-4/ Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13.07.1990, in der derzeit gültigen Fassung

- /9-5/ DIN 1054, Beiblatt Baugrund, zulässige Belastungen des Baugrunds, Erläuterungen, November 1976
- /9-6/ Preuss, J. et al.: Post Closure Safety of the Morsleben Repository, Proc. WM'02 Conf., Feb. 24-28, Tucson, AZ
- /9-7/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung), vom 18. März 1997, BGBl. I S.542
- /9-8/ Brennecke, P.: Endlagerung: Grundwasserrelevante Aspekte, atw, 43. Jahrgang, Heft 12, Dezember 1998
- /9-9/ Lawa-Arbeitsgruppe, Grundwasserschutz bei Abfallverwertung und Produkteinsatz: Aktualisierte Prüfwerte der Lawa-Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, Stand 2.12.1996
- /9-10/ Bekanntmachung der Neufassung der Trinkwasserverordnung vom 5.12.90, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil I, Nr. 66, s.2612.2629
- /9-11/ Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Eignung von Fließgewässern für die Trinkwasserversorgung, DVGW-Regelwerk, Technische Mitteilung Merkblatt W251, Stand August 1996
- /9-12/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, Stand Oktober 1993
- /9-13/ Verordnung über den Schutz von Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, S. 1714 ber. 2002, S. 1459) zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 18.06.2002 (BGBl. I, S. 1869, 1903)
- /9-14/ ICRP, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, Publication 46, 1985
- /9-15/ GRS, Sicherheitskriterien für die Endlagerung in einem Bergwerk – überarbeitete Diskussionsgrundlage – GRS – A – 2990, Januar 2002
- /9-16/ Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlagersicherheitskriterien, 5.-6.12.2002
- /9-17/ Storck, R.; Becker, D. A.: The SPIN project: Safety and performance indicators in different time frames, in: The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories, OECD/NEA Workshop Proc., Paris, France, 16-18. April 2002

- /9-18/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd - Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002
- /9-19/ Closs, K.-D.: Anforderungen an Plutonium-Abfallprodukte aus der Sicht der Endlagerung, Physiker Tagung, Dresden, 2000
- /9-20/ Greenspan, E., Vujic, J. and Burch, J.: Neutronic analysis of critical configurations in geologic repositories: I - Weapons-grade plutonium. Nuclear Science and Engineering, 127: 262-297, 1997
- /9-21/ Kastenberg, W.E., Peterson, P.F., Ahn, J. and al, e.: Considerations of autocatalytic criticality of fissile materials in geologic repositories. Nuclear-Technology, 115(3): 298-310, 1996
- /9-22/ Vujic, J. and Greenspan, E.: Neutronic analysis of critical configurations in geologic repositories: II - Highly Enriched Uranium. Nuclear Science and Engineering, 129: 1-14, 1998
- /9-23/ Kienzler, B., Loida, A., Maschek, W., Rineiski, A. Is Criticality a Matter of Concern for Gorleben? 10th IHLRWM Conference, Las Vegas, March 30-April 3, 2003
- /9-24/ Kienzler, B., Loida, A., Maschek, W. and Rineiski, A.: Mobility and criticality of plutonium in a repository. Nuclear Technology, 143(9): 309-321, 2003
- /9-25/ Heinicke, W., Krug, H., Thomas, W., Weber, W. and GMAL, B.: Handbuch zur Kritikalität, GRS, Garching, 1985
- /9-26/ NAGRA: Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht (NTB) 02-03, Wettingen, Schweiz
- /9-27/ Stephan Schmidt KG: Aspekte der Geochemie im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Tongestein, 2004
- /9-28/ INE: Sicherheitstechnische Einzelfragen. Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioactive Abfälle. Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. Abschlussbericht, Teil 1: Text-Teil. Altmaier, M.; Brendler, V.; Bosbach, D.; Kienzler, Chr.M.; Neck, V. & Richter, A., Inst. f. Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe, FZK-INE 002/04, 2004
- /9-29/ GRS: Sorptionsdatenbank SODA. Datenbank zur Bestandsaufnahme und Bewertung geochemischer Informationen zum Verhalten von Abfallinhaltsstoffen im Deckgebirge einer UTD/UTV. Brassler, Th.; Mönig, J.; Scherschel, C. & Veerhoff, M., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-182, ISBN 3-931995-50-X, 2002

12 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 3-1:	Tektonische Gliederung der Norddeutschen Senke mit der Pompeckj'sche Scholle und dem Niedersächsischen Tektogen im Nordwesten Deutschlands /3-6/	6
Abbildung 3-2:	West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens /3-7/.	8
Abbildung 3-3:	Geologische Übersichtskarte der Molasse-Zone (Außeralpines Molassebecken auf dem Gebiet von Deutschland = Süddeutsches Molassebecken) /3-6/.	10
Abbildung 4-1:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	18
Abbildung 4-2:	Endlagerbehälter für Primärbehälter mit verglasten HAW	19
Abbildung 4-3:	Endlager für verglaste HAW /4-5/	23
Abbildung 4-4:	Schnitt einer Endlagerungsstrecke für verglaste HAW /4-5/	24
Abbildung 4-5:	Endlager für ausgediente Brennelemente	25
Abbildung 4-6:	Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /4-5/	26
Abbildung 4-7:	Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente MOX-Brennelemente /4-5/	26
Abbildung 4-8:	Untertagelabor HADES–Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /2-17/	28
Abbildung 4-9:	Keilblocksystem für den Streckenausbau /2-17/	28
Abbildung 4-10:	HAW-Kokille in Endlagerabschirmbehälter	38
Abbildung 4-11:	Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung	40
Abbildung 4-12:	Endlager für HAW/ILW im Opalinuston	41
Abbildung 4-13:	Layout des Endlagers im Opalinuston	42
Abbildung 4-14:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	53
Abbildung 4-15:	Endlagercontainer für verglasten HAW	55
Abbildung 4-16:	Schematisches Layout des Endlagers (Ausschnitt)	57
Abbildung 4-17:	Einlagerungszelle für verglasten HAW	59
Abbildung 4-18:	Einlagerungszelle für ausgedienten Kernbrennstoff	61
Abbildung 4-19:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente für die Endlagerung in Ton in Spanien	71

Abbildung 4-20:	Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle für die Endlagerung in Ton in Spanien	72
Abbildung 4-21:	Endlagerbehälter und Abschirmbehälter für den Transport von Endlagerbehältern nach Untertage bei der Endlagerung in Ton in Spanien	73
Abbildung 4-22:	Spanien - Endlager-Layout	75
Abbildung 4-23:	Spanien - AGP Granit - Verschlusskonzept	77
Abbildung 5-1:	Strecke im Salz	80
Abbildung 5-2:	Kfz-Werkstatt mit Anker und Netzen	80
Abbildung 5-3:	Beraubung der Firste	81
Abbildung 5-4:	POLLUX-10-DWR-U-BE-Endlagerbehälter /5-2/	84
Abbildung 5-5:	Brennstabkokille 3 (BSK 3)	85
Abbildung 5-6:	COGEMA-HAW-Kokille	86
Abbildung 5-7:	Feldaufteilung für wärmeentwickelnde Abfälle	88
Abbildung 6-1:	Schachtanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe –343 m) mit Anker-/ Spritzbetonausbau	94
Abbildung 6-2:	Schachtanlage Konrad - Ehemalige Untersuchungsstrecke (Teufe –541 m) mit geschraubten Stahlbögen und Anker-/Spritzbetonausbau in der Firste	95
Abbildung 6-3:	Zweischaliger, bewehrter und wasserundurchlässiger Spritzbetonausbau im Dogger in ca. 1000 m Teufe	95
Abbildung 6-4:	POLLUX-3 - Endlagerbehälter	101
Abbildung 6-5:	Bentonitummanteltes Endlagergebäude HAW-Kokille	102
Abbildung 6-6:	Bentonitummanteltes Endlagergebäude	103
Abbildung 6-7:	Querschnitt durch die Einlagerungsstrecke für POLLUX-3	104
Abbildung 6-8:	Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für HAW-Kokillen	105
Abbildung 6-9:	Querschnitt durch die Bohrlochbeschickungsstrecke und Bohrloch für BSK 2	106
Abbildung 6-10:	Transport- und Einlagerungsstrecken POLLUX-3	108
Abbildung 6-11:	Endlager für POLLUX-3	109
Abbildung 6-12:	Bohrlochbeschickungsstrecken für HAW	110
Abbildung 6-13:	Einlagerungsbereich für HAW-Kokillen	111
Abbildung 6-14:	Bohrlochbeschickungsstrecken für BSK 2	113

Abbildung 6-15: Einlagerungsbereich für BSK 2	114
Abbildung 7-1: Endlager in Ton – POLLUX-3 Streckenlagerung und HAW-Kokillen Bohrlochlagerung	136
Abbildung 7-2: Endlager in Ton – HAW-Kokillen und BSK-2-Bohrlochlagerung	138

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Belgien - Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“	16
Tabelle 4-2:	Belgien – Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Direkte Endlagerung“	17
Tabelle 4-3:	Belgien - Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“	20
Tabelle 4-4:	Belgien – Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Direkte Endlagerung“	21
Tabelle 4-5:	Wärmeleitfähigkeit der Barrieren	31
Tabelle 4-6:	Kostenabschätzung für ein Endlager in Boom-Ton (Stand 1997, Preise, Stand 2000) /4-4/	34
Tabelle 4-7:	Abfallmengengerüst HAW und LL-ILW	36
Tabelle 4-8:	Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 1)	47
Tabelle 4-9:	Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 2)	47
Tabelle 4-10:	ANDRA - Vorläufiges Inventar an HAW/langlebigen radioaktiven Abfällen	48
Tabelle 4-11:	Literaturangaben zum Aufkommen an HAW und ausgedientem Kernbrennstoff in Frankreich	49
Tabelle 4-12:	Endlagerinventar	50
Tabelle 4-13:	Primärbehälter für Abfallkategorie Brennelemente (Abfallkategorie C)	51
Tabelle 4-14:	Primärbehälter für verglaste Abfälle (Abfallkategorie C)	54
Tabelle 4-15:	Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle	54
Tabelle 4-17:	Abmessungen und Masse des gefüllten Endlagerbehälters für verglaste Abfälle (C1 - C4)	55
Tabelle 4-16:	Restwärmentwicklung und Zwischenlagerzeit der Primärbehälter mit verglasten Abfällen	56
Tabelle 4-18:	Kosten des französischen Endlagersystems	67
Tabelle 4-20:	Spanien - Inventar eines geologischen Endlagers	68
Tabelle 4-21:	Planungsgrundlage für ein geologisches Endlager in Spanien	69
Tabelle 4-22:	Wärmeleistung eines Referenzbrennelementes als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme	74

Tabelle 5-1:	Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfall aus Wiederaufarbeitung	82
Tabelle 5-2:	Basis-Szenarium - Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung nach Gebindealternativen	82
Tabelle 6-1:	Prognostizierte Abfallgebände-Volumina für wärmeentwickelnde Abfälle bis zum Jahr 2030	96
Tabelle 6-2:	Gebindeanzahl wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von der Herkunft	97
Tabelle 6-3:	Mengengerüst wärmeentwickelnder Abfälle für die Direkte Endlagerung (POLLUX-3-DWR oder BSK 2) und Anzahl der HAW-Kokillen	97
Tabelle 7-1:	Wirtsgesteins- und konzeptabhängig erforderliche Endlagerflächen	137
Tabelle 2-1:	Stoffe/Verbindungen und zugehörige Prüfwerte/Grenzkonzentrationen [g/l]	153
Tabelle 9-2:	Zusammenfassung der Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein (Teil 1)	159
Tabelle 9-3:	Zusammenfassung der Kritikalitätsanalysen für die Endlagerung in Steinsalz bzw. in Tongestein (Teil 2)	160
Tabelle 9-4:	Vergleich der kritischen Volumina und kritischen Massen für MOX im homogenen Wasser- bzw. Ton-System (MX 80)	161

14 Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BE	Brennelement
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BNFL	British Nuclear Fuels plc.
BSK	Brennstabkockille
COGEMA	Compagnie Générale de Matières Nucléaires
CSD-C	Colis Standard de Déchets Compactés
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DWR	Druckwasserreaktor
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A.
EWN	Energiewerke Nord
FKZ	Förderkennzeichen
FRMII	Forschungsreaktor München
FuE	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GEIST	Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein
GWd/tSm	Gigawattage pro Tonne Schwermetall (Abbrand)
HAW	High Active Waste
HLW	High Level Waste
ILW	Intermediate Level Waste
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
KKW	Kernkraftwerk
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LLW	Low Level Waste
LWR	Leichtwasserreaktor
MOX	Mischoxid
MTR2	CASTOR – Behältertyp
NSB	Niedersächsisches Becken
NSB	Niedersächsisches Becken

ONDRAF/ NIRAS	Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies
PKA	Pilotkonditionierungsanlage
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SAM	Systemanalyse Mischkonzept
SCK CEN	Studiecentrum voor Kernenergie-Centre d'étude de L'Energie Nucléaire
SEK	Systemanalyse Endlagerkonzepte
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
tSm	Tonne Schwermetall
U	Uran
UOX	Uranoxid
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe

15 Verzeichnis der Anlagenbände

- A1 Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton
- A2 Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton
- A3 Sicherheit in der Betriebsphase
- A4 Sicherheit in der Nachbetriebsphase
- A5 Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens
- A6 Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Geochemie