

**Entwicklung und Umsetzung von
technischen Konzepten für geologische
Endlager in allen Wirtsgesteinen**

EUGENIA

AP 5 - Technische Endlagerkonzepte

DBE_{TEC}
DBE TECHNOLOGY GmbH

**Entwicklung und Umsetzung von
technischen Konzepten für geologische
Endlager in allen Wirtsgesteinen**

EUGENIA

AP 5 - Technische Endlagerkonzepte

J. Ziegenhagen

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

September 2008

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02 E 10346 von DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Endlagerung in Granit	9
2.1	Schweden	9
2.1.1	Endlagerinventar	10
2.1.2	Endlagerbehälterkonzept	10
2.1.3	Endlagerkonzept	13
2.1.4	Transport- und Handhabungssystem	18
2.1.5	Auffahrtechnik	20
2.1.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	20
2.1.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	21
2.1.8	Aufwand- und Kostenbewertung	22
2.2	Finnland	22
2.2.1	Endlagerinventar	23
2.2.2	Endlagerbehälterkonzept	24
2.2.3	Endlagerkonzept	26
2.2.4	Transport- und Handhabungssystem	30
2.2.5	Auffahrtechnik	30
2.2.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	31
2.2.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	33
2.2.8	Aufwand- und Kostenbewertung	35
3	Endlager in Tongestein	37
3.1	Belgien	37
3.1.1	Endlagerinventar	37
3.1.2	Endlagerbehälterkonzept	39
3.1.3	Endlagerkonzept	42
3.1.4	Transport- und Handhabungssystem	49
3.1.5	Auffahrtechnik	50
3.1.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	52

3.1.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	54
3.1.8	Aufwand- und Kostenbewertung	57
3.2	Frankreich	58
3.2.1	Endlagerinventar	59
3.2.2	Endlagerbehälterkonzept	61
3.2.3	Endlagerkonzept	67
3.2.4	Transport- und Handhabungssystem	75
3.2.5	Auffahrtechnik	79
3.2.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	81
3.2.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	83
3.2.8	Aufwand- und Kostenbewertung	85
3.3	Schweiz	86
3.3.1	Endlagerinventar	87
3.3.2	Endlagerbehälterkonzept	87
3.3.3	Endlagerkonzept	89
3.3.4	Transport- und Handhabungssystem	95
3.3.5	Auffahrtechnik	97
3.3.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	97
3.3.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	99
3.3.8	Aufwand- und Kostenbewertung	100
4	Endlagerung in einer Salzformation - Deutschland	101
4.1	Endlagerinventar	101
4.2	Endlagerbehälterkonzept	102
4.3	Endlagerkonzept	108
4.4	Transport- und Handhabungssystem	116
4.5	Auffahrtechnik	119
4.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	119
4.7	Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik	122
4.8	Aufwand- und Kostenbewertung	123
5	Zusammenfassung	125

Tabellenverzeichnis	129
Abbildungsverzeichnis	131
Abkürzungsverzeichnis	137
Literaturverzeichnis	141

1 Einleitung

Beim Betrieb von Leistungsreaktoren fallen ausgediente Brennelemente an, die entweder direkt oder nach deren Wiederaufarbeitung als hochradioaktiver verglaster Abfall einer Entsorgung/endlagerung zugeführt werden müssen. Des Weiteren fallen aus dem Betrieb und der Stilllegung von KKW weitere hochaktive Abfälle an. Dieser Problematik haben sich die meisten der KKW-betreibenden Länder gestellt sowie auch einige Länder, bei denen derartige Abfälle z. B. beim Betrieb von Forschungsreaktoren anfallen. Von der IAEA empfohlen und auch international favorisiert ist für diese Abfälle die Einrichtung von Endlagern in tiefen geologischen Formationen, insbesondere im Salz, im Ton und in Magmatiten (hauptsächlich granitisches Gestein).

International gibt es Konzepte und Planungen für dieendlagerung von hochradioaktiven und wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, insbesondere aus Leistungsreaktoren und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente, in unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Die Auswahl von Standorten und des Wirtsgesteins tragen im hohen Maße den nationalen, insbesondere den geologischen Besonderheiten, Rechnung. Tabelle 1-1 zeigt eine Übersicht über bekannte internationale Endlagerlagerkonzepte in geologischen Formationen bezüglich der Auswahl des Wirtsgesteins.

Tabelle 1-1: Übersicht über internationale Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bzgl. der Auswahl des Wirtsgesteins

Land	Standort	Abfallart	Wirtsgestein	Bemerkung
Belgien	Mol-Dessel	HAW, BE	Boom-Ton	
Deutschland	Gorleben	HAW, BE	Salz	
Finnland	Olkiluoto	BE	Granit	
Frankreich	Meuse/Haute Marne	HAW, BE	Callovo-Oxford-Ton	
Japan	-	HAW	Sediment, Kristallin	Beide Formationen werden erwogen
Kanada	-	BE	Kristallin	
Niederlande	-	HAW, BE	Salz, Ton	BE Forschungsreaktor; Beide Formationen werden erwogen
Russland	Krasnojarsk	HAW, BE	Granit	
	“Mayak” (Ural)	HAW	Porphyrit	
Schweden	-	BE	Granit	
Schweiz	-	HAW, BE	Opalinuston	
Spanien	-	HAW, BE	Granit, Ton	Beide Formationen werden erwogen
USA	Yucca Mountain	BE, HAW	Tuff	
	Carlsbad, New Mexico	Transuran-Abfälle	Salz	

Der Entwicklungsstand der Endlagerprojekte ist sehr unterschiedlich und reicht von der Erarbeitung konzeptioneller Pläne und beginnender geologischer Erkundungen zur

Standortvorauswahl bis zu abgeschlossenen Konzepten und bereits ausgewählten Endlagerstandorten.

In Deutschland gibt es eine entsprechende Planung für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Steinsalzformationen. Im Rahmen der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ wurden in Vorkonzepttiefen Planungen für ein Endlager in einer tiefen Steinsalzformation erarbeitet. Nachdem seitens der Bundesregierung Ende der 90er Jahre entschieden wurde, auch alternative Wirtsgesteine zu untersuchen, traten Überlegungen zur Endlagerung in Tonformationen weiter in den Vordergrund.

Nachfolgend werden in einzelnen Ländern entwickelte bzw. in Planung befindliche Konzepte für HAW/BE-Endlager in Ton, Granit und Salz beschrieben und nach Wirtsgesteinen gegliedert zusammengestellt. Im Vordergrund stehen dabei Fragestellungen zu folgenden Themen:

- Abfallart und -menge
- Konzepte für Endlagerbehälter
- Beschreibung der Endlagerkonzepte
- Auslegung des Grubengebäudes (thermisch, mechanisch, radiologisch)
- Transportsysteme und Komponenten für den Abfalltransport von über Tage ins Endlager
- Einlagerungskonzepte und -technologien (behälter- und wirtsgesteinsspezifisch)
- Verfüll- und Verschlusskonzept
- Erreichter Stand der Planung bzw. der Realisierung
- Aufwands- und Kostenbewertung

Der Schwerpunkt der Bearbeitung liegt auf den Ländern, deren Endlagerprogramme für Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente am weitesten fortgeschritten sind. Das sind im einzelnen folgende Länder:

- Wirtsgestein Granit: Finnland, Schweden
- Wirtsgestein Ton: Belgien, Frankreich, Schweiz
- Wirtsgestein Salz: Deutschland

2 Endlagerung in Granit

2.1 Schweden

In Schweden ist keine Wiederaufarbeitung der ausgedienten Brennelemente vorgesehen. Die Grundkonzeption Schwedens für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sieht vor, dass kurzlebige schwach- und mittelaktive radioaktive Betriebsabfälle in das Endlager SFR verbracht werden. Der ausgediente Kernbrennstoff soll nach einer Abklingzeit an den Standorten der KKW und Zwischenlagerung im zentralen Lager für ausgediente Brennelemente (CLAB) in ein geologisches Endlager im Granit endgelagert werden (s. Abbildung 2-1).

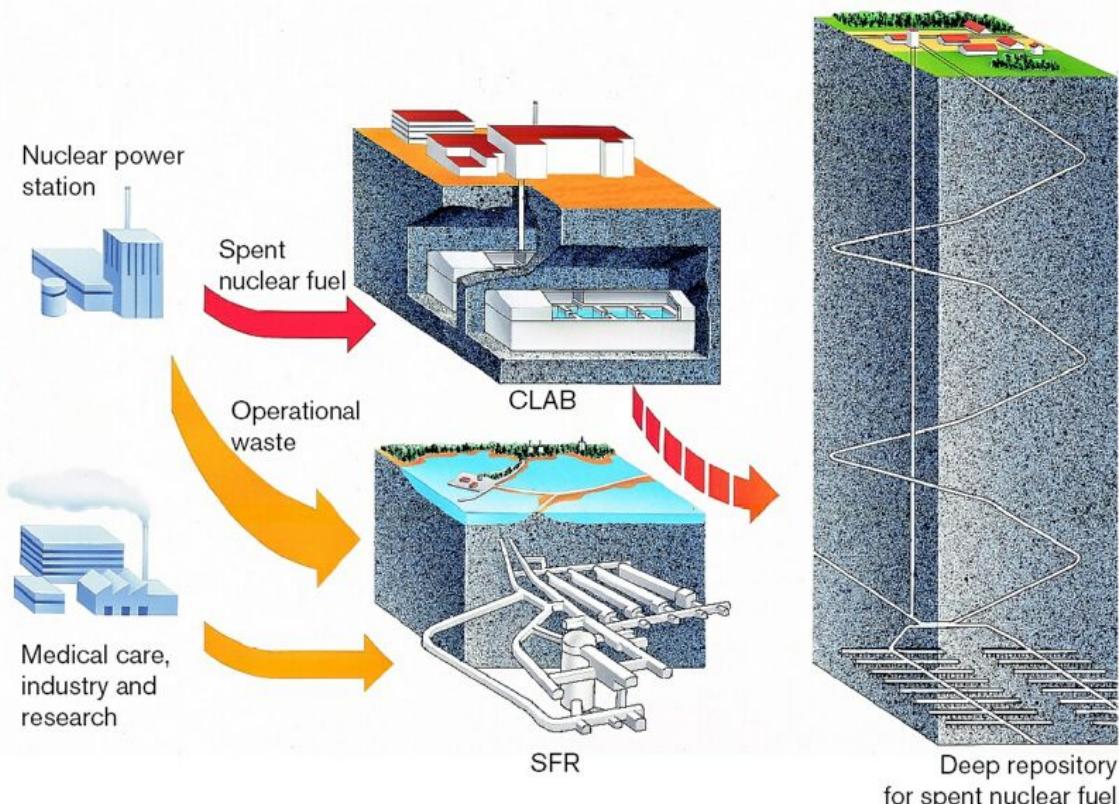


Abbildung 2-1: Schweden – Grundkonzept der Entsorgung radioaktiver Abfälle /2-1/

Seit 2002 werden zwei potentielle Standorte bezüglich ihrer Eignung für die Errichtung eines geologischen Endlagers für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in einer Granitformation untersucht. Eine Auswahl des Endlagerstandortes soll bis 2009 erfolgen /2-2/.

In den gesetzlichen Regelungen Schwedens sind keine Festlegungen bezüglich einer Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle enthalten. Es sind jedoch von der SKI und SSI Verordnungen bezüglich einer Rückholbarkeit erlassen worden, die besagen, dass, wenn ein Eingriff in das Endlager erfolgen soll oder Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung vorgesehen werden, eine Sicherheitsbewertung dieser Maßnahmen zu erarbeiten und den Kontrollorganen vorzulegen ist.

SKB hat entsprechend den Vorgaben der Nationalen Behörde für ausgedienten Kernbrennstoff /2-3/ Untersuchungen bezüglich der Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes durchgeführt, die von einer stufenweisen Einlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes ausgehen:

- Errichtung und Betrieb eines Untertagelabors im Hartgestein, wo Endlagertechniken getestet werden können und eine Beobachtung der Funktionsfähigkeit der technischen Barrieren gewährleistet werden kann.
- Errichtung eines Demonstrationsendlagers mit ca. 5 – 10 % des gesamten Endlagerinventars mit entsprechendem Monitoring des Endlagersystems. Nach Einlagerung von ca. 200 – 400 Containern soll eine Bewertung der Einlagerung erfolgen und bei positiver Einschätzung wird die Einlagerung fortgesetzt.
- Einlagerung in das eigentliche Endlager.

Die zur Rückholbarkeit der Container mit ausgedienten Brennelementen durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einem gewissen Aufwand eine Rückholung zu jeder Phase des Endlagerprozesses möglich ist, solange die radioaktiven Abfälle im Gebinde eingeschlossen sind /2-4/

2.1.1 Endlagerinventar

Die Gesamtmenge an ausgedienten Brennelementen von den DWR- und BWR-KKW Schwedens wird auf 9300 tSM abgeschätzt, bei einer Betriebszeit der KKW von 40 Jahren. Das entspricht ca. 45 000 ausgedienten Brennelementen /2-5/.

2.1.2 Endlagerbehälterkonzept

Der Endlagercontainer für ausgediente Brennelemente ist als Doppelbehälter ausgelegt. Der innere Behälter aus Stahl soll die mechanische Stabilität sichern, der äußere Kupferbehälter die chemische. Der Deckel des inneren Behälters wird verschraubt und der Deckel des Kupferbehälters verschweißt. Zwei Varianten des Endlagerbehälters mit unterschiedlicher Wandstärke des Kupferbehälters werden erwogen (Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Schweden – Varianten von kupferummantelten Containern für ausgediente Brennelemente /2-6/

Für das Referenzkonzept wurde die Variante mit einem Kupferbehälter mit einer Wandstärke von 50 mm ausgewählt. Das Beladen der Endlagercontainer mit ausgedienten Brennelementen soll in einer Anlage am Standort des zentralen Zwischenlagers für ausgediente Brennelemente CLAB erfolgen.

In einem BE-Endlagerbehälter können entweder 4 DWR-BE oder 12 SWR-BE eingelagert werden. Abbildung 2-3 zeigt Schnitte von Endlagerbehältern.

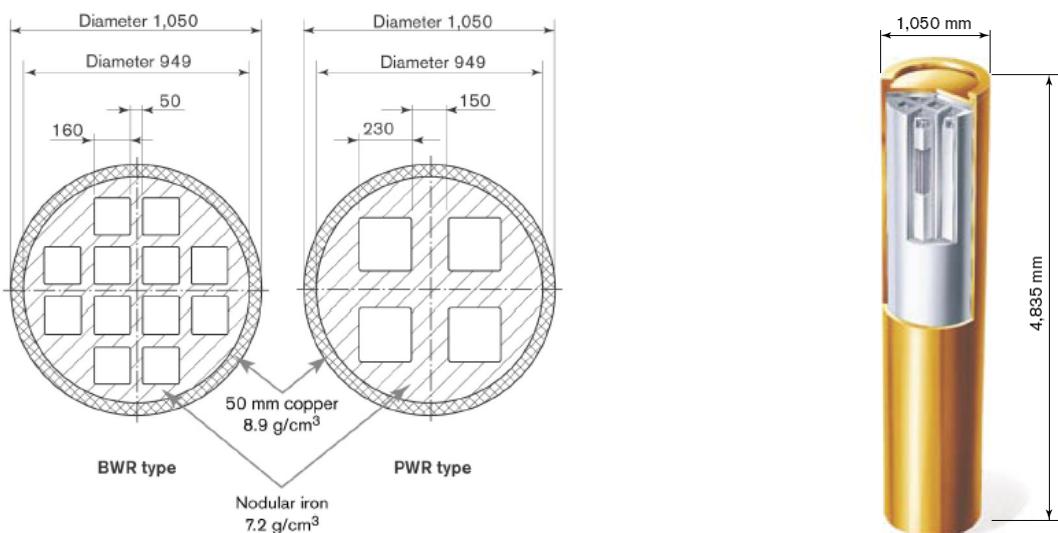


Abbildung 2-3: Schweden – Endlagerbehälter für ausgediente BE, Abmessungen in mm, (BWR = SWR und PWR = DWR) /2-8/, /2-9/

Die Temperatur an der Oberfläche der Container soll 100 °C nicht überschreiten /2-7/. Das entspricht einer Beladung pro Container von ca. 2 tSM, in Abhängigkeit von den Kenndaten der abgebrannten Brennelemente. Die Endlagerung soll 40 Jahre nach der Entladung aus den Reaktoren erfolgen. Die Wärmeleistung des ausgedienten Kernbrennstoffes beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 800 W/tSM.

Die Wärmeleistung eines Gebindes mit ausgedienten Referenz-BE in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 2-4 gezeigt.

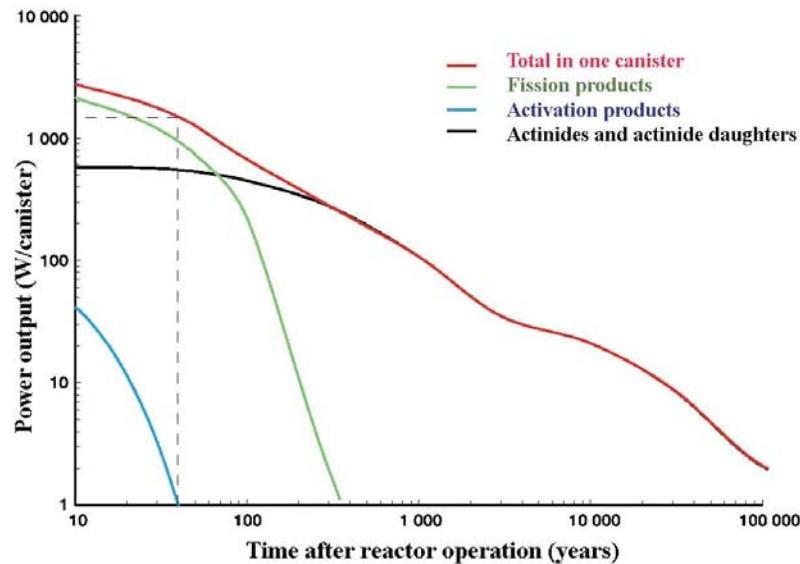


Abbildung 2-4: Schweden – Wärmeleistung eines Gebindes mit SKB-Referenzbrenn-elementen SVEA 96 mit einem Abbrand von 38 MW d/kg U /2-7/

Tabelle 2-1 enthält Angaben zu Behälterbeladungen, -abmessungen und -standzeiten (abgeschätzte Dauer der Behälterintegrität).

Tabelle 2-1: Schweden – Angaben zu Endlagerbehältern für ausgediente BE /2-6/

Abfallart	Beladung	Behälterabmessungen		Standzeit
Ausgediente Brennelemente	4 DWR BE oder 12 SWR-BE	Außendurchmesser: 1.050 mm Länge (max.): 4.835 mm Wandstärke (max.): 50 mm Gesamtmasse (max.): 25 Mg Gesamtvolumen: 4,2 m ³		100.000 a

Für die Endlagerung in horizontalen Strecken wird von SKB alternativ der Einsatz eines so-genannten „Supercontainers“ erwogen. Ein Supercontainer besteht aus dem BE-Endlagerbehälter (Kupferbehälter), der mit Bentonitringen bzw. -blöcken ummantelt wird. Als Traghalterung werden der Abfallbehälter und die Bentonitumhüllung von einem perforierten Stahlzylinder eingeschlossen. Die Gesamtlänge des Supercontainers mit einer Masse von ca. 45 t soll 5,5 m betragen. In der Abbildung 2-5 /2-10/ ist der Aufbau der Supercontainer dargestellt.

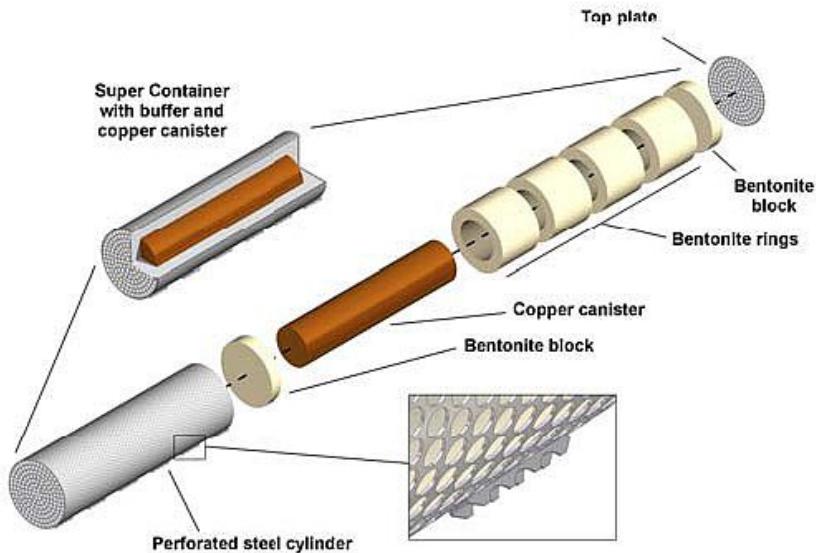


Abbildung 2-5: Schweden – Aufbau eines Supercontainers /2-10/

2.1.3 Endlagerkonzept

Das KBS-3-Konzept der SKB sieht die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in einer Granitformation in einer Tiefe von ca. 500 m vor. Bezuglich der Einlagerung der Container wurden von SKB und Posiva alternative Konzepte untersucht /2-11/, /2-12/, /2-13/, /2-14/, (s. Abbildung 2-6).

- Vertikale Einlagerung von einem oder mehreren Endlagercontainern in einem Bohrloch (KBS-3V)
- Horizontale Einlagerung von je einem Endlagercontainer in einer horizontalen Bohrung (KBS-3H)
- Horizontale Einlagerung von mehreren Endlagercontainern hintereinander in mittellangen horizontalen Bohrlöchern (KBS-3MLH).

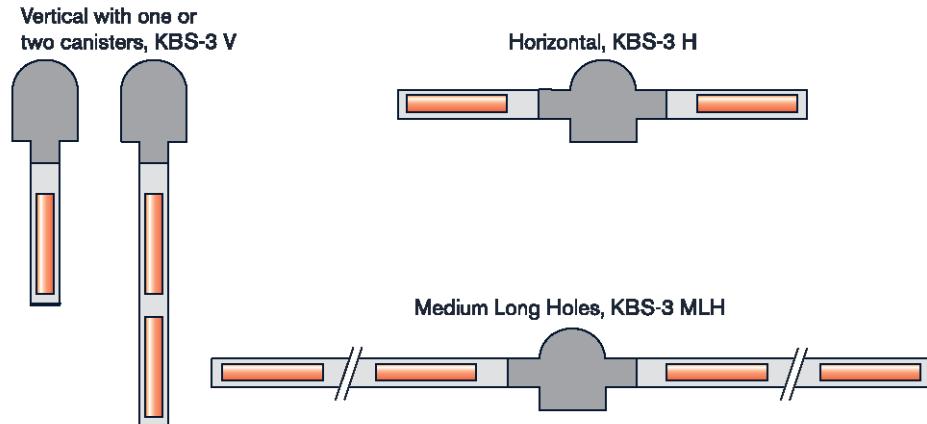


Abbildung 2-6: Schweden – Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente

Im Ergebnis der bisherigen Untersuchungen wurde das Konzept KBS-3V als Referenzkonzept ausgewählt /2-13/.

Das Endlager besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, die über eine Rampe mit der Erdoberfläche verbunden sind. Des Weiteren sind vier Schächte vorgesehen. Ein Förderschacht und zwei Wetterschächte im Zentralteil des Endlagers und ein Auszugsschacht am entferntesten Ende des Endlagers /2-15/. Abbildung 2-7 zeigt das prinzipielle Layout des Endlagers.

Die Länge der Einlagerungsstrecken für die vertikale Bohrlochlagerung wurde bei den Machbarkeitsuntersuchungen auf 265 m festgelegt. Eine Präzisierung der Länge soll bei dem Auffahren entsprechend den angetroffenen geologischen Bedingungen erfolgen. Der Streckenabstand beträgt ca. 40 m.

In den Boden der Einlagerungsstrecken werden im Abstand von ca. 6 m die Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 1,75 m und einer Tiefe von ca. 8 m niedergebracht.

Die Strecken- und Bohrlochabstände wurden so ausgewählt, dass die Temperaturgrenze von 100 °C nicht überschritten wird.

Insgesamt sind über 100 Einlagerungsstrecken aufzufahren. In jeder Strecke sollen ca. 40 Bohrlöcher niedergebracht werden.

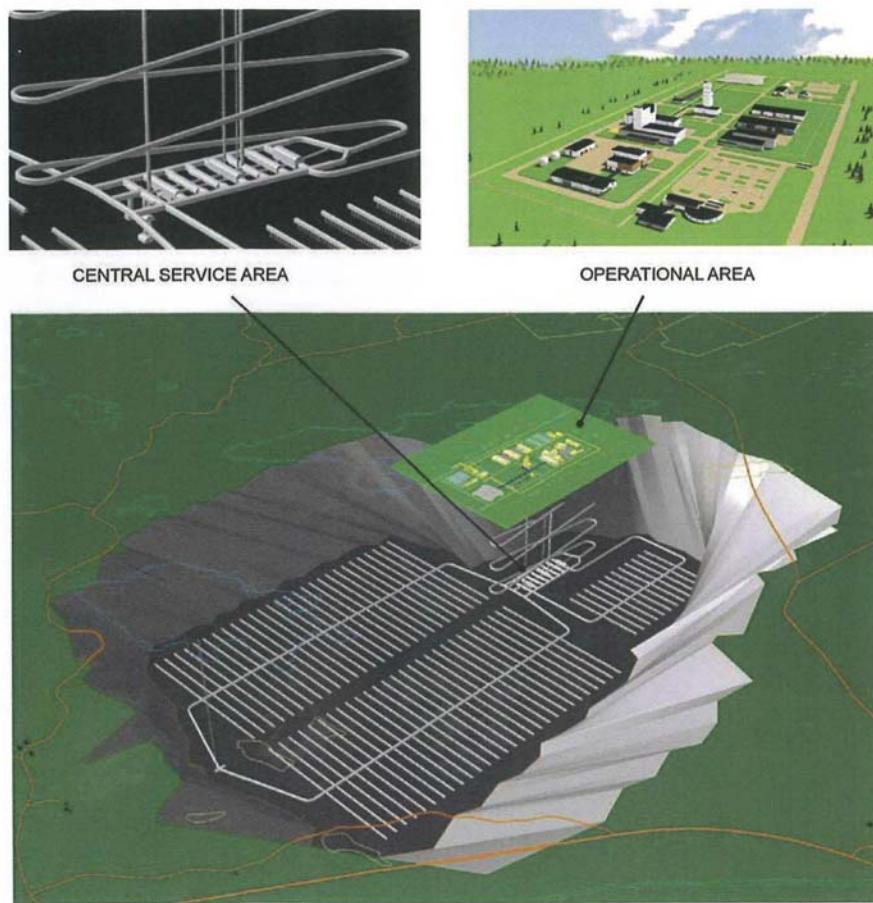


Abbildung 2-7: Schweden – Endlagerlayout /2-15/

Der Einlagerungsprozess sieht vor, dass die Bentonitringe bzw. -blöcke in das Bohrloch eingebracht werden und dann die Endlagercontainer in die Bentonitauskleidung eingesetzt werden. Die Bentonitringe mit einer Höhe von 50 cm und einem äußerem Durchmesser von 165 cm werden vorgefertigt (Abbildung 2-8).



Abbildung 2-8: Schweden – Fertigung von Bentonitringen /2-18/

Das Einsetzen der Endlagercontainer in die Bohrlöcher erfolgt mit einer Einlademaschine, von der ein Muster gefertigt und getestet wurde (Abbildung 2-9). Abbildung 2-10 zeigt das Endlager nach dem KBS-3V Konzept.

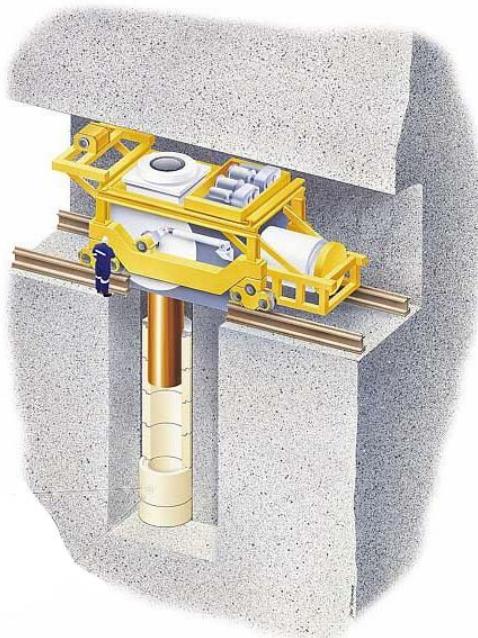


Abbildung 2-9: Schweden – Bohrloch-Einlagerungsmaschine

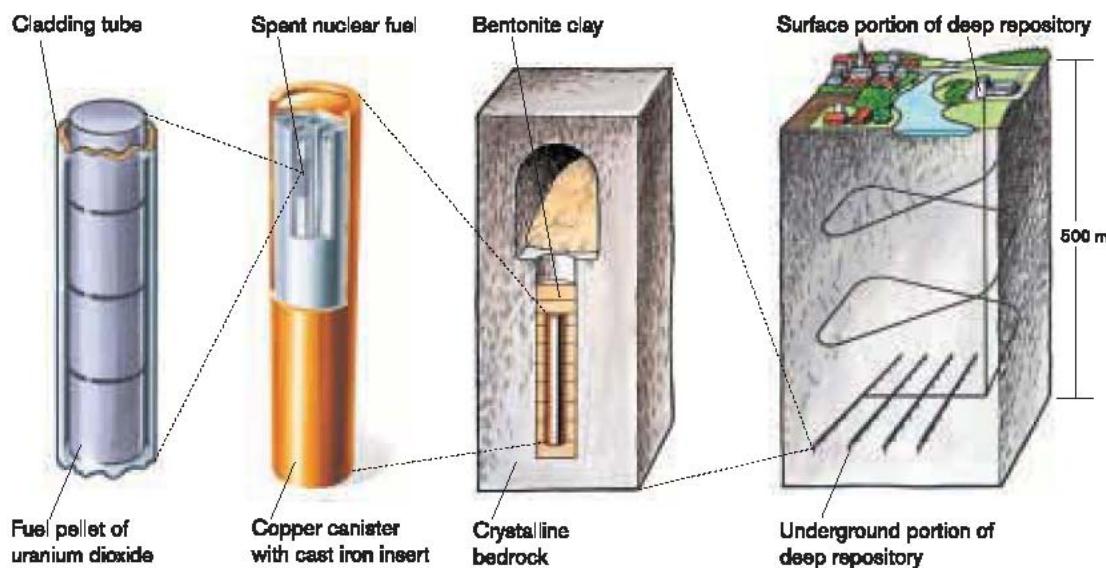


Abbildung 2-10: Schweden – Geologisches Endlager nach dem KBS-3V-Konzept /2-16/

Nach dem Einsetzen wird der Container mit Bentonitblöcken abgedeckt und der Resthohlraum des Bohrloches verfüllt. Abbildung 2-11 zeigt die Arbeitsschritte bei der Einlagerung nach dem KBS-3V-Konzept /2-15/.

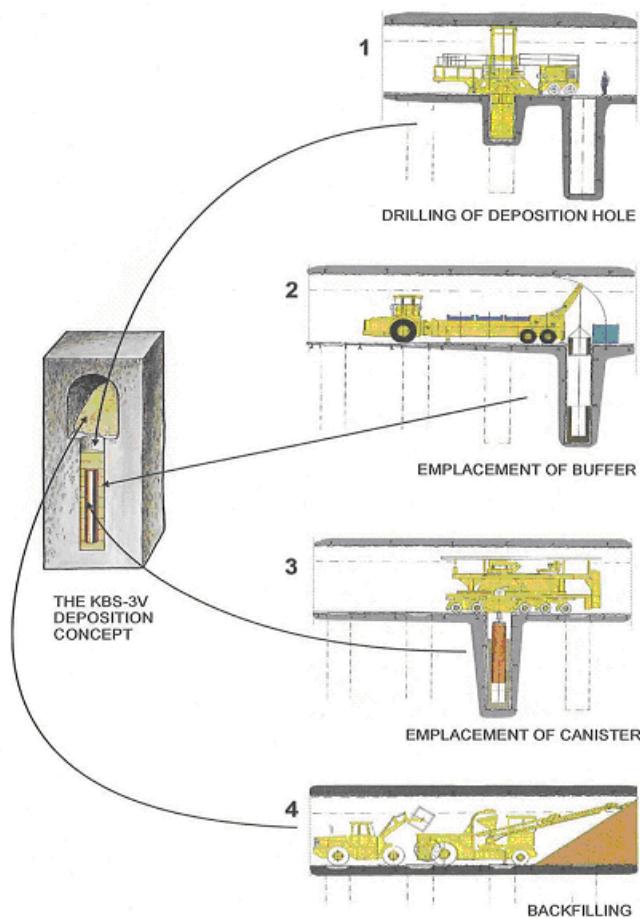


Abbildung 2-11: Schweden – Ablauf der Einlagerung in vertikale Bohrlöcher /2-15/

Als Alternativvariante wird in /2-17/ die horizontale Lagerung beschrieben (KBS-3H), die sich derzeit in der Erprobungsphase im Untertagelabor Äspö befindet. Dabei soll der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Supercontainer eingesetzt werden.

Dieser Endlagerbehälter soll in ca. 300 m lange horizontale Bohrungen des Endlagers eingebbracht werden (s. Abbildung 2-12). Zwischen den Containern werden Distanzblöcke eingesetzt.

Untersuchungen zur Rückholbarkeit bei dieser Konzeption wurden durchgeführt /2-14/.

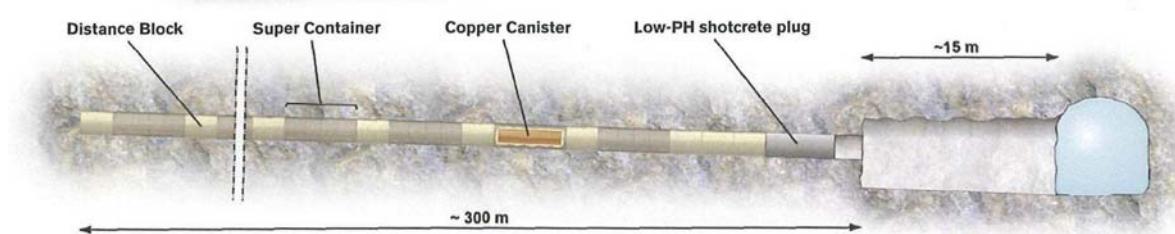


Abbildung 2-12: Schweden – horizontale Einlagerung von Supercontainern (KBS-3H-Konzept) /2-18/

2.1.4 Transport- und Handhabungssystem

Zum Transport- und Handhabungssystem liegen begrenzte Informationen vor. Danach befindet sich die Transport- und Handhabungstechnik derzeit im Entwicklungsstadium. Einzelne Komponenten werden im Untertagelabor Äspö erprobt.

Das KBS-3V-Konzept sieht den Transport der BE-Behälter in horizontaler Lage über die Rampe zum Einlagerungsort vor. Hier werden die Behälter mittels einer Einlagerungsmaschine gekippt und in das Bohrloch platziert. Abbildung 2-13 zeigt eine schematische Darstellung des Einsetzens eines BE-Behälters in ein Bohrloch mit der Einlagerungsmaschine (s. auch Abbildung 2-8). Abbildung 2-14 zeigt die Bohrloch-Einlagerungsmaschine im URL Äspö.

Für den Transport der Supercontainer in die Einlagerungsstrecken wird an einer Streckeneinlagerungsmaschine auf der Grundlage der Wasserkissentechnologie gearbeitet. Das Prinzip dieses Wasserkissentransports entspricht dem Prinzip des Luftkissentransports und ist in der Abbildung 2-15 dargestellt. Diese Transporttechnologie wird derzeit im Untertagelabor Äspö im Rahmen des ESDRED-Projektes getestet. Die Abbildung 2-16 zeigt die Strecken-Einlagerungsmaschine im Untertagelabor Äspö .

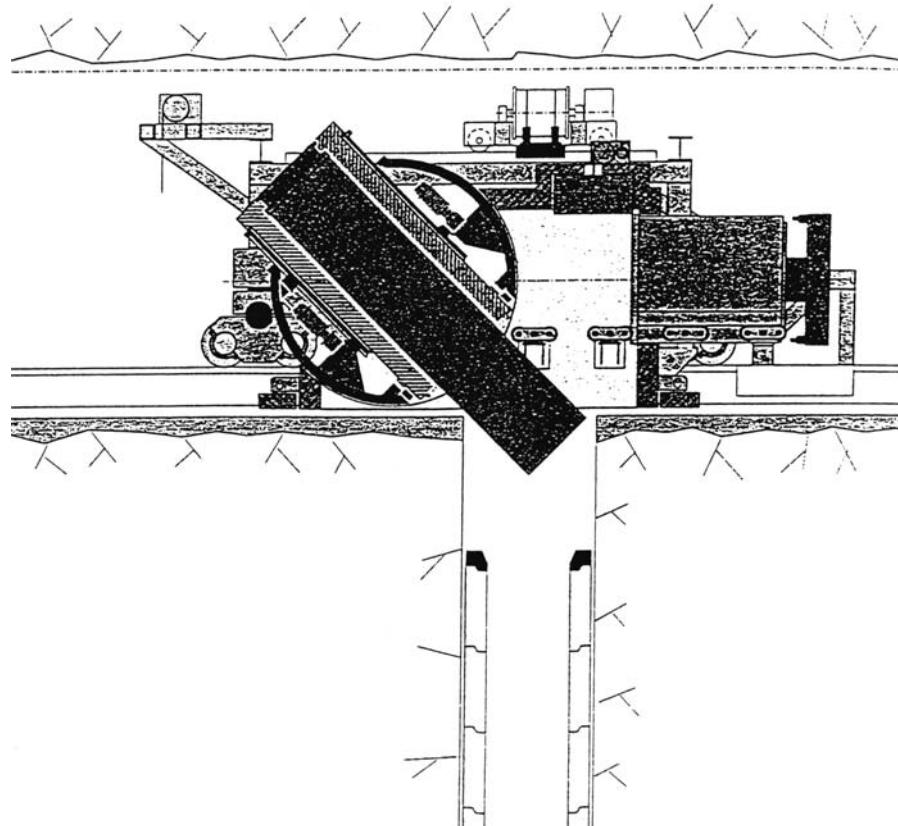


Abbildung 2-13: Schweden – KBS-3V-Konzept - Einlagerungsmaschine und Platzierung eines Containers



Abbildung 2-14: Schweden – KBS-3V-Konzept; Einlagerungsmaschine im URL Äspö /2-18/

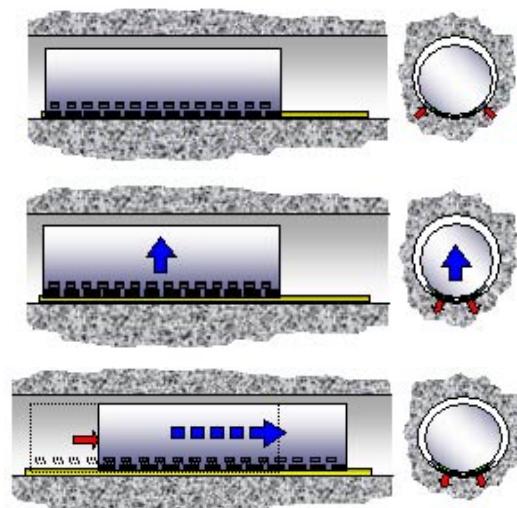


Abbildung 2-15: Schweden – KBS-3H-Konzept; Prinzip des Wasserkissentransports /2-18/



Abbildung 2-16: Schweden – KBS-3H-Konzept; Einlagerungsmaschine im URL-Äspö /2-18/

2.1.5 Auffahrtechnik

Die Strecken sollen mit konventioneller Bohr- und Sprengtechnik aufgefahren werden. Die Lüftungsschächte sollen mit der Raise-Bohrtechnik und der Aufzugsschacht mit Rise-Bohrtechnik und Ausbrechen hergestellt werden /2-15/.

Die Auswertung der Erfahrungen bei der bergmännischen Erschließung des URL Äspö hinsichtlich Tunnelbau, Maschineneinsatz, Gesteinseigenschaften, notwendige Sicherungsmaßnahmen, Gestaltung der Bewetterung, Beherrschung des Wasserzutritts sowie Berücksichtigung der Wetterparameter (Temperatur, Luftfeuchte, Gaszusammensetzung und möglicher Zutritt toxischer Gase) können für die Planung und den Bau des späteren geologischen Tiefenlagers genutzt werden.

2.1.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

An die Verfüllung von Strecken und Grubenräumen werden folgende Anforderungen gestellt:

- Keine gefährlichen Einwirkungen auf andere Barrieren
- Chemische und mechanische Stabilität
- Ausreichende Dichte und geringe Kompaktibilität
- Geringe hydraulische Leitfähigkeit
- Radionuklidsorptionsvermögen

Für die Verfüllung der Strecken und Grubenräume sowie für Strecken- und Schachtverschlüsse werden im Felslabor Äspö verschiedene Materialien untersucht. Gegenwärtig werden zwei Varianten untersucht - gebrochenes Wirtsgestein gemischt mit Bentonit, bzw. nur gebrochenes Wirtsgestein. Bei den Versuchen mit ausschließlich gebrochenem Wirtsgestein wurde der Hohlraum zwischen der Rückfüllung aus gebrochenem Gestein und der Streckendecke mit vorkompaktierten Bentonitblöcken verfüllt, um eine Abdichtwirkung zu erreichen.

Die Verfüllung soll abschnittsweise, entsprechend dem Verlauf der Einlagerung erfolgen. Ein teilweises Verfüllen der Transportstrecken entsprechend dem Einlagerungsfortschritt und der Auslegung der Endlagerfelder kann möglich sein.

Zu Strecken- bzw. Schachtverschlüssen liegen keine Informationen vor.

2.1.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Das Endlagerkonzept ist noch nicht endgültig festgelegt. Es werden noch verschiedene Varianten der Einlagerung, des Transportes und der Verfüll- und Verschlusstechnik untersucht. Umfangreiche Untersuchungen wurden und werden zu dem Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente durchgeführt. Versuchsmuster der Endlagerbehälter und anderer Endlagerkomponenten, wie Einlagerungsmaschinen für die vertikale und horizontale Einlagerung, Bentonitverfüllungen wurden gefertigt und werden getestet.

SKB legt der SKI alle drei Jahre ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die Endlagerung vor, letztmalig im September 2007. Die wesentlichsten Forschungseinrichtungen der SKB sind das Untertagelabor in Äspö und das Behälterlabor in Oskarshamn.

Die Untersuchungen zum Endlagerkonzept konzentrieren sich augenblicklich insbesondere auf die Bewertung der Barrierenwirkung sowie die Wechselwirkung der technischen und natürlichen Barrieren.

Im URL Äspö werden u. a. umfangreiche Arbeiten zur Erkundung mechanischer Gesteinseigenschaften, Homogenität größerer Gebirgsbereiche, Klüftigkeit des Granits und zur Auflockerung des Gebirges im Bereich neu aufgefahrener Strecken durchgeführt. Des Weiteren werden Versuche zur Erprobung der Einlagerungstechnik sowie zum Bentonit als Puffer- und Verfüllmaterial durchgeführt bzw. sind vorgesehen.

Im Behälterlabor Oskarshamn werden Verfahren zum Verschweißen der Kupferbehälter, Technologien für das Beladen der Behälter mit Brennelementen u. a. untersucht.

Der konzipierte Ablauf der Arbeiten bis zur Inbetriebnahme eines geologischen Endlagers ist auf der Abbildung 2-17 gezeigt. Danach soll mit der Versuchseinlagerung ca. 2016 und mit dem regulären Endlagerbetrieb 2020 begonnen werden.

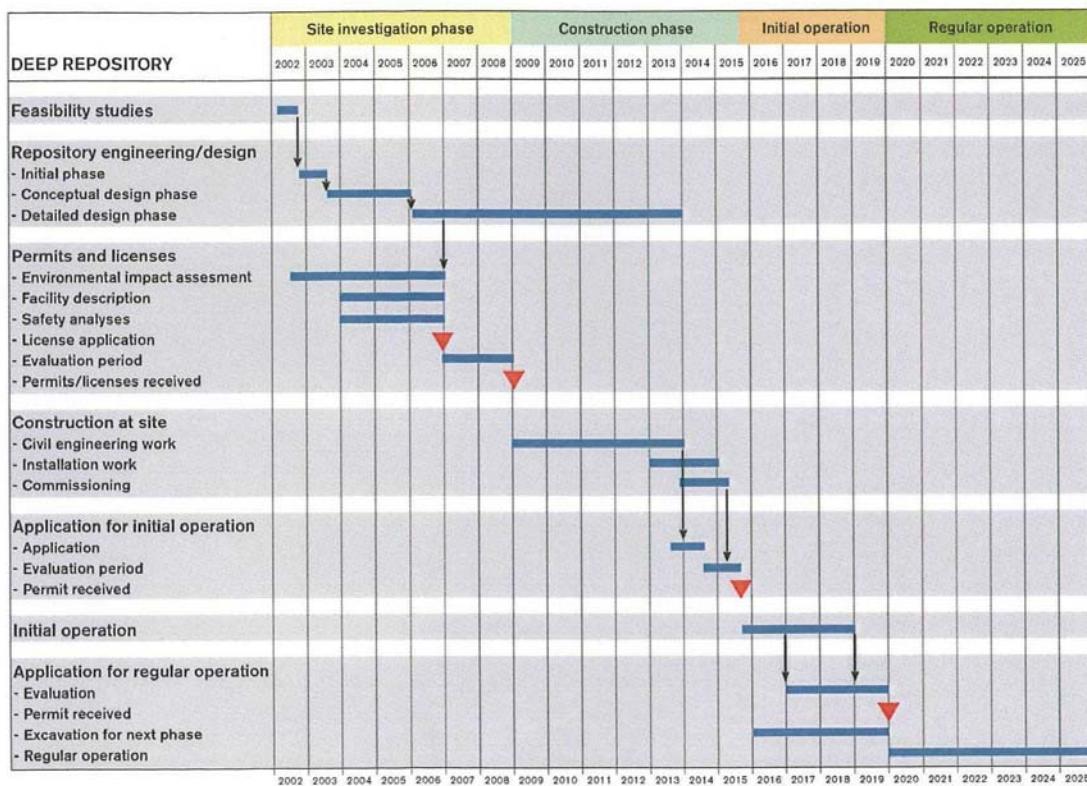


Abbildung 2-17: Schweden – Ablauf der Arbeiten zur Errichtung eines geologischen Endlagers /2-15/

2.1.8 Aufwand- und Kostenbewertung

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des schwedischen geologischen Endlagers liegen nur sehr begrenzte Informationen vor.

In /2-15/ wird aufgeführt, dass die Errichtungskosten des Endlagers bis zum Beginn der Versuchseinlagerung in der Größenordnung von 500 Mill. Dollar liegen werden. Die Kosten vom Einlagerungsbeginn bis zur endgültigen Schließung des Endlagers einschließlich Demontage der Tagesanlagen werden mit ca. 1 Mrd. Dollar bewertet.

2.2 Finnland

Die Grundkonzeption Finnlands für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sieht vor, dass kurzlebige schwach- und mittelaktive radioaktive Betriebsabfälle in die zwei bestehenden Endlager in Kristallingestein an den Standorten der KKW Loviisa und Olkiluoto eingelagert werden.

Bei dem ausgedienten Kernbrennstoff geht Finnland von der grundsätzlichen Strategie der direkten Endlagerung aus. Die grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes wurden von der Regierung 1999 erlassen /2-19/.

Die Arbeiten zur geologischen Endlagerung der ausgedienten Brennelemente wurden ca. 1978 aufgenommen. 2001 wurde eine Grundsatzentscheidung zur Errichtung des Endlagers am aus mehreren Varianten ausgewählten Standort Olkiluoto getroffen.

Zur Frage der Rückholbarkeit legt die von STUK auf der Grundlage der Regierungsentscheidung von 1999 über die Sicherheit der Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes erlassene Regelung „Langzeitsicherheit der Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes“ (YVL 8.4, 23 May 2001) folgendes fest:

„In der Nachbetriebsphase muss eine Rückholung der Abfallgebinde über eine Periode möglich sein, in der die technischen Barrieren einen vollständigen Einschluss der endgelagerten radioaktiven Substanzen zu gewährleisten haben. Das Endlager ist so auszulegen, dass eine Rückholung der Abfallgebinde, falls erforderlich, mit der zur Zeit der Endlagerung verfügbaren Technologie und vernünftigem Aufwand machbar ist. Eine Erleichterung der Rückholbarkeit oder ein Monitoring in der Nachbetriebsphase dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht verschlechtern.“

Obwohl Studien bezüglich einer Rückholbarkeit schwach- und mittelaktiver Abfälle erarbeitet wurden, kann geschlussfolgert werden, dass eine Rückholung ausschließlich für ausgedienten Kernbrennstoff erwogen wird. Im Forschungs- und Entwicklungsprogramm der POSIVA ist dazu folgendes diesbezügliches Auslegungsprinzip dargelegt worden:

„Die Auslegungsprinzipien bei der Planung des Endlagers sind so, dass die Langzeitsicherheit ohne irgendwelche Anforderungen bezüglich eines Monitorings gesichert ist, und dass das Endlager geöffnet und die Abfälle rückgeholt werden können, wenn angenommen wird, dass Verbesserungen in der Technologie diese Änderung des Herangehens vernünftig und praktikabel machen würden. Das bedeutet, dass das Endlager unter Berücksichtigung der Anforderung nach Rückholung der Abfälle zu planen ist.“ /2-20/

Bezüglich der Rückholbarkeit beabsichtigt Finnland eine Zusammenarbeit mit der SKB in Schweden.

2.2.1 Endlagerinventar

Die Abschätzungen des bis 2070 zu erwartenden Inventars an ausgedienten Brennelementen sind wie folgt /2-21/:

KKW Loviisa 1 und 2:	700 Behälter mit 1 020 tSM
KKW Olkiluoto 1 und 2:	1 210 Behälter mit 2 530 tSM
KKW Olkiluoto 3:	930 Behälter mit 1 980 tSM

Insgesamt sollen somit 2 840 Behälter mit 5 530 tSM endgelagert werden.

Der mittlere und der maximale Abbrand der BE des KKW Loviisa betragen 37 - 39 MWd/kgU, bzw. 45 MWd/kgU und 50 MWd/kgU für das KKW Olkiluoto.

Diese Abschätzungen können sich in Abhängigkeit von der Entwicklung der Beladung der Reaktoren, der Konstruktion der Brennelemente und des Abbrandes verändern /2-22/.

2.2.2 Endlagerbehälterkonzept

Entsprechend der Grundstrategie für die Errichtung des finnischen Endlagers nach dem schwedischen KSB-3-Konzept sind für die Endlagerung der ausgedienten Brennelemente Doppelbehälter vorgesehen. Der innere Behälter aus Stahl soll die mechanische Stabilität sichern, der äußere Kupferbehälter die chemische. Der Deckel des inneren Behälters wird verschraubt und der Deckel des Kupferbehälters verschweißt.

Entsprechen den unterschiedlichen Abmessungen der in den KKW eingesetzten Brennelemente sind drei Behältertypen vorgesehen. Abbildung 2-18 zeigt die Behälter für WWER-440-BE (Loviisa) und BWR-BE (Olkiluoto).



Abbildung 2-18: Finnland – Varianten von kupferummantelten Behältern für ausgediente Brennelemente /2-23/

Der Innenbehälter ist aus Kugelgraphitguss in einem Stück gefertigt /2-23/. Die Abmessungen sowie die Form der Stellbohrungen für die Brennelemente sind den Abmessungen der verschiedenen Brennelementtypen angepasst. Abbildung 2-19 zeigt Schnitte durch die Innenbehälter für BE des WWER-440- und des EPR-Typs.

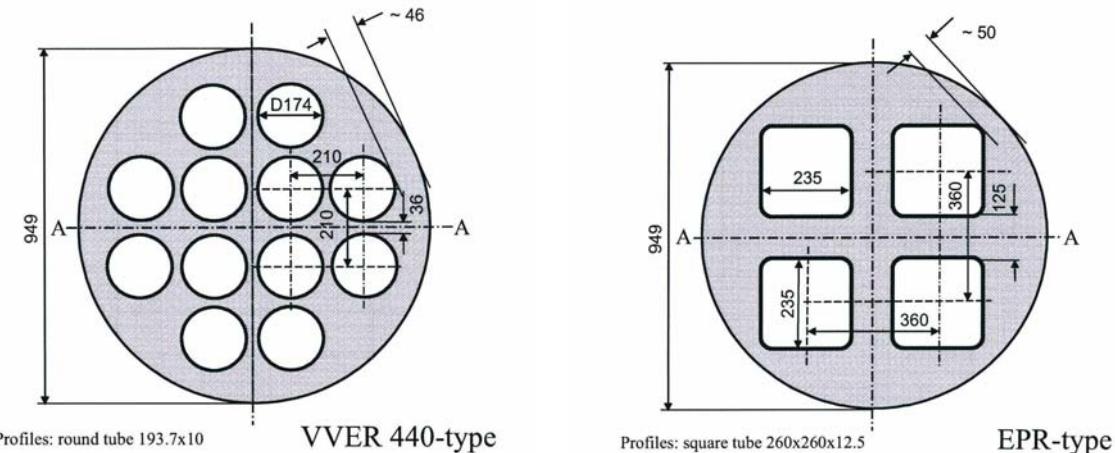


Abbildung 2-19: Finnland – Schnitt durch die Innenbehälter für BE der WWER-440- und EPR-Typen /2-23/

Die Stärke des Bodens der Guss-Innenbehälter variiert zwischen 50 mm für SWR-BE sowie WWER-440-BE und 70 mm für EPR-BE. Der Boden der Guss-Innenbehälter ist zusätzlich mit einem Stahldeckel mit einer Stärke von 15 mm versehen.

Alle Innenbehälter werden mit einem Stahldeckel mit einer Stärke von 50 mm verschlossen, der mittig mit einer M30-Schraube mit dem Innenbehälterkörper verschraubt wird.

In einen BE-Endlagerbehälter können entweder 4 EPR-BE oder 12 SWR- bzw. WWER-440-BE eingelagert werden. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die vorgesehenen Endlagerbehälterdaten.

Tabelle 2-2: Finnland – Daten der Endlagerbehälter /2-23/

Beladung	Außendurchmesser cm	Wandstärke mm	Gesamtlänge cm	Masse leer kg	Masse beladen kg
12 SWR-BE	105	48	480	~ 20700	~ 24300
12 WWER-440-BE	105	48	360	~ 16100	~ 18700
4 EPR-BE	105	48	525	~ 26000	~ 29100

Gemäß dem Endlagerkonzept soll die Temperatur an der Oberfläche der Behälter 100 °C nicht überschreiten /2-22/. Für die thermischen Berechnungen wurde eine Maximaltemperatur von 80 °C angenommen, um Unsicherheiten in der Berechnung zu berücksichtigen /2-24/. Auf der Grundlage der thermischen Berechnungen wurde die Anfangswärmeleistung der Endlagerbehälter bei Einlagerung auf 1370 W für WWER-440 BE, 1700 W für BE KKW Olkiluoto 1-2 und 1830 W für BE KKW Olkiluoto 3 begrenzt /2-24/, /2-25/. Abbildung 2-20 zeigt die berechnete Temperaturrentwicklung bei der Einlagerung eines einzelnen EPR-BE-Behälters und Abbildung 2-21 das Temperaturfeld eines Endlagerfeldes 70 Jahre nach Einlagerung.

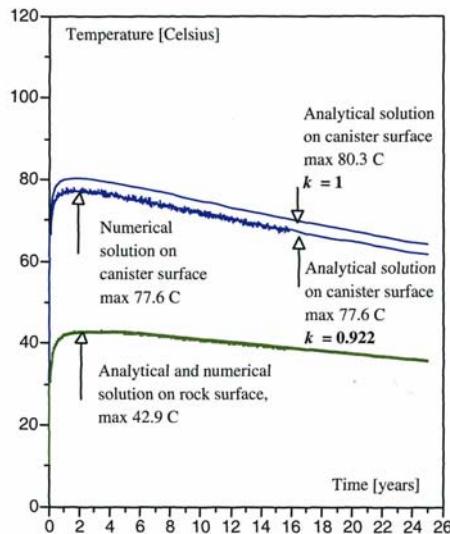


Abbildung 2-20: Finnland – Temperaturrentwicklung bei der Einlagerung eines einzelnen EPR-BE-Behälters /2-24/

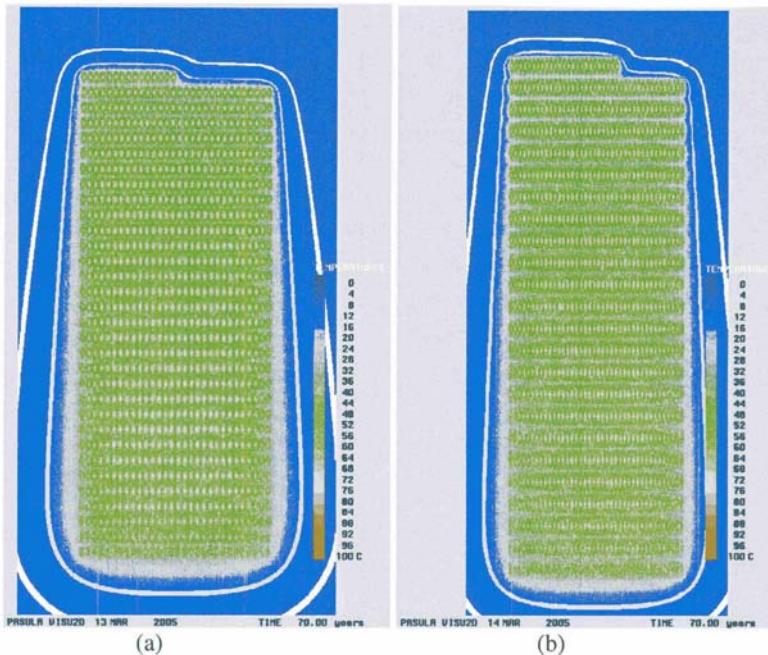


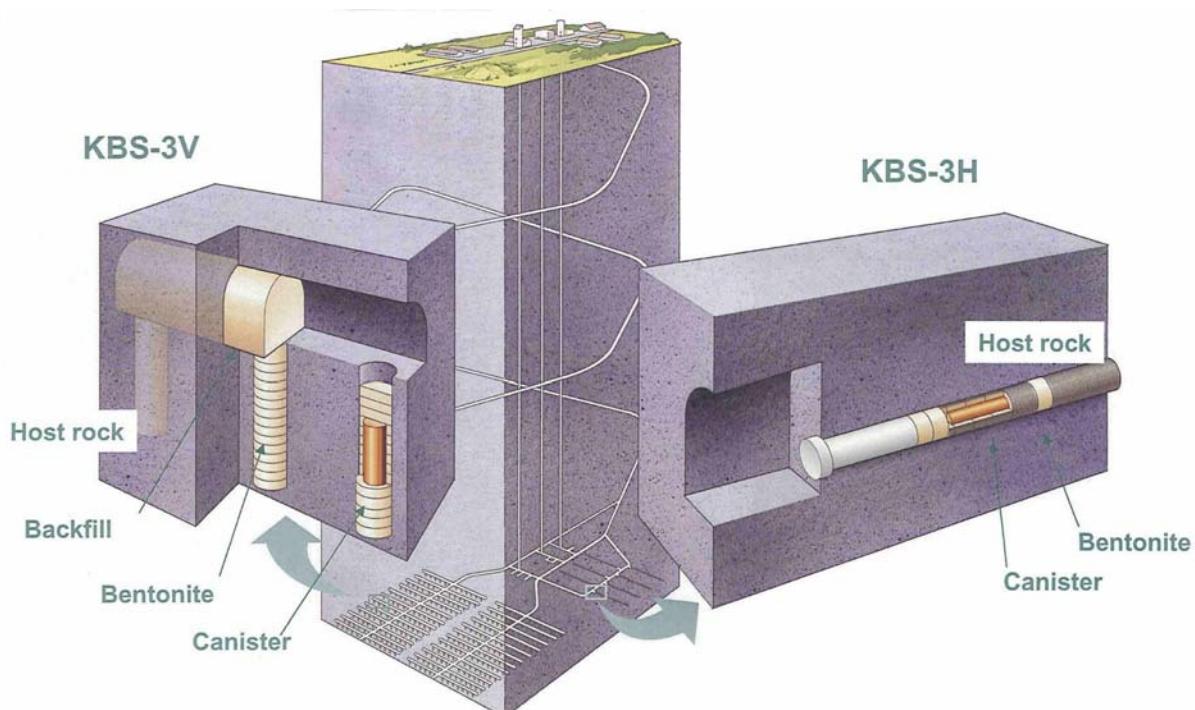
Abbildung 2-21: Finnland – Temperaturfeld eines Endlagerfeldes mit EPR-BE-Behältern 70 Jahre nach Einlagerung /2-25/ bei einem Containerabstand sowie Streckenabstand von 8 m bzw. 25 m (a) und 8 m bzw. 40 m (b)

2.2.3 Endlagerkonzept

Finnland sieht für die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in einer Granitformation das KBS-3-Konzept der SKB vor. Von SKB und Posiva wurden alternative Konzepte untersucht /2-11/, /2-12/, /2-13/, /2-14/, (s. Abbildung 2-22).

- Vertikale Einlagerung von einem oder mehreren Endlagerbehältern in einem Bohrloch (KBS-3V)
- Horizontale Einlagerung von je einem Endlagerbehälter in einer horizontalen Bohrung (KBS-3H)
- Horizontale Einlagerung von mehreren Endlagerbehältern hintereinander in mittellangen horizontalen Bohrlöchern (KBS-3MLH).

Als Vorzugsvariante wird die vertikale Bohrlocheinlagerung betrachtet.



**Abbildung 2-22: Finnland – KBS-3-Konzept - Einlagerungsvarianten für ausgediente Brenn-
elemente /2-22/**

Für die Auslegung des finnischen Endlagers am Standort Olkiluoto werden zwei Varianten betrachtet /2-22/:

- Endlager mit Einlagerungsstrecken in einer Teufe von ca. 420 m
- Endlager mit Einlagerungsstrecken in einer Teufe von ca. 420 m und mit einem zweiten Einlagerungshorizont in einer Teufe zwischen 500 m und 520 m.

Im weiteren bezieht sich die Beschreibung auf das Endlager mit einem Einlagerungshorizont in ca. 420 m Teufe.

Wesentliche Kriterien für die Auslegung des Endlagers sind /2-22/:

- Die Lebensdauer der Behälter unter den im Endlager zu erwartenden Bedingungen soll mindestens 100 000 Jahre betragen.
- Die Behälter müssen einem hydrostatischen Druck von 14 MPa sowie einem Lastdruck von 30 MPa, resultierend von einer angenommenen 3 km Eisschicht während einer Eiszeit, standhalten.
- Die Oberflächentemperatur der Behälter soll derart sein, dass eine Temperatur von weniger als 100 °C im Verfüllmaterial Bentonit eingehalten werden kann.
- Die Konstruktion und Standfestigkeit der Behälter müssen eine Rückholung der Behälter aus dem Endlager gestatten, wenn dies als notwendig oder zweckmäßig erachtet wird.

Das Endlager besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, die über eine Zugangsrampe mit der Erdoberfläche verbunden sind. Des Weiteren sind drei Schächte vorgesehen – Schacht für Behältertransport, Schacht für Personentransport und Wetterschacht /2-22/. Der Wetterschacht soll einen Durchmesser von 3,5 m und der Personentransportsschacht von 4,5 m haben. Abbildung 2-23 zeigt ein schematisches Layout des Endlagers.

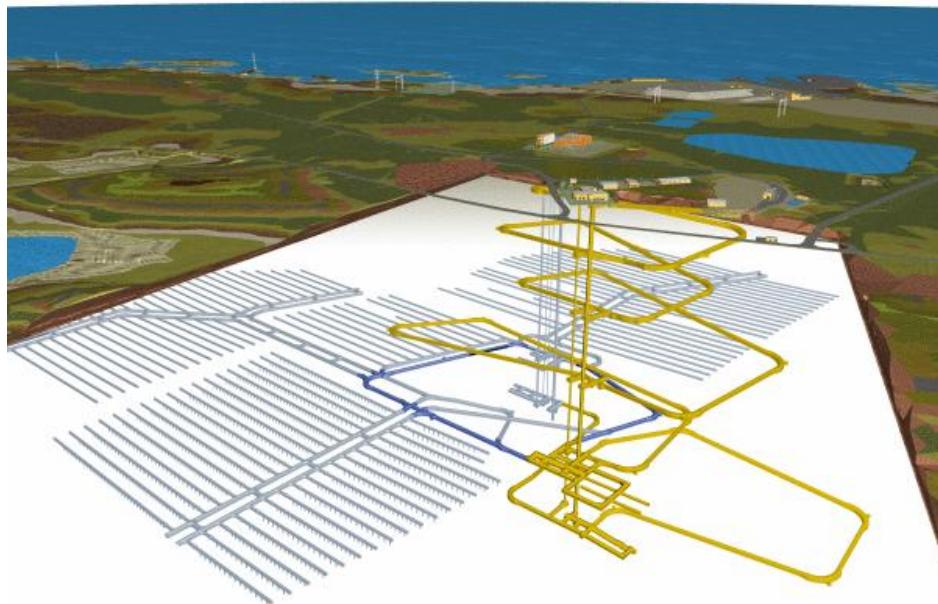


Abbildung 2-23: Finnland – Endlager Olkiluoto -Schematisches Layout /2-22/

Die maximale Länge der Einlagerungsstrecken mit einer Höhe von ca. 5 m und einer Breite an der Sohle von 3,5 m soll 350 m nicht überschreiten /2-25/. Der Streckenabstand soll ca. 25 m betragen. Als Option wird ein Streckenabstand von 40 m betrachtet.

Die Gesamtlänge der Einlagerungsstrecken soll ca. 41 km betragen. Das Gesamtvolumen der Einlagerungsstrecken mit den Einlagerungsbohrungen soll ca. 630 000 m³ und das Gesamtvolumen des Endlagers ca. 1,3 Mill. m³ betragen /2-25/.

Die Anordnung der Einlagerungsfelder erfolgt entsprechend den geologischen Gegebenheiten in der Einlagerungsteufe (s. Abbildung 2-24).

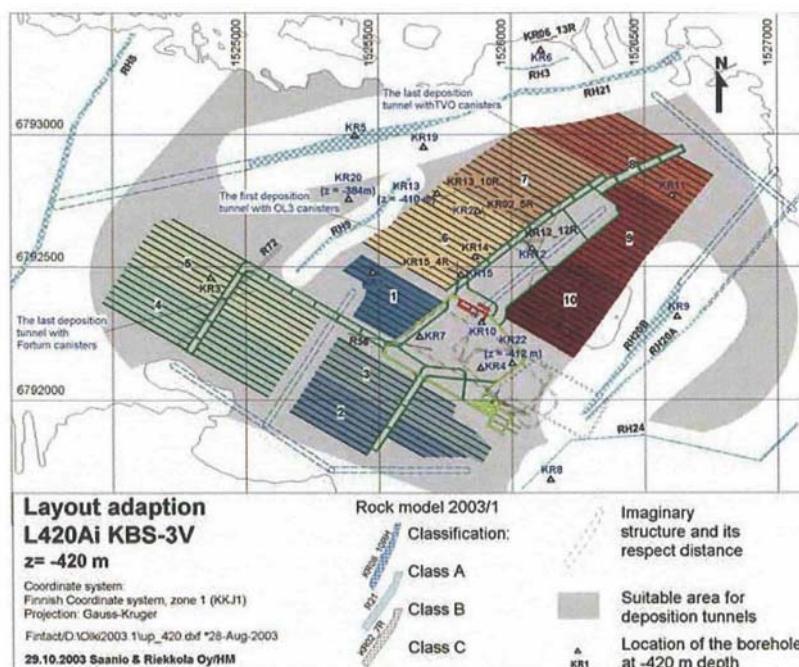


Abbildung 2-24: Finnland – Lage der Endlagerfelder in einer Tiefe von 420 m /2-25/

In den Boden der Einlagerungsstrecken werden im Abstand von ca. 10 m die Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 1,75 m und einer Tiefe von ca. 8 m niedergebracht. Die Strecken- und Bohrlochabstände wurden so ausgewählt, dass die Temperaturgrenze von 100 °C nicht überschritten wird. Das Einsetzen der Endlagerbehälter in die Bohrlöcher erfolgt mit einer Einlademaschine (Abbildung 2-25).

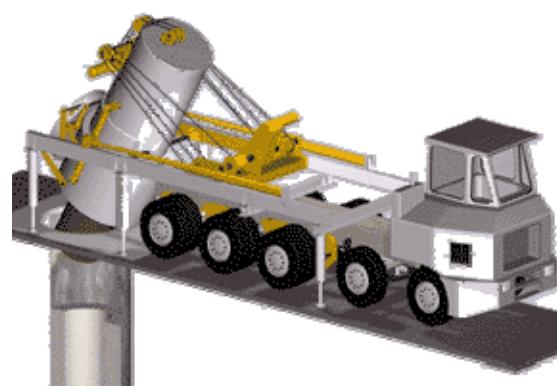


Abbildung 2-25: Finnland – Einlagerungsmaschine für BE-Behälter /2-26/

Das Einbringen des Verfüllmaterials Bentonit in die Bohrungen wird gemeinsam von Posiva und SKB untersucht (s. Kap. 2.1). Gegenwärtig wird eine Variante erprobt, nach der eine Bodenschicht Bentonit eingebracht wird, wonach vorgefertigte Bentonitringe in die Bohrungen eingesetzt werden sollen. Nach dem Einsetzen eines BE-Behälters wird der

verbleibende Hohlraum oberhalb des Behälters mit einer Bentonitschicht verfüllt. Abbildung 2-26 zeigt schematisch einen Schnitt durch ein beladenes und verfülltes Bohrloch.

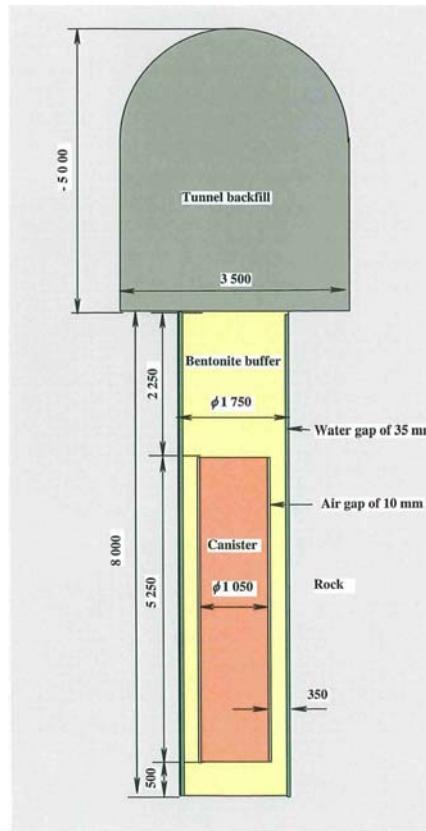


Abbildung 2-26: Finnland – Schnitt einer verfüllten Einlagerungsbohrung /2-22/

2.2.4 Transport- und Handhabungssystem

Zum Transport- und Handhabungssystem liegen kaum Informationen vor. Danach befindet sich die Transport- und Handhabungstechnik derzeit im Entwicklungsstadium.

2.2.5 Auffahrtechnik

Die Zugangsrampe wird mit konventioneller Bohr- und Sprengtechnik aufgefahrt /2-27/.

Das Auffahren des Wetterschachtes und des Personenbeförderungsschachtes erfolgt mit der Rise-Bohr-Technologie. Zuerst wird eine Bohrung mit einem Durchmesser von 30 cm bis auf eine Teufe von ca. 90 m niedergebracht und dann ein 3,5 m bzw. 4,5 m Bohrmeißel (Abbildung 2-27) eingesetzt, um die Schächte auf die Einlagerungsteufe niederzubringen. Die Geschwindigkeit beim Auffahren des Wetterschachtes beträgt zwischen 0,5 m und 1 m pro Schicht /2-27/.

Das die Bohrungen umgebende Wirtsgestein wurde vorinjiziert, um Wasserzuflüsse zu minimieren.



Abbildung 2-27: Finnland – 3,5 m Bohrkrone /2-27/

Die Einlagerungs- und Transportstrecken sollen mit konventioneller Bohr- und Sprengtechnik aufgefahren werden. Das Auffahren der Einlagerungsstrecken soll nacheinander entsprechend der Feldernummerierung auf Abbildung 2-24 vorgenommen werden. Untersuchungen zur Auffahrtechnologie und der vom Auffahren verursachten EDZ wurden im Rahmen des ZEDEX-Experimentes im Äspö-Untertagelabor durchgeführt /2-22/.

Die Einlagerungs- und Transportstrecken sowie die Rampe sollen mit Ankern ausgebaut werden. Die Sohlen der Strecken und der Rampe sollen nach dem Auffahren mit Beton ausgeglichen werden. Dieser Beton soll vor dem Verschluss des Endlagers zu einem maximal möglichen Grad entfernt werden /2-22/.

2.2.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

An die Verfüllung von Strecken und Grubenräumen werden die gleichen Anforderungen wie im schwedischen Konzept gestellt (s. Kap 2.1).

Posiva und SKB untersuchen gemeinsam im Rahmen des BACLO-Programms verschiedene Varianten für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken, der übrigen Grubenräume sowie der Schächte und der Rampe. Als Vorzugsvariante für die Verfüllung der Einlagerungs- und Transportstrecken wird derzeitig eine Verfüllung mit einem Gemisch von gebrochenem Gestein und Bentonit im Verhältnis 70 zu 30 Gew.% angesehen. Die endgültige Auswahl des Verfüllmaterials soll Ende 2008 erfolgen /2-22/.

Die Verfüllung soll abschnittsweise, entsprechend dem Verlauf der Einlagerung erfolgen. Ein teilweises Verfüllen der Transportstrecken entsprechend dem Einlagerungsfortschritt und der Auslegung der Endlagerfelder kann möglich sein.

Für die übrigen Grubenräume (Räume der Infrastruktur, Schächte und andere) gibt es noch keine genauen Vorstellungen. Es wird eine Verfüllung mit einem 85/15 %-igen Gemisch aus gebrochenem Gestein und Bentonit oder mit gebrochenem Gestein in Kombination mit Zement-Bentonit-Stopfen erwogen /2-22/.

Für den Verschluss von Grubenräumen sind eine Reihe unterschiedlicher Lösungen in Diskussion:

- Verschluss der Einlagerungsbohrungen mit einem Bentonitstopfen
- Verschluss der Zugänge zu den Einlagerungsstrecken mit einem Verschluss aus Beton und gepressten Bentonitblöcken. Dieser Verschluss soll eine Stärke von ca. 6 m haben. Der Beton soll mit ca. 50 kg/m³ Glasfasern gemischt werden. Abbildung 2-28 zeigt schematisch einen Verschluss am Zugang zu einer Einlagerungsstrecke.
- An möglichen Störungszonen wird an Verschlüsse aus Beton, kombiniert mit Bentonitblöcken, zu beiden Seiten der Störungszone gedacht.
- An den Übergemündungen der Schächte und der Rampe sollen massive Verschlüsse aus Beton, Bentonit und gebrochenem Gestein mit einer Stärke von ca. 10 m angebracht werden.

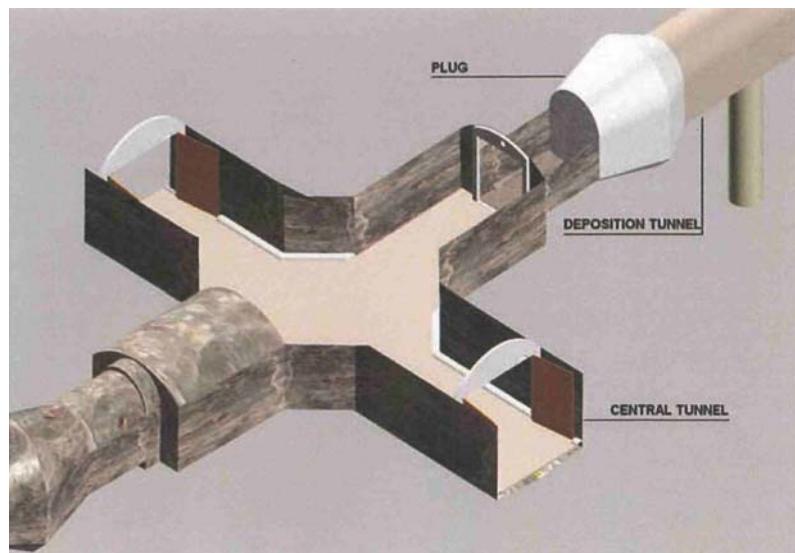


Abbildung 2-28: Finnland – Verschluss der Einlagerungsstrecken /2-22/

2.2.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Der Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik kann analog zu Schweden bewertet werden (s. Kap. 2.1.7).

Das Endlagerkonzept ist noch nicht endgültig festgelegt. Es werden noch verschiedene Varianten der Einlagerung, des Untertagetransportes und der Verfüll- und Verschlusstechnik untersucht. Umfangreiche Untersuchungen wurden und werden zu dem Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente durchgeführt. Versuchsmuster der Endlagerbehälter wurden gefertigt und werden getestet. Abbildung 2-29 zeigt Ausschnitte aus der Fertigung und Montage von BE-Behältern und Abbildung 2-30 zeigt einen SWR-BE-Behälter nach einem zerstörenden Drucktest. Der Zerstörungsdruck bei diesem Test betrug 138 MPa.

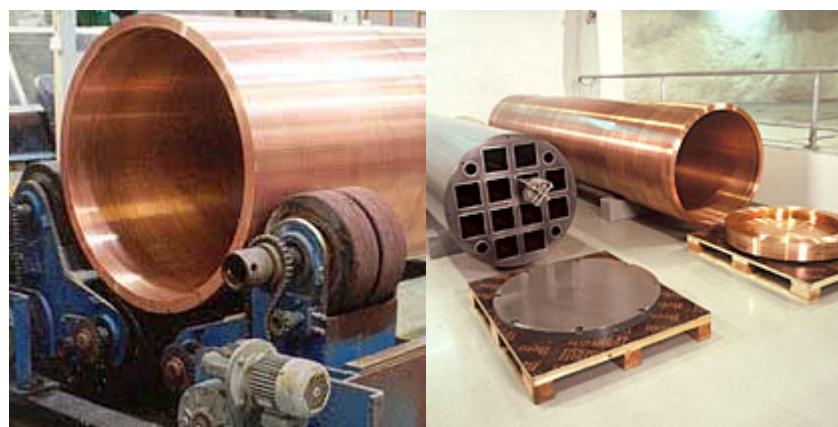


Abbildung 2-29: Finnland – Fertigung von BE-Endlagerbehältern /2-27/



Abbildung 2-30: Finnland – SWR-BE-Behälter nach zerstörendem Drucktest /2-22/

Der Sicherheitsbericht für das Endlager Olkiluoto soll entsprechend dem auf Abbildung 2-31 gezeigtem Ablauf 2012 fertiggestellt sein.

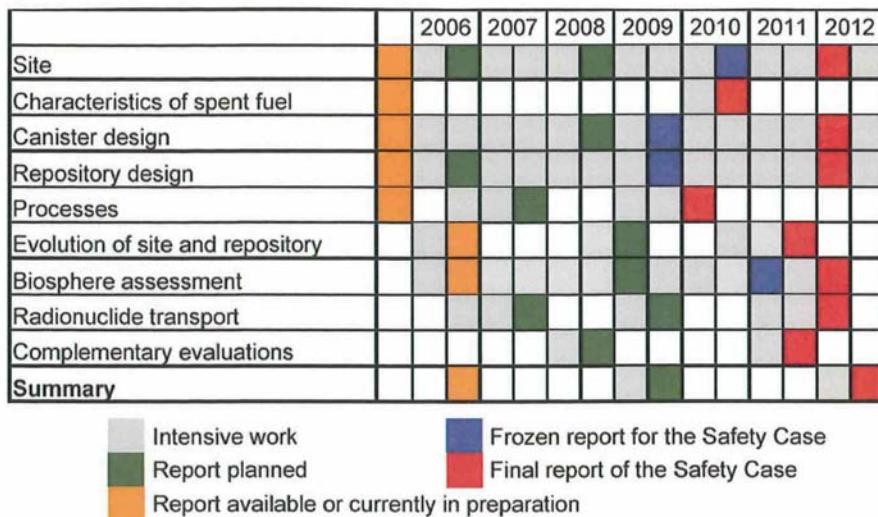


Abbildung 2-31: Finnland – Ablauf der Arbeiten zur Erstellung des Sicherheitsberichtes für das Endlager Olkiluoto /2-22/

Der konzipierte Ablauf der Arbeiten bis zur Inbetriebnahme eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten ist auf der Abbildung 2-32 gezeigt. Danach soll mit dem regulären Endlagerbetrieb 2020 begonnen werden.

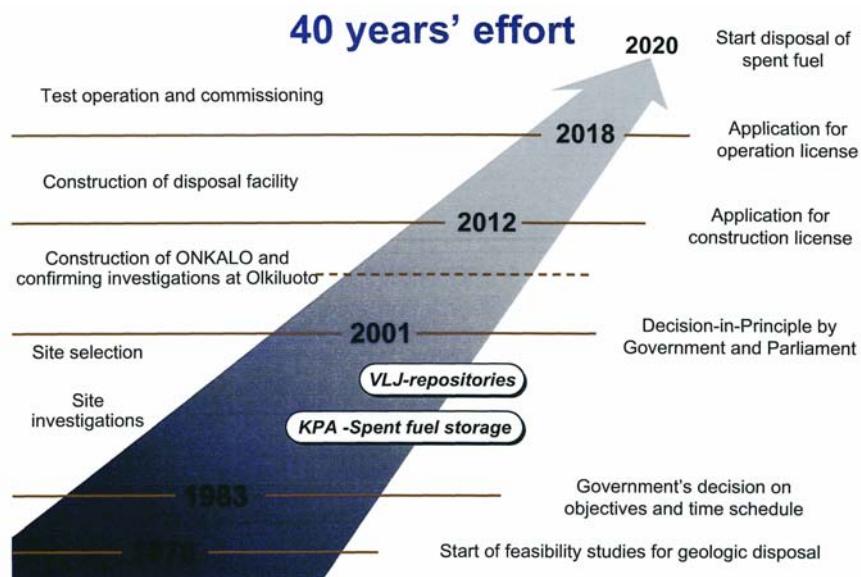


Abbildung 2-32: Finnland – Ablauf der Arbeiten zur Errichtung eines geologischen Endlagers /2-27/

2.2.8 Aufwand- und Kostenbewertung

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des finnischen geologischen Endlagers liegen nur sehr begrenzte Informationen vor.

In /2-27/ wird aufgeführt, dass die Investitionskosten für das Endlager ca. 650 Mill. EURO, die Betriebskosten ca. 2.100 Mill. EURO und die Stilllegungs- und Verschlusskosten ca. 250 Mill. EURO betragen sollen.

3 Endlager in Tongestein

3.1 Belgien

Seit Mitte der 70er Jahre werden in Belgien Untersuchungen zur Eignung von tiefen Tonformationen für die Endlagerung von hoch- und mittelradioaktiven 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-Acticity Disposal Experimental Site) in Betrieb ist.

3.1.1 Endlagerinventar

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 /3-1/. 1998 wurde von der belgischen Regierung ein Moratorium für die Fortführung der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff verhängt /3-2/. Ausgehend von diesen Entscheidungen berücksichtigt das belgische Konzept für ein Endlager in Tongestein zwei Optionen der Kernbrennstoffstrategie /3-2/, /3-3/:

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

Beide Optionen beruhen auf den gleichen Basisannahmen:

- Die sieben KKW-Blöcke werden nach einer Betriebszeit von je 40 Jahren stillgelegt.
- Die Anreicherung des Kernbrennstoffes beträgt für Uran-Brennelemente 4% ^{235}U und für MOX-Brennelemente 4,93% $^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$.
- Als Referenzabbrand werden 45 GWd/tSM für ausgediente Brennelemente zugrundegelegt.

Unter diesen Annahmen wurde die Gesamtmenge des Kernbrennstoffes auf 4860 tSM eingeschätzt, zu der 75 tSM der MOX-Elemente hinzuzuzählen sind. Daraus ergeben sich folgende endzulagernde Abfallmengen für die zwei Optionen:

- Volle Wiederaufarbeitung der 4860 tSM
 - 3915 Kokillen mit verglasten HAW
 - 75 tSM MOX-Elemente
- Direkte Endlagerung – Wiederaufbereitung der vertraglich vereinbarten 630 tSM
 - 670 tSM (420 Kokillen mit verglasten HAW) aus der Wiederaufbereitung
 - 4190 tSM ausgedienter Uran-Kernbrennstoff
 - 75 tSM ausgedienter MOX-Kernbrennstoff

Im SAFIR-2-Konzept /3-4/ war die Einlagerung der hochaktiven Abfälle in Behältern mit jeweils einer Kokille bzw. mit einem Brennelement vorgesehen. Tabelle 3-1 zeigt eine

Gesamtübersicht des HAW- und BE-Inventars, das gemäß dem SAFIR-2-Konzept in ein geologisches Endlager verbracht werden sollte /3-3/.

Tabelle 3-1: Belgien Konzept SAFIR-2 – Vorgesehenes radioaktives Abfallinventar eines Endlagers in Ton /2-3/

Kate- gorie	Herkunft	Matrix	Gebindeanzahl*	Volumen per Gebinde [m ³]	Aktivität per Gebinde**		Wärmeleis- tung per Ge- binde** [W]
					Alpha	Beta- Gamma	
HAW	BE-Wiederaufarbeitung	Glas	3915/420	0,180	1,3·10 ¹⁴	9,1·10 ¹⁵	602
BE	Ausgedienter UO ₂ Kernbrennstoff (Doel 1u. 2)	-	1669	0,326	1,7·10 ¹⁴	1,5·10 ¹⁵	188
BE	Ausgedienter UO ₂ Kernbrennstoff (Tihange 1u. 2, Doel 3)	-	4780	0,444	1,7·10 ¹⁴	1,5·10 ¹⁵	188
BE	Ausgedienter UO ₂ Kernbrennstoff (Tihange2, Doel 4)	-	3266	0,517	1,7·10 ¹⁴	1,5·10 ¹⁵	188
BE	MOX-Kernbrennstoff	-	144	0,444	9,9·10 ¹⁴	2,3·10 ¹⁵	905
Insgesamt			34414/ 35188	9688/ 12198 m ³			

* Normalschrift – Referenzszenarium der vollen Wiederaufbereitung; Kursiv und Fett – Option direkte Endlagerung

** Daten zum Zeitpunkt der Konditionierung

Seit 2003 wird von ONDRAF/NIRAS in Weiterentwicklung des SAFIR-2-Konzeptes ein Endlagerkonzept favorisiert, nach dem die Endlagerung der HAW und BE in sogenannten Supercontainern erfolgen soll /3-5/. Diese Container sollen jeweils zwei HAW-Kokillen, vier

DWR-BE (Uran) bzw. ein MOX-BE aufnehmen. Nach diesem Konzept würde sich folgendes Endlagerinventar an HAW und BE ergeben:

Tabelle 3-2: Belgien – Abgeschätztes Inventar an endzulagernden HAW und BE (Supercontainerkonzept)

Kategorie	Masse tSM	Kokillen bzw. BE Stck.	Endlagerbehälter Stck.	Volumen per Gebinde [m³]
Volle Wiederaufarbeitung				
HAW	4.860	3.920 Kokillen	1.960	12
MOX-BE	75	144 BE	144	12,3
Option direkte Endlagerung				
HAW	670	420 Kokillen	210	12
DWR-BE	4.190	ca. 10.000 BE	ca. 2.500	21,5
MOX-BE	75	144 BE	144	12,3

Im weiteren wird das Endlagerkonzept entsprechend dem derzeit favorisierten Konzept des Einsatzes von Supercontainern beschrieben.

3.1.2 Endlagerbehälterkonzept

Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen OPHELIE (On Surface preliminary heating simulation experimenting later instruments and equipment) sowie PRACLEY (Preliminary demonstration test for clay disposal of highly radioactive waste), die im Rahmen des SAFIR-2-Konzeptes durchgeführt wurden, zeigten Probleme der praktischen Machbarkeit des sicheren Transportes und der Platzierung der HAW-Gebinde /3-5/. Die Materialauswahl der Endlagerbehälter und die Abmessungen einiger technischer Barrieren erschienen nicht ausreichend begründet. Deshalb wurde eine Weiterentwicklung des SAFIR-2-Konzeptes vorgenommen (s. Kap. 3.1.3). Eine der wesentlichsten Veränderungen betraf das Endlagerbehälterkonzept, was auch eine Veränderung der Einlagerungskonzeption nach sich zog.

Bezüglich des Endlagerbehälters wurden folgende Anforderungen formuliert /3-5/:

- Der Endlagerbehälter und seine unmittelbare Umgebung müssen so ausgelegt sein, dass ein sicherer Einschluss der Radionuklide für mindestens 500 Jahre für verglaste HAW und 2000 Jahre für ausgediente Brennelemente gewährleistet wird.
- Um die Dauer des Umwelteinflusses während der Einlagerungsphase, insbesondere der Einflüsse, die eine Korrosion der Behälter verursachen können, zu verringern, ist die Einlagerung von mindestens zwei Endlagerbehältern der unterschiedlichen Auslegungen pro Tag zu gewährleisten.

ONDRAF/NIRAS hat dazu das Konzept des Supercontainers als neues Referenz-Behälterkonzept für die Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen entwickelt. Die Auswahl dieses Konzeptes beruht auf einer Analyse verschiedener alternativer Auslegungsoptionen, die nach einer Reihe von Langzeit-Sicherheitskriterien sowie Machbarkeitskriterien bewertet wurden.

Das Supercontainerkonzept sieht vor, die Abfälle in Overpacks aus unlegiertem Stahl mit einer Wandstärke von 30 mm zu verpacken und anschließend den Deckel des Overpacks zu verschweißen. In einen Overpack sollen jeweils zwei HAW-Kokillen, vier DWR-BE bzw. ein MOX-BE verpackt werden. Jeweils ein Overpack mit Abfällen wird dann in einen Supercontainer verpackt. Der Supercontainer gewährleistet den Strahlenschutz durch einen Zementbuffer, der den Overpack umgibt. Die Stärke des Zementbuffers soll ca. 600 bis 700 mm betragen. Als Material für den Buffer werden anorganischer Phosphatzement und gewöhnlicher Portlandzement betrachtet.

An das Material des Buffers werden folgende Anforderungen gestellt /3-5/:

- Chemisch kompatibel mit den umgebenden Komponenten (Material des Overpack, Wirtsgestein),
- Stabilität bei hoher Temperaturbelastung (bis 100° C),
- Gleicher Ausdehnungskoeffizient wie der Metallmantel,
- Hinreichende Wärmeleitfähigkeit,
- Entsprechende Dichte, um den Strahlenschutz ohne zusätzliche Abschirmung zu gewährleisten,
- Geringes hydraulisches Leitvermögen um eine mögliche Infiltration von Flüssigkeiten zur Oberfläche des Overpacks zu verlangsamen.

Den Buffer umgibt ein Metallmantel mit einer Wandstärke von 6 mm, der die mechanische Stabilität gewährleisten und gleichzeitig als Gussform für das Zementmaterial dienen soll. Der Metallmantel soll auch das Buffermaterial vor einer Einwirkung von korrodierenden Substanzen im Boom-Ton schützen. Aus Überlegungen des Korrosionsschutzes wird der Einsatz von Austenitstahl für den Metallmantel erwogen. Der Metallmantel wird mit Deckeln verschweißt.

Ein Schnitt durch einen Supercontainer ist in Abbildung 3-1 gezeigt.

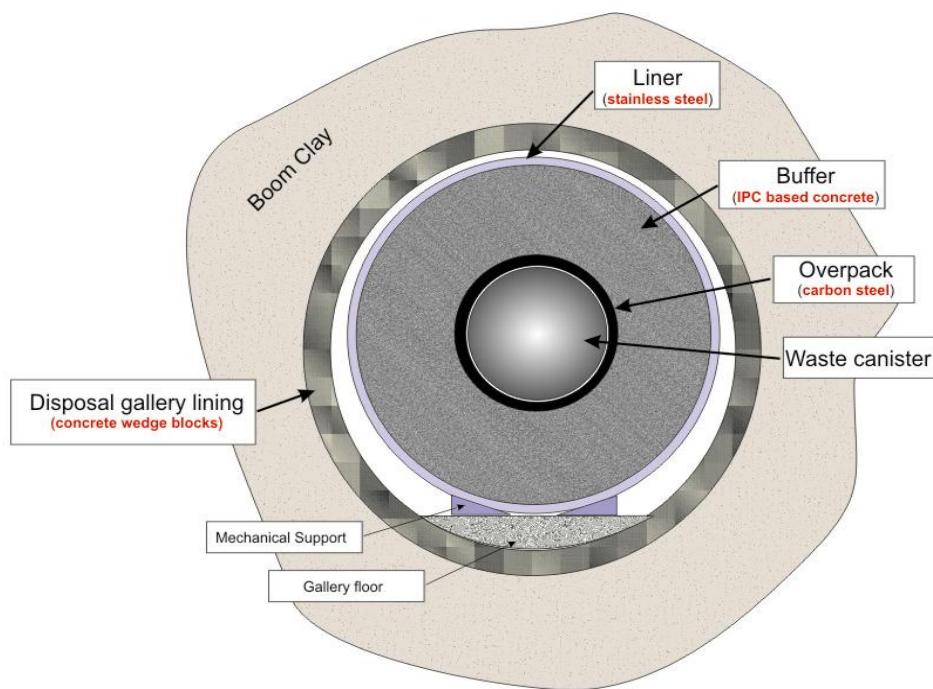


Abbildung 3-1: Belgien – Schematischer Schnitt eines Supercontainers /3-5/

Bei der Konstruktion der Supercontainer wird berücksichtigt, dass sich die für die Endlagerung vorgesehenen Abfälle in ihren Abmessungen unterscheiden. So weisen die Brennelemente der belgischen KKW unterschiedliche Gesamtlängen, Massen und Seitenbreiten auf (s. Tabelle 3-3). Deshalb werden unterschiedliche BE-Overpacks und damit auch unterschiedliche Supercontainer eingesetzt.

Tabelle 3-3: Belgien – Brennelementdaten /3-3/

Reaktorblock	Doel 1, 2	Tihange 1	Tihange 2, Doel 3	Tihange 3, Doel 4
Brennelementtyp	14x14	15x15	17x17	17x17
Seitenbreite (mm)	198	214	214	214
Gesamtlänge (mm)	2940	4110	4110	4855
Gesamtmasse (kg)	385	650	670	780
Uran-Masse (kg)	265	431	461	528
Masse der Strukturteile (kg)	120	219	209	242

Andere Abmessungen der Overpacks und zugehörigen Supercontainer ergeben sich aus den Abmessungen der HAW-Kokillen, die für die COGEMA-Kokillen für verglaste HAW nachstehend aufgeführt sind /3-3/, /3-7/.

- Material Austenitstahl AISI 309
- Volumen innen 170 l
- Transportvolumen 175 l
- Außendurchmesser 430 mm
- Wandstärke 5 mm
- Gesamthöhe 1338 mm
- Mittlere Gesamtmasse 492 kg
- Maximale Aktivität $2,8 \cdot 104$ TBq
- Maximale Wärmeentwicklung 2000 W

Entsprechend den oben erläuterten unterschiedlichen Abmessungen der HAW-Kokillen bzw. ausgedienten Brennelementen sind Supercontainer mit unterschiedlichen Abmessungen konzipiert (s. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Belgien – Angaben zu Endlagerbehältern (Supercontainern) für HAW-Kokillen und ausgediente Brennelemente /3-8/, /3-9/

Abfallart	Beladung	Behälterabmessungen		Standzeit	Zwischenlagerzeit	Wärmeleistung
WA-Abfälle	2 HAW-Kokillen	Außendurchmesser: Länge: Wandstärke: Gesamtmasse: Gesamtvolumen:	1.900 mm 4.200 mm 700 mm 30 Mg 12 m ³	500 a	60 a bis 70 a	keine Angabe
BE	4 DWR-BE (Uran)	Außendurchmesser: Länge (max.): Wandstärke: Gesamtmasse (max.): Gesamtvolumen:	2.100 mm 6.200 mm 600 mm 60 Mg 21,5 m ³	2000 a	60 a bis 70 a	keine Angabe
BE	1 DWR-BE (MOX)	Außendurchmesser: Länge: Wandstärke: Gesamtmasse: Gesamtvolumen:	1.600 mm 6.100 mm 600 mm 31 Mg 12,3 m ³			

3.1.3 Endlagerkonzept

Seit den 70er Jahren wurden in Belgien verschiedene Konzepte zur Endlagerung in geologischen Formationen betrachtet. Dabei vollzog sich eine Entwicklung von der in anfänglichen Studien betrachteten Bohrlochendlagerung (PAGIS) zur Streckenlagerung /3-2/. Das ur-

sprüngliche SAFIR-2-Konzept ging von einer Endlagerung in Strecken in der Boom-Ton-Formation am Standort Mol-Dessel aus. Dieses Grundkonzept wird auch weiterhin verfolgt.

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

- Endlagerung des HAW aus der Wiederaufbereitung aller ausgedienten Brennelemente (Referenzoption) sowie der MOX-BE;
- Direkte Endlagerung der Brennelemente und Endlagerung der verglasten HAW-Abfälle aus der Wiederaufbereitung gemäß den bestehenden Verträgen.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung der festgelegten Temperaturkriterien für das Verfüllmaterial bzw. die Wirtschaftsformation. 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“ /3-10/.

Die Hauptargumente für diese Festlegung sind:

- Vermeidung einer möglichen Verdampfung von Wasser, das in Poren an einzelnen Stellen zwischen der Streckenverkleidung und dem Verfüllmaterial auch nach Sättigung des Bentonits bei atmosphärischem Druck vorhanden sein könnte;
- Verminderung einer Mineralumwandlung, z. B. Illitisierung
- Verminderung der Wirkung von Kombinationseffekten von thermischen, hydraulischen, mechanischen, mineralogischen, physikalischen und chemischen sowie Transportprozessen;
- Verringerung der Korrosionsrate der Endlagerbehälter;
- 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.

Im Rahmen des SAFIR-2-Konzeptes wurden zur Bestimmung der Bedingungen, unter denen das o. g. Kriterium bei der Referenzauslegung des Endlagers im Boom-Ton in Mol-Dessel eingehalten werden können, entsprechende thermische Berechnungen für verglaste HAW durchgeführt. 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 /3-9/. Bezogen auf das konzipierte Endlagerfeld bzw. die Einlagerungsstrecken ergibt sich eine maximale zulässige Wärmebelastung von ca. 100 kW/ha /3-11/ bzw. 250 W/m. Weiterhin wird die Einhaltung des Temperaturkriteriums durch entsprechende Abstände zwischen den Containern

in der Einlagerungsstrecke, durch die Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. durch das Layout des Endlagers gewährleistet. Wesentlich dabei sind auch die thermischen Eigenschaften des Nahfeldes.

Für die Auslegung des Endlagers wurden neben den in 3.1.2 aufgeführten Anforderungen an die Endlagerbehälter folgende weitere spezifischen Anforderungen formuliert /3-6/:

- Um die eingebrachten Abfallcontainer ist eine Verfüllung erforderlich, um die mechanische Abstützung der Streckenwände über sehr lange Zeiträume zu gewährleisten und einen plötzlichen Einbruch der Streckenwände auf die Abfälle zu vermeiden.
- Die Auslegung des Endlagers hat so zu erfolgen, dass die Barrierenfunktion des Boom-Tones minimal gestört wird. Dazu sind spezifische Auffahrtechniken sowie Konstruktionselemente einzusetzen, um die Strecken mit minimal möglichen Abmessungen aufzufahren und auszubauen.
- Die verschiedenen technischen Barrieren sind so auszuwählen und auszulegen, dass die Barrierenfunktion des Boom-Tons nicht nachteilig beeinflusst wird.
- Die horizontalen Strecken sollen im mittleren Teil der Boom-Ton-Formation aufgefahren werden, um eine möglichst effektive Einbettung der Abfälle in der Tonschicht zu erreichen. Das heißt, dass die Endlagerstrecken in einer Teufe von 230 m angeordnet werden sollen.
- Um Ungewissheiten bei den Sicherheitsanalysen möglichst auszuschließen, sollte das Endlagersystem ausreichend robust ausgelegt sein, d. h. die Kennwerte der verschiedenen Komponenten des Endlagers sollen eine ausreichende Stabilität und eine der Vorhersagbarkeit ihres Verhaltens aufweisen. Eine Wechselwirkung zwischen Abfällen, technischen Barrieren und dem Wirtsgestein ist so weit wie machbar auszuschließen.

Obwohl nicht gesetzlich festgelegt, soll eine Rückholbarkeit der Abfälle in jeder Phase des Bestehens des Endlagers berücksichtigt werden. Jedoch dürfen Maßnahmen zur Ermöglichung oder Erleichterung einer Rückholung unter keinen Umständen die betriebliche und Langzeitsicherheit des Endlagers beeinträchtigen.

Unter Berücksichtigung des Verschleißes der Ausrüstungen wird eine Betriebsdauer des Endlagers von 50 Jahren angenommen.

Das vorgesehene Endlager (s. Abbildung 3-2) besteht aus einem Streckennetz in der Mitte der Boom-Ton-Formation in einer Teufe von ca. 230 m /3-3/. Es ist die Errichtung von drei Schächten vorgesehen – Auffahrtschacht, Gebindeförderschacht sowie Personen- und Winterschacht, die in einem Abstand von ca. 400 m angeordnet sind /3-5/. Der Innendurchmesser der Schächte beträgt bis zu 10 m (Gebindetransportschacht). Untertage sind die Schächte an der Basis mit einer Verbindungsstrecke mit einem Durchmesser von 6 m verbunden. Die Verbindungsstrecke stellt gleichzeitig den Fluchtweg dar. Von der Verbindungsstrecke gehen die Einlagerungsstrecken ab. Die Einlagerungsstrecken können in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnologie einen Durchmesser bis zu 4 m haben. Die Länge der Einlagerungsstrecken beträgt ca. 1000 m.

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.

Gegenwärtig werden drei verschiedene Einlagerungskonzepte als Alternativen zum SAFIR-2-Konzept untersucht /3-5/:

- Horizontale Streckenlagerung von Supercontainern (Referenzkonzept),
- Horizontale oder vertikale Bohrlochlagerung von Overpacks,
- Horizontale Einlagerung von Overpacks in Hülsen (Sleeve design).

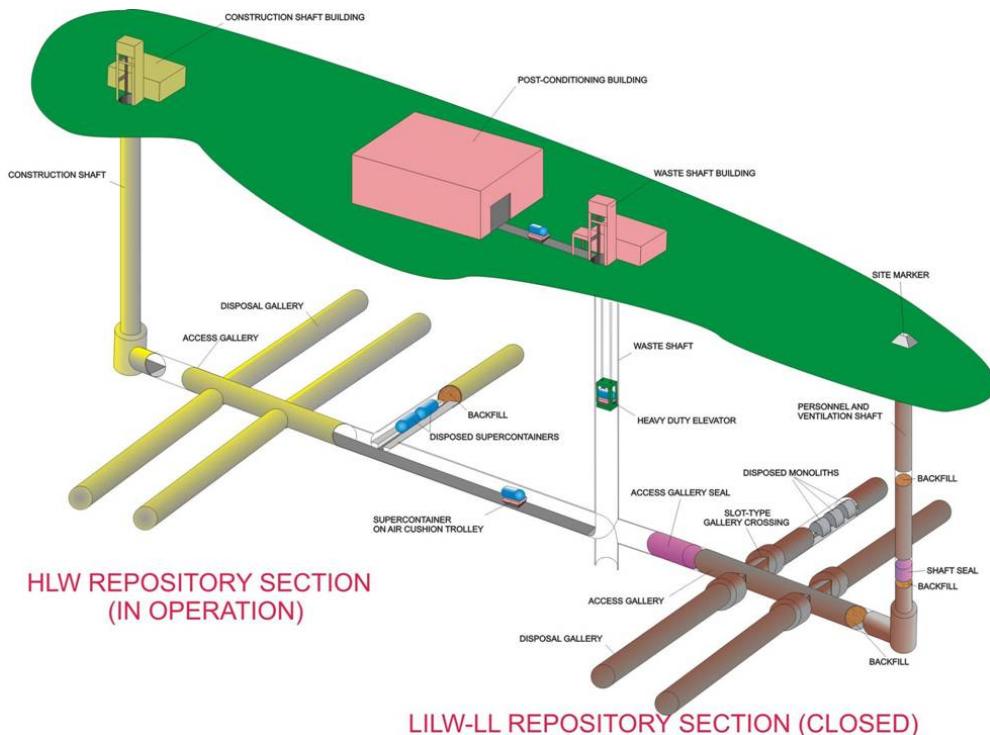


Abbildung 3-2: Belgien – Endlagerlayout /3-3/

Streckenlagerung

Zur Einlagerung der Supercontainer werden von der Verbindungsstrecke die Einlagerungsstrecken mit einem Durchmesser von 3600 mm aufgefahren, die mit Betonsegmenten von ca. 300 mm Stärke ausgebaut werden. Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 zeigen die Streckenlagerung von Supercontainern mit HAW und Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 mit ausgedienten Brennelementen. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 40 - 50 m.

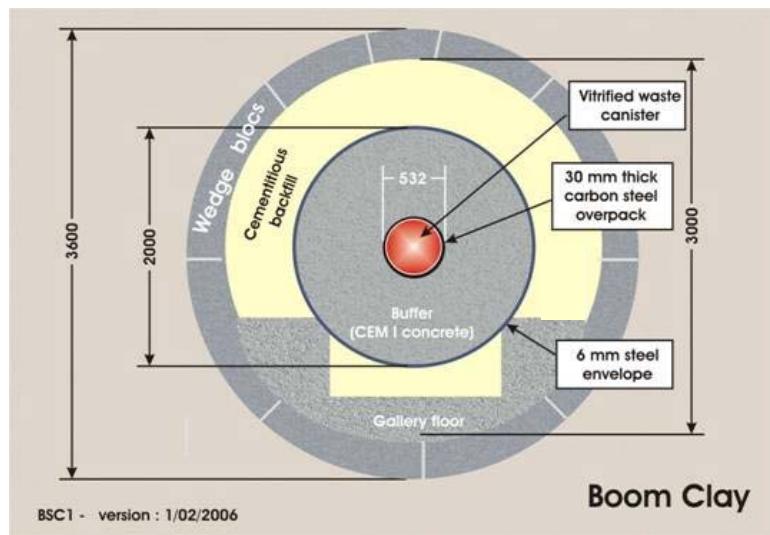


Abbildung 3-3: Belgien – Querschnitt der Streckenlagerung (Supercontainer) für HAW /3-3/

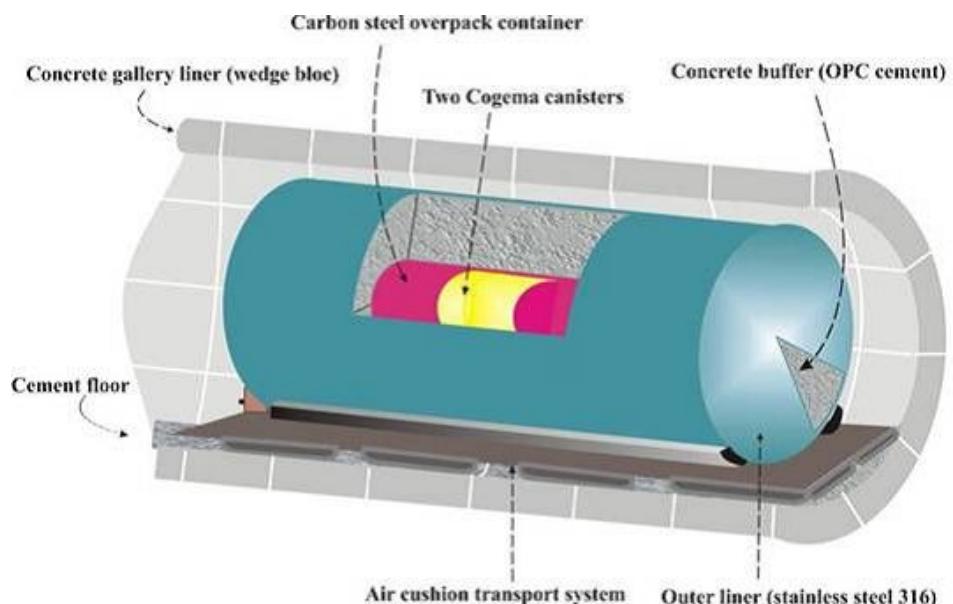


Abbildung 3-4: Belgien – Streckenlagerung Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (Supercontainer-Konzept) /3-3/

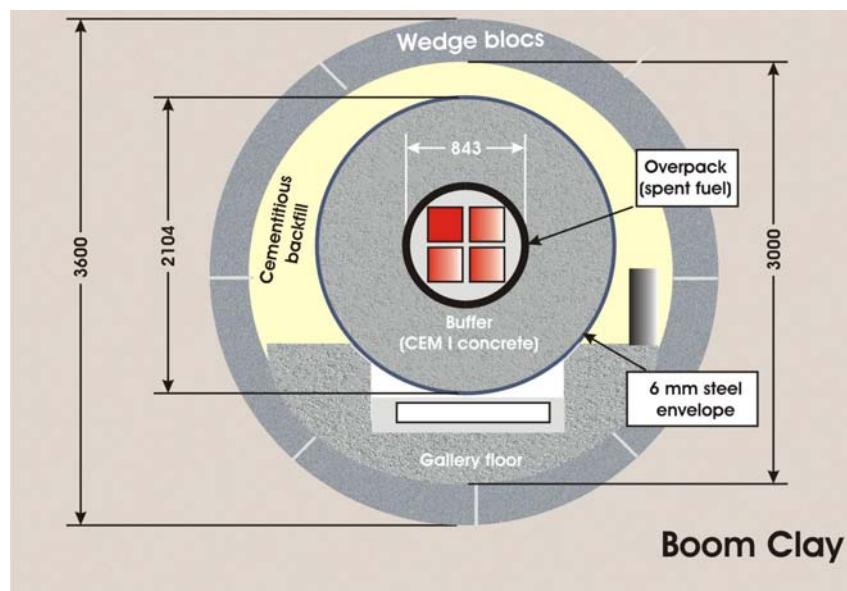


Abbildung 3-5: Belgien – Streckenlagerung von BE-Endlagerbehältern (Supercontainer-Konzept) /3-3/

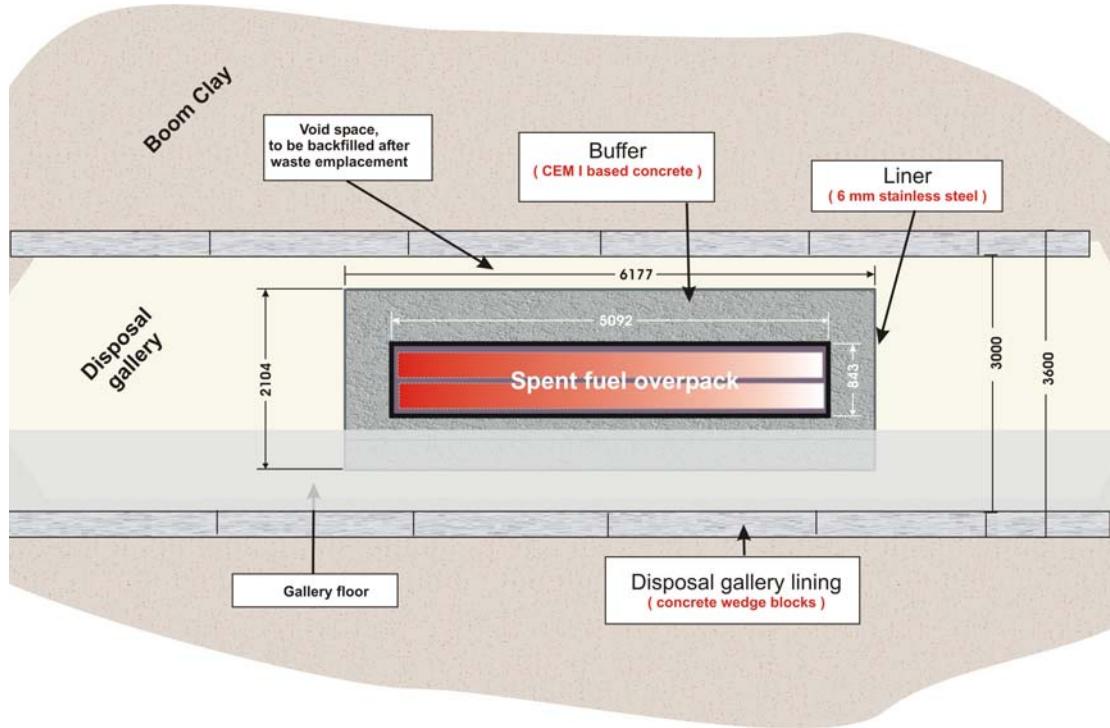


Abbildung 3-6: Belgien – Streckenlagerung von BE-Endlagerbehältern (Supercontainer-Konzept) /3-3/

Nach der Einlagerung der Container werden die verbliebenen Hohlräume der Einlagerungsstrecken verfüllt.

Bohrlochlagerung

Das Ziel dieser Einlagerungskonzeption ist eine möglichst einfache Gestaltung des technischen Barrierensystems, wobei der Boom-Ton-Formation die Hauptbarrierenfunktion zugeordnet ist /3-5/.

Die Bohrlöcher mit einer Länge von ca. 8 m werden von der Sohle der Einlagerungsstrecken gestoßen und sofort mit einem Stahlmantel verkleidet. Die Stärke dieses Stahlmantels soll so dimensioniert werden, dass die Spannungen aus der umgebenden Boom-Ton-Formation aufgenommen werden. Der Abstand zwischen den Bohrlöchern soll ca. 5 m betragen, um die Temperatur im Nahfeld auf 100 °C zu begrenzen.

In die Bohrlöcher sollen jeweils zwei Overpacks eingelagert werden (s. Abbildung 3-7). Nach der Einlagerung der Overpacks wird das Bohrloch mit einem Stopfen verschlossen, der den Strahlenschutz gewährleisten soll. Auf den Stopfen wird ein Stahldeckel gesetzt, auf den Beton bis zur Höhe der Streckensohle aufgebracht wird.

Für die Bohrlochlagerung wird eine alternative Variante zur vertikalen Bohrlochanordnung erwogen, bei der horizontale Bohrlöcher in den Wänden der Einlagerungsstrecken gestoßen werden. Die Anordnung der Bohrlöcher soll in einem bestimmten Abstand alternierend in der linken und rechten Streckenwand erfolgen. Diese Variante hätte gegenüber der vertikalen Anordnung den Vorteil, dass die Mächtigkeit der geologischen Barriere der Boom-Ton-Formation nicht beeinträchtigt wird. Gewisse Nachteile werden bei der Handhabung gesehen.

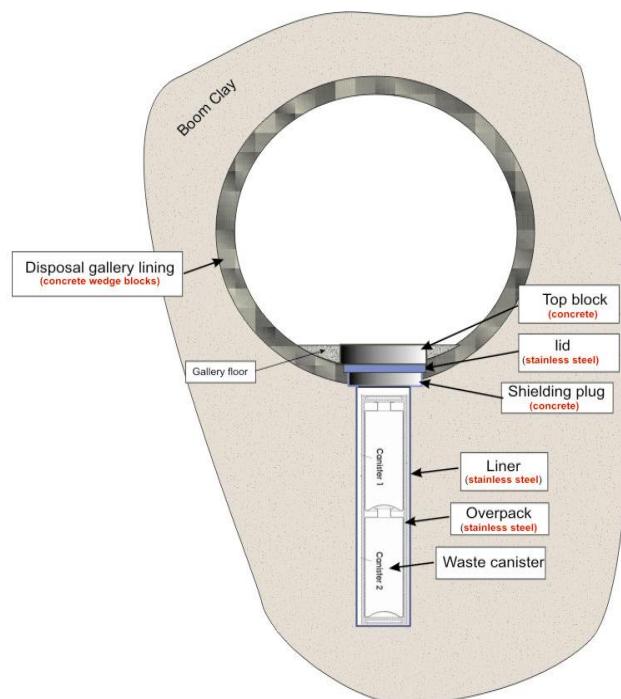


Abbildung 3-7: Belgien — Bohrlochlagerung von Overpacks mit HAW /3-5/

Horizontale Einlagerung von Overpacks in Hülsen (Sleeve design)

Das Ziel dieses Einlagerungskonzeptes ist es, den Durchmesser der Endlagerstrecken zu minimieren und damit die Störung des Wirtsgesteins zu verringern.

Die Endlagerstrecken sollen einen Durchmesser von ca. 2,25 m haben. In die Endlagerstrecken wird die sogenannte Hülse aus Bentonit eingebracht, in die dann ein Overpack platziert wird (s. Abbildung 3-8). Anschließend wird die nächste Hülse eingebracht und mit der vorangegangenen Hülse mit einem s. g. Schlüsselstein verbunden. Dann wird der nächste Overpack eingelagert, usw. Zwischen den einzelnen Einlagerungsvorgängen wird die Einlagerungsstrecke mit einem temporären Stopfen als Strahlenschutzmaßnahme verschlossen.

Der Einsatz von Beton für die Hülsen wurde ausgeschlossen, da dabei Wegsamkeiten in der beladenen Endlagerstrecke verbleiben können, was aus Sicht möglicher Korrosion sowie Nuklidmigration vermieden werden sollte. Deshalb wurde ein gut quellender Bentonit ausgewählt, aus dem dieses Konstruktionselement gefertigt werden soll. Die Montage der Hülsen aus gepressten Bentonitringen ist angedacht.

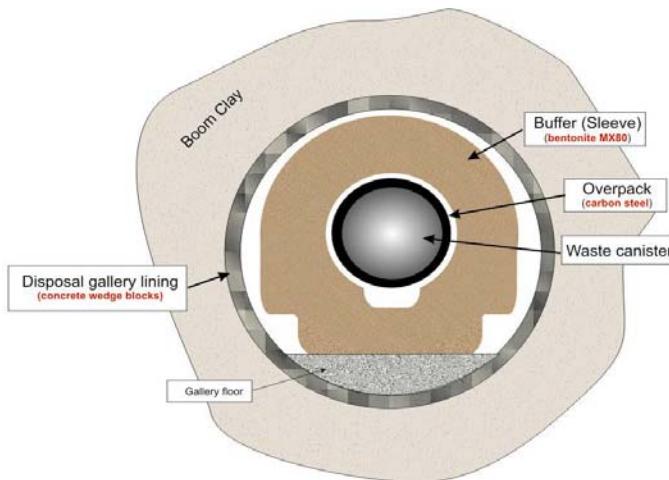


Abbildung 3-8: Belgien – Einlagerung von Overpacks in Hülsen (Sleeve design) /3-5/

3.1.4 Transport- und Handhabungssystem

Für das SAFIR-Konzept wurde ein schienengebundener Transportwagen entwickelt, auf dem vier Abfallbehälter transportiert werden können und auf dem auch der Schieberoboter für das Platzieren der Behälter in der Einlagerungsstrecke angeordnet ist.

Für das jetzt favorisierte Supercontainerkonzept wurden erste Untersuchungen zum möglichen Transportsystem durchgeführt. In einer Machbarkeitsstudie sind für die Endlagerbereiche über Tage sowie für die Zugangs- und Endlagerstrecken drei verschiedene Transporttechniken betrachtet worden: Schiene, Rad, Luftkissen. Hierzu ist von ONDRAF/NIRAS in Zusammenarbeit mit BABCOCK NOELL und BELGATOM eine Studie zur Basisauslegung für den Schacht- und Untertagetransport des Supercontainers erarbeitet worden /3-5/. Als am geeignetsten wurde bisher der Luftkissentransport erachtet.

Bei der vertikalen Bohrlocheinlagerung von Overpacks ist an den Einsatz einer Einlagerungsmaschine gedacht, die der für das schwedische KBS-3-Konzept entspricht /3-5/.

Bei dem sogenannten Hülsen-Konzept soll der Transport der Overpacks zu den Einlagerungsstrecken in einem Abschirmbehälter auf einem speziellen Transportwagen erfolgen. Das Einbringen der Overpacks in die Hülsen soll mit einem speziellen Gabelstapler erfolgen. Beide Maschinen sollen schienengebunden sein.

3.1.5 Auffahrtechnik

Bezüglich der Errichtungstechnologie des belgischen Endlagers liegen noch keine detaillierten 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 können. Deshalb wird im weiteren eine kurze Beschreibung der im Untertagelabor in Mol angewendeten Auffahrtechniken gegeben /3-4/, /3-12/, /3-13/.

Für das Durchfahren der ca. 180 m mächtigen Deckgebirgsschichten aus z. T. wasserführenden Sandschichten wurde das Gefrierverfahren eingesetzt. Dazu wurden von der Oberfläche insgesamt 16 Gefrierrohre auf einem Kreis von 7 m Durchmesser bis in eine Tiefe von 192 m niedergebracht. Damit wurde auch die Übergangszone zwischen den Sandschichten und dem Boom-Ton erfasst. Nach dem Einfrieren wurde mit dem Schachtteufen begonnen. Nach jeweils 2 m Teufung wurde auf die Schachtwand eine Spritzbetonschicht aufgetragen, deren Stärke von 20 cm stufenweise auf 40 cm erhöht wurde. Das Teufen wurde bis zum Erreichen des Tonspiegels fortgesetzt. Hier wurde dann das Ringfundament für den weiteren Ausbau des Schachtes errichtet. Der Endausbau des Schachtes erfolgte mit vorgefertigten Stahlbetonringen mit einer äußeren 8 mm starken Stahlverkleidung. Die einzelnen Ringe mit einer Wandstärke von 30 cm und einer Höhe von 2,85 m wurden miteinander verschweißt. Der Zwischenraum zwischen Spritzbeton und Stahlbetonringen wurde mit flüssigem Asphalt ausgegossen. Damit wurde vor allem eine bessere Dichtigkeit des Schachtes und eine bessere Verteilung der Spannungen auf den Ausbau erreicht.

Der weitere Schachtbau erfolgte ohne Einfrieren bis zur Endteufe von 230 m. Auf Grund der hohen Konvergenz des Boom-Tons war es erforderlich, so schnell wie möglich zeitweilige Beton-Rippen-Schalungen zu setzen. Der Endausbau des unteren Schachtteils erfolgte nach Erreichen der Endteufe mit Stahlbetonguss.

Der fertige Schacht hat einen Innendurchmesser von 3 m. Ein Schnitt des Schachtes ist in Abbildung 3-9 gezeigt. Grundprinzip beim Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 zur bestehenden Versuchsstrecke war, die Störung der umgebenden Wirtschaftsformation so gering wie möglich zu halten. Diese Störung hängt wesentlich vom Durchmesser der aufzufahrenden Strecke ab. Bei gleichem Durchmesser ist die Störung umso geringer,

- je schneller das Auffahren erfolgt,

- je kürzer die Zeit zwischen Auffahren und Ausbau ist,
- je geringer das Überschneiden der Strecke gehalten wird,
- je enger der Ausbau am geschnittenen Profil anliegt,
- je steifer der Ausbau ist.

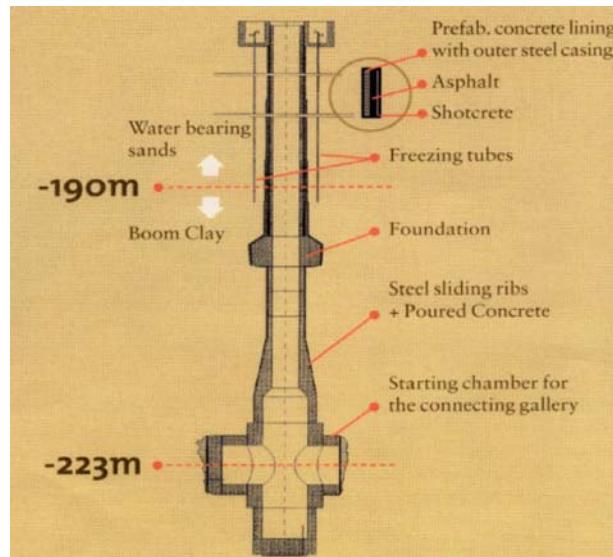


Abbildung 3-9: Untertagelabor HADES – Schnitt Schacht 2 /3-13/

Für das Auffahren der Verbindungsstrecke wurde deshalb eine Vollschnittmaschine gewählt (Abbildung 3-10). Die maximale zulässige Schnittleistung wurde mit 2 m pro Tag bestimmt. Das Überschneiden des Profils wurde auf max. 3 cm begrenzt. Sofort nach dem Auffahren erfolgte der Ausbau der Strecke mit Betonelementen im sogenannten Keilblocksystem (s. Abbildung 3-11). In /3-4/ ist vermerkt, das 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.

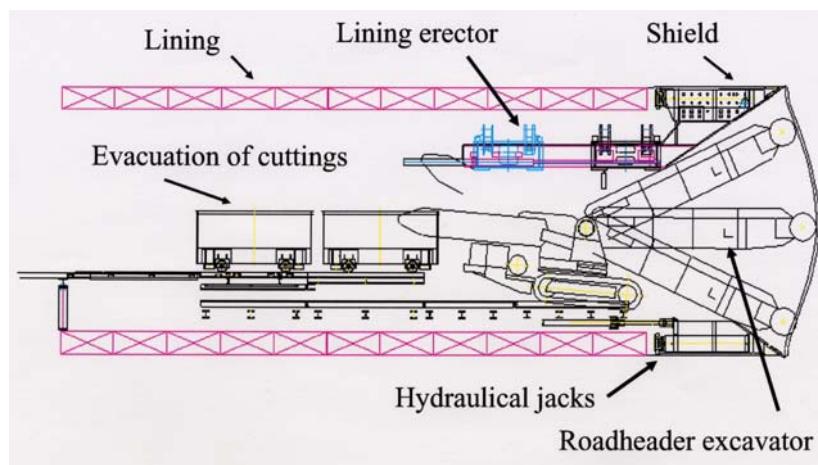


Abbildung 3-10: Untertagelabor HADES – Vollschnittmaschine zum Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /3-13/

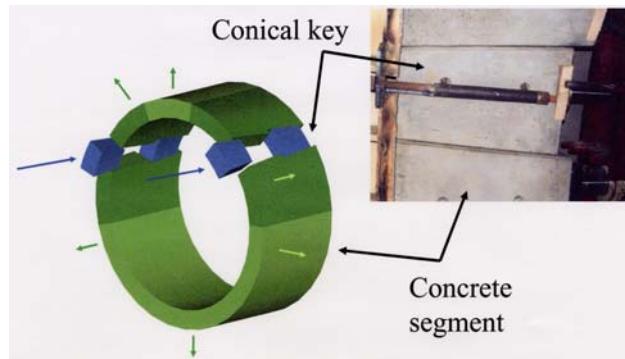


Abbildung 3-11: Keilblocksystem für den Streckenausbau /3-13/

3.1.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Im SAFIR-Konzept waren als Verfüllmaterial für die Einlagerungsstrecken vorgefertigte Elemente aus einem Gemisch von 60% FoCa-Ton, 35% Sand und 5% Graphit vorgesehen /3-4/, /3-10/. Durch den Graphitzusatz wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials wesentlich erhöht. In /3-4/ wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials mit $2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ angegeben, gegenüber einer Wärmeleitfähigkeit des Boom-Tons von $1,69 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Korrosionsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Graphit keinen Einfluss auf die Korrosion von Austenitstahl hat /3-14/.

Das jetzige Verfüll- und Verschlusskonzept des Endlagers in der Boom-Ton-Formation sieht bei Einsatz der Supercontainer eine Verfüllung der in den Einlagerungsstrecken verbliebenen Hohlräume mit einem fließfähigen Zementmaterial vor. Die wesentlichsten Funktionen dieser Barriere sind:

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

Für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken werden zwei Varianten betrachtet:

- Abschnittsweise Verfüllung nach Einlagerung einer geringen Behälteranzahl (Abbildung 3-12)
- Komplette Verfüllung nach Abschluss der Einlagerung in einer Einlagerungsstrecke (Abbildung 3-13).

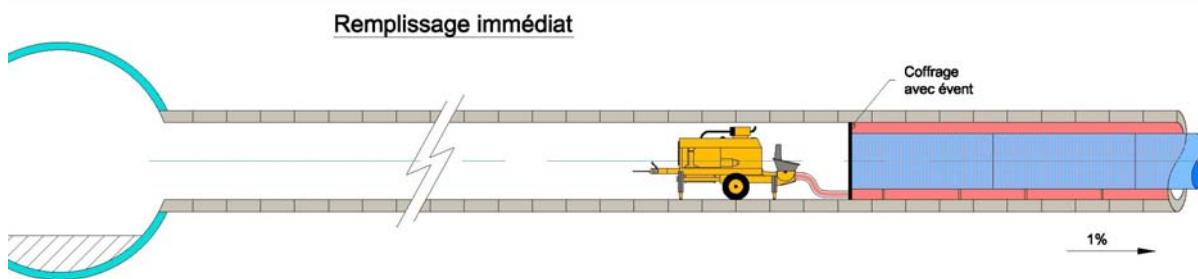


Abbildung 3-12: Belgien – Abschnittsweise Verfüllung der Einlagerungsstrecken

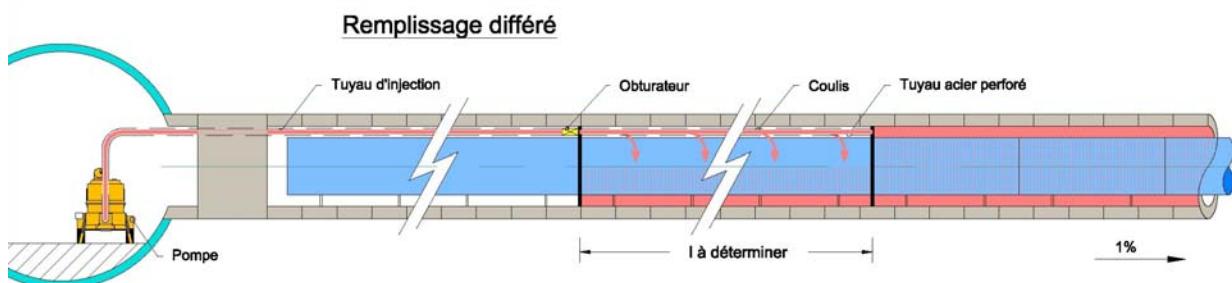


Abbildung 3-13: Belgien – Verfüllung einer Einlagerungsstrecke nach Einlagerung aller Behälter

Die Verfüllung der Verbindungsstrecke soll mit einem Ton-Sand-Gemisch erfolgen. Des Weiteren sind zwei wasserdichte Verschlussbauwerke vorgesehen, die hintereinander angeordnet werden. Anschließend wird die Strecke versiegelt.

Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken für HAW mit geringer Wärmeentwicklung und LILW sowie der übrigen Strecken und der Schächte soll mit Beton oder ähnlichem Material erfolgen bzw. mit einem Gemisch aus FoCa-Ton und Sand /3-4/.

An den Schachtverschluss werden folgende Hauptanforderungen gestellt /3-15/:

- 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 Endlagerteufe 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.

In den laufenden Experimenten wird u. a. ein Bentonit untersucht, der gepresst eine Dichte von 1,7 g/cm³ aufweist und nach Sättigung einen Quelldruck von 4,4 MPa, was der lithostatischen Spannung der Wirtsformation entspricht. Die Durchlässigkeit nach Sättigung des Bentonits wird mit ca. 10⁻¹³ m/s angegeben /3-15/.

3.1.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Im SAFIR-2-Bericht /3-3/ wurde der Entwicklungsstand des geologischen Endlagerkonzeptes in der Boom-Ton-Formation beschrieben. Danach wurden und werden seit längerer Zeit zur Begründung der Konzeption intensive Forschungsarbeiten, insbesondere im Rahmen des Untertagelabors HADES bei Mol, durchgeführt. Mit einer Planung des Endlagers konnte aber noch nicht begonnen werden.

Das weitere schrittweise Vorgehen auf dem Wege zu einem geologischen Endlager umfasst folgende Etappen /3-6/, /3-16/, /3-17/:

- Klärung der Endlageroption im Boom-Ton, Definition des Standortbestimmungsprozesses, Erarbeitung einer strategischen Umweltbeeinflussungsbewertung – 2009
- Beginn der konkreten Standortsuche und -auswahl – 2010
- Bestätigung der Auswahl des Standortes im Boom-Ton
- Sicherheitstechnische und Machbarkeitsbegründung 1 (Machbarkeit, PRACLAY-Untersuchungen) – 2013
- Sicherheitstechnische und Machbarkeitsbegründung 2 (Ausschluss von phänomenologischen Komplikationen) – 2020
- Genehmigungsvorbereitung (vorläufiger Sicherheitsbericht)
- Fortführung des vorläufigen Sicherheitsberichts und Einbeziehung der wärmeentwickelnden Abfälle
- Genehmigungsverfahren
- Baubeginn frühestens 2025
- Betriebsbeginn ca. 2035.

Die zweite Phase des Forschungs- und Entwicklungsprogramms von ONDRA/NIRAS wurde mit der Veröffentlichung des SAFIR-2-Berichtes abgeschlossen. In der dritten Phase sind insbesondere verschiedene Aspekte der Machbarkeit der untersuchten technischen Lösungen nachzuweisen sowie die Zusammenführung der bisherigen Untersuchungen zu einem Konzept durchzuführen. Fundamentale Bedeutung wird dabei dem PRACLAY-Experiment zugemessen. PRACLAY (Preliminary demonstration test for CLAY disposal of highly radioactive waste) soll die Möglichkeit einer sicheren Endlagerung von wärmeerzeugenden Abfällen im Boom-Ton im Maßstab 1:1 demonstrieren. Das Experiment soll im neu errichteten Teil des Untertagelabors durchgeführt werden. Ursprünglich war das PRACLAY-Experiment zur

Untermauerung des SAFIR-2-Konzeptes gedacht. Mit den neueren Überlegungen zum Endlagerkonzept bei Einsatz eines Supercontainers wurde das PRACLAY-Experiment modifiziert und umfasst folgende Hauptuntersuchungen /3-18/:

- In situ Untersuchungen im HADES-Labor
 - Auffahren von Endlagerstrecken und Kreuzungen von Strecken
 - Thermische Simulationsversuche über 10 Jahre
 - Untersuchungen zur Rückfüllung und Stopfen
 - Langzeitverhalten des technischen Barrierensystems
- Laboruntersuchungen
 - Untersuchung der Materialien des technischen Barrierensystems
 - Untersuchungen zur Auslegung und Konstruktion des technischen Barrierensystems
 - Untersuchungen zur thermischen, chemischen und mechanischen Wechselwirkung der einzelnen Komponenten des technischen Barrierensystems an Modellen

Eine Prinzipskizze der In-situ-PRACLAY-Experiemente ist auf Abbildung 3-14 gezeigt.

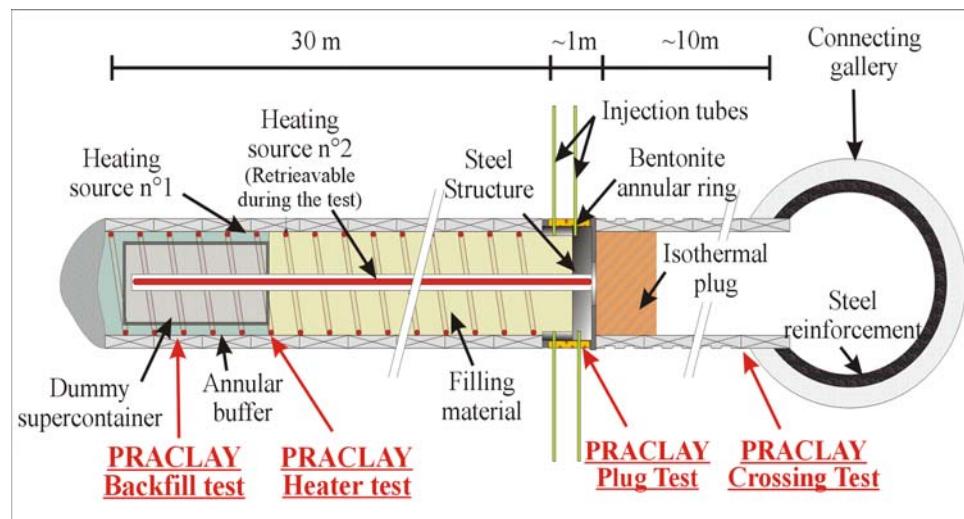


Abbildung 3-14: Belgien – In-situ-PRACLAY-Experiment /3-18/

Ausgehend von den in den Abschnitten 3.1.2 bis 3.1.4 beschriebenen Einlagerungstechnologien für verglaste HAW und ausgedienten Kernbrennstoff besteht die diesbezügliche Einlagerungstechnik aus folgenden Hauptkomponenten:

- Overpack
- Supercontainer
- Transportsystem für Supercontainer

- Transportwagen und Gabelstapler für Transport und Handhabung von HAW-Overpacks
- Kippanlage für Bohrlocheinlagerung.

Zu diesen Komponenten liegen bisher nur sporadische Informationen konzeptionellen Charakters vor. Aus der verfügbaren Literatur ist ersichtlich, dass zu allen Komponenten noch umfangreiche sicherheitstechnische und Machbarkeitsuntersuchungen erforderlich sind.

ONDRAF/NIRAS hat erste Untersuchungen zum Supercontainer bzw. zur technischen Barriere durchgeführt. Diese umfassten u. a. folgende Problemkreise:

- Radiolyse
- Thermohydraulisches Verhalten des Betonbuffers
- Metallkorrosion
- Chemische und mineralogische Veränderungen des Betonbuffers
- Gasentwicklung.

Weitere Untersuchungen zum Supercontainer werden durchgeführt bzw. sind vorgesehen, u. a.:

- Weitere Untersuchungen zum Korrosionsverhalten
- Untersuchungen zur Zusammensetzung des Buffermaterials sowie zum Material des Mantels
- Bestimmung der Kenndaten des Bufferbetons
- Erhitzungstest des Supercontainers
- Rissmodellierung des Buffers
- Erprobung von Fertigungstechnologien für den Supercontainer.

Für die bisher betrachteten Endlagerkonzepte sind verschiedene Transportsysteme von BABCOCK NOELL und BELGATOM entwickelt worden. Zum aktuellen Supercontainer-Konzept sind in einer Machbarkeitsstudie für die Endlagerbereiche übergängig sowie Zugangs- und Endlagerstrecken drei verschiedene Transporttechniken betrachtet worden: Schiene, Rad, Luftpumpe. Als am geeignetsten wird die Luftpumpe bewertet. Hierzu ist von ONDRAF/NIRAS in Zusammenarbeit mit BABCOCK NOELL und BELGATOM eine Studie zur Basisauslegung für den Schacht- und Untertagetransport des Supercontainers erarbeitet worden /3-5/, /3-19/.

Zur Verfüll- und Verschlusstechnik wurden und werden umfangreiche Studien und Versuche durchgeführt, die sowohl die Auswahl des Verfüllmaterials und Untersuchung seiner Kenndaten als auch die Verfüll- und Verschlusstechniken betreffen.

In Zusammenarbeit zwischen EIG EURIDICE, Belgien und CEA/SESD, Frankreich, wurden zum Beispiel zwei Haupttypen von Verfüllmaterial untersucht – vorgespannte Bentonitblöcke sowie hochverdichtete Pellets gemischt mit Bentonitpulver /3-20/. Zur Auswahl des Verfüllmaterials wurden Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität und zum Schwelldruck durchgeführt. Die Fertigung der Blöcke im industriellen Maßstab wurde erprobt. Die dabei erreichte mechanische Stabilität und Formbeständigkeit ermöglicht den Transport der Blöcke, die Lagerung und den Einbau ohne nennenswerte Probleme. Die Sättigung des Materials, Schwelldruck, Permeabilität und Verhalten bei Wärmebelastung des gesättigten Materials wurden und werden in-situ untersucht.

Für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken wurden erste Untersuchungen zum Einsatz von Material auf Zementbasis durchgeführt. Das Schachtverschlusskonzept wird im Untertagelabor in Mol im Modellversuch (RESEAL-Projekt) untersucht. In einem Bohrlochversuch werden zwei unterschiedliche Materialien getestet – FoCa-Ton (Frankreich) und Serrata-Ton (Spanien). Die Verschlusstopfen werden aus vorgespannten Bentonitblöcken errichtet /3-4/, /3-20/.

3.1.8 Aufwand- und Kostenbewertung

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des belgischen Referenzendlagers im Boom-Ton liegen zusammengefasst folgende Informationen vor /3-4/:

Von ONDRAF/NIRAS wurde eine Methodologie für die Kostenabschätzung entwickelt. Diese beruht auf einer analytischen und 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 verglaste HAW und ausgediente Brennelemente vorgenommen, da für den Endlagerteil für LILW noch kein Konzept vorliegt. Es wurde allerdings berücksichtigt, dass höchstwahrscheinlich ein gemeinsames Endlager für die genannten Abfallkategorien errichtet wird. Tabelle 3-5 zeigt die Ergebnisse der Kostenabschätzungen für die zwei Endlageroptionen – komplette Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes und direkte Endlagerung der ausgedienten Brennelemente.

Die in Tabelle 3-5 aufgeführten Kostenabschätzungen berücksichtigen nicht die Kosten für bisher geleistete FuE-Arbeiten, die für die Zeit von 1974 bis 2000 mit 150 Mill. € zu Preisen aus dem Jahr 2000 bewertet werden.

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

Tabelle 3-5: Belgien – Kostenabschätzung für ein Endlager im Boom-Ton (Preise, Stand 2000) /3-4/

Endlagerphase	Komplette Wiederaufarbeitung			Direkte Endlagerung		
	Grundkosten Mill. €	Koeffizient	Schätz- kosten Mill. €	Grund- kosten Mill. €	Koeffizient	Schätz- kosten Mill. €
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

Nach neueren Abschätzungen sollen die Errichtungskosten des Endlagers bei ca. 520 Mill. EURO liegen.

3.2 Frankreich

Mit dem Gesetz N° 91-1381 vom 30 Dezember 1991 wurden in Frankreich drei Hauptforschungsrichtungen für das Management hochaktiver und langlebiger radioaktiver Abfälle festgelegt /3-21/, /3-22/:

- Untersuchungen für die Trennung und Transmutation von Radionukliden – verantwortlich CEA;
- Untersuchung der Möglichkeiten einer rückholbaren bzw. reversiblen Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, insbesondere durch die Errichtung von Untertagelabors – verantwortlich ANDRA;
- Untersuchung der Konditionierung und oberflächennahen langfristigen Zwischenlagerung – verantwortlich CEA.

Damit wurde ein umfangreiches Forschungsprogramm zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen gestartet, einschließlich der Errichtung von Untertage-Labors. Dabei werden sowohl Granit- als auch Tonformationen betrachtet. Seit 1992 werden Arbeiten zur Endlagerkonzeption durchgeführt. Geologische Erkundungsarbeiten laufen seit 1994 /3-23/.

1997 wurden generische Endlagerkonzepte für drei Standorte (Tonformation in Meuse/Haute-Marne sowie Gard und Granitformation in Vienne) vorgelegt. Die weiteren Arbeiten mündeten in der Entwicklung von vorläufigen Endlagerkonzepten, die die Ergebnisse von ersten Sicherheitsbewertungen berücksichtigten, insbesondere bezüglich der Gebinde und der technischen Barrieren.

Bezüglich der Endlagerung in Granitgestein beschränkten sich die Arbeiten im wesentlichen auf die Erarbeitung konzeptioneller Lösungen, basierend auf Analysen von ca. 78 Standorten in Granitgesteinen, die ausreichend weit von Störungszonen entfernt sind. Der Granitstand-

ort Vienne wurde entgegen den ursprünglichen Planungen wegen geologischer und konzeptioneller Defizite nicht weiter verfolgt.

Im Dezember 1999 wurde von der französischen Regierung die Errichtung eines Untertage-labors in der Tonformation bei Meuse/Haute-Marne beschlossen. Das Forschungsprogramm der ANDRA ist vornehmlich auf die Untersuchung der Eignung dieses Standortes für die Errichtung eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten ausgerichtet. Das im weiteren beschriebene Endlagerkonzept für eine Tonformation bezieht sich auf den genannten Standort.

In Auswertung der bis dahin gewonnenen Ergebnisse wurde 2005 das „Dossier 2005 Argile“ zur Sicherheit der geologischen Endlagerung hochradioaktiver und langlebiger Abfälle in Frankreich vorgelegt, das einem Peer Review durch die OECD/NEA unterzogen wurde. Auf dieser Grundlage hat die Nationalversammlung am 31. Mai 2006 einem Gesetzentwurf zugestimmt, der die Fortsetzung der Arbeiten mit dem Ziel der Errichtung eines Endlagers bis 2025 vorsieht.

3.2.1 Endlagerinventar

In /3-21/ wird von der ANDRA ein Mengengerüst für die einzulagernden Abfallströme an hochaktiven Abfällen für vier 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 1a: Wiederaufarbeitung des gesamten ausgedienten Kernbrennstoffes von den gegenwärtig bestehenden Kernkraftwerken

Szenarium 1b und 1c: Wiederaufbereitung des ausgedienten Kernbrennstoffes mit Ausnahme des MOX-Brennstoffes, für den die Option direkte Endlagerung angenommen wird. Beim Szenarium 1b wird eine höhere Wärmeerzeugung der verglasten Abfälle im Vergleich zu der derzeitigen Wärmeerzeugung angenommen. Beim Szenarium 1c entspricht die Wärmeerzeugung den gegenwärtigen Gebinden.

Szenarium 2: Wiederaufbereitung von Uranoxidbrennelementen bis zum Jahre 2010 und dann direkte Endlagerung.

Bei diesen Szenarien sind folgende Mengen an Kernbrennstoff wiederaufzuarbeiten:

- Szenarium 1a

○ Uranoxid-Brennelemente	41 500 tSM
○ Natururanoxid-Brennelemente	800 tSM
○ MOX-Brennelemente	2 700 tSM

- Szenarium 1b und 1c
 - Uranoxid-Brennelemente 41 500 tSM
 - Natururanoxid-Brennelemente 800 tSM
- Szenarium 2
 - Uranoxid-Brennelemente 16 000 tSM

Das Endlagerprogramm der direkten Endlagerung ausgedienter BE wurde Anfang 2007 ausgesetzt. Es soll zu einem späteren Zeitpunkt über eine Wiederaufnahme entschieden werden. In Tabelle 3-6 sind die endzulagernden Abfallgebinde für die Szenarien 1a und 2 angegeben.

Tabelle 3-6: Frankreich – HAW-Endlagerinventar /3-21/, /3-23/

		Szenarium 1a Totale Wiederaufarbei- tung		Szenarium 2 Wiederaufbereitung bis 2010 und dann direkte Endlager- rung	
Verglaste Abfälle					
Gebindetyp*		Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³
C0		4120	700	4120	780
C1		4640	810	4640	810
C2		990	170	5920	1040
C3		13320	2330	0	0
C4		13250	2320	0	0
Gesamt		36320	6330	14680	1850
Ausgediente Brennelemente					
Gebindetyp*		Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³	Gebinde- anzahl	Gebinde- volumen m ³
CU 1 Uranoxid-BE u. Natururanoxid-BE		0	0	13500	67500
CU2 MOX-BE		0	0	4000	8000
Gesamt		0	0	17500	75500

* Beschreibung der Gebinde s. Kap. 3.2.2

3.2.2 Endlagerbehälterkonzept

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht mehrere Behältertypen vor, die nach ausgewählten Kriterien für die verschiedenen Abfallarten bestimmt wurden /3-23/, /3-24/. 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.

Verglaste HAW

In der Tabelle 3-7 sind die Primärbehältertypen für verglaste HAW aufgeführt. Tabelle 3-8 zeigt die Hauptkenndaten dieser Behälter.

Alle Behälter sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit Ausnahme der C0.1-Behälter mit einem verschweißten Deckel verschlossen und sind wasserdicht. Der Verschluss der C0.1-Behälter ist nicht wasserdicht.

Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter mit Ausnahme der C0.1-Behälter beträgt ca. 500 kg, der gefüllte C0.1-Behälter wiegt 90 kg.

Tabelle 3-7: Frankreich – Primärbehälter für verglaste Abfälle /3-25/

Abfallart	Bezeichnung des Primärbehälters	Erläuterung
Verglaste Abfälle	C0.1	Verglaste Abfälle von PIVER
	C0.2	Verglaste Abfälle von Umo R7
	C0.3	Verglaste Abfälle von AVM
	C1	Gegenwärtige Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid- BE-Wiederaufbereitung
	C2	Künftig vorgesehene Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid-BE-Wiederaufbereitung

	C3	Verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und MOX-BE-Wiederaufbereitung
	C4	Verglaste Abfälle mit Pu-Gehalt aus der BE-Wiederaufbereitung

Tabelle 3-8: Frankreich – Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle /3-25/

Behältertyp	Außenhöhe (max.) mm	Außendurchmesser (max.) mm	Max. Innenvolumen l
C0.1	575 bis 875	386	39 - 45
C0.2, C1 bis C4	1338	430	175
C0.3	1015	498	175

Abbildung 3-15 zeigt zwei Typen von Primärbehältern für verglaste HAW.



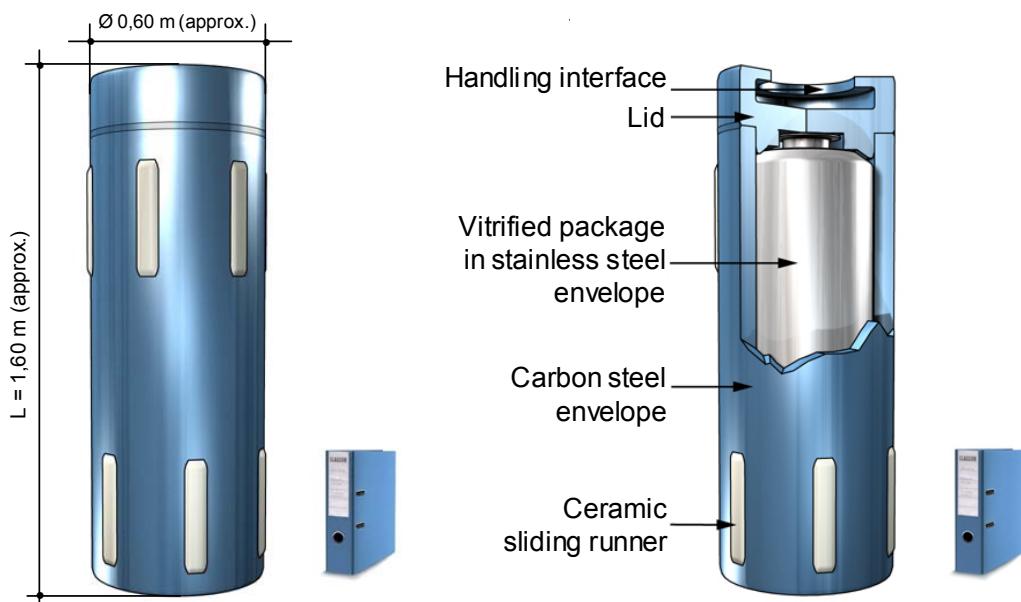
Abbildung 3-15: Frankreich – 175 l - Primärbehälter für verglaste HAW (Links - C0.2, C1 bis C4, rechts - C0.3) /3-26/

Tabelle 3-9 zeigt die Restwärmendwicklung und die festgelegten Zwischenlagerungszeiten der Gebinde nach ihrer Herstellung.

Tabelle 3-9: Frankreich – Restwärmentwicklung und Zwischenlagerungszeiten der Primärbehälter mit verglasten Abfällen /3-25/

Behälter	Restwärmeleistung W/Gebinde			Festgelegte Zwischen- lagerungszeit Jahre
	Bei Herstellung	Nach 60 Jahren	Nach 100 Jahren	
C0	250	60	30	20
C1	2000	470	230	60
C2	2250	490	235	60
C3	2500	590	320	70
C4	2500	630	340	70

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden (Abbildung 3-16). 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 3-16: Frankreich – Typischer Endlagercontainer für verglaste HAW /3-27/

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 einen sicheren Einschluss der Abfälle für 1000 Jahre zu si-

chern. Dabei wurde von einer maximalen Temperatur von 100 °C und einem Druck von 12 MPa ausgegangen.

Alle Endlagerbehälter sind mit keramischen Gleitern versehen.

Entsprechend der Geometrie der Primärbehälter sind drei Typen der HAW-Endlagerbehälter vorgesehen (s. Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Frankreich – Abmessungen und Masse der gefüllten HAW-Endlagerbehälter für verglaste Abfälle /3-25/

Endlagerbehälter-typ	Primärbehälter	Außendurchmesser mm	Länge mm	Masse kg
1	C0.3, C1, C2, C3, C4	590	1649	1970
2	C0.2	655	1342	1860
3	C0.1	655	1342	1720

Ausgediente Brennelemente

In der Tabelle 3-11 sind die Primärbehältertypen für ausgediente Brennelemente aufgeführt. 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. 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.

Tabelle 3-11: Frankreich – Primärbehältertypen für ausgediente Brennelemente /3-25/

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, S-LOE...)
	CU3.2	CELESTIN-BE
	CU3.3	BE von Transportanlagen

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 90 Jahren Abklingzeit ca. 1100 W und verringert sich auf ca. 200 W nach 1000 Jahren.

Zu den übrigen in Tabelle 3-11 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. Es sollen BE-Endlagerbehälter mit zwei unterschiedlichen Durchmessern eingesetzt werden /3-25/.

Der Behältertyp mit einem Außendurchmesser von 1255 mm, einer Länge von 4500 und 5400 mm und einem Gewicht von 35 t und 43 t ist für die Aufnahme von vier Uran-Brennelementen bestimmt. Die Länge der Behälter hängt von der Länge der Brennelemente ab sowie davon, ob die Brennelemente mit oder ohne Primärbehälter in den BE-Endlagerbehälter verpackt werden. Die Abbildung 3-17 zeigt einen BE-Endlagerbehälter mit großem Durchmesser und Abbildung 3-18 Schnitte der BE-Endlagerbehälter mit großem Durchmesser mit und ohne Primärbehälter.

Der Behältertyp mit einem Durchmesser von 620 mm, einer Länge von 4500 bzw. 5400 mm und einem Gewicht von 8 t oder 10 t ist für die Aufnahme von einem MOX-BE oder einem Uranoxid-BE mit höherer Wärmeentwicklung bestimmt (s. Abbildung 3-19). Die Länge der Behälter hängt gleichfalls von der Länge der Brennelemente ab sowie davon, ob die Brennelemente mit oder ohne Primärbehälter in den BE-Endlagerbehälter verpackt werden.

Die Endlagerbehälter werden aus unlegiertem Stahl hergestellt und bestehen aus zwei Teilen – dem zylindrischen Gehäuse und einem Deckel mit Konstruktionselementen für die Handhabung der Behälter (s. Abbildung 3-17 bis Abbildung 3-19). Es wird noch untersucht, ob der Behältermantel und Boden in einem Stück gefertigt werden oder der Boden wie der Deckel eingeschweißt wird. Die Wandstärke der Behälter von 110 mm bzw. 120 mm wurde so ausgewählt, dass die Behälter 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.

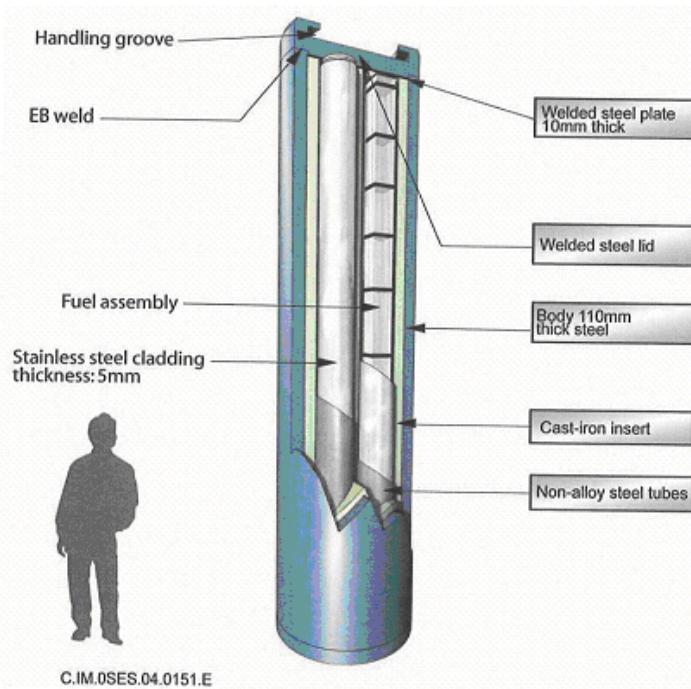


Abbildung 3-17: Frankreich – BE-Endlagerbehälter für vier Uranoxid-BE /3-25/

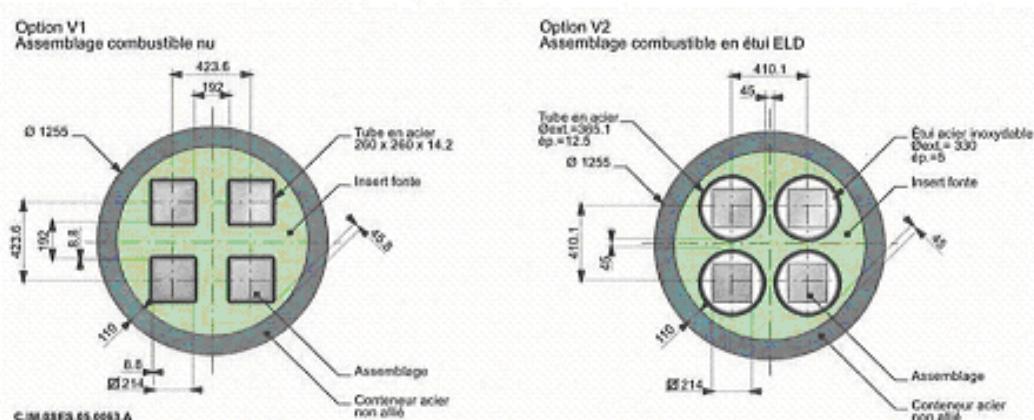


Abbildung 3-18: Frankreich – Schnitt eines BE-Endlagerbehälters für vier Uranoxid-BE mit (rechts) und ohne Primärbehälter (links) /3-25/

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 minimalem freiem Volumen

- Unterstützung der Wärmeabgabe von den Brennelementen an die Umgebung.

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 Behälter 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.

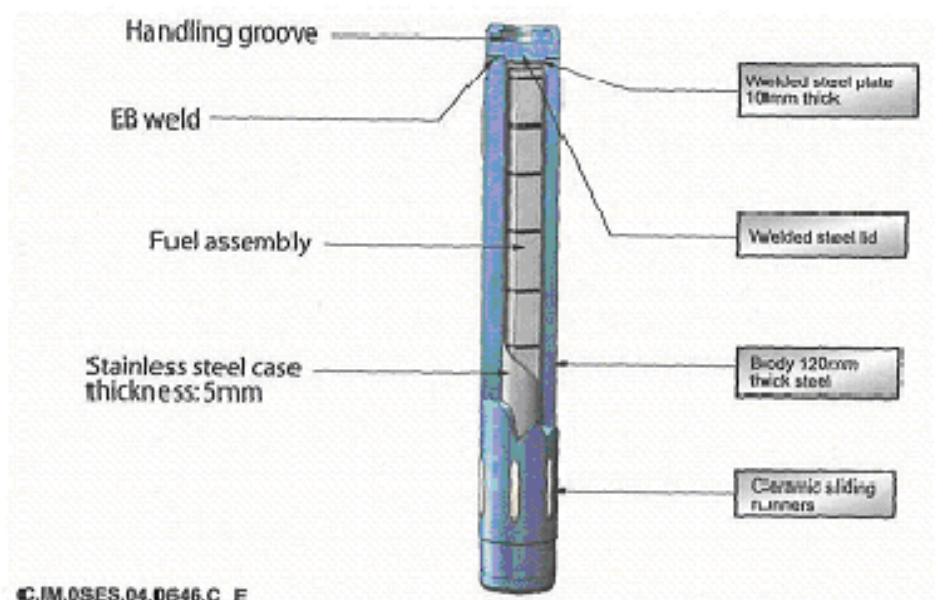


Abbildung 3-19: Frankreich – BE-Endlagerbehälter für ein MOX- oder ein Uranoxid-BE /3-25/

3.2.3 Endlagerkonzept

Im neuen Entsorgungsgesetz Frankreichs, das im Juni 2006 verabschiedet wurde, ist festgelegt, dass bis 2015 der Sicherheitsnachweis eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten für hochradioaktive Abfälle vorliegen und 2025 das Endlager in Betrieb soll /3-28/. Das Endlager soll am Standort des Untertage-Forschungslabors Bure, Meuse/Haute Marne im Ton errichtet werden. Es ist vorgesehen, in einem Endlager in getrennten Einlagerungsbereichen HAW („C-Typ“) und ggf. ausgediente BE („U-Typ“) sowie LILW-LL („B-Typ“) endzulagern /3-25/.

Mit dem Gesetz über das Management radioaktiver Abfälle 91-1381 vom 30.12.1991, Art. 4 wurden Festlegungen bezüglich der Berücksichtigung einer Rückholung der Abfälle getroffen:

„Untersuchung der Möglichkeiten einer rückholbaren bzw. reversiblen Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, insbesondere durch die Errichtung von Untertagelabors“

Dementsprechend enthält das Endlagerkonzept eine Reihe von technischen Lösungen, die eine Rückholung in den einzelnen Phasen des Endlagerprozesses ermöglichen, bzw. erleichtern. Das Grundprinzip dabei ist die Reversibilität der einzelnen Einlagerungsschritte.

Entsprechend den Szenarien des Brennstoffkreislaufes (s. Kap. 3.2.1) berücksichtigt das Endlagerkonzept sowohl die Einlagerung von verglasten HAW als auch die direkte Einlagerung ausgedienter Brennelemente.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung der festgelegten Temperaturkriterien für das Verfüllmaterial bzw. die Wirtsgesteinsformation. Auf der Grundlage von Studien wird vorausgesetzt, dass eine Temperaturbelastung von ca. 100 °C über einen Zeitraum von ca. 10 000 Jahren nur geringfügige bzw. keine irreversiblen Veränderungen des Verfüllmaterials und des Wirtsgesteins hervorruft. Auf dieser Grundlage geht das Endlagerkonzept davon aus, dass an der Kontaktgrenze zum Tongestein die Temperatur 90 °C nicht überschreiten soll und nach 100 000 Jahren unter 70 °C liegt. Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 zeigen den berechneten Temperaturverlauf für die Endlagerung von Behältern mit HAW bzw. ausgedienten Brennelementen nach ca. 60 Jahren Zwischenlagerung.

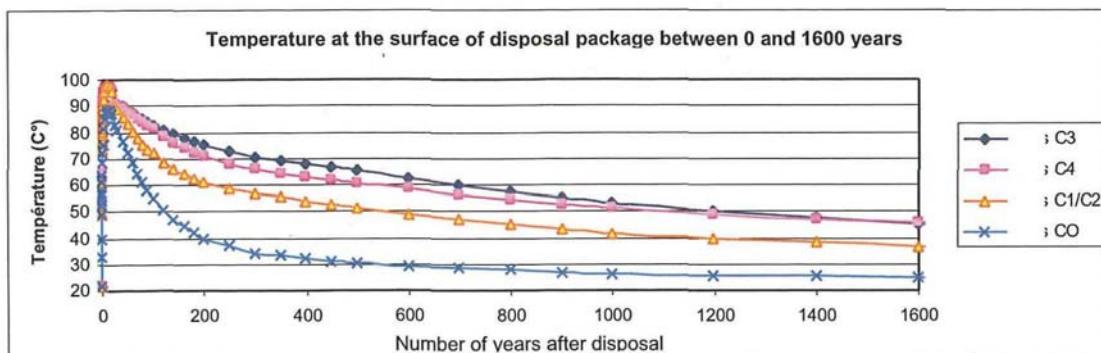


Abbildung 3-20: Frankreich – Temperaturverlauf für HAW-Endlagerbehälter /3-25/

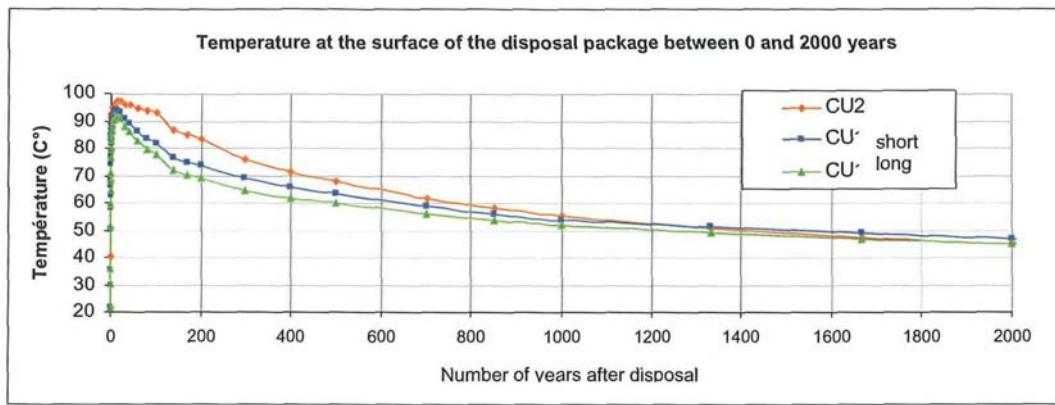


Abbildung 3-21: Frankreich - Temperaturverlauf für BE-Endlagerbehälter /3-25/

Die Tagesanlagen des Endlagers sollen eine Fläche von ca. 50 bis 100 ha und die Untertageanlage von ca. 1500 bis 3000 ha einnehmen. Abbildung 3-22 zeigt ein schematisches Layout des Endlagers.

Die Endlagerung soll in einer Tiefe von ca. 500 m erfolgen. Es wurden verschiedene Varianten der Verbindung der Untertageanlagen mit den Tagesanlagen betrachtet /3-25/:

- Schachtransport
- Transport über Rampe
- Transport über Schächte und Rampe.

Als Referenzvariante wurde die Errichtung von Schächten ausgewählt, nach der vier Schächte errichtet werden, die in einer sogenannten Schachtzone angeordnet sind, die sich am Rand der Einlagerungsfelder befindet.

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

- Schacht mit einem Durchmesser von 11,5 m für den Transport der Abfallgebinde nach Untertage und ggf. von Untertage nach Übertrage
- Schacht mit einem Durchmesser von 8,50 m für Personaltransport und kleinere 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.

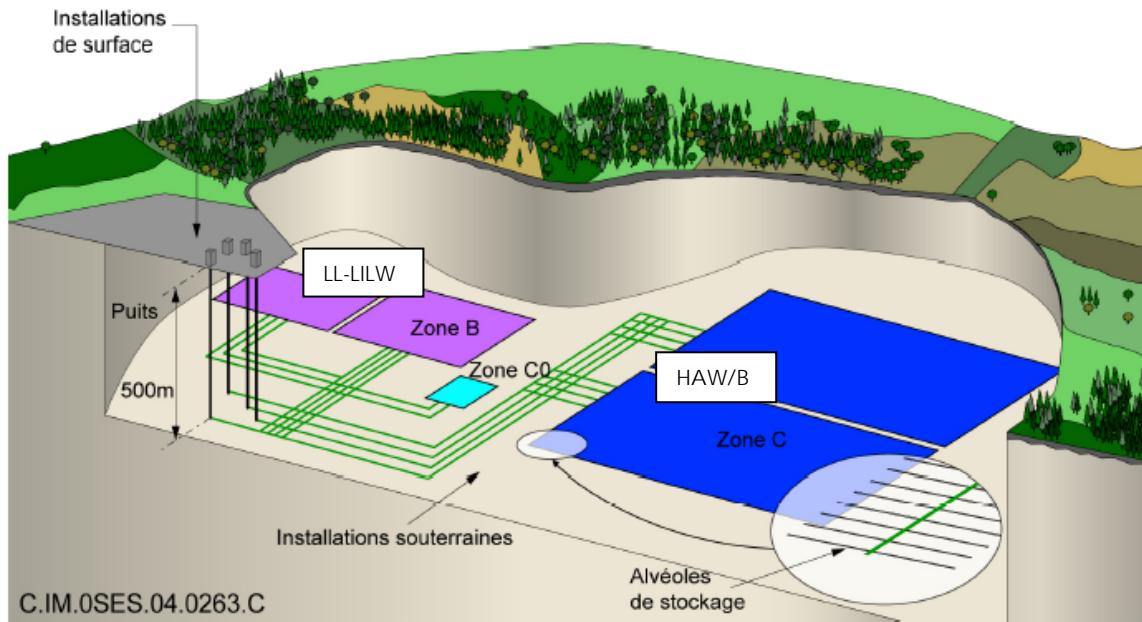


Abbildung 3-22: Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers /3-26/

Der Schacht für den Abfallgebindetransport ist ausschließlich für den Transport der Transferbehälter mit Abfallgebinden nach Untertage und den Transport der leeren Transferbehälter 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 mit LL-LILW, 16 Gebinde mit HAW und 4 Gebinde mit BE pro Woche betragen.

Für die Endlagerung sind Untertage vier Endlagerzonen vorgesehen, jeweils eine für die Abfallkategorien LL-LILW, HAW (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.

Endlagerung Abfallkategorie C (verglaste HAW)

Die verglasten Abfälle werden in der entsprechenden Endlagerzone eingelagert, die in sogenannte Einlagerungsmodulen eingeteilt ist. Jedes Modul besteht in Abhängigkeit von dem einzulagernden Abfalltyp aus zehn bis zu einigen Hundert Endlagerzellen, die von beiden Seiten der Transportstrecken abgehen. Der Abstand zwischen den Achsen der Einlagerungszellen beträgt zwischen 8,5 und 13,5 m in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde. Die Enden der Einlagerungszellen sind 20 m voneinander entfernt.

Eine typische Einlagerungszelle stellt ein horizontales blindes Bohrloch mit einem Durchmesser von 700 mm und einer Länge von ca. 40 m dar (Abbildung 3-23).

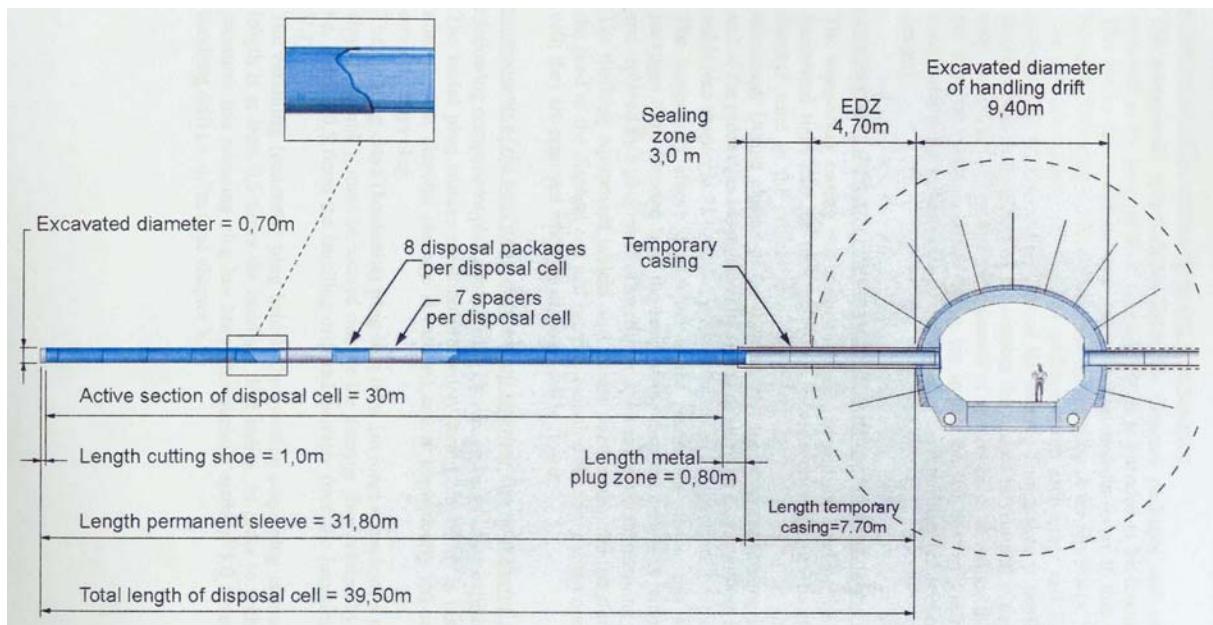


Abbildung 3-23: Einlagerungszelle für verglasten HAW /3-25/

Das Bohrloch ist in zwei Abschnitte unterteilt, den Bohrlochkopf und den Einlagerungsabschnitt.

Der Bohrlochkopf ist während des Einlagerungsbetriebes mit zwei Metallrohren bestückt, die beim endgültigen 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 Metallpropfen 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 das Entfernen des Stopfens 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 Abfallgebinde werden im Einlagerungsrohr durch Abstandhalter voneinander getrennt. Der Abstandhalter ist ein mit Sand gefüllter Behälter mit den gleichen Abmessungen wie die Endlagerbehälter.

Abbildung 3-24 zeigt eine schematische Darstellung der Endlagerzellen für HAW.

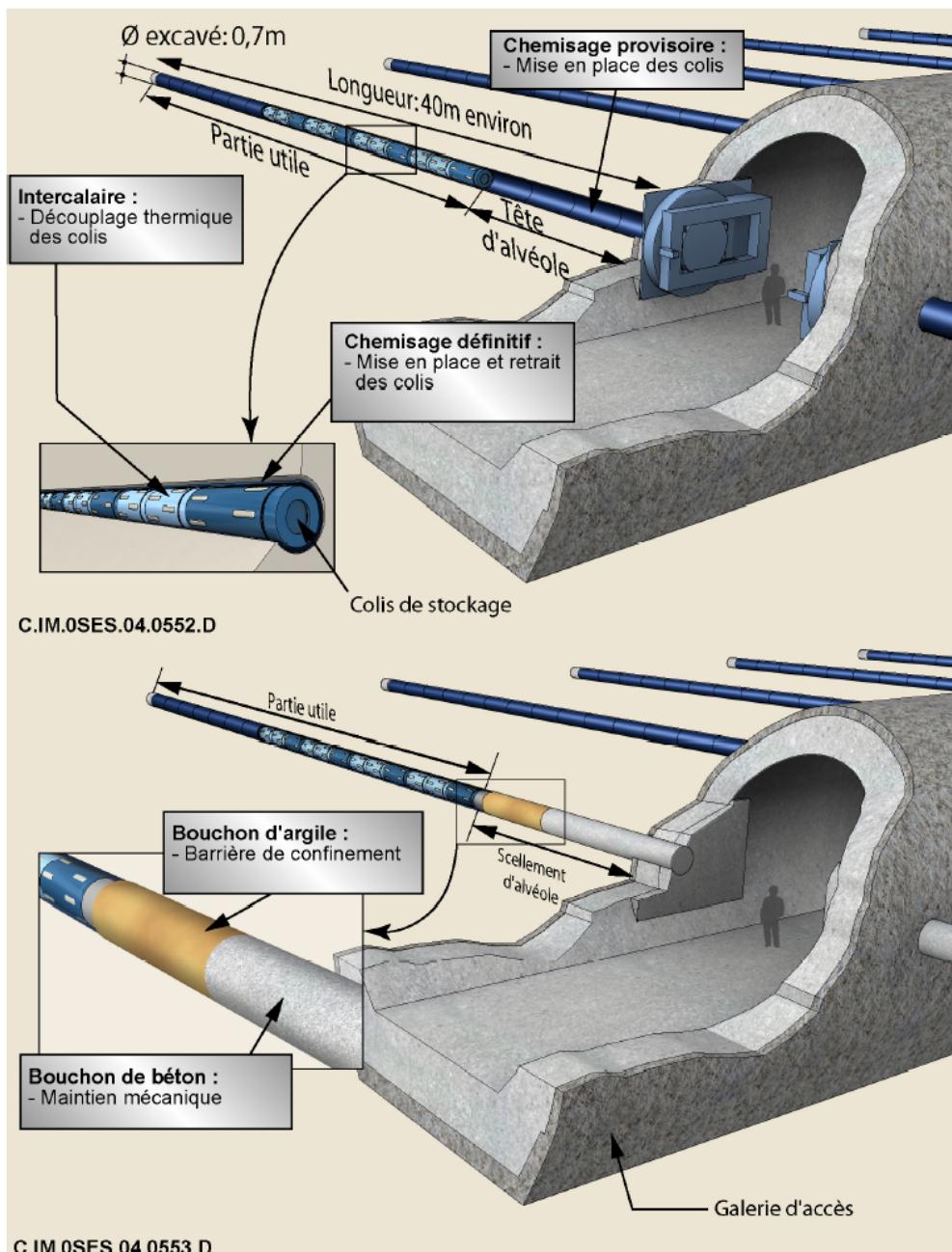


Abbildung 3-24: Frankreich – Endlagerzelle für verglaste HAW. Oben – in Betrieb, Unten – Versiegelte Zelle /3-25/

Endlagerung ausgedienter Brennelemente

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 Tonos darf 90 °C nicht überschreiten.

Das Layout der Endlagerungszone sowie der Einlagerungsfelder entspricht dem für verglaste Abfälle.

Die Transportstrecken von denen die Endlagerzellen beidseitig abgehen, sind ca. 6,40 m breit und ca. 4,50 m hoch. Die Abmessungen sind durch die Abmessungen der Transportfahrzeuge und Einlagerungsmaschinen bestimmt. Die Streckenfirste ist mit Ankern versehen und die Strecken sind mit einer 20 cm starken Betonschicht ausgebaut.

Die Endlagerzellen stellen horizontale Bohrungen darf mit einem Durchmesser von 3200 mm für Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelemente (Kategorie CU1) und 2600 mm für MOX-Brennelemente (Kategorie CU2). Die Länge der Bohrlöcher beträgt 43 m bzw. 46 m. Davon sind 32 bzw. 35 m 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 Bohrlöcher beträgt 20 m. Abbildung 3-25 zeigt das Layout einer Einlagerungszelle für ausgediente Brennelemente.

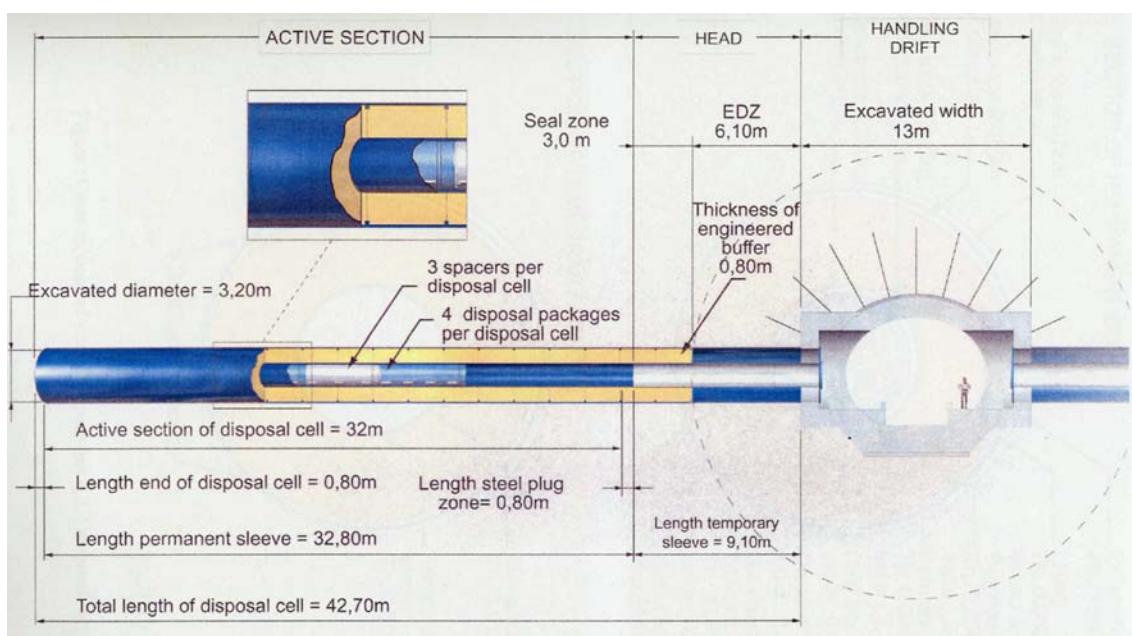


Abbildung 3-25: Frankreich – Endlagerzelle für ausgedienten Kernbrennstoff /3-23/

Das Bohrloch ist mit einem Metallrohr verkleidet, das aus 2 m langen Metallringen zusammengefügt 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

Die Bentonitringe werden vor dem Einbringen mittels Metallbändern 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 $< 10^{-11} \text{ m/s}$
- Wärmeleitfähigkeit $> 1,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (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 zusammengeschweißt.

Die Metallverkleidung und die Bentonitringe im Kopfteil des Bohrloches sind die gleichen 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 Metallpropfen 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.

Abbildung 3-26 zeigt Details einer Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente.

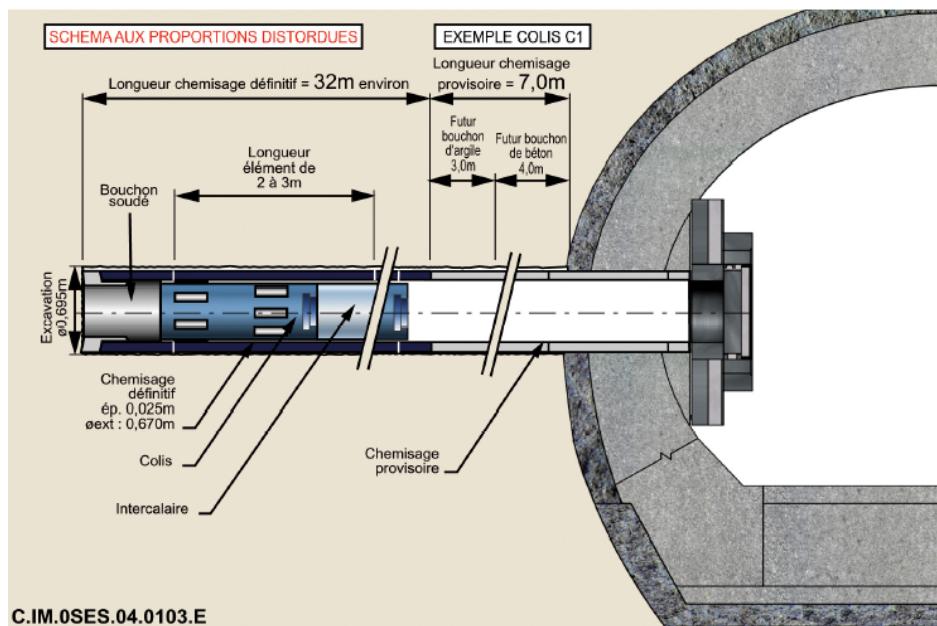


Abbildung 3-26: Frankreich – Schnitt einer Endlagerzelle für ausgediente BE /3-25/

3.2.4 Transport- und Handhabungssystem

Die Endlagerergebinde werden aus Strahlenschutzgründen in geschützte Transferbehälter verpackt, in denen sie bis zum Einlagerungsort transportiert werden. Entsprechend den unterschiedlichen Abmessungen der Endlagerbehälter sollen verschiedene Transferbehältertypen eingesetzt werden (s. Abbildung 3-27).

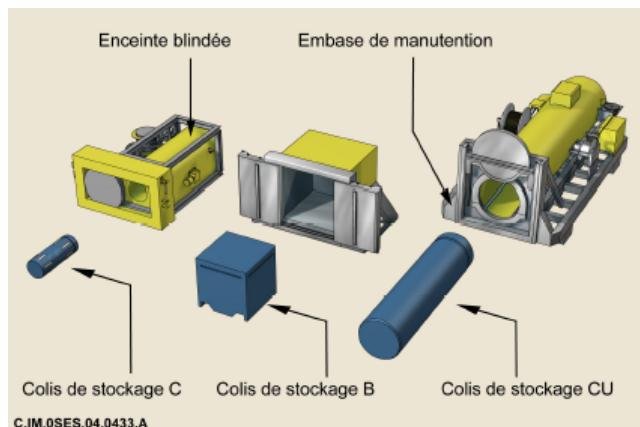


Abbildung 3-27: Frankreich – Transferbehälter für HAW-Gebinde (C-Typ), LILW-Gebinde (B-Typ) und für BE-Gebinde (CU-Typ) /3-25/

Ein Einlagerungszyklus umfasst folgende Schritte:

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

Die Einlagerungsschritte sind auf der Abbildung 3-28 schematisch dargestellt.

Die Transferbehälter mit den Abfallgebinden werden mit einem gummitireiften Transportfahrzeug in den Förderkorb transportiert. Die Förderung nach Untertage erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 1m/s. Am Förderort werden die Transferbehälter auf ein gummitireifenes Transportfahrzeug umgeladen, mit dem sie durch die Luftschiele 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 Transferbehälter 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 An-docken an die Einlagerungszellen, eingesetzt werden.

Das Transportfahrzeug mit dem auf der Hubplattform befindlichen Transferbehälter fährt in die entsprechende Handhabungsstrecke und wird dort quer zur Endlagerzelle positioniert. Mit einem Schiebemechanismus wird der quer auf dem Transportfahrzeug liegende HAW-Transferbehälter an den Eingang in die Einlagerungszelle angedockt. Die Tore des Transferbehälters und des Einganges in die Zelle werden geöffnet. Mit einem Schieberoboter wird dann das Abfallgebinde in die Einlagerungszelle geschoben. Nach dem Zurückfahren des Schieberoboters wird der Eingang in die Zelle wieder verschlossen. Abbildung 3-29 zeigt eine schematische Abbildung des Einlagerns eines Endlagergebindes in die Endlagerzelle.

Gebinde mit Brennelementen können auf Grund der Länge der Gebinde nicht in Querlage transportiert werden. Deshalb ist das Transportfahrzeug mit einer Drehbühne ausgerüstet, mit der der Transferbehälter für das Andocken um 90° gedreht werden kann, so dass seine Achse auf der Achse der Einlagerungszelle liegt.

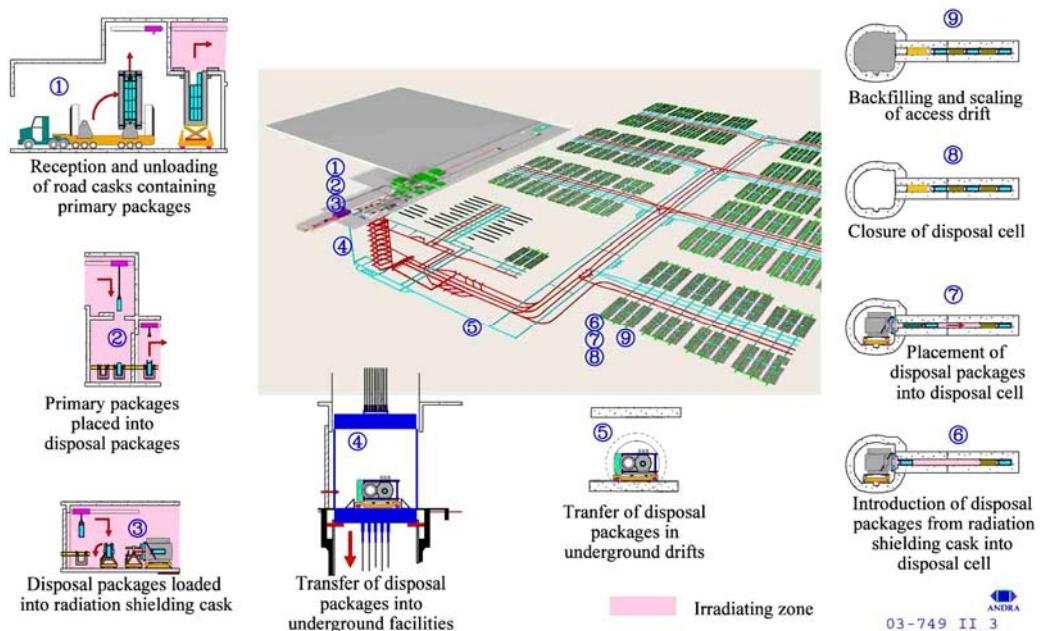


Abbildung 3-28: Frankreich – Einlagerungssequenzen für HAW/BE-Gebinde /3-26/

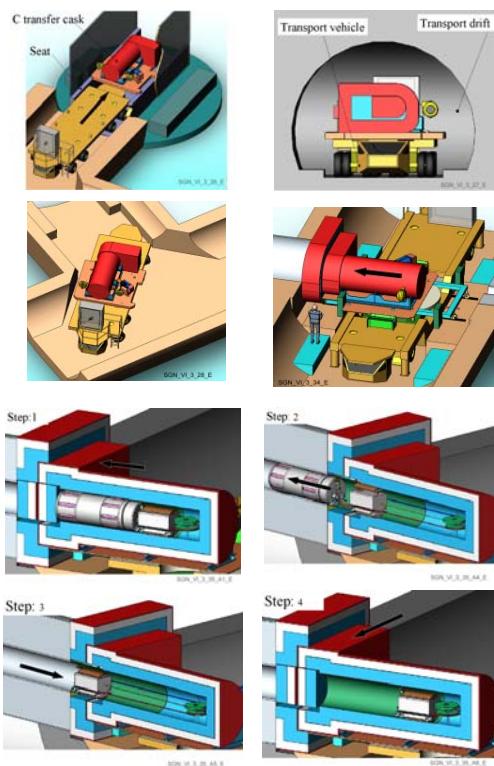
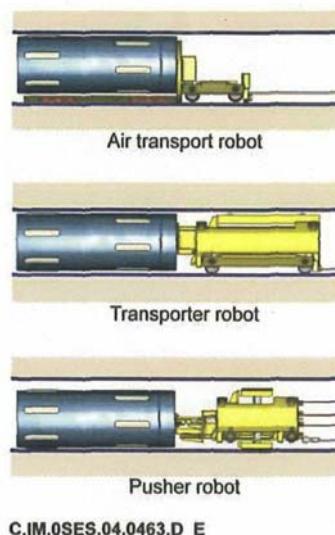


Abbildung 3-29: Frankreich – Transport und Einlagerung eines HAW-Gebindes /3-26/

Für das Einbringen der Gebinde in die Endlagerzelle wurden drei Varianten untersucht (Abbildung 3-30):

- Luftkissentransport
- Transportroboter
- Schieberoboter



C.1M.0SES.04.0463.D_E

Abbildung 3-30: Frankreich – Varianten des Einbringens der Gebinde in die Endlagerzelle /3-25/

Als Vorzugsvariante zum Einbringen von HAW-Gebinden wurde aus folgenden Hauptgründen der Einsatz eines Schieberroboters bestimmt:

- Versuche mit einem Luftkissentransport haben gezeigt, dass auf Grund des relativ geringen Durchmessers der Gebinde mit HAW ein Luftkissentransport nur schwer zu realisieren ist.
- Bei Einsatz eines Schieberroboters können Verwerfungen bis zu 8 mm innerhalb der Endlagerstrecken problemlos überwunden werden (s. Abbildung 3-31).

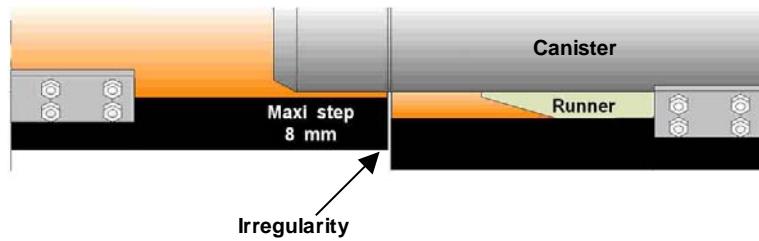


Abbildung 3-31: Frankreich – Gebindetransport bei Verwerfungen in der Endlagerzelle /3-26/

Der Schieberroboter ist sowohl für die Einlagerung der Gebinde, als auch für deren Rückholung konstruiert. Die Hauptteile des Roboters sind:

- Gleiter, mit denen der Roboter beim Verschieben eines Gebindes in der Einlagerungszelle verspannt wird,
- Schieber, mit dem das Gebinde verschoben wird
- Räder mit Antrieb, mit denen der Roboter nach einem Verschiebeprozess weitergefahren wird
- Elektroantrieb.

Das Verschieben des Gebindes erfolgt in Schritten von 1 m. Der Ablauf ist wie folgt (s. Abbildung 3-32):

Der Schieber des Roboters ist eingezogen und in Kontakt mit dem Gebinde. Der Roboter wird verspannt und das Gebinde mit dem Schieber um 1 m verschoben. Der Schieber wird eingezogen und die Verspannung gelöst. Der Roboter fährt 1 m vorwärts, bis der Schieber das Gebinde berührt. Der Zyklus wird so oft wiederholt, bis das Gebinde seine Lagerungsposition erreicht hat. Anschließend fährt der Roboter zurück in den Transferbehälter.

Die Tore des Transferbehälters und der Einlagerungszelle werden geschlossen.

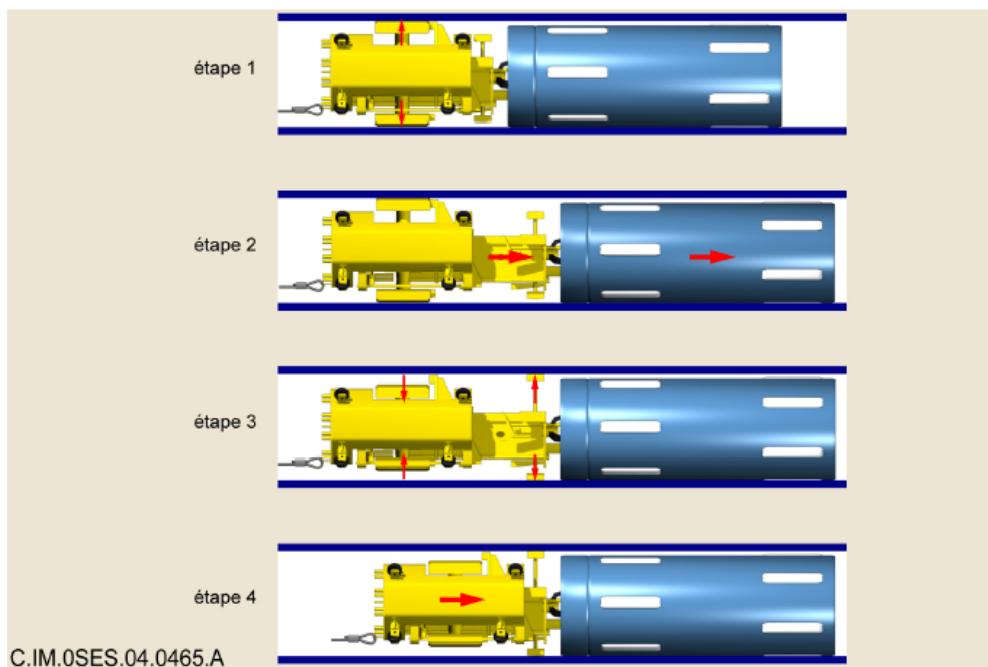


Abbildung 3-32: Frankreich – Funktionsweise eines Schieberroboters /3-25/

Für das Einbringen von BE-Gebinden wurde dem Luftkissentransport der Vorzug gegenüber dem Einsatz eines Schieberroboters gegeben.

Der Luftkissentransporter besteht aus zwei Hauptteilen, die beim Verschieben zusammenwirken – dem Schiebewagen, mit dem das BE-Gebinde analog zu dem Schieberroter für die Gebinde mit verglasten Abfällen verschoben wird und der Trageplatte, die mit 16 Luftkissenmodulen ausgerüstet ist. Die Trageplatte ist an den Durchmesser des Gebindes angepasst und kann bis zu 40 t anheben.

Für das Einbringen des Gebindes in die Zelle wird es mit der Luftkissentrageplatte angehoben und mit dem verspannten Schieberwagen um ca. 1 m verschoben. Das Gebinde wird auf die Keramikgleiter abgesetzt und der Wagen sowie die Trageplatte werden entsprechend verschoben. Der Zyklus wird wiederholt, bis das Gebinde in der Zelle platziert ist. Anschließend werden Wagen und Platte zurückgezogen und die Tore des Transferbehälters sowie der Einlagerungszelle geschlossen.

3.2.5 Auffahrtechnik

Zur Auffahrtechnik liegen nur begrenzte Informationen vor.

Die Auswertung der bei der Errichtung des Untertagelabors Meuse/Haute-Marne in Bure gewonnenen Erfahrungen sowohl bei der bergmännischen Erschließung über die beiden Schächte als auch bei der URL-Streckenauffahrung hinsichtlich Schachtteufarbeiten, Streckenauffahrung und Ausbau, Maschineneinsatz, Gesteinseigenschaften, notwendige Sicherungsmaßnahmen, Gestaltung der Bewetterung, Beherrschung des Wasserzutritts so-

wie Berücksichtigung der Wetterparameter (Temperatur, Luftfeuchte, Gaszusammensetzung und möglicher Zutritt toxischer Gase) können für die Planung und den Bau des späteren Endlagers genutzt werden.

Im weiteren wird auf die in den Berichten der ANDRA enthaltenen Erläuterungen zur Errichtung des Endlagers in Ton Bezug genommen /3-23/, /3-25/.

Das Auffahren der Transportstrecken soll mit Teilschnittmaschinen erfolgen. Das ausgebrochene Material wird mit Schaufelladern auf Dieselfahrzeuge verladen und zu einem Zwischenlagerplatz unterte abtransportiert. Von dort erfolgt der Transport nach über Tage mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

Nach jeweils 0,80 m Aushub wird der aufgefahrenen Abschnitt mit 10 cm Spritzbeton befestigt. 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.

Für das Auffahren der Einlagerungszellen sollen Mikro-Tunnelbohrmaschinen eingesetzt werden, die die Zellen von den Transportstrecken 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 in der Einlagerungsstrecke für ausgediente BE 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 -seilen zu einem Paket zusammengefügt (s. Abbildung 3-33). Dadurch wird zum einen der verbleibende Abstand zwischen den Ringen gegenüber der Einzelmontage Vorort wesentlich verringert und zum anderen die Montagezeit unterte verkürzt. Die Ringanzahl per Paket wird durch das mögliche Transport- und Handhabungsgewicht bestimmt.

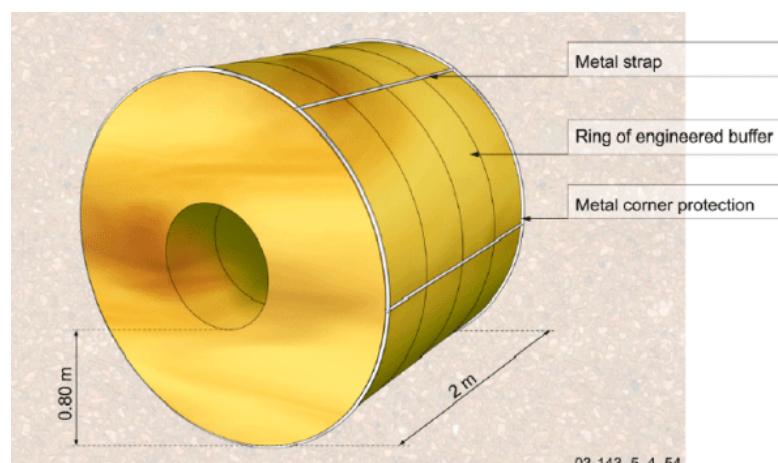


Abbildung 3-33: Frankreich – Bentonitringpaket /3-26/

Die Bentonitringpakete werden mittels Luftkissentransport platziert. Anschließend wird das Einlagerungsrohr aus Kohlenstoffstahl aus 6 m langen Schüssen eingebaut. Abbildung 3-34 zeigt den schematischen Aufbau einer Endlagerzelle.

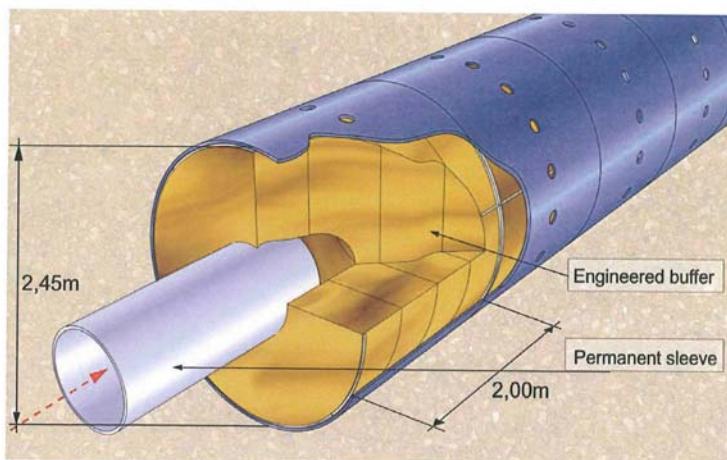


Abbildung 3-34: Frankreich – Schematischer Aufbau einer Endlagerzelle für ausgediente BE /3-25/

3.2.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüllen und Verschließen soll in Etappen erfolgen, in denen sich die Möglichkeit der Rückholung sukzessive schwieriger gestaltet.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht im wesentlichen drei Elemente vor /3-33/, /3-25/:

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

Für die Endlagerzellen mit verglasten HAW und Brennelementen 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 Keramikschicht versehen, um eine Kontaktkorrosion zu vermeiden und die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter 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 die Einlagerungsoperation erforderlich war, und ein Bentonitstopfen mit einer Stärke von ca. 3 m eingebracht, der bis zur Auflockerungszone der Transportstrecke reicht. Dieser Ben-

tonitstopfen hat die Hauptbarrierenfunktion 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 Transportstrecke 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 übrigen Strecken sollen mit dem Aushubmaterial verfüllt werden, wobei Betondämme vorgesehen sind (s. Abbildung 3-35).

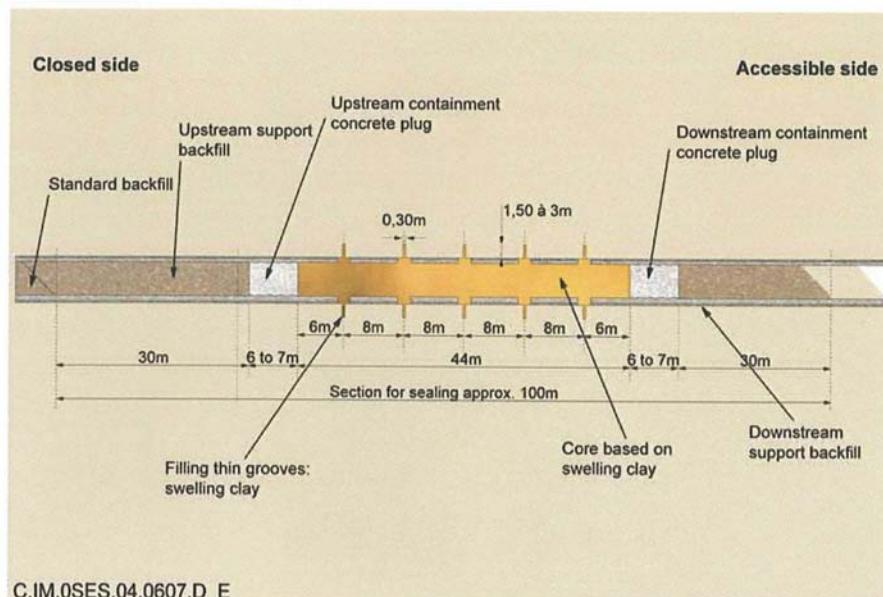


Abbildung 3-35: Frankreich – Streckenverschluss /3-25/

Das Schema des Schachtverschlussystems ist auf Abbildung 3-36 gezeigt. Es umfasst eine stabile Verfüllung mit Beton im unteren Teil der Schächte. Oberhalb der Betonverfüllung wird eine Verfüllung mit ausgehobenem Ton bis zum Beginn der Oxford-Tonformation vorgenommen, wo dann ein Sperrverschluss aus hochquellendem MX-Ton eingebaut werden soll. Oberhalb der Oxford-Tonformation soll eine weitere Sperrsicht aus Ton eingebracht werden.

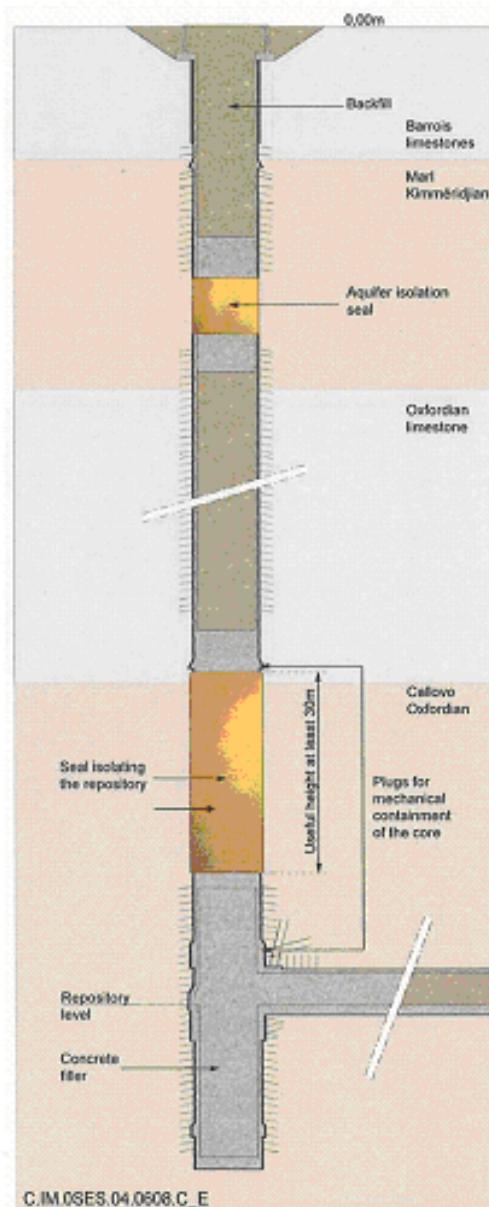


Abbildung 3-36: Frankreich – Schachtverschluss /3-25/

3.2.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Der Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik ist zusammenfassend in Berichten der ANDRA dargestellt /3-30/.

Die Ergebnisse der Standortuntersuchungen und die Ergebnisse im Untertagelabor in der Tonformation Meuse/Haute-Marne zeigen die grundsätzliche Machbarkeit eines Endlagers im Ton.

Im Rahmen umfangreicher FuE-Arbeiten werden Untersuchungen insbesondere zur Auslegung des Endlagers sowie zum Transport und zur Einlagerung von Endlagerbehältern und

Puffermaterial durchgeführt bzw. sind vorgesehen. Im Untertagelabor werden Versuche bezüglich der Verfüllung von Strecken durchgeführt (s. Abbildung 3-37).

Die Untersuchungen zum Endlagerkonzept betreffen vor allem die Bewertung der Barrierenwirkung sowie die Wechselwirkung der technischen und natürlichen Barrieren. Muster für die Bentonitverkleidung von Endlagerzellen wurden gefertigt.

Bezüglich der Transporttechnologien wurden Untersuchungen zu verschiedenen Methoden durchgeführt. Endgültige Lösungen sind noch nicht fixiert worden.

Materialuntersuchungen wurden und werden durchgeführt, um die geeigneten Materialien für Behälter, Einbauten und Verschlüsse der Endlagerzellen etc. auszuwählen.



Abbildung 3-37: Frankreich – Versuche zur Streckenverfüllung im ULR Bure Meuse/Haute-Marne /3-30/

Die Entwicklung der Einlagerungstechnik steht noch am Anfang. Versuchsmuster von Endlagercontainern wurden gefertigt (Abbildung 3-38), hauptsächlich bezüglich der Untersuchung der Fertigungstechnologie.

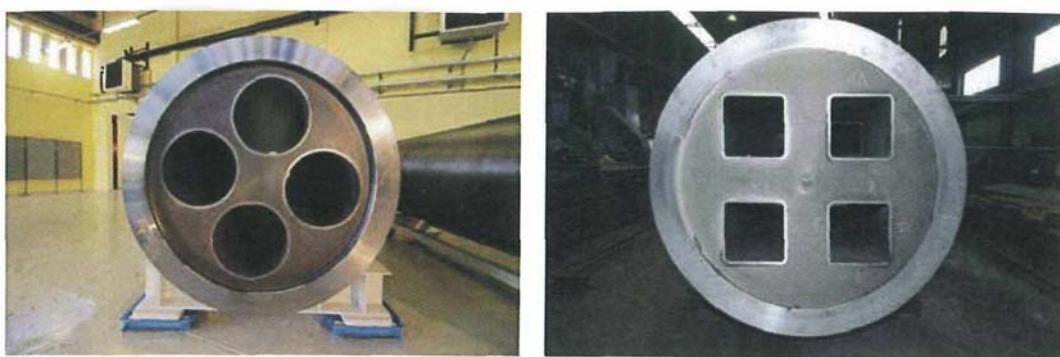


Abbildung 3-38: Frankreich – BE-Endlagerbehälter (links Endlagerung mit Primärbehälter, rechts – ohne)

Für das weitere Forschungs- und Entwicklungsprogramm werden Untersuchungen von maßstabsgetreuen Mustern von Endlagerkomponenten für erforderlich gehalten. Das soll die Errichtung von Endlagerzellen einschließen.

Eine Vielzahl von Endlagerkomponenten ist unter Zugrundelegung von einfachen und konservativen Modellen entworfen worden, die weiter vervollkommen und besser quantifiziert werden müssen, um vorhandene Unsicherheiten abzubauen.

Des Weiteren sind detaillierte Erkundungen in einer Zone von ca. 200 km² erforderlich, um einen Standort des Endlagers zu fixieren.

Es wird eingeschätzt, dass der derzeitigen Phase der Bewertung der grundsätzlichen Machbarkeit eines Endlagers im Ton eine Entwicklungsphase von ca. fünf Jahren folgen wird. Diese Phase soll sich vor allem auf die technologische Realisierung konzentrieren. Des Weiteren sollen die notwendigen Daten für die Standortbestimmung eines Endlagers gewonnen werden, beispielsweise durch großflächige seismische Erkundungen. Im Untertagelabor sollen in-situ Untersuchungen und direkte technologische Tests durchgeführt werden. Diese Phase könnte mit einer generellen Sicherheitsanalyse abgeschlossen werden.

Unter Voraussetzung eines positiven Abschlusses der vorstehend erläuterten Phase könnte zur industriellen Planung übergegangen werden. Es wird eingeschätzt, dass bei diesem weiteren Vorgehen ein Endlager ca. 2025 in Betrieb genommen werden könnte.

3.2.8 Aufwand- und Kostenbewertung

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des französischen Referenzendlagers in einer Tonformation liegen nur sehr begrenzte Informationen vor.

In /3-31/ 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 zur Forschung für die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten der o. g. radioaktiven Abfälle bestimmt sind, enthalten. Werden diese Kosten herausgerechnet, ergeben sich ca. 13,1 Mrd. € als Kosten des Endlagers. Tabelle 3-12 zeigt eine Übersicht über die Kosten des Endlagersystems Frankreichs für radioaktive Abfälle.

Tabelle 3-12: Kosten des französischen Endlagersystems (nach /3-31/)

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
Endlager	LLW/ILW-LL, HAW, SF	13,1
Gesamt		17,59

3.3 Schweiz

Die Entsorgung von ausgedienten Brennelementen, hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufbereitung und von langlebigen mittelaktiven Abfällen beruht auf dem Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, d. h. ihrem dauerhaft wirksamen Einschluss in geeigneten, tiefliegenden Gesteinsformationen. Das spiegelt sich in dem Standpunkt der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) von 1999 wider /3-32/:

- An der Oberfläche gelegene Abfalllager und tiefe Dauerlager werden dem Ziel der Langzeitsicherheit 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 gesetzliche Regelung der Rückholungsoption ist erstmals im neuen Kernenergiegesetz verankert /3-33/.

Von der NAGRA wurden für die Endlagerung in tiefen geologischen Schichten Gesteinsformationen der Unterer Süßwassermolasse und des Opalinustons untersucht und der Opalinuston als perspektivische Gesteinsformation ausgewählt. Für Eignungsuntersuchungen des Opalinustons 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. Die NAGRA hat im Jahr 2002 die Resultate zum Projekt Opalinuston vorgelegt. Der Bundesrat kam Ende Juni 2006 zum Gesamturteil, dass der gesetzlich geforderte Entsorgungsnachweis für diese Abfälle erbracht ist. Ein konkreter Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ist damit jedoch noch nicht festgelegt.

3.3.1 Endlagerinventar

Für die ausgedienten BE der KKW in der Schweiz haben bisher Verträge zur Wiederaufarbeitung bestanden. Per Gesetz wurde festgelegt, dass zukünftig keine weitere Wiederaufarbeitung stattfindet. Damit wird ca. ein Drittel der verbrauchten Brennelemente wieder aufgearbeitet /3-33/. Bei einer 50-jährigen Betriebszeit der Kernkraftwerke werden folgende Mengen endzulagernder ausgedienter Brennelemente sowie HAW aus der Wiederaufarbeitung der BE anfallen (s. Tabelle 3-13) /3-33/, /3-35/, /3-36/:

Tabelle 3-13: Schweiz – Endlagerinventar

Abfall	Aufkommen tSM	Anzahl BE	Anzahl Behälter	Volumen Primärbehälter m ³
HAW	1195		730	120
BE aus DWR, SWR	3200 2.460	10.500	2065 1.630	1150

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

3.3.2 Endlagerbehälterkonzept

Nach den verfügbaren Informationen sollen folgende Behälter zum Einsatz kommen:

HAW-Kokillen

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

Nach /3-36/ sollen die Kokillen mit verglasten HAW in massive Endlagerbehälter aus Stahl bzw. Kupfer mit verschweißtem Deckel gepackt werden. Die Standfestigkeit der Stahlcontainer wird mit 1000 Jahren bewertet /3-37/, die der Kupferbehälter mit 10⁵ Jahren /3-38/. Der Außendurchmesser eines Stahl-Endlagerbehälters ist in /3-39/ mit 940 mm angegeben. (Abbildung 3-39). Die endgültige Auswahl des Materials soll entsprechend den standortspezifischen Randbedingungen erfolgen.

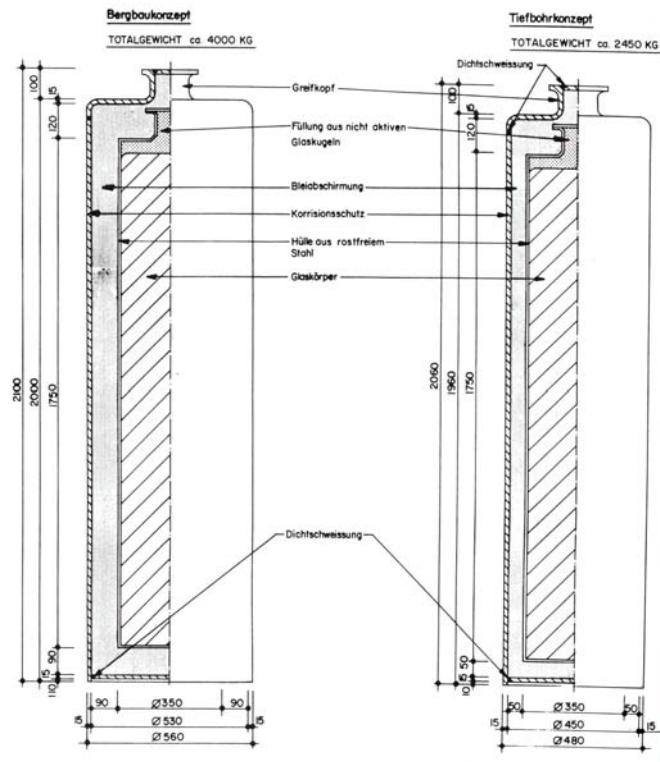


Abbildung 3-39: Schweiz – Endlagerbehälter für HAW-Kokillen /3-34/

Als Endlagerbehälter für Kokillen mit verglasten HAW sind auch Behälter für 2 Kokillen vorgesehen /3-40/. Nähere Angaben zu diesen Behältern sind nicht verfügbar.

BE-Endlagerbehälter

Die Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente sollen 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 3-40).

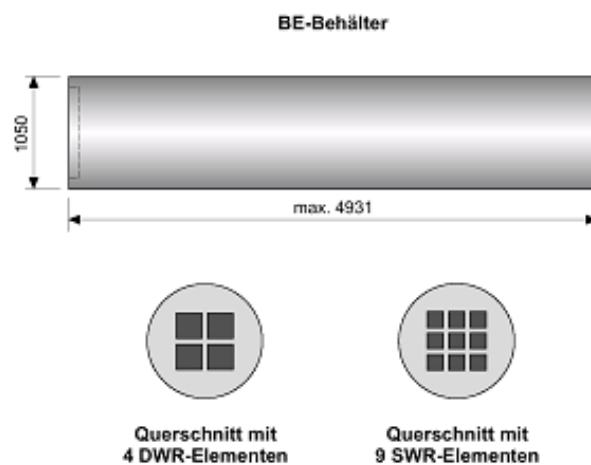


Abbildung 3-40: Schweiz – BE-Endlagerbehälter /3-34/

Tabelle 3-14 gibt eine Übersicht über die bekannten Daten der HAW- und BE-Endlagerbehälter.

Tabelle 3-14: Schweiz – Angaben zu Endlagerbehältern für HAW-Kokillen und ausgediente BE, Schweiz /3-34/

Behältertyp	Bela-dung	Behälterabmessungen		Standzeit	Zwischen-lagerzeit	Wärme-leistung
WA-Abfälle	1 HAW-Kokille	Außendurchmes- ser: Länge: Wandstärke: Gesamtmasse: Gesamtvolumen:	940 mm 2.000 mm 250 mm 8,4 Mg 1,39 m ³		30 a bis 40 a	keine Angabe
Brenn-elemente	9 SWR-BE	Außendurchmes- ser: Länge: Wandstärke: Gesamtmasse: Gesamtvolumen:	1.050 mm 4.931 mm 150 mm 29 Mg 4,3 m ³	1.000 a bis 10.000 a	40 a bis 55 a	1,5 kW
Brenn-elemente	4 DWR-BE	Außendurchmes- ser: Länge: Wandstärke: Gesamtmasse: Gesamtvolumen:	1.050 mm 4.400 mm keine Angabe 24 Mg 3,81 m ³			

3.3.3 Endlagerkonzept

Die über Jahre entwickelte Strategie für die geologische Endlagerung entspricht den Forderungen des neuen Kernenergiegesetzes bezüglich einer "kontrollierten geologischen Langzeitlagerung". Das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung (KGL) sieht zusätzlich zum eigentlichen Endlager – oder Hauptlager – die Errichtung eines Test- und eines Piloteinlagerungsbereiches (Pilotlager) vor, ferner eine der Endlagerung vorgeschaltete Phase der Beobachtung und erleichterten Rückholbarkeit der Abfälle. Das Konzept der „kontrollierten geologischen Langzeitlagerung“ berücksichtigt somit gleichzeitig die Ansprüche auf Langzeitsicherheit und auf Reversibilität. Auf diese Weise soll die langzeitsichere Endlagerung schrittweise erreicht werden, falls die Abfälle nicht vorher zurückgeholt werden. Das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung sieht folgende Systemelemente vor: Hauptlager, Testlager, Pilotlager sowie Streckensystem, welches die Systemelemente miteinander verbindet sowie Strecken, welche eine Nah- und Fernfeldüberwachung zulassen (Abbildung 3-41).

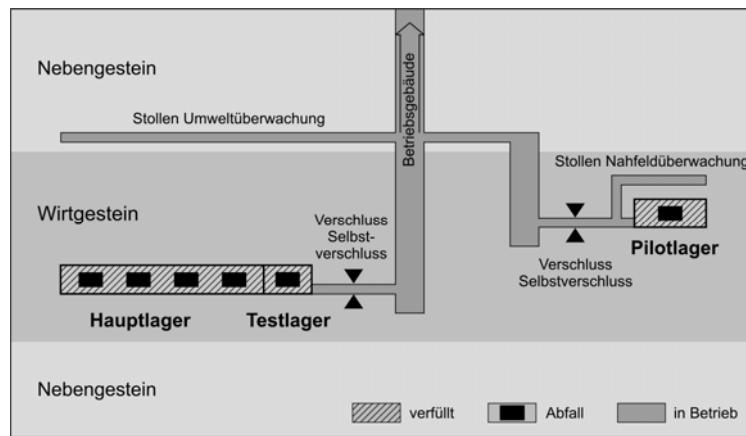


Abbildung 3-41: Schweiz – Schematische Darstellung der Schlüsselemente des Konzepts zur kontrollierten geologischen Langzeitlagerung gemäß EKRA /3-32/

Basierend auf diesem Prinzipkonzept wurde in der Schweiz ein Endlagerkonzept für HAW, ausgediente Brennelemente und langlebige mittelaktive Abfälle im Opalinuston entwickelt, das in Abbildung 3-42 gezeigt ist.

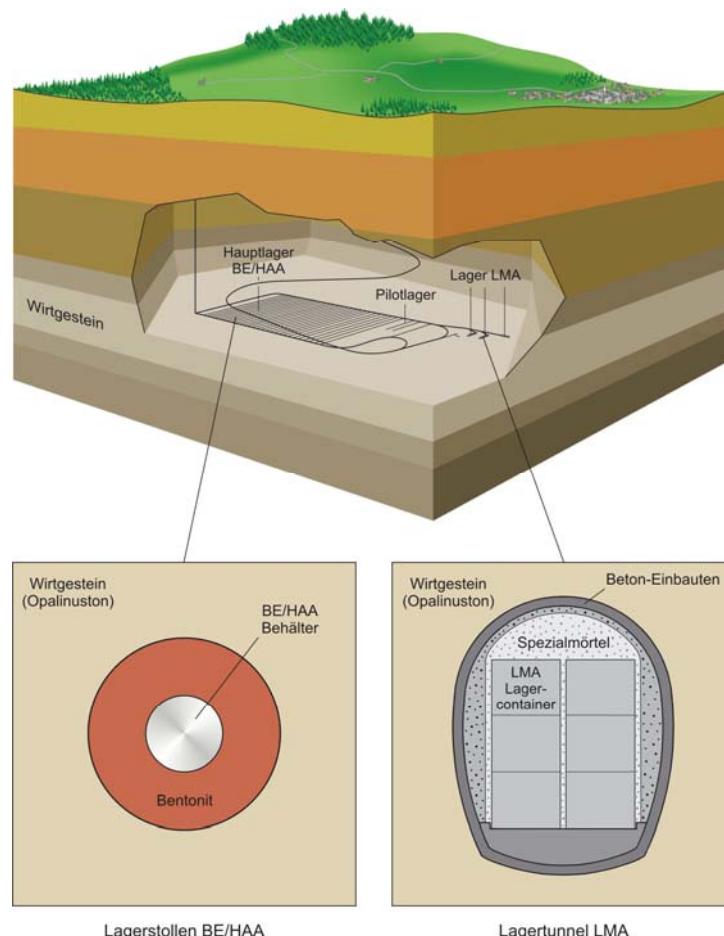


Abbildung 3-42: Schweiz – Hauptkomponenten und Auslegung des Endlagers für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle /3-41/

Das Endlager ist in der Mitte der Opalinustonschicht in einer Teufe von ca. 650 m angeordnet, wo der Opalinuston eine Mächtigkeit zwischen 110 – 120 m aufweist, und ist über eine Rampe sowie einen Schacht mit der Oberfläche verbunden.

Der Schacht dient dem Ein- und Ausbringen von Personen und Material in der Phase der Lagererstellung und insbesondere bei der Lagererweiterung nach Aufnahme des Einlagerungsbetriebs. Er dient ferner als Lüftungsschacht (Ausziehschacht) sowie Notausstieg und hat einen Ausbruchdurchmesser vom 4,0 m. Im Bereich wasserführender Schichten ist ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen geplant.

Die Rampe mit einer Neigung von 12,5° verläuft diagonal über das Hauptfeld und mündet in der unterirdischen Umladestation sowie dem Erprobungsendlager. Die Abmessungen des Zugangstunnels im Opalinuston (Ausbruchmaße) sind rund 7 m in der Breite und ca. 6,5 m in der Höhe. Zum Durchfahren stark wasserführender Zonen im Hangenden des Opalinuston ist ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen vorgesehen. In wenig durchlässigen Formationen erfolgt die Felssicherung durch Anker und Spritzbeton als einschaliger Ausbau. Die Neigung der Rampe basiert auf einer Optimierung betrieblicher, baulicher und sicherheitstechnischer Aspekte.

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.

Die Rampe dient in der Betriebsphase dem Transport von Abfallgebinden, Bentonitaufslagern und Bentonitgranulat etc. sowie dem Personentransport und der Frischluftzufuhr von der Oberfläche in den Bereich der Lageranlage.

Mit Beginn der Einlagerung wird die Rampe ausschließlich für den Transport der Abfallgebinde genutzt. Die zur Einlagerung parallele Errichtung weiterer Einlagerungsstollen 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 Abstand zwischen den Errichtungsstrecken beträgt 30 – 40 m. Der Innendurchmesser dieser Strecken ist ca. 5 m (Abbildung 3-43).

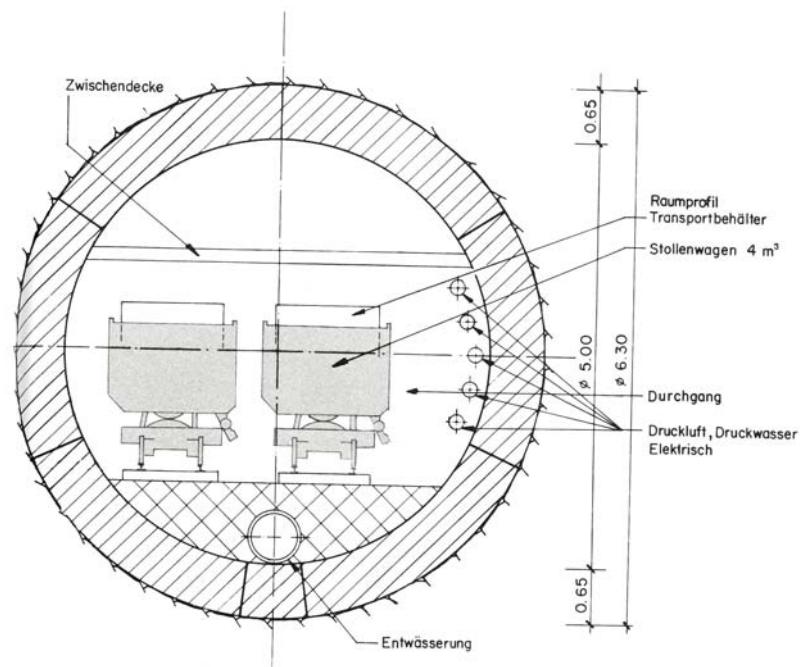


Abbildung 3-43: Querschnitt einer Errichtungsstrecke /3-42/

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

Die Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen ist im Hauptfeld vorgesehen. Das Hauptfeld besteht aus 27 Einlagerungsstrecken, die zwischen der Transportstrecke und der sogenannten Errichtungsstrecke angeordnet sind. Die Länge der Einlagerungsstrecken soll ca. 800 m betragen, bei einem Innendurchmesser von ca. 2,50 m.

Die Einlagerungsstollen sind mit Netzen und Ankern gesichert. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstollen 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 Einlagerungsstrecken werden mit einer Neigung von ca. 7° der Tonformation folgend errichtet. Am oberen Ende einer jeden Einlagerungsstrecke BE/HAW wird eine Schleuse errichtet, in der die zur Einlagerung gelangenden Endlagergebinde (ohne Transportabschirmung) und Bentonitaufleger bereitgestellt werden.

Die Einlagerungsstollen des Hauptlagers werden vom Bautunnel aus steigend mit einer Tunnelbohrmaschine aufgefahren und vor ihrer Beschickung im bautunnelseitigen Ende verschlossen. Die zur Einlagerung notwendigen Schienen (Meterspur) werden auf gekrümmten, dem Stollenradius angepassten Flachstahlschwellen im Stollen fixiert und verbleiben nach dessen Beschickung im Stollen. Die Einlagerungsstollen für HAW und ausgediente BE werden je nach Bedarf erstellt, so dass ein vorbereiteter Stollen nicht länger als zwei Jahre offen bleibt.

Abbildung 3-44 zeigt ein schematisches Layout des Endlagers. Der Flächenbedarf für das Endlager in der Schweiz beträgt mit den von NAGRA der Planung zugrunde gelegten Kriterien insgesamt 2 km².

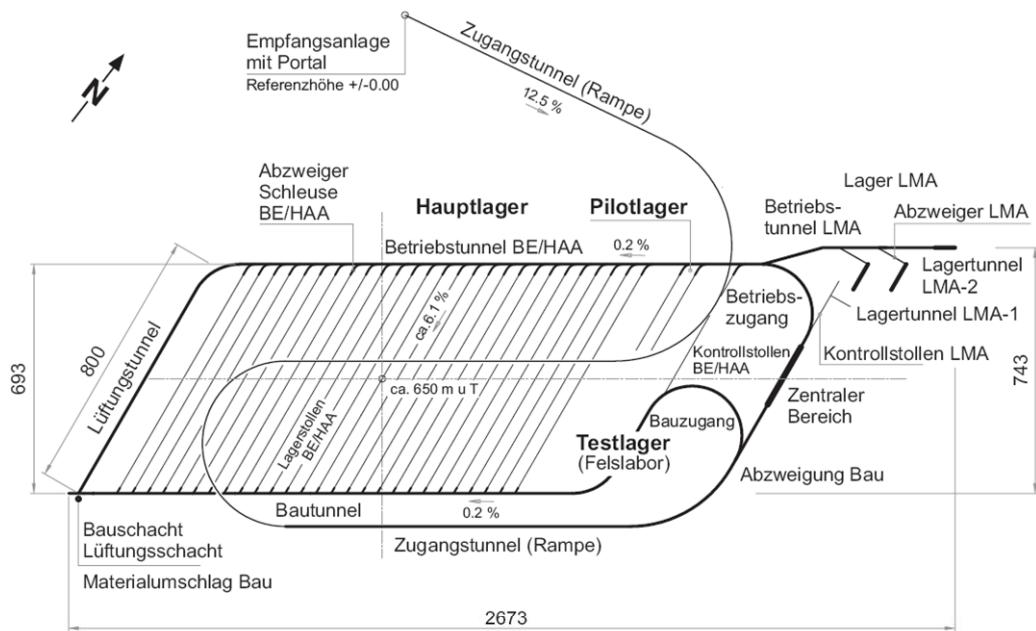


Abbildung 3-44: Schweiz – Layout der untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers für BE, HAW und LMA /3-41/

Die Auslegung des Endlagers erfolgte auf der Basis der Einhaltung eines 100 °C-Kriteriums im Wirtsgestein, wobei 100 °C erst innerhalb der Bentonitbarriere erreicht und somit ein Teil der Barriere gezielt "geopfert" wird. Dieser Opferbereich wird durch eine größere Schichtdicke der Bentonitbarriere kompensiert.

Die Endlagerbehälter werden liegend auf kompaktierten Bentonitblöcken in den Einlagerungsstollen mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern entlang der Stollenachse platziert (Abbildung 3-45 und Abbildung 3-46).

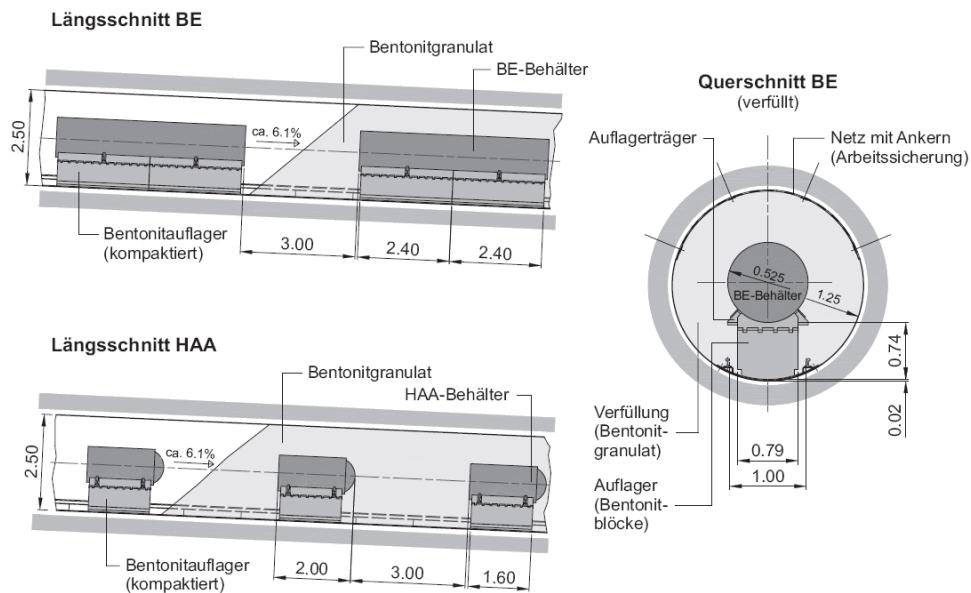


Abbildung 3-45: Schweiz – Einlagerung von BE/HAW in Einlagerungsstrecken (Abmessungen in m) /3-41/

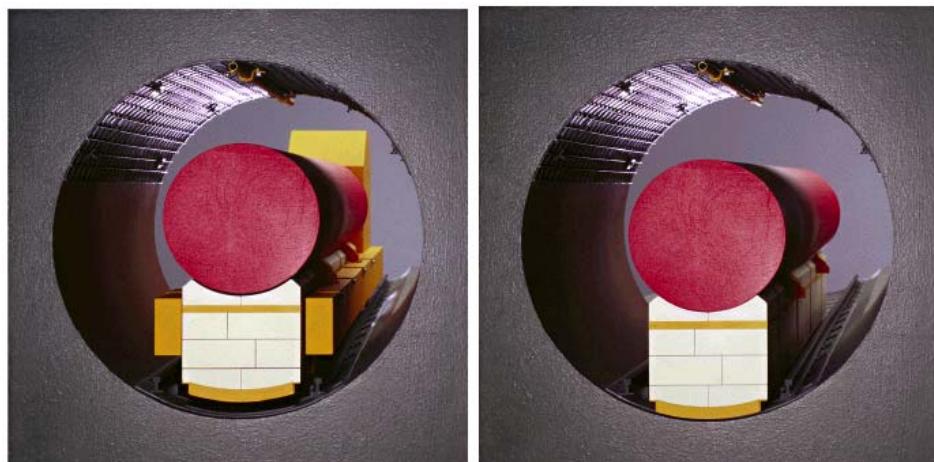


Abbildung 3-46: Schweiz – Einfahren eines BE-Behälters mit Bentonitauflager: Einfahren im Bild links; bereit zum Einbringen der Verfüllung (Bentonitgranulat) im Bild rechts (Modellfoto) /3-41/

Die verbleibenden Hohlräume werden mit Hilfe einer Förderleitung mit Bentonitgranulat verfüllt (Abbildung 3-47). Aufgrund ingenieurtechnischer Erfahrung beläuft sich der Porenraum in solchen Schüttungen auf 40 - 50 Vol. %.

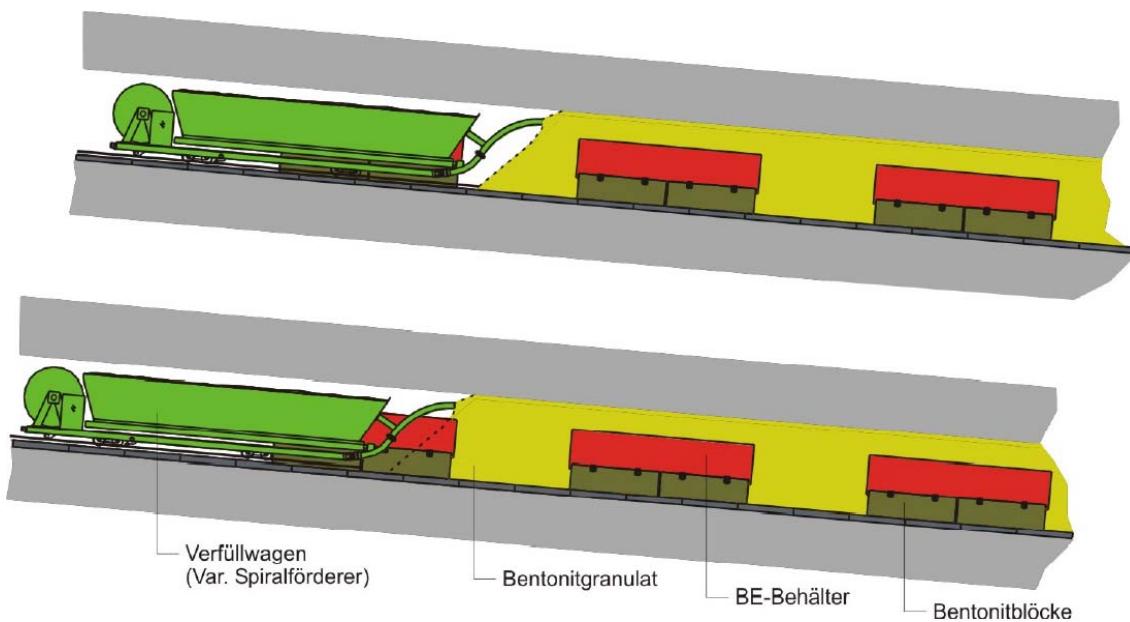


Abbildung 3-47: Schweiz – Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des BE-Behälters (schematisch) /3-41/

3.3.4 Transport- und Handhabungssystem

Die Abfallgebinde mit HAW bzw. BE werden in der übertägigen Empfangshalle in eine Transportabschirmung bzw. einen Transportbehälter verladen und so betriebsintern weitertransportiert. Der interne Transport von Abfallgebinden erfolgt grundsätzlich fernbedient.

Der Transport über die Rampe erfolgt bis unmittelbar vor Aufnahme des Einlagerungsbetriebes gleislos mit bereiften Fahrzeugen. Dann wird der Transport auf Schienenbetrieb einer elektrisch betriebenen Zahnradbahn umgestellt. Mit der Zahnradbahn sollen die Gebinde untertage bis zum Zentralbereich transportiert werden. Hier wird das Zugfahrzeug der Zahnradbahn gegen eine elektrisch betriebene Stollenlokomotive im Adhäsionsbetrieb gewechselt. Des Weiteren wird an den Wagen mit dem Gebinde ein so genannter Hydraulikwagen angekoppelt.

Der Hydraulikwagen dient dazu, das Endlagergebinde fernbedient aus der anlagenintern verwendeten Transportabschirmung bzw. dem Transportbehälter auf das Umsetzgerät zu schieben. Mit dem Umsetzgerät wird das Gebinde auf die Auflageträger des Einlagerungstrolleys aufgesetzt (s. Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49). Mit dem Einlagerungstrolley werden die Behälter samt Bentonitaufklager in den Einlagerungsstollen eingefahren und in der vorgesehenen Lagerposition abgesetzt.

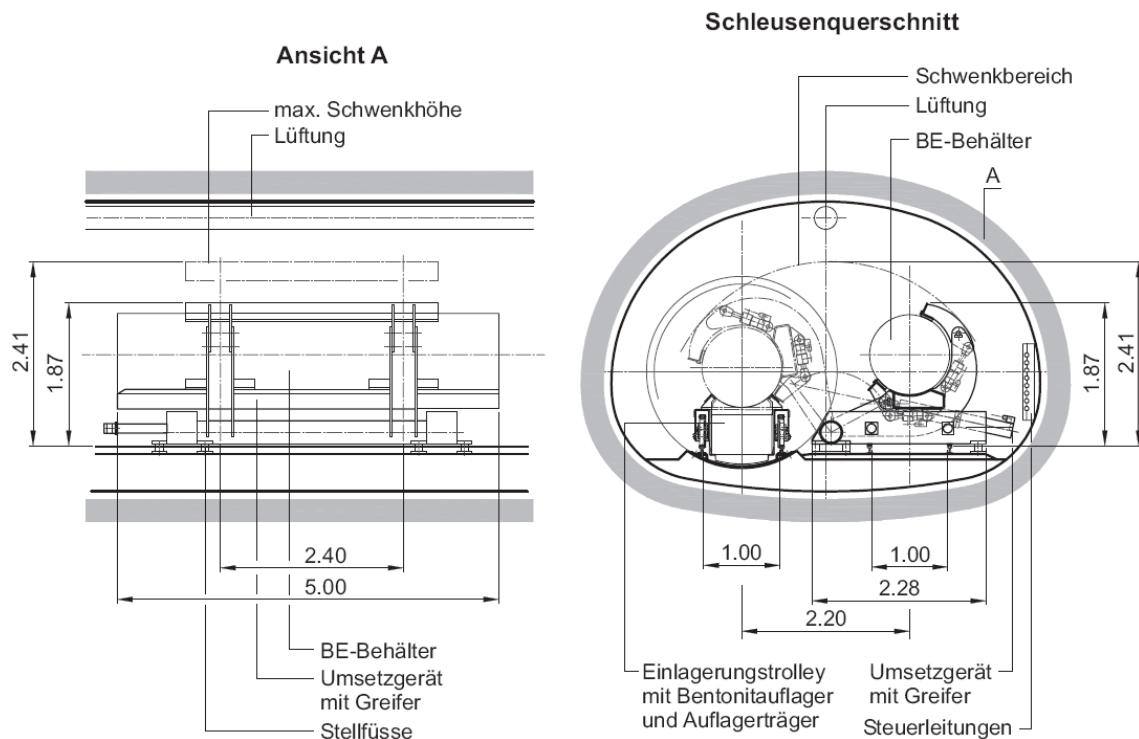


Abbildung 3-48: Schweiz – Umsetzgerät für BE/HAW-Behälter – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAW (Abmessungen in m) /3-41/

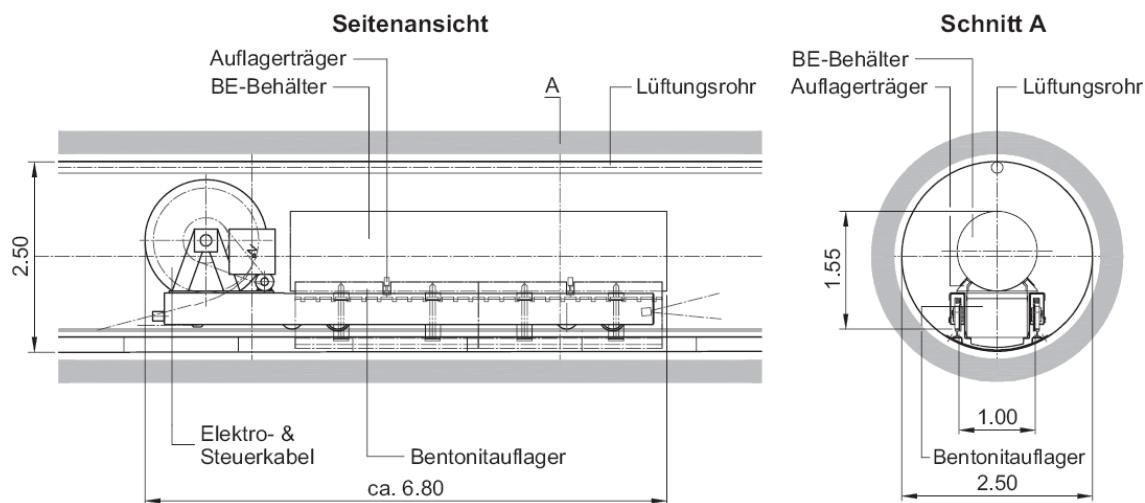


Abbildung 3-49: Schweiz – Einlagerungstrolley – Seitenansicht und Schnitt durch einen Einlagerungsstollen BE/HAW (Abmessungen in m) /3-41/

Nach Herausfahren des Einlagerungstrolleys wird der Verfüllwagen in die Strecke gefahren und das Verfüllen des Einlagerungsstollens vorgenommen.

3.3.5 Auffahrtechnik

Bezüglich der Errichtungstechnologie des Schweizer Endlagers liegen nur begrenzte Informationen vor. Für den Schacht ist im Bereich wasserführender Schichten ein zweischaliger Ausbau mit Wasserisolation und Injektionen geplant.

Aus der verfügbaren Literatur ist zu entnehmen, dass Einlagerungsstollen für BE/HAW des Hauptlagers vom Bautunnel aus steigend mit einer Tunnelbohrmaschine aufgefahren und vor ihrer Beschickung im bautunnelseitigen Ende verschlossen werden sollen.

Des Weiteren wird berichtet, dass bei den Einlagerungsstollen auf einen Ausbau mit zementierten/betonierten Strukturelementen verzichtet wird, da die Einlagerungsstollen je nach Bedarf erstellt werden, so dass ein vorbereiteter Stollen nicht länger als zwei Jahre offen bleibt. Des Weiteren haben die Forschungsergebnisse im Opalinuston des Felslabors Mont Terri und die geotechnisch/felsmechanischen Resultate der Sondierbohrung Benken gezeigt, dass für die Lagerstollen bei dem geringen Durchmesser und der optimalen Ausrichtung zur Sicherstellung der Hohlraumstabilität keine Felssicherungsmaßnahmen notwendig sind. Zur Vermeidung von Blocksturz bzw. zur Sicherstellung des Arbeitsschutzes genügt eine Ankerung in Verbindung mit Draht- bzw. Armierungsnetzen. Als Anker sind Stahl- oder Kunststoffanker vorgesehen. Sowohl der Vortrieb wie das Bohren der Anker erfolgen ohne oder mit minimalem Wassereinsatz.

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei der Errichtung und der Erweiterung des Untertagelabors in Mont Terri auch Erfahrungen hinsichtlich der Errichtung von Strecken im Ton gewonnen wurden, die bei der Errichtung eines Endlagers in Ton berücksichtigt werden können.

3.3.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept geht von folgenden Grundanforderungen aus:

- Möglichst geringe Durchlässigkeit innerhalb der Versiegelungszone sowie auch der peripheren Auflockerungszone,
- Möglichst großer Widerstand gegen Verformung des Gebirges, um weiterreichende Auflockerung zu vermeiden,
- Guter Verbund und Haftbarkeit mit dem Wirtsgestein,
- Einfache Einbaumöglichkeit mit vernünftiger Qualitätskontrolle,
- Chemische Verträglichkeit mit dem Wirtsgestein,
- Ausreichendes Sorptionsvermögen für Radionuklide bzw. geringe Diffusivität.

Der Verfüllung und Versiegelung des geologischen Tiefenlagers wird die Aufgabe zugemessen, die durch den Bau der Anlage vor allem hinsichtlich Wasserbewegung in den

durchörterten Schichten und im Wirtsgestein bewirkten Änderungen soweit rückgängig zu machen, dass die Barrierenwirkung insbesondere des Wirtsgesteins und der technischen Barrieren nicht unzulässig beeinträchtigt wird. Zusätzlich soll durch die Verfüllung und Versiegelung das Lager definitiv verschlossen und dadurch der Zugang von Personen in die Lagerzone wirksam und dauerhaft erschwert werden.

Durch den stufenweisen Einbau der Verfüllung und Versiegelung bis zum vollständigen Verschluss der Gesamtanlage soll in jeder Situation ein optimaler Schutz der Abfälle vor internen und externen Einwirkungen sowie Einwirkungen Dritter erreicht werden:

- Die Einlagerungsstollen BE/HAW werden während des Einlagerungsbetriebs verfüllt und versiegelt.
- Nach einer ersten Überwachungsphase wird das Hauptlager inkl. Schacht verschlossen und der verschlossene Teil der Anlage durch Versiegelungen gesichert. Die Außenanlagen im Schachtkopf werden abgebaut und das Gelände rekultiviert.
- Am Schluss werden über die Rampe die noch offenen Anlagen unter Tage verfüllt und ebenfalls versiegelt.

Der Verschluss der Anlage erfolgt durch individuell ausgelegte Versiegelungen (Verschlussbauwerke) an Schlüsselzonen und durch Streckenverfüllungen als System gestaffelter passiver Sicherheitsbarrieren derart, dass auf weitere Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen verzichtet werden kann.

Die Möglichkeit der Rückholung eingelagerter Abfälle wurde überprüft. Die Rückholung ist mit heutiger Technik als standardisierter Ablauf machbar und kann auch für HAA angewendet werden.

Die Verfüllung des verbleibenden Hohlraumes nach Platzierung eines Containers auf dem Unterbau aus Bentonitblöcken soll mit Bentonitgranulat erfolgen. Dazu wird ein spezieller Wagen in der Umladestation mit Granulat beladen und in die Einlagerungsstrecke gefahren, wo der Hohlraum so verfüllt wird, dass zwischen Granulat und Streckenfirsche ein freier Raum für die Bewetterung verbleibt. Nachdem das letzte Gebinde in eine Einlagerungsstrecke verbracht wurde, wird der verbliebene Hohlraum unter der Streckenfirsche mittels einer Rückfüllleitung an der Streckenfirsche pneumatisch verfüllt. Die gefüllte Strecke soll dann mit einem Zementdamm verschlossen werden, wobei alternative Lösungen untersucht werden. Abbildung 3-47 zeigt schematisch das Einbringen des Bentonitgranulates in einer Einlagerungsstrecke.

Die Bentonitblöcke unter den Gebinden sind aus hochkommpaktiertem Bentonit gefertigt, mit einer Trockendichte von $1,75 \text{ t/m}^3$. Das Bentonitgranulat hat eine Trockendichte der einzelnen Granulatkörper 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 smektitreicher 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.

Das Schachtverschlusskonzept sieht ein mehrschichtiges Verschlussbauwerk aus natürlichen Materialien vor. Zwei Widerlager werden aus Schotterkies mit entsprechenden Übergangsschichten zum Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit hergestellt. 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 das ca. 40 m lange Dichtelement. Vor dessen Einbau wird eine mögliche Auflockerungszone um die Schachtröhre entfernt und der verbleibende Querschnitt mit Bentonit gefüllt. Die detaillierten Maßnahmen zur Abtrennung von Aquiferen in den überliegenden Schichten werden aufgrund der Ergebnisse beim Rampenbau bzw. Schachtabteufen festgelegt.

3.3.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Nach Abschluss einer umfassenden Überprüfung und einer positiven Bewertung des Nachweises durch die Bundesbehörden sowie durch internationale Experten hat der Bundesrat den Entsorgungsnachweis am 28. Juni 2006 gutgeheißen. Damit ist kein Standortentscheid getroffen, sondern die grundsätzliche Machbarkeit eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten in der Schweiz nachgewiesen worden, wie dies das Kernenergiegesetz verlangt.

Zum Einlagerungskonzept sowie zur Einlagerungs- und Verfülltechnik wurden bisher im Wesentlichen nur konzeptionelle Untersuchungen durchgeführt. Abbildung 3-50 zeigt schematisch das geplante weitere Vorgehen zur Errichtung eines Endlagers in Tongestein.

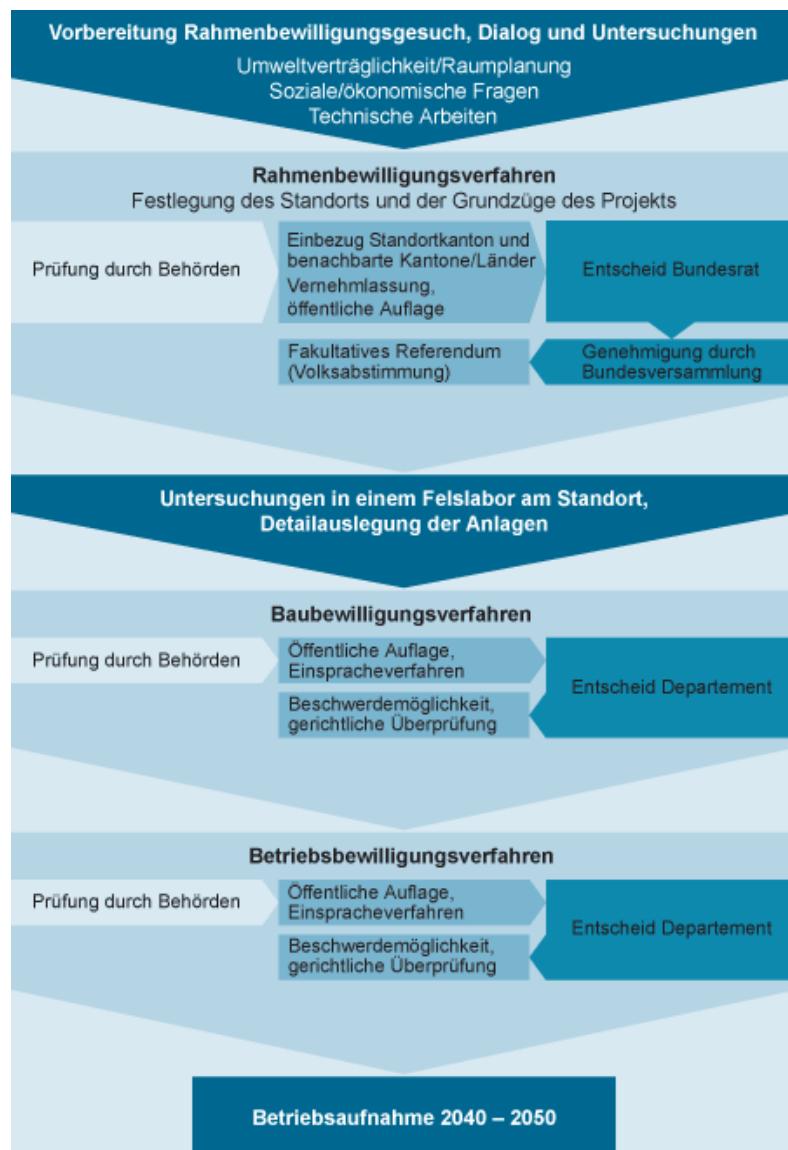


Abbildung 3-50: Schweiz – Geplantes Vorgehen zur Errichtung eines Endlagers für HAW und ausgediente Brennelemente /3-41/

Die Auswahl des genauen Standortes soll in drei Etappen bis 2014/2016 erfolgen und die Inbetriebnahme eines HAW-Endlagers ist ca. 2040 vorgesehen.

3.3.8 Aufwand- und Kostenbewertung

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

4 Endlagerung in einer Salzformation - Deutschland

Eine grundsätzliche Entscheidung zur Endlagerung aller radioaktiven Stoffe in tiefen geologischen Formationen wurde in Deutschland bereits in den 60er Jahren getroffen. Seit Anfang der 70er Jahre wurden in Deutschland Standortvergleiche durchgeführt, in deren Ergebnis der Salzstock bei Gorleben als der günstigste Standort für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle ausgewählt wurde. Die Eignungsuntersuchungen dieses Standortes werden seit 1979 durchgeführt. 1983 stimmte die Bundesregierung mit Kabinettsbeschluss vom 13. Juli 1983 der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben zu, die 1984 mit der Schachtabteufung begonnen wurde. Über zwei Schächte und entsprechende Strecken wurde der Salzstock in 840 m Tiefe großräumig erschlossen und mit der untertägigen geowissenschaftlichen Erkundung begonnen.

Im Oktober 2000 wurden diese Arbeiten auf Beschluss der Bundesregierung unterbrochen und ein Moratorium (mind. 3 bis max. 10 Jahre) verfügt /4-1/.

In Deutschland werden radioaktive Abfälle in wärmeentwickelnde Abfälle und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung eingeteilt. Diese Klassifizierung entspricht der Grundstrategie Deutschlands zur Endlagerung aller radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen.

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Regelungen, die eine Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle vorsehen. Die deutschen Endlagerkonzepte sehen keine Maßnahmen zur Ermöglichung oder Erleichterung einer Rückholung radioaktiver Abfälle vor. Untersuchungen zur Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus einem Endlager in tiefen geologischen Formationen wurden in Deutschland durchgeführt und dabei die möglichen Konsequenzen bezüglich der Endlagerauslegung und -sicherheit ausgewiesen /4-2/, /4-3/.

4.1 Endlagerinventar

Ausgediente BE sind im Rahmen von Verträgen zur Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente nach Frankreich bzw. Großbritannien transportiert worden. Durch politische Entscheidung wurden die Transporte ausgedienter BE aus Leistungsreaktoren zu den Wiederaufarbeitungsanlagen im Jahre 2005 beendet. Die danach anfallenden ausgedienten BE werden bis zu einer möglichen direkten Endlagerung in Zwischenlagern an den KKW-Standorten gelagert. Das endzulagernde Inventar an hochradioaktiven und wärmeentwickelnden Abfällen basiert auf dem Mengengerüst des Entwurfs des Nationalen Entsorgungsplans /4-4/ mit Aktualisierungen aus den Ergebnissen der Anfragen bei den Hauptablieferern.

Zu den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente zählen HAW-Kokillen (CSD-V) mit verglasten hochradioaktiven Spaltprodukten und Feedklärschlamm, verglaste mittelradioaktive Deko- und Spülwässer (CSD-B) und kompaktierte mittelradioaktive Brennelementhülsen, Strukturteile und Technologieabfälle (CSD-C). Das Mengengerüst berücksichtigt die bei der Verglasungseinrichtung des Forschungszentrums Karlsruhe (VEK)

anfallenden HAW-Kokillen und die aus England und Frankreich zurückzuführenden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (WA-Abfälle). Von BN-GS (British Nuclear Group Sellafield, ehemals BNFL British Nuclear Fuels) werden ausschließlich WA-Abfälle in Form von HAW-Kokillen zurückgeführt. Von AREVA-NC (ehemals COGEMA, La Hague) sind neben HAW-Kokillen (CSD-V) auch mittelradioaktive WA-Abfälle (CSD-C und CSD-B) zurückzuführen.

Entsprechend den Abschätzungen /4-5/ umfassen die bis zum Jahr 2040 anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle:

- Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von 6.077 tSM ausgedienter BE aus Leistungsreaktoren in ausländischen Wiederaufarbeitungsanlagen sowie von 91 tSM in der WAK und
- direkte Endlagerung von ca. 10.680 tSM ausgedienter BE aus Leistungsreaktoren mit SWR, DWR und WWER.

Diese Abfälle sollen in verschiedene Behälter für die Endlagerung verpackt werden. Die Mengen der endzulagernden Gebinde sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle /4-5/

Abfallart	Endlagergebindetyp	Anzahl der Gebinde
Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (AREVA NC, BN-GS, WAK)	HAW-Kokille	3.767
	CSD-B	560
Verpresste Hülsen- und Strukturteile, technologischer Abfall aus der Wiederaufarbeitung	CSD-C	6.902
Brennelemente	POLLUX-Behälter oder Brennstabkokille (BSK)	2.045 oder 6.817

4.2 Endlagerbehälterkonzept

Für die Endlagerung der HAW und BE werden verschiedene Varianten betrachtet, bei denen unterschiedliche Endlagerbehälter eingesetzt werden. In Tabelle 4-2 sind die wichtigsten Daten zu den Endlagerbehältern der hochradioaktiven und wärmeentwickelnden Abfälle zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Deutschland – Daten typischer Endlagerbehälter /4-6/

	Länge/ Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Gebinde- volumen [m ³]	Gebinde- masse [Mg]	Transport- gebinde- volumen [m ³]
HAW-Kokillen CSD-B	1.338	430 456	0,18	0,49	2,65 ³⁾
CSD-C	1.345	440	0,18	0,70 0,85	2,65 ³⁾
POLLUX	5.517	1.560 ¹⁾	10,55	[65	10,55
BSK	4.980	430 440 ²⁾	0,72	5,3	7,4 ⁴⁾
CASTOR AVR/THTR	2.784	1.380 ¹⁾	4,16	26	4,16
CASTOR MTR 2	1.631	1.430	2,62	18	2,62
CASTOR KNK	2.784	1.380 ¹⁾	4,16	25	4,16

1) ohne Tragezapfen

2) Durchmesser im Deckelbereich

3) Transferbehälter für HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C: l = 2.000 mm, d = 1.300 mm (abgeschätzt)

4) Transferbehälter für BSK: l = 5.570 mm, d = 1.300 mm

Die in Tabelle 4-1 aufgeführten Endlagerbehälter/Verpackungen liegen innerhalb der derzeit bestehenden Geometrie- und Massenbeschränkungen, die aufgrund des entwickelten Transport- und Einlagerungssystems für ein zukünftiges Endlager im Salz in /4-7/ abgeleitet wurden.

Die HAW-Kokillen enthalten die verglasten, beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehenden Spaltproduktlösungen. Es werden ca. 150 Liter flüssige Glasschmelze in einen Edelstahlbehälter mit 5 mm Wandstärke abgefüllt. Der Deckel wird mit dem Behälterkörper verschweißt. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf.

Die radioaktiven Reststoffe aus der Betriebsabwasseraufbereitung in La Hague werden verdampft und die Konzentrate mit dem CCM-Verfahren als mittelradioaktive Glasprodukte in die CSD-B-Kokille konditioniert. Die Abmessungen dieses Edelstahlbehälters entsprechen denen der HAW-Kokille.

Die CSD-C-Kokille dient zur Aufnahme der zu Presslingen kompaktierten Brennelementhülsen und Technologieabfälle. Die Kokille ist ein Edelstahlbehälter mit 5 mm. Der Deckel wird mit dem Behälterkörper verschweißt. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf.

Abbildung 4-1 zeigt eine HAW- und eine CSD-C-Kokille.

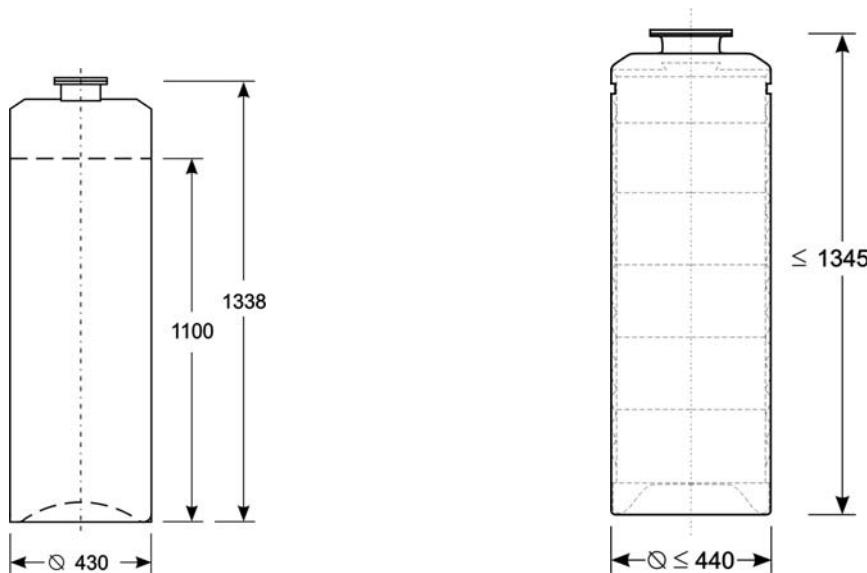


Abbildung 4-1: Deutschland – HAW-Kokille (links) und CSD-C (rechts)

Für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente sollen Behälter vom Typ POLLUX oder Brennstabkokillen (BSK) eingesetzt werden.

Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornstahl (15MnNi6.3), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in 5 Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 DWR-BE oder 6 SWR-BE eingesetzt wird. Unter geometrischen Gesichtspunkten können die Brennstabbüchsen auch die gezogenen Brennstäbe von 5 WWER-BE aufnehmen. In der innen angeordneten, quadratischen Büchse können anstatt der Brennlementstäbe gepresste Strukturelemente eingebracht werden. Bei dieser Variante wird von einer vollen Beladung mit Brennstäben ausgegangen. Der Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyäthylen zur Neutronenmoderation eingesetzt. Der POLLUX-Behälter kann die Brennstäbe von bis zu 10 DWR-BE, 30 SWR-BE oder 25 WWER-BE aufnehmen. In der Abbildung 4-2 ist beispielhaft der POLLUX-10 mit den gezogenen Brennstäben aus 10 DWR-BE dargestellt.

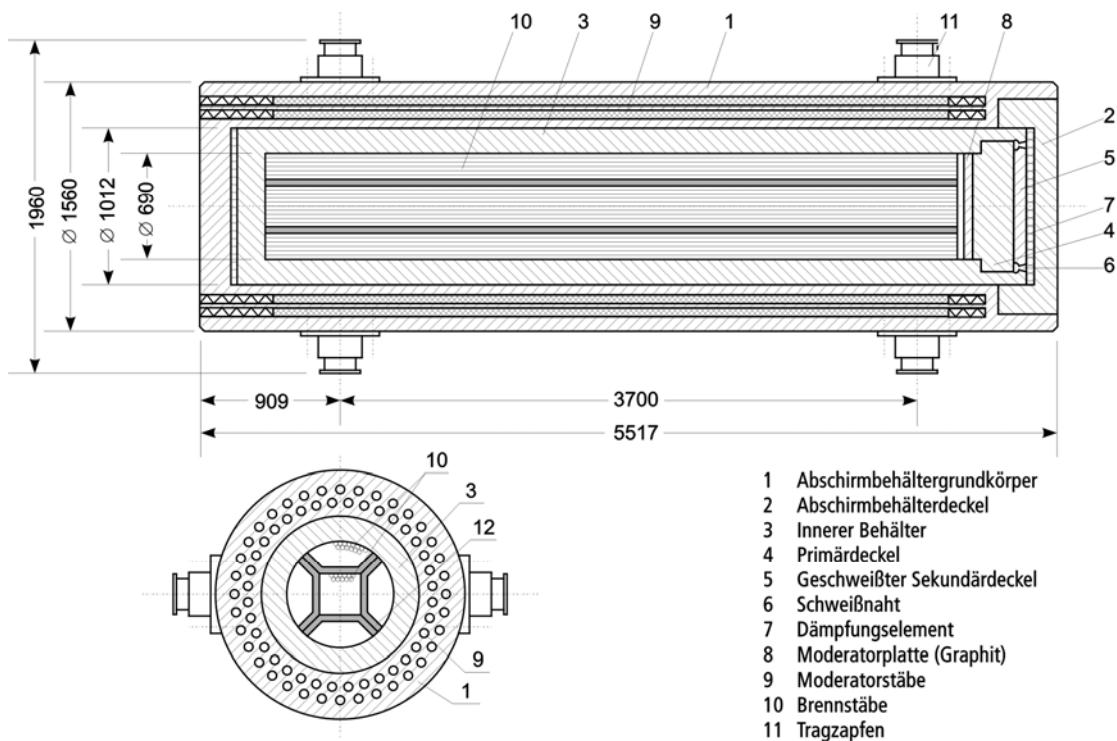
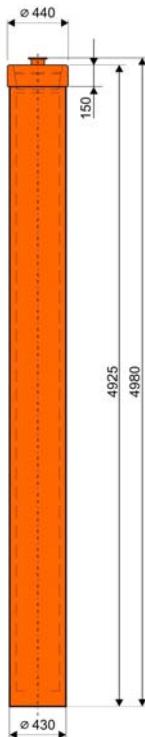


Abbildung 4-2: Deutschland – POLLUX-Behälter

Die Brennstabkokille BSK (s. Abbildung 4-3) wurde als Alternative zum POLLUX-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe aus 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE (in zwei Brennstabbuchsen) entworfen. Unter geometrischen Gesichtspunkten kann die BSK auch die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWER-BE aufnehmen. Die Geometrie des Behälters (mit Ausnahme der Länge) korrespondiert weitgehend mit der HAW-Kokille, CSD-B bzw. CSD-C. Dies eröffnet die Möglichkeit der Handhabung mit weitgehend identischen Hebezeugen und die Einlagerung in gleichkalibrigen Bohrlöchern.

Die BSK besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 40 mm Wandstärke /4-8/ und einem angepressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl. Der innere Schachtraum wird zunächst durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen. In einer Aussparung in der Deckelunterseite wird eine Moderatorplatte zur Neutronenabschirmung eingelegt. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Tragpilz auf.



Gewicht, beladen: 5,266 kg

Abbildung 4-3: Deutschland – Brennstabkokille (BSK)

Die CASTOR-Behälter des Typs AVR/THTR und KNK bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit und aus zwei übereinanderliegenden, einzeln abgedichteten Deckeln aus Gusseisen bzw. aus unlegiertem Baustahl (Primär- und Sekundärdeckel) und enthält einen zylindrischen Innenraum zur Aufnahme einer Stahlkanne für THTR-BE oder zur Aufnahme von zwei Stahlkannen für die AVR-BE. Zum Schutz des Deckelsystems vor Staub, Feuchtigkeit und mechanischen Einwirkungen, beispielsweise bei der Handhabung, kann der CASTOR-Behälter mit einer Schutzplatte aus Kohlenstoffstahl versehen werden. Zur Handhabung wird der Behälter oben und unten jeweils mit zwei Tragzapfen ausgerüstet.

Die dichte Umschließung wird gebildet vom Behälterkörper, dem Primärdeckel mit Verschraubung und Metalldichtring sowie der Verschlusskappe im Primärdeckel einschließlich deren Metalldichtring und Verschraubung oder von dem Behälterkörper und dem Sekundärdeckel mit Metalldichtring und Verschraubung sowie den im Sekundärdeckel vorhandenen Verschlüssen (Verschlusskappe und Blindflansch oder Druckschalter) einschließlich deren Metalldichtring und Verschraubung.

Die Beladung eines CASTOR AVR/THTR erfolgt entweder mit einer Kanne, die etwa 2.100 Brennelemente des THTR-300 enthält, oder mit zwei Kannen, die insgesamt ca. 1.900 Brennelemente des AVR enthalten. Abbildung 4-4 zeigt den CASTOR AVR/THTR mit zwei Kannen und Schutzplatte.

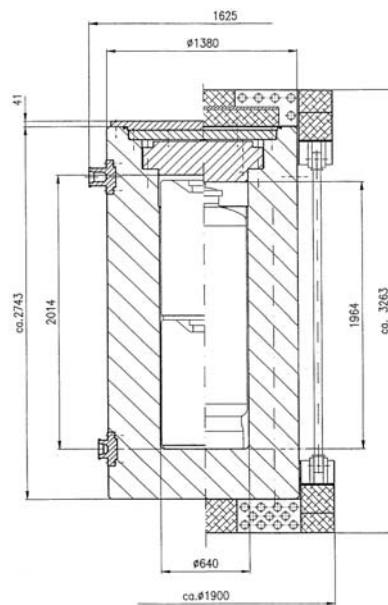


Abbildung 4-4: Deutschland – CASTOR AVR/THTR

Beim CASTOR KNK befindet sich im Behälterschachtraum ein Tragkorb, der jeweils 9 verschweißte Büchsen mit bestrahlten und unbestrahlten Kernbrennstoffen aufnimmt. Es existieren zwei Tragkorbvarianten. Die Variante 1 nimmt neun Büchsen vom Typ Phenix, die Variante 2 acht Büchsen vom Typ Phenix und in der zentralen Tragkorbposition eine Büchse vom Typ OH auf. Die Phenix-Büchsen enthalten Kernbrennstoffe aus der kompakten natriumgekühlten Kernreaktoranlage KNK II (33 Stück) oder Kernbrennstoffe aus Nuklearexperimenten (2 Stück: Mol-1 und Mol-2). In einer OH-Büchse sind Kernbrennstoffe aus dem Nuklearschiff „Otto-Hahn“ verpackt.

Der CASTOR MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Am oberen Zylinderende sind der Primärdeckel und der Sekundärdeckel angeordnet. Die dichte Umschließung wird gebildet durch den Behälterkörper und den Primärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und den zugehörigen Metalldichtungen und Verschraubungen bzw. alternativ durch den Sekundärdeckel mit seinem Verschlussdeckel und dem Druckschalter oder Blindflansch mit den zugehörigen Verschraubungen und Metalldichtungen. Im Behälterinnenraum ist einer von sechs möglichen Tragkörben angeordnet. Die Abbildung 4-5 zeigt den CASTOR MTR 2 in Transportkonfiguration mit Stoßdämpfer.

Es sind verschiedene Beladevarianten mit Brennelementen aus verschiedenen Forschungsreaktoren zulässig, darunter die des Forschungsreaktors München (FRM II) und des Rossendorfer Forschungsreaktors (RFR) der VKTA.

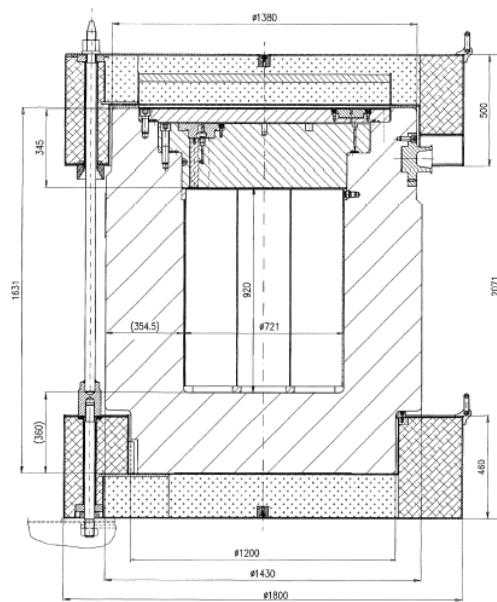


Abbildung 4-5: Deutschland – CASTOR MTR 2

Tabelle 4-3 gibt eine Übersicht über Kenndaten der wesentlichen HAW- und BE-Gebinde.

Tabelle 4-3: Deutschland – Kenndaten von Gebinden mit wärmeentwickelnden Abfällen /4-9/

		POLLUX-8*	HAW-Kokille	CSD-C	ELB-3 BE
Länge	mm	5.517	1.338	1.345	4.900
Durchmesser	mm	1.560	≤ 430	≤ 440	430
Masse ges.	t	65	max. 492	max. 850	5.200
Masse SM	tSM	4,3	-	-	1,6
Wärmeleistung bei Ausladung	kW	8.164,80		0,02	3.061,80
nach 10 Jahren		8,08	1,26		3,03
nach 30 Jahren		5,14	0,67**		1,93

* Uran-BE; **nach 33 Jahren

4.3 Endlagerkonzept

Das bisherige Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde Abfälle geht gemäß der vom BfS in Auftrag gegebenen Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben 1998 /4-10/ von der Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen einschließlich ausgedienter BE in einem geologischen Endlager in einem Salzstock aus. Die Errichtung des Endlagers ist in einer Teufe von ca. 870 m vorgesehen. Die Einlagerung der wärmeentwickelnden und der schwach wärmeentwickelnden Abfälle soll in räumlich getrennten Flügeln des Endlagers erfolgen (s. Abbildung 4-6).

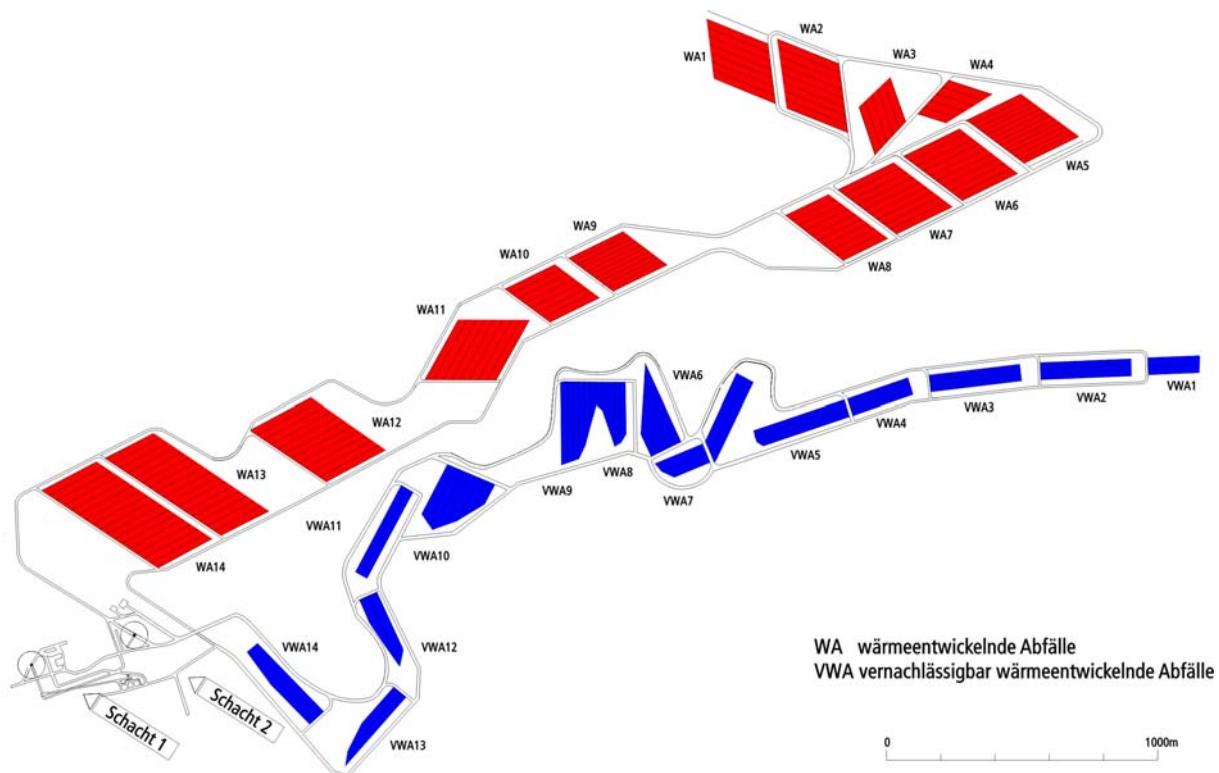


Abbildung 4-6: Deutschland – Gorleben Layout der geplanten Einlagerungsfelder

Die Lage der Einlagerungsfelder sowie Länge der Einlagerungsstrecken ist der Geologie des Salzstockes angepasst. Der Zugang zu den Untertageanlagen des Endlagers erfolgt über zwei Schächte mit einem Durchmesser von ca. 7,5 m.

Der für den Transport der Abfallgebinde nach untertage vorgesehene Schacht 2 ist mit einer Förderanlage für eine maximale Nutzlast von 85 t ausgerüstet. Am Füllort wird ein Plateauwagen mit dem Abfallgebinde von einer Batterie-Grubenlokomotive (Abbildung 4-7) übernommen und über die Richtstrecke bis zu dem in Betrieb befindlichen Einlagerungsfeld und dann über einen Querschlag in die Einlagerungsstrecke gezogen.

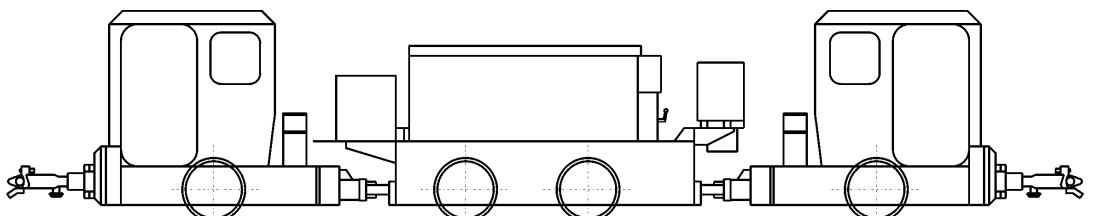


Abbildung 4-7: Deutschland – Skizze der Batterie-Grubenlokomotive

Die Querschnitte der Richtstrecken und Querschläge hängen von den Lichtraumprofilen der eingesetzten Transporttechnik ab. Auf der Basis der gleisgebundenen Transporttechnik mit einem parallelen Fahrzeug ergibt sich ein Streckenprofil mit einer lichten Höhe von 4170 mm, einer Sohlenbreite von 7 m und einem Querschnitt von ca. 27 m².

Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit unterschiedlicher Größe eingeteilt, die sich aus den geologischen Bedingungen ergibt.

Es wurden drei Varianten der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle betrachtet:

- Streckenlagerung der ausgedienten Brennelemente in POLLUX-Behältern oder als ELB-3 (entspricht BSK); Bohrlochlagerung der HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefen Bohrlöchern;
- Reine Bohrlochlagerung, wobei die ausgedienten Brennelemente konditioniert in ELB-3 (entspricht BSK) verpackt werden;
- Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente, Bohrlochlagerung der HAW- und CSD-C-Kokillen in 30 m tiefen Bohrlöchern.

Streckenlagerung

Bei der Streckenlagerung von POLLUX-8 Gebinden umfasst die Größe eines Feldes ca. 83.100 m², bei einer Länge von 277 m und einer Breite von 300 m. Bei reiner Streckenlagerung sind ca. 8 Felder erforderlich, um die Gesamtanzahl an POLLUX-8-Gebinden einzulagern.

Von den Querschlägen zwischen den Richtstrecken gehen die blinden Einlagerungsstrecken ab. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 36 m. Die Länge der Einlagerungsstrecken kann bis 300 m erreichen. Die Höhe der Einlagerungsstrecken ist ca. 3,4 m und die Breite ca. 4,5 m.

Abbildung 4-8 zeigt den Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Streckenlagerung von POLLUX-Behältern. Die Maße 4,5 m x 3,4 m sind als Mindestmaße zu verstehen.

Die Auslegung des Querschnitts erfolgt hinsichtlich der Erfordernisse des Streckentransports der Gebinde und der bergbaulichen Anforderungen. Parallel zum Fahrweg für Gleislosfahrzeuge sind die Schienen zum gleisgebundenen Transport auf Schotterbett verlegt. Querschnittsbestimmend sind die Dimensionen der Einlagerungsvorrichtung.

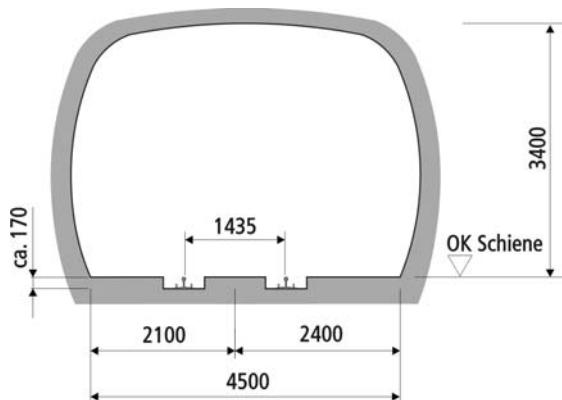


Abbildung 4-8: Deutschland – Querschnitt durch die POLLUX-Einlagerungsstrecke

Die POLLUX-Behälter werden nach dem Transport nach untertege mit einem gleisgebundenen Plateauwagen zur Einlagerungsstrecke transportiert. Hier werden die Behälter mit einer Einlagerungsmaschine (Abbildung 4-9), so wie sie im Rahmen des FuE-Vorhabens zur Direkten Endlagerung entwickelt und im Maßstab 1:1 gebaut und erprobt wurde, vom Plateauwagen entladen und auf der Sohle der Einlagerungsstrecke abgelegt.

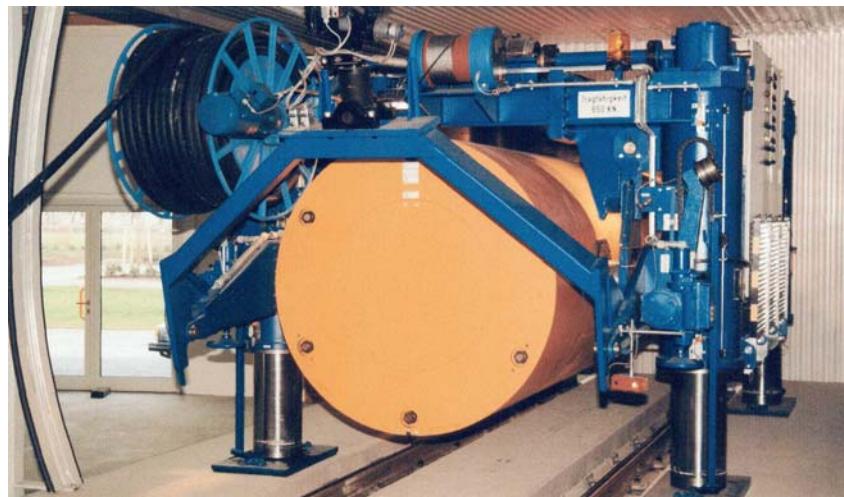


Abbildung 4-9: Deutschland – Demonstrationsstand im Maßstab 1:1 mit einer Einlagerungsmaschine für die Streckenlagerung

Die Einlagerungsmaschine wird zurückgefahren und der Abschnitt mit dem eingelagerten POLLUX-Behälter mit Salzgrus verfüllt. In einem Abstand von ca. 6 m wird der nächste Behälter platziert usw. bis eine Einlagerungsstrecke gefüllt ist. Abbildung 4-10 zeigt schematisch den Ablauf der Streckenlagerung.

Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, beginnend mit den Strecken am äußersten Ende des Grubengebäudes in Richtung der Schächte.

Nachdem eine Einlagerungsstrecke gefüllt ist, wird diese verschlossen. Nachdem alle Einlagerungsstrecken eines Feldes gefüllt sind, wird der entsprechende Querschlag verfüllt und verschlossen und das Feld abgeworfen. Gleichermaßen werden die Richtstrecken zu beiden Seiten der abgeworfenen Einlagerungsfelder mit Salzgrus verfüllt und verschlossen.

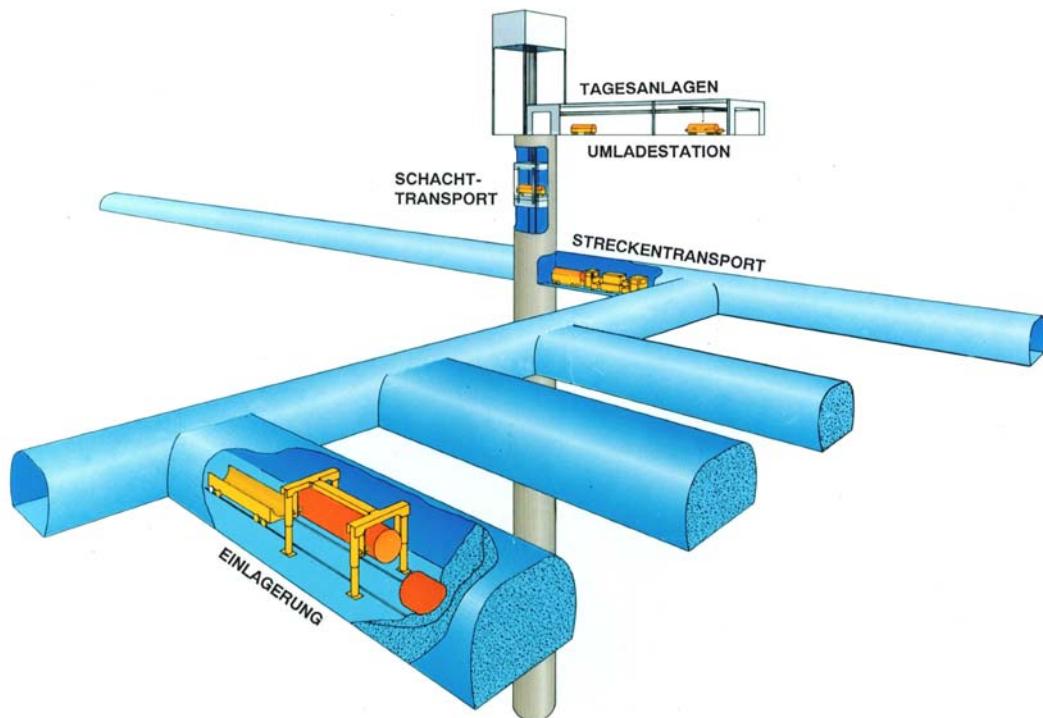


Abbildung 4-10: Deutschland – Gorleben Schema der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern

Der Abstand von ca. 6 m zwischen den Behältern wurde anhand thermischer Berechnungen bestimmt, um die maximale Auslegungstemperatur (200 °C) bei der Endlagerung in Salz einzuhalten. Thermische Berechnungen haben gezeigt, dass die Temperatur des Behälters, des Versatzmaterials und des Gebirges in der Umgebung des eingelagerten Behälters, nachdem ein Abfallgebinde versetzt wurde, rasch ansteigt und nach kurzer Zeit Temperaturen bis ca. 200 °C erreicht. Danach sinkt die Temperatur allmählich wieder ab.

Der berechnete Temperaturverlauf wurde durch die thermischen Simulationsversuche zur Streckenlagerung im Forschungsbergwerk Asse bestätigt (s. Abbildung 4-11) /4-11/. In diesem in-situ-Demonstrationsversuch wurden in zwei parallelen Strecken auf der 800 m-Sohle jeweils 3 elektrisch beheizbare Versuchsbehälter, die in der Dimension und von der Wärmeleistung den POLLUX-Behältern entsprechen, abgelegt und über fast 10 Jahre betrieben.

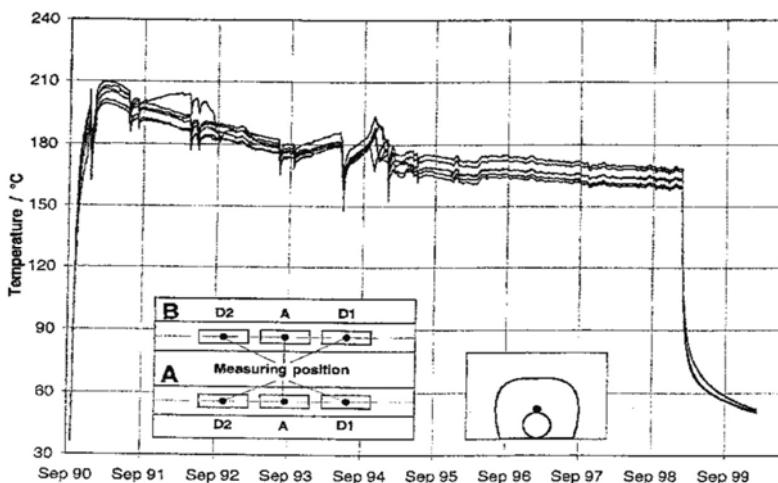


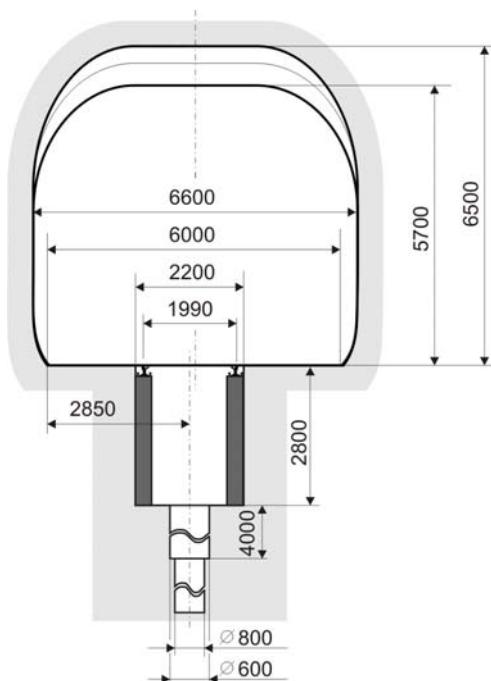
Abbildung 4-11: TSS Versuch – Gemessener Temperaturverlauf an der Behälteroberfläche /4-11/

Bohrlochlagerung

Für die Einlagerung von wärmeentwickelnden unabgeschirmten Gebinden des Typs HAW-Kokille sowie Endlagerbüchsen ELB-3 BE ist die Bohrlocheinlagerung in vertikalen bzw. unter einem Winkel von 45° geneigten Bohrlöchern möglich. Die Tiefe der vertikalen Langbohrlöcher beträgt ca. 325 m, der geneigten Kurzbohrlöcher 31 m. Die nutzbare Bohrlochlänge beträgt bei Tiefbohrlöchern abzüglich 10 m für den Bohrlochverschluss und 25 m für nicht abförderbares Bohrklein ca. 290 m. Die nutzbare Bohrlochlänge bei Kurzbohrlöchern beträgt abzüglich 10 m für den Bohrlochverschluss und 1 m für nicht abförderbares Bohrklein 20 m.

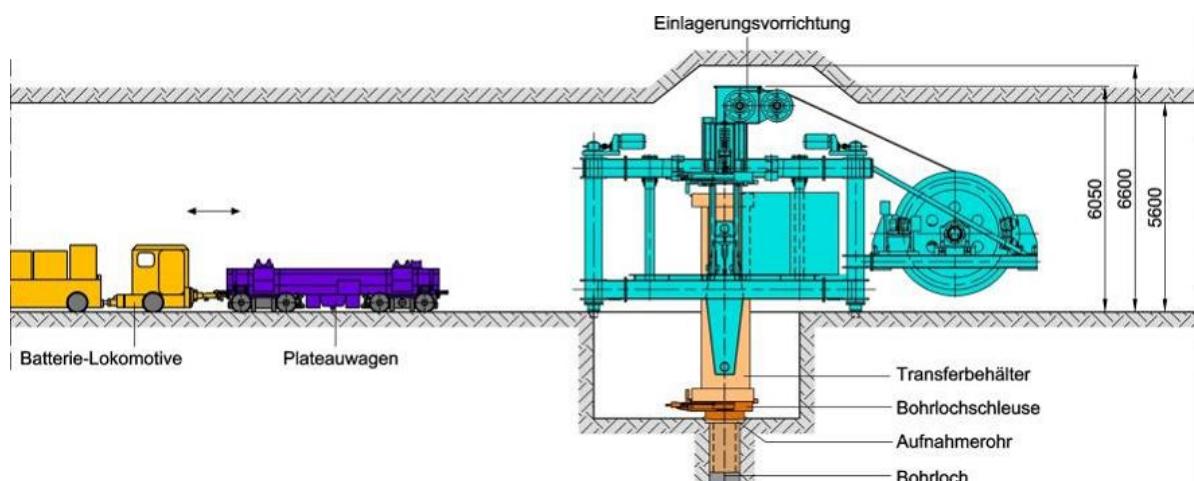
Abbildung 4-12 zeigt den Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke zur Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen. Die Maße 6,0 m x 6,6 m sind als Mindestmaße über dem Bohrloch zu verstehen.

Für die Bohrlochlagerung werden die vorgesehenen Einlagerungsstrecken in regelmäßigen Abständen mit Bohrlöchern versehen. Die Bohrarbeiten beginnen am hinteren Ende einer Einlagerungsstrecke und enden am Abzweig zum Querschlag entsprechend der Reihenfolge der späteren Verfüllung. Jedes Bohrloch wird mit einem betonierten Bohrlochkeller versehen, der mit einem Bohrlochdeckel verschlossen wird. Der Bohrlochdeckel ermöglicht das Überfahren der vorbereiteten leeren Bohrlöcher während des Einlagerungsbetriebes.



**Abbildung 4-12: Deutschland – Entwurf eines Querschnitts durch eine HAW-Kokillen-
Einlagerungsstecke**

Die Einlagerung der Gebinde in die Bohrlöcher erfolgt mit einer Einlagerungsmaschine, mit der die Behälter aus dem abgeschirmten Transferbehälter über ein Schleusensystem in die Bohrlöcher abgesenkt werden (Abbildung 4-13). Ein solches Einlagerungssystem wurde im Rahmen eines FuE-Vorhabens entwickelt und befindet sich seit Sommer 2008 in einem Versuchsstand in der Erprobung. Ziel ist es, die Zuverlässigkeit dieses Einlagerungssystems nachzuweisen, das die Anforderungen aus dem Atomgesetz und Bergrecht erfüllt (Abbildung 4-14).



**Abbildung 4-13: Deutschland – Systemzeichnung der Einlagerungstechnik für die Bohrloch-
lagerung von Endlagergebinden (Maßangaben in mm)**

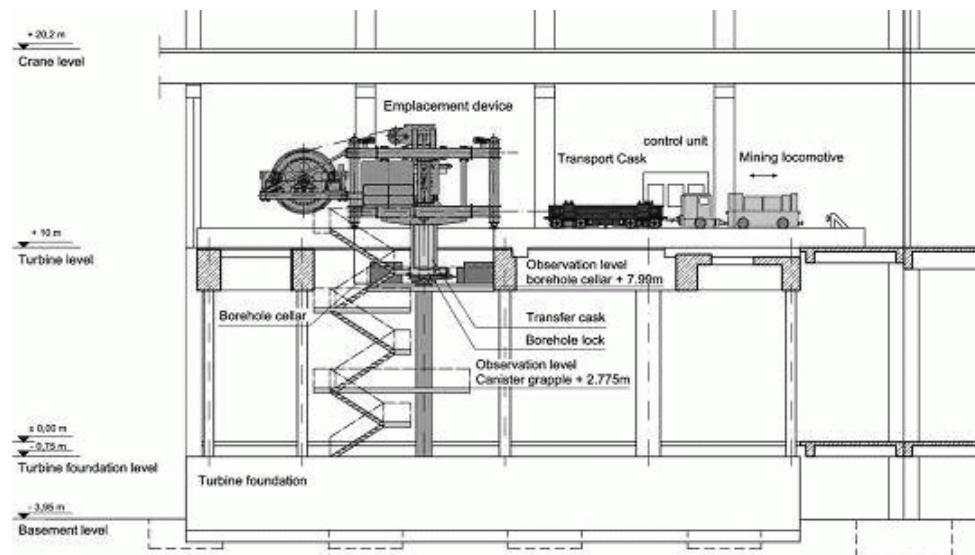


Abbildung 4-14: Deutschland – Versuchsanlage zur Demonstration der Einlagerung von BSK 3 bzw. HAW-Kokillen

Nach Füllung eines Bohrloches mit Gebinden bis auf eine Resttiefe von ca. 10 m wird das Bohrloch verfüllt und verschlossen. Nach Füllung aller Bohrlöcher einer Einlagerungsstrecke wird diese verfüllt und verschlossen.

Bei Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle in unter 45° geneigte Kurzbohrlöcher lässt sich 1 m Streckenhöhe einsparen. Der erforderliche Querschnitt liegt dann bei 31 m^2 , bei einer Streckenhöhe von ca. 6 m anstelle der ca. 44 m^2 bei vertikalen Bohrlöchern. Hier ist die Höhe der Einlagerungsmaschine maßgebend, da Kurzbohrlöcher mit einer kleineren Bohrmaschine erstellt werden können.

Für die Einlagerung von Gebinden in geneigte Kurzbohrlöcher wird eine verfahrbare Bohrlocheinlagerungsmaschine (s. Abbildung 4-15) eingesetzt.

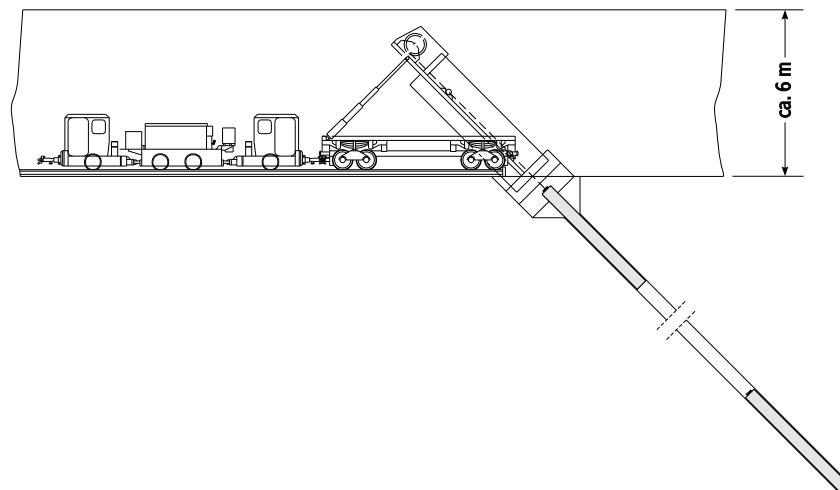


Abbildung 4-15: Deutschland – Einlagerung von BSK bzw. HAW-Kokillen in geneigte Kurzbohrlöcher

Der Ablauf der Einlagerung in die geneigten Bohrlöcher ist analog zur Einlagerung in vertikale Bohrlöcher. Der Ablauf der Bohrlocheinlagerung ist schematisch auf der Abbildung 4-16 gezeigt.

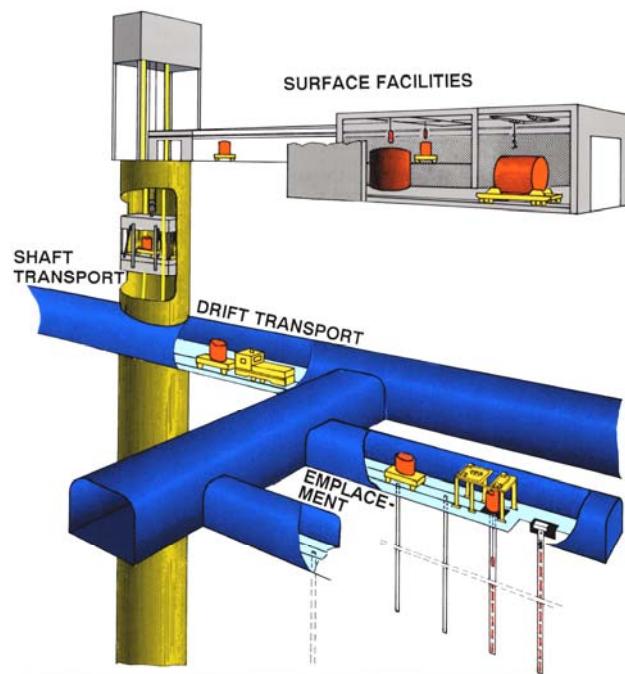


Abbildung 4-16: Deutschland – Ablaufschema bei der Bohrlocheinlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen

4.4 Transport- und Handhabungssystem

Die Anlieferung der Abfallgebinde zum Endlager erfolgt in Transporteinheiten per Bahn bzw. per Lkw. In der Umschlagsanlage übertrage erfolgt die Umladung auf innerbetriebliche Transportmittel – Plateauwagen – mit anschließendem Transport zum Schacht. Für den innerbetrieblichen Transport sollen verschiedene Typen von Plateauwagen eingesetzt werden:

- Plateauwagen für Transferbehälter
- Plateauwagen für POLLUX- und Castor-HTR-Behälter.

Ein Plateauwagen für den Transferbehälter für BSK 3 wurde im Rahmen eines aktuellen FuE-Vorhabens zur Demonstration der Bohrlochlagerung entwickelt und gebaut (Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14). Der Plateauwagen, mit dem POLLUX-Behälter transportiert werden können, wurde im Rahmen von Demonstrationsversuchen in den 90er Jahren gebaut und erprobt (s. Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18)

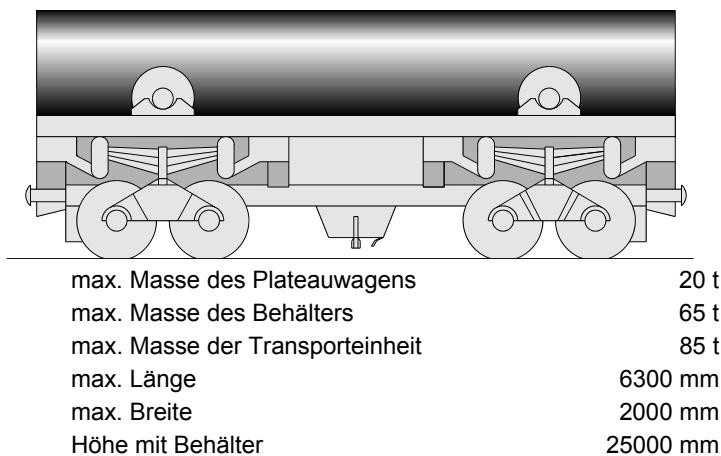


Abbildung 4-17: Deutschland – Skizze eines Plateauwagens mit POLLUX-Behälter

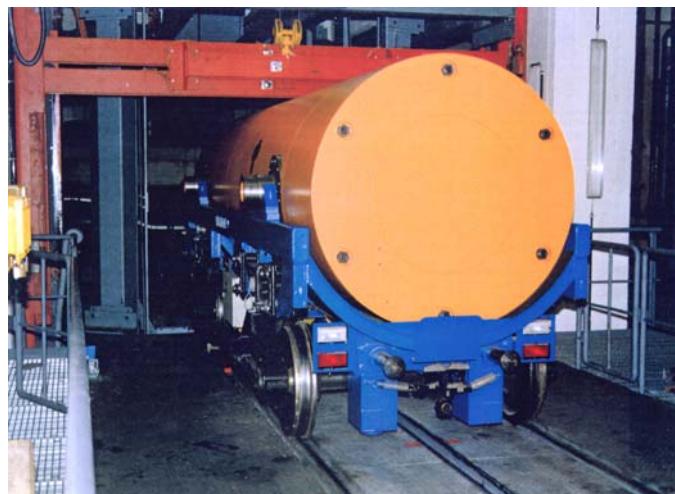


Abbildung 4-18: Deutschland – Foto eines Plateauwagens mit POLLUX-Versuchsbehälter in einem Versuchsstand

Nicht selbstabschirmende Gebinde (BSK) werden in einem Transferbehälter transportiert. Abbildung 4-19 zeigt schematisch einen Transferbehälter.

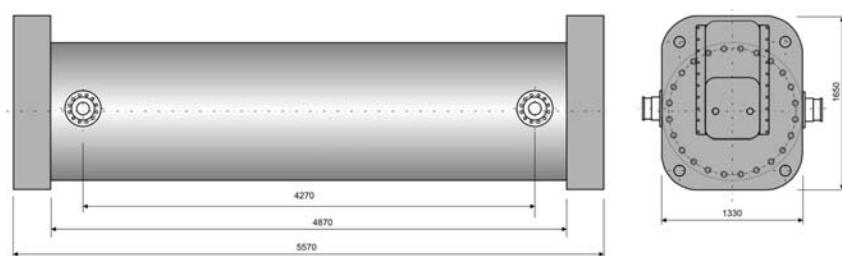


Abbildung 4-19: Deutschland – BSK-Transferbehälter

Der Plateauwagen zum Transport des Transferbehälters für die HAW-/CSD-C-Kokillen existiert nur als Konzept (Abbildung 4-20). Der Plateauwagen ist gelaufgebunden und zweiachsig ausgeführt. Zur Aufnahme des Transferbehälters ist der Rahmen in Fahrzeugmitte köcher-

förmig ausgebildet. Die Einrichtungen zur Fortbewegung des Plateauwagen gleichen denen des Plateauwagens für den POLLUX. Im Rahmen eines aktuellen FuE-Vorhabens wird erprobt, ob die Transporteinheit für die BSK, d. h. der Transferbehälter und der Plateauwagen, auch für ein Gebinde mit HAW-Kokillen geeignet ist.

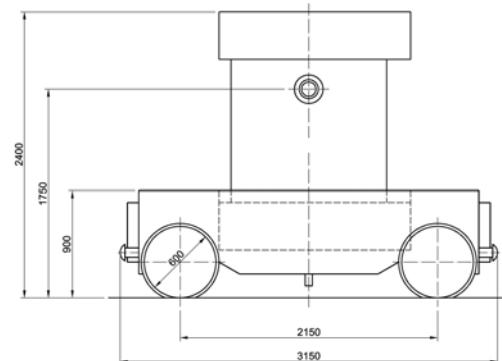


Abbildung 4-20: Deutschland – Plateauwagen für Transferbehälter Kokillen

Der Transport der Gebinde nach Untertage erfolgt mit der Schachtförderanlage. Abbildung 4-21 zeigt für den Schachttransport von POLLUX-Behältern einen Demonstrationsversuch, bei dem 1992 das Be- und Entladen des Förderkorbes im Maßstab 1:1 erfolgreich erprobt und die Zuverlässigkeit des Systems nachgewiesen wurde.

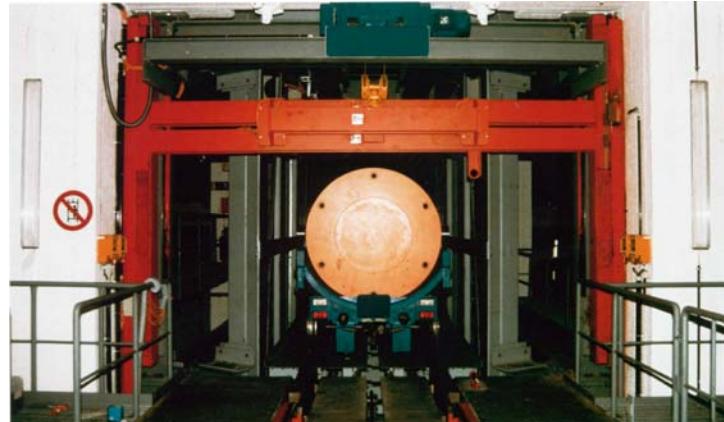


Abbildung 4-21: Deutschland – Demonstrationsversuch zum Schachttransport von POLLUX-Behältern

Den Transport der Plateauwagen zwischen Schacht und Einlagerungsfeld übernehmen batteriegetriebene Lokomotiven (s. Abbildung 4-7).

Die Einlagerungstechnik für die Strecken- und Bohrlochlagerung wurde im Kap. 4.3 vorgestellt.

4.5 Auffahrtechnik

Beim Abteufen der Schächte Gorleben wurde für das Durchfahren der oberen Deckgebirgschichten das Gefrierverfahren eingesetzt. Der Schachtausbau erfolgte nach dem Stand der Technik mit einer Stahlbetonsäule und einem verschweißten Stahlmantel, der mit Asphalt hinterfüllt wurde. Das Auffahren der bisherigen Grubenräume für das Erkundungsbergwerk erfolgte mittels gebirgsschonendem Sprengen und Einsatz von Voll- und Teilschnittmaschinen. Die Einlagerungsstrecken werden später gebirgsschonend mit Teilschnittmaschinen erstellt.

4.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Allgemeine Anforderungen an die Verfüllung des Endlagerbergwerkes und an Verschlussmaßnahmen sind in den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle des BMI von 1983 aufgeführt. Darüber hinaus gilt die Strahlenschutzverordnung und u. a. das dort ausgewiesene Minimierungsgebot, aus dem entsprechende Sicherheitsvorkehrungen abzuleiten sind. Wesentliche Anforderungen sind:

- Die Anzahl offener Einlagerungsräume ist zu minimieren, die Einlagerungshohlräume sind so rasch wie möglich zu befüllen und zu verschließen.
- Während oder nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ist der verbleibende Hohlräum in den Einlagerungsräumen mit geeignetem Versatzmaterial zu verfüllen.
- Versetzte Felder sind gegen offene Teile des Endlagerbergwerkes gegen Zutritt von Lösungen dicht abzuschließen.
- Mit Abfällen befüllte und mit Versatzmaterial verfüllte Teile der Einlagerungsfelder sowie vollständig versetzte Felder werden abgeworfen.
- Bei anderen untertägigen Hohlräumen, die abgeworfen werden, ist ebenso zu verfahren.

Bei der Verfüllung des Resthohlräumes in den Einlagerungsstrecken und -kammern sowie der übrigen Hohlräume des Grubengebäudes in einer Salzformation gelten weitere spezifische Anforderungen:

- Mechanische Stabilisierung der natürlichen geologischen Barriere Salzgestein,
- Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen (HAW, Brennelemente),
- Reduzierung des potenziellen Aufnahmevermögens für Fluide (im Störfall),
- Minimierung der radiologischen Belastung des Personals in der Betriebsphase

In Tabelle 4-4 sind ausgehend von den o. g. Kriterien und Randbedingungen im Rahmen der „Aktualisierung Konzept Endlager Gorleben“ mögliche Verfülltechniken für die einzelnen zu verfüllenden Hohlräume in Abhängigkeit von der Einlagerungstechnik zusammengefasst /4-

10/. Die endgültige Auswahl der Verfülltechniken muss im Verlauf der weiteren Planung getroffen werden.

Tabelle 4-4: Deutschland – Mögliche Verfülltechniken in einer Salzformation /4-10/

Einlagerungstechnik/ Hohlraum	Verfülltechnik		
	Blasversatz	Schleuderver- satz	Schüttversatz
Streckenlagerung POLLUX/CASTOR		X	
Streckenlagerung Großcontainer		X	
Kammerlagerung Großcontainer	X		
Bohrlochlagerung - Bohrloch			X
Bohrlochlagerung – Einlagerungsstrecke	X	X	
Kammerlagerung LAW	X	X	
Querschläge WA		X	X
Querschläge VA	X	X	X
Richtstrecken	X	X	X
Sonstige Hohlräume (z. B. Werkstätten, Abwetterstrecken, Erkundungsstrecken)	X	X	X

Abbildung 4-22 zeigt schematisch den Einsatz einer Schleudermaschine beim Versatz eines POLLUX-Behälters.

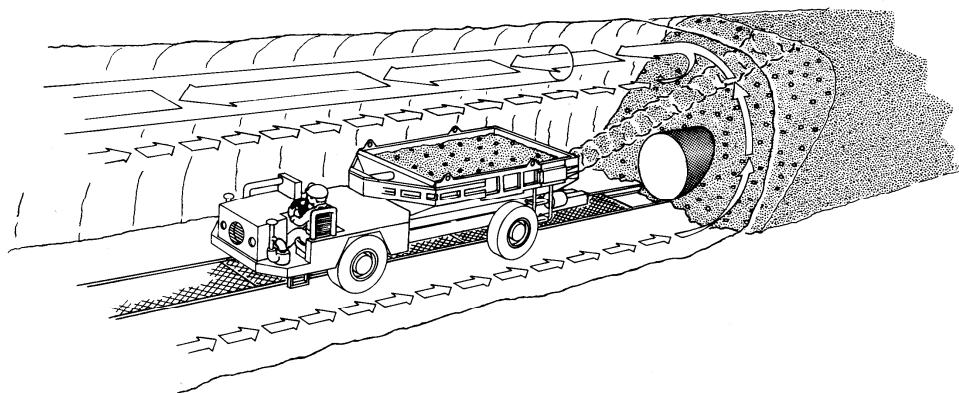


Abbildung 4-22: Deutschland – Prinzipskizze des Versatzes eingelagerter POLLUX-Behälter mit Salzgrus

Wie ein entsprechender in-situ-Versuch im Forschungsbergwerk Asse gezeigt hat /4-11/, wird bei Einsatz dieses Verfahrens durch die Kompaktierung des Salzgruses auf Grund der Konvergenz des Wirtsgesteins ein schneller Einschluss der Behälter erreicht.

Nachdem eine Einlagerungsstrecke gefüllt ist, wird diese verschlossen. Nachdem alle Einlagerungsstrecken eines Feldes gefüllt sind, wird der entsprechende Querschlag verfüllt und verschlossen und das Feld abgeworfen. Gleichermaßen werden die Richtstrecken zu beiden Seiten der abgeworfenen Einlagerungsfelder mit Salzgrus verfüllt und verschlossen.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht vor, dass nach Abschluss der Einlagerung in allen Einlagerungsfeldern die verbliebenen Grubenräume, Strecken und die Schächte verfüllt und verschlossen werden. An ausgewählten Stellen der Richtstrecken werden Verschlüsse gesetzt, um den eventuellen Zufluss von Wasser, das möglicherweise über einen undicht werdenden Schachtverschluss in der Nachbetriebsphase zu den Einlagerungsbereichen über die verfüllten Grubenbaue zufließt, zu verhindern. Prinzipskizzen der Streckenverschlüsse und des Schachtverschlusses sind auf Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 gezeigt.

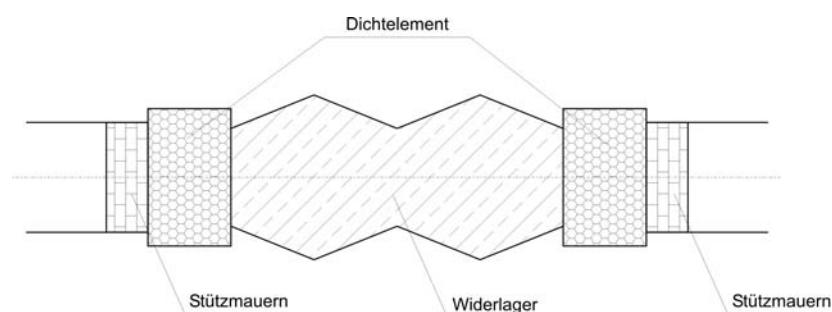


Abbildung 4-23: Deutschland – Prinzipskizze Streckenverschluss

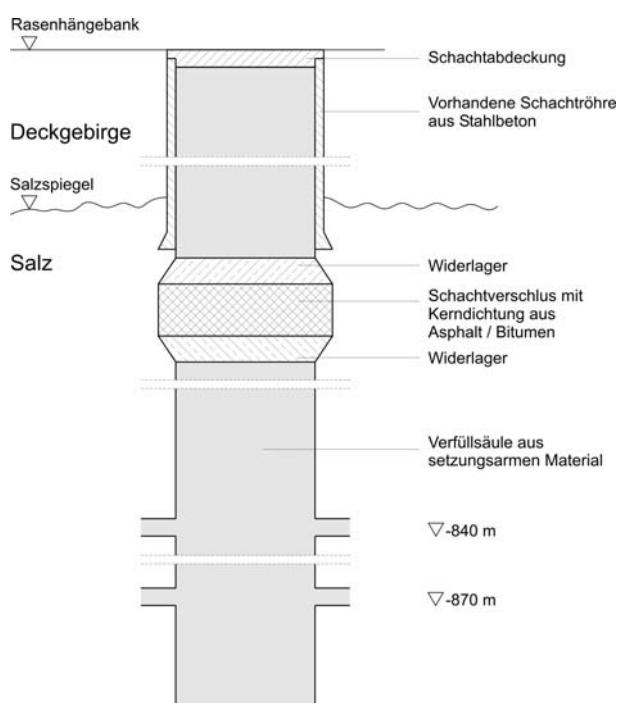


Abbildung 4-24: Deutschland – Prinzipskizze Schachtverschluss

4.7 Entwicklungsstand des Endlagerkonzeptes sowie der Einlagerungs- und Verfülltechnik

In Deutschland wurden umfangreiche wissenschaftlich-technische, konstruktive und planerische Arbeiten zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in einer Salzformation, z. T. mit Bezug zum Standort Gorleben, durchgeführt. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang das von Mitte der 80er Jahre bis 2003 durchgeführte FuE-Programm zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente, mit dem durch system-analytische Arbeiten und Demonstrationsversuche im Maßstab 1:1 die Genehmigungsreife und Zuverlässigkeit der Direkten Endlagerung nachgewiesen wurde. Das Endlagerkonzept für wärmeentwickelnde Abfälle ist letztmalig in der vom BfS in Auftrag gegebenen Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben 1998 /4-10/ aktualisiert worden. Im Zusammenhang mit dem im Oktober 2000 verfügten Moratorium zur Erkundung des bereits 1977 am Ende eines umfangreichen technisch-wissenschaftlichen Auswahlverfahrens festgelegten Salzstocks in Gorleben hat das BfS 12 konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen vor einer eventuellen Wiederaufnahme der Erkundung im Salzstock Gorleben klären lassen. Mit dem Synthesebericht des BfS /4-12/ liegen alle Ergebnisse dazu seit November 2005 vor. Damit besteht eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für weitere Entscheidungen zur Fortführung der Erkundungsarbeiten und zur Endlagerplanung. Die notwendige politische Entscheidung ist bisher nicht getroffen worden. Mit der letztinstanzlichen gesetzlichen Entscheidung zum Planfeststellungsbeschluss für das Endlager Konrad im Frühjahr 2007 herrscht Klarheit dahingehend, dass es getrennte Endlager für wärmeentwickelnde und nicht-wärmeentwickelnde Abfälle geben wird. Konrad ist für letzteres geplant.

Die Endlagerbehälter für die wärmeentwickelnden Abfälle sind bereits zum jetzigen Zeitpunkt existent. Für den POLLUX-Behälter erfolgte bereits die Ausführungsplanung bis zur Reife der Antragstellung für das verkehrsrechtliche Zulassungsverfahren und das atomrechtliche Genehmigungsverfahren. Darüber hinaus wurde vom POLLUX-Behälter ein Dummy für Handhabungsversuche gefertigt. Für die Brennstabkokille BSK 3 liegt die Entwurfsplanung vor. Für Demonstrationsversuche wurde ebenfalls ein Dummy im Maßstab 1:1 gefertigt. Die CASTOR-Behälter des Typs AVR/THT und MTR sind ebenfalls existent. Der Einsatz des CASTOR KNK steht unmittelbar bevor.

Der Prototyp einer Anlage zur Verpackung der ausgedienten BE in endlagerfähige Behälter (Pilotkonditionierungsanlage) ist am Standort Gorleben bereits errichtet worden und genehmigt.

Ein Konzept für die untertägige Transport- und Einlagerungstechnik der vorgenannten Endlagerbehälter liegt vor. Die zuverlässige Funktionsweise dieser Technik für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern wurde 1993 im Rahmen von übertägigen Demonstrationsversuchen nachgewiesen. Mit dem Artikelgesetz von 1994 wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass dafür der Stand der Technik erreicht worden war.

Das Konzept für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen liegt vor. Für die Technik der Bohrlochlagerung von BSK wird derzeit ein Demonstrationsversuch vorbereitet. Damit soll ähnlich wie bei den Versuchen mit POLLUX-Behältern die Genehmigungsreife und Zuverläss-

sigkeit dieser Transport- und Einlagerungstechnik nachgewiesen werden. Abschließende Ergebnisse werden dazu im 1. Halbjahr 2009 erwartet.

4.8 Aufwand- und Kostenbewertung

Eine detaillierte Bewertung der Kosten für die Errichtung eines Endlagers am Standort Gorleben ist 1998 in /4-10/ vorgenommen worden. Danach belaufen sich die Kosten für die Errichtung des Endlagers auf ca. 630 Mill. €. Einschließlich der Kosten für Forschung und Entwicklung, untertägige Erkundung, Genehmigungsverfahren, Betrieb und Stilllegung sowie Verschluss des Endlagers wurden die Gesamtkosten auf ca. 6 Mrd. € abgeschätzt.

5 Zusammenfassung

Der Entwicklungsstand der Endlagerprojekte für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist in den betrachteten Ländern sehr unterschiedlich. Der erzielte Stand reicht von der Erarbeitung konzeptioneller Pläne über umfangreiche geologische, hydrogeologische, seismische u. ä. Erkundungen bis hin zu terminlichen Festlegungen, bis wann Untertagelabors und schließlich Endlager betriebsbereit sein sollen. Zum Teil sind bereits Endlagerstandorte ausgewählt und Arbeiten zur Errichtung angelaufen.

Die Auswahl des Wirtsgesteins und von Standorten trägt im hohen Maße den nationalen territorialen, geologischen und sozialen Gegebenheiten Rechnung. Die Übertragung der für andere Länder entwickelten Konzepte und Vorgehensweisen auf Deutschland ist deshalb nur begrenzt möglich.

In Schweden und Finnland ist Granitgestein die bevorzugte Wirtsgesteinsformation. Grund dafür ist das verbreitete Vorkommen dieser Gesteinsart bzw. der Mangel an anderen geeigneten Formationen in diesen Ländern. Die Gesteinsformationen sind an den ausgewählten Standorten in beiden Ländern durch Störungszonen (Risse, Brüche) gekennzeichnet. Damit kann der geologischen Barriere auf Dauer keine hohe Schutzfunktion zuerkannt werden und es ist mit Wasserzutritt in die Einlagerungsbereiche bereits nach relativ kurzen Zeiträumen zu rechnen. Das schwedischen KBS-3-Konzept (ausschließlich direkte Endlagerung ausgedienter BE), dem auch weitestgehend das finnische Endlagerkonzept folgt, sieht deshalb als die entscheidende technische Barriere den Einsatz von kupferummantelten Endlagerbehältern mit einer Standzeit von mindestens 100 000 Jahren vor. Des Weiteren werden Puffermaterialien sowie Verfüllungen und Verschlüsse als geotechnische Barrieren vorgesehen. Bentonit wird dazu für eine allseitige Verkleidung der Endlagerbehälter eingesetzt und hat eine Abdichtwirkung zu erfüllen. Um die Barrierenwirksamkeit des Bentonits zu erhalten, muss die begrenzende Temperatur von <100 °C im Nahbereich der Abfälle eingehalten werden. Die genannte Temperaturbegrenzung wird durch entsprechend lange Zwischenlagerung der ausgedienten Brennelemente, Auswahl der Behälterbeladung und Auslegung der Endlagerfelder abgesichert. Eine Übertragung dieses Konzepts auf deutsche Bedingungen wäre prinzipiell denkbar. Da nach Aussagen der BGR /5-1/ in Deutschland Magmatitformationen mit hinreichenden Endlagereigenschaften nicht in ausreichender Größe bzw. z. T. in erdbebengefährdeten Regionen vorkommen, wird ein solches Endlagerkonzept nicht weiter verfolgt.

In Belgien, Frankreich und der Schweiz werden Untersuchungen zur Eignung von Tongestein als Endlagerwirtsgestein durchgeführt. Während in Frankreich und in der Schweiz Tonstein als Wirtsgestein zur Verfügung steht, wird in Belgien der sogenannte Boom-Clay, ein plastischer Ton, auf seine Eignung untersucht. Da auch in Tongesteinsformationen der Zutritt von Grundwasser in die Einlagerungsbereiche nicht auf Dauer ausgeschlossen werden kann, sind ebenfalls die technischen und geotechnischen Barrieren von großer Bedeutung. In den Konzepten der drei genannten Länder soll die Isolation der Abfälle vor eindringendem Wasser hauptsächlich durch Puffer- und Verfüllmaterialien aus Ton – insbesondere aus quellfähigem Tonmaterial (Bentonit) – erreicht werden. Hierbei ist die gleiche Temperaturrestriktion von 100 °C wie bei dem Bentoniteinsatz in Granit zu berücksichtigen.

Eine Übertragung der Konzepte auf deutsche Verhältnisse wäre prinzipiell möglich, da nach Feststellung der BGR /5-2/ geeignete Tonformationen in Deutschland vorhanden sind. Dabei sind allerdings die Unterschiede in der thermischen Endlagerauslegung im Vergleich mit dem aktuellen Endlagerkonzept Gorleben zu beachten. Im Salz kann eine Grenztemperatur an der Kontaktgrenze Behälter-Wirtsgestein von 200 °C angesetzt werden. Die Verringerung der Grenztemperatur auf 100 °C bei einem Konzept in Tongestein würde eine starke Reduzierung der Wärmeleistung der Gebinde erfordern. Dazu muss entweder die Zwischenlagerzeit der ausgedienten Brennelemente erhöht oder die Beladung der Behälter im Vergleich zum Endlagerkonzept Gorleben verringert werden. Entsprechende Untersuchungen /5-3/ haben gezeigt, dass außerdem konzeptionelle Änderungen der Endlagerauslegung, wie Vergrößerung der Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken, erforderlich wären, und der Flächebedarf für die Einlagerung um ca. den Faktor 5 im Vergleich zur Endlagerung in einer Salzformation ansteigen würde. Im Rahmen eines FuE-Vorhabens werden derzeit die konkreten Randbedingungen für eine Endlagerauslegung in einer Tonformation untersucht und Abweichungen gegenüber dem Endlagerkonzept Gorleben beschrieben.

Die Endlagerkonzepte sind in allen o. g. Ländern noch nicht endgültig festgelegt und erfordern weitergehende Untersuchungen. Noch notwendige Untersuchungen zum Endlagerkonzept betreffen vor allem die Bewertung der Barrierenwirkung sowie die Wechselwirkung der technischen und natürlichen Barrieren.

In Schweden und Finnland werden noch verschiedene Varianten der Einlagerung, des Transportes und der Verfüll- und Verschlusstechnik untersucht. Umfangreiche Untersuchungen wurden und werden zu den Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente durchgeführt. Versuchsmuster der Endlagerbehälter und anderer Endlagerkomponenten, wie Einlagerungsmaschinen für die vertikale und horizontale Einlagerung, Bentonitverfüllungen u. a. wurden gefertigt und werden getestet. Im URL Äspö werden u. a. umfangreiche Arbeiten zur Erkundung mechanischer Gesteinseigenschaften, Homogenität größerer Gebirgsbereiche, Klüftigkeit des Granits und zur Auflockerung des Gebirges im Bereich neu aufgefahrener Strecken durchgeführt. Des Weiteren werden Versuche zur Erprobung der Einlagerungstechnik sowie zum Bentonit als Puffer- und Verfüllmaterial durchgeführt bzw. sind vorgesehen. Im Behälterlabor Oskarshamn werden Verfahren zum Verschweißen der Kupferbehälter, Technologien für das Beladen der Behälter mit Brennelementen u. a. untersucht.

In Frankreich werden im Rahmen umfangreicher FuE-Arbeiten Untersuchungen insbesondere zur Auslegung des Endlagers sowie zum Transport und zur Einlagerung von Endlagerbehältern und Puffermaterial durchgeführt bzw. sind vorgesehen. Im Untertagelabor Bure werden Versuche bezüglich der Verfüllung von Strecken durchgeführt. Die Untersuchungen zum Endlagerkonzept betreffen vor allem die Bewertung der Barrierenwirkung sowie die Wechselwirkung der technischen und natürlichen Barrieren. Muster für die Bentonitverkleidung von Endlagerzellen wurden gefertigt. Bezuglich der Transporttechnologien wurden Untersuchungen zu verschiedenen Methoden durchgeführt. Endgültige Lösungen sind noch nicht fixiert worden. Materialuntersuchungen wurden und werden durchgeführt, um die geeigneten Materialien für Behälter, Einbauten und Verschlüsse der Endlagerzellen etc.

auszuwählen. Die Entwicklung der Einlagerungstechnik steht noch am Anfang. Versuchsmuster von Endlagercontainern wurden gefertigt, hauptsächlich bezüglich der Untersuchung der Fertigungstechnologie. Für das weitere Forschungs- und Entwicklungsprogramm werden Untersuchungen von maßstabgetreuen Mustern von Endlagerkomponenten für erforderlich gehalten. Das soll die Errichtung von Muster-Endlagerzellen einschließen. Eine Vielzahl von Endlagerkomponenten ist unter Zugrundelegung von einfachen und konservativen Modellen entworfen wurden, die weiter vervollkommen und besser quantifiziert werden müssen, um vorhandene Unsicherheiten abzubauen.

Das belgische Endlagerkonzept wurde in den letzten Jahren verändert und aktuell der Einsatz eines Supercontainers vorgesehen. Dieses neue Konzept erfordert erhebliche Veränderungen insbesondere bzgl. des Transport- und Einlagerungskonzeptes gegenüber dem früheren SAFIR-2-Konzept. Zu allen Komponenten sind noch umfangreiche sicherheitstechnische und Machbarkeitsuntersuchungen erforderlich, die hauptsächlich folgende Komponenten betreffen:

- Overpack
- Supercontainer
- Transportsystem für Supercontainer
- Transportwagen und Gabelstapler für Transport und Handhabung von HAW-Overpacks
- Kippanlage für Bohrlocheinlagerung.

Weitere Untersuchungen zum Supercontainer werden durchgeführt bzw. sind vorgesehen, wie u. a.:

- Weitere Untersuchungen zum Korrosionsverhalten
- Untersuchungen zur Zusammensetzung des Buffermaterials sowie zum Material des Mantels
- Bestimmung der Kenndaten des Bufferbetons
- Erhitzungstest des Supercontainers
- Rissmodellierung des Buffers
- Erprobung von Fertigungstechnologien für den Supercontainer.

Zur Verfüll- und Verschlusstechnik wurden und werden umfangreiche Studien und Versuche durchgeführt, die sowohl die Auswahl des Verfüllmaterials und Untersuchung seiner Kenndaten als auch die Verfüll- und Verschlusstechniken betreffen. Zur Auswahl des Verfüllmaterials wurden Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität und zum Schwelldruck durchgeführt. Die Fertigung der Blöcke im industriellen Maßstab wurde erprobt.

In der Schweiz wurden bisher im wesentlichen nur konzeptionelle Untersuchungen zum Einlagerungskonzept sowie zur Einlagerungs- und Verfülltechnik durchgeführt. Praktische

Erfahrungen zur Einlagerungstechnologie und zur Verfüll- und Verschlusstechnologie stehen noch aus.

In Deutschland wurde vor Beginn der ersten Endlagerplanungen Salz als Wirtsgestein favorisiert. Die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit, das Kriechverhalten und damit das Isolationspotenzial sowie die mehr als 100-jährigen Erfahrungen im Salzbergbau waren die entscheidenden Gründe dafür. Forschung und Endlagerplanungen wurden seit Mitte der 60er Jahre dazu zielgerichtet durchgeführt. Mit der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ liegen in Deutschland seit 1998 Planungen in Vorkonzepttiefen vor, die für Steinsalz in keinem weiteren Land auf vergleichbarer Detaillierungsstufe existieren. Darin sind auch die Ergebnisse der erfolgreich durchgeführten Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente berücksichtigt. Das Konzept unterscheidet sich von denen in Magmatit und in Ton wesentlich hinsichtlich der vorrangigen Barrierenfunktion des Wirtsgesteins und damit auch deutlich hinsichtlich der Auslegung technischer und geotechnischer Barrieren. Für Steinsalz kann auf Grund seiner isolierenden Eigenschaften auch für Zeiträume, in denen die technischen und geotechnischen Barrieren nicht mehr wirksam sein müssen, ein Langzeitsicherheitsnachweis geführt werden.

Durch ein umfangreiches Forschungs- und Entwicklungsprogramm wurde die technische Machbarkeit der direkten Endlagerung ausgedienter BE sowohl durch systematische Arbeiten planerisch nachgewiesen als auch durch eine Reihe von Demonstrationsversuchen im Maßstab 1:1 erprobt. Im Artikelgesetz von 1994 wurde diesem neuen erreichten Stand der Technik Rechnung getragen.

Im Zusammenhang mit dem von der Bundesregierung im Oktober 2000 verfügten Moratorium zur Erkundung des Endlagerstandortes Gorleben hat das BfS 12 konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen vor einer eventuellen Wiederaufnahme der Erkundung im Salzstock Gorleben aufgeworfen. Mit dem Synthesebericht des BfS /5-4/ liegen dazu alle Ergebnisse seit November 2005 vor. Damit besteht eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für weitere Entscheidungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland, die auf politischer Ebene zu treffen sind.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Übersicht über internationale Konzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bzgl. der Auswahl des Wirtsgesteins	7
Tabelle 2-1:	Schweden – Angaben zu Endlagerbehältern für ausgediente BE /2-6/	12
Tabelle 2-2:	Finnland – Daten der Endlagerbehälter /2-23/	25
Tabelle 3-1:	Belgien Konzept SAFIR-2 – Vorgesehenes radioaktives Abfallinventar eines Endlagers in Ton /2-3/	38
Tabelle 3-2:	Belgien – Abgeschätztes Inventar an endzulagernden HAW und BE (Supercontainerkonzept)	39
Tabelle 3-3:	Belgien – Brennelementdaten /3-3/	41
Tabelle 3-4:	Belgien – Angaben zu Endlagerbehältern (Supercontainern) für HAW-Kokillen und ausgediente Brennelemente /3-8/, /3-9/	42
Tabelle 3-5:	Belgien – Kostenabschätzung für ein Endlager im Boom-Ton (Preise, Stand 2000) /3-4/	58
Tabelle 3-6:	Frankreich – HAW-Endlagerinventar /3-21/, /3-23/	60
Tabelle 3-7:	Frankreich – Primärbehälter für verglaste Abfälle /3-25/	61
Tabelle 3-8:	Frankreich – Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle /3-25/	62
Tabelle 3-9:	Frankreich – Restwärmementwicklung und Zwischenlagerungszeiten der Primärbehälter mit verglasten Abfällen /3-25/	63
Tabelle 3-10:	Frankreich – Abmessungen und Masse der gefüllten HAW-Endlagerbehälter für verglaste Abfälle /3-25/	64
Tabelle 3-11:	Frankreich – Primärbehältertypen für ausgediente Brennelemente /3-25/	64
Tabelle 3-12:	Kosten des französischen Endlagersystems (nach /3-31/)	86
Tabelle 3-13:	Schweiz – Endlagerinventar	87
Tabelle 3-14:	Schweiz – Angaben zu Endlagerbehältern für HAW-Kokillen und ausgediente BE, Schweiz /3-34/	89
Tabelle 4-1:	Mengengerüst der hochradioaktiven wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle /4-5/	102
Tabelle 4-2:	Deutschland – Daten typischer Endlagerbehälter /4-6/	103
Tabelle 4-3:	Deutschland – Kenndaten von Gebinden mit wärmeentwickelnden Abfällen /4-9/	108
Tabelle 4-4:	Deutschland – Mögliche Verfülltechniken in einer Salzformation /4-10/	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schweden – Grundkonzept der Entsorgung radioaktiver Abfälle /2-1/	9
Abbildung 2-2:	Schweden – Varianten von kupferummantelten Containern für ausgediente Brennelemente /2-6/	11
Abbildung 2-3:	Schweden – Endlagerbehälter für ausgediente BE, Abmessungen in mm, (BWR = SWR und PWR = DWR) /2-8/, /2-9/	11
Abbildung 2-4:	Schweden – Wärmeleistung eines Gebindes mit SKB-Referenzbrennelementen SVEA 96 mit einem Abbrand von 38 MW d/kg U /2-7/	12
Abbildung 2-5:	Schweden – Aufbau eines Supercontainers /2-10/	13
Abbildung 2-6:	Schweden – Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente	14
Abbildung 2-7:	Schweden – Endlagerlayout /2-15/	15
Abbildung 2-8:	Schweden – Fertigung von Bentonittringen /2-18/	15
Abbildung 2-9:	Schweden – Bohrloch-Einlagerungsmaschine	16
Abbildung 2-10:	Schweden – Geologisches Endlager nach dem KBS-3V-Konzept /2-16/	16
Abbildung 2-11:	Schweden – Ablauf der Einlagerung in vertikale Bohrlöcher /2-15/	17
Abbildung 2-12:	Schweden – horizontale Einlagerung von Supercontainern (KBS-3H-Konzept) /2-18/	17
Abbildung 2-13:	Schweden – KBS-3V-Konzept - Einlagerungsmaschine und Platzierung eines Containers	18
Abbildung 2-14:	Schweden – KBS-3V-Konzept; Einlagerungsmaschine im URL Äspö /2-18/	19
Abbildung 2-15:	Schweden – KBS-3H-Konzept; Prinzip des Wasserkissentransports /2-18/	19
Abbildung 2-16:	Schweden – KBS-3H-Konzept; Einlagerungsmaschine im URL-Äspö /2-18/	20
Abbildung 2-17:	Schweden – Ablauf der Arbeiten zur Errichtung eines geologischen Endlagers /2-15/	22
Abbildung 2-18:	Finnland – Varianten von kupferummantelten Behältern für ausgediente Brennelemente /2-23/	24
Abbildung 2-19:	Finnland – Schnitt durch die Innenbehälter für BE der WWER-440- und EPR-Typen /2-23/	25
Abbildung 2-20:	Finnland – Temperaturrentwicklung bei der Einlagerung eines einzelnen EPR-BE-Behälters /2-24/	26
Abbildung 2-21:	Finnland – Temperaturfeld eines Endlagerfeldes mit EPR-BE-Behältern 70 Jahre nach Einlagerung /2-25/ bei einem Containerabstand sowie Streckenabstand von 8 m bzw. 25 m (a) und 8 m bzw. 40 m (b)	26

Abbildung 2-22: Finnland – KBS-3-Konzept - Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente /2-22/	27
Abbildung 2-23: Finnland – Endlager Olkiluoto -Schematisches Layout /2-22/	28
Abbildung 2-24: Finnland – Lage der Endlagerfelder in einer Teufe von 420 m /2-25/	29
Abbildung 2-25: Finnland – Einlagerungsmaschine für BE-Behälter /2-26/	29
Abbildung 2-26: Finnland – Schnitt einer verfüllten Einlagerungsbohrung /2-22/	30
Abbildung 2-27: Finnland – 3,5 m Bohrkrone /2-27/	31
Abbildung 2-28: Finnland – Verschluss der Einlagerungsstrecken /2-22/	32
Abbildung 2-29: Finnland – Fertigung von BE-Endlagerbehältern /2-27/	33
Abbildung 2-30: Finnland – SWR-BE-Behälter nach zerstörendem Drucktest /2-22/	33
Abbildung 2-31: Finnland – Ablauf der Arbeiten zur Erstellung des Sicherheitsberichtes für das Endlager Olkiluoto /2-22/	34
Abbildung 2-32: Finnland – Ablauf der Arbeiten zur Errichtung eines geologischen Endlagers /2-27/	34
Abbildung 3-1: Belgien – Schematischer Schnitt eines Supercontainers /3-5/	41
Abbildung 3-2: Belgien – Endlagerlayout /3-3/	45
Abbildung 3-3: Belgien – Querschnitt der Streckenlagerung (Supercontainer) für HAW /3-3/	46
Abbildung 3-4: Belgien – Streckenlagerung Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (Supercontainer-Konzept) /3-3/	46
Abbildung 3-5: Belgien – Streckenlagerung von BE-Endlagerbehältern (Supercontainer-Konzept) /3-3/	47
Abbildung 3-6: Belgien – Streckenlagerung von BE-Endlagerbehältern (Supercontainer-Konzept) /3-3/	47
Abbildung 3-7: Belgien – Bohrlochlagerung von Overpacks mit HAW /3-5/	48
Abbildung 3-8: Belgien – Einlagerung von Overpacks in Hülsen (Sleeve design) /3-5/	49
Abbildung 3-9: Untertagelabor HADES – Schnitt Schacht 2 /3-13/	51
Abbildung 3-10: Untertagelabor HADES – Vollschnittmaschine zum Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /3-13/	51
Abbildung 3-11: Keilblocksystem für den Streckenausbau /3-13/	52
Abbildung 3-12: Belgien – Abschnittsweise Verfüllung der Einlagerungsstrecken	53
Abbildung 3-13: Belgien – Verfüllung einer Einlagerungsstrecke nach Einlagerung aller Behälter	53
Abbildung 3-14: Belgien – In-situ-PRACTAY-Experiment /3-18/	55
Abbildung 3-15: Frankreich – 175 l - Primärbehälter für verglaste HAW (Links - C0.2, C1 bis C4, rechts - C0.3) /3-26/	62

Abbildung 3-16: Frankreich – Typischer Endlagercontainer für verglaste HAW /3-27/	63
Abbildung 3-17: Frankreich – BE-Endlagerbehälter für vier Uranoxid-BE /3-25/	66
Abbildung 3-18: Frankreich – Schnitt eines BE-Endlagerbehälters für vier Uranoxid-BE mit (rechts) und ohne Primärbehälter (links) /3-25/	66
Abbildung 3-19: Frankreich – BE-Endlagerbehälter für ein MOX- oder ein Uranoxid-BE /3-25/	67
Abbildung 3-20: Frankreich – Temperaturverlauf für HAW-Endlagerbehälter /3-25/	68
Abbildung 3-21: Frankreich - Temperaturverlauf für BE-Endlagerbehälter /3-25/	69
Abbildung 3-22: Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers /3-26/	70
Abbildung 3-23: Einlagerungszelle für verglasten HAW /3-25/	71
Abbildung 3-24: Frankreich – Endlagerzelle für verglaste HAW. Oben – in Betrieb, Unten - Versiegelte Zelle /3-25/	72
Abbildung 3-25: Frankreich – Endlagerzelle für ausgedienten Kernbrennstoff /3-23/	73
Abbildung 3-26: Frankreich – Schnitt einer Endlagerzelle für ausgediente BE /3-25/	74
Abbildung 3-27: Frankreich – Transferbehälter für HAW-Gebinde (C-Typ), LILW-Gebinde (B-Typ) und für BE-Gebinde (CU-Typ) /3-25/	75
Abbildung 3-28: Frankreich – Einlagerungssequenzen für HAW/BE-Gebinde /3-26/	76
Abbildung 3-29: Frankreich – Transport und Einlagerung eines HAW-Gebindes /3-26/	77
Abbildung 3-30: Frankreich – Varianten des Einbringens der Gebinde in die Endlagerzelle /3-25/	77
Abbildung 3-31: Frankreich – Gebindetransport bei Verwerfungen in der Endlagerzelle /3-26/	78
Abbildung 3-32: Frankreich – Funktionsweise eines Schieberoboters /3-25/	79
Abbildung 3-33: Frankreich – Bentonittringpaket /3-26/	80
Abbildung 3-34: Frankreich – Schematischer Aufbau einer Endlagerzelle für ausgediente BE /3-25/	81
Abbildung 3-35: Frankreich – Streckenverschluss /3-25/	82
Abbildung 3-36: Frankreich – Schachtverschluss /3-25/	83
Abbildung 3-37: Frankreich – Versuche zur Streckenverfüllung im ULR Bure Meuse/Haute-Marne /3-30/	84
Abbildung 3-38: Frankreich – BE-Endlagerbehälter (links Endlagerung mit Primärbehälter, rechts – ohne)	84
Abbildung 3-39: Schweiz – Endlagerbehälter für HAW-Kokillen /3-34/	88
Abbildung 3-40: Schweiz – BE-Endlagerbehälter /3-34/	88
Abbildung 3-41: Schweiz – Schematische Darstellung der Schlüsselelemente des Konzepts zur kontrollierten geologischen Langzeitlagerung gemäß	

EKRA /3-32/	90
Abbildung 3-42: Schweiz – Hauptkomponenten und Auslegung des Endlagers für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle /3-41/	90
Abbildung 3-43: Querschnitt einer Errichtungsstrecke /3-42/	92
Abbildung 3-44: Schweiz – Layout der untertägigen Anlagen eines geologischen Tiefenlagers für BE, HAW und LMA /3-41/	93
Abbildung 3-45: Schweiz – Einlagerung von BE/HAW in Einlagerungsstrecken (Abmessungen in m) /3-41/	94
Abbildung 3-46: Schweiz – Einfahren eines BE-Behälters mit Bentonitaufboden: Einfahren im Bild links; bereit zum Einbringen der Verfüllung (Bentonitgranulat) im Bild rechts (Modelfoto) /3-41/	94
Abbildung 3-47: Schweiz – Einbringen der Granulatverfüllung nach dem Positionieren des BE-Behälters (schematisch) /3-41/	95
Abbildung 3-48: Schweiz – Umsetzgerät für BE/HAW-Behälter – Seitenansicht und Ansicht in der Schleuse BE/HAW (Abmessungen in m) /3-41/	96
Abbildung 3-49: Schweiz – Einlagerungstrolley – Seitenansicht und Schnitt durch einen Einlagerungsstollen BE/HAW (Abmessungen in m) /3-41/	96
Abbildung 3-50: Schweiz – Geplantes Vorgehen zur Errichtung eines Endlagers für HAW und ausgediente Brennelemente /3-41/	100
Abbildung 4-1: Deutschland – HAW-Kokille (links) und CSD-C (rechts)	104
Abbildung 4-2: Deutschland – POLLUX-Behälter	105
Abbildung 4-3: Deutschland – Brennstabkokille (BSK)	106
Abbildung 4-4: Deutschland – CASTOR AVR/THTR	107
Abbildung 4-5: Deutschland – CASTOR MTR 2	108
Abbildung 4-6: Deutschland – Gorleben Layout der geplanten Einlagerungsfelder	109
Abbildung 4-7: Deutschland – Skizze der Batterie-Grubenlokomotive	109
Abbildung 4-8: Deutschland – Querschnitt durch die POLLUX-Einlagerungsstrecke	110
Abbildung 4-9: Deutschland – Demonstrationsstand im Maßstab 1:1 mit einer Einlagerungsmaschine für die Streckenlagerung	111
Abbildung 4-10: Deutschland – Gorleben Schema der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern	112
Abbildung 4-11: TSS Versuch – Gemessener Temperaturverlauf an der Behälteroberfläche /4-11/	113
Abbildung 4-12: Deutschland – Entwurf eines Querschnitts durch eine HAW-Kokillen-Einlagerungsstrecke	114
Abbildung 4-13: Deutschland – Systemzeichnung der Einlagerungstechnik für die	

Bohrlochlagerung von Endlagergebinden (Maßangaben in mm)	114
Abbildung 4-14: Deutschland – Versuchsanlage zur Demonstration der Einlagerung von BSK 3 bzw. HAW-Kokillen	115
Abbildung 4-15: Deutschland – Einlagerung von BSK bzw. HAW-Kokillen in geneigte Kurzbohrlöcher	115
Abbildung 4-16: Deutschland – Ablaufschema bei der Bohrlocheinlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen	116
Abbildung 4-17: Deutschland – Skizze eines Plateauwagens mit POLLUX-Behälter	117
Abbildung 4-18: Deutschland – Foto eines Plateauwagens mit POLLUX-Versuchsbehälter in einem Versuchsstand	117
Abbildung 4-19: Deutschland – BSK-Transferbehälter	117
Abbildung 4-20: Deutschland – Plateauwagen für Transferbehälter Kokillen	118
Abbildung 4-21: Deutschland – Demonstrationsversuch zum Schachttransport von POLLUX-Behältern	118
Abbildung 4-22: Deutschland – Prinzipskizze des Versatzes eingelagerter POLLUX-Behälter mit Salzgrus	120
Abbildung 4-23: Deutschland – Prinzipskizze Streckenverschluss	121
Abbildung 4-24: Deutschland – Prinzipskizze Schachtverschluss	121

Abkürzungsverzeichnis

ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Nationale Gesellschaft für die Behandlung radioaktiver Abfälle, Frankreich).
A-Waste	Abfallkategorie für schwach radioaktive und kurzlebige Abfällen, geeignet für oberflächennaheendlagerung (Belgien, Frankreich)
Babcock Noell	Babcock Noell GmbH, Würzburg
BACCHUS	A Validation Experiment for Hydromechanical Models for Unsaturated Soils (Mol, Belgien)
BE	Brennelement
Belgoprocess	Tochtergesellschaft von ONDRAF/NIRAS, zuständig für die Behandlung radioaktiver Abfälle (Dessel, Belgien)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Deutschland)
BSK	Brennstabkokille
B-Waste	Abfallkategorie für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die weder der Kategorie „A-Waste“ noch der Kategorie „C-Waste“ zurechnen sind (Belgien, Frankreich)
CANDU	CAN ada D euterium U ranium; kanadischer Schwerwasserreaktor
COGEMA	General Company for Nuclear Substances (Compagnie Générale des Matières Nucléaires) (Vélizy, Frankreich)
CORA	Commission on radioactive waste disposal (Niederlande)
CSD-B	Conteneur Standard Déchets Boue (Standardcontainer für verglaste Abfälle)
CSD-C	Conteneur Standard Déchets Compactés (Standardcontainer für kompaktierte Abfälle)
CSD-V	Conteneur Standard Déchets Vitrifiés (Standardcontainer für verglaste Abfälle)
C-Waste	Abfallkategorie für wärmeentwickelnde Abfälle mit einer Wärmeleistung > 20 W/m ³ (Belgien, Frankreich)
DWR	Druckwasserreaktor
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (Spanien)
EPR	Europäischer Druckwasser-Reaktor

EU	Europäische Union
HADES	High-Activity Disposal Experimental Site (Untertagelabor von SCK•CEN im Boom Clay in Mol, Belgien)
HAW	Hochradioaktiver Abfall aus der Wiederaufarbeitung
IAEA	International Atomic Energy Agency
ILW-LL	Mittelradioaktiver langlebiger Abfall
KBS-3	Schwedisches Endlagerkonzept
KBS-3-H	Schwedisches Endlagerkonzept für horizontale Behälterlagerung
KBS-3-V	Schwedisches Endlagerkonzept für vertikale Behälterlagerung
KKW	Kernkraftwerk
LILW-LL	Schwach- und mittelradioaktiver Abfall, langlebig
LILW-SL	Schwach- und mittelradioaktiver Abfall, kurzlebig
LMA	Leicht- und mittelradioaktiver Abfall
MOX	Mischoxid-Brennstoff ($UO_2 - PuO_2$)
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NDA	Nuclear Decommissioning Authority (Großbritannien)
NIREX	United Kingdom Nirex Ltd. (Großbritannien)
NWMO	Nuclear Waste Management Organisation (Kanada)
OECD/NEA	Organisation for Economic Cooperation and Development / Nuclear Energy Agency (Paris, Frankreich)
ONDRAF/NIRAS	Organisme National pour les Déchets Radioactifs et les Matières Fissiles Enrichies/ Nationale Instelling voor Radioactieve Afval en verrijkte Splijtstoffen (Gesellschaft für die Behandlung radioaktiver Abfälle und Kernbrennstoffe, Belgien)
ONKALO	Untertagelabor (Finnland)
PAMELA	Pilotanlage Mol zur Erzeugung lagerfähiger Abfälle (Belgoprocess, Belgien)
POLLUX	Abgeschirmter Behälter für die Endlagerung gezogener Kernbrennstäbe (Deutschland)
RESEAL	Large-Scale In Situ Demonstration Test for Repository Sealing in an Argillaceous Host Rock (European project)

SAFIR 2	Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2 (Belgien)
SKB	Schwedische Kernbrennstoff- und Abfallmanagement Co.
SKI	Schwedische Kernenergiebehörde
SSI	Schwedische Strahlenschutzbehörde
STUK	Finnische Nuklear- und Strahlenschutzbehörde
SWR	Siedewasserreaktor
TRU	Transuran-Abfälle (USA)
tSM	Tonnen Schwermetall
USA	United States of America
WA	Wiederaufarbeitung
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant; Endlager der USA für TRU-Abfälle, nahe Carlsbad, New Mexico
WWER	Druckwasserreaktor russischer Bauart

Literaturverzeichnis

- /2-1/ SKB R&D-Programme 89. Handling and final disposal of nuclear waste. Programme for research, development and other measures. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management company, September 1989
- /2-2/ Sweden's second national report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; Ds 2005:44; 2005
- /2-3/ [National Board 1990] Evaluation of SKB R&D Programme 89. The National Board for Spent Nuclear Fuel, Dnr 93/89, March 1990.
- /2-4/ Grupa J. Et al., Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final report. Nuclear Science and Technology, Euratom, European Commission EUR 19145 EN
- /2-5/ Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB Technical Report, TR-01-03.
- /2-6/ Deep repository for spent nuclear fuel. SR-97 -Post closure safety.
Main report Volume I and Volume II. SKB TR-99-06, November 1999
- /2-7/ Wiborgh M. (editor). Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. SKB Technical Report, TR-99-28.
- /2-8/ Workshop on Design and Assessment of Radioactive Waste Packages, 5-6th October 2005 at Joint Research Centre, Institute for Energy, Petten, The Netherlands; Design, manufacturing, closure, non-destructive inspection and long term durability of radioactive waste packages, Hannu Hänninen, Helsinki University of Technology Laboratory of Engineering Materials, Finland
- /2-9/ Workshop on Design and Assessment of Radioactive Waste Packages, 5-6th October 2005 at Joint Research Centre, Institute for Energy, Petten, The Netherlands; Design Criteria for the canister for geological disposal of the Swedish spent nuclear fuel, Lars Werme, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Sweden
- /2-10/ Pettersson S. et al. Research, development and demonstration programme for a KBS-3 repository with horizontal emplacement. SKB Report R-01-55
- /2-11/ Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB Technical Report, TR 93-04. 1
- /2-12/ Autio J, Saunio T, Tolppanen P, Raiko H, Vieno T and Salo J-P. Assessment of alternative disposal concepts. Posiva 96-12.
- /2-13/ Sandstedt H, Munier R and Pers K. Project Jade. Comparison of repository systems. SKB Technical Report, TR-01-17.
- /2-14/ Pettersson S et al. Research, development and demonstration programme for a KBS-3 repository with horizontal emplacement. SKB Report R-01-55 (in Swedish).

- /2-15/ Stig Pettersson, Eva Widing (SKB), DEVELOPMENT OF THE SWEDISH DEEP REPOSITORY FOR SPENT NUCLEAR FUEL IN CRYSTALLINE HOST ROCK (ABSTRACT), WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ
- /2-16/ RD&D-programme 2001. Programme for research, development and demonstration of methods for management and disposal of nuclear waste. SKB TR-01-30. SKB, September 2001
- /2-17/ Ahlström, Per-Eric, Programmes for deep geological disposal of spent nuclear fuel in Sweden and Finland, SKB IC Mai 2006, S. 46 und 47 (unveröffentlicht)
- /2-18/ ESDRED; <http://www.esdred.info/>
- /2-19/ Government Decision on the Safety of disposal of Spent Nuclear Fuel, 478/1999
- /2-20/ Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Programme for Research, Development and Technical Design for 2004–2006. Report, Report TKS-2003, Posiva Oy.
- /2-21/ Paul Smith et al. "Safety Assessment for a KBS-3H Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto, Summary Report", POSIVA 2007-06, December 2007
- /2-22/ Pastina,B.&Hellä,P., Expected evolution of a spent fuel repository at Olkiluoto, POSIVA 2006-05, December 2006, revised December 2007
- /2-23/ H. Raiko, Disposal canister for spent nuclear fuel – design report; POSIVA 2005-02; July 2005
- /2-24/ Ikonen,K., 2003a.Thermal analysis of spent nuclear fuel repository.Posiva Oy, Olkiluoto,Finland.Posiva report POSIVA 2003-04.
- /2-25/ Ikonen K., Thermal analysis of repository for Spent EPR-type fuel, POSIVA 2005-06, September 2005
- /2-26/ <http://www.stuk.fi>
- /2-27/ http://www.posiva.fi/englanti/tietopankki_tiedottet.html
- /3-1/ C. Dierick, M. Detilleux, G. Nuyt, L. Janssen, G. Demazy „Synthesis of the technical feasibility evaluation of spent fuel conditioning in Belgium”, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998
- /3-2/ 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
- /3-3/ ONDRAF/NIRAS “SAFIR 2 Report”, NIROND 2001-06 E, December 2001
- /3-4/ ONDRAF/NIRAS “Technical overview of the SAFIR 2 report”, NIROND 2001-05 E, December 2001
- /3-5/ J. Bel, C. de Brock, A. Giovannini, A. Van Coethem, M. Detilleux, "Alternative deep repository design for disposal of very high level waste in Belgium"; WM'04 Conferences, February 29 – March 4, 2004, Tucson

- /3-6/ Jean-Paul Boyazis, ONDRAF/NIRAS, The Belgian R&D program for disposal of High and Intermediate level Waste
- /3-7/ G.Nuyt, J. Van Averbeke, J. L. Catoire, J. P. Boyazis. M. Demarche « Description, safety design criteria and cold commissioning of the storage facility for HLW and MLW in Belgium”, Proceedings WM’98, Tucson, März 1998
- /3-8/ Chris De Bock: The ONDRAF/NIRAS Waste Overpack and Supercontainer design (post-conditioning the Belgian HLW and SNF); Workshop and Technical Meeting on Design and Assessment of Packages for Radioactive Waste, Bergen (NL), November 21st 2006
- /3-9/ Second meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; National Report; Kingdom of Belgium, May 2006
- /3-10/ J. Bel, F. Bernier “Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HLW), Proceedings ASME 2001
- /3-11/ J. Verstricht, M. Demarche, C. Gatabin „Development of a backfill material within the Belgian concept for geological disposal of high-level radioactive waste: an example of successful international co-operation”, Proceedings, Tucson 2001
- /3-12/ J. Verstricht, M. Demarche, D. De Bruyn, „Extension of the underground research facility for real-scale demonstration“, Proceedings Tucson 2001
- /3-13/ F. Bernier “The extension of the HADES URF and associated R&D work”, Topical Day, Mol, Belgium, May 21, 2002
www.sckcen.be/conf/td21052002/FredericBernier.pdf
- /3-14/ 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
- /3-15/ G. Volckaert, F. X. Holvoet, F. Bernier, M. Put „Sealing of the shafts of a repository in clay“, Web-Site www.nirond.be
- /3-16/ G. Volckaert, EC concerted action Retrievability – SCK contribution, Brussel 23-24 June 1998 (unveröffentlicht)
- /3-17/ 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
- /3-18/ B. Frederic, M. Demarche and B. Johan “The Belgian Demonstration programme for the disposal of high-level and long-lived radioactive waste”
- /3-19/ Johan Bel, ONDRAF/NIRAS: Example of an integrated prefabricated high pH buffer system – the Belgian concept of Supercontainer and associated backfill; ESDRED, Lecture # 7, Bucharest, 8 Nov. 2006

- /3-20/ J. Verstricht, M. Demarche, C. Gatabin „Development of a backfill material within the Belgian concept for geological disposal of high-level radioactive waste: an example of successful international co-operation”, Proceedings, Tucson 2001
- /3-21/ ANDRA, Dossier 2005 Argile,
http://www.andra.fr/publication/produit/D05_264_en.pdf
- /3-22/ <http://www.cea.fr>
- /3-23/ ANDRA, Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, December 2001
- /3-24/ CROP, Project; WP1 und WP2; Andra Annexe, 13 August 2001
- /3-25/ Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December 2005 <http://www.andra.fr/publication/produit/Argile-TAG-03-01-2007.pdf>
- /3-26/ B.R.W. Haverkate, J. Hart, A.D. Poley, Review of the Horizontal Emplacement Technique concerning Retrievability Disposal Cell Concept, Petten, 20 January 2006
- /3-27/ Filbert, W., J. Wehrmann, W. Bollingerfehr, T. Schwarz, J. Schulz, J.-M. Boggiaud, „Conceptual Design“, Deliverable 2 of Module 2 (Waste Canister Transfer & Emplacement Technology), Work Package 2.1, EC 6FWP ESDRED Project, Contract Number: FI6W-CT-2004-50885114, October 2005.
- /3-28/ atw 52. Jg. (2007) Heft 3, März 2007; S. 182ff
- /3-29/ ANDRA Report Series, Dossier Argile Synthesis, Evaluation of the feasibility of a geological repository in argillaceous formation, June-December 2005
- /3-30/ P. Drasdo „Kosten der Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Schriften des energiewirtschaftlichen Instituts Bd 58, München 2001
- /3-31/ Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA); Schlussbericht; Bern, Januar 2000
- /3-32/ J. Ziegenhagen u. a.: Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager – Fachbericht Literaturrecherche; Peine 30.09.2004
- /3-33/ Abfallinventare und Mengen
<http://www.nagra.ch/index1.tpl?iid=156a1b3c2d67e&id2=3&lang=1&str=a3b56c&cat=120462453823265503>
- /3-34/ Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05, Wettingen, 2002
- /3-35/ 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
- /3-36/ 1999 McKinley I.G., Russell Alexander W., Integration of TRU disposal studies in Switzerland, Proceedings WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson

- /3-37/ CROP "Swiss Country Annex for WP1 Design and construction of engineered barriers"
- /3-38/ www.nagra.ch/english/lager/lagerhaa.htm
- /3-39/ Nagra: Fakten – Mengen radioaktiver Abfälle; September2006
- /3-40/ Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05, Wettingen, 2002
- /3-41/ Nagra (2002c): Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02, Nagra, Wettingen.
- /3-42/ <http://www.nagra.ch/>
- /4-1/ Umweltpolitik, Übereinkommen über nukleare Sicherheit, Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland für die Dritte Überprüfungstagung im April 2005 (Herausgeber BMU, September 2004)
- /4-2/ Engelmann H.-J., Lommerzheim A., Biurrun E., Hubert R., Pöhler M. „Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers“, DEAB T 57; DBE Februar 1995
- /4-3/ J. Ziegenhagen u. a., „Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager (Z2.2.7/WS 1006/8489-2)“, Abschlußbericht, Mai 2005
- /4-4/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Projektgruppe Nationaler Entsorgungsplan, RS III 2-13200/1, Arbeitsgrundlage Nationaler Entsorgungsplan für radioaktive Reststoffe, November 2003
- /4-5/ Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
- /4-6/ Abschlussbericht für das Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern für HAW“ ISIBEL, AP1.2 Konzeptionelle Endlagerplanung, Aufgabe 1: Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
- /4-7/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, September 1995 (S. 4, 5) DBE 1995
- /4-8/ Gesellschaft für Nuklear-Behälter, Beschreibung der Brennstabkokille BSK 3, GNB B 043/98, September 1998, Revision 0 (S. 8, 14)
- /4-9/ Filbert W. u. a. Stand von Wissenschaft und Technik für einen Endlagerbetrieb mit wärmeentwickelnden Abfällen unter Berücksichtigung nationaler und internationaler Endlagerplanungen sowie bestehender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, Abschlussbericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, Oktober 2007

- /4-10/ Filbert, W; Engelmann, H.-J., Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, DBE, Peine, 1998
- /4-11/ Bechthold, W. (editor) Thermal simulation of drift emplacement (TSS) – Summary of interim results; Forschungszentrum Karlsruhe, September 1997
- /4-12/ Bundesamt für Strahlenschutz: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Wirtsgesteine im Vergleich, Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, Salzgitter, November 2005
- /5-1/ Bräuer,V.; et al: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands; Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin und Hannover , November 2004
- /5-2/ Hooth, P.; et al : Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands; Untersuchungen und Bewertung von Tongesteinsformationen; Berlin/Hannover, April 2007
- /5-3/ M. Polster, GEIST – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein, Teilbericht: Thermische Endlagerauslegung für die Bohrlochlagerung von Brennstabkokillen (BSK) im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GMBH, 2004
- /5-4/ s. /4-12/