

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

EUGENIA

**AP 6 – Bau und Betrieb von Endlager-
bergwerken**

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

EUGENIA

**AP 6 – Bau und Betrieb von Endlager-
bergwerken**

Dr. E. Weiß
Dr. A. Lommerzheim

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	5
2	Weit fortgeschrittene Endlagerprojekte in Europa	7
2.1	Kristallingesteine	7
2.1.1	Schweden	8
2.1.2	Finnland	12
2.1.3	Frankreich	13
2.2	Ton und Tongestein	15
2.2.1	Belgien	16
2.2.2	Frankreich	18
2.2.3	Schweiz	20
2.2.4	Deutschland	23
2.3	Salzformationen	24
3	Berg- und bautechnische Maßnahmen zur Herstellung und Instandhaltung von Grubenbauen	31
3.1	Grundlagen	31
3.1.1	Bau von Schächten im Injektionsverfahren	31
3.1.2	Bau von Schächten im Gefrierschachtverfahren	34
3.1.3	Bau von Schächten durch Bohrverfahren	36
3.1.4	Rampen	38
3.2	Schächte und Rampen in den europäischen Endlagerprojekten	38
3.2.1	Kristallingesteine	38
3.2.2	Ton und Tonstein	43
3.2.3	Salzformationen	47
3.3	Auffahrung von Strecken und Kammern	49
3.3.1	Grundlagen	50
3.3.2	Strecken und Kammern in den europäischen Endlagerprojekten	56
3.3.3	Die Erstellung von Bohrlöchern	75
4	Infrastruktureinrichtungen in den Tagesanlagen	85
4.1	Gebäude und Anlagen	85
4.1.1	Frankreich	85

4.1.2	Schweiz	90
4.1.3	Deutschland	94
4.2	Maschinen und Geräte	99
5	Einlagerungstechnik	103
5.1	Frankreich	103
5.1.1	Endlagerkonzept für Granit	103
5.1.2	Endlagerkonzept für Ton	109
5.2	Schweden	120
5.3	Finnland	122
5.4	Belgien	122
5.5	Schweiz	125
5.6	Deutschland	132
6	Strahlenschutzmaßnahmen	141
7	Wettertechnik	149
7.1	Frankreich	149
7.2	Schweiz	151
7.3	Deutschland	153
7.4	Belgien	157
8	Entwässerungstechnik	159
8.1	Tongestein	159
8.2	Kristallingesteine	161
8.3	Salzformationen	161
9	Zusammenfassung	163
	Tabellenverzeichnis	169
	Abbildungsverzeichnis	171
	Abkürzungsverzeichnis	177
	Literaturverzeichnis	179

1 Einleitung

Um den Menschen und die Umwelt vor einer möglichen Gefährdung durch die Inventare radioaktiver Abfälle zu schützen, müssen diese langfristig und sicher von der Biosphäre isoliert werden. Dabei ist sich die Wissenschaft einig, dass nur die Endlagerung in geologischen Formationen diesen langfristig sicheren Schutz gewährleisten kann /1-1/, /1-2/.

Zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wurde hierfür in Deutschland ab Mitte der 1960er Jahre bei der geowissenschaftlichen Erkundung Steinsalz der Vorrang vor anderen Gesteinsarten als potentiell Wirtsgestein gegeben.

Schwach- bis mittelradioaktive Abfälle wurden von 1981 bis 1998 im ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerk Morsleben eingelagert, das zunächst entsprechend dem Genehmigungs- und Entsorgungskonzept der DDR und nach der Wiedervereinigung als Bundesendlager betrieben wurde. Für dieses Endlager läuft z. Z. das Genehmigungsverfahren für die Stilllegung. Voraussichtlich ab 2013 steht dann das ehemalige Erzbergwerk Konrad als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur Verfügung. Die Bau- und Betriebsgenehmigung wurde 2002 erteilt und nach letztinstanzlicher gerichtlicher Prüfung wurde 2007 mit der Umrüstung des Bergwerks zum Endlager begonnen.

Der Salzstock Gorleben wird seit 1979 auf seine Eignung als Standort für ein Endlager für ausgediente Brennelemente und hoch radioaktive Abfälle untersucht. Mit der Errichtung des Erkundungsbergwerks wurde 1985 begonnen. Im Jahr 2000 wurde die Erkundung auf Grund eines Moratoriums unterbrochen, um grundsätzliche offene Fragen zu klären.

Die relevanten petrophysikalischen Eigenschaften der möglichen Wirtsgesteine für HAW-Endlagerbergwerke sowie Grundlagen und Beispiele für ein Standortauswahlverfahren werden in /1-3/ dargestellt.

2 Weit fortgeschrittene Endlagerprojekte in Europa

Als Grundlage für die anschließenden Ausführungen über die vorgesehene Technik für den Bau und Betrieb eines Endlagers werden im folgenden die am weitesten fortgeschrittenen Endlagerkonzepte für verschiedene Wirtsgesteine vorgestellt.

2.1 Kristallingesteine

Die Entscheidung für die Auswahl von Kristallingesteinen als potentielle Wirtsgesteine für tiefe Endlager für hoch radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente erfolgt in der Regel auf Grund der regionalen geologischen Situation. Entsprechende Untersuchungen werden in skandinavischen und osteuropäischen Ländern, in der Schweiz, den USA, Kanada, Japan und China durchgeführt. An einigen Standorten werden die Kristallingesteine von einem sedimentären Deckgebirge überlagert. Standorte für Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente wurden bisher in Finnland (Olkiluoto), Schweden (Oskarshamn oder Forsmark) und USA (Yucca Mountain) festgelegt.

Kristallingesteine sind mechanisch standfest, was für die Standsicherheit des Grubengebäudes während der Betriebszeit günstig ist und während der Nachbetriebsphase eine mechanische Schutzfunktion für die Abfallgebände darstellt. Andererseits sind diese Gesteine aber von – häufig wasserführenden – Klüften und Spalten durchdrungen, so dass bei einer Nutzung als Wirtsgestein für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente die Rückhaltefunktionen für die radioaktiven Inventare von technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten sind.

Die Endlagerkonzepte für Kristallingesteine sehen daher korrosionsresistente Endlagerbehälter mit Standzeiten von wenigstens 100.000 Jahren sowie um den Endlagerbehälter einen Puffer aus quellfähigen Tonmaterialien zur Vermeidung oder Verzögerung eines Lösungszutritts zum Behälter und für den Fall des Austritts als Sorptionsbarriere vor. Um die günstigen Eigenschaften des Ton-Puffers (Quellvermögen, Plastizität, geringe Permeabilität, ausreichende Wärmeleitfähigkeit, Sorptionsvermögen für Radionuklide) langfristig zu erhalten, werden für die Endlagerung in Kristallingesteinen Temperaturobergrenzen von 100°C für den Kontakt Endlagerbehälter / Puffer festgelegt. Da die Kristallingesteine nur ein geringes Sorptionsvermögen haben, spielt bei den entsprechenden Endlagerkonzepten das Rückhaltevermögen des Puffers sowie des Verfüll- und Verschlussmaterials eine größere Rolle als in Tonformationen. Voraussetzung für eine Langzeitfunktion der Tonbarrieren ist, dass die günstigen Eigenschaften des Tons durch die salinaren Tiefenwässer nicht beeinträchtigt werden und dass ein Auswaschen des Tons verhindert wird.

Das Design des Grubengebäudes wird in der Weise an die Struktur des Kristallinkomplexes angepasst, dass die Einlagerungsbereiche in ungestörten Gesteinsblöcken ohne wasserführende Klüfte errichtet werden. Da Kristallinformationen häufig große Gesteinsvolumina aufweisen, besteht eine gewisse Flexibilität, um das Endlagerdesign an den Verlauf der Klüfte anzupassen. Eine bessere Ausnutzung wenig geklüfteter und nur gering wasserführender Gesteinsbereiche ist durch ein mehrsohliges Grubengebäude möglich.

2.1.1 Schweden

In Schweden ist eine direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente vorgesehen. Das Grundkonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sieht vor, dass kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Betriebsabfälle in das Endlager SFR verbracht werden. Der ausgediente Kernbrennstoff soll nach einer Abklingzeit an den Standorten der Kernkraftwerke und einer Zwischenlagerung im zentralen Lager für ausgediente Brennelemente (CLAB) in einem Endlager in Granit endgelagert werden.

Seit 2002 werden die beiden potentiellen Standorte Forsmark und Laxemar bezüglich ihrer Eignung zur Errichtung eines geologischen Endlagers für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in einer Granitformation untersucht. Eine Auswahl des Standortes soll bis 2009 erfolgen /2-1/.

Die Schwedische Gesellschaft für Kernbrennstoffe und Abfallentsorgung (SKB) hat entsprechend den Vorgaben der SKI /2-2/ Untersuchungen und Planungen für die Endlagerung der ausgedienten Kernbrennstoffe durchgeführt. Dabei wird von einer stufenweisen Errichtung des Endlagers ausgegangen: Untertagelabor – Demonstrationsendlager (ca. 5 – 10 % des vorgesehenen Gesamtinventars) – Endlager.

Da SKB und die finnische Endlagergesellschaft POSIVA ähnliche Endlagerkonzepte für ausgediente Brennelemente in Kristallingesteinen verfolgen, werden viele Forschungsarbeiten von den beiden Gesellschaften gemeinsam durchgeführt.

Im kerntechnischen Regelwerk Schwedens sind keine Festlegungen bezüglich einer Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle enthalten. Falls aber ein Eingriff in ein Endlager erfolgen soll, sind den kerntechnischen Aufsichtsbehörden entsprechende Sicherheitsbewertungen vorzulegen. Untersuchungen zur Rückholbarkeit der Container mit ausgedienten Brennelementen haben gezeigt, dass mit einem gewissen Aufwand eine Rückholung zu jeder Phase des Endlagerprozesses möglich ist, solange die ausgedienten Brennelemente im Gebinde eingeschlossen sind /2-3/.

SKB plant die Errichtung eines Endlagers für ausgediente Brennelemente in einer Granitformation in einer Teufe von ca. 500 m. Grundlage für die Endlagerplanung ist das KBS-3 Konzept, von dem die folgenden Optionen untersucht wurden /2-4/, /2-5/, /2-6/ und /2-7/ (Abbildung 2-1):

- Vertikale Bohrlochlagerung von einem oder mehreren Endlagercontainern (KBS-3 V),
- horizontale Bohrlochlagerung von einem Endlagercontainer je Bohrloch (KBS-3 H) sowie
- horizontale Einlagerung von mehreren Endlagercontainern hintereinander in mittellangen, horizontalen Bohrlöchern (KBS-3 MLH).

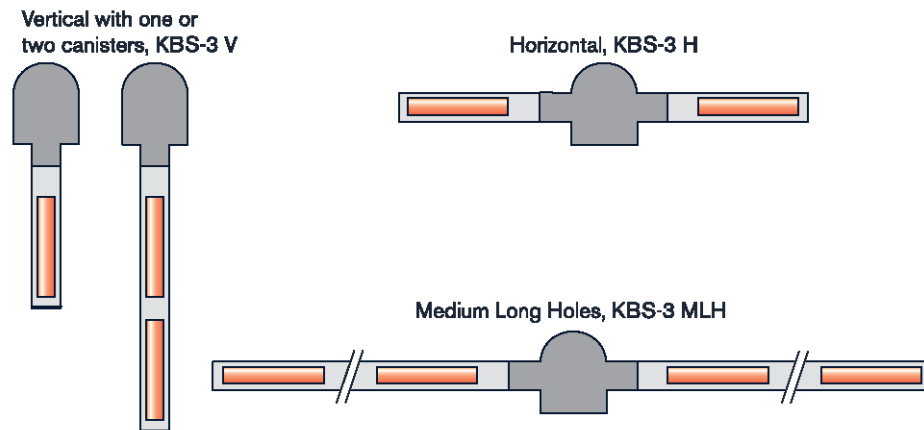


Abbildung 2-1: Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente – Schweden /2-9/

Aufgrund eines Konzeptvergleichs wurde das Konzept KBS-3V als Referenzkonzept ausgewählt /2-6/.

Das Endlager besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, die über eine Rampe und 4 Schächte mit der Oberfläche verbunden sind. Einer der Schächte dient der Material- und Personalförderung, während die anderen Schächte (2 im Zentralteil, einer am entferntesten Ende des Endlagers) für die Bewetterung genutzt werden /2-8/. (Abbildung 2-2).

Die mittlere Länge der Einlagerungsstrecken für die vertikale Bohrlochlagerung wurde aufgrund von Machbarkeitsuntersuchungen auf 265 m festgelegt. Eine Präzisierung der Länge soll bei der Auffahrung entsprechend den angetroffenen geologischen Verhältnissen erfolgen. Der Streckenabstand beträgt ca. 40 m. In den Boden der Einlagerungsstrecken werden im Abstand von ca. 6 m die Einlagerungsbohrlöcher 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 im Puffermaterial nicht überschritten wird. Insgesamt sind über 100 Einlagerungsstrecken aufzufahren, wobei in jeder Strecke ca. 40 Einlagerungsbohrlöcher niedergebracht werden.

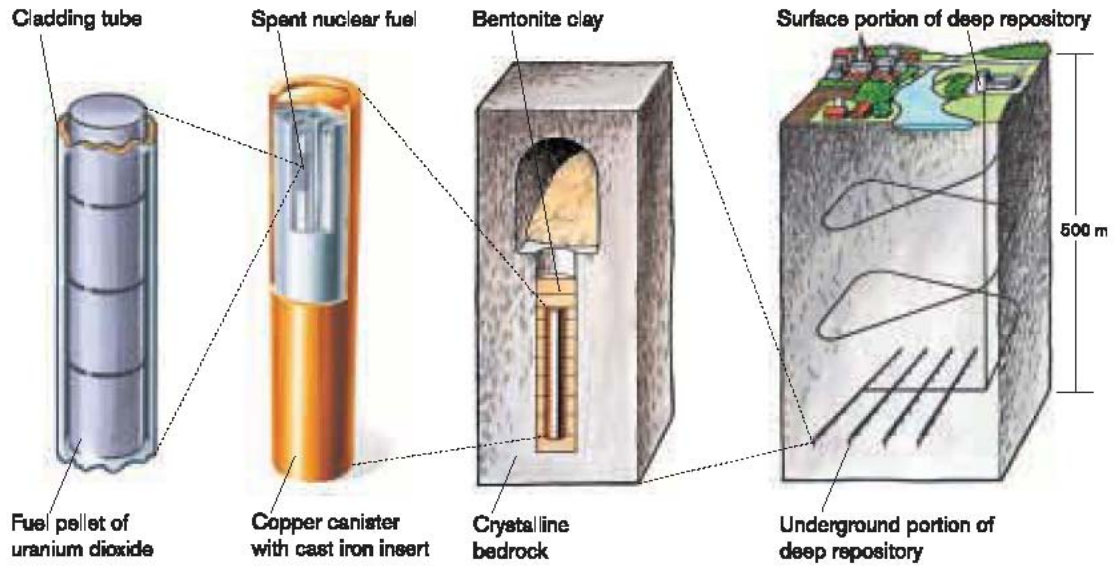


Abbildung 2-2: Endlagerkonzept KBS-3 V – Schweden /2-9/

Die Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung der ausgediente Brennelemente bestehen aus einem inneren Stahlbehälter und einem äußeren Kupferbehälter. Z. Z. werden noch zwei Varianten des Endlagerbehälters analysiert, die sich durch abweichende Wandstärken des Kupferbehälters unterscheiden (Abbildung 2-3). Der Referenzbehälter hat eine Wandstärke 50 mm und enthält entweder 4 DWR-Brennelemente oder 12 SWR-Brennelemente. Die aufgrund der Korrosionsresistenz abgeschätzte Dauer der Behälterintegrität beträgt 100.000 Jahre.

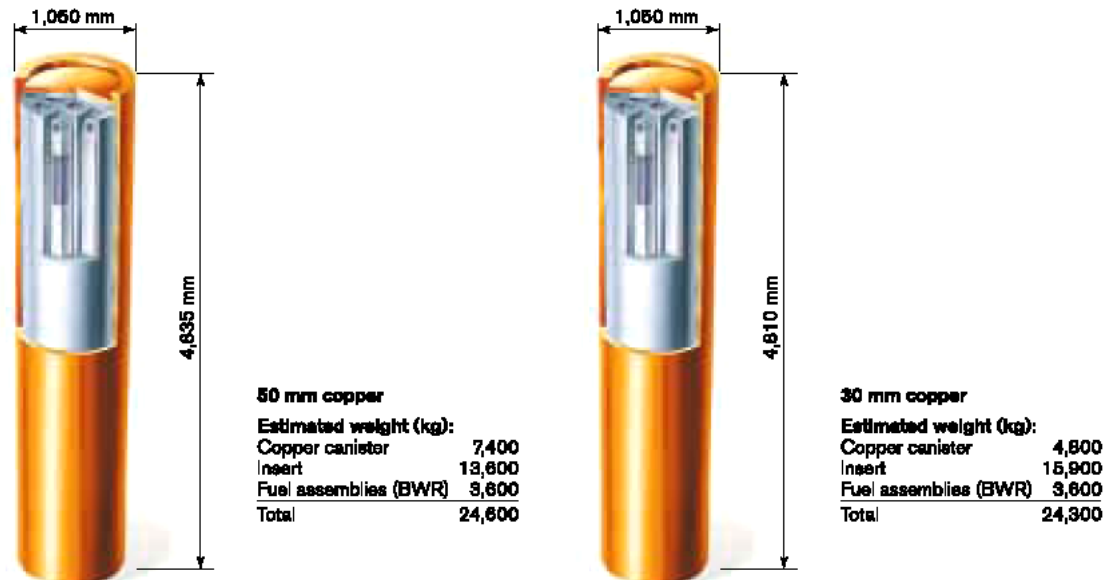


Abbildung 2-3: Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente /2-10/.
Der linke Behälter entspricht dem schwedischen Referenzkonzept.

Aufgrund von Temperaturbegrenzungen für den Bentonitpuffer soll die Temperatur an der Oberfläche der Container 100 °C nicht überschreiten /2-10/. Dies wird durch eine Abklingzeit für die Brennelemente von ca. 40 Jahren vor der Endlagerung sichergestellt werden.

Das Endlagerkonzept KBS-3 V sieht vor, dass die Einlagerungsbohrlöcher vor dem Einbringen der Kupferbehälter mit Bentonitringen bzw. -blöcken ausgekleidet werden und nach Abschluss der Einlagerung durch Bentonitblöcke verschlossen werden /2-8/ (Abbildung 2-2).

Alternativ zur Endlagerung in Vertikalbohrlöchern wird auch die Endlagerung in Horizontalbohrlöchern bzw. -strecken analysiert. Für dieses Konzept wird der Einsatz eines sogenannten „Supercontainers“ erwogen. Ein Supercontainer besteht aus dem kupferummantelten Endlagerbehälter, der mit Bentonitringen bzw. -blöcken in einem perforierten Stahlzylinder umgeben wird. Die Gesamtlänge des 45 t schweren Supercontainers beträgt 5,5 m (Abbildung 2-4). Die Funktionalität und Handhabung des Supercontainers wird derzeit im Untertagelabor Aspö erprobt /2-11/. Der Supercontainer soll in ca. 300 m lange horizontale Bohrungen des Endlagers eingebracht werden (Abbildung 2-5). Dabei werden zwischen den Containern Distanzblöcke eingesetzt /2-7/. Für dieses Konzept wurden auch Untersuchungen zur Rückholbarkeit durchgeführt.

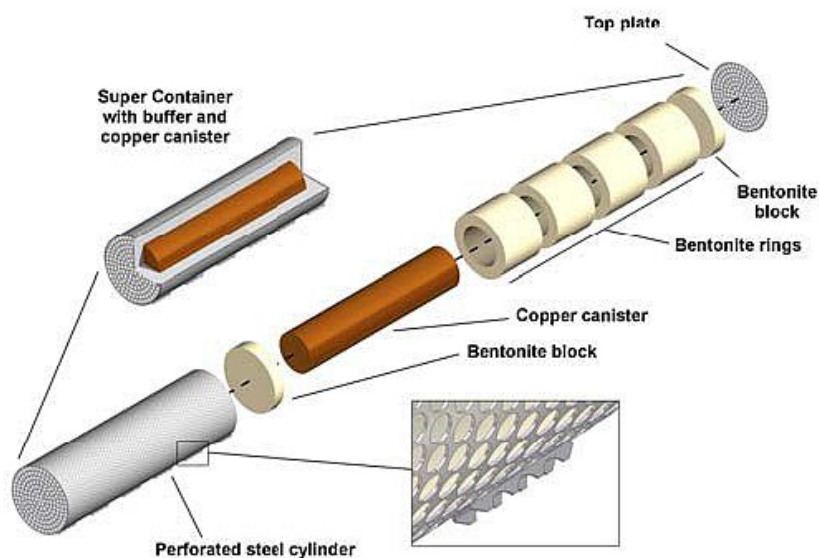


Abbildung 2-4: Aufbau eines Supercontainers – Schweden /2-7/

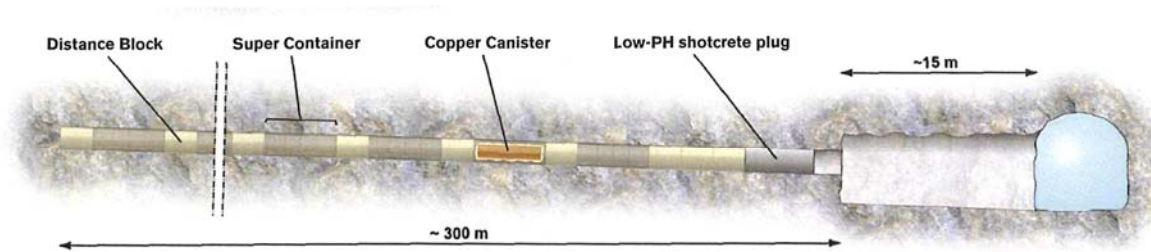


Abbildung 2-5: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) – Schweden /2-7/

2.1.2 Finnland

Die Arbeiten zur Endlagerung der ausgedienten Brennelemente in tiefen geologischen Formationen wurden in Finnland 1978 aufgenommen. 2001 wurde eine Grundsatzentscheidung zur Errichtung des Endlagers am ausgewählten Standort Olkiluoto getroffen. Die Standortuntersuchung erfolgt im Untertagelabor ONKALO. Die Grubenräume des Untertagelabors werden in das zukünftige Endlager integriert werden /2-12/.

In der Nachbetriebsphase muss eine Rückholung der Abfallgebinde über die Periode möglich sein, in der die technischen Barrieren einen vollständigen Einschluss der endgelagerten radioaktiven Substanzen zu gewährleisten haben /2-13/. Dabei darf eine Erleichterung der Rückholbarkeit oder ein Monitoring in der Nachbetriebsphase die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht verschlechtern. Eine Rückholung wird ausschließlich für ausgedienten Kernbrennstoff erwogen. Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm der POSIVA sieht daher eine Endlagerplanung unter Berücksichtigung der Rückholung vor /2-14/.

Die Endlagerplanungen der POSIVA sehen ein einsöhliges Endlager in einer Tiefe von –420 mNN als Referenzkonzept vor /2-12/. Das Endlagerkonzept für ausgediente Brennelemente orientiert sich am KBS-3 Konzept der schwedischen SKB /2-12/. Das Referenzkonzept sieht die Einlagerung der Endlagerbehälter in vertikalen Bohrlöchern vor (KBS-3V) und legt dieselben Auslegungsanforderungen wie das schwedische Konzept zugrunde.

Das Grubengebäude des Endlagers besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, die über eine Zugangsrampe und sechs Schächte mit der Oberfläche verbunden sind (Abbildung 2-6). Die untertägigen Anlagen werden in einen Kontrollbereich (in dem Abfälle transportiert und eingelagert werden) und einen konventionellen Bereich (Infrastrukturbereich und Teile, die für eine künftige Einlagerung vorbereitet werden) gegliedert. Der Kontrollbereich verfügt über vier Schächte (Personaltransport, einziehender und ausziehender Wetterschacht sowie Endlagerbehältertransport), der konventionelle Teil über einen Personal- und einen Abluftschacht sowie eine Zugangsrampe. Die Wetterschächte haben einen Durchmesser von 3,5 m und die anderen Schächte von 4,5 m. Die Einlagerungsstrecken werden entsprechend der geologischen Verhältnisse in Einlagerungsbereiche gegliedert (Abbildung 2-6). Die mit 25 m Abstand aufgefahrene Einlagerungsstrecken ha-

ben – in Abhängigkeit von den einzulagernden Abfallgebinden – einen Querschnitt von 12,6 bis 14,0 m² und eine maximale Länge von 350 m /2-12/.

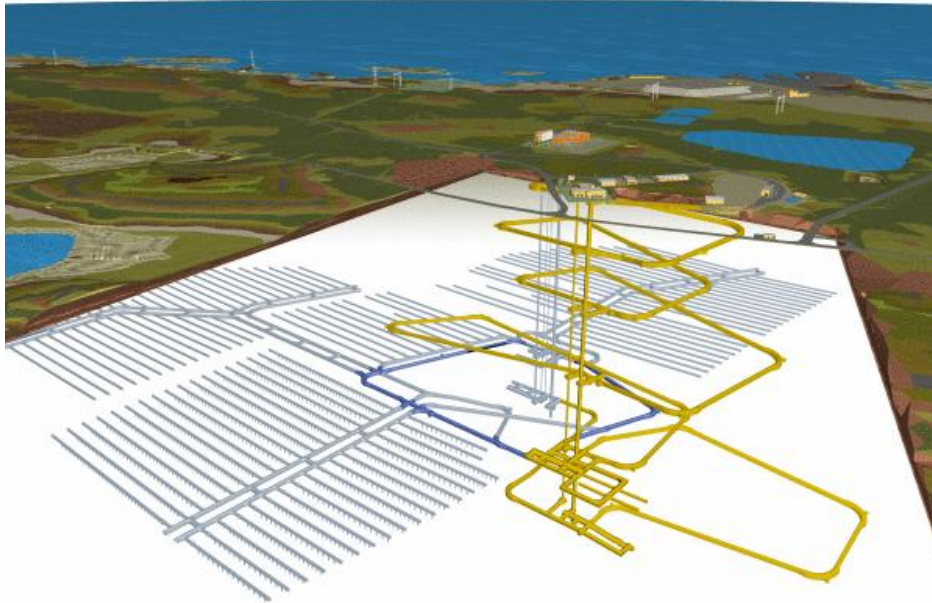


Abbildung 2-6: Endlager Olkiluoto -Schematisches Layout – Finnland /2-12/

Da in finnischen Kernkraftwerken drei unterschiedliche Brennelement-Typen mit verschiedenen Abmessungen eingesetzt werden, müssen dementsprechend auch drei verschiedene Endlagerbehälter mit Längen von 3,6 bis 5,25 m verwendet werden. Die Tiefe der Einlagerungsbohrlöcher wird der Behälterlänge angepasst. Nach dem Einsetzen des Endlagerbehälters wird der verbleibende Hohlraum mit Bentonit verfüllt. Der Bohrlochabstand wird der Wärmeleistung der Behälter angepasst, damit die maximal zulässige Temperatur im Bentonitpuffer von 100°C eingehalten werden kann.

2.1.3 Frankreich

In Frankreich wird alternativ zur Endlagerung in Ton auch die Endlagerung in Granit untersucht. Für die Granit-Option wurde allerdings bisher noch kein Standort für ein Untertage-labor festgelegt, so dass die bisherigen Endlagerkonzepte generischer Natur sind. Entsprechend dem französischen Kernbrennstoffkreislauf werden in einem zukünftigen Endlager vor allem verglaste hoch radioaktive Abfälle (HAW) eingelagert werden /2-15/. Als Zugänge zum Endlager werden die Varianten „Zugang nur über Schächte“ sowie „Zugang über Schächte und eine Rampe“ untersucht. Das Endlagerkonzept (Abbildung 2-7) sieht die Errichtung von Einlagerungszonen in Granitblöcken vor, die frei von wasserführenden Klüften sind. Kleinere wasserführende Klüfte sind kein Ausschlusskriterium, wenn ihre hydraulische Leitfähigkeit die Sicherheitsfunktionen der übrigen Endlagerkomponenten nicht beeinflusst. Die Eignung eines Bereiches wird durch vorlaufende geologische, hydrogeologische und geophysikalische Erkundungsmaßnahmen ermittelt. Die Einlagerungszonen bestehen aus Strecken, in deren Sohle die Einlagerungsbohrlöcher angeordnet sind. Die

Abstände zwischen den 200 bis 250 m langen Einlagerungsstrecken (25 m) und -bohrlöchern (8 m HAW bzw. 10-15 m BE) wurden so festgelegt, dass keine thermomechanischen Beeinflussungen auftreten. Der Streckenquerschnitt wird entsprechend den Anforderungen der Transport- und Einlagerungstechnik festgelegt.

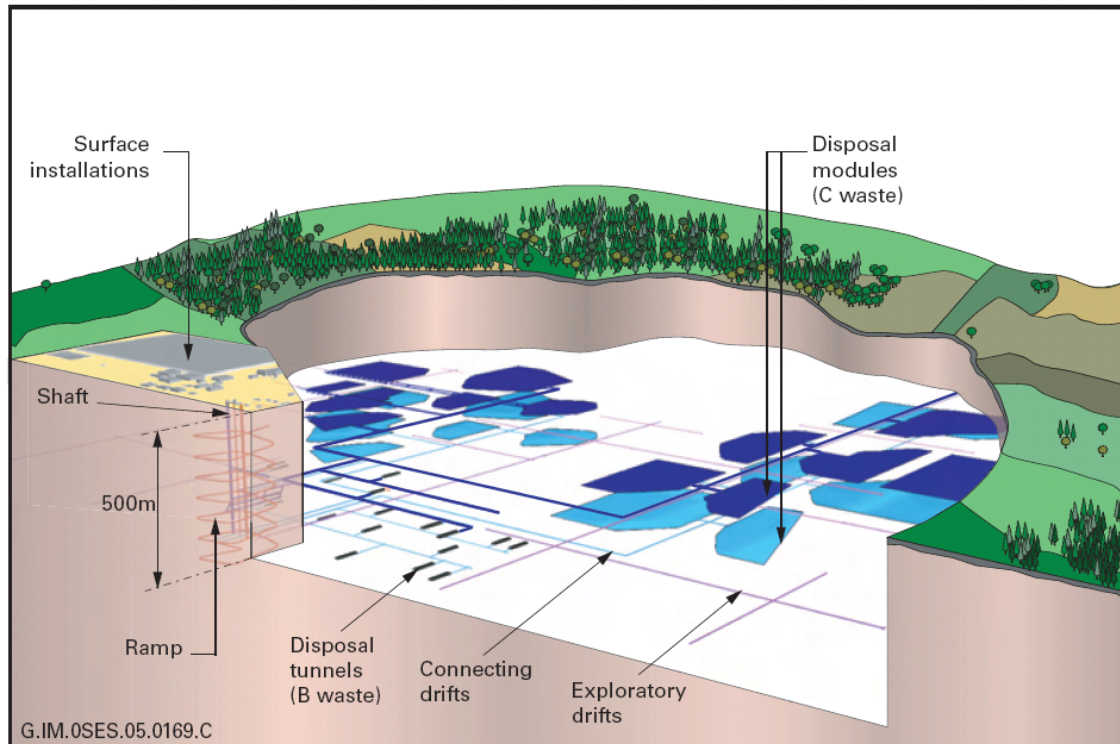


Abbildung 2-7: Französisches Endlagerkonzept in einer kristallinen Formation – Frankreich /2-15/

Das französische Konzept basiert auf dem skandinavischen KBS3-Konzept, wobei die vertikale Varianten das Referenzkonzept (Abbildung 2-8) ist. Dabei wird die Wahl zwischen horizontalen und vertikalen Einlagerungsbohrungen in erster Linie von der Orientierung und Verteilung der kleinen Klüfte im Gestein abhängig gemacht. Bei vorwiegend senkrechten Klüften werden aus statischen Gründen senkrechte Einlagerungsbohrungen vorgesehen, bei vorwiegend waagrechten Klüften horizontale Bohrungen. Die Gebindeanzahl pro Bohrloch ist von der Wärmeproduktion des Abfalls abhängig und variiert zwischen 2 und 5, wobei bei den stark wärmeerzeugenden Abfällen eine vorangegangene Zwischenlagerzeit von bis zu 60 Jahren erforderlich ist. Während für die verglasten Abfälle Endlagerbehälter aus einer Stahl-Kohlenstofflegierung vorgesehen sind, wird für ausgediente Brennelemente auf das skandinavische Kupferbehälter-Konzept zurückgegriffen. Als Puffermaterial zur Vermeidung eines Lösungszutritts sowie zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide wird Bentonit bevorzugt, wobei die Eigenschaften der Tonbarriere im Hinblick auf den Quelldruck, die Dichte, die hydraulische Leitfähigkeit, die thermischen Eigenschaften und die Plastizität durch zielgerichtete Änderung der mineralogischen Zusammensetzung an die Standortbedingungen angepasst werden können.

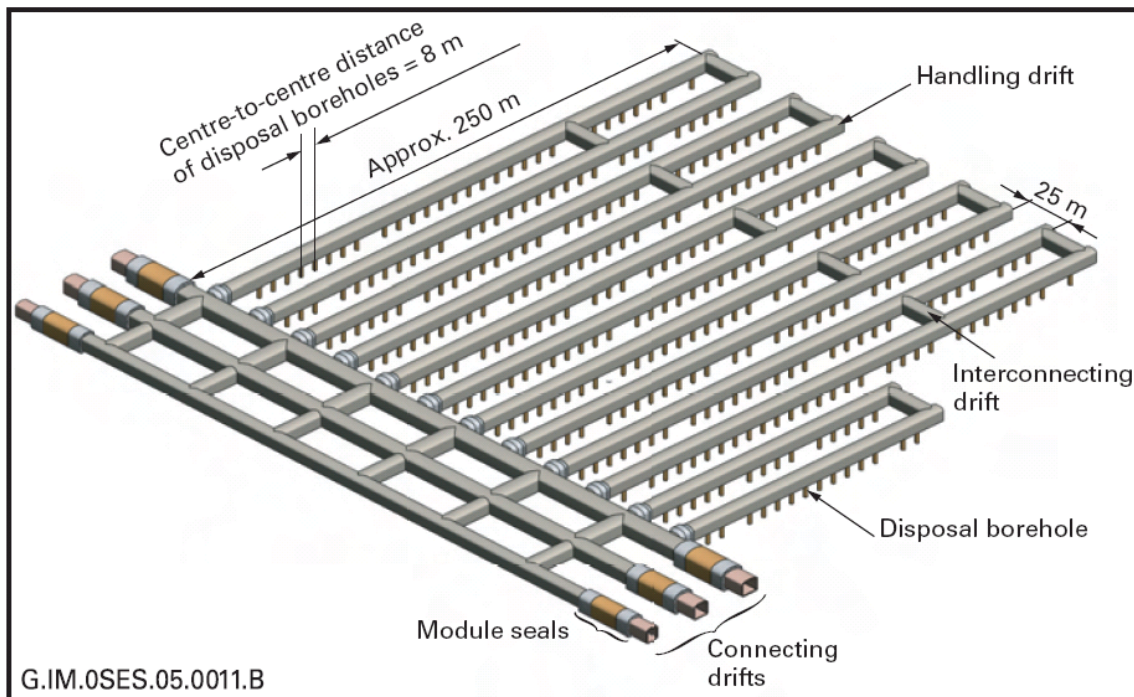


Abbildung 2-8: Einlagerungskonzept für wärmeentwickelnde Abfälle in Bohrlöchern – Frankreich /2-16/

2.2 Ton und Tongestein

Einen Überblick über den internationalen Stand der Endlagerung im Tonstein geben die GEIST-Studie /2-17/, in der ein generisches Endlager im Salz und im Tongestein unter adäquaten Randbedingungen verglichen wurde, sowie die ERATO-Studie, in der auf der Grundlage einer Neubewertung des internationalen Standes der Endlagerforschung für Tonstein ein Referenzkonzept für ein deutsches Endlager im Tonstein entwickelt wurde /2-18/.

Bei der Endlagerung im Ton stellt das Wirtsgestein die entscheidende Barriere für den langzeitsicheren Einschluss des Radionuklidinventars dar. Aufgrund der starken Konvergenz in Tonsteinen werden sich die durch bergbauliche Aktivitäten geschaffenen Hohlräume langfristig schließen, wobei auch die dabei durch Verformung entstehenden Risse langfristig wieder verheilen. Aufgabe der technischen und geotechnischen Barrieren ist es daher, bis zum Verschluss der Grubenräume durch die Gebirgsverformung das Radionuklidinventar einzuschließen und mögliche Wegsamkeiten für einen Fluidzu- oder -austritt zu verschließen. Eingelagerte Abfallgebände werden von einem tonigen Puffermaterial umgeben. Um die Barrierenwirkung dieses Materials nicht zu beeinträchtigen und Siedeeffekte des Porenwassers im umgebenden Puffermaterial zu vermeiden, soll die Temperatur an der Behälteroberfläche 100°C nicht überschreiten.

In Belgien, Frankreich und der Schweiz sind die Wirtsgesteinsuntersuchungen mit Hilfe von Untertagelaboren sowie die Endlagerplanungen weit fortgeschritten.

2.2.1 Belgien

Seit den 70er Jahren wurden in Belgien verschiedene Endlagerkonzepte in geologischen Formationen betrachtet, wobei nach der anfänglich präferierten Bohrlochlagerung (PAGIS-Studie) aktuell die Streckenlagerung in der Boom-Clay-Formation am Standort Mol-Dessel als Referenzkonzept dient /2-19/, /2-20/, /2-21/. Dabei wird einerseits die Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (HAW) aus der Wiederaufarbeitung (Referenzoption) und andererseits die kombinierte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und HAW untersucht. Entsprechende Konzepte wurden in der SAFIR 2-Studie beschrieben und die technische Machbarkeit in der PRACLAY-Studie untersucht /2-22/. Aufgrund erster Ergebnisse der PRACLAY-Studie wurde das SAFIR 2-Konzept bezüglich des Behälterkonzeptes und der Verfüllung der Einlagerungsstrecken weiterentwickelt („Supercontainer-Konzept“ /2-21/). Konzeptbestimmend ist in allen Konzepten eine Grenztemperatur von 100°C an der Kontaktfläche zwischen dem Behälteroverpack und dem Puffermaterial, die von wärmeentwickelnden Abfällen nicht überschritten werden darf /2-20/.

Das vorgesehene Endlager besteht aus einem Streckennetz in der Boom-Clay-Formation in einer Teufe von ca. 230 m /2-20/. Der Zugang zum Endlager wird durch zwei Schächte gebildet. Untertage sind die Schächte durch eine Verbindungsstrecke verbunden (Abbildung 2-8). Von den Schächten gehen beidseitig rechtwinklig zur Verbindungsstrecke zwei Hauptstrecken ab. Diese Hauptstrecken bilden den Zugang zu dem Endlagerfeld für HAW und ausgedienten Kernbrennstoff auf der einen Seite von den Schächten und zum Endlagerfeld für LILW auf der anderen Seite. Die Dimensionierung der Schächte und der Strecken erfolgt auf der Grundlage betrieblicher, technischer, ökonomischer und sicherheitsrelevanter Erwägungen. Die Endlagerung der Behälter mit ausgedienten Brennelementen erfolgt in Strecken mit einem Durchmesser von 2,70 m und einer Länge von ca. 800 m (Abbildung 2-9). Diese erhalten einen ca. 25 cm dicken Betonausbau. Innerhalb des Tunnels verlaufen 4 Rohre, die durch quellfähigen Ton getrennt sind. Die Abfallgebände werden entsprechend ihrer Wärmeentwicklung in den Röhren angeordnet. Die Einlagerungsstrecken liegen rechtwinklig zu den Hauptstrecken und werden von diesen in drei Felder geteilt. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 40 m. Behälter mit verglastem HAW werden in Strecken mit 2,4 m Durchmesser in einer Edelstahlröhre eingelagert. Der Ringraum wird mit einem vorbereiteten Gemisch aus Bentonit, Sand und Grafit verfüllt. Beim Einlagerungskonzept für die ausgedienten Brennelemente wurde die größere Länge und Wärmeleistung der Endlagerbehälter dadurch berücksichtigt, dass der Winkel zwischen den Hauptstrecken und den Einlagerungsstrecken reduziert, der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken erhöht, und die Anzahl der Behälter je Einlagerungsstrecke verringert wurde.

Im Supercontainer-Konzept /2-21/ werden die in einen Overpack eingeschlossenen HAW oder ausgedienten Brennelemente von einer 6 mm starken Edelstahlhülle mit einer 70 cm starken Pufferschicht aus Portland-Zement umschlossen, die einerseits für die Abschirmung während des Betriebes und andererseits für ein günstiges chemisches Milieu während der erforderlichen Behälterstandzeit sorgt (Abbildung 2-10). Die verbleibenden Hohlräume zwischen dem Betonausbau der Strecken und dem Supercontainer werden mit Zement oder anderen Verfüllmaterialien (z. B. Bentonit-Sand-Gemische) verschlossen.

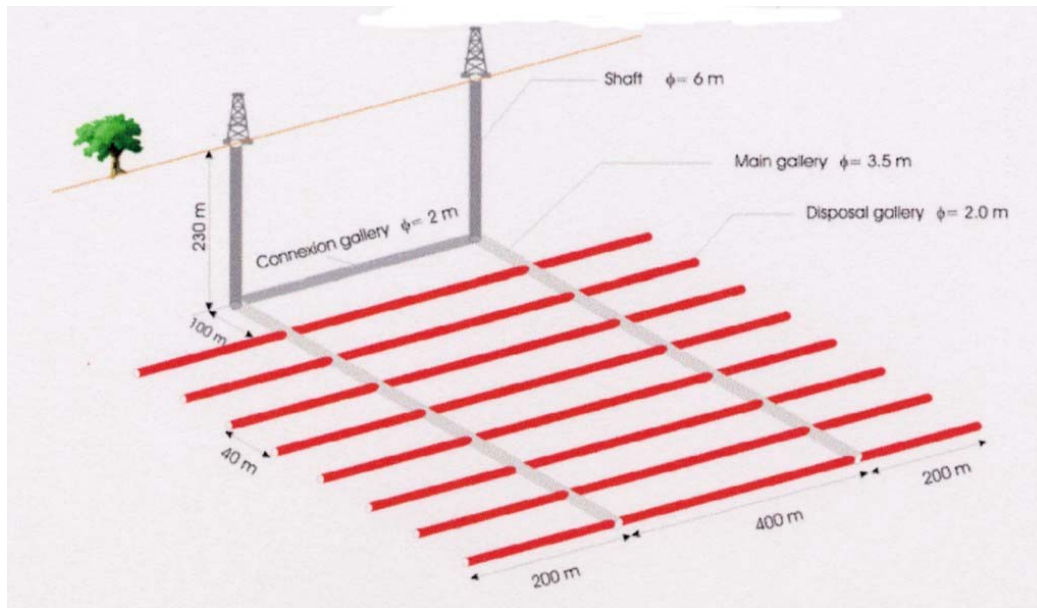


Abbildung 2-9: Endlager für verglaste HAW – Belgien /2-20/

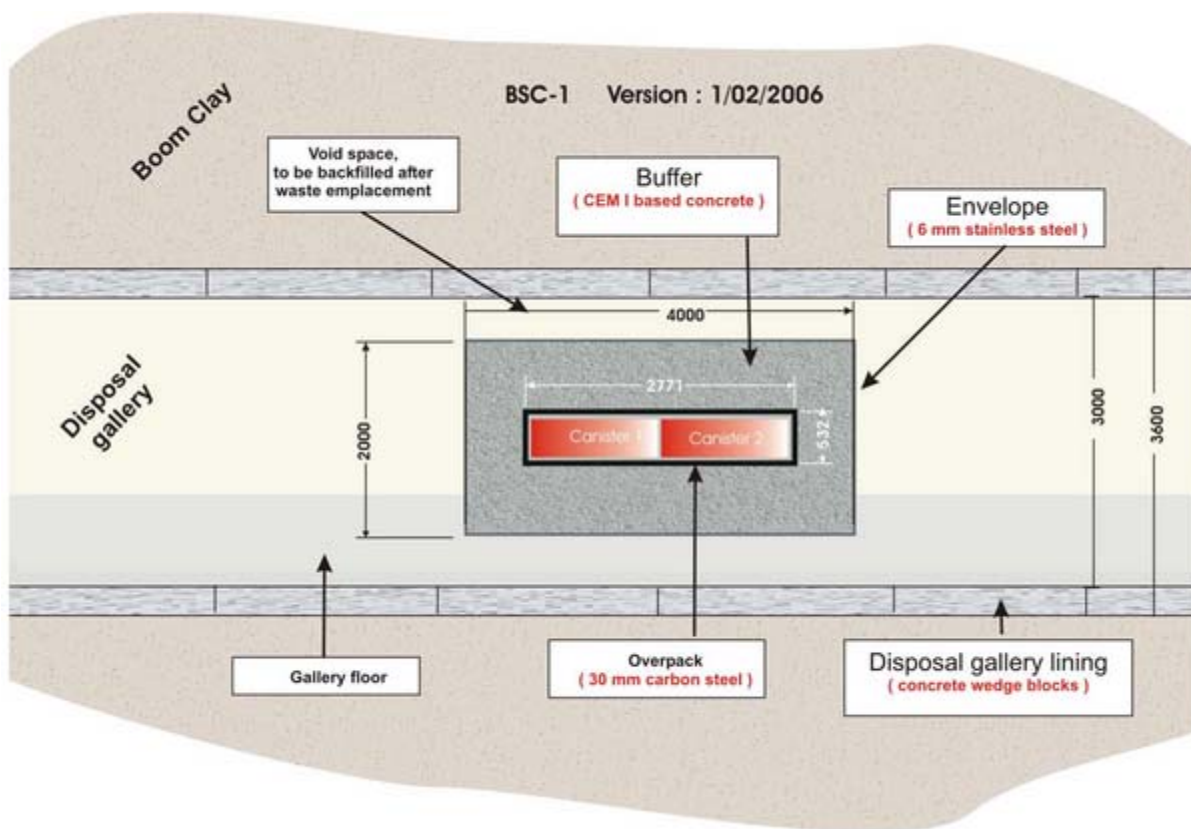


Abbildung 2-10: Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für verglaste HAW, Supercontainer-Konzept – Belgien /2-21/

2.2.2 Frankreich

Im neuen Entsorgungsgesetz Frankreichs, das im Juni 2006 verabschiedet wurde, ist festgelegt, dass bis 2015 der Sicherheitsnachweis eines geologischen Endlagers für hochradioaktive Abfälle vorliegen und das Endlager 2025 in Betrieb gehen soll /2-23/. Das Endlager soll in der Nähe des Standortes des Untertage-Forschungslabors Bure, Meuse / Haute Marne im Ton errichtet werden. Es ist vorgesehen, die verschiedenen Abfallarten (C-Waste: hochradioaktive Abfälle und ggf. CU-Waste: ausgediente Brennelemente sowie B-Waste: langlebige mittelradioaktive Abfälle) in getrennten Einlagerungsbereichen in das Endlager einzubringen /2-24/. Da gemäß gesetzlicher Anforderung bei der Endlagerplanung eine mögliche Rückholung der Abfälle zu berücksichtigen ist, enthält das Endlagerkonzept eine Reihe von technischen Lösungen, die eine Rückholung in den einzelnen Phasen des Endlagerprozesses ermöglichen bzw. erleichtern.

In Abwandlung der Temperaturbegrenzungen in anderen Endlagerkonzepten für Ton wurde für das französische Konzept eine maximal zulässige Temperatur von 90 °C am Kontakt Puffermaterial / Tongestein festgelegt /2-24/.

Die Endlagerung soll in ca. 500 m Teufe in 130 m mächtigen Tonen des mittleren und oberen Juras erfolgen, wobei die Über- und Untertageanlagen beim Referenzkonzept durch 4 Schächte miteinander verbunden werden (Abbildung 2-11) /2-24/. Die Schächte werden in einer Schachtzone angeordnet, die sich am Rand der Einlagerungsfelder befindet. Dabei dient je ein Schacht dem Transport der Abfallgebände, dem Transport des Personals und kleinerer Ausrüstungen, dem Abwetterabzug und als Bergbauschacht. Im Umfeld der Schachtzone befindet sich auch der Infrastrukturbereich, der durch Verbindungsstrecken mit den Einlagerungszonen (= -bereichen) verbunden ist. Durch die räumliche Trennung der Einlagerungszonen für verschiedene Abfallarten wird eine gegenseitige Beeinflussung der Abfälle vermieden und ein flexibler Ablauf der Einlagerung der Gebände in die verschiedenen Zonen gewährleistet. Die Einlagerungszonen sind in Einlagerungsmodule unterteilt, die wiederum in Abhängigkeit vom einzulagernden Abfalltyp aus zehn bis zu einigen hundert Einlagerungszellen bestehen. Die Endlagerzellen stellen blinde horizontale Bohrungen dar, die beidseitig von den Transportstrecken abgehen. Die Bohrungen gliedern sich in den Bohrlochkopf und den Einlagerungsabschnitt. Das Grundkonzept der Einlagerungszelle ist für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente identisch, doch die einzelnen Elemente werden in ihren Abmessungen und ihrer Detailsausführung an die verschiedenen Abfallarten angepasst.

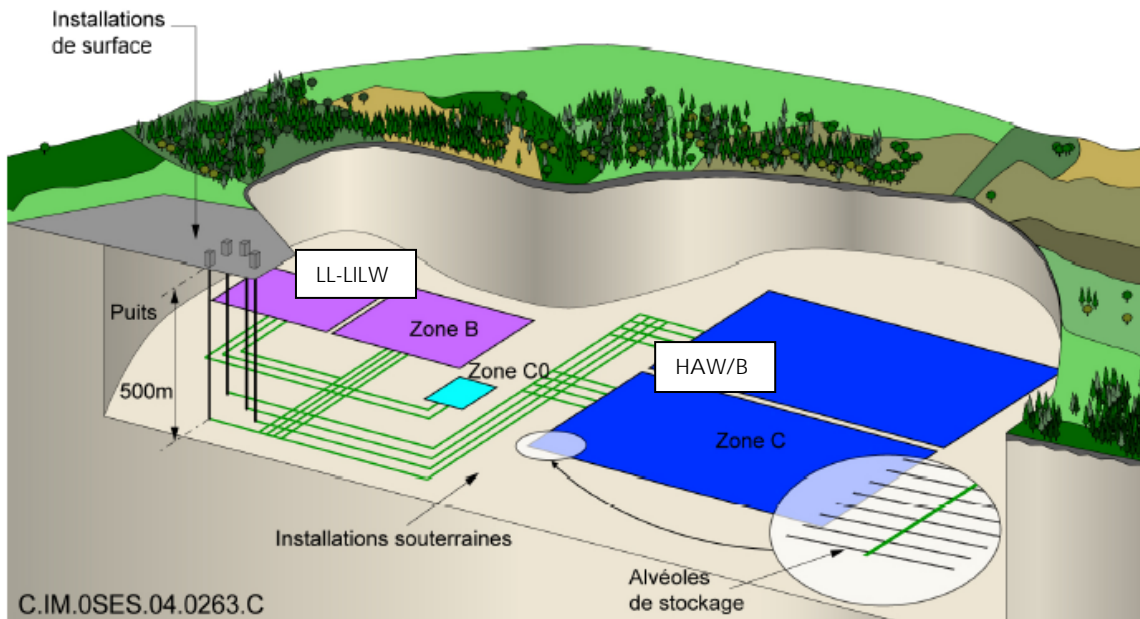


Abbildung 2-11: Schematisches Layout des geplanten Endlagers – Frankreich /2-25/

Bei der Einlagerung von hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfällen beträgt der Abstand zwischen den Achsen der Einlagerungszellen in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde zwischen 8,5 m und 13,5 m. Die Einlagerungszellen haben einen Durchmesser von 700 mm und eine Länge von ca. 40 m, wovon 8 m auf den Bohrlochkopf und 32 m auf den Einlagerungsabschnitt entfallen (Abbildung 2-12). Der Einlagerungsabschnitt ist mit einem Metallrohr mit einer Wandstärke von 25 mm bestückt. Das Rohr wird aus Kohlenstoffstahl gefertigt und ist für eine Standzeit von ca. 1000 Jahren ausgelegt. Die Abfallgebände werden im Einlagerungsabschnitt durch mit Sand gefüllte Behälter voneinander getrennt. Der Verschluss der Einlagerungszelle erfolgt mit einem Metallpropfen und einem Bentonit-Beton-Stopfen. Der Metallpropfen ist mit einer Keramikschicht überzogen, um galvanische Effekte beim Kontakt mit dem Gleitrohr zu vermeiden. Er soll eine eventuelle Rückholung der Gebinde erleichtern.

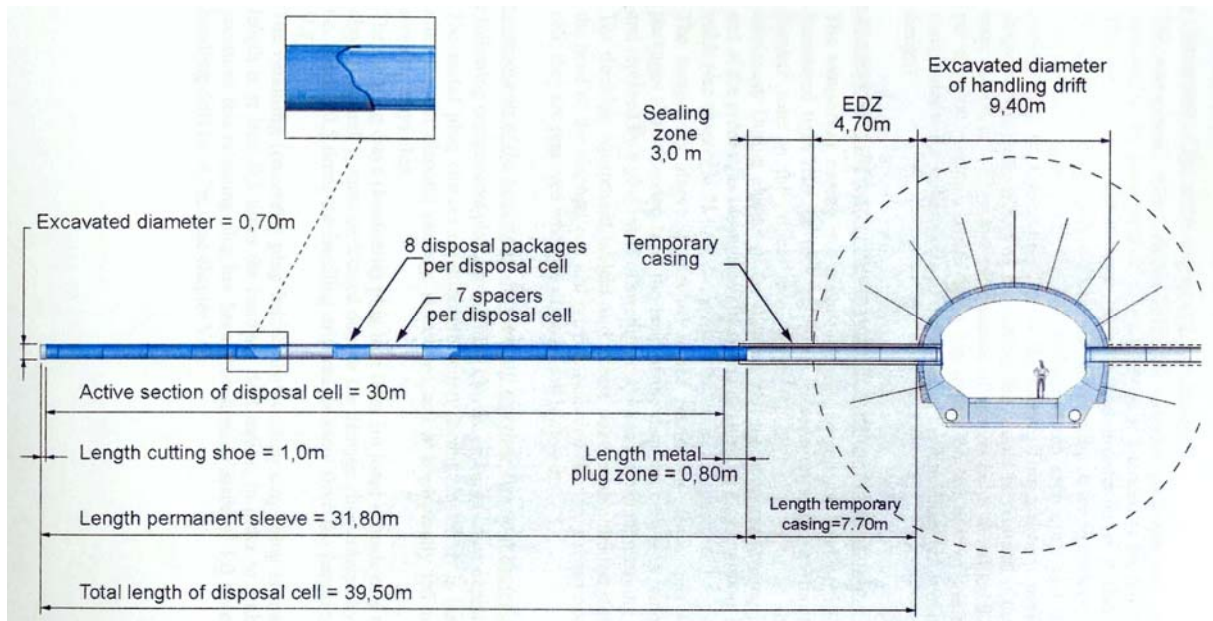


Abbildung 2-12: Einlagerungszelle für verglaste HAW – Frankreich /2-24/

Das Konzept für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente sieht eine Einbringung der Abfallgebände in ca. 45 m lange Bohrlöcher mit Durchmessern von 2,5 m bis 3,3 m (je nach Gebindetyp) vor. Die Gebände werden in ein zentrales Einlagerungsrohr eingebracht, das von einer 80 cm starken Bentonitschicht umgeben ist. Die Einlagerungsbohrlöcher sind mit perforierten Stahlrohren verkleidet, um den Zutritt von Feuchtigkeit und damit eine Wiederaufsättigung des Bentonits mit Wasser zu ermöglichen. Das Endlagerkonzept für die ausgedienten Brennelemente wurde nach ANDRA-interner Überprüfung in 2007 zunächst ausgesetzt. Über die Wiederaufnahme und ggf. Weiterführung der entsprechenden Planungen wird zu einem späteren Zeitpunkt entschieden.

2.2.3 Schweiz

Seit Ende der 60er Jahre werden in der Schweiz Untersuchungen zur Eignung von tiefen geologischen Formationen für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen durchgeführt. In einer ersten Phase wurde im Rahmen des Projektes Kristallin die Endlagerung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz untersucht. Mit dem „Projekt Gewähr 1985“ konnte die generelle Eignung des Gesteins nachgewiesen werden /2-26/.

Gleichzeitig wurde vom Bundesrat die Ausdehnung der Untersuchungen auf Sedimentgesteine gefordert. Von der Nagra wurden dazu Gesteinsformationen der Unteren Süßwassermolasse und des Opalinus-Tons untersucht und der Opalinus-Ton als potentiell geeignete Gesteinsformation ausgewählt. Die seit 1997 laufenden Untersuchungen des Opalinus-Tons im Zürcher Weinland haben die Erwartungen an das Wirtsgestein bestätigt. Ende 2002 wurde für diese Formation der Entsorgungsnachweis für hochradioaktive Abfälle, ausgediente Brennelemente und langlebige α -haltige Abfälle fertiggestellt /2-27/.

Zur Eignungsuntersuchung des Opalinus-Tons für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurde am Mont Terri, Kanton Jura, ein Untertagelabor errichtet. Die Forschungsarbeiten in diesem Labor werden mit breiter internationaler Beteiligung, darunter auch deutsche Organisationen, durchgeführt.

Die geologischen Verhältnisse im Opalinus-Ton des Zürcher Weinlandes wurden durch Bohrungserkundung und Laboruntersuchungen analysiert. Nach den Ergebnissen von Spannungsmessungen sind bei der Errichtung eines Endlagers keine bergbaulichen Schwierigkeiten zu erwarten /2-28/. Das von der NAGRA entwickelte Endlagerkonzept für HAW und ausgediente Brennelemente basiert auf dem von der „Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle“ entwickelten Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung.

Demnach soll das Endlager in der Mitte des Opalinus-Tons in einer Teufe von ca. 650 m angeordnet werden. Der Zugang von den Tagesanlagen zum Grubengebäude soll über eine Rampe und einen Schacht erfolgen, die beide über einen Betonausbau gesichert werden. In der Betriebsphase wird die Rampe dem Transport der Abfallgebände nach untertage dienen. Vor der Errichtung der Einlagerungsstrecken im Hauptfeld wird das Pilotendlager errichtet. Dieses besteht aus zwei kurzen Einlagerungsstrecken und einer Kontrollstrecke. Diese Strecken sind von beiden Seiten zugänglich und mit Messgeräten ausgerüstet.

Für das Design der Einlagerungsbereiche für HAW und ausgediente Brennelemente ist die maximal zulässige Grenztemperatur von 125°C im äußeren Bereich des Bentonitbuffers konzeptbestimmend, die durch den Wärmeeintrag der radioaktiven Abfälle nicht überschritten werden darf. Die Einhaltung dieser Anforderung wird durch eine entsprechende Beladung der Behälter, durch den Abstand der Behälter in der Strecke, die Wärmeleitfähigkeit des Puffermaterials und den Abstand der Einlagerungsstrecken sichergestellt.

Die Festlegung auf eine Streckenlagerung der Abfallbehälter ergibt sich aus der leichteren Durchführung einer horizontalen Einlagerung und aus einer begrenzten Mächtigkeit des Opalinus-Tons von 105-125 m. Die Streckenlagerung maximiert daher die Dicke der Tonbarriere.

Ausgediente Brennelemente sollen entweder in Stahlguss- oder Kupferbehältern eingelagert werden, verglaste Abfälle in Edelstahlbehältern. Die Einlagerung dieser Abfallgebände erfolgt in einem Einlagerungsfeld, das zwischen einer Transportstrecke und der sogenannten Errichtungstrecke angeordnet ist (Abbildung 2-13). Die Einlagerungsstrecken haben einen Durchmesser von ca. 2,5 m und eine Länge von 800 m. Sie sind in einem Abstand von 40 m angeordnet. Der Streckenverlauf soll längs zu den horizontalen Hauptspannungen des Wirtsgesteins orientiert werden, um die auffahrungsbedingten Auflockerungen durch Spannungsentlastung zu reduzieren. Bei der Einlagerung werden die Endlagerbehälter auf einem Unterbau aus hochkompaktierten Bentonitblöcken abgelegt (Abbildung 2-14). Die Verfüllung des verbleibenden Hohlraums bis zur Streckenkontur erfolgt mit Bentonitpellets bzw. -granulat.

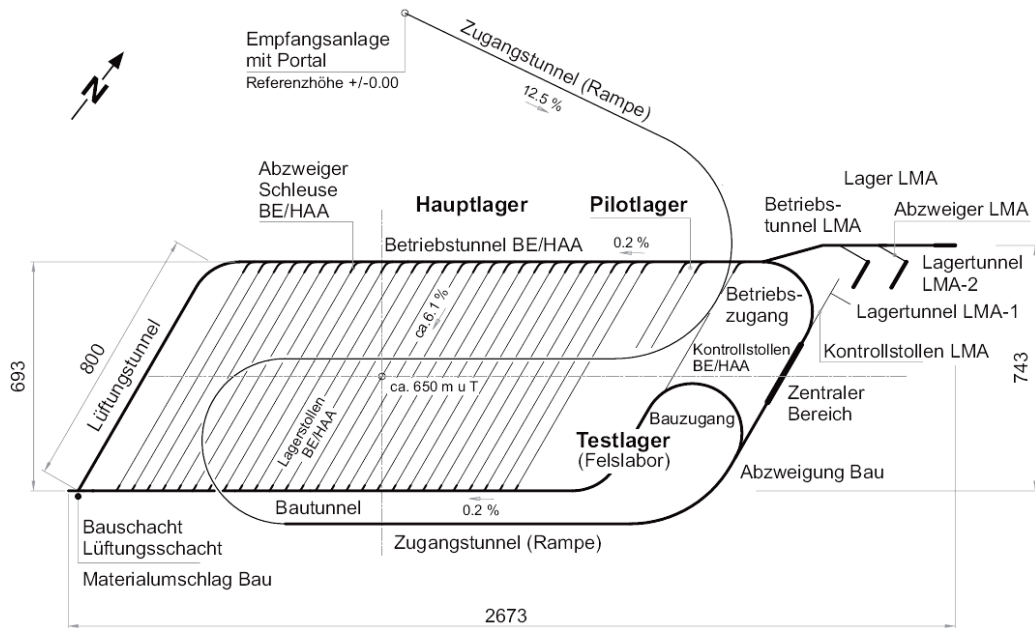


Abbildung 2-13: Endlagerdesign für hoch- und mittelradioaktive Abfälle im Opalinus-Ton – Schweiz /2-27/

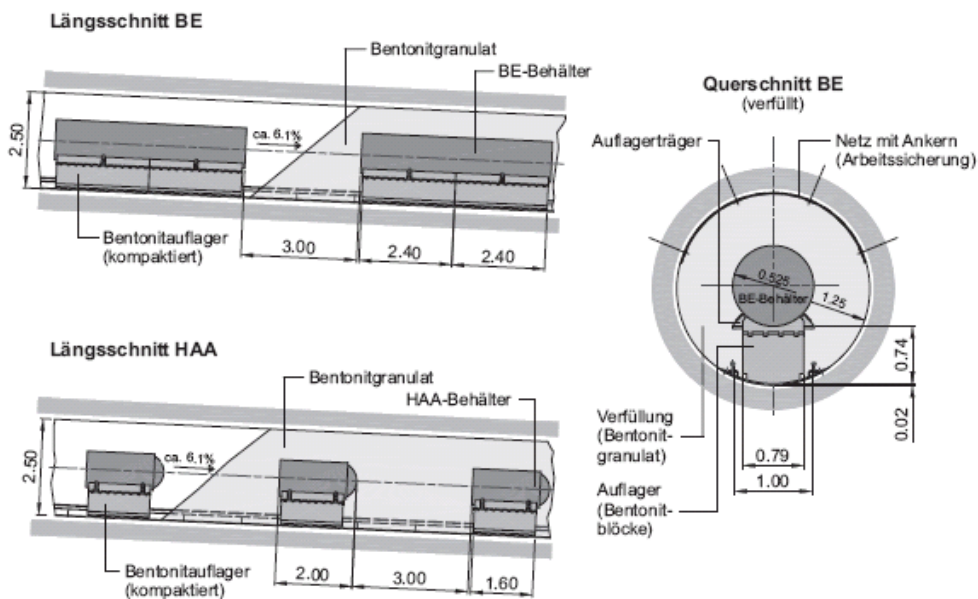


Abbildung 2-14: Streckenlagerung von Gebinden mit ausgedienten Brennelementen (BE) und verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) – Schweiz /2-27/

Die mittelradioaktiven Abfälle sollen in zwei vom Hauptfeld getrennten Einlagerungsstrecken endgelagert werden. Diese mit Betonelementen ausgebauten Strecken haben eine Breite von 7 m und eine Höhe von 9 m. Nach der Einlagerung werden die Resthohlräume mit Zement verfüllt.

2.2.4 Deutschland

Die Bundesregierung traf Ende der 90er Jahre die Entscheidung, zusätzlich zu dem in Deutschland bevorzugten Endlagermedium Salz alternative Wirtsgesteine und entsprechende Endlagerkonzepte vergleichend zu untersuchen. In diesem Zusammenhang führte die BGR (Hannover) Untersuchungen und Bewertungen von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen durch /2-32/. Diese grundlegenden Untersuchungen wurden in einer Reihe von Forschungsprojekten vertieft. Im Zuge des Projektes ERATO wurde schließlich ein standortunabhängiges Referenzkonzept für die Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und HAW in unterkretazischen Tonformationen in Norddeutschland entwickelt /2-18/. Dieses Konzept baut auf Erfahrungen und Konzepten in Belgien, Frankreich und der Schweiz auf und passt diese an die Anforderungen in den norddeutschen Unterkreidetonen an. Auf der Grundlage einer Alternativenprüfung wurde die Bohrlochlagerung als Referenzkonzept ausgewählt (Abbildung 2-15). Die technische Machbarkeit des Endlagerkonzeptes wurde aufgrund einer Analyse und Bewertung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik belegt.

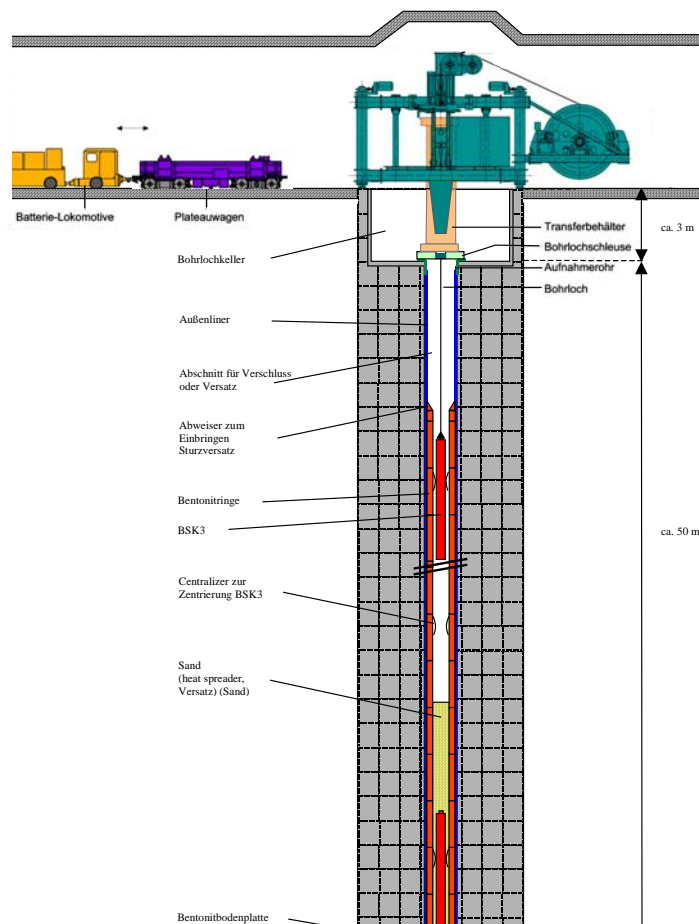


Abbildung 2-15: Deutsches Referenzkonzept für die Bohrlochlagerung in Ton /2-18/

2.3 Salzformationen

In den 60er Jahren wurde in Deutschland die grundsätzliche Entscheidung zur Endlagerung aller radioaktiven Stoffe in tiefen geologischen Formationen getroffen. Dabei wurden basierend auf Untersuchungen der Bundesanstalt für Bodenforschung Salzformationen als prinzipiell geeignete Wirtsgesteine angesehen. Hauptargumente hierfür sind die Dichtheit, die Plastizität, die Trockenheit und die gute Wärmeleitfähigkeit von Salz. Seit Mitte der 70er Jahre wurden in Deutschland Standortuntersuchungen durchgeführt, in deren Ergebnis der Salzstock bei Gorleben als eignungshöffiger Standort für weitergehende Untersuchungen im Hinblick auf eine spätere Nutzung als Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle ausgewählt wurde. 1979 wurde mit Standortuntersuchungen – zunächst von der Oberfläche – begonnen. 1983 stimmte die Bundesregierung der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben zu, die 1985/1986 mit der Schachtabteufung begonnen wurde. In den Folgejahren wurde der Salzstock über zwei Schächte, einen Infrastrukturbereich sowie Erkundungsstrecken in 840 m Teufe großräumig erschlossen und mit der untertägigen geowissenschaftlichen Erkundung begonnen. Parallel hierzu wurden umfangreiche Grundlagenforschung im Hinblick auf die physiko-chemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und Abfalltypen durchgeführt. Seit Anfang der 80er Jahre wurden die Forschungsarbeiten durch Demonstrationsversuche zum Nachweis der technischen Machbarkeit der Direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente im Salz sowie systemanalytische Arbeiten zu Endlagerkonzepten ergänzt. Als Ergebnis wurde Mitte der 80er Jahre ein Referenzkonzept für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (Abbildung 2-18) entwickelt.

Im Zuge einer Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen zum Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung wurde ein Moratorium von mindestens 3 bis maximal 10 Jahren für die Erkundungsarbeiten im Salzstock Gorleben beschlossen. Im Oktober 2000 wurden die Arbeiten in Gorleben dementsprechend unterbrochen. Weiterhin wurde durch die Atomgesetz-Novelle von 2002 die Entsorgung von Kernbrennstoffen auf die direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen beschränkt.

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Regelungen, die eine Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle vorsehen.

Das Endlagerkonzept im Salzgestein ging in dem Abschlussbericht von 1998 gemäß der „Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben“ /2-29/, /2-30/ von der gemeinsamen Endlagerung von wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem einzigen Endlager in einem Salzstock aus. Die Errichtung der Einlagerungssohle ist dort in einer Teufe von ca. 870 m vorgesehen (Abbildung 2-16, /2-31/). Der Zugang zu den Untertageanlagen des Endlagers erfolgt über zwei Schächte mit einem Durchmesser von ca. 7,5 m. Schacht 1 ist Personal- und Materialschacht, über Schacht 2 sollen die Abfallgebände transportiert werden. Die Querschnitte der Richtstrecken und Querschläge wurden der vorgesehenen Transporttechnik angepasst. Die Höhe beträgt 4,2 m und die Sohlenbreite 7 m.

Die Einlagerung der verschiedenen Abfallarten sollte in räumlich getrennten Flügeln des Endlagers erfolgen /2-30/. Die Lage der Einlagerungsfelder sowie die Länge der Einlagerungsstrecken wird an die Geologie des Salzstockes angepasst (Abbildung 2-17). Die Einlagerung beginnt in den Strecken am äußersten Ende des Grubengebäudes und schreitet dann in Richtung der Schächte vorwärts. Dabei werden alle verfüllten Einlagerungsfelder und die Querschläge und Richtstrecken sukzessive abgeworfen.

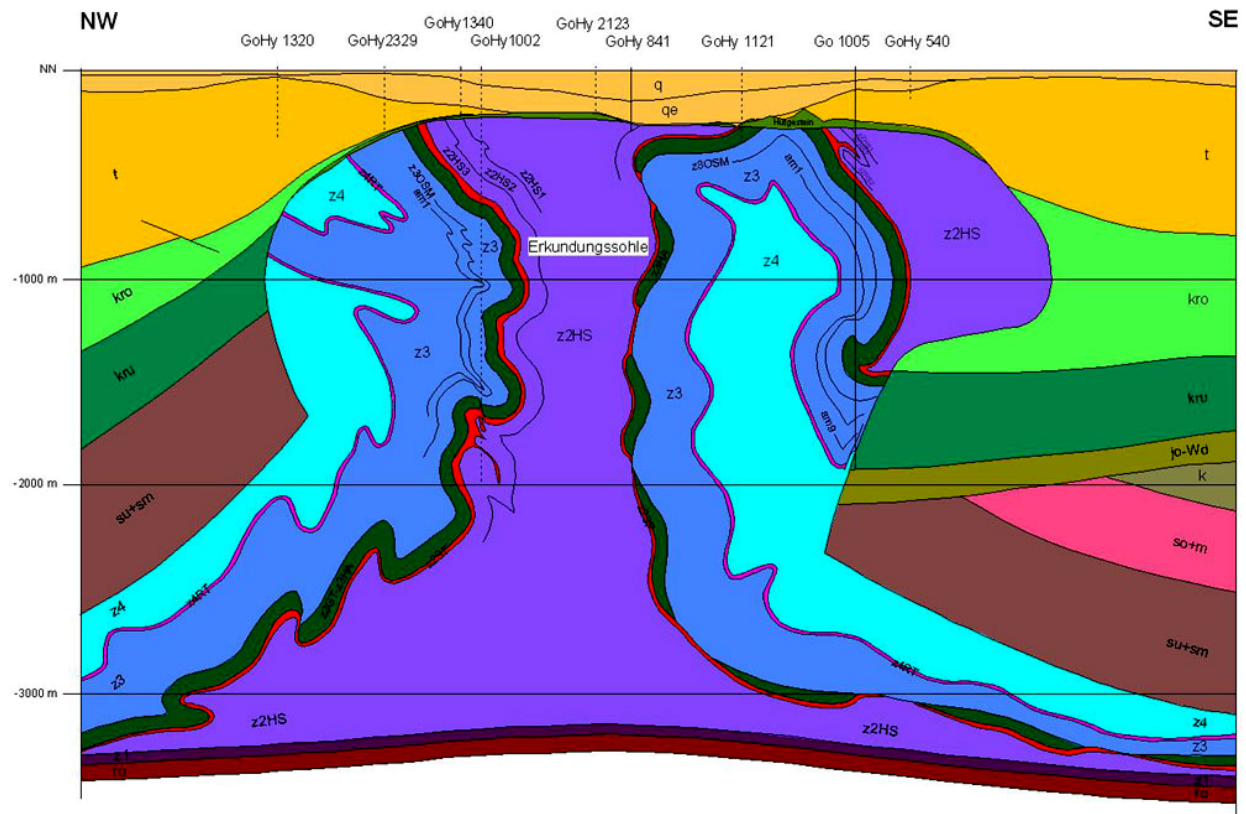
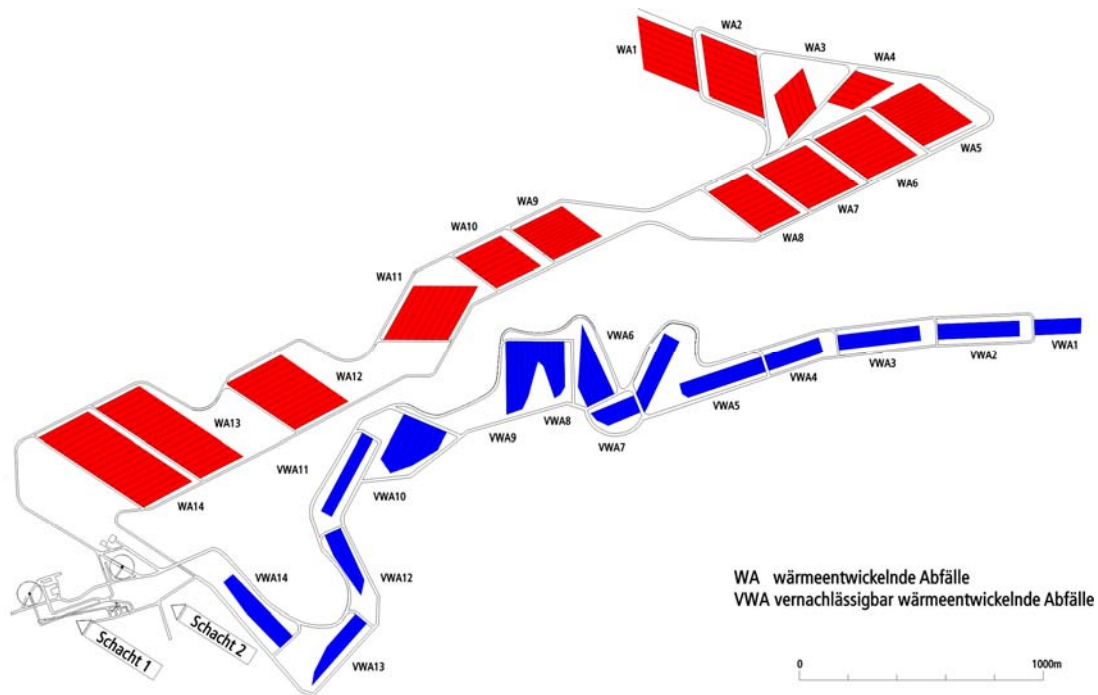


Abbildung 2-16: Geologischer Vertikalschnitt durch den Salzstock Gorleben – Deutschland. Die heutige Erkundungssohle befindet sich in 840 m Teufe, ca. 30 m über der möglichen Einlagerungssohle /2-31/.



**Abbildung 2-17: Arbeitsmodell Gorleben /2-29/
Anpassung des Endlager-Lay-outs an die geologischen Verhältnisse.
Einlagerungsfelder. Rot: wärmeentwickelnde Abfälle, blau: vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle – Deutschland.**

Mit dem abschließenden Urteil des Bundesverwaltungsgerichtes zum Planfeststellungsverfahren für das Endlager Konrad im März 2007 und der daraufhin unverzüglich begonnenen Arbeit für dessen Umrüstung zu einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle erübrigt sich die weitere Betrachtung eines einzigen Endlagers für alle Arten von radioaktiven Abfällen.

Für die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle wurden drei Varianten betrachtet /2-30/:

- Die kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung, Bohrlochlagerung in 300 m tiefen Bohr-
löchern;
- die kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung, Bohrlochlagerung in 30 m tiefen, ge-
neigten Kurzbohrlöchern; und
- die ausschließliche Bohrlochlagerung.

Streckenlagerung

Für die Streckenlagerung sind POLLUX-Behälter für ausgediente Brennelemente sowie verschiedene Typen von CASTOR-Behältern für Brennelemente aus Forschungsreaktoren vorgesehen /2-30/: Die Streckenlagerungsfelder sind zwischen zwei Richtstrecken angeordnet. Von den Querschlägen gehen bis zu 300 m lange Einlagerungstrecken mit einem Querschnitt von 3,4 m x 4,5 m ab. Der Abstand zwischen den Einlagerungstrecken beträgt

36 m. Die technische Machbarkeit der Streckenlagerung wurde durch Demonstrationsversuche nachgewiesen.

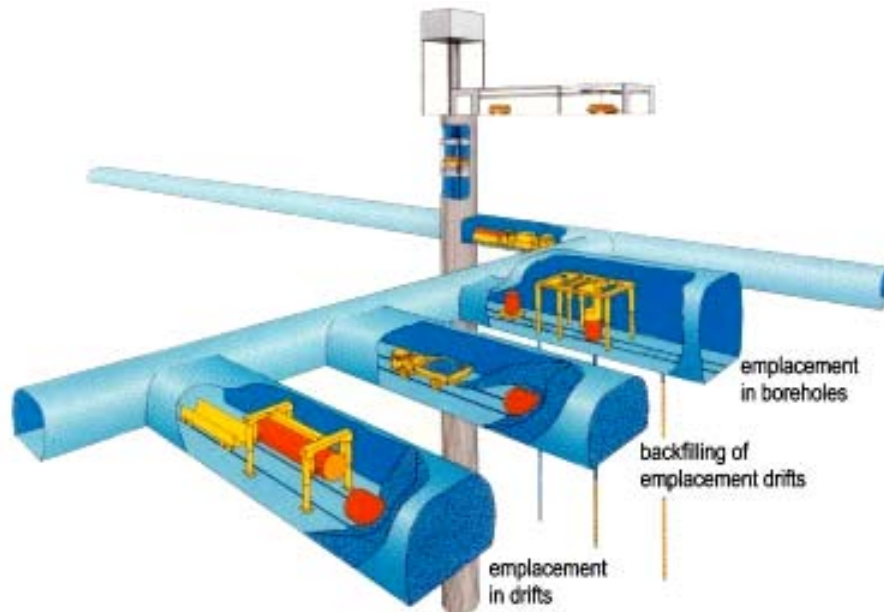


Abbildung 2-18: Referenzkonzept im Salz für die Direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und von Wiederaufarbeitungsabfällen – Deutschland

Bohrlochlagerung in vertikalen Langbohrlöchern

Für die Einlagerung von wärmeentwickelnden, ungeschirmten Gebinden der Typen BSK 3 für ausgediente Brennelemente sowie HAW-, CSD-B- und CSD-C-Kokillen ist die Bohrloch-einlagerung in vertikalen Bohrlöchern mit einer Länge von ca. 325 m möglich /2-30/. Die nutzbare Bohrlochlänge beträgt ca. 290 m. Nach Füllung eines Bohrloches mit Gebinden werden die oberen 10 m des Bohrlochs mit Salzgrus verfüllt und mit einem Verschluss abgedichtet. Der Querschnitt der Zugangsstrecke wird den Erfordernissen der Einlagerungs-maschine angepasst und misst 6,0 m x 6,6 m.

Für die Bohrlochlagerung sollen die vorgesehenen Einlagerungstrecken in regelmäßigen Abständen mit Bohrlöchern versehen werden, die einen betonierten Bohrlochkeller besitzen und mit einem Bohrlochdeckel verschlossen werden. Die Bohrlochabstände richten sich nach der Wärmeleistung der einzulagernden Gebinde und werden durch Modellrechnungen ermittelt. Die technische Machbarkeit der Bohrlochlagerung wird z. Z. durch einen Demonst-rationsversuch nachgewiesen (Abbildung 2-19).

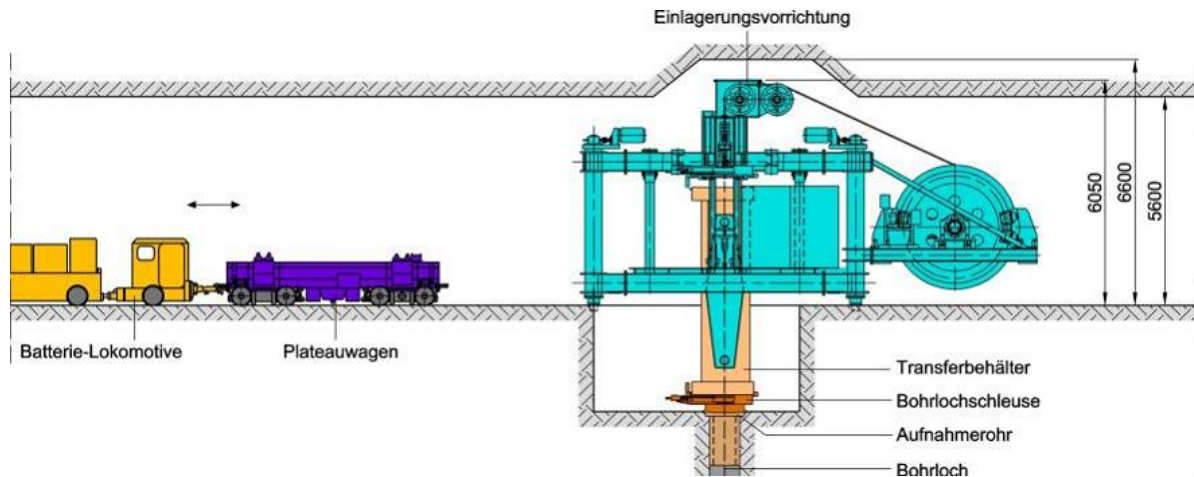


Abbildung 2-19: Prinzipskizze vom technischen Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in tiefe Bohrlöcher / Foto vom Versuchsstand zur Erprobung der Komponenten im Maßstab 1:1 – Deutschland /2-30/

Bohrlochlagerung in geneigten Kurzbohrlöchern

Die zweite Konzept für die Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden, unabschirmten Gebinden sieht die Einbringung in 31 m lange Kurzbohrlöcher vor, die in einem Winkel von 45° geneigt sind (Abbildung 2-20). Die nutzbare Bohrlochlänge beträgt bei Kurzbohrlöchern abzüglich Bohrlochverschluss und nicht abförderbares Bohrklein 20 m.

Aufgrund der Neigung von Bohr- und Einlagerungsmaschine kann die Höhe der Einlagerungsstrecken um einen Meter reduziert werden. Die Entwicklung der entsprechenden Einlagerungsgeräte befindet sich noch im Konzeptstadium /2-30/. Befüllung und Verschluss

der Einlagerungsbohrungen sowie das Abwerfen der Einlagerungsstrecken erfolgt analog zum oben dargestellten Konzept für Tiefbohrungen.

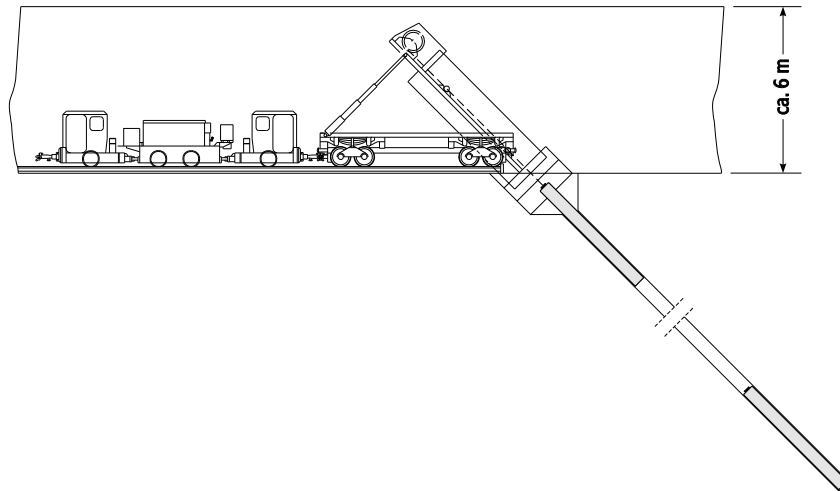


Abbildung 2-20: Prinzipskizze vom technischen Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in geneigte Kurzbohrlöcher – Deutschland /2-30/

3 Berg- und bautechnische Maßnahmen zur Herstellung und Instandhaltung von Grubenbauen

3.1 Grundlagen

Im Folgenden werden als Grundlage für die anschließende Darstellung der wirtsgesteins-spezifischen Auffahrungskonzepte die wichtigsten bergbautechnischen Verfahren kurz dargestellt. Die Angaben stammen aus Lehrbüchern, Unterlagen der Maschinenhersteller und verschiedenen Fachartikeln (vgl. /3-1/ bis /3-11/).

Die Verbindung der Erdoberfläche mit den untertägigen Grubenräumen wird je nach den lokalen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen mit Hilfe von Schächten oder Rampen hergestellt.

3.1.1 Bau von Schächten im Injektionsverfahren

Kristallingesteine oder sedimentäre Festgesteine sind in der Regel standfest aber wasserführend, sei es in Klüften, Spalten, Poren oder sonstigen Hohlräumen. In dieser Situation bietet sich ein Abteufen von Schächte mit Hilfe des sogenannte Injektionsverfahrens an. Bei diesem Verfahren werden die Wasserwegsamkeiten durch Einpressen eines Injektionsmittels verschlossen, so dass das Gebirge vor dem Durchteufen abgedichtet wird. Das Fernhalten des Wassers vom Schachtinneren empfiehlt sich nicht nur, um Abteufarbeiten auf der Sohle zu erleichtern oder erst möglich zu machen, sondern auch um später an dauerhaften Wasserhebungskosten zu sparen und Korrosionsschäden am Schachtausbau und an Einbauten im Schacht zu verhindern. Enthält zusetzendes Wasser Sulfate oder Kohlensäure oder hat es sonstige korrodierende Eigenschaften, bleiben Folgen chemischen Angriffs nicht auf Stahl beschränkt, sondern treten ebenso an Gusseisen, Mörtel und Beton auf.

In lockerem Gebirge sind die Hohlräume und Poren von anderer und unregelmäßigerer Form und Größe als die Hohlräume in standfestem Gestein. Um Aussagen über die Injizierbarkeit machen zu können, muss die Ungleichförmigkeit des Gesteins ermittelt werden. Je gleichkörniger das Gestein ist, desto besser lässt es sich injizieren.

Während Lockergesteine Porenwasserleiter sind, besitzen Festgesteine meist nur einen geringen Porenraum. Die Wasserführung ist in diesem Fall an andere Hohlräume wie Schichtfugen, Klüfte, Spalten und Störungen, bei Karbonaten auch Auswaschungen (Verkarstungen), gebunden.

Die Weite von Fugen, Klüften, Spalten oder Störungen kann vom Bruchteil eines Millimeters bis zu mehreren Zentimetern reichen.. Dabei kann schon ein feiner Spalt von 0,1 mm Weite erhebliche Wassermengen in den Schacht strömen lassen, abhängig davon, wie er von der Schachtröhre angeschnitten ist und unter welchem Druck das Wasser steht. Zum Injizieren von Klüften im standfesten Gebirge reichen im Allgemeinen einfache Suspensionen von Normalzement aus, dessen größte Körner einen Durchmesser von maximal 0,1 mm aufweisen.

Die zum Abdichten von Wasserzutritten verwendeten Injektionsmischungen können durch den Grad der Dispersion, d. h. nach der Größe der in der Dispersionsflüssigkeit enthaltenen Teilchen, und durch ihre Stabilität, d. h. nach ihrer Neigung zum Niederschlag, an die spezifischen Anforderungen angepasst werden. Grobdisperse Mischungen sind einfache Suspensionen von Zement in Wasser, sogenannte Zementsuspensionen, ferner Ton-Zement- oder Bentonit-Zement-Suspensionen. Als kolloiddispers bezeichnet man beispielsweise die Injektionsmittel Wasserglas, Kalziumchloridlauge oder Bitumen, als molekular- oder ionendispers die unter den Sammelbegriff Kunstharz fallenden Mischungen.

Für das Durchführen der Zementation bieten sich zwei Möglichkeiten:

- Zementieren von übertage aus; und
- Zementieren von der Schachtsohle aus.

Beim Zementieren von übertage aus bohrt man außerhalb des projektierten Schachtquerschnittes, ca. 10 m bis 30 m vom Schachtmittelpunkt entfernt, zwei oder drei, manchmal auch mehr Bohrlöcher bis zur vorgesehenen Endteufe des Schachtes und verpresst die Zementsuspension mit Hochdruckpumpen. Auf diese Weise versucht man spätere Unterbrechungen der Teufarbeiten zu vermeiden, wie sie mit dem absatzweisen Vorbohren und Zementieren der Bohrlöcher von der Abteufsohle aus zwangsweise verbunden ist. Die Praxis hat gezeigt, dass zumindest weniger häufig von der Sohle aus zementiert und somit die Arbeiten unterbrochen werden müssen. Das Verpressen von übertage hat häufig einen erheblichen Zementverbrauch zur Folge.

Beim Zementieren von der Schachtsohle aus werden die Injektionsbohrungen senkrecht nach unten und fächerförmig nach schräg unten geteuft und anschließend die Verpressarbeiten vorgenommen. Ist die Abteufsohle nicht fest genug, um bei dem zu erwartenden Wasserdruck den Standrohren ausreichend Halt zu bieten, wird ein Betonklotz eingebracht, in den die Standrohre eingelassen sind. Vor allem braucht man einen Betonklotz, falls ein Wassereinbruch aus der Sohle befürchtet wird oder schon eingetreten ist. Auf der Schachtsohle wird zunächst als Sickerschicht oder Drainage ein Schotterbett aufgeschüttet, aus dem so lange gepumpt wird, bis der anschließend eingebrachte Beton genügend fest ist, den Wasserdruck aufzunehmen, ohne zu reißen oder angehoben zu werden.

Zum Abteufen des Schachtes wird in weichem Gebirge aus dem Tiefbau bekanntes Grabgerät, wie z. B. Löffelbagger, Senkschaufellader oder Teilschnittmaschinen eingesetzt. Das Lösen ohne Bohr- und Sprengarbeiten hat den Vorteil eines fortwährenden Lösens des Gesteinsmaterials aus der Sohle und eines unterbrechungsfreien Wegräumens und Förderns des Haufwerks.

In festem Gebirge erfolgt der Vortrieb meist durch Bohr- und Sprengverfahren. Gebohrt wird entweder mit schweren Bohrhämmern oder mit Drehbohrmaschinen. Bevorzugt werden pneumatische Hammerbohrmaschinen eingesetzt. Bei modernen Schachtsprenglochbohrgeräten werden mehrere (bis zu sechs) Bohrmaschinen gleichzeitig eingesetzt. Die Geräte sind schnell auf- und abrüstbar und können zusammengeklappt transportiert werden. Sehr hartes

Gebirge kann auch mit hydraulischen Hammerbohrmaschinen am selben Gerät abgebohrt werden. Zur Durchführung der Bohrarbeiten genügen gewöhnlich fünf bis acht Mann auf der Sohle.

Die Abschlagslänge geht beim Bohr- und Sprengverfahren meist nicht über 4 m hinaus. Der Bohrlochaufwand je Quadratmeter Ausbruchquerschnitt beträgt 1,3 bis 2, seltener 3 Loch, das sind 1,3 bis 2, oder 3 Bohrmeter je Festkubikmeter Gestein.

Das Wegräumen des Haufwerks kann mit Wurfschaufellader, Seitenkipplader oder mit einem kleinen Tieflöffelbagger erfolgen. Ob einer solchen Lademaschine der Vorzug vor dem Greifer gegeben wird, hängt in erster Linie vom Ausbruchdurchmesser ab.

Weltweit ist der Einsatz von Mehrschalengreifern (Polypgreifern) (Abbildung 3-1) mit bis zu acht Greifschalen und einem Fassungsvermögen von bis zu 1,2 m³ beim Schachtteufen sehr verbreitet. Die Greiferschalen öffnen und schließen mittels Druckluft. Der Greifer hängt an einem Seil an einer beweglichen Greiferbühne ca. 10 m über der Abteufsohle. Oft ist die Greiferbühne zugleich unterster Tragboden einer mehrbödigen Abteufbühne, wie sie beim gleichzeitigen Teufen und Ausbauen benutzt wird. An neueren Greiferbühnen kann die Greiferwinde horizontal im sogenannten Rundlauf und auch radial fahren, so dass das frühere beschwerliche und unfallträchtige Schwenken des Greifers von Hand entfällt. Gesteuert wird der Greifer von einem Schachthauer in einer Kabine, die an der Greiferbühne befestigt ist und einen guten Überblick über die Abteufsohle erlaubt.



Abbildung 3-1: Polypgreifer

Die Herstellungskosten von Schächten, die nach dem Verfahren des abschnittsweisen Teufens und Verpressens erstellt werden, hängen von der durchteuften Gesteinsart, vom Durchmesser, von der Tiefe, vom Wasserzufluss und der Art des Ausbaus ab. Legt man die in /3-1/ genannten Kosten unter Berücksichtigung der Preissteigerungen der letzten Jahre zugrunde, so ergibt sich ein Meterpreis von ca. 40.000 € bis ca. 55.000 €.

3.1.2 Bau von Schächten im Gefrierschachtverfahren

Das Gefrierschacht-Verfahren wendet man zum Durchteufen von lockerem, unverfestigtem und wasserführendem Gebirge an. Dabei werden um den späteren Ausbruchsquerschnitt des Schachtes herum lotrechte Gefrierbohrlöcher bis in das standfeste, wasserfreie Gebirge abgeteuft (Abbildung 3-2). Die Bohrlöcher werden im Drehbohrverfahren erstellt, wobei in der Regel mehrere Anlagen gleichzeitig eingesetzt werden. Je nach Teufe und Anzahl der Bohrlöcher dauert das Bohren meist zwei bis vier Monate. Von ausschlaggebender Bedeutung ist ein möglichst lotrechter Verlauf aller Gefrierbohrlöcher, damit der Frostmantel zuverlässig schließt. Zu diesem Zweck werden Bohrlochneigungsmesser in das Bohrgestänge eingelassen und Neigung und Richtung des Bohrloches kontrolliert. Stärkere Abweichungen von der Senkrechten müssen während des Bohrens korrigiert werden, wobei sich der Einsatz einer Bohrturbine bewährt hat. Auch hydraulische Im-Bohrloch-Motoren, sogenannte Dyna-Drills, werden eingesetzt.

In jedes Gefrierbohrloch wird ein unten geschlossener Strang aus Futterrohren eingebaut, in den man ein unten offenes Fallrohr geringeren Durchmessers einhängt (Abbildung 3-2). Jedes Rohrpaar wird mit einer leistungsfähigen Gefrieranlage verbunden, so dass ein Kälte-trägerkreislauf entsteht. Der Kälte-träger besteht aus einer Mischsole mit niedrigem Gefrierpunkt und strömt in der Regel aus einer Sammelzulaufleitung durch das Fallrohr zum Bohrloch-tiefsten, von wo er im Ringraum zwischen Gefrierrohr und Fallrohr wieder nach oben steigt.

Die Temperatur des Kälte-trägers wird an den Gefrierpunkt des im Gebirge enthaltenen Grundwassers und somit an dessen Salinität angepasst. Die entsprechende Temperaturspanne liegt zwischen ca. -20 °C bis -40 °C . Durch den Kälte-träger wird dem Gebirge fortlaufend Wärme entzogen, so dass zunächst um jedes Bohrloch ein allmählich wachsender Frostkörper entsteht. Benachbarte Frostkörper wachsen mit der Zeit zusammen und bilden einen standfesten und wasserdichten, kreisringförmigen Frostmantel im Gebirge, in dessen Schutz der Schacht abgeteuft werden kann.

Bei der Gefrieranlage können die Kreisläufe des Kältemittels, des Kälte-trägers und des Kühlwassers unterschieden werden. Das Kältemittel, meist Ammoniak oder Frigen, durchläuft wie bei allen Kompressionskälteanlagen einen Verdichter, einen Verflüssiger, eine Regeleinrichtung und einen Verdampfer. Bei mehrstufiger Verdichtung können im Verdampfer Temperaturen bis -45 °C erreicht werden. Der Verdampfer ist zugleich Wärmetauscher für den Kälte-träger, meist eine Mischsole, die im Wesentlichen Magnesiumchlorid (MgCl_2) und Kalziumchlorid (CaCl_2) enthält. Der Kälte-träger wird durch Umwälzpumpen ständig in

Bewegung gehalten. Die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf des Kälträgers am Verdampfer beträgt ca. 3 °C bis 5 °C.

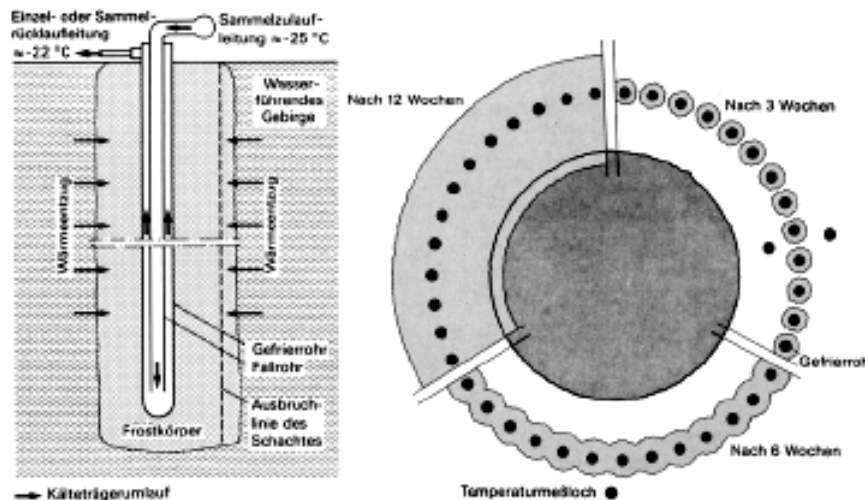


Abbildung 3-2: Gefrierschachtverfahren /3-1/

Der Verflüssiger für das verdichtete Kältemittel ist ebenfalls als Wärmetauscher ausgebildet, und zwar in Gestalt eines Röhrenkessels, in dem Kühlwasser durch Innenrohre strömt und das noch dampfförmige Kältemittel im Kesselraum um die Rohre herum so weit kühlt, bis es kondensiert. Ist genügend billiges Kühlwasser vorhanden, wird im offenen Kreislauf gearbeitet, d. h., das erwärmte Wasser kann ablaufen. Im anderen Fall, dem geschlossenen Kreislauf, wird das Wasser zurückgekühlt, bevor es durch eine Umwälzpumpe von neuem dem Verflüssiger zugeht. Die Entscheidung über die Art des einzusetzenden Kreislaufs hängt davon ab, ob für einen offenen Kreislauf genügend Wasser zur Verfügung steht oder zu welchen Kosten es beschafft werden kann.

Für das erfolgreiche Niederbringen eines Gefrierschachtes ist das Erzeugen eines ausreichend dimensionierten Frostkörpers Voraussetzung. Der Durchmesser des Gefrierlochkreises ist 4 m bis 10 m größer als der Aushubdurchmesser, so dass die Bohrlöcher 2 m bis 5 m vom späteren Ausbruch entfernt sind. Der Abstand der Bohrlöcher auf dem Gefrierkreis kann bei Kenntnis der wärmetechnischen Kennwerte auf 1,8 m erweitert werden.

Für den Gefriervorgang sind in der Regel zwei bis vier Monate erforderlich. Die erforderliche Zeitspanne hängt von der Dicke des Frostmantels, dem Gefrierlochabstand, der natürlichen Gebirgstemperatur und der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges sowie der Gefriertemperatur des Grundwassers ab. Durch den Gefriervorgang bildet sich zunächst ein Frostring, in dessen Zentrum sich ungefrorenes Gebirge befindet. Danach schreitet der Frost wegen der geringeren Wärmeverluste im Inneren des Frostmantels zum Schachtmittelpunkt hin schneller fort als nach außen in das Gebirge. Das Schließen des Frostmantels erkennt man an einem steigenden Grundwasserspiegel in seinem Inneren aufgrund der Volumenvergrößerung des sich bildenden Eises. Zum Druckausgleich und zur Kontrolle wird deshalb grundsätzlich ein sogenanntes Mittelloch gebohrt. Es empfiehlt sich, mit dem Abteufen möglichst früh zu beginnen, solange der Schachtkern noch „weich“ ist.

Bei den Schachteufarbeiten sollte das gefrorene Gebirge ohne stärkere Erschütterungen gelöst werden, damit die Gefrierrohre im Frostmantel nicht beschädigt werden. Daher werden häufig sogenannten „Felsbrecher“, wie z. B. eine Schlagkopfmachine benutzt, die unter der Abteufbühne drehbar gelagert ist. Gute Erfahrungen wurden auch mit umgebauten Teilschnittmaschinen oder mit umgebauten Walzenschrämladern gemacht. Sie arbeiten nicht nur gebirgsschonend, sondern erlauben es auch, den Schachtstoß gleichmäßig zu schneiden, was für das Einbringen des Stoßausbaus von Nutzen ist. Ein gebirgsschonender Vortrieb ist mit auch mit Bohr- und Sprengverfahren möglich, wenn Sprengstoffe geringer Brisanz (z. B. Donarit oder Ammon-Gelit 3) eingesetzt werden.

Das Bohren im gefrorenen Gebirge geschieht drehend, meist mit Kohlenbohrstangen oder mit Schlangenhohlbohrstangen und Luftspülung. Für druckluftbetriebene Arbeitsmaschinen und Werkzeuge empfiehlt sich eine übertage aufzustellende Anlage zur Drucklufttrocknung. Ein elektrohydraulischer Rundlaufgreifer ersetzt den sonst üblichen Druckluftgreifer. Der Schacht erhält vor dem Abschalten der Gefrieranlage einen wasserdichten Ausbau.

Die Kosten des Gefrierschachtverfahrens hängen im Wesentlichen vom Schachtdurchmesser, von der Gefrierteufe und von der Art des Ausbaus ab. Legt man die in /3-1/ genannten Kosten zugrunde und berücksichtigt die mittlerweile eingetretenen Preiserhöhungen, so ergeben sich für einen Schacht mit einem Durchmesser von 8 m und einer Teufe von 300 m Kosten von ca. 70.000 € bis ca. 100.000 € je Meter.

3.1.3 Bau von Schächten durch Bohrverfahren

Das Schachtbohren im stark wasserführenden, lockeren bis mäßig festen Gebirge kann mittels des Lufthebeverfahrens erfolgen (Abbildung 3-3). Mit diesem Verfahren wurden in Deutschland bis zu 500 m tiefe Schächte mit Durchmessern bis 8 m erstellt.

Das Schachtbohren wird in mehreren nacheinander folgenden Bohrstufen durchgeführt, wobei die Bohrlochwand von einer bis zur Rasensohle anstehenden und durch Aufschlammung kolloidalen Tons spezifisch schwer gemachten Flüssigkeitssäule mit einer Dichte von ca. $1,2\text{g/cm}^3$ unter Gegendruck und somit stabil gehalten wird. Lose Sande erweisen sich dabei als standfest und Tonschichten werden am Hereinquellen gehindert. Stark geklüftete Schichten neigen zu Nachfall, weshalb das Verfahren mit dem Gefrierverfahren im Wettbewerb steht. Bis ca. 6,5 m Durchmesser und bis 300 m Teufe sind Bohrschächte schneller und kostengünstiger herzustellen als Gefrierschächte.

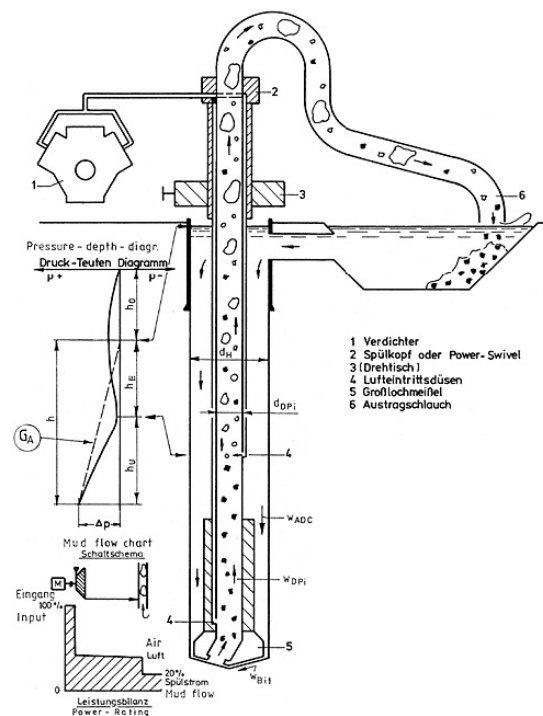


Abbildung 3-3: Lufthebebohrverfahren /3-1/

Der Schacht wird stufenweise abgebohrt, wobei zunächst z. B. ein 2 m weites Vorbohrloch bis zur Endteufe hergestellt wird. Die Abmessungen der weiteren Bohrstufen und die Art der verwendeten Bohrer richten sich nach der Gesteinsfestigkeit. Das mit dem Bohrstrang übertragbare Drehmoment ist für die Größe der jeweils zu bearbeitenden Kreisringfläche auf der Schachtsohle maßgebend. Das Bohrgut wird von der Dickspülung, die man auch als Gegen-spülung oder indirekte Spülung bezeichnet, nach übertage getragen, wobei Druckluft in das Bohrgestänge eingeblasen wird. Das leichtere Druckluft-Trübe-Gemisch steigt im Gestänge mit einer Geschwindigkeit von bis zu 5 m/s auf, wobei es selbst Gesteinsbrocken bis 30 kg Masse und 25 cm Durchmesser durch das Gestänge und den Spülschlauch mitnimmt. Die indirekte Spülung ist erforderlich, da im gebohrten großen Querschnitt die direkte Spülung keine zum Austrag des Bohrkleins ausreichende Geschwindigkeit erreichen kann. Der Trübespiegel im Schacht muss gleichmäßig bis zur Rasensohle erhalten bleiben. Verluste durch ein Abfließen der Spülung in das Gebirge und Mehrbedarf durch Bohrfortschritt müssen durch ständiges Nachmischen ausgeglichen werden.

Die Einrichtungen zum Bohren von Schächten im festen Gebirge ähneln leistungsfähigen Rotary-Anlagen mit Antrieb des Bohrwerkzeugs von übertage durch Drehtisch und Gestänge. Bei anderen Verfahren ist der Antrieb des Bohrwerkzeugs im Bohrkopf untergebracht.

Das Vorbohrloch für das Schachtbohren mit großem Durchmesser muss in einem vorher errichteten Grubenbau enden. zum Erweitern der Vorbohrung sind derzeit drei Verfahren üblich:

- mit Gestänge von oben nach unten bohren: abwärts ziehend (Gesenkbohren),

- mit Gestänge von unten nach oben bohren: aufwärts ziehend (Aufbruchbohren), und
- ohne Gestänge von oben nach unten bohren: mit Antrieb im Bohrloch (Gesenkbohren)

Für die Errichtung von Tagesschächten wird in erster Linie das aufwärts ziehende Raise-Bohrverfahren angewandt. Die Bohrmaschine befindet sich an der Oberfläche, wobei das Gestänge durch das Vorbohrloch in den Grubenraum reicht. Das Gestänge wird mit dem Erweiterungsbohrkopf verbunden und dieser mit bis zu 1.700 kN und einem Drehmoment von bis zu 160 kNm nach oben gezogen. Der Erweiterungsbohrkopf trägt je nach Gesteinsart Kegelrollen unterschiedlicher Gestalt. Beim Bohren von unten nach oben ist unter sonst gleichen Bedingungen der Verschleiß am Bohrwerkzeug geringer, da das Bohrklein durch die Schwerkraft auch ohne Wasserzusatz nach unten fällt, die einzelne Bohrrolle also stets auf eine saubere Bohrlochsohle trifft.

Ohne Ausbau und Einbauten belaufen sich die Kosten für das Schachtbohren mit einem Durchmesser von 6 m auf 10.000 € bis 15.000 € pro Schachtmeter.

3.1.4 Rampen

Rampen sind geneigte Strecken, die eine Verbindung von übertage nach untertage herstellen. Sie werden im standfesten Gebirge angelegt und erlauben den Transport mit Rad- und Schienenfahrzeugen. Die Neigung der Rampe beträgt maximal ca. 10 gon, was ca. 15 % entspricht. Rampen vermeiden sogenannte „Knickstellen“ in der Versorgungsstruktur des Bergwerkes, die ein Umschlagen von z. B. Haufwerk oder Material auf ein anderes Förder- oder Transportmittel nötig machen. Bei Radfahrzeugen begünstigt die Rampe eine beliebige Verfügbarkeit des Gerätes im gesamten Grubengebäude. Die logistische Funktion der als Serpentine angelegten Strecken ist nicht nur auf Förderung und Transport beschränkt. Vielmehr haben sie auch alle sonstigen Funktionen der Versorgung und Entsorgung zu erfüllen, wie Wetterführung, Wasserhaltung und Zufuhr von Energie.

Das Auffahren der Rampe erfolgt gebirgsabhängig durch Bohren und Sprengen oder mit Hilfe von Teilschnittmaschinen. Eine genauere Beschreibung wird in Kap. 3.3 bei der Darstellung des Auffahrens der Strecken und Kammern gegeben.

3.2 Schächte und Rampen in den europäischen Endlagerprojekten

3.2.1 Kristallingesteine

Bezüglich der Errichtung von Endlagerbergwerken für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen kann auf umfangreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden, die weltweit im Bereich des Erzbergbaus sowie im Tunnelbau gesammelt wurden. Praktische Erfahrungen mit der Errichtung von Endlagerbergwerken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Kristallingesteinen liegen aus Schweden (SFR), Norwegen (Himdalen) und Finnland (Loviisa, Olkiluoto) vor. Diese Endlager befinden sich allerdings in relativ geringen Tiefen (60 –

120 m). Im Unterschied hierzu wurden die Untertagelabore Äspö (Schweden) und Onkalo (Finnland) in den geplanten Einlagerungsniveaus für ein Endlager für ausgediente Brennelemente errichtet. Für das Untertagelabor Onkalo sind 3 Schächte (2 Wetterschächte, 1 Personenschacht) sowie eine Rampe geplant. Das Untersuchungs-niveau befindet sich in einer Teufe von 520 m. Im Januar 2009 hatte die Rampe eine Länge von 3337 m und erreichte, wie die Schächte, eine Teufe von 317 m /3-12/, /3-13/. Das Äspö-Hartgesteinslabor wurde nach einer vorlaufenden vierjährigen übertägigen Erkundungsphase von 1990 bis 1995 in einer Tiefe von 450 m aufgefahren /3-14/, /3-15/, /3-16/. Das Untertagelabor ist über einen Schacht und eine 3600 m lange Rampe mit der Erdoberfläche verbunden.

Auf der Grundlage dieser praktischen Erfahrungen wurden auch für generische Endlagerkonzepte Planungen für die Errichtung und den Betrieb erstellt, so z. B. für das französische Konzept /3-17/. Aufgrund der hohen mechanischen Stabilität der Kristallingesteine ist ein stabilisierender Ausbau von Grubenräumen meist nicht erforderlich. Wasserführende Klüfte erfordern aber bereichsweise Maßnahmen zur Abdichtung.

Das Schachtabteufen für die skandinavischen Untertagelabore erfolgte mit dem Bohr- und Sprengverfahren, z. T. auch in Kombination mit dem Raise-Bohrverfahren. Für die zukünftigen Endlagerbergwerke sind vier bzw. sechs Schächte und eine Rampe vorgesehen; für das französische Konzept wurde noch nicht abschließend festgelegt, ob die Schächte mit einer Rampe kombiniert werden sollen. Für alle Konzepte wird aber ein Abteufen der Schächte mit dem Bohr- und Sprengverfahren vorgesehen, z. T. kombiniert mit dem Raise-Bohrverfahren. Falls, z. B. im oberflächennahen Deckgebirge, lockere bzw. wasserführende Schichten oder Störungszonen durchteuft werden müssen (z. B. in Frankreich, vgl. /3-17/), kann das Bohr- / Sprengverfahren mit Gefrier- oder Injektionsverfahren kombiniert werden, um diese Gesteine abzudichten bzw. zu stabilisieren.

Vorlaufend zum Schachtabteufen wird in allen Projekten eine Detailerkundung der Geologie und der hydrogeologischen Verhältnisse stattfinden, um Details der Teufarbeiten zu planen sowie die Eignung der Gesteine für den Einbau verschiedener Einrichtungen zu überprüfen. Zu diesem Zweck werden im Bereich der Schachtachse Bohrungen niedergebracht. Auf dieser Grundlage können mögliche Wasserzutritte abgeschätzt werden und evtl. erforderliche Injektionsarbeiten geplant werden.

Anschließend wird durch das Deckgebirge und die oberen, aufgelockerten Granitbereiche ein Vorschacht bis in mehrere Zehnermeter Tiefe mit Hilfe des Bohr- und Sprengverfahrens abgeteuft. Falls lockere Deckgebirgsgesteine vorliegen, kann dieser Teil des Schachtes im Bohrverfahren erstellt werden. Während der Teufarbeiten erfolgen kontinuierlich Sicherungsarbeiten mit Netzen, Ankern und Spritzbeton, ggf. Injektionsarbeiten zur Abdichtung des Gebirges sowie das Einbringen eines dichten Ausbaus.

Nach Erreichen des Granitkörpers wurde auf das Bohr- und Sprengverfahren übergewechselt. Dieses Verfahren wird auch bei der Erstellung des Hauptschachtes fortgeführt. Der Schachtvortrieb erfolgt in Abschlügen von ca. 2 bis 4 m. Nach der Abfuhr des Haufwerks erfolgt die geologische Aufnahme der Schachtwandung. Anschließend wird die Schachtstoß durch Netze, Anker und Spritzbeton gesichert und durch Injektionen stabilisiert und abge-

ichtet. In Abschnitten von 5 – 10 m wird der Schachtausbau aus Betonelementen nachgezogen.

Für das Schachtteufen werden bewegliche Geräte, die bei den Teufarbeiten in den Schacht abgelassen werden, und stationäre Geräte, die an der Oberfläche verbleiben, benötigt.

Die beweglichen Geräte umfassen die Abteufplattform, die aus einer Metallkonstruktion besteht und an Seilen in den Schacht abgelassen wird. Erforderliche Arbeiten im Schacht oberhalb der Sohle werden von dieser Plattform aus durchgeführt.

An der Oberfläche befindet sich zum Verfahren der Arbeitsbühne ein Förderturm. Nach Fertigstellung des Schachtes werden die Abteufgeräte entfernt und durch permanente Einrichtungen ersetzt.

Sobald ein Schacht oder die Rampe abgeteuft und eine Strecke aufgefahren ist, können die übrigen Schächte, wie in Onkalo erprobt, auch im Raise-Bohrverfahren erstellt werden /3-12/, /3-13/, /3-14/ (Abbildung 3-4). Dabei wird ausgehend von einer Pilotbohrung der Bohrl Lochdurchmesser mit Hilfe einer Schachtbohrmaschine von unten nach oben auf den gewünschten Durchmesser erweitert. Es ist auch eine Kombination von Raise-Bohr- und Bohr-/ Sprengverfahren für die Erstellung der Schächte möglich.



Abbildung 3-4: Raise-Bohrkronen für die Erstellung des Personenschachtes für das Untertagelabor Onkalo – Finnland /3-13/

Die Abmessungen und die Auslegung der Rampen in Endlagerbergwerken richten sich auch danach ob eine spätere Nutzung für den konventionellen Materialtransport oder für den Transport von Abfallgebinden vorgesehen ist. Da in der Regel die Rampe mit Radfahrzeugen befahren werden sollen, beträgt das maximale Gefälle 15 % bzw. 10 % für den Transport von Abfallgebinden. Weitere Anforderungen an den Streckenquerschnitt und Kurvenradius

ergeben sich aus den Abmessungen der Transportfahrzeuge. Neben dem Transport dienen die Rampen auch der Bewetterung.

Rampen wurden bisher, z. B. in den skandinavischen Projekten, meist im Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Dieselbe Vorgehensweise ist auch für die Endlager geplant. Wie bei den Schächten ist eine detaillierte Vorerkundung durch Bohrungen, Geophysik, hydrogeologische Tests etc. erforderlich. In den oberflächennahen Bereichen mit aufgelockerten und wasserführenden Gesteinen wird die Rampe durch einen Stahlbetonausbau gesichert. In tieferen Teilen mit stabilen Kristallingesteinen reicht eine Sicherung durch Stahlnetze und Anker (Abbildung 3-5). Lediglich mechanisch instabile Bereiche oder Abschnitte mit Wasserzutritten werden hier durch Zementinjektionen sowie einen Betonausbau stabilisiert und abgedichtet.

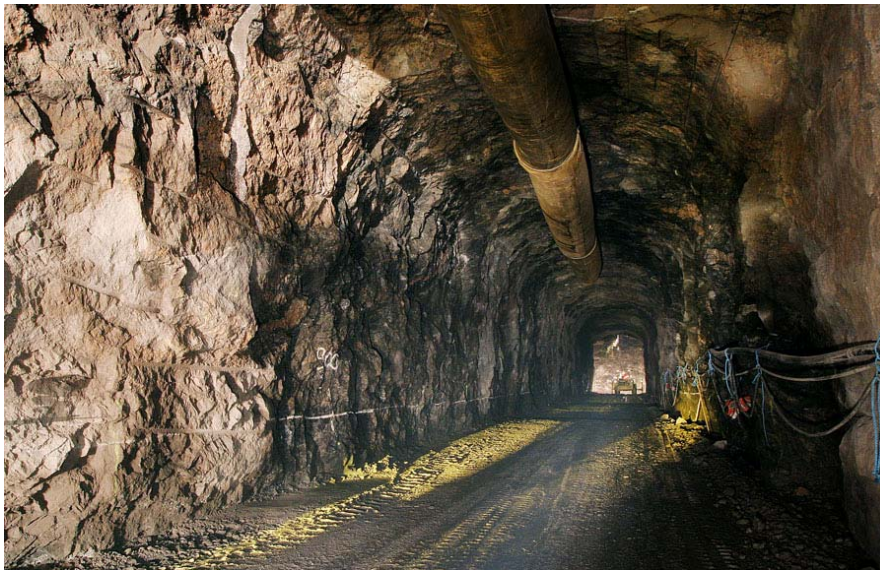


Abbildung 3-5: Rampe des Untertagelabors Onkalo mit Anker- und Netzsicherung der Streckenwandung – Finnland /3-13/

Bezüglich der Planungen für die Schachtfördereinrichtung und die Schachteinbauten ist das französische Konzept weit fortgeschritten /3-17/.

Der Lasttransport innerhalb der Schächte soll mit einem Köpe-Treibscheibensystem bewerkstelligt werden; einer Technik, die sich seit einem Jahrhundert weltweit bewährt hat.

Der Konstruktionsschacht

Der Konstruktionsschacht soll einen Durchmesser von 10 m bis 12 m besitzen und bis ca. 30 m unterhalb des tiefsten Einlagerungsniveaus reichen. Der Schacht wird über die folgenden Fördereinrichtungen verfügen, um den unabhängigen Transport verschiedener Materialien nach untertage sicherzustellen:

- Zwei Skipförderanlagen zum Transport von Aushub und Verfüllmaterial und
- einen Förderkorb, der für den Transport schwerer Maschinen bis zu 40 t ausgelegt ist.

Weiterhin ist eine Notförderung zu Rettungszwecken vorgesehen. Der Konstruktionsschacht wird außerdem als einziehender Wetterschacht dienen.

Schacht zum Personentransport (Fahrschacht)

Der Fahrschacht soll einen Durchmesser von 6 m bis 7 m aufweisen und ebenso wie der Konstruktionsschacht bis 30 m unterhalb des tiefsten Einlagerungsniveaus reichen. Er wird mit einem Hauptförderkorb für ca. 20 Personen und einer Notförderung ausgestattet. Der Schacht dient als zweiter einziehender Wetterschacht.

Schacht zum Transport der Abfallgebinde

Für den Transport der Abfallgebinde von der Oberfläche zu den untertägigen Einrichtungen und dem Fördern der leeren Transportbehälter ist ein separater Schacht vorgesehen. Der Schachtdurchmesser von 11-12 m orientiert sich an den Abmessungen des Transportequipments und der Abfallgebinde. Die Schachteinbauten und ihre Sicherheitseinrichtungen werden für eine Nettolast von 110 t ausgelegt, was einer Gesamtlast von ca. 300 t entspricht, die mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 1 m/s gefahren wird. Die Gesamtlast wird auf ca. 10 Stahlseile verteilt, so dass sich pro Seil ca. 10 t ergeben. In Tabelle 3-1 sind die Daten existierender Schächte mit vergleichbaren Daten aufgeführt.

Der Schacht zum Transport der Abfallgebinde soll außerdem über eine Ausrüstung zur Notförderung von Personal verfügen.

Der Schacht ist Teil des radiologisch überwachten Bewetterungssystems und verfügt sowohl an der Oberfläche wie im Grubengebäude über Luftschleusen.

Tabelle 3-1: Technische Daten von Schachtförderanlagen für schwere Lasten

Land	Bergwerk	Teufe (m)	Last je Seil (t)	Anzahl an Seilen	Geschwindigkeit (m/s)
Schweden	Erzbergbau Kiruna	802	32	6	17
Polen	Erzbergbau Pniowek	1160	57	4	18
Deutschland	Erkundungsbergwerk Gorleben	870	27	8	5
USA	WIPP	698	20	6	2,5

Ausziehender Wetterschacht

Über den ausziehenden Wetterschacht werden die verbrauchte Luft, Schwaden von Sprengarbeiten und evtl. Rauch des konventionellen Grubengebäudebereichs abgeführt. Der Durchmesser soll ca. 10 m betragen.

3.2.2 Ton und Tonstein

Die bergbauliche Gewinnung von Tonen ist auf relativ geringe Tiefen beschränkt, doch ist Ton bzw. Tonstein ein wesentliches Nebengestein im Kohlebergbau und darüber hinaus im Deckgebirge vieler Bergwerke verbreitet, so dass insgesamt zahlreiche bergbauliche Erfahrungen mit Tonen und Tonsteinen vorliegen. Weitere Erfahrungen ergeben sich aus dem Tunnelbau.

Weltweit wurden noch keine Endlager in Tonsteinen eingerichtet, doch sind diese Gesteine bevorzugte Wirtsgesteine in Belgien /2-20/, Frankreich /2-24/ sowie der Schweiz /2-27/ und werden in diesen Ländern in Untertagelaboren (Hades, Bure, Mont Terri) untersucht. Bei der Errichtung dieser Untertagelabore konnten wichtige bergbautechnische Erfahrungen bezüglich der Erstellung von Grubenräumen in tonigen Wirtsgesteinen gesammelt werden.

Frankreich

Das auf Erfahrungen beim Errichten des Untertagelabors in Bure basierende französische Konzept für die Schächte eines Endlagerbergwerks in jurassischen Tonen sieht die Anlage von vier Schächten vor, deren Funktionen die gleichen sind, wie sie bei den kristallinen Gesteinen beschrieben wurden /2-24/. Das tonige Wirtsgestein befindet sich in einer Tiefe von ca. 490 m und besitzt eine Mächtigkeit von ca. 130 m. Das Deckgebirge besteht aus teilweise wasserführenden Kalken (Abbildung 3-6).

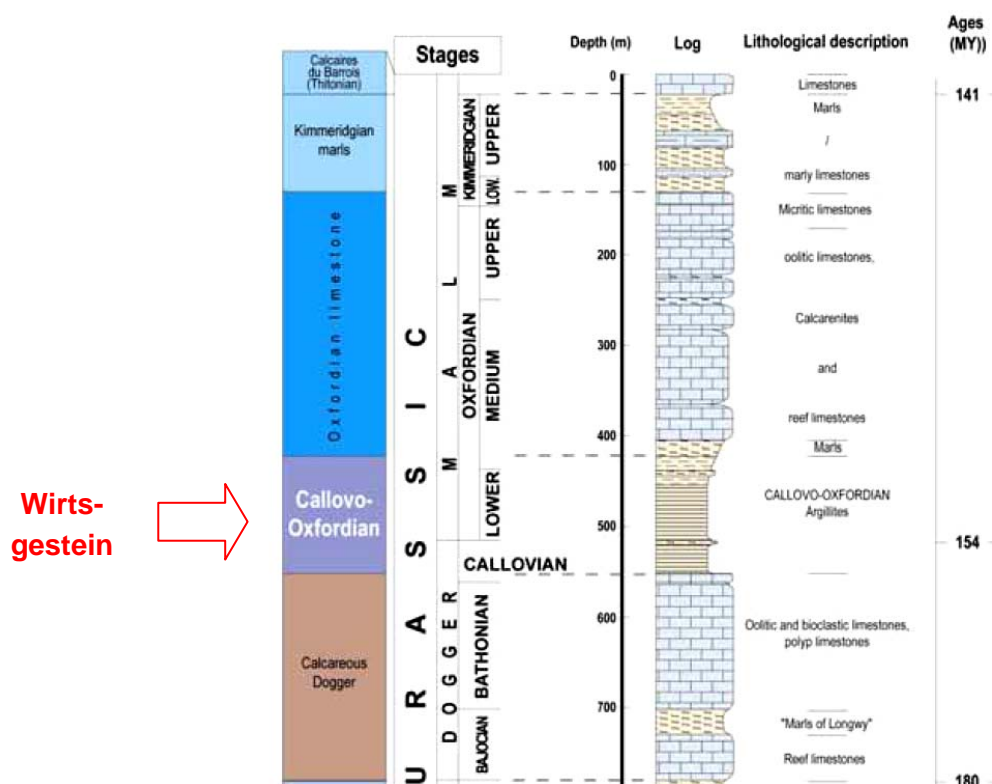


Abbildung 3-6: Stratigraphie des Standortes Bure – Frankreich /2-24//

Entsprechend dem französischen Endlagerkonzept sollen für das Endlagerbergwerk vier Schächte mit Durchmessern von 6,5 m bis 11,5 m abgeteuft werden. Dabei sollen die Schächte nach dem Erstellen des Vorschachtes und der Installation der Abteufgeräte mit Hilfe des Bohr- und Sprengverfahrens abgeteuft werden /2-24/. Zusätzlich kann bei den Teufarbeiten auch eine Vortriebsmaschine eingesetzt werden. Die Arbeiten im Schacht sollen von einer verfahrbaren Arbeitsbühne ausgeführt werden. Die Abschlaglängen werden beim Bohren und Sprengen in Abhängigkeit vom Schachtdurchmesser 2 m bis 3 m betragen. Das derzeitige Errichtungskonzept für Schächte sieht den Einsatz alternativer Methoden wie die Schachtbohrtechnik (Großlochbohrtechnik) oder das Raise-Boring nicht vor.

Das Einbringen des Schachtausbaus wird sukzessive mit den Teufarbeiten erfolgen. Die oberflächennahen, wasserführenden Jura-Kalke sollen durch einen ca. 60 cm starken Betonausbau abgedichtet werden. In den restlichen Deckgebirgshorizonte besteht die Gebirgssicherung aus 3 m langen Felsankern und ca. 20 cm bis 30 cm dickem Spritzbeton.

In den Tonen sind zwei Arten der Gebirgssicherung vorgesehen. In der für den Schachtverschluss vorgesehenen Abdichtungszone sollen Stahlbögen und Spritzbeton eingebracht werden. Diese Zone endet ca. 50 m über dem Top der Formation. Außerhalb dieses Bereichs werden 4 m lange Felsanker und Spritzbeton verwendet.

Der endgültige Innenausbau ist in den über den Tonen liegenden Gebirgsabschnitten 45 cm bis 50 cm stark, in den Tonen 1,35 m dick.

Das französische Endlagerkonzept bevorzugt aufgrund der einfachen geologischen Verhältnisse eindeutig die Anlage der vier Schächte /2-24/. Die Errichtung einer Rampe als Ersatz für den Bau-/Konstruktionsschacht oder den Einlagerungsschacht wurde alternativ geprüft und bewertet. Zur Bewetterung würden die einzelnen Wendeln durch einen Wetterschacht verbunden. Die Auffahrung der Rampe könnte mit Hilfe des Bohr- und Sprengverfahrens erfolgen.

Schweiz

Für das Schweizer Untertagelabor Mont Terri wurde in einem Berghang ein Forschungstunnel im Opalinus-Ton parallel zu einem Straßentunnel aufgefahren, so dass hier kein Schacht abgeteuft werden musste. Das Schweizer Endlagerkonzept sieht die Anlage eines Schachtes und einer Rampe vor, wobei zunächst die Rampe, dann der Schacht errichtet werden /2-27/. Bei der Erstellung der Rampe kann auf umfangreiche Erfahrungen aus dem Tunnelbau zurückgegriffen werden.

Der Opalinus-Ton (Mittlerer Jura) wird von einer ca. 550 m mächtigen Abfolge sedimentärer Gesteine des Malm, Tertiär und Quartär überlagert, die meist standfest sind (Abbildung 3-7). In der Unteren Süßwassermolasse (Tertiär) und in Malm-Karbonaten sind lokal erhöhte Durchlässigkeiten zu erwarten. Es wird deshalb bei der Errichtung der Rampe von einem mechanischen Auffahren abgesehen und ein konventioneller Sprengvortrieb, allenfalls ein Vortrieb mit Teilschnittmaschine, bevorzugt, welcher unvorhergesehene Situationen besser meistern lässt. Um das Risiko eines unerwarteten Wassereintruchs zu minimieren, werden

systematisch Vorauserkundungsbohrungen ausgeführt. In Bereichen mit Wasserzutritten sind zur Abdichtung 30 m bis 50 m lange, schirmartig nach außen gerichtete Injektionsbohrungen mit Zement geplant. Ist diese Zone durchfahren, werden radiale Ergänzungsinjektionen ausgeführt, mit welchen die Wasserzutritte in den Tunnel minimiert werden sollen. Nicht verdrängbares Bergwasser wird gefasst und in einer Drainage der Pumpstation zugeführt, von wo es an die Oberfläche gefördert wird.

Sobald die Rampe den späteren Schachtfuß erreicht hat, wird von der Oberfläche aus in der Schachtachse eine Pilotbohrung abgeteuft, wobei wasserführende Bereiche durch Zementinjektionen abgedichtet werden /2-27/. Nach Abschluss der Bohrung wird der Schacht mit 4 m Durchmesser mit Hilfe einer Raise-Bohrmaschine von unten nach oben aufgefahren, wobei wasserführende Bereiche bei Bedarf nachinjiziert werden (Abbildung 3-4). Falls sich das Abteufen des Schachtes im Raise-Bohrverfahren aufgrund der geologischen Ergebnisse der Pilotbohrung als riskant erweisen sollte, ist alternativ ein Schachtteufen im konventionellen Bohr-/ Sprengverfahren vorgesehen.

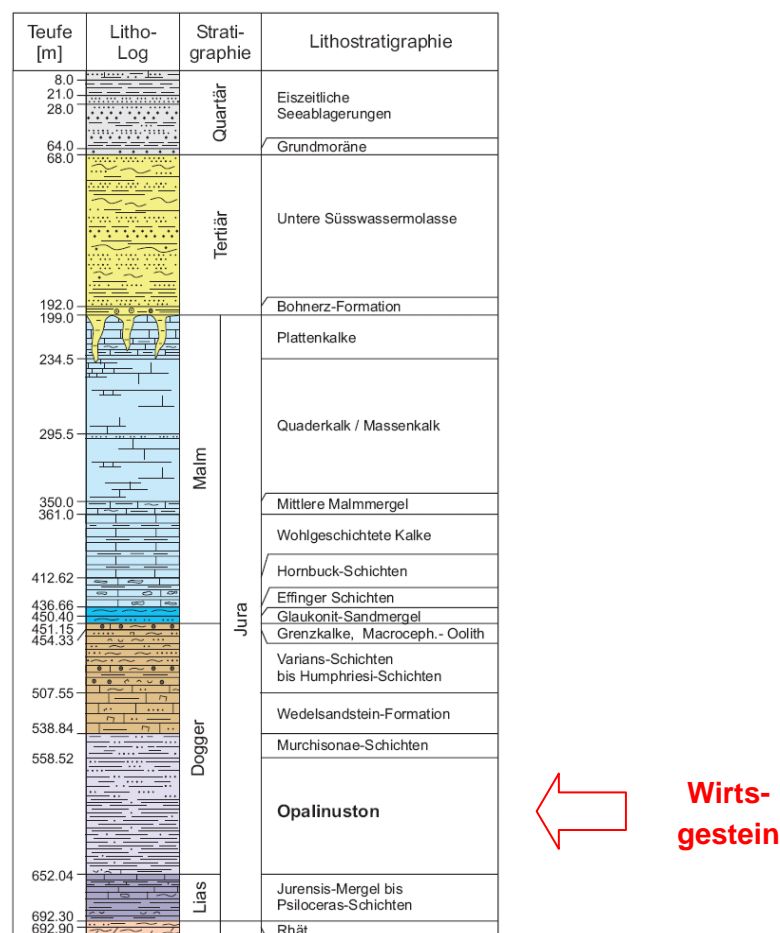


Abbildung 3-7: Geologisches Profil der Sondierbohrung Benken – Schweiz /3-20/

Zur Stabilisierung der Schachtwand sowie der Rampenkontur ist im Bereich wasserführender Schichten ein zweischaliger Ausbau mit zwischenliegender Wasserisolation vorgesehen. Die Ausbruchsicherung soll durch Felsanker und armierten Spritzbeton erfolgen, wobei die Ankerdichte und die Betonstärke auf die geologischen Verhältnisse und die Tiefenlage

abgestimmt werden. Das Innengewölbe wird als geschalter, hochwertiger Ortbeton ausgeführt.

In nicht wasserführenden Schichten ist ein einschaliger Ausbau mit Spritzbeton geplant, wobei beim Einsatz von Stahlfaserarmierungen eine Deckschicht ohne Fasern eingebracht wird. Auch beim einschaligen Ausbau werden Anker und Gewölbestärke auf die geologischen Verhältnisse und die Tiefenlage abgestimmt.

Da der spätere Transport über die Rampe im Endlagerbetrieb prinzipiell mittels Zahnradbahnen erfolgen soll, wird die betonierte Sohle mit entsprechenden Gleisanlagen versehen.

Belgien

Mitte der 70er Jahre wurde am Standort Mol-Dessel in Belgien mit der Untersuchung der tertiären Boom-Clay-Formation hinsichtlich ihrer Eignung für ein Endlager begonnen und das Untertagelabor HADES (**H**igh-**A**ctivity **D**isposal **E**xperimental **S**ite) in ca. 230 m Tiefe eingerichtet /3-18/, /3-19/.

Die untertägigen Einrichtungen des Untertagelabors sind über zwei Schächte, die in einem Abstand von ca. 400 m angeordnet sind, erreichbar. Der Innendurchmesser der Schächte beträgt ca. 6 m.

Da die Boom-Clay-Formation von einem ca. 180 m mächtigen Deckgebirge überlagert wird, das wasserführende, lockere Sandschichten enthält, wurde zum Schachtteufen das Gefrierverfahren eingesetzt /3-18/. Um das Gebirge im Bereich des Schachtes zu gefrieren, wurden von der Oberfläche insgesamt 16 Gefrierrohre auf einen Kreis von 7 m Durchmesser um den Schachtmittelpunkt bis in eine Teufe von 192 m niedergebracht. Damit wurde auch die Übergangszone zwischen den Sandschichten und dem Boom-Clay erfasst. Nach dem Einfrieren wurde mit dem Schachtteufen begonnen. Nach jedem Abschlag von 2 m wurde auf die Schachtwand durch eine 20 cm starke Spritzbetonschicht stabilisiert, deren Stärke stufenweise auf 40 cm erhöht wurde. Im Grenzbereich Deckgebirge / Boom Clay wurde dann das Ringfundament für den weiteren Ausbau des Schachtes errichtet. Der Endausbau des Schachtes erfolgte mit 30 cm starken und 2,85 m hohen Stahlbetonringen, die eine 8 mm starke äußere Stahlverkleidung aufweisen. Die einzelnen Ringe wurden miteinander verschweißt. Der Zwischenraum zwischen Spritzbeton und Stahlbetonringen wurde mit flüssigem Asphalt ausgegossen. Damit wurden 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-Clays wurden während des Teufens zunächst gleitende Stahlrippen und anschließend ein Betonausbau eingebracht (Abbildung 3-8).

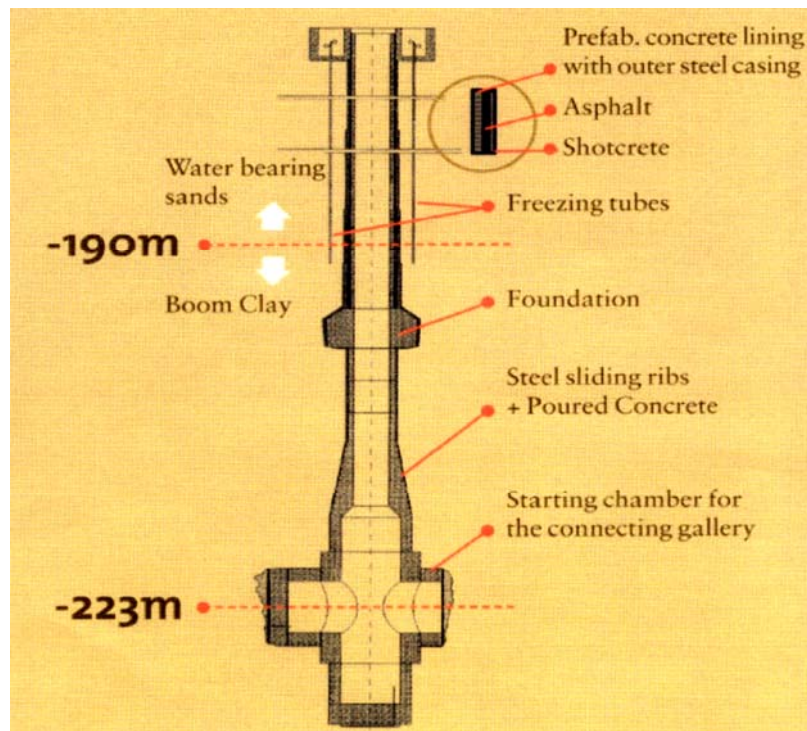


Abbildung 3-8: Schnitt durch Schacht 2 des Untertagelabors HADES – Belgien /3-18/

3.2.3 Salzformationen

In Deutschland liegen umfangreiche Bergbau-Erfahrungen für Salzformationen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau vor. Zudem liefern das Forschungsbergwerk Asse und das Endlagerbergwerk Morsleben wichtige Erfahrungen über die Nutzung von Salzgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Diese Erfahrungen machte man sich auch bei der Auffahrung des Erkundungsbergwerks Gorleben zu nutze. Das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung im Salz basiert auf dem Arbeitsmodell für den Salzstock Gorleben und integriert das Erkundungsbergwerk /2-30/. Zu den für den Bergbau positiven Eigenschaften des Salzes gehört seine hohe Standsicherheit, die einen Ausbau des Schachtes oder der Grubenräume in diesen Schichten meist überflüssig macht.

Für das Erkundungsbergwerk Gorleben wurden von 1985-1997 zwei Schächte mit Teufen von 933 m bzw. 843 m in das standfeste Steinsalz der Leine-Folge abgeteuft. Da das 260 m mächtige Deckgebirge oberhalb des Salzstocks aus teilweise wasserführenden Lockersedimenten besteht, wurden die Schächte im Gefrierverfahren errichtet. Zum Erzeugen des erforderlichen Frostkörpers wurden um die jeweilige Schacht-position 48 Gefrierlochbohrungen bis in eine Teufe von ca. 270 m abgeteuft. Der Gefriervorgang dauerte 2 Jahre.

Anschließend wurde in offener Bauweise zunächst ein ca. 21 m tiefer Vorschacht erstellt und mit Stahlbeton ausgebaut.

Das Schachtteufen erfolgte im Deckgebirge je nach Gesteinskonsistenz entweder gebirgschonend mittels Schacht-Kurz-Helix (Abbildung 3-9) oder in festeren Gesteinen (z. B.

Geschiebemergel) mit Hilfe des Bohr- / Sprengverfahrens. Im Salinar wurde generell mit Hilfe des Bohr- / Sprengverfahrens gearbeitet. Der Schachtdurchmesser beträgt je nach Ausbauart und Teufenstufe ca. 7,5 bis 11 m, im Fundamentbereich 13,5 bzw. 15,2 m.

Die Schächte wurden vom Deckgebirge bis ca. 90 m tief in die Salzformationen in verschiedenen Stufen ausgebaut (Abbildung 3-10). Unterhalb des Vorschachtes wurde die Schachtwandung auf Längen von 190 m bzw. 140 m mit Betonformsteinen ausgekleidet. Darunter wurde ein Aufhängefundament errichtet, von dem aus der Schacht bis zum Salzspiegel mit Stahlringen stabilisiert wird. Etwa 90 m unterhalb des Salzspiegels wurde das Innenausbaufundament errichtet und anschließend der Innenausbau aus 0,5-1,2 m starkem Stahlbeton mit einem Blechmantel, der mit Bitumen hinterfüllt wurde, hochgezogen. Im Salinar ist der Schachtstoß mit Ankern und Maschendraht gegen Steinfall gesichert.

Die Schächte sind mit einer Hauptseilfahrtanlage und einer mittleren Seilfahrtanlage zum Material- und Personentransport ausgerüstet. Schacht 1 dient als einziehender, Schacht 2 als ausziehender Wetterschacht.



Abbildung 3-9: Schacht-Helix

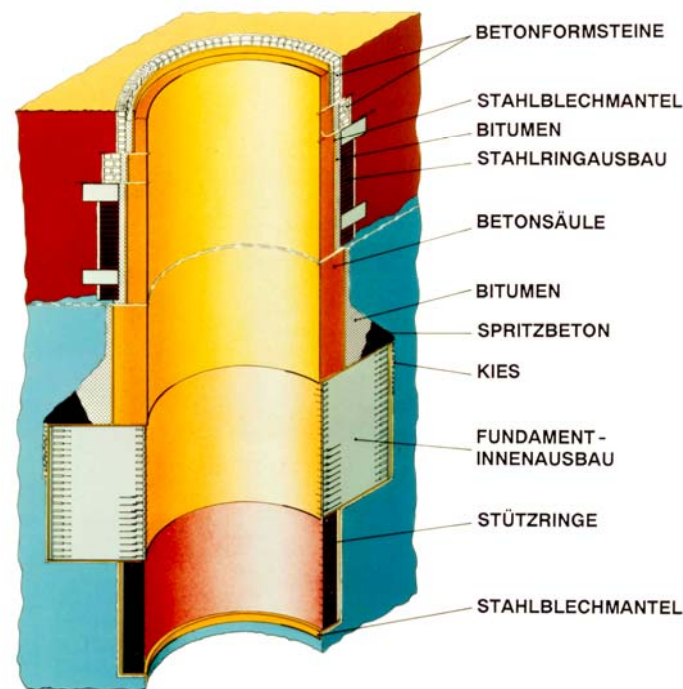


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des Ausbaus der Gorleben-Schächte – Deutschland

3.3 Auffahrung von Strecken und Kammern

Nach der Erstellung der Zugänge zum Endlagerbergwerk sind untertage der Infrastrukturbereich, die Erkundungs- und Verbindungsstrecken sowie – je nach Bedarf – die Einlagerungsbereiche aufzufahren. Die für diese Arbeiten einzusetzenden Geräte und Auffahrungsstrategien entsprechen – abgesehen von den Einlagerungsbereichen – dem bergbaulichen Standard. Weiterhin liefern der Bau und Betrieb der Untertagelabore in potentiellen Wirtsgesteinen und z. T. an den vorgesehenen Endlagerstandorten wichtige Grundlagen für die Planung der Auffahrung des Endlagerbergwerks /2-9/, /2-12/, /2-20/, /2-24/, /2-27/.

Prinzipiell kommen drei verschiedene Verfahren für die Erstellung von Grubenräumen in Frage: das Bohr- und Sprengverfahren sowie der Vortrieb mit Teil- oder Vollschnittmaschinen /3-1/. Der Einsatz des jeweiligen Verfahrens ergibt sich aus geologischen, bergbaulichen, langzeitsicherheitlichen und finanziellen Erwägungen. Während das Bohr- und Sprengverfahren sowie der Vortrieb mit Teilschnittmaschinen flexibel bezüglich der Geologie und dem bergbaulichen Einsatz sind, erfordert der Einsatz von Vollschnittmaschinen, wie sie z. B. im Tunnelbau eingesetzt werden, eine bestimmte Gebirgsfestigkeit, um eine zuverlässige Verspannung der Maschine gegen den Streckenmantel zu gewährleisten. Zudem eignen sich die großen Vollschnittmaschinen aufgrund ihrer Abmessungen nur zum Erstellen langer Strecken mit geringen Kurvenradien. Dabei erreichen sie hohe Vortriebsgeschwindigkeiten. Der Investitionsaufwand ist aber sehr hoch. Prinzipiell sind schneidende Verfahren gebirgsschonender als das Bohr- und Sprengverfahren. Dieser Punkt ist aus langzeitsicherheitlichen Gründen relevant, da die durch die Auffahrung bedingten Auflockerungs-

zonen um die Grubenräume potentielle Wegsamkeiten für Lösungen während der Nachbetriebsphase darstellen können. Während der Streckenauffahrung findet immer eine vorausseilende geologische Erkundung statt, um wasserführende Störungen und Klüfte zu identifizieren und ggf. vor der Auffahrung durch Zementinjektionen abzudichten.

3.3.1 Grundlagen

3.3.1.1 Sprengvortrieb

Der Sprengvortrieb umfasst die Arbeitsvorgänge Bohren, Sprengen, Wegfüllen und evtl. Ausbauen /3-1/.

Am Streckenende (Ortsbrust) werden Sprengbohrlöcher, die der Aufnahme der Sprengladung dienen, und Einbruchsbohrlöcher, die ungeladen bleiben, gebohrt. Mit Ausnahme der Einbruchsbohrlöcher, die man vorwiegend im Salzbergbau als Großbohrlöcher mit einem Durchmesser größer 65 mm erstellt, sind die Bohrlöcher meist normal- oder kleinkalibrig, d. h., sie haben einen Durchmesser von weniger als 65 mm.

Kleinere Bohrlöcher werden mit Druckluft-Bohrhämern auf Bohrstützen mit einer Bohrgeschwindigkeit zwischen 0,3 m/min und 0,5 m/min erstellt. Zur Leistungssteigerung und zur Erstellung größerer Bohrlöcher werden lafettengeführte, hydraulische Bohrhammer verwendet /3-6/. Diese erreichen Bohrgeschwindigkeiten von 3,5 m/min und mehr. Träger der Lafetten sind Bohrwagen auf Raupen- oder Räderfahrwerk. Größere Streckenquerschnitte begünstigen den Bohrwagen, der größere Durchmesser der Spreng- und Einbruchsbohrlöcher erreichen lässt. Außerdem bietet der diesel- oder der elektrohydraulische Bohrwagen die Möglichkeit, die Bohrarbeiten zu automatisieren, also nach einem Programm gesteuert ablaufen zu lassen.

Der Sprengvortrieb ist eng verbunden mit der Bohrarbeit, die den für den Sprengstoff nötigen Laderaum schafft. Die erforderliche Gesamtbohrlänge wird vom Ladungsdurchmesser beeinflusst. Mit Vergrößern des Bohrlochdurchmessers wächst der Laderaum quadratisch, so dass die benötigte Sprengstoffmenge in weniger Löchern untergebracht werden kann. Durch den Einsatz leistungsfähiger Hydraulik-Bohrhammer kann Zeit beim Bohren eingespart werden. Auch die für das Sprengen benötigte Zeit wird verringert, da sich die Anzahl an Ladesäulen verringert, die erstellt und eingebracht werden müssen.

Das Vergrößern der Bohrlochzahl mit gleichzeitigem Strecken der Ladung führt zu einem gebirgsschonenden Sprengen, bei dem die Standfestigkeit des Gebirges im Streckenmantel möglichst wenig geschwächt und somit die Steinfallgefahr und die Schaffung von Wegsamkeiten vermieden wird.

Die beträchtliche Haufwerksmenge eines leistungsfähigen Streckenvortriebs kann nur mit entsprechend leistungsfähigen Lademaschinen bewältigt werden /3-1/. Die heute gängigen Lademaschinen sind:

- Schrapplader,
- Seitenkipplader,
- Seitengriffplader,
- Fahrlader.

Wesentliches Bauteil des Schrappladers ist das Schrapppgefäß. Dieses ist ein oben und unten offener stählerner Kasten von 0,5 m³ bis 3 m³ Rauminhalt, mit Vorder- und Hinterseil. Das Gefäß wird von einer Winde, dem Schrapperhaspel, am Vorderseil über das Haufwerk hinweggezogen, wobei es sich füllt und weiter auf eine Ladeschurre geschleppt, aus der das Gut in ein nachgeschaltetes Fördermittel, z. B. einen Förderwagen, fällt. Sodann wird das Gefäß vom Hinterseil zurückgezogen und der Vorgang beginnt von Neuem. Die Umlenkrollen sind mit Dübeln in der Ortsbrust oder bei aufgelockertem Gebirge an Stahlschienen, die in der Strecke verkeilt sind, befestigt. Die Ladeleistung kann bis zu 80 m³/h betragen.

Nachteilig ist das unvollständige Freiladen, das in der Regel Nacharbeiten von Hand erforderlich macht. Ferner ist ein Helfer für das Umhängen der Umlenkrollen und das Beseitigen von Förderstörungen, wie etwa durch das Zerkleinern von großen Haufwerksstücken mit dem Abbauhammer erforderlich.

In weichem Gestein wie Ton lässt sich ein Auskolken der Sohle kaum verhindern, so dass zusätzlicher Aufwand für Planierarbeiten entsteht. Zudem wird durch die Ortsgebundenheit des Schrappladers der Maschineneinsatz für andere Arbeitsvorgänge, wie Bohren und Ausbau, sowie den Materialtransport behindert, da der Streckenquerschnitt größtenteils versperrt wird.

Der Seitenkipplader (Abbildung 3-11) fährt zur Haufwerksaufnahme mit gesenkter Schaufel in das gelöste Gestein und gibt es durch seitliches Kippen der Schaufel an das nachgeschaltete Fördermittel ab /3-7/. Der mit Druckluft oder elektrohydraulisch angetriebene Seitenkipplader besitzt ein Raupenfahrwerk, das ihm Beweglichkeit zum Freiladen der Sohle auch in breiten Strecken verleiht. Der Schaufelinhalt liegt bei 0,4 m³ bis 2 m³, womit sich eine Ladeleistung von 15 m³/h bis 120 m³/h erreichen lässt. Der Seitenkipper ist außer zum Wegladen des Haufwerks in seinem Fahrbereich für Nebenarbeiten wie dem Transport von Ausbaumaterial verwendbar.



Abbildung 3-11: Seitenkipplader /3-7/

Beim Seitengriffloader wird das Haufwerk über eine Laderampe dem zur Maschine gehörenden Kratzförderer zugeführt. Unterschiede bei den Seitengriffladern gibt es in der Art und Weise, wie die Seitwärtsbewegung konstruktiv gelöst ist, durch Querförderer, rotierende Scheiben oder Ladearme („Hammerscherenlader“). Da der Seitengriffloader kontinuierlich arbeitet, wobei die Teilvorgänge des Wegfüllens (Aufnehmen, Zwischenfördern und Abwerfen) gleichzeitig ablaufen, erzielt er eine hohe Ladeleistung von 120 m³/h und mehr.

Der Fahrlader, der auch als Rad- oder Frontschaufellader bezeichnet wird, besitzt einen Schaufelinhalt von bis zu 10 m³. Er ist gummibereift und aufgrund seiner Knicklenkung (gelenkige Verbindung zwischen Vorder- und Hinterteil des Fahrzeugs) auch in engen Grubenbauen außerordentlich beweglich. Die Förderleistung beträgt bis 100 m³/h.

3.3.1.2 Teilschnitt-Vortriebsmaschine

Unter der Bezeichnung „Teilschnittmaschine“ fasst man Streckenvortriebsmaschinen zusammen, die stets nur einen Teil des Ausbruchquerschnittes angreifen, die Streckenende also abschnittsweise bearbeiten. Neben den mit Schneidkopf ausgerüsteten Maschinen gibt es auch solche, die sich die Schlagwirkung eines sogenannten Schlagkopfes zunutze machen /3-1/, /3-5/.

Die Schneidkopfmaschine arbeitet nach dem Auslegerprinzip, womit sich jede beliebige Form des Streckenquerschnitts herstellen lässt. Die Querschnittfläche ist allerdings durch ein Mindest- und Höchstmaß begrenzt, das ohne Veränderung des Auslegers aus einer Aufstellung geschnitten werden kann. Auf dem Maschinenrahmen ist ein Ausleger gelagert, der in beliebiger Richtung schwenkbar und mit einem sich drehenden Schneidkopf versehen ist. Um auch festes Gestein schneiden zu können, baut man Maschinen mit immer größerer Masse und mit immer mehr Leistung.

Nach der Drehrichtung des am Ausleger angeflanschten Schneidkopfes in Bezug auf die Längsachse des Auslegers unterscheidet man zwischen Längsschneidkopf und Querschneidkopf. Der Längsschneidkopf dreht coaxial zum Ausleger, seine Drehachse liegt somit quer zur Schwenkrichtung des Auslegers. Er schleudert das Haufwerk seitlich auf die Streckensohle. Wegen seiner konischen Form kann der Längsschneidkopf einen glatten Streckenstoß ohne Absätze herstellen.



Abbildung 3-12: Teilschnittmaschine mit Querschneidkopf /3-1/

Der Querschneidkopf (Abbildung 3-12) rotiert quer zur Auslegerlängsachse. Er besteht aus zwei kalottenförmigen Schneidrädern, die dichter mit Schneidwerkzeug besetzt sind als beim schraubenförmigen Längsschneidkopf. Die Gewichtskraft der Maschine wird als Gegenkraft zur Schneidkraft besser genutzt. Das Haufwerk wird aus der Ortsbrust auf die Ladeeinrichtung geschleudert. Das Profilschneiden am Hangenden und an den Stößen gestaltet sich im Vergleich zum Längsschneidkopf als schwierig. Es entstehen Stufen im Streckenmantel, zu deren Glättung die Maschine verfahren werden muss.

Um die Vorzüge der beiden Schneidkopfarten zu nutzen, gibt es neuerdings Maschinen mit auswechselbarem Schneidkopf.

Als Schneidwerkzeug werden bei beiden Schneidkopfarten gewöhnlich sogenannte Meißel eingesetzt, und zwar in hartem Gestein vorwiegend selbstschärfende Rundschafftmeißel, in weichem Gestein auch Flachmeißel /3-5/. Zur ersten Einschätzung der Schneidbarkeit eines Gesteins dienen Angaben zu dessen Druck- und Zugfestigkeit, dem Gehalt und mittlerem Korndurchmesser an schleißscharfem Mineral und dem daraus ermittelten Verschleißkoeffizienten. Als Grenze wirtschaftlicher Schneidbarkeit gelten ca. 80 N/mm² Druckfestigkeit und ein Verschleißkoeffizient von $F=0,3$ N/mm.

An Schneidkopfmaschinen findet man zum Aufnehmen des gewonnenen Haufwerks Seitengrifflader unterschiedlicher Ausführung. Verbreitet ist der Hummerscherenlader, daneben auch der einzelne Ladearm, ferner der umlaufende Ladekratzer. Die Ladeeinrichtung führt

das Haufwerk einem Kratzförderer zu, der entweder inmitten der Maschine in einem Tunnel oder in zweifacher Ausführung seitlich über deren Körper angeordnet ist. Gegen das Abwurfende ist der Förderer meist in der Höhe verstellbar und beiderseits schwenkbar, um das Haufwerk an beliebige Streckenförderung übergeben zu können.

3.3.1.3 Streckenbohrmaschine

Die Strecken- bzw. Tunnelbohrmaschine (Abbildung 3-13) bearbeitet nach Art der Gesteinsbohrtechnik die Ortsbrust im ganzen und stellt somit verfahrensbedingt einen kreisrunden Streckenquerschnitt her /3-1/, /3-7/.

Der Bohrkopf ist der aktive Teil der Maschine. Den Raum hinter dem Bohrkopf umhüllt ein im Durchmesser verstellbarer Schutzmantel.

In mittelhartem bis hartem Gestein besteht der Bohrkopf aus der Bohrrolle mit einfacher Ringschneide. In sehr hartem Gestein gelangt bei hohem Andruck eine Bohrrolle mit Hartmetallstiften, die sogenannte Warzenrolle, zur Anwendung. Mit Drehen des Bohrkopfes rollt das Bohrwerkzeug auf konzentrischer Kreisbahn auf der Ortsbrust, dringt bei 150 kN bis 200 kN Andruckkraft in das Gestein ein und schert die zwischen den einzelnen Schneidbahnen verbliebenen Gesteinsrippen ab. Mit vertretbarem Aufwand lässt sich mit gebräuchlichen Schneidrollen Gestein bis 200 N/mm² Druckfestigkeit und mit einem Verschleißkoeffizienten $F < 2,7$ N/mm bearbeiten.



Abbildung 3-13: Streckenbohrmaschine /3-20/

Die Anzahl der Schneidrollen am Bohrkopf richtet sich nach dessen Durchmesser. Je größer dieser ist, umso mehr Schneidrollen sind erforderlich, um die Ortsbrust flächendeckend auf genügend engen Schneidbahnen bearbeiten zu können und um so mehr wächst der Bedarf an Vorschubkraft. Im Gewinnungsbergbau sind Maschinen mit Durchmessern bis zu 6,5 m

im Einsatz. Bei einem Durchmesser von mehr als 6 m beträgt die nötige Vorschubkraft am Bohrkopf mehr als 10.000 kN.

Im Bohrkopf ist neben dem Bohrwerkzeug das Gerät zur Aufnahme des gelösten Gesteins installiert. Dabei handelt es sich z. B. um am Umfang des Bohrkopfes eingebaute Kratzer oder Schaufeln, die das Bohrklein aufnehmen und auf ein Zwischenfördermittel austragen.

Der Bohrkopf ist durch eine Welle mit dem Bohrkopfträger fest verbunden. Angetrieben wird der Bohrkopf entweder zentral durch diese Welle oder durch angeflanschte Motoren, die durch Planetengetriebe auf ein innenverzahntes Hauptantriebsrad wirken.

Der Bohrkopfträger (auch Innenkelly genannt) ist im Maschinenrahmen (Außenkelly) verschiebbar gelagert. Während des Bohrens gleitet er, dem Bohrfortschritt folgend, im fest im Streckenmantel verspannten Maschinenrahmen nach vorn. Am Maschinenrahmen ist die Vorschub- und Verspanneinrichtung angebracht. Sie erzeugt einerseits die zum Erbohren des Gesteins nötige Andrückkraft der Bohrwerkzeuge in Vortriebsrichtung und leitet andererseits hierdurch Reaktionskraft aus dem Maschinenrahmen durch Reibungskraft in das Gebirge ab. Das Bohren wird nach Hublänge der Vorschubeinrichtung unterbrochen, der Maschinenkörper auf Stützen gelagert, die Verspannung gelöst und die Vorschubeinrichtung eingefahren und der Maschinenrahmen samt Verspannung um Hublänge nachgezogen. Nach Verspannung der Maschine und Einfahren der Stützen kann der nächste Bohrhub beginnen.

Zum Abfordern des Haufwerks wird dieses durch Kratzer oder Schaufeln am Bohrkopf aufgenommen und geht einem Stetigförderer zu, der entweder über, in oder unter dem Maschinenrahmen angeordnet ist. Freies Verlegen außerhalb des Maschinenrahmens erleichtert das Reinigen und Instandsetzen des Förderers. Ein Fördermittel über dem Rahmen erfordert besondere Vorkehrungen, damit herabfallendes Haufwerk weder Mensch noch Maschine gefährdet. Durch entsprechende Maßnahmen ist ein Fördermittel unter der Maschine nicht erforderlich. Andererseits gestaltet sich die Übergabe auf ein nachgeschaltetes Fördermittel einfacher, wenn der vom Zwischenfördermittel, einem Brückenband, zu überwindende Höhenunterschied gering ist.

3.3.1.4 Die Wahl des Vortriebsverfahrens

Für die technische Anwendbarkeit eines Vortriebsverfahrens ist in erster Linie die Gesteinsbeschaffenheit maßgebend. Der Sprengvortrieb ist, wenn auch manchmal mit Leistungseinbußen, in allen Gesteinen einsetzbar.

Dem Einsatz der Vortriebsmaschinen sind dort Grenzen gesetzt, wo der Verschleiß des Bohr- oder Schneidwerkzeugs überhand nimmt /3-6/, /3-7/. Bei Schneidkopfmaschinen liegt diese Grenze bei einer Druckfestigkeit des Gesteins von 80 N/mm² und einem Verschleißkoeffizienten von $F=0,3$ N/mm. Rollenbohrwerkzeug, wie es in Streckenbohrmaschinen Verwendung findet, kann auch schleißschärferes Gestein bewältigen, bis zu einem Ver-

schleißkoeffizienten von $F=2,7$ N/mm und einer Druckfestigkeit von 200 N/mm². Dem Bohrvortrieb eröffnet sich somit ein breiteres Anwendungsgebiet als dem Schneidvortrieb.

Anders sind die Verhältnisse in aufgelockertem Gebirge und beim Durchörteren geologischer Störungen. Um die erforderliche Andruckkraft des Bohrwerkzeuges erzeugen zu können, bedarf die Streckenbohrmaschine einer zuverlässigen Verspannung gegen den Streckenmantel, weshalb das Gebirge eine natürliche Mindeststandfestigkeit aufweisen muss. Der Vortrieb mit Teilschnittmaschine ist hier einfacher, da die Reaktionskraft aus dem Schneidkopf meist ohne zusätzliche Verspannung von der Maschine selbst aufgenommen und in die Streckensohle abgetragen wird.

Sind die geologischen Voraussetzungen für den Einsatz einer Streckenvortriebsmaschine erfüllt, sind es häufig finanzielle Erwägungen, die deren Auswahl beeinflussen, so dass die konkurrierenden Vortriebsverfahren hinsichtlich ihrer Kosten miteinander verglichen werden müssen. Eine Abschätzung des Anteils der Sach- und Arbeitskosten an den Gesamtkosten führt beim Sprengvortrieb zu einem ungefähren Verhältnis von einem Drittel zu zwei Dritteln. Der Bohrvortrieb zeigt ein umgekehrtes Bild, denn bei ihm hat man mit gut zwei Drittel Anteil der Sachkosten an den Gesamtkosten zu rechnen und mit anteiligen Arbeitskosten von knapp einem Drittel.

Vortriebsmaschinen verursachen einen beträchtlichen Investitionsaufwand, der zusammen mit den Ausgaben für umfangreiche Vorarbeiten die Auffahrung von vorn herein mit hohen Fixkosten belastet. Aus diesem Grunde sollten die aufzufahrenden Strecken möglichst lang sein. Unter entsprechenden Rahmenbedingungen ist der mit dem maschinellen Vortrieb erzielbare Streckenvortrieb um das Zwei- bis Dreifache höher als beim Sprengvortrieb.

3.3.2 Strecken und Kammern in den europäischen Endlagerprojekten

3.3.2.1 Kristalline Gesteine

Skandinavien

Bezüglich der bergbaulichen Errichtungsplanung ist für die skandinavischen Konzepte jeweils das Untertagelabor der Ausgangspunkt für die weitere Errichtung des Grubengebäudes /2-9/, /2-12/. Der konventionelle Infrastrukturbereich des Endlagers kann noch während des Betriebes des Untertagelabors errichtet werden /2-12/. Der Infrastrukturbereich für den Kontrollbereich wird zu Beginn des Ausbaus zum Endlager erstellt. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken erfolgt schrittweise je nach Abfallanlieferung. Kriterien für die Ausrichtung der Einlagerungsstrecken sind wasserführende Störungszonen sowie die Hauptspannung des Gebirges. Um offene Einlagerungsbereiche zu minimieren, erfolgen in beiden Konzepten die Auffahrung, Abfall-Einlagerung sowie das Verfüllen und Abwerfen während der ganzen Betriebszeit parallel nebeneinander. Das schwedische Konzept sieht vor, dass zunächst ein Demonstrationsendlager aufgefahren wird, das etwa 5-10 % des gesamten Endlagerinventars aufnimmt /2-12/. Wenn die abschließende Bewertung dieser Einlagerungen positiv ausfällt, soll das eigentliche Endlager errichtet werden.

Basierend auf den Erfahrungen bei der Erstellung der Untertagelabore Äspö und Onkalo erfolgt in beiden skandinavischen Konzepten die Erstellung der Grubenräume mittels Bohr- und Sprengverfahren (Abbildung 3-14). Entsprechend den Ergebnissen der Vorerkundung werden Anordnung und Länge der Sprengbohrungen sowie die Menge des Sprengmittels exakt berechnet, damit das Ausbruchvolumen genau den Vorgaben entspricht und die Schädigung des umgebenden Gesteins minimiert wird. Die Sicherung der Streckenkontur erfolgt durch Anker und Stahlnetze. Während des Vortriebs werden wasserführende Störungszonen durch Zementinjektionen abgedichtet und brüchige Bereiche durch Spritzbeton oder einen Betonausbau stabilisiert. Der Streckenvortrieb beträgt etwa 6 m pro Tag für die Einlage-strecken und ca. 4 m für die größeren Hauptstrecken. Um die Auffahrung zu beschleunigen, kann an mehreren Strecken gleichzeitig gearbeitet werden, wobei die Förderkapazität des Schachtes für das Ausbruchsmaterial der limitierende Faktor ist.

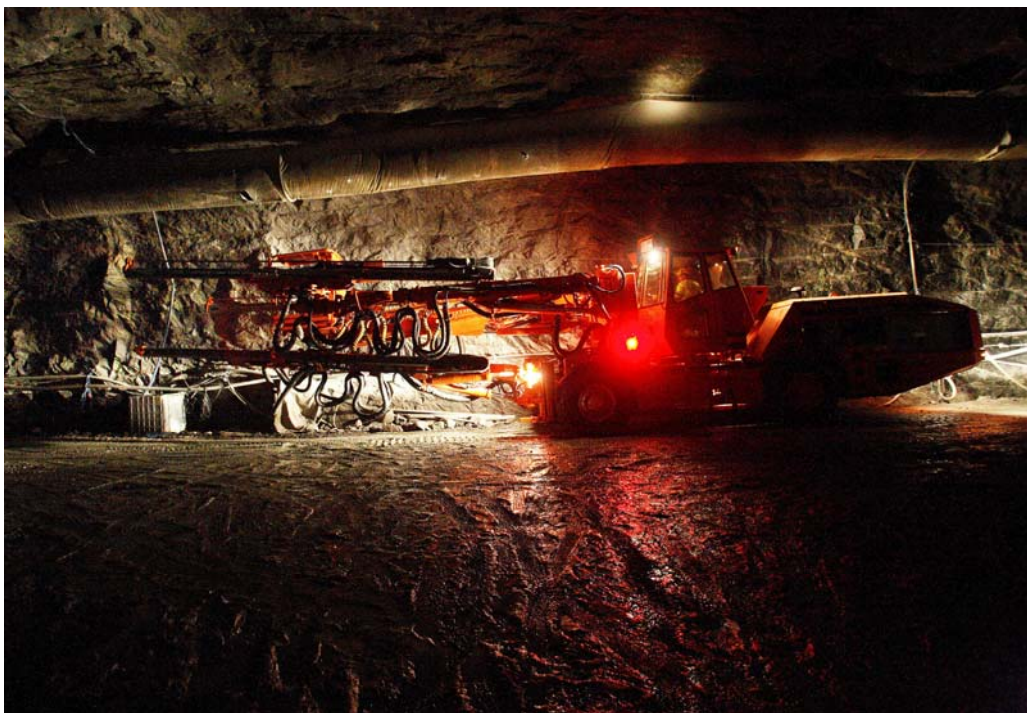


Abbildung 3-14: Erstellung von Sprengbohrlöchern im Unterlabor Onkalo – Finnland /3-12/

Frankreich

Das französische generische Endlagerkonzept für Granit orientiert sich weitgehend an den skandinavischen Konzepten /2-15/. Allerdings kann hier (noch) nicht auf die Erfahrungen bei der Errichtung und dem Betrieb eines Untertagelabors zurückgegriffen werden. Es ist vorgesehen, die schachtnahen Infrastrukturbereiche entsprechend dem zweistöckigen Endlagerdesign in zwei Ebenen anzulegen. Die Hauptfunktionen der Infrastrukturbereiche sind die Abwicklung des Materialflusses für Auffahrungs- und Verfüllarbeiten, die Versorgung der untertägigen Einrichtungen, die Wetterversorgung und, nach Inbetriebnahme, die Bereitstellung der gefüllten und die Rückführung der leeren Endlagerbehälter. Nach Erstellung der Infrastruktur wird die genaue Lage der Einlagerungsbereiche in kluft- und störungsarmen Granitblöcken durch Erkundungsstrecken und -bohrungen sowie hydrogeologische und geo-

physikalische Tests ermittelt. Um die hydrogeologischen Verhältnisse möglichst wenig zu stören, werden die Strecken als Blindstrecken in Form eines Kammes aufgeföhren. Der Abstand zwischen den Erkundungsstrecken betröhgt 400 m bis 500 m; ihre Breite liegt bei 4 m bis 6 m.

Die Einlagerungsbereiche werden in intakten Granitblöcken eingerichtet. Auf jedem Einlagerungsniveau verbindet ein Netz von Verbindungsstrecken die Einlagerungsmodule (mit ihren dazugehörigen Einlagerungskammern) mit dem schachtnahen Infrastrukturbereich. Dieses Netz hat eine vom Schacht ausgehende baumartige Struktur, um so den Zugang zu den mehr oder weniger verteilten Blöcken herzustellen (Abbildung 3-15).

Die Verbindungsstrecken mit den Einlagerungsbereichen werden parallel in Gruppen von 3-5 Strecken angeordnet, um Explorations-, Bau-, Einlagerungs- und Verschlussaktivitäten gleichzeitig in jedem Einlagerungsmodul durchführen zu können. Diese Streckengruppen sind in 400 m-Abständen untereinander durch Querschläge verbunden. Die Verbindungsstrecken sind durch Hauptstrecken mit dem Infrastrukturbereich verbunden.

Bei der Streckenaufföhren wird entsprechend den skandinavischen Erfahrungen das Bohr- und Sprengverfahren bevorzugt. Vorteile dieses Verfahrens sind die Möglichkeit Streckenquerschnitte in jeder erforderlichen Form herzustellen und die hohe Flexibilität, um die Endlagerarchitektur an die Ergebnisse der Exploration anzupassen. Untersuchungen haben ergeben, dass sich die Einflüsse auf das Gebirge durch ein geeignetes Sprengmuster auf ca. 30 cm beschränken lassen.

Aufgrund der größeren Ausdehnung des französischen Endlagers ist für die mehrere Kilometer langen Haupt-, Verbindungs- oder Einlagerungsstrecken auch der Einsatz von Tunnelbohrmaschinen denkbar. Vorteile dieses Verfahrens sind die höhere Vortriebsgeschwindigkeit und das gebirgsschonende Schneidverfahren.

Aufgrund der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Granits sind bei der Aufföhren im Falle eines nicht gestörten Gebirges keine Sicherungsmaßnahmen erforderlich. In gestörten, gebirgsmechanisch instabilen Bereichen oder in Abschnitten mit Wasserzutritten können Ankerungen, Injektionsarbeiten oder andere Sicherungsmaßnahmen erforderlich sein. Entsprechend der Nutzung der Strecken sind Betonfahrbahnen vorgesehen, in die bei Bedarf (z. B. um durch den Einsatz von Schienenfahrzeugen den Durchsatz von Ausbruch-, Versatz- und Verfüllmaterial zu erhöhen) auch Schienen eingelassen werden können (Abbildung 3-16).

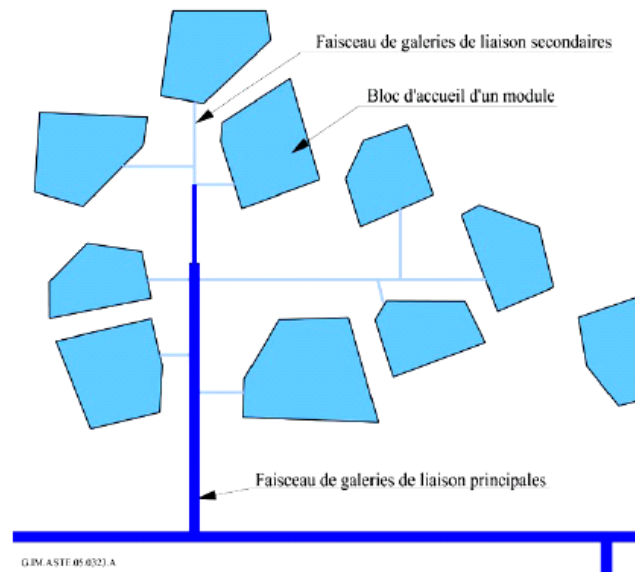


Abbildung 3-15: Baumartige Struktur der vom Schachtnahbereich zu den Einlagerungsmodulen führenden Verbindungsstrecken – Frankreich /2-15/

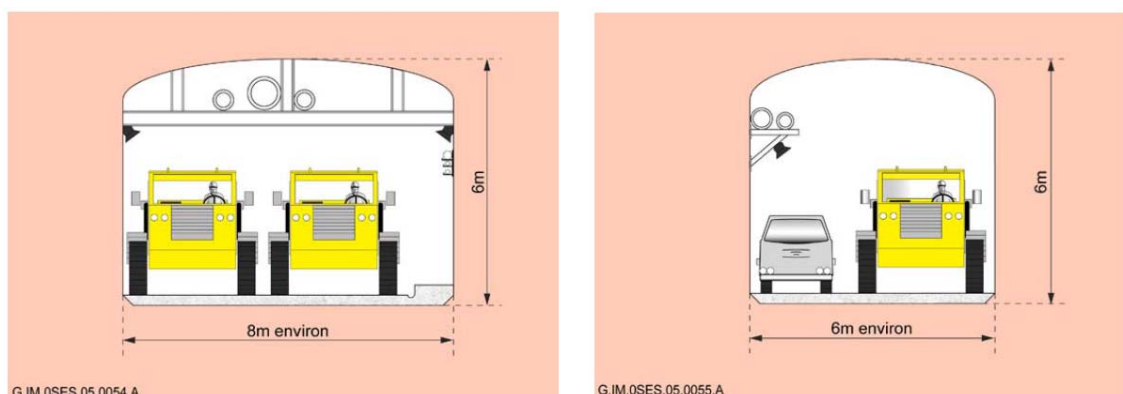


Abbildung 3-16: Typische Querschnitte von Baustrecken – Frankreich /2-15/

Die entsprechend den geologischen Verhältnissen bis zu 250 m langen Einlagerungsstrecken mit den senkrechten Einlagerungsbohrlöchern (Zellen) werden aus thermischen und mechanischen Gründen in 25 m Abstand angeordnet. Sie werden in Abständen von 150 bis 200 m zur Bewetterung und als Fluchtwege durch Querschläge verbunden.

Die senkrechte Anordnung der Einlagerungsbohrlöcher in 8 m-Abstand korrespondiert mit den in französischen Kristallinkomplexen überwiegend senkrecht orientierten Klüften. Beim Auftreten horizontaler Klüfte können die Bohrlöcher auch horizontal ausgerichtet werden.

3.3.2.2 Ton und Tonstein

Es liegen umfangreiche Erfahrungen im Berg- und Tunnelbau mit Ton und Tonstein vor. Der Gewinnungsbergbau für Ton ist auf relativ geringe Teufen beschränkt. So wird in Deutschland noch in vier Tiefbauten Ton gewonnen /3-21/, /3-22/:

- Grube Lengemannschacht (Großalmerode bei Kassel, Hessen)
- Grube Goebel-Werk (Großalmerode bei Kassel, Hessen)
- Grube Abendtal (Eisenberg, Pfalz)
- Tonwerk Klingenberg (Klingenberg am Main)

In diesen Betrieben kommen verschiedene Abbauverfahren zum Einsatz:

In der 80 m tiefen Grube Lengemannschacht wird der Ton aus Vorrichtungs- und Abbaustrecken heraus im ein- oder zweiflügeligen Streifenbruchbau abgebaut. Die Tongewinnung erfolgt mit einer Tonbohrmaschine „Vetter“ Typ VE 500/11 auf Raupenfahrwerk mit 50 cm Vorschub pro Abbauscheibe (Abbildung 3-17). Von diesem Gerät existieren zwei Varianten: eine mit freischneidender dreiflügeliger Bohrschneide und anschließender Aufnahme des Haufwerks mittels Bunkerlader, und eine zweite mit zweiflügeliger Bohrschneide mit angeschlossener Förderschnecke und Förderrohr. Die Strecken werden durch Ausmauerung, Betonformsteinausbau, einem Stahlbogenausbau oder einen Türstockausbau mit Holzschwartenverzug stabilisiert.

In der ehemaligen Grube Richard (Westerwald) erfolgten der Abbau von Ton mit einem Fräslader sowie der Transport mit Kipploren (1 t Nutzlast) und Lokomotiven mit batterieelektrischem Antrieb.



Abbildung 3-17: Tonbohrmaschine „Vetter“ in der Grube Lengemannschacht – Deutschland /3-21/

Untersuchungen des Tonquellens in Untertagebauen /3-23/ haben u.a. ergeben, dass

- die Wasseraufnahme und das Quellen des Tons mit einer Gebirgsentfestigung verbunden ist, welche bis zu einem völligen Festigkeitsverlust führen kann (Abbildung 3-18),
- vorwiegend der Sohlenbereich vom Quellen erfasst wird,
- bei hufeisenförmigen Hohlräumen die größten Sohlenhebungen in der Sohlenmitte beobachtet werden, und

bei Kontakt des Tons mit feuchter Tunnelluft oberflächennahe Verwitterungserscheinungen auftreten können.

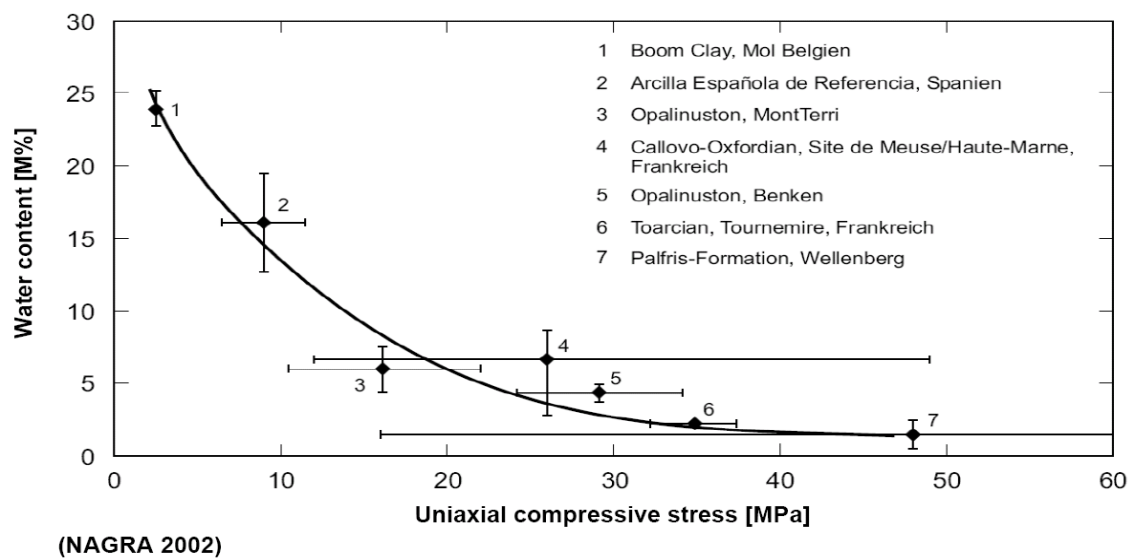


Abbildung 3-18: Wassergehalt und einaxiale Druckfestigkeit ausgewählter europäischer Tonvorkommen /3-23/

Grube Konrad

Das Deckgebirge oberhalb der Wirtsgesteinsformation (Eisenoolith des Jura) des Endlagers KONRAD für schwach und mittlerradioaktive Abfälle enthält 300 – 400 m mächtige Tonablagerungen. 1990 wurden zu wissenschaftlichen Zwecken in Teufen von 343 m und 541 m zwei jeweils etwa 40 m lange Strecken in Unterkreide-Tonsteinen aufgeföhren. Das Untersuchungsprogramm diente dem Nachweis der Dichtigkeit von alten Bohrungen und den später zu verschließenden Schächten im Bereich der Tonbarriereschichten. Gleichzeitig lieferte das Projekt interessante Erfahrungen zu geomechanischen Eigenschaften verschiedener Tone in unterschiedlichen Teufenbereichen.

Aufgrund der schwierigen Gebirgsverhältnisse wurde die Strecke in 343 m Teufe umgehend durch einen Anker Ausbau (1 Anker pro m²) mit Baustahlmattenverzug gesichert und schließlich als endgültiger Ausbau ein Anker-Spritzbetonausbau mit ca. 15 cm Betondicke eingebracht. Die Strecke in 541 m Teufe wurde auf der gesamten Länge mit geschraubten Stahlbögen im Abstand von 0,5 m starr ausgebaut; zusätzlich wurden die Firste und die Seitenwände (Stöße) durchgehend mit einer ca. 15 cm dicken Spritzbetonschicht gesichert. Als

Sohle wurde zur Stabilisierung des Grubenraumes eine durchgehende, mit Baustahlmatten armierte Betonplatte von ca. 20 cm Dicke eingebracht.

Nach ca. 10 Jahren Standzeit zeigten sich in beiden Strecken an den Stößen Konvergenzen und im Bereich der Sohle Risse infolge von Sohlenhebungen. Die Sohlenhebungen betragen bis zu 50 cm. Die Streckenstöße waren aufgelockert und in die Strecke hereingedrückt. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Strecken in den Jahren 1999 und 2000 wieder verfüllt.

Weitere Erfahrungen wurden bei der Auffahrung von Strecken in sehr wasserempfindlichen Tongesteinen des Dogger in ca. 1000 m Teufe gesammelt. Diese Strecken wurden mit einer kleinen Teilschnittmaschine aufgefahren und haben einen Querschnitt von ca. 20 m² bis ca. 30 m². Aufgrund der Gebirgsverhältnisse wurde ein Ausbau aus einer zweischaligen, armierten Spritzbetonschicht mit Sohlenschluss erstellt. Zusätzlich wurde der Gebirgsverband durch Injektionsmaßnahmen mit einem 2-Komponenten-Kunstharzsystem und Injektionsankern unterschiedlicher Länge verstärkt. Der Ausbau ist auch nach acht Jahren Standzeit noch intakt.

Die oben dargestellten Erfahrungen im Deckgebirge des Endlagers Konrad sowie entsprechende Erfahrungen aus den Untertagelaboren Hades, Bure und Mont Terri belegen, dass Auffahrungs-, Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen von Grubenräumen in wasserempfindlichen Tonen / Tonsteinen kosten- und zeitaufwändig sind. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen in den Tongesteinen ist eine konkrete Ausweisung einer Schicht- oder Auffahrleistung und deren Kosten als Planungsgrundlage schwierig. Tatsache ist, dass die Kosten für den Sicherungs- und Ausbaaufwand deutlich höher sind als im wasserunempfindlichen und standfesten Gebirge.

Frankreich

Das französische Konzept für die Errichtung eines Endlagers in Ton basiert im wesentlichen auf den Erfahrungen im Untertagelabor in Bure /2-24/ (vgl. Kap. 2.2.2). Die als potenzielle Wirtsgesteine vorgesehenen Tonsteine besitzen einen höheren Diagenesegrad und somit eine wesentliche höhere Druckfestigkeit als der belgische Boom Clay. Die geomechanischen Rahmenbedingungen für die bergbaulichen Tätigkeiten zur Erstellung des Grubengebäudes sind daher günstiger.

Das französische Endlagerkonzept für Ton sieht vor, dass die Einlagerungsbereiche über Verbindungs- und Zugangsstrecken mit dem Infrastrukturbereich verbunden sind /2-24/. Die Verbindungsstrecken werden parallel in Gruppen von 3-5 Strecken angeordnet, um Explorations-, Bau-, Einlagerungs- und Verschlussaktivitäten gleichzeitig in jedem Einlagerungsmodul durchführen zu können.

Laut Errichtungsplanung sind die Verbindungsstrecken, wie im Untertagelabor in Bure, mit Teilschnittmaschinen aufzufahren. Das ausgebrochene Material wird mit Schaufelladern auf Dieselfahrzeuge verladen und zu einem untertägigen Zwischenlagerplatz abtransportiert, von wo es nach übertage verbracht wird.

Nach jeweils ca. 80 cm Vortrieb wird der aufgefahrene Abschnitt mit 10 cm Spritzbeton befestigt. Nach Fertigstellung einer Strecke erfolgt der Endausbau mit Beton, der mit Hilfe vorgefertigter Verschalung vor Ort mit einer Stärke von ca. 20 cm bis ca. 30 cm eingebracht wird (Abbildung 3-19). Alternativ kann auch ein Stahlbogenausbau eingesetzt werden.

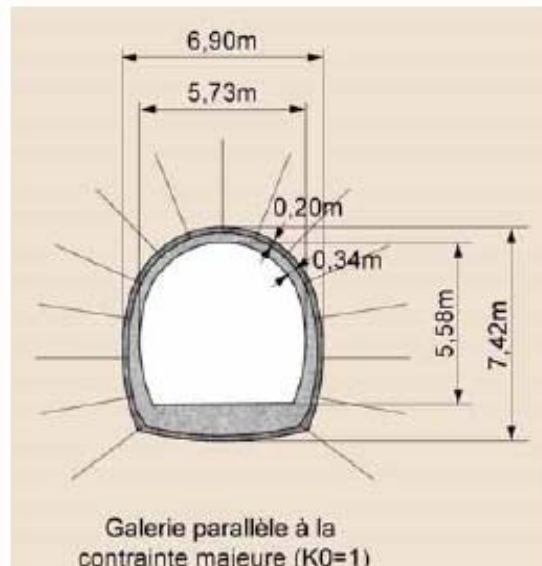


Abbildung 3-19: Querschnitt durch eine Verbindungsstrecke – Frankreich /2-24/

An den Schnittstellen von Strecken gleicher Größe sind spezielle konstruktive Maßnahmen erforderlich, um die Gebirgsstabilität sicherzustellen /2-24/. Die französischen Studien sehen vor, den Durchmesser einer Strecke zu erhöhen, so dass das Verhältnis der nutzbaren Höhen bei ca. 1,3 liegt. Dies verleiht dem Streckenkreuz eine wesentliche höhere Stabilität. Eine andere Möglichkeit bilden Verstärkungspfeiler aus Beton an den vier Ecken des Streckenkreuzes.

Die für Abdichtungsbauwerke im Zuge der Verschlussmaßnahmen vorgesehenen Streckenabschnitte besitzen einen Durchmesser von ca. 7 m bis 7,5 m. Hier wird, um die Integrität des Gebirges so wenig wie möglich zu stören, auf den Einsatz von Felsankern verzichtet. Stattdessen wird stahlarmierter Spritzbeton mit einer Dicke von ca. 80 cm verwendet (Abbildung 3-20).

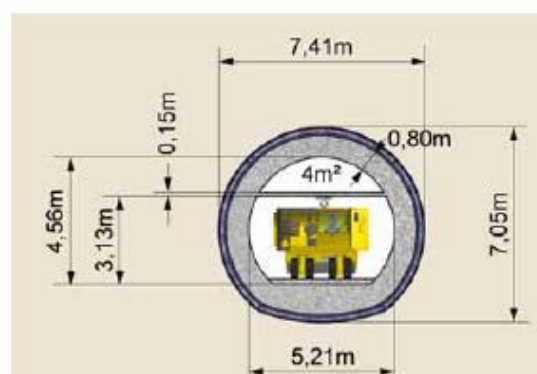


Abbildung 3-20: Streckenquerschnitt an für Abdichtungsbauwerke vorgesehenen Streckenabschnitten – Frankreich /2-24/

Die Gebirgssicherung und der Ausbau des Grubengebäudes dienen die Arbeitssicherheit während der gesamten Betriebsphase des Endlagers – vom Bau bis zur Stilllegung – durch Gewährleistung der Grubenraumstabilität.

Die Planungen für die Auslegung des Streckenausbaus basieren auf thermo-mechanischen Modellrechnungen. Um die Unwägbarkeiten bei der Abschätzung der thermo-mechanischen Belastungen und bei den Materialkenngrößen zu berücksichtigen, entsprach die Vorgehensweise mit der Einführung von Sicherheitsfaktoren bautechnischen Vorschriften wie dem Eurocode. Für die Berechnung wurden die Finite-Elemente-Methode und die „convergence-confinement method“, die eine vereinfachte Näherung zur Behandlung von Strukturen mit kreisförmigem Querschnitt darstellt, benutzt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen ergaben, dass zur Gebirgssicherung Anker und Spritzbeton erforderlich sind. Die Anker werden unmittelbar hinter der Abbaufont eingebracht, während der Spritzbeton einige Meter dahinter aufgebracht wird. Vorgesehen sind Gebirgsanker mit einer Länge von 2,4 m, die in einem Raster von 1,5 m x 1,5 m gesetzt werden. Zusätzlich wird ein Metallnetz angebracht. Der Spritzbeton vom Typ B40 soll bei einer erwarteten Standzeit von einem Jahr in einer Dicke von 25 cm und bei einer Standzeit von 6 Monaten in einer Dicke von 15 cm aufgespritzt werden.

Die Dimensionen des Ausbaus beziehen sich auf einen Einbau nach einer Standzeit von sechs Monaten und einer angestrebten Lebensdauer von ca. 100 Jahren, wobei Erfahrungen aus Bergbau- und Tunnelbauprojekten vorliegen. Nach Modellrechnungen wird nach 100 Jahren ein Gebirgsdruck von 3,5 mPa auf den Ausbau einwirken. Der Ausbau wird auf einen Druck von 8 mPa ausgelegt. Für einen Hohlraum mit einer Hufeisenform wird bei Verwendung eines Betons vom Typ B60 eine mittlere Dicke von 70 cm erforderlich. Sie beträgt an den Stößen 95 cm und am Übergang von den Stößen zur Sohle, wo die größten Belastungen auftreten, 1,4 m.

Bei dem vorgesehenen Beton handelt es sich um HPC (high-performance concrete). Dieser wird allgemein in Ingenieurbauten verwendet. Sein mechanisches Verhalten wird durch die Art und den Anteil (400 kg/m³) des verwendeten Zements bestimmt. Als Beimischung wird Kalk benutzt, wodurch die relativ hohe Abbindewärme und dadurch die wärmeinduzierte Rissbildung reduziert werden.

Auf der Grundlage vergleichender Untersuchungen über Konzepte zur Streckenlagerung („Einlagerungsstrecke“) und zur Bohrlochlagerung („Einlagerungszelle“) wurde die Bohrlochlagerung als Referenzkonzept für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle (HAW) und ausgedienter Brennelemente (BE) ausgewählt /2-24/ (vgl. Kap. 2.2.2). Hierfür sollen ca. 40 m (HAW) bzw. 43 m (BE) lange Bohrlöcher mit Durchmessern von ca. 0,7 m (HAW) bzw. 2,6-3,3 m (BE) erstellt werden, die senkrecht von den Zugangsstrecken in die beiden Stöße der Zugangsstrecken mit Tunnelbohrmaschinen gebohrt werden. Entsprechend der anderen Wärmeleistung und dem Abklingverhalten der ausgedienten Brennelemente erhalten die Bohrlöcher für diese Abfälle eine Stahlverrohrung und einen 0,8 m starken Bentonitpuffer um die Abfallgebinde. Die vorderen ca. 10 m der Einlagerungsbohrlöcher sind für die Aufnahme der Bohrlochabdichtung vorgesehen. Für die Dimensionen der Zugangsstrecken sind somit

die Ausmaße der Tunnelbohrmaschine und der Platzbedarf bei der Einlagerung der Gebinde ausschlaggebend. Versuche haben gezeigt, dass für die Einlagerung von HAW-Gebinden eine Breite von 6,4 m und eine Höhe von 4,5 m ausreichend ist, während für die Handhabung der größeren BE-Gebinde die Strecke vor der Einlagerungsbohrung auf eine Breite von ca. 10 m und eine Höhe von ca. 7 m erweitert werden muss. Die Gebirgssicherung wird durch 4 m lange Anker und Spritzbeton mit einer Dicke von 20 cm erreicht. Der Streckenausbau besteht aus Beton (B60) mit einer Dicke von 1 m, der sechs Monate bis ein Jahr nach der Streckenauffahrung erstellt wird.

Schweiz

Das Schweizer Wirtsgestein Opalinus-Ton besitzt nach den Ergebnissen, die im Untertagelabor Mont Terri sowie in der Erkundungsbohrung Benken gesammelt wurden, felsmechanische Kennwerte, die für die bergbaulichen Arbeiten relativ günstig sind /3-20/.

Wie in Kap. 2.2.3 beschrieben, werden im Schweizer Endlagerkonzept die verschiedenen Abfallarten in getrennten Bereichen des Endlagerbergwerks eingelagert. Das Endlager mit einer Ausdehnung von ca. 2.700 m x ca. 750 m soll in der Mittelebene der Wirtsgesteinsformation in ca. 650 m Tiefe aufgefahren werden. Ausgangspunkt der Errichtung ist ein Infrastrukturbereich mit einem Felslabor für untertägige Untersuchungen für die Lagerauslegung und den abschließenden Sicherheitsnachweis vor der Inbetriebnahme. Vorlaufend zur Errichtung des restlichen Endlagers wird ein Pilotendlager errichtet, das aus zwei kurzen Einlagerungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente sowie einer Kontrollstrecke besteht. Falls die hier gewonnenen Daten die Annahmen des Sicherheitsnachweises bestätigen, kann mit der Auffahrung des eigentlichen Endlagers begonnen werden. Dieses umfasst Einlagerungsstrecken für ausgediente Brennelemente und die wärmentwickelnde Abfälle, Einlagerungstunnel für langlebige, mittelradioaktive Abfälle sowie Betriebs-, Bau- und Lüftungstunnel.

Als Grundlage für die Errichtungsplanung wurden von der NAGRA die geomechanischen Eigenschaften des Opalinus-Tons durch In-situ-Untersuchungen im Untertagelabor in Mont Terri, Laboruntersuchungen sowie Modellrechnungen analysiert /3-20/, /3-24/. Durch diese Untersuchungen konnten Aussagen zur Stabilität der Grubenräume, die für das Endlagerbergwerk aufzufahren sind, und die erforderlichen Sicherungsmaßnahmen vorab getroffen werden. Bei den Modellrechnungen wurde – abweichend zu den ermittelten Gesteinseigenschaften – ein elastisch-isotropes Medium unterstellt, weil elastische Transversalisotropien im Modell nicht abgebildet werden können. Aufgrund dieser Modelleinschränkungen werden die Deformationen vor allem in horizontaler Richtung überzeichnet. Weitere vereinfachte Modellannahmen betreffen die hydraulischen Eigenschaften des Opalinus-Tons. So blieb eine Änderung des Porenwasserdrucks durch Drainage unberücksichtigt, obwohl eine Drainage des Porenwassers in die Hohlräume die Porenwasserdrücke erheblich abbauen und so indirekt die Verformung reduzieren würde. Die Modellierung der Gebirgssicherung berücksichtigt das relativ späte Einbringen und allmähliche Aushärten des Spritzbetons. Zusammenfassend wurden die Modellrechnungen im Hinblick auf die Materialparameter und hydraulischen Verhältnisse unter konservativen Annahmen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Von besonderer Bedeutung ist, dass die Einlagerungsstrecken für HAW/BE aufgrund der kurzen Offenstandszeiten und geringen Streckenquerschnitte keine Gebirgsstabilisierung benötigen. Aus Gründen des Arbeitsschutzes ist aber eine Sicherung durch Felsanker und Stahlnetzen erforderlich, da die Strecken schichtparallel aufgeföhren werden und somit Steinschlaggefahr besteht. Die im Felslabor Mont Terri festgestellte erhöhte Standfestigkeit des Opalinus-Tons, welche auf eine konturnahe Austrocknung durch die Belüftung zurückzuführen ist, bildet in den Einlagerungsstrecken eine zusätzliche, nicht berücksichtigte Reserve /3-25/.

Tabelle 3-2: Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierung – Schweiz /3-20/

	Rechenmodell	Ausbruch- Querschnitt [m ²]	Spritz- beton [cm]	Moment [kNm]	Normal- kraft [kN]	Querkraft [kN]	max. Verschie- bung [mm]
Lagerstollen BE/HAA	<i>Strain softening</i> und Trennflächen- modell, quasi homogenes Spannungsfeld	4.9	0	kein Einbau	kein Einbau	kein Einbau	24
Lagertunnel LMA 1 (Umlade- station)		77.7	30	25	748	70	78
Betriebstunnel (und Lagertunnel LMA-2)	<i>Strain softening</i> und Trennflächen- modell, hohe Horizontalspan- nungen	26.5	25	20	759	75	142

Die Einlagerungsstrecken für HAW/BE sollen mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine vom Bautunnel her aufgeföhren werden. Entstehender Staub wird am Entstehungsort abgesaugt und die Luft vor der Einleitung in offene Strecken oder der Abgabe in die Umgebung über entsprechende Filter geföhrt.

Entsprechend den Erfahrungen im Untertagelabor Mont Terri sollen die übrigen Strecken und Kammern im Opalinus-Ton entweder mit Teilschnittmaschinen (Abbildung 3-21) oder durch gebirgsschonendes Sprengen (Abbildung 3-22) aufgeföhren werden. Diese Strecken werden entsprechend den Ergebnissen der Modellrechnungen (Tabelle 3-2) mit Felsankern und faserarmiertem Spritzbeton stabilisiert. Werden als Armierung Stahlfasern eingesetzt, wird eine unarmierte Deckschicht am Schluss aufgebracht. Bei Verwendung von Kunststofffasern ist dies nicht nötig. Durch mehrschichtigen Auftrag wird die im entsprechenden Bauteil notwendige Auskleidungsstärke ca. 50 m hinter der Aufföhrensfront erreicht. Der Ausbau erfolgt überall einschalig.

Die nichtwärmeentwickelnden Abfälle (LMA-1 und LMA-2) werden in Strecken mit hufeisenförmigem Querschnitt mit einer Breite von 7,10 m bis 7,60 m und einer Höhe von 9,20 m bis 10,80 m eingelagert. Die Aufföhren und Stabilisierung erfolgt in der oben beschriebenen Art und Weise.



Abbildung 3-21: Teilschnittmaschine /3-20/



Abbildung 3-22: Bohrjumbo zum Bohren der Löcher für den Sprengvortrieb /3-20/

Belgien

Wesentliche Grundlagen für das belgische Endlagerkonzept sowie für die Errichtungsplanung für das Endlagerbergwerk wurden aus den Erfahrungen bei der Errichtung und dem Betrieb des Untertagelabors Hades abgeleitet /3-18/, /3-19/.

Gemäß dem belgischen Endlagerkonzept soll in der Mitte der tertiären Boom-Clay-Formation in ca. 230 m Teufe ein Endlagerbergwerk mit einer Ausdehnung von ca. 1400 m x 800 m errichtet werden (Kap. 2.2.1) /2-20/. Der Verlauf der Grubenräume folgt dabei insgesamt der Schichtneigung der Tonformation von ca. 1° bis 2°. Die verschiedenen Abfallarten sollen in unterschiedlichen Bereichen des Grubengebäudes gelagert werden. Die Abmessungen und die Anordnung der Zugangs- und Endlagerstrecken wurden auf der Grundlage thermome-

chanischer Modellrechnungen unter Berücksichtigung betrieblicher Anforderungen (Abmessungen der Abfallgebinde sowie der Geräte für den Bau, Betrieb und die Schließung des Endlagers) festgelegt.

Der Boom-Clay stellt ein wenig verfestigtes, relativ plastisches Sediment dar, das aufgrund seiner hohen Verformbarkeit (E-Modul: 200 bis 400 mPa) besondere Anforderungen an die Erstellung und Offenhaltung der Grubenbaue stellt. Die geomechanischen Eigenschaften des Tons wurden durch umfangreiche In-situ-Untersuchungen im Untertagelabor Hades, Laboruntersuchungen sowie Modellrechnungen analysiert /2-20/. Die gewonnenen Daten stellen, neben den praktischen Erfahrungen beim Betrieb des Untertagelabors, wichtige Grundlagen für die Errichtungsplanung für das Endlager dar.

Das Grundprinzip beim Auffahren der Grubenräume ist es, die Störungen im umgebenden Gebirge so gering wie möglich zu halten. Diese Störungen hängen wesentlich vom Durchmesser der aufzufahrenden Strecke ab. Bei gleichem Durchmesser ist die Störung des Gebirges um so geringer, je

- schneller das Auffahren erfolgt,
- kürzer die Zeitspanne zwischen Auffahren und Ausbau ist,
- geringer das Überschneiden der Strecke gehalten wird,
- enger der Ausbau am geschnittenen Profil anliegt und
- steifer der Ausbau ist /3-26/.

Ziel dieser Maßnahmen ist es auch, die Mächtigkeit der auffahrungsbedingten Auflockerungszone (excavation damage zone, EDZ) zu begrenzen, die ein potenzieller Ausbreitungspfad für Lösungen während der Nachbetriebsphase des Endlagers ist. Eine Parameterstudie, die auf einem visko-elasto-plastischen Modell basiert, hat ergeben, dass für ein schonendes Auffahren eine Vortriebsgeschwindigkeit von wenigstens 2 m pro Tag erforderlich ist. Weiterhin wurde das Überschneiden (= Differenz zwischen aufgefahretem Querschnitt und dem Ausbau) auf 3 cm begrenzt.

Zur Einhaltung der oben angegebenen Anforderungen wurde für die Auffahrung der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten des Untertagelabors HADES eine Teilschnittmaschine mit parallelem Schildvortrieb verwendet (Abbildung 3-23).

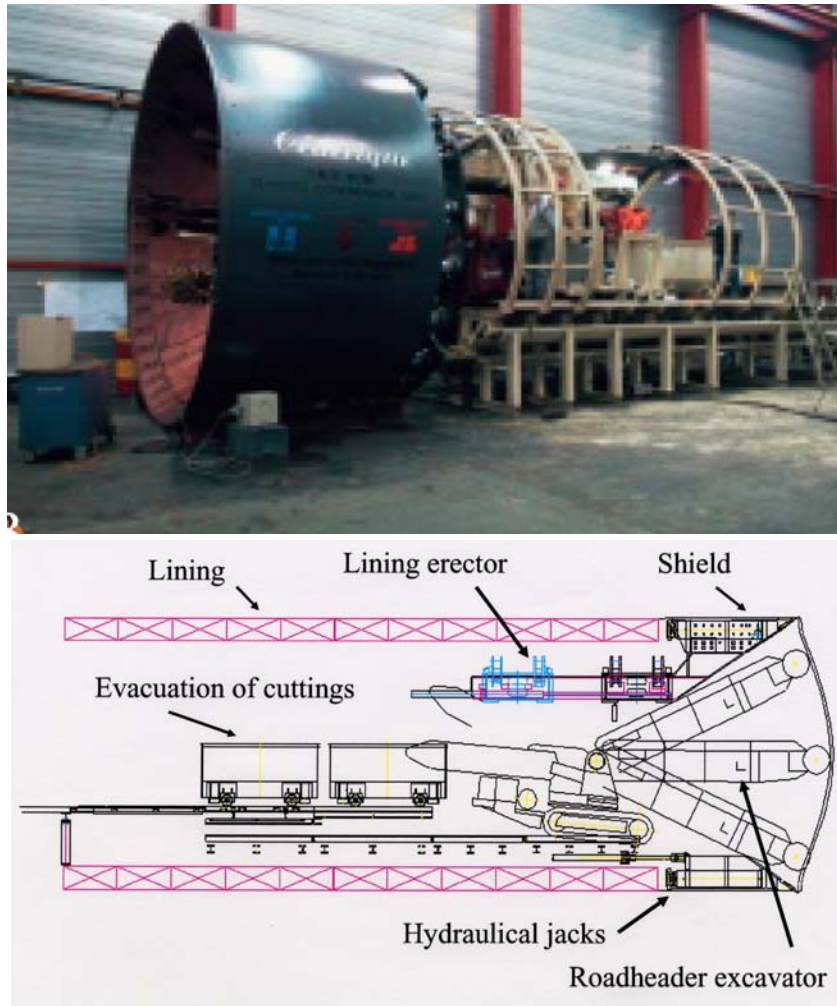


Abbildung 3-23: Teilschnittmaschine mit Vortriebsschild (oben), schematische Darstellung des Streckenvortriebs (unten). Untertagelabor Hades – Belgien /3-27/

Der Ausbau der Strecke erfolgte aufgrund der hohen Plastizität des Tones sofort nach dem Auffahren, wobei drei Technologien erprobt wurden /3-26/:

- Tübbinge aus Metall (Abbildung 3-24), die aus vorgefertigten Segmenten zusammengeschaubt wurden, mit nachfolgender Einbringung eines Injektionsmittels in den Ringraum zwischen Ausbau und Gebirge.



Abbildung 3-24: Engständiger Ausbau mit Stahltübbing, Untertagelabor HADES – Belgien /3-26/

- Das Einschieben von Sicherungsröhren aus Stahl oder Beton (Abbildung 3-25).
- Die Keilblocktechnik, die für den U-Bahnbau im Boom-Clay Londons entwickelt wurde. Hierbei werden vorgefertigte Segmente an die Wandung der aufgefahrenen Strecke angepasst und durch keilartige Segmente verspannt (Abbildung 3-26).

Die vergleichenden Untersuchungen haben ergeben, dass das Konzept der Tübbinge zu massiven Einwirkungen auf das Gebirge führt und deshalb zu verwerfen ist /3-26/. Das Einschieben von Stahl- oder Betonröhren bereitet aufgrund der großen Reibungskräfte zwischen Gebirge und Ausbau erhebliche Schwierigkeiten und wurde deshalb fallen gelassen. Als günstigstes Verfahren wurde die Keilblock-Technik identifiziert. Bei diesem Verfahren werden pro Ring 10 Betonsegmente mit einer Dicke von 40 cm und einer Breite von 1,0 m in den Streckenquerschnitt eingebracht.

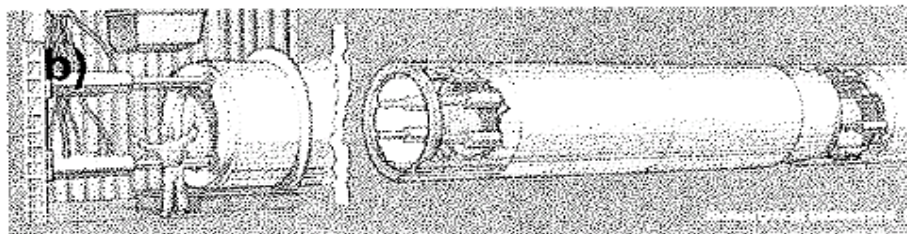


Abbildung 3-25: Schematische Darstellung der Sicherung einer Strecke durch das Einschieben von Stahl- oder Betonröhren – Belgien /3-26/

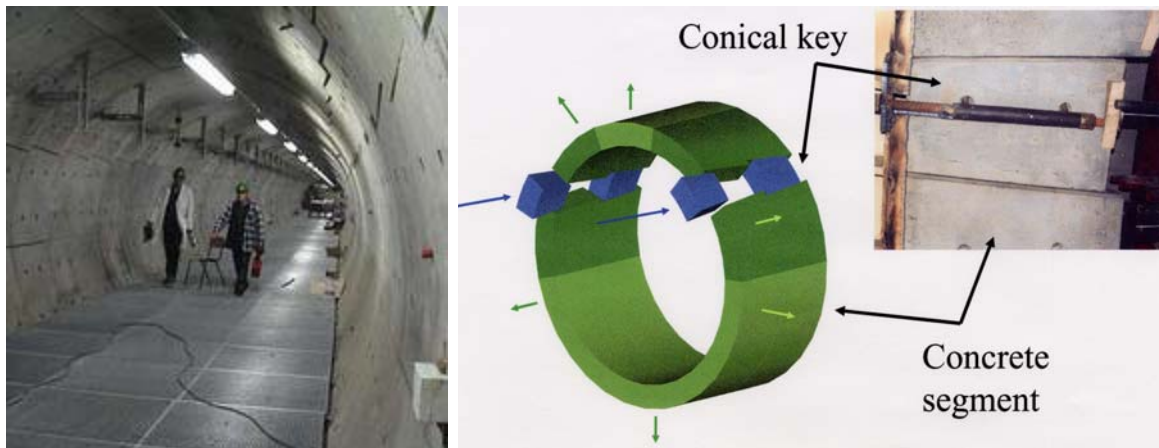


Abbildung 3-26: Betonausbau in Keilblocktechnik in der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten des Untertagelabors HADES – Belgien /3-26/

Bezüglich der Anwendung der Ausbaukonzepte auf ein zukünftiges Endlager wurde festgestellt, dass die Keilblock-Technik nicht für den Ausbau aller Grubenräume geeignet ist /2-20/. So sind z. B. Streckenkrenzungen oder -verzweigungen nicht durch einen Keilblock-Ausbau zu stabilisieren. Daher ist in einem späteren Endlager in diesen Bereichen ein Stahlausbau oder eine andere Ausbautechnik erforderlich.

3.3.2.3 Salzformationen

Bezüglich des Erstellens von Strecken und Kammern in Salzformationen liegen in Deutschland umfangreiche Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau sowie endlager-spezifische Erfahrungen aus dem Forschungsbergwerk Asse und dem Endlager Morsleben vor. Diese Erfahrungen machte man sich auch bei der Auffahrung des Erkundungsbergwerks Gorleben zu nutze. Die Erkundung soll standortspezifische Daten liefern, die einerseits eine Beurteilung der Standorteignung ermöglichen sollen und andererseits nach Feststellung der Eignung die Grundlage bilden, um ein Endlager zu planen, auszulegen und Genehmigungsunterlagen zu erstellen.

Basierend auf dem derzeitigen Stand der Erkundung wurde das Arbeitsmodell Gorleben entwickelt, das eine standortspezifische, an die Geologie angepasste Endlagerplanung darstellt (vgl. Kap. 2.3, /2-30/). Dabei müssen die Grubenbaue Sicherheitsabstände zu Anhydrit- und Carnallit-Lagen sowie den Salzstockflanken einhalten. Die Einlagerungsstrecken werden in homogenen Salzbereichen angeordnet (Abbildung 2-12). Das derzeitige Konzept sieht zwei Sohlen vor, wobei die 840 m-Sohle der aktuellen Erkundungssohle entspricht (später Abwettersohle) und die neu aufzufahrende 870 m-Sohle der Einlagerung dienen soll.

Die Grubenräume des derzeitigen Erkundungsbergwerks umfassen einen Infrastrukturbereich und eine Umfahrung des ersten Erkundungsbereiches (Abbildung 3-27). Die weitere Erkundungsplanung sieht vor, in der Längsachse des Salzstockes nach Nordosten zwei mehr oder weniger parallel verlaufende Richtstrecken aufzufahren, die im Abstand von 100 m durch Querschläge miteinander verbunden werden, wobei die nördliche Richtstrecke

im Staßfurt-Steinsalz und die südliche im Leine-Steinsalz verläuft (Abbildung 3-28). Bevor die Strecken aufgefahren werden können, müssen Vorbohrungen gestoßen und geophysikalische Messungen (elektromagnetische Hochfrequenz-Reflexionsmessungen) durchgeführt werden, um Bereiche zu identifizieren, die frei von Anhydrit- und Kaliflöz-Vorkommen sind.

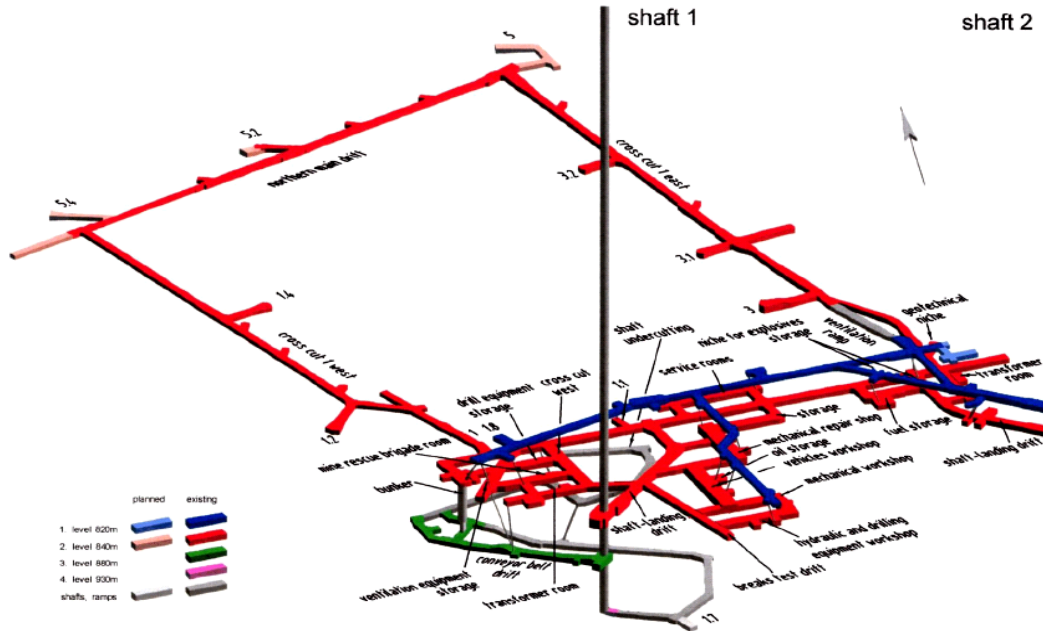


Abbildung 3-27: Infrastrukturbereich und aufgefahrene Strecken des EB1 – Deutschland.

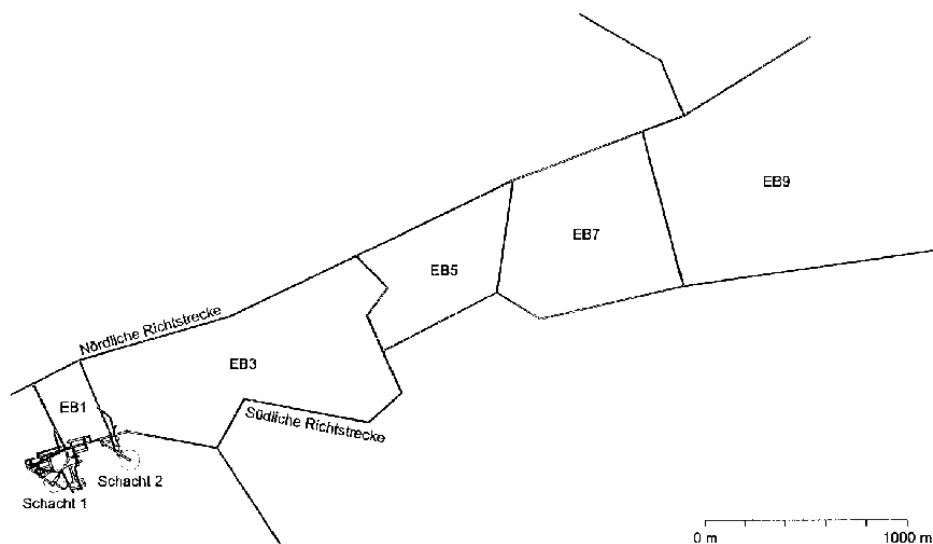


Abbildung 3-28: Geplante Erkundungsbereiche im Salzstock Gorleben – Deutschland /2-29/

Es ist vorgesehen, die Einlagerungssohle durch eine Rampe an das Grubengebäude des Erkundungsbergwerks anzubinden. Die bestehenden Infrastrukturräume der Erkundungssohle können für den konventionellen Bergwerksbetrieb im späteren Endlager genutzt werden.

Im Bereich der Einlagerungssohle wird für die Einrichtungen und Maschinen des Kontrollbereiches ein eigener Infrastrukturbereich mit einem geschätzten Ausbruchsvolumen von ca. 110.000 m³ aufgeföhren. Zusätzlich ist ein Bunker mit einem Volumen von ca. 10.000 m³ für Versatzmaterialien erforderlich. Die Infrastrukturräume sollen im feinkristallinen Leine-Steinsalz angelegt werden, da dieses im Allgemeinen wesentlich standfester ist als das Staßfurt-Steinsalz.

Die Aufföhruung der erforderlichen 14 Einlagerungsfelder wird mit der Errichtung der nördlichen und südlichen Richtstrecken und Querschläge begonnen /2-30/ (Abbildung 2-12). Die Querschnitte der nördlichen Richtstrecke und der Querschläge hängen von der eingesetzten Transporttechnik ab. Bei einer gleisgebundenen Transporttechnik mit einem parallelen Fahrzeug ergibt sich ein Streckenprofil mit einem Querschnitt von ca. 49 m² (Abbildung 3-29). Für die südliche Richtstrecke zur Vorrichtung der Einlagerungstrecken ist ein Streckenquerschnitt von ca. 25 m² erforderlich (Abbildung 3-29), für Querschläge zur POLLUX-Einlagerungstrecke von ca. 32 m².

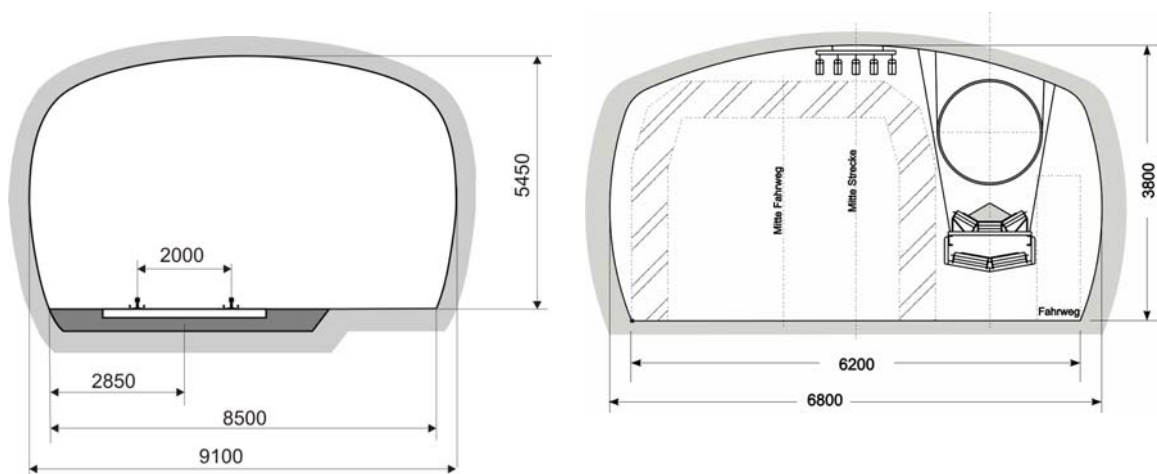


Abbildung 3-29: Streckenquerschnitte der nördlichen (links) und südlichen Richtstrecke – Deutschland /2-30/

Bei einer Länge der nördlichen Richtstrecke von ca. 5.000 m, der südlichen Richtstrecke von ca. 5.600 m und der Querschläge von ca. 4.500 m lässt sich das Ausbruchsvolumen wie folgt abschätzen:

Nördliche Richtstrecke	ca. 5.000 m x 49 m ² = 245.000 m ³
Südliche Richtstrecke	ca. 5.600 m x 25 m ² = 140.000 m ³
Querschläge	ca. 4.500 m x 32 m ² = <u>144.000 m³</u>
∑ Richtstrecken und Querschläge	<u>529.000 m³</u>

Die bis zu 300 m langen, blinden Einlagerungstrecken für die POLLUX-Einlagerung zweigen von den zwischen den Richtstrecken angeordneten Querschlägen ab. Der Abstand zwischen den Strecken beträgt 13,5 m, die Streckenquerschnittsgröße ca. 15 m² (Abbildung 3-30). Die für die Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder Abfälle vorgesehenen Strecken besitzen einen Streckenquerschnitt von ca. 34 m² und unmittelbar über dem Einlagerungs-

bohrloch einen 3 m tiefen Bohrlochkeller und eine Aufweitung der Strecke auf 6,6 m (Abbildung 3-30).

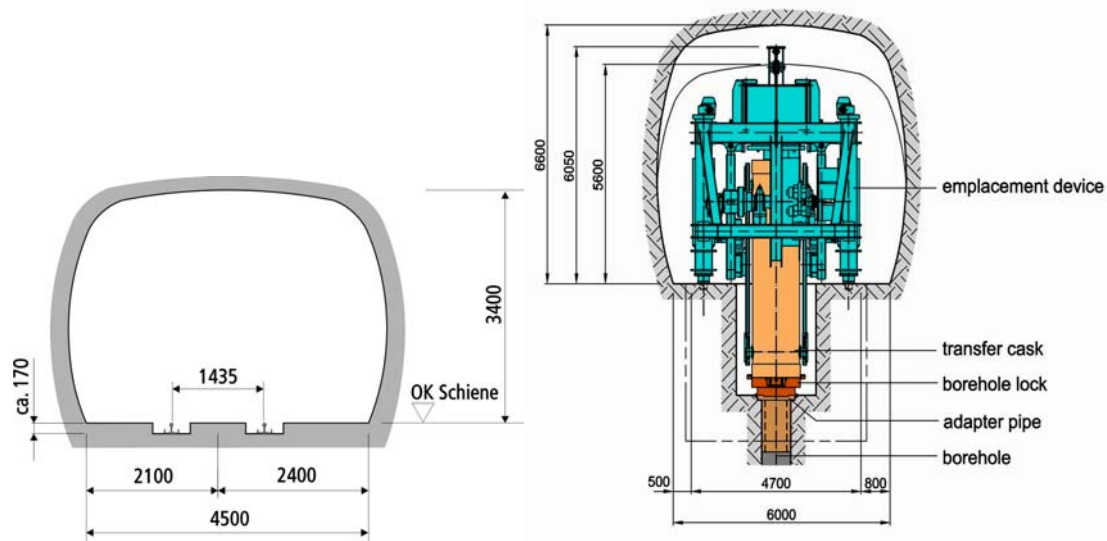


Abbildung 3-30: Querschnitte von Einlagerungsstrecken für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (links) und für die Bohrlochlagerung – Deutschland /2-30/

Die Errichtungsplanung sieht vor, dass die Grubenräume eines Endlagerbergwerks im Salz grundsätzlich gebirgsschonend mit Vollschnitt- oder Teilschnittmaschinen aufgefahren werden /2-29/. Dabei erlaubt der Einsatz von Teilschnittmaschinen die größere Flexibilität zum profilgenauen Schneiden unterschiedlicher Streckenquerschnitte (Abbildung 3-31), während Tunnelbohrmaschinen den raschen Vortrieb langer Strecken (z. B. der Richtstrecken) ermöglichen. Das Bohr- und Sprengverfahren soll nur ausnahmsweise in betrieblich unumgänglichen Fällen eingesetzt werden.



Abbildung 3-31: Teilschnittmaschine im Salz – Deutschland

Die Standfestigkeit des Gebirges erlaubt es, nach dem Auffahren der Kammern und Strecken auf einen Ausbau zu verzichten (Abbildung 3-32). Langfristig genutzte Strecken und Kammern werden aus Gründen der Arbeitssicherheit mit Gebirgsankern und Stahlnetzen gegen Steinschlag gesichert. Die Gebirgskonvergenz infolge der viskoplastischen Eigenschaften des Salzes erfordert das regelmäßige Nachschneiden der Grubenraumkonturen.



Abbildung 3-32: Unausgebauter Grubenraum (Werkstatt) im Erkundungsbergwerk Gorleben – Deutschland

3.3.3 Die Erstellung von Bohrlöchern

Im Zuge der Errichtung eines Endlagers werden Bohrungen zu unterschiedlichen Zwecken erforderlich. Dies sind:

- Erkundungsbohrungen, meist als Kernbohrungen, für geologische Zwecke
- Technische Bohrungen, z. B. für geotechnische Instrumentierungen
- Versorgungsbohrungen, z. B. für die Installation der Wettertechnik
- Einlagerungsbohrlöcher

Aus betrieblichen und sicherheitlichen Gründen bestehen an das Erstellen von Einlagerungsbohrlöchern besonders hohe Anforderungen bezüglich der exakten Einhaltung geometrischer Vorgaben, der Bohrlochorientierung sowie der Einhaltung von Sicherheitsabständen zu wasserführenden Formationen und Störungen.

3.3.3.1 Kristallingesteine

Kristallingesteine werden im Hinblick auf ihre Bohrbarkeit zu den mittelharten bis sehr harten Gesteinen gerechnet /3-28/.

Die Bohrlöcher, die für die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Kristallgesteinen vorgesehen sind, besitzen je nach Abfallart Tiefen von zu 11 m und Durchmesser von ca. 1,35 m bis ca. 1,85 m /2-9/, /2-12/, /2-15/. Vor dem Bohren größerer Bohrungen erfolgt eine Vorerkundung durch eine Kernbohrung, um wasserführende Störungen zu identifizieren und durch Zementinjektionen abzudichten. Ist ein Abdichten nicht möglich, wird das Bohrloch aufgegeben.

Das Aufweiten der Vorbohrung kann entweder mit Hilfe einer für den vertikalen Einsatz modifizierten Mikro-Tunnel-Anlage (Abbildung 3-33) oder einem Flachbohrkopf erfolgen.

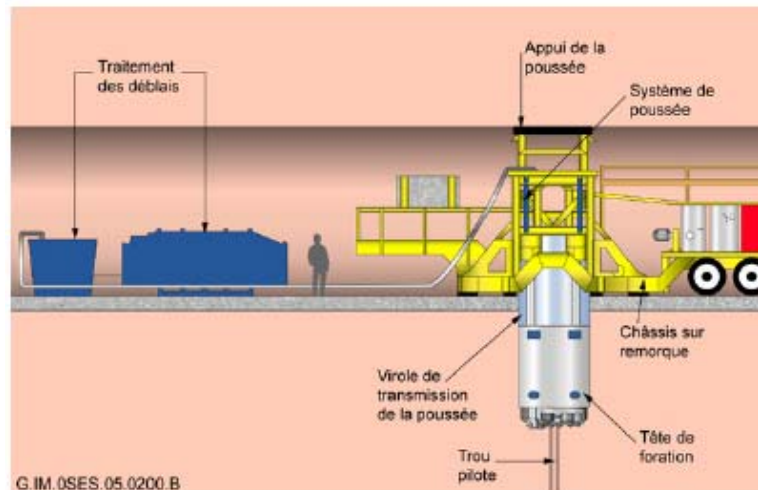


Abbildung 3-33: Schematische Darstellung des Erstellens eines Einlagerungsbohrlochs mittels Mikro-Tunnel-Bohrmaschine – Frankreich /2-25/

Der Einsatz der Mikro-Tunnel-Anlage wurde in den Untertagelaboren Aspö und Onkalo erfolgreich getestet (Abbildung 3-34). Die Hauptprobleme bilden der Vorschub auf den Bohrkopf und die Entfernung des Bohrkleins. Bei dem getesteten Prototypen wird der Vorschub des Bohrkopfs durch vier hydraulische Stempel erzeugt, die auf die beim Bohren mitgeführte Stahlverrohrung drücken /2-12/. Die Länge der einzelnen Stahlrohre entspricht dem Kolbenhub der Stempel. Das Bohrklein wird über ein Saugrohr mit Hilfe einer Vakuumpumpe entfernt.

Alternativ wurde auch die horizontale Bohrlochlagerung untersucht. Hierfür geeignetes Bohr- und Einlagerungsgerät wird im Untertagelabor Äspö erprobt /3-29/.

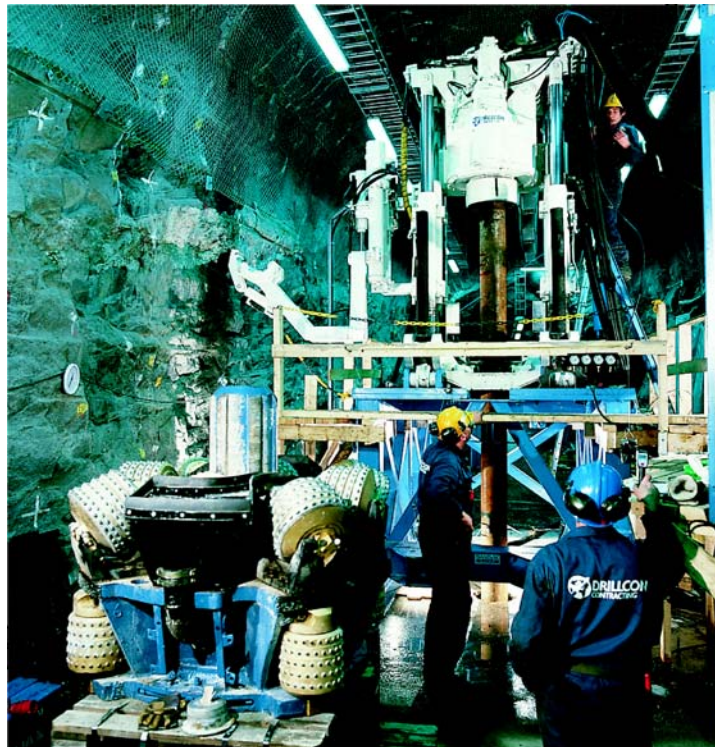


Abbildung 3-34: Test der Mikrotunnel-Bohrmaschine im Untertagelabor Onkalo – Finnland /3-13/

Für die Aufweitung des Bohrloches auf den gewünschten Enddurchmesser kann ferner ein Flachbohrkopf eingesetzt werden /3-30/. Hierbei handelt es sich um eine „kleine“ Vortriebsmaschine, die einer Vollschnitt-Tunnelfräse sehr nahe kommt. Beim „Drückenden Lösen“ wird unter hoher Auflast ein sich drehender Bohrkopf mit Rollenmeißeln, der mit Warzen, Disken oder Zähnen bestückt ist, in versetzten Spuren über den Fels gerollt und somit die ganze Bohrlochsohle bearbeitet. Die Auflast wird mittels Schwerstangen, Zusatzgewichten sowie durch aktiven Zylindervorschub erzeugt. Die Entfernung des Gesteinsmehls kann mittels Lufthebeverfahren, Saugbohrverfahren, Jet-Bohrverfahren sowie Counterflash-Verfahren erfolgen. Durch ein effizientes Förderndes Bohrkleins wird ein Verkleben des Bohrkopfes verhindert.

3.3.3.2 Ton / Tonstein

Die Wahl des Bohrverfahrens für die Gewinnung von Kernen aus Tonen und Tonsteinen ist von den petrophysikalischen Eigenschaften der jeweiligen Tonformation abhängig. Die für die einzelnen Wirtsgesteine geeigneten Verfahren wurden durch entsprechende Versuche in den Untertagelaboren erprobt. Generell ist auch hier zur Erkundung der geologischen Situation eine Vorbohrung zu erstellen, die im Anschluss auf den Enddurchmesser erweitert wird. Nach Möglichkeit sollen die Vorerkundung und das anschließende Aufbohren mit einem Bohrgerät durchgeführt werden.

Folgende Verfahren sind für die Erstellung von vertikalen Bohrlöchern in Ton / Tonstein geeignet /3-31/:

Variante 1: Erstellung eines Vorbohrlochs mittels Hohlbohrschnecke inkl. einer Kernbohrung

Die Bohrungen werden im Drehbohrverfahren mit kontinuierlicher Förderung mittels einer Endloshohlbohrschnecke erstellt. Die Gestänge (Schneckensegmente) besitzen eine Länge von 1,00 m bis 2,00 m und werden so lange nachgesetzt, bis die gewünschte Teufe der Bohrung erreicht ist. Der entscheidende Unterschied gegenüber dem Endlosschneckenbohren ist ein durchgehendes Hohlgestänge, in dem sich an einem separaten Gestänge ein Zentralbohrer befindet, der während des Bohrens mit dem Schneckenrohr verbunden ist. Soll eine Bodenprobe entnommen werden, wird das Gestänge mit dem zentralen Bohrwerkzeug entfernt und eine Vorrichtung zur Entnahme von Bodenproben (z. B. ein Kernbohrstrang) installiert.

Variante 2: Erstellen einer Kernbohrung mit einem Rammbohrhammer

Der Rammbohrhammer ist ein bewährtes Gerät zur Entnahme ungestörter Bodenproben beim Einsatz mechanischer Trockenbohrverfahren. Der am Seil hängende Drucklufthammer treibt eine mit ihm an seinem unteren Ende verbundene Rammschappe in das Erdreich ein und bringt beim Herausziehen die eingeschlagene Bodenprobe vollständig heraus. Das Bohrloch wird in seiner ganzen Länge gekernt, so dass auch dünnste Einlagerungen sicher zu erkennen sind. Die erreichbaren Bohrtiefen betragen je nach Gesteinsbeschaffenheit und Bohrdurchmesser bis ca. 80 m.

Variante 3a: Erstellung einer Kernbohrung im Drehbohrverfahren (Doppelkernrohr - Rotarybohren mit Formationswasser)

Handelt es sich bei der Tonformation um standfesten Tonstein, wie er z. B. auf der Schachtanlage Konrad vorgefunden wird, besteht die Möglichkeit, eine Vorerkundung der Einlagerungsbohrung mit einem Drehbohrverfahren durchzuführen. Die Probennahme erfolgt mit einem Doppelkernrohrsystem. Dieses besteht aus zwei ineinander liegenden Rohren, welche über ein Lager miteinander verbunden sind. Hierbei schützt das Innenrohr die Probe, welche mit zunehmender Teufe in dieses hineinwandert. Der Bohrprozess wird über die Rotation des Kernrohres über den Bohrstrang ausgeübt. Als Bohrwerkzeug befindet sich am unteren Ende des Kernrohres eine Kernbohrkrone, die an das jeweilige Gestein angepasst werden kann. Um die Vorerkundung der Einlagerungsbohrungen zu beschleunigen, kann für diesen Zweck ein Doppelseilkernrohr verwendet werden.

Die Seilkernrohre entsprechen der vorher erwähnten Konstruktion des Doppelkernrohres mit gelagertem Innenrohr. Jedoch ist bei dem Seilkernrohr die gesamte Innenrohreinheit im Außenrohr ver- und entriegelbar und am Seil mit Hilfe eines Kernrohrfängers (Overshot) ausbaubar, während das Gestänge im Bohrloch verbleibt.

Um eine höhere Qualität der zu erbringenden Proben zu gewährleisten, ist der Einsatz eines Plastik-, Fiberglas oder PVC-Liners erforderlich. Dieser wird in das Innenrohr eingelassen. Ist die Kernstrecke abgebohrt, wird dieser Liner mit dem darin befindlichen Kern entnommen.

Somit ist die Bodenprobe während des Bohrvorganges und der Probenentnahme zusätzlich geschützt.

Das beschriebene Kernsystem funktioniert nur in Verbindung mit einem Spülmedium, welches den Austrag des Bohrkleins bewirkt. Es kann eine Flüssigkeits- oder Luftspülung verwendet werden. Flüssigkeitsspülung (Wasser) ist mit NaCl aufzusalzen, um ein Quellen des Tones zu verhindern. Bei Anwendung einer Flüssigkeitsspülung ist am Bohrort ein Spülungstank und eine Spülungspumpe zu installieren.

Variante 3b: Erstellung einer Kernbohrung im Drehbohrverfahren (Einfach- oder Doppelkernrohr - Rotarybohren mit Luft)

Für den Betrieb mit dem Spülungsmedium Luft sind geringfügige Änderungen am Kernsystem erforderlich.

Im Gegensatz zum Kernsystem, welches mit Flüssigkeiten betrieben wird, haben die Stabilisatoren, Bohrkronen und das Innenrohr ein anderes Design und geänderte Abmessungen. Beim Betrieb mit Luft wird keine Tankanlage und keine Spülpumpe benötigt. Betrieben wird dieses System mit einem Kompressor, der ca. 10 m³/min bei 10 bar Luft fördert und eine Aufstiegs geschwindigkeit von min. 17 m/sec im Ringraum gewährleistet. Es ist vorteilhaft, dass die Geräte zur Spülluftaufbereitung und -behandlung nicht im Bereich des Bohrgerätes aufgestellt werden müssen.

Wird beim Niederbringen der Bohrung Formationswasser oder Feuchte angetroffen, so wird der Austrag des Bohrkleins stark beeinträchtigt. In diesem Falle kann auf Salzwasser- oder Ölspülung umgestellt werden.

Aufweitung der Bohrung auf Enddurchmesser

Die Bohrlöcher haben nach dem Ziehen der Bohrkerns einen Durchmesser von maximal 280 mm. Die Aufweitung auf den für die Einlagerung gewünschten Bohrlochdurchmesser kann mit Hilfe der Schneckenbohrtechnik erfolgen

Variante 1: Aufbohren mittels Hohlbohrschneckentechnik

Bei diesem Verfahren wird die Bohrung kontinuierlich erweitert. Die Hohlbohrschnecke ist hierbei mit einem Piloten oder einem Zentralbohrer ausgestattet, so dass der Strang im bestehenden Bohrloch geführt wird. Das Bohrklein wird kontinuierlich über die Schnecke ausgetragen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass in einem Erweiterungsschritt vom Bohrlochmund bis zur Endteufe gebohrt werden kann. Je nach Konsistenz der Tonformation wird der Enddurchmesser des Bohrlochs in einem oder mehreren Erweiterungsschritten erreicht. Da über die gesamte Bohrlochlänge gebohrt wird, treten relativ hohe Drehmomente auf.

Variante 2: **Aufbohren mittels konventioneller Schnecke**

Hierbei wird eine konventionelle Schnecke mit ihrer Gesamtlänge von ca. 2,00 m in das Gebirge gebohrt und anschließend gezogen. Der Vorgang wird bis zu Erreichen der Endteufe wiederholt. Es handelt sich also um ein diskontinuierliches Bohrverfahren. Die auftretenden Drehmomente sind wesentlich geringer als bei der Hohlbohrschneckentechnik.

Im Gegensatz zu Kristallingesteinen und zum Salz ist es bei Tonformationen meist erforderlich, eine Schutzverrohrung zur Stabilisierung des Bohrlochs bis zur Einlagerung von Gebinden einzubringen. Hierbei handelt es sich um Fiberglasrohre (sogenannte GFK-Rohre) mit Einbaulängen von 4,00 m.

Horizontale Bohrlöcher

Für das französische Einlagerungskonzept für wärmeentwickelnde Abfälle in Ton sollen 43 bis 46 m lange, horizontale Bohrlöcher mit 70 cm Durchmesser beidseitig in die Stöße der Zugangsstrecken gebohrt werden [2-24]. Hierfür wurden zwei Verfahren vergleichend untersucht:

- das horizontale Bohren und
- das Mikrotunnel-Verfahren.

Beim horizontalen Bohren verbleibt der Motor auf dem Bohrgerät. Die Drehung und der Vorschub werden mit Hilfe eines Bohrgestänges auf das Bohrwerkzeug übertragen. Im Gegensatz dazu bewegt sich der Antriebsmotor beim Mikrotunnel-Verfahren innerhalb des Bohrlochs vorwärts (vgl. Kap. 3.3.3.1).

Beim Bohrverfahren ist der Bohrkopf mit Carbid-Zähnen ausgestattet, von denen der äußere Kranz eingefahren werden kann. Dies ermöglicht es, eine Verrohrung während des Bohrens mitzuführen und das Bohrwerkzeug nach Fertigstellung des Bohrloches zu ziehen. Eine am Gestänge angebrachte Schnecke sorgt für den Austrag des Bohrgutes (Abbildung 3-35).

Das Mikrotunnel-Verfahren ist richtungsgenauer, was jedoch in diesem Zusammenhang nicht relevant ist, da die beim Bohrverfahren auftretenden Abweichungen keine negativen Auswirkungen auf die Nutzung der Einlagerungsbohrung haben. Während mit dem Bohrverfahren Bohrfortschritte von 5 m/h erzielt werden können, beträgt der Bohrfortschritt beim Mikrotunnel-Bohrverfahren ca. 2 m/h. Der Platzbedarf ist für beide Verfahren vergleichbar. Zusammenfassend bevorzugt ANDRA aufgrund des höheren Bohrfortschrittes das Bohrverfahren. Der Ablauf der Bohrlöchererstellung ist in Abbildung 3-36 schematisch dargestellt.

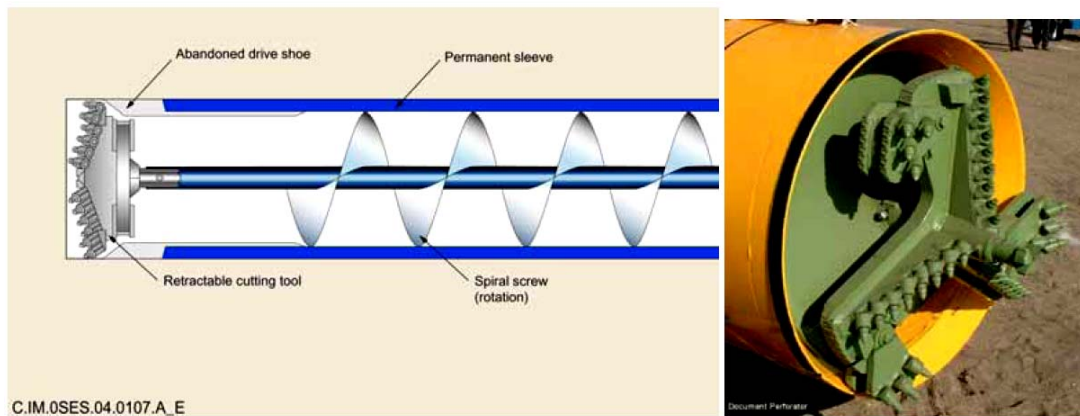


Abbildung 3-35: Bohrwerkzeug für die Erstellung von Einlagerungsbohrungen für wärmentwickelnde Abfälle – Frankreich /2-24/

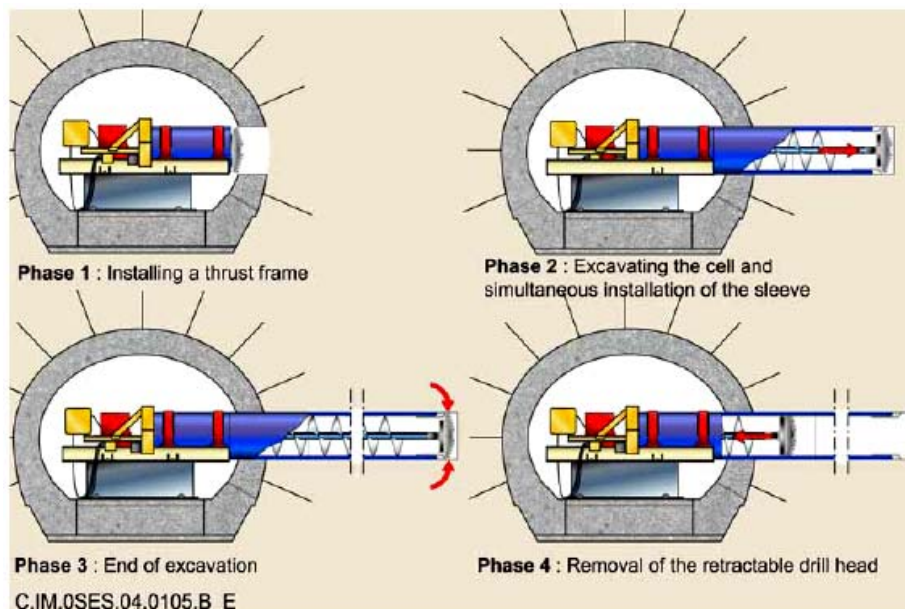


Abbildung 3-36: Phasen bei der Erstellung eines horizontalen Bohrlochs – Frankreich /2-24/

3.3.3.3 Salzformationen

Das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salz sieht die Einlagerung von HAW-Kokillen in vertikalen Bohrlochern vor /2-29/. Weiterhin wird z. Z. in einem Großversuch die technische Machbarkeit der Endlagerung von ausgedienten Brennstäben in BSK 3-Kokillen in Bohrlochern untersucht /3-34/. Die entsprechenden Einlagerungsbohrlöcher sollen eine Länge von ca. 335 m und einen Durchmesser von mindestens 0,55 m haben. In mehreren Forschungsvorhaben wurde die technische Machbarkeit der Erstellung von 500 m tiefen Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,6 m in Trockenbohrtechnik nachgewiesen /3-32/.

Es wurden folgende Anforderungen an die Einlagerungsbohrlöcher für HAW-Kokillen definiert /2-29/:

- Die nutzbare Länge des Bohrloches beträgt bis zu 300 m, so dass sich unter Berücksichtigung von 25 m für das nicht-abführbare Bohrklein und von 10 m Salzgrus oberhalb der Kokillensäule als Bohrlochverschluss eine Bohrteufe von ca. 335 m ergibt.
- Der Bohrdurchmesser ist so zu wählen, dass die Kokillen problemlos eingelagert werden können und die Konvergenz den Bohrdurchmesser innerhalb des Einlagerungszeitraumes nicht unter einen definierten kritischen Wert reduziert. Bei einer Kokille mit einem maximalen Durchmesser von 440 mm sollte der Bohrdurchmesser 550 mm nicht unterschreiten.
- Andererseits ist der Bohrdurchmesser zu minimieren, um einen schnellen Einschluss der Bebinde zu erreichen.
- Um bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle eine Korrosion an den Endlagerkokillen durch Restfeuchte auszuschließen, sind die Bohrlöcher im Trockenbohrverfahren zu erstellen.
- Die Bohrlochabweichung darf nur so groß sein, dass die maximal zulässige Temperatur von 200 °C im Einlagerungsfeld durch zu geringen Abstand nicht überschritten wird.

Das Erstellen von Vertikalbohrungen mit einem Durchmesser von 600 mm und einer damals noch vorgesehenen Teufe von bis zu 600 m in Trockenbohrweise wurde auf der Schachtanlage Asse in einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben erprobt.

Zur Herstellung von Wetterbohrlöchern und Versturzröllöchern wurde auf der Schachtanlage Asse bereits zuvor ein Raise-Bohrkopf mit Planetengetriebe für Vollbohrungen eingesetzt. Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde dieser zu einem Schleusenbohrkopf umkonstruiert und mit einer Zellradblasmaschine kombiniert. Das anfallende Bohrklein wurde pneumatisch über das Bohrgestänge abtransportiert. Die Maschine erreichte mit einem Bohrkopf mit 1000 mm Durchmesser (Schleusenbohrkopf SBK 1000) eine Bohrteufe von 200 m, wobei die Abweichung im Bohrlochtiefsten 10 m betrug /3-32/. Ein Weiterbohren war aufgrund der Schräglage des Bohrkopfes nicht möglich.

Da die Endlagerung der HAW-Kokillen geringere Bohrdurchmesser erfordert, wurde ein Schleusenbohrkopf mit einem Durchmesser von 600 mm und einer Steuereinrichtung entwickelt. Mit ihm wurde eine Bohrlochteufe von 347 m erreicht. Diese Teufe stellte für die verwendete Bohranlage die Leistungsgrenze dar. Die Abweichung im Bohrlochtiefsten betrug 50 mm.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Trockenbohrtechnik wurde schließlich eine Bohranlage entwickelt (EH 1202), die gegenüber der bisher verwendeten Anlage eine wesentlich geringere Höhe aufweist (4,65 m statt ca. 7 m), vollhydraulisch arbeitet und bei der die Druckluftzufuhr über ein Doppelwandbohrgestänge erfolgt /3-33/. Mit dieser Anlage wurden Schichtleistungen von 15 m bis 18 m erreicht. Die erzielte Bohrlochteufe betrug 500 m. Die Bohrlochabweichung lag unterhalb des Bohrdurchmessers.

Durch diese Versuche konnte die technische Machbarkeit der Erstellung von Einlagerungsbohrlöchern nachgewiesen werden. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten ist aber die Prototyp-Anlage noch auf ihre Zuverlässigkeit zu überprüfen und zur Anwendungsreife zu bringen.

Wie bereits in Kap. 3.3.2.3 beschrieben, soll der Streckenquerschnitt im Bereich der Einlagerungsbohrlöcher durch einen Bohrlochkeller und einen Ausbruch in der Streckenfirste an die für das Schwenken des Transferbehälters erforderliche Höhe angepasst werden (Abbildung 2-14, Abbildung 3-31) /3-34/.

Zur Erstellung des 3,0 m (Tiefe) x 2,2 m (Breite) x 5,5 m (Länge) messenden Bohrlochkellers wird der entsprechende Bereich in der Streckensohle mit einer Schlitzsäge durch mehrere Schlitzte von einigen Zentimetern Dicke vorbereitet. In das Tiefste dieser Schlitzte werden Sprengschnüre gelegt, um die gesägten Blöcke an ihrer Basis abzulösen. Die Blöcke werden mittels Anker herausgehoben. Anschließend wird der Bohrlochkeller mit Beton ausgebaut. Die Erstellung eines Bohrlochkellers wurde bereits im Erkundungsbergwerk Gorleben erprobt und erfordert ca. 15 Schichten.

Nach dem Erstellen des Schachtkellers wird aus Strahlenschutzgründen eine Bohrlochschleuse am Kopf des Einlagerungsbohrlochs montiert (Abbildung 3-37). Über Positionshalter wird die Schleuse des Transferbehälters an der Bohrlochschleuse angedockt (Abbildung 2-14) /3-34/. Die Schleusen können nur geöffnet werden, wenn der Transferbehälter korrekt auf der Bohrlochschleuse positioniert ist.

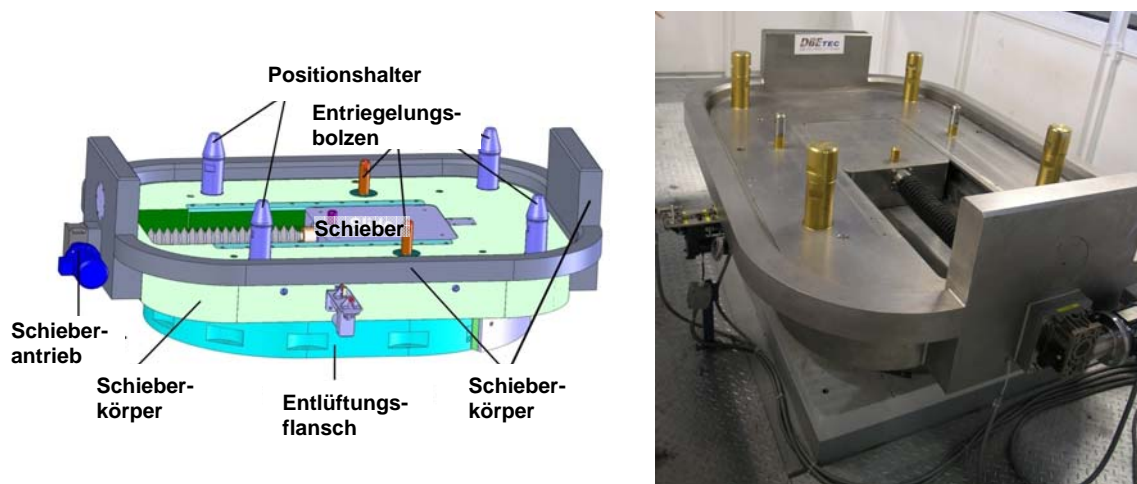


Abbildung 3-37: Bohrlochschleuse. Links Konzept, rechts Prototyp – Deutschland.

Die Einlagerungsstrecken werden in regelmäßigen Abständen mit Bohrlöchern versehen, wobei die Bohrarbeiten am hinteren Ende einer Einlagerungsstrecke beginnen und am Abzweig zum Querschlag enden. Die Bohrlochabstände werden der Wärmeleistung der Behälter angepasst.

4 Infrastruktureinrichtungen in den Tagesanlagen

Die technischen Konzepte für die übertägigen Infrastruktureinrichtungen in den verschiedenen Endlagerkonzepten werden durch die spezifischen Konzepte zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Konditionierung, Transport- und Endlagerbehälter) sowie durch das nationale Regelwerk (Atomrecht, Bergrecht, Baurecht etc.) bestimmt, während die für die untertägigen Anlagen bedeutenden Faktoren des Wirtsgesteinstyps und der geologischen Verhältnisse keine Rolle spielen. Dies erklärt auch, weshalb die Konzepte für die Tagesanlagen der verschiedenen europäischen Endlagerkonzepte einander sehr ähnlich sind. Die Anlagen gliedern sich in kerntechnische Anlagen (Empfangshalle, Pufferhalle, Heiße Zelle für Umladen / Reparatur, Schacht / Rampe für Abfalltransport) und den industriell / bergbaulichen Bereich (Werkstätten, Lagerhallen, ggf. Einrichtung zur Herstellung von Verfüll- / Verschlussmaterial, Versorgungseinrichtungen, Schacht / Rampe für Personal- / Materialtransport etc.). Das Design der kerntechnischen Anlagen richtet sich nach den vorgesehenen Abfallgebinden, den Transport-, und Endlagerbehältertypen, dem Konzept für den An- und Abtransport der Abfallgebinde und den Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks. Bezüglich der Errichtung kann in vielen Aspekten auf Erfahrungen in anderen kerntechnischen Anlagen – z. B. Zwischenlagern und Konditionierungsanlagen – zugegriffen werden. Neue Technologien werden in der Regel vor dem Einsatz durch Pilotanlagen erprobt.

4.1 Gebäude und Anlagen

4.1.1 Frankreich

Das französische Konzept sieht für potentielle Endlager im Granit oder im Ton identische übertägige Infrastruktureinrichtungen vor /2-15/ und /2-24/.

Die übertägigen Einrichtungen werden in vier Hauptbereiche untergliedert (Abbildung 4-1):

- Kerntechnische Zone, mit einem Flächenbedarf von ca. 25 ha, in der die Abfallgebinde / Endlagerbehälter angenommen und für den betrieblichen Transport und die Einlagerung vorbereitet werden.
- Industrielle Zone, mit einem Flächenbedarf von ca. 35 ha, mit den Werkstätten und Einrichtungen, die zur Unterstützung der untertägigen Arbeiten erforderlich sind.
- Administrative Zone, mit einem Flächenbedarf von ca. 20 ha, bestehend aus Bürogebäuden und Parkplätzen.

Halde für den Aushub, mit einer Fläche zwischen 120 ha und 300 ha (abhängig vom Einlagerungsszenarium).

Kerntechnische Zone

Hierbei handelt es sich um eine spezielle industrielle Zone mit Zutrittsbeschränkung gemäß Strahlenschutzrecht. Sie beinhaltet:

- Eine Zone mit einfacher Zugangskontrolle (ohne spezifische Risiken aufgrund kerntechnischer Aktivitäten), die z. B. die Feuerwehrrstation und Warenlager für Ausrüstungsgegenstände enthält, die zur Herstellung der für die Einlagerung benötigten Verpackungen benötigt werden.
- Eine Zone, die aufgrund der für kerntechnischen Anlagen geltenden Bestimmungen als „sensitiv“ eingestuft wird (Kontrollbereich). Dieser Bereich ist vollständig umzäunt und unterliegt einer strengeren Zutrittskontrolle. Er bietet Möglichkeiten zum Abladen und zur temporären Lagerung der Transportbehälter und zur Vorbereitung der Einlagerungsbehälter. Der Bereich ist mit dem Einlagerungsschacht verbunden.

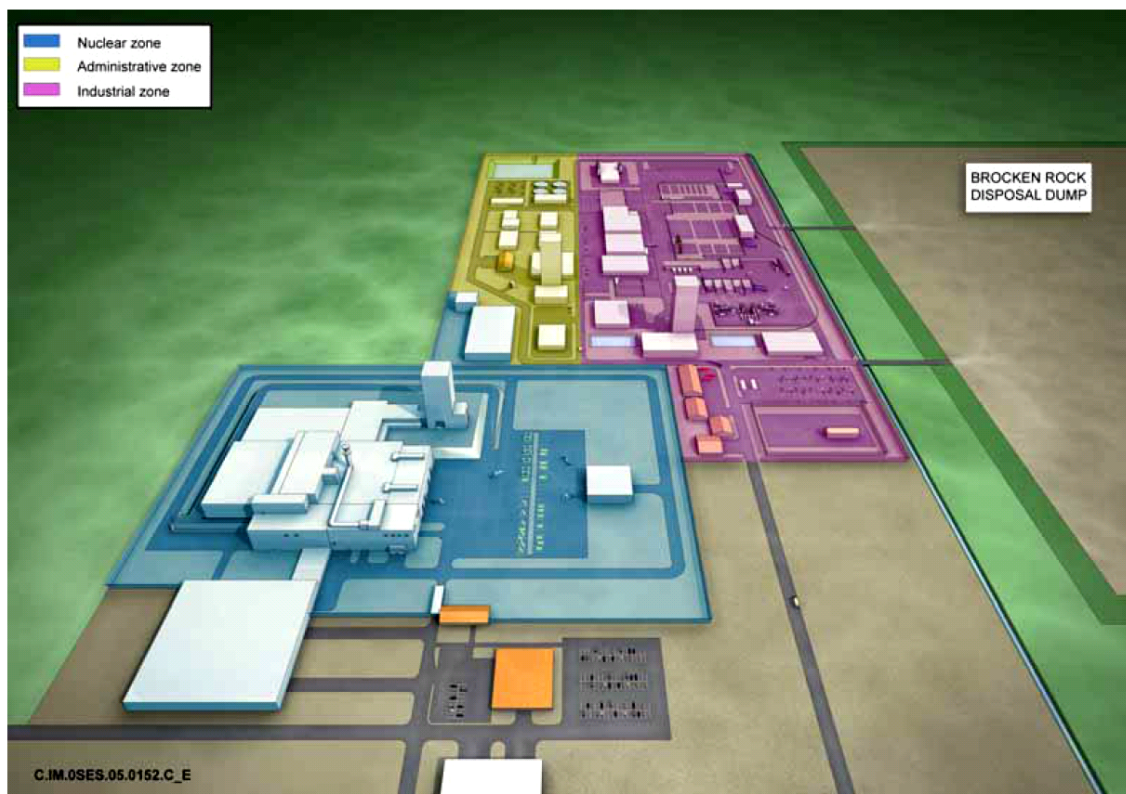


Abbildung 4-1: Übertägige Einrichtungen – Frankreich /2-15/

Der kerntechnische Bereich besitzt ein spezielles Gebäude für die Annahme und die Vorbereitung von Gebinden mit schwach wärmeentwickelnde und wärmeentwickelnde Abfälle auf die Endlagerung. Für den Fall, dass auch abgebrannte Brennelemente eingelagert werden müssen, ist hierfür ein weiteres Gebäude erforderlich. Das Gebäude ist in die folgenden Bereiche unterteilt (Abbildung 4-2):

- Annahme der Transportbehälter
- Umladen der Abfälle aus den Transportbehältern in die Endlagerbehälter
- Pufferlager für beladene Endlagerbehälter
- Laden der Endlagerbehälter in den Transferbehälter
- Pufferlager für beladene Transferbehälter

- Einlagerungsschacht

Der Bereich für die Entladung der Transportbehälter besitzt einen fahrbaren Kran und heiße Zellen. In ihnen werden die primären Behälter aus den Transport- in Endlagerbehälter umgeladen. Entsprechend der unterschiedlichen Abfalltypen gibt es drei Stränge mit heißen Zellen für das Umladen: zwei für schwach wärmeentwickelnde und einer für wärmeentwickelnde Abfälle. Im Strang für die Umladung schwach wärmeentwickelnde Abfälle sind auch Anlagen zur Zementherstellung vorgesehen, so dass die Hohlräume zwischen den Abfallbehältern und dem Endlagerbehälter mit Zement vergossen werden können. Zum Aushärten werden diese Gebinde ca. 28 Tage im Pufferlager zwischengelagert.

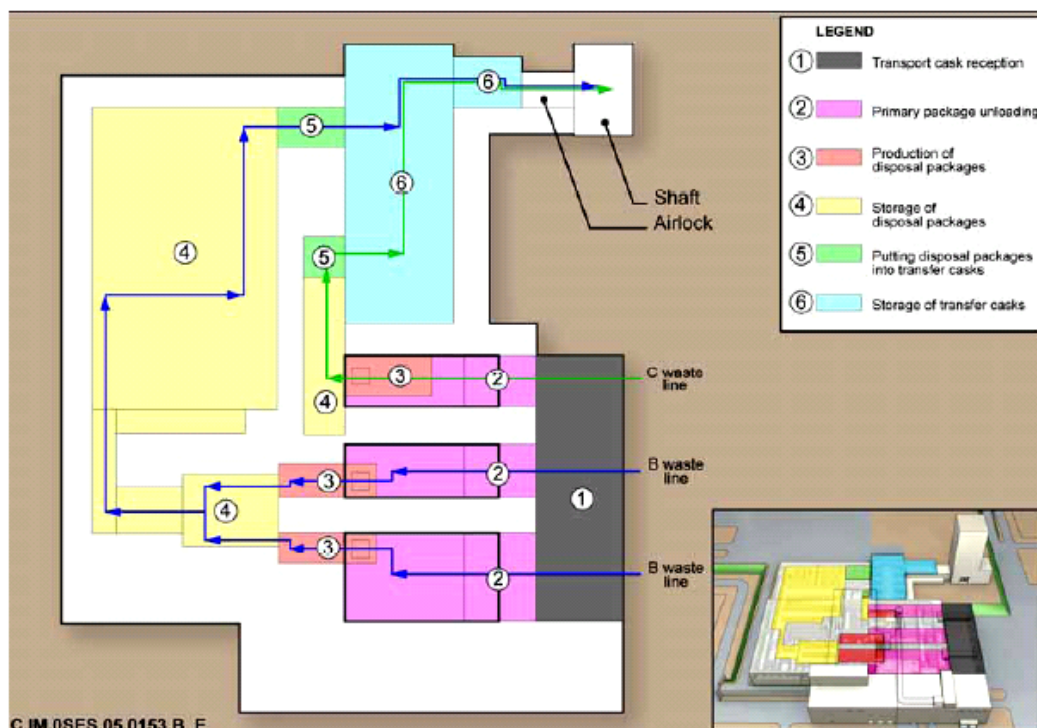


Abbildung 4-2: Gebäude für die Konditionierung schwach wärmeentwickelnder und wärmeentwickelnder Abfälle – Frankreich /2-15/

Im Umladestrang für die wärmentwickelnden Abfälle sind die folgenden Schritte zur Vorbereitung der Endlagerbehälter mit verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen auf die Einlagerung vorgesehen (Abbildung 4-3):

- Der leere Endlagerbehälter wird aus dem Lager in den Konditionierungsbereich gebracht und dort zusammen mit dem Deckel zur Vorbereitung auf das Elektronenstrahlschweißen entmagnetisiert.
- In der Heißen Zelle der Ladestation wird der Endlagerbehälter mit Hilfe eines speziellen Greifers mit dem Primärbehälter beladen.
- Der Deckel des Endlagerbehälters wird mit Hilfe des Elektronenstrahlschweißverfahrens verschlossen. Das Schweißen erfolgt unter Vakuum. Die Beladung der Schweißkammer erfolgt von oben durch eine mit Dichtungen versehene Tür. Zum Schweißen wird der End-

lagerbehälter auf dem Arbeitsplatz gedreht. Das 45 kW-Schweißgerät besitzt eine Schweißgeschwindigkeit von ca. 10 cm bis 15 cm pro Minute, so dass der Schweißvorgang in ca. 20 Minuten ausgeführt werden kann.

- Anschließend wird der Behälter aus der Schweißeinrichtung entnommen und die Schweißnaht hinsichtlich Dichtigkeit sowie der Container auf eventuelle Kontamination untersucht. Falls Beanstandungen auftreten, wird der Endlagerbehälter in eine gesonderte Zelle verbracht, entladen und Nachbesserungen vorgenommen.
- Die nicht beanstandeten Endlagerbehälter werden in ein Pufferlager gebracht.

Die Vorbereitung eines Endlagerbehälters dauert ca. 3 Stunden, so dass bei einer Konditionierungsstraße und einer 24-stündigen Arbeitszeit täglich maximal acht Behälter bearbeitet werden können.

Aus Strahlenschutzgründen wird für den Transport des Endlagerbehälters nach untertage ein Transportbehälter benutzt.

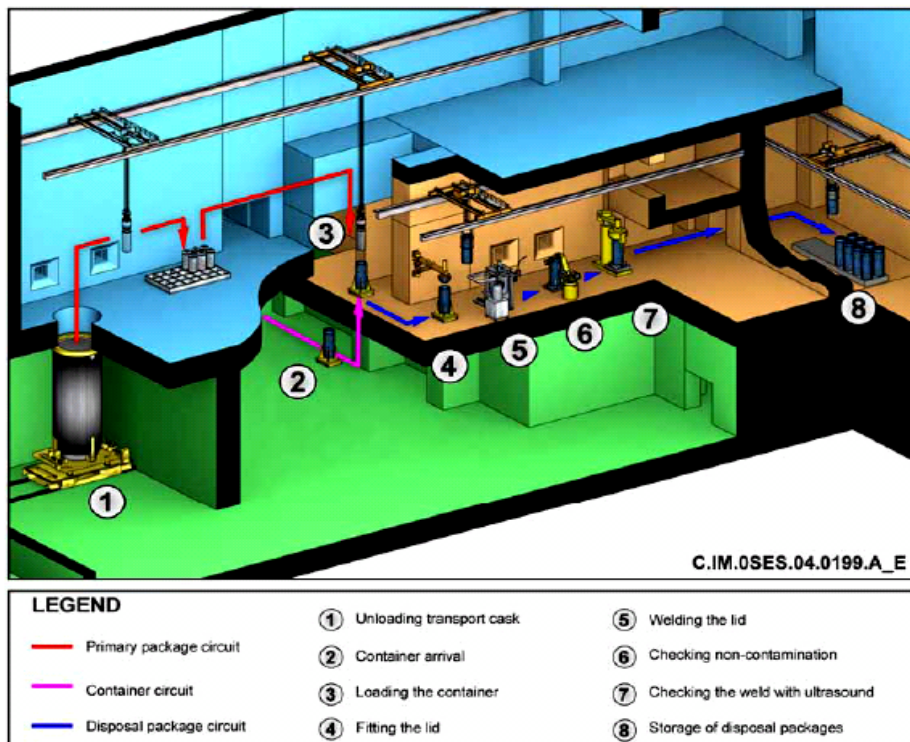


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Vorbereitung von Endlagerbehältern für die Einlagerung – Frankreich /2-24/

Die Arbeitsschritte für die Vorbereitung des Endlagergebindes mit ausgedienten Brennelementen für den Transport nach untertage entsprechen weitgehend dem Vorgehen bei den Behältern mit verglasten Abfällen. Ein Unterschied besteht im Aufschweißen einer Platte auf den Eiseneinsatz zum Fixieren der Brennelemente. Dadurch kann das Luftvolumen, das zum Erzeugen des für das Elektronenstrahlschweißen erforderlichen Vakuums abgesaugt werden muss, verringert werden. Aus dem gleichen Grunde wird nicht der gesamte Behälter in die

Vakuumkammer gegeben, sondern nur der oberste Teil mit dem Deckel (Abbildung 4-4). Zum Schweißen wird ein Gerät mit einer Leistung von ca. 50 kW eingesetzt, das eine Schweißgeschwindigkeit von ca. 10 cm bis 20 cm pro Minute erreicht. Der Schweißvorgang dauert somit pro Behälter weniger als eine Stunde.

Die gesamte Vorbereitungszeit eines Endlagergebindes für ausgediente Brennelemente für den Transport nach untertage dauert ca. 10 Stunden. Bei zwei gleichzeitig arbeitenden Konditionierungsstraßen können pro Tag zwei, maximal drei Behälter für die Einlagerung vorbereitet werden.

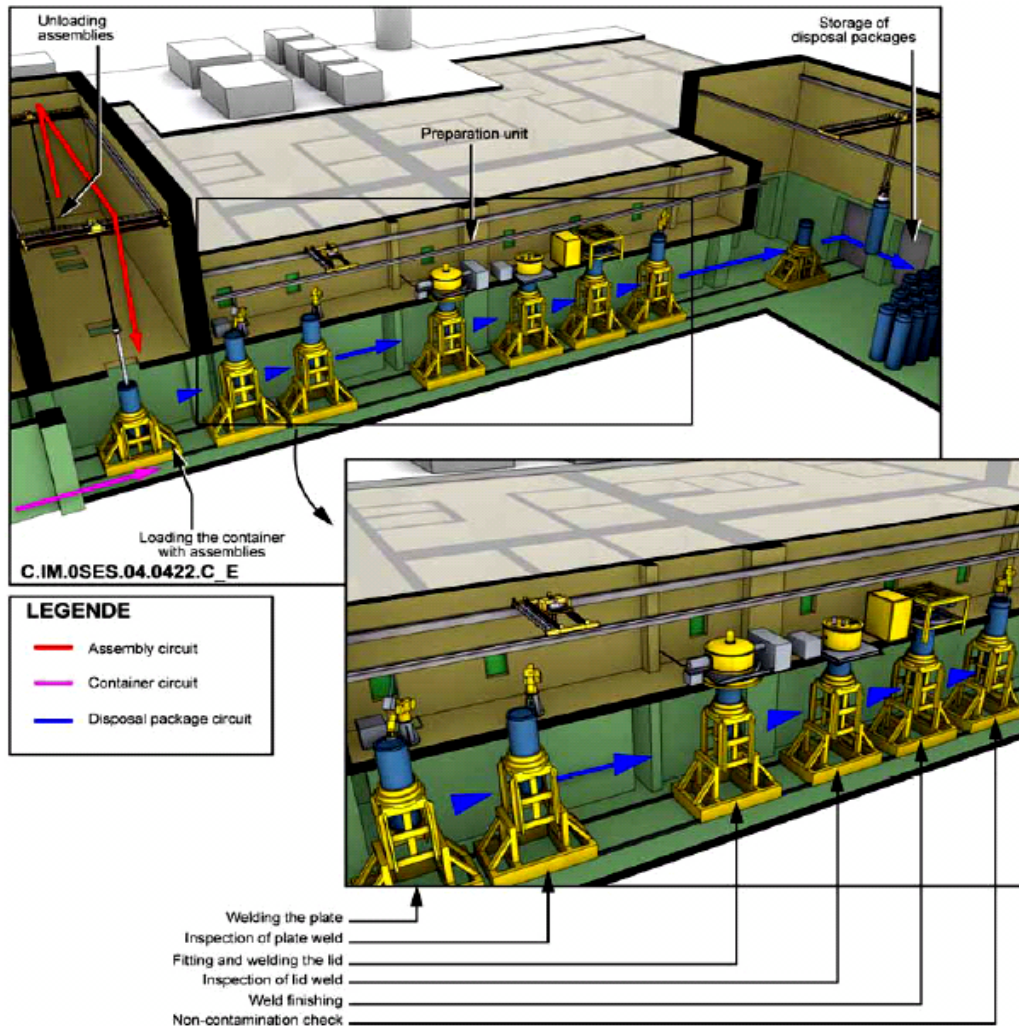


Abbildung 4-4: Vorbereitung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen für den Transport nach untertage – Frankreich /2-24/

Industrieller und administrativer Bereich

Der industrielle Bereich soll um den Konstruktionsschacht herum angeordnet werden /2-15/. Die Einrichtungen beinhalten:

- das Schachtgebäude und die Gebäude zur Versorgung des Schachtes

- die Werkstätten zur Vorbereitung des Baumaterial
- Wartungs- und Reparaturlinrichtungen
- Servicegebäude (Lager, Kernlager, Zementlabor etc.)

Die Ausstattung des industriellen Bereiches wird den jeweiligen Anforderungen der untertägigen Arbeiten angepasst. Die Einrichtungen für die Betriebsleitung und die Belegschaft befinden sich beim Personentransportschacht. Dies sind Bürogebäude, ein Erste Hilfe-Gebäude, Umkleiden, Kantine etc.

Halde

Das Aushubmaterial wird auf einer Halde gelagert. Es wird zu ca. 40 % für die endgültige Verfüllung des Endlagers wiederverwendet.

Die Halde besitzt ein Volumen von mehreren Millionen Kubikmetern. Da eine Halde um so leichter zu handhaben ist, je flacher sie ist, muss ein Kompromiss zwischen der Höhe und der erforderlichen Fläche gefunden werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird eine Höhe von ca. 10 m angenommen, was einen Flächenbedarf von 100 ha bis 300 ha bedeutet.

Es sind vorbereitende Erdarbeiten erforderlich wie das Abtragen des Mutterbodens, die Herstellung einer Lagerfläche, der Bau von Gräben und von Absetzbecken.

Das für die Verfüllung wiederverwendete Haldenmaterial muss hinsichtlich seiner Korngröße und seines Wassergehaltes an die Erfordernisse angepasst werden.

Der abgetragene Mutterboden wird in der Nähe der Deponie gelagert. Er kann für eine Begrünung der Halde verwendet werden.

4.1.2 Schweiz

Entsprechend dem Schweizer Endlagerkonzept werden die Tagesanlagen in zwei getrennte Bereiche aufgeteilt sein: den Zugangsbereich, der vor allem die kerntechnischen Anlagen umfasst, sowie den Bereich des Bau- und Lüftungsschachtes /3-20/.

Das Endlagerkonzept sieht vor, dass die Abfallbinde während der Betriebs- und Einlagerungsphase primär per Bahn im Zugangsbereich angeliefert werden /3-20/. Dadurch soll das Straßennetz von Schwertransporten entlastet und die Beeinträchtigungen für die Anwohner reduziert werden. Die Tagesanlagen werden daher sowohl an das Straßen- wie auch an das Schienennetz angeschlossen.

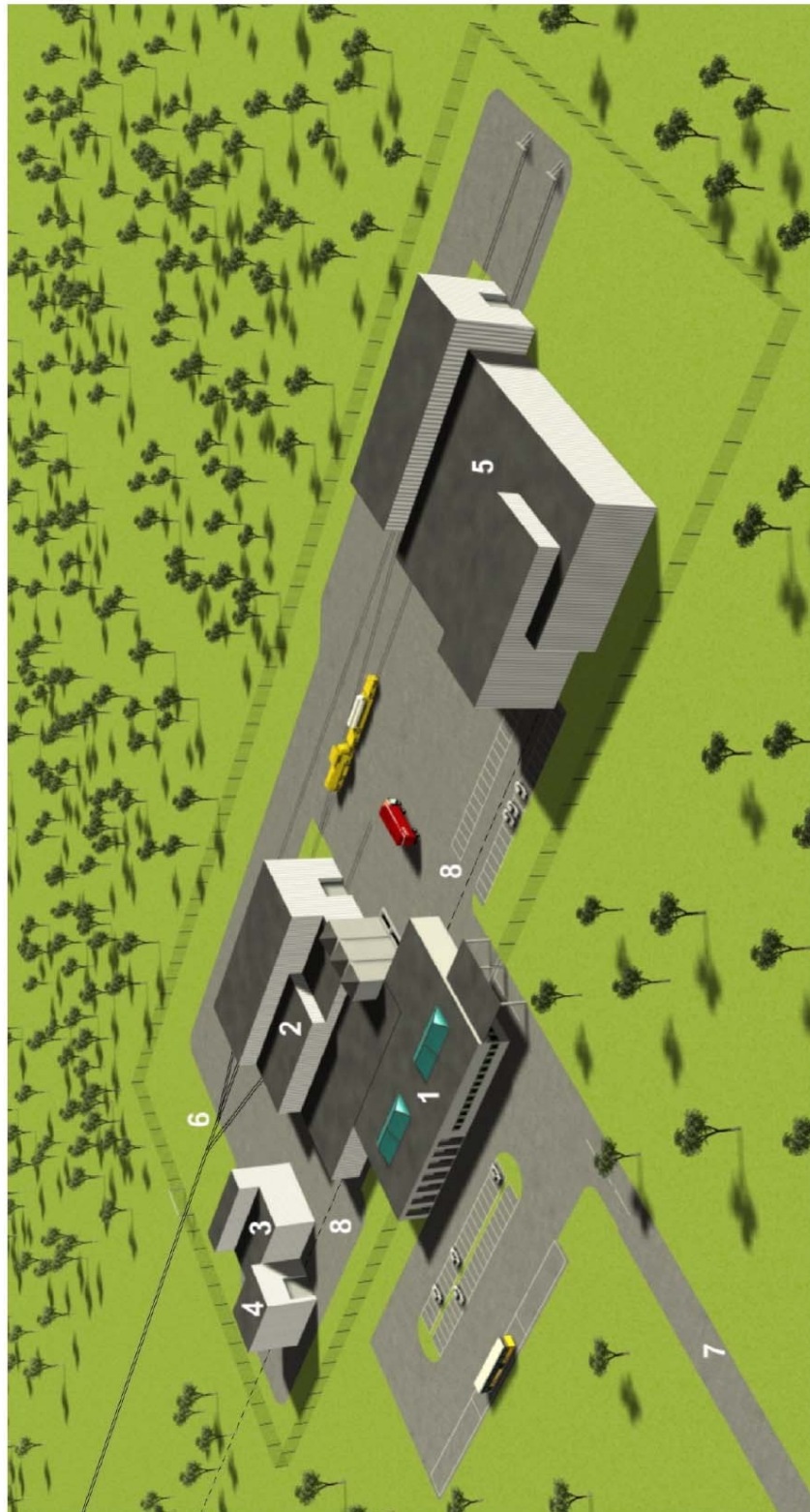
Der Zugangsbereich (Abbildung 4-5) wird im Verlauf der Lagerrealisierung unterschiedlich genutzt. Nachfolgend wird die Situation während der Explorationsphase, während der Phase des Lagerbaus und schwerpunktmäßig während der Phase der Einlagerung beschrieben.

Während der Explorationsphase für den Bau und Betrieb der Rampe und des Testlagers werden verschiedene temporäre Einrichtungen des Bauunternehmers sowie der wissenschaftlichen Kontraktoren und der NAGRA erstellt /3-20/. Die temporären Baustelleneinrichtungen werden bis auf betriebsnotwendige Anlagen wie z. B. Lüftungsanlagen und Elektroinstallationen nach Abschluss der Arbeiten demontiert. Die übrigen Anlagen (Bürräumen, Labor- und Werkstatteinrichtungen, etc.) werden je nach den Bedürfnissen weitergenutzt und ggf. weiter ausgebaut.

Bis zur Aufnahme des Einlagerungsbetriebs sind im Zugangsbereich die Anbindung an das Straßen- und Schienennetz sowie das Verwaltungsgebäude, die kerntechnischen Anlagen (Betriebsgebäude mit Empfangs- und Pufferhalle, ggf. Konditionierungs- und Verpackungsanlage), das Lüftungsgebäude mit Trafostation, die Geräteschleuse und der im Tagebau zu erstellende Teil der Rampe zu realisieren.

Während des Lagerbetriebs dient das Betriebsgebäude der Empfangsanlage der Verarbeitung angelieferter Güter sowie der Vorbereitung der Abfälle für die Einlagerung /3-20/. Das Betriebsgebäude wird mit allen für Annahme und Vorbereitung der Abfallgebände für Endlagerung notwendigen technischen Betriebseinrichtungen ausgestattet und umfasst auch einen Leitstand, Labors und eine Werkstatt. Entsprechend den Strahlenschutz-Anforderungen wird ein Kontrollbereich eingerichtet und mit zugehörigen Absperrungen und Schleusen versehen.

Im Verwaltungsgebäude der Empfangsanlage werden Verwaltung, Betriebsleitung, Personalräume und Einrichtungen der Öffentlichkeitsarbeit sowie die radiologische Umgebungsüberwachung untergebracht.



- | | | | |
|---|------------------------|---|-------------------------------------|
| 1 | Administrationsgebäude | 5 | Konditionier- und Verpackungsanlage |
| 2 | Betriebsgebäude | 6 | Bahnzufahrt |
| 3 | Lüftungsgebäude | 7 | Straßenzufahrt |
| 4 | Geräteschleue | 8 | Rampe (überdeckt) |

**Abbildung 4-5: Modell der Außenanlagen des Zugangsbereichs während des Einlagerungs-
betriebs des Endlagers – Schweiz /3-20/**

Die Einrichtungen des Lüftungsgebäudes dienen der Bewetterung aller Anlagen untertage. Ferner versorgt die in diesem Gebäude ebenfalls untergebrachte Elektroinspeisung sowohl die untertägigen Anlagen als auch die gesamten Außenanlagen des Zugangsbereichs mit elektrischer Energie.

Das Gebäude der Geräteschleuse enthält einen vertikalen Zugang zur Rampe, wodurch das Ein- und Ausbringen größerer Geräte und Komponenten (z. B. Stollenlokomotive, Verfüllwagen etc.) ermöglicht wird /3-20/. Dies ist z. B. bei Installationsarbeiten im untertägigen Bereich während des Baus der Anlage oder bei Generalrevisionen von Geräten während des Lagerbetriebs erforderlich. Die Geräteschleuse ist kein routinemäßig benutzter Durchgang im Einlagerungsbetrieb und ist deshalb gegen unbefugte Benutzung gesichert.

In der Konditionierungs- und Verpackungsanlage für ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Abfälle werden die einlagerungsfähigen Gebinde hergestellt und für die Einlagerung bereitgestellt. Alternativ könnten diese Abfälle auch in Endlagerbehältern angeliefert werden und müssten dann in der Empfangshalle des Betriebsgebäudes zur Einlagerung bereitgestellt werden. Dann müsste die Empfangshalle allerdings um 30 % größer geplant werden.

Der separat vom Zugangsbereich gelegene Bereich mit dem Bau- und Lüftungsschacht (Abbildung 4-6) soll während der Bauphase des Endlagers an eine Straße angeschlossen werden, damit der Bauunternehmer die für den Schachtbau erforderlichen Einrichtungen installieren und die Teufarbeiten durchführen kann /3-20/. Der Schachtkopfbereich dient neben der Aufnahme von Installationen vor allem dem Materialumschlag, insbesondere von Ausbruchmaterial.

Nach Fertigstellung des Schachtes wird der Förderturm errichtet, der für den Transport von Personen und Material ausgelegt wird. Der Schacht dient außerdem als Abwetterschacht für das Endlagerbergwerk. Weitere Installationen im Schachtkopfbereich sind ein Gebäude mit Baubüro, Mannschaftsräume, Werkstatt, Trafoanlage etc., ein überdachtes Depot für Ausbruchmaterial sowie eine Geräte- und Materialhalle. Der Schachtkopfbereich benötigt eine Fläche von ca. 100 m x 100 m.

Während der Betriebsphase des Endlagers werden hier auch alle Einrichtungen installiert, die für die Erstellung der Einlagerungsstrecken erforderlich sind. Die Einlagerungsstrecken werden unmittelbar vor der Einlagerung gebaut und zwar in Jahrestanchen, abgestimmt auf den Bedarf des Einlagerungsbetriebs.



- 1 Förderturm mit Abluftöffnungen
- 2 Baubüro, Mannschaftsräume, Werkstatt, Trafoanlage
- 3 Ausbruchmaterialdepot
- 4 Geräte- / Materialhalle

**Abbildung 4-6: Modell der Anlagen im Schachtkopfbereich während des Einlagerungs-
betriebs – Schweiz /3-20/**

4.1.3 Deutschland

In Deutschland wird die Eignung des Salzstocks Gorleben als Wirtsgestein für ein Endlager für radioaktive Abfälle durch ein Erkundungsbergwerk untersucht. Bei einem positiven Erkundungsergebnis könnten die Anlagen und Einrichtungen des Erkundungsbergwerks auch für ein zukünftiges Endlager genutzt werden.

Spezielle Auslegungsanforderungen an die verschiedenen Gebäude der Tagesanlagen eines zukünftigen Endlagerbergwerks im Salz ergeben sich aus dem kerntechnischen Regelwerk (Atomgesetz, Strahlenschutzverordnung, KTA-Normen etc.) sowie dem Bundesberggesetz mit den einschlägigen Verordnungen für die Auslegung aller Gebäude und Anlagenteile, die unmittelbar für den Transport, die Handhabung oder die Lagerung der radioaktiven Abfälle benötigt werden /2-29/, /2-30/. Diesem Bereich sind ebenfalls die Einrichtungen zum Schutz der Anlagen vor Störmaßnahmen und die Bewetterungs- und Brandschutzeinrichtungen zuzurechnen. Die übrigen Einrichtungen werden wie die eines konventionellen Bergwerks ausgelegt und werden hier nicht näher beschrieben. Das Konzept für die Tagesanlagen ist in Abbildung 4-7 wiedergegeben.

Die wesentlichsten Funktionen des kerntechnischen Teils der Tagesanlagen sind die Annahme, Entladung und Pufferung von Abfallgebinden sowie der Transport der Gebinde zum

Einlagerungsschacht. Entsprechend den durchzuführenden Arbeiten sind die Tagesanlagen nach Funktionsbereichen untergliedert. Die wichtigsten Einrichtungen sind:

- die Umschlagsanlage für Abfallgebände,
- die Schachtförderanlage und die Schachthalle,
- die erforderlichen Technik-, Sozial-, Labor- und Büroeinrichtungen,
- die LKW- und Waggontrocknungsanlagen, und
- die Verkehrsanlagen.

Das Betriebsgelände Gorleben ist an das öffentliche Straßennetz angeschlossen. Auslegungsbestimmend für die Fahrbahnbefestigung, die Kurvenradien und die Straßenbreite sind einerseits eine mobile Friktionswinde, die zum Auflegen der Seile an den Schächten benötigt wird und andererseits die LKW, die die Abfallgebände anliefern. Ca. 1 km vom Betriebsgelände entfernt befindet sich die Salzhalde, die über eine Zufahrtstraße mit dem Bergwerk verbunden ist.

Das Betriebsgelände ist ferner an das Schienennetz angeschlossen.

Die Umschlagsanlage

In ihr erfolgt die Annahme, das Entladen, die Kontrolle sowie, falls erforderlich, die Pufferung und die Vorbereitung der Abfallgebände für den Transport nach untertage und für die Einlagerung. Ferner sind eventuell notwendige Sonderbehandlungen von Abfallgebänden, wie z. B. die Oberflächendekontamination vorzusehen. Die für die Endlagerung zu erwartenden Abfallgebände können in zwei Abfallströme unterteilt werden, die durch folgende Merkmale charakterisiert sind (Der in /2-29/ aufgeführte Abfallstrom A entfällt aufgrund der Genehmigung des Endlagers KONRAD) /2-30/:

- Abfallstrom B
 - Abfallgebände beladen mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, wie z. B. Brennstäben. Es handelt sich um Behälter vom Typ „POLLUX“ bzw. „CASTOR“ mit einer Masse bis 75 t.
 - Abfallgebände mit z. B. Brennstäben aus Forschungsreaktoren.
- Abfallstrom C
 - Abfallgebände beladen mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen, die unabgeschirmt in Bohrlöchern eingelagert werden, wobei es sich um HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C-Kokillen sowie um Brennstabkokillen BSK 3 handelt.

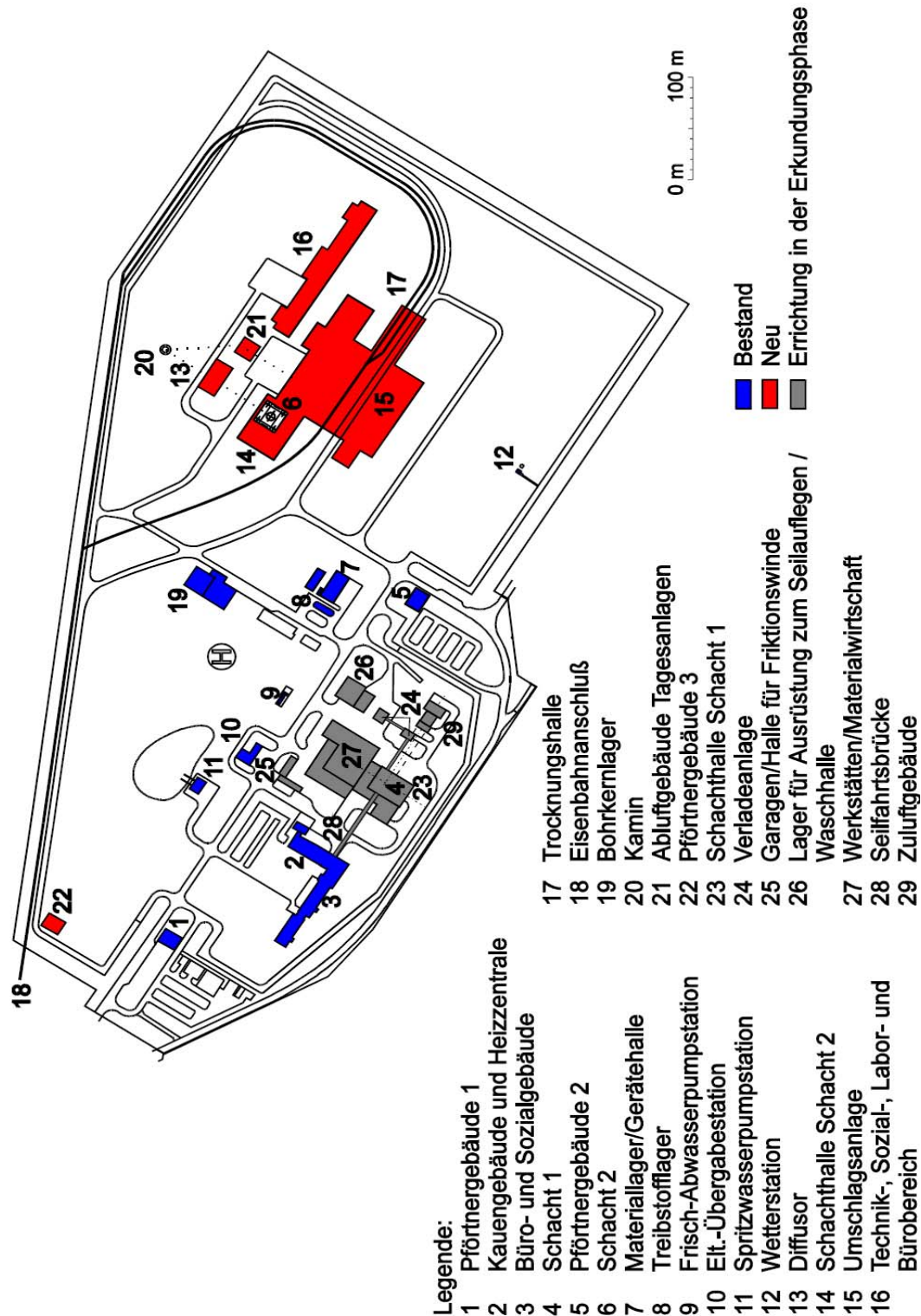


Abbildung 4-7: Tagesanlagen für ein Endlagerbergwerk am Standort Gorleben – Deutschland /2-29/

Abfallgebände des Abfallstromes B können direkt nach der Annahme in der Umschlagsanlage mit innerbetrieblichen Transportmitteln zum Schacht transportiert und anschließend zu

den Einlagerungsstrecken nach untertage verbracht werden. Übertägig wird eine Puffermöglichkeit vorgesehen, um die Behälter bei Betriebsstörungen zwischenlagern zu können.

Da Gebinde des Abfallstroms C unabgeschirmt in Bohrlöcher eingelagert werden, ist für den Transport ein Transferbehälter erforderlich. Das Umladen aus dem CASTOR-Transportbehälter in den Transferbehälter erfolgt in einer heißen Zelle der Konditionierungsanlage. Der Transferbehälter wird nach untertage transportiert, am Einlagerungsort entladen und schließlich wieder zur Konditionierungsanlage zurückgebracht. Eine Pufferlagerung beladener Endlager- und Transferbehälter ist übertage möglich.

Entsprechend dem Umgang mit Gebinden mit radioaktiven Abfällen bestehen für die Errichtung der Umschlagsanlage eine Reihe spezieller baulicher Anforderungen. So müssen die Außenwände einerseits die Abschirmung der Direktstrahlung in die Umgebung und andererseits einen Schutz gegen Einwirkungen von außen (Flugzeugabsturz) gewährleisten. Im Gebäude müssen konstruktive Maßnahmen zum Strahlenschutz des Betriebspersonals vorgesehen sein. Alle Bereiche, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, müssen mit einem Dekontanstrich versehen werden, damit im Fall einer Freisetzung radioaktiver Stoffe durch einen Unfall, eine Reinigung möglich ist. Weiterhin sind konstruktive Maßnahmen vorzusehen, um die Auswirkung von Behälterabstürzen zu reduzieren (z. B. die Verwendung von Dämpferbeton in Umladepositionen). Alle Handhabungs- und Transportsysteme müssen den hohen Standards der KTA genügen.

Eine Bewertung verschiedener Varianten eines innerbetrieblichen Transportsystems (Hängbahn, fahrerloses Transportsystem, gleisgebundener Flurtransport, Luftkissenfahrzeug, Portalhubwagen, Rollenbahnsystem) ergab eindeutige Vorteile für den gleisgebundenen Flurtransport /3-35/. Dieser ist für den Transport schwerer Lasten besonders geeignet und hat sich im untertägigen Bergbau bewährt. Zur Vereinheitlichung wurde der gleisgebundene Transport mit Einsatz von Plateauwagen für alle Arten von Gebinden beschlossen. Bedingt durch die sichere Spurführung ist auch eine einfache Fernsteuerung möglich.

Die Umschlagsanlage wird in mehrere Hallen (Funktionsbereiche) unterteilt, zwischen denen der Transport mit Brückenkränen und Plateauwagen erfolgt. Von der Endladehalle zur Transport- und Bereitstellungshalle sowie zu den Pufferhallen werden die Abfallgebinde mittels Kran transportiert. In der Transport- und Bereitstellungshalle werden die Gebinde auf Plateauwagen umgeladen und in die Schachthalle verfrachtet.

Für das aktuelle Referenzkonzept (kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung) gliedert sich die Umschlagsanlage in /2-30/:

- Fahrzeugannahme und Eingangskontrolle

Die Halle verfügt über eine Zufahrtsstraße und eine Gleisstrecke. Bei der Eingangskontrolle der eingehenden Gebinde werden die Begleitpapiere kontrolliert sowie Sichtkontrollen und Messungen der Oberflächenkontamination, der Ortsdosisleistungen und der Oberflächentemperatur durchgeführt.

- Umladehalle

POLLUX-Behälter werden unmittelbar auf Plateauwagen zum innerbetrieblichen Schienen-transport umgeladen, CASTOR-Behälter mit Kokillen werden mit Hilfe eines gleisgebundenen Andockfahrzeugs vor die Heiße Zelle gebracht. Hier wird der Sekundärdeckel des CASTOR-Behälters mit einem 10 t-Brückenkran entfernt. Nach dem Andocken an die Heiße Zelle demontiert ein Handhabungsroboter den Primärdeckel des CASTOR-Behälters und anschließend werden die Kokillen mit einem Zellenkran oder einem Portalroboter aus dem CASTOR-Behälter in den Transferbehälter umgeladen. Anschließend wird der Transferbehälter für den innerbetrieblichen Transport auf einen Plateauwagen geladen.

In der Umladehalle befindet sich zur Handhabung voller und leerer CASTOR-, POLLUX- und Transferbehälter ein Brückenkran mit einer Spannweite von 36 m und einer Tragkraft von 130 t, der bis in die Pufferhalle verfahren werden kann.

- Pufferhalle

In einer Pufferhalle werden Gebinde, die aus betrieblichen Gründen nicht sofort weitertransportiert werden können, zwischengelagert. Diese Gebinde werden mit einem Brückenkran von der Umladehalle in die Pufferhalle transportiert und abgestellt, bzw. von der Pufferhalle über den Entlade- und Übergabebereich in den Transportbereich der Bereitstellungs-/Transporthalle transportiert.

An die Pufferhalle schließen sich Service- und Wartungseinrichtungen an. Hier kann eine ggf. erforderliche Dekontamination eingehender Abfallgebände, aus dem Schacht rückgeführter Transferbehälter sowie von Plateauwagen erfolgen. Ferner werden erforderliche Reparaturen an den Gebinden, Behältern und Ausrüstungen, mit Ausnahme der Plateauwagen vorgenommen. Plateauwagen werden nach evtl. erforderlicher Dekontamination in der Werkstatt repariert. Die hier entstehenden festen und flüssigen radioaktiven Abfälle werden gesammelt und dem Bereich für die Behandlung radioaktiver Betriebsabfälle zugeführt.

- Technik

Hier sind die Anlagen zur Energie- und Medienversorgung, die Leittechnik und die Lüftungszentrale der Umschlagsanlage zusammengefasst.

- Personaleingangsbereich

Das Gebäude ist für den Zugang des Personals zur bzw. aus der Umschlagsanlage bestimmt. Das Gebäude umfasst die Zutritts- und Ausgangskontrolle, Umkleieräume, sanitäre Einrichtungen, Strahlenschutzkontrolle und ist entsprechend den Bedingungen des Strahlenschutzes in Strahlenschutzbereiche eingeteilt.

- Sammlung und Behandlung radioaktiver Betriebsabfälle

Die Halle ist mit einer Fläche von 400 m² für die Sammlung, Behandlung und Konditionierung fester und flüssiger radioaktiver Betriebsabfälle bestimmt. Die konditionierten Abfälle werden von hier zur Endlagerung abtransportiert.

- Schachthalle Schacht 2

Die Schachthalle grenzt unmittelbar an die Umladehalle an, in der die beladenen Plateauwagen für den Schachttransport nach Untertage bereit gestellt werden.

Die Schachthalle umfasst die Bereiche Schachtbeschickung mit Schachtförderanlagen einschließlich Schachtschleusen sowie Gleisanlagen für Transporte zum bzw. vom Schacht, Lagerräume für Ersatzfördermittel und Räume für erforderliche Nebenfunktionen. Aus der Umschlagsanlage führen zwei Gleise in die Schachthalle. Der Transportweg der mit Abfallgebunden beladenen Plateauwagen verläuft über ein Gleis aus der Umschlagsanlage bis zum Querverschub auf der Zulaufseite der Schachthalle und vom Querverschub weiter durch die Schachtschleuse bis zur Schachtförderanlage. Die Schachthalle ist mit Toren ausgestattet, die ein Befahren mit LKW und Gabelstaplern ermöglicht.

An der Nordwestseite der Schachthalle schließt ein Anbau mit einem Lagerraum mit Ersatzfördermitteln, die Elektro-Betriebsräume (Traforäume, Mittel- und Niederspannung) und der Aufenthaltsraum für Bedienungspersonal.

Salzhalde

Zur Lagerung des ausgebrachten Salzes ist eine Halde erforderlich, die sich in ca. 1 km Entfernung vom Erkundungsbergwerk befindet. Sie ist mit Tonlagen und einem Geotextil nach unten hin abgedichtet und von einem Graben umgeben, der das durch die Halde sickernde Niederschlagswasser auffängt und zwei Rückhaltebecken zuführt. Die darin befindliche Salzlauge wird bei hohen Elbpegeln in den Fluss eingeleitet.

4.2 Maschinen und Geräte

Die in den kerntechnischen Bereichen der Tagesanlagen eines Endlagers benötigten Maschinen und Geräte orientieren sich weitgehend an der Technik wie sie in anderen kerntechnischen Anlagen, wie z. B. den Kernkraftwerken, Zwischenlagern und Konditionierungseinrichtungen, eingesetzt wird. Da hier bereits in allen Ländern entsprechendes Know-how vorhanden ist, liegen hier für die meisten Endlagerkonzepte nur knappe Angaben vor. Zudem ähneln sich die in den Tagesanlagen der verschiedenen Endlagerkonzepte anfallenden Tätigkeiten und somit auch die vorgesehenen Maschinen und Geräte. Im Folgenden seien daher exemplarisch die Maschinen und Geräte des deutschen Konzeptes beschrieben, die relativ detailliert geplant sind /2-30/ (Tabelle 4-1).

Übertage sind Maschinen und Geräte in erster Linie für das Umpacken und den Transport von Endlagergebunden vorzusehen.

Bei Transport- und Hebevorgängen großer Lasten über große Verkehrsflächen wird bevorzugt ein Brückenkran eingesetzt, da dieser gegenüber anderen Hebezeugen wie dem Portalkran, dem Säulenschwenkkran und mobilen Hebezeugen deutliche Vorteile hinsichtlich der Handhabung und der Flurfreiheit besitzt.

Die Nutzlast und die Anzahl der Krananlagen werden entsprechend den Massen und Abmessungen der Gebinde bzw. Transporteinheiten sowie den Transportwegen in der Umschlagsanlage bestimmt. Entsprechend den Anforderungen der KTA wird der Kran mit hohen Sicherheiten ausgelegt, um einen Behälterabsturz auszuschließen. Hierzu zählen u.a. auch eine automatische Hubhöhen- und Geschwindigkeitsbegrenzung sowie eine Unterbrechungslose Stromversorgung. Die Bedienung erfolgt aus einer abgeschirmten Krankabine.

Bei einer vergleichenden Bewertung möglicher Varianten eines innerbetrieblichen Transportsystems ergaben sich deutliche Vorteile des gleisgebundenen Flurtransports, der für den Transport schwerer Lasten besonders geeignet und im untertägigen Bergbau bewährt ist. Bedingt durch die sichere Spurführung ist auch eine einfache Fernsteuerung möglich.

Zwischen den Funktionsbereichen der Umschlagsanlage erfolgt der Gebindeftransport mit Brückenkränen und mit Plateauwagen. Von der Entladehalle zur Transport- und Bereitstellungshalle sowie zur Pufferhalle werden die Gebinde mittels Brückenkran transportiert. In der Transport- und Bereitstellungshalle werden die Gebinde auf Plateauwagen umgeladen und zur Schachthalle bzw. zur Sonderbehandlung transportiert.

Der Transport der maximal 130 t schweren Behälter zwischen Pufferbereich und Umladehalle erfolgt über fahrbare Hubbühnen, das Absetzen der Behälter in die Transfertunnel mittels des Pufferhallenkran.

Tabelle 4-1: In den Tagesanlagen eines Endlagers erforderliche Transport- und Handhabungseinrichtungen (Deutsche Referenzkonzept, /2-30/)

Handhabungsschritt	POLLUX	HAW-Kokille CSD-C-Kokille
Entfernen Transportschutz vom CASTOR/POLLUX	Brückenkran - Haupthubwerk Tragkraft 1300 kN (Lastaufnahme CASTOR/POLLUX) - Zusatzhubwerk Tragkraft 200 kN (Lastaufnahme Transferbehälter/Handhabung Transportschutz)	
Umschlag CASTOR		
Umschlag POLLUX		
Umschlag Transferbehälter		
CASTOR-Transport Eingangskontrolle/Heiße Zelle	-	Andockfahrzeug CASTOR
Eingangskontrolle Entfernen Sekundärdeckel	-	Brückenkran (Tragkraft 100 kN)
Entfernen Primärdeckel	-	Handhabungsroboter
Umladung HAW- und CSD-C-Kokille	-	Zellenkran Heiße Zelle (Tragkraft 10 kN)
	-	Transferbehälter universell für HAW- und CSD-C-Kokille ausgelegt
Transferbehältertransport Heiße Zelle/ Umladebereich „C“	-	Andockfahrzeug Transferbehälter HAW- und CSD-C-Kokille
Flurtransport in der Umladehalle	Plateauwagen für POLLUX	Plateauwagen für Transferbehälter HAW- und CSD-C-Kokille
	Stationär installierte Flurfördereinrichtung für Plateauwagen	

5 Einlagerungstechnik

5.1 Frankreich

Für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle sind in Frankreich 7 verschiedene Typen von Primärbehältern vorgesehen, die unterschiedliche Abmessungen und Gewichte aufweisen /2-24/.

Entsprechend den verschiedenen Brennelementen in den unterschiedlichen Reaktortypen sind für ausgediente Brennelemente 5 Arten von Primärbehältern vorgesehen. Die Primärbehälter werden mit Helium gefüllt, um die Wärmeabgabe der Brennelemente zu erhöhen. Die MOX-Brennelemente werden einzeln verpackt.

5.1.1 Endlagerkonzept für Granit

Verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle

Für das französische Endlagerkonzept für Granit wurden zwei Typen von Endlagerbehältern mit standardisierten Abmessungen entwickelt, die für alle Primärbehälter mit verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen geeignet sind /2-15/. Diese Edelstahl-Behälter haben Längen von 1,29 m bzw. 1,61 m und Durchmesser von 0,615 m bzw. 0,550 m. Das Gewicht der beladenen Endlagerbehälter variiert zwischen 1500 kg und 1800 kg. Der Deckel wird nach dem Beladen mit dem Behälterkörper verschweißt und besitzt eine Nut, an der ein Greifer ansetzen kann.

Die Hauptfunktionen der Endlagerbehälter sind:

- Schutz der verglasten Abfälle vor einem Kontakt mit Wasser;
- sicherer Einschluss der Glasmatrix für eine Zeitspanne mit einer sehr hohen Aktivität der kurz- und mittellebigen Radionuklide; und
- Schutz der Glasmatrix vor äußeren Einflüssen, die eine signifikante Veränderung der Matrix hervorrufen könnten

Die Behälter sollen einen sicheren Einschluss der Abfälle gegen Korrosion für einen Zeitraum von 1000 Jahren gewährleisten.

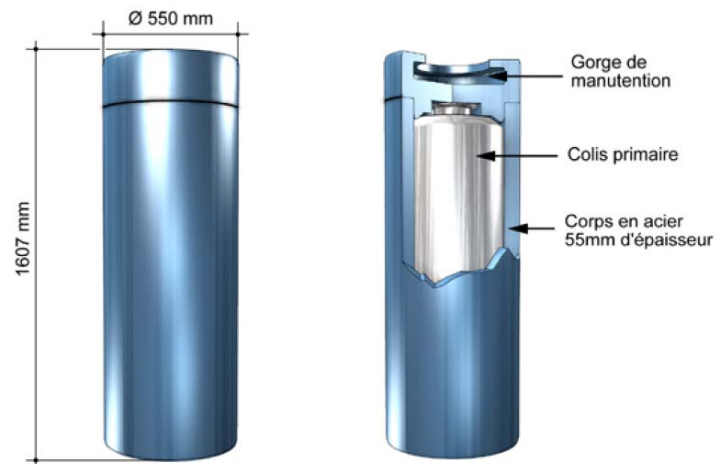
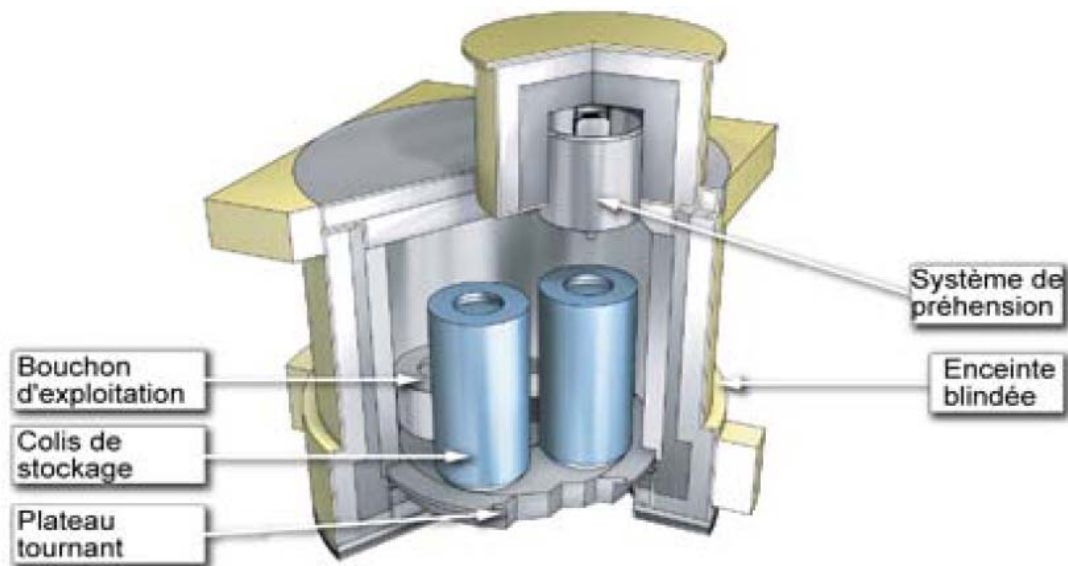


Abbildung 5-1: Endlagercontainer für verglaste HAW – Frankreich /2-15/



G.IM.ASTE.05.0367.A

Abbildung 5-2: Schutzbehälter zum Transport zweier Endlagerbehälter und eines Bentonitstopfens – Frankreich /2-15/

Die Endlagerbehälter sollen in vertikalen Bohrlöchern versenkt werden /2-15/. Hierzu werden zwei Behälter und ein Bentonitstopfen in den übertägigen Anlagen in einen Schutzbehälter (Abbildung 5-2) gegeben und von dort nach untertage transportiert. Der Schutzbehälter ist zylindrisch gebaut und besteht aus ca. 300 mm dicken Wänden aus einem Neutronen absorbierenden Material. Er misst ca. 2,5 m im Durchmesser und besitzt eine Höhe von ca. 3,4 m. Im beladenen Zustand liegt sein Gewicht bei ca. 50 t.

Der Schutzbehälter wird auf einem Transportfahrzeug im Förderkorb nach untertage transportiert. Hier wird der Behälter auf ein anderes Transportfahrzeug umgeladen, das den Behälter zum Einlagerungsbohrloch transportiert. Dieses Fahrzeug besitzt von einander unabhängig bewegliche Räder, wodurch es über einen ausgesprochen kleinen Wendekreis

verfügt. Die Ladefläche mit dem Behälter kann hydraulisch abgesenkt werden. Das Gewicht des Fahrzeugs wird bei ca. 100 t liegen.



Abbildung 5-3: Transportfahrzeug in der Strecke – Frankreich /2-15/

Über dem Einlagerungsbohrloch wird der Schutzbehälter hydraulisch abgesenkt und mit seiner Öffnung über dem Bohrlochmund ausjustiert (Abbildung 5-4). Während des Andockens wird aus Strahlenschutzgründen eine spezielle Elastomer-Blei-Abschirmung eingesetzt. Der Schutzbehälter besitzt an seiner Unterseite eine Öffnung, über die der Entladevorgang erfolgt. Die Basisplatte des Behälters ist drehbar, so dass anschließend der zweite Behälter und der Bentonitstopfen über der Öffnung positioniert werden können.

Aufgrund der Tatsache, dass der Schutzbehälter zwei Endlagerbehälter und einen Bentonitstopfen aufnehmen kann, ist es möglich, ein Bohrloch durch einen Transport zu füllen. Für Bohrlöcher, die für mehr als zwei Behälter vorgesehen sind, ist ein neuer Beladezyklus erforderlich, der mit der Entnahme des Bentonitstopfens beginnt und mit seinem abermaligen Einbau endet.

Das Beladesystem wird mit den in der Kerntechnik üblichen Sicherheitseinrichtungen ausgerüstet /2-15/. So besitzt der Antrieb des Hebezeugs eine Vorrichtung, die beim Auftreten von Störungen die Absenkgeschwindigkeit verringert. Ebenso öffnet sich der Greifer nur, wenn der Behälter abgestellt ist.

Die oben dargestellte Planung für den Transport- und die Einlagerung der Endlagerbehälter mit verglasten Abfällen befindet sich im Konzeptstadium. Prototypen wurden noch nicht angefertigt und erprobt.

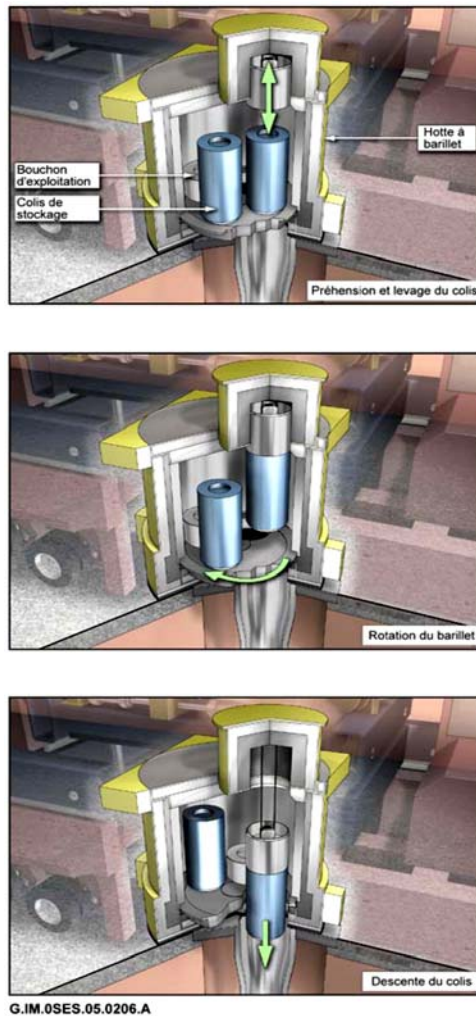


Abbildung 5-4: Einlagerung eines Endlagerbehälters in ein vertikales Bohrloch – Frankreich /2-15/

Ausgediente Brennelemente

Da die ausgedienten Brennelemente nicht wie die hoch radioaktiven Abfälle in einer Glasmatrix fixiert sind, können aus ihnen bei Wasserkontakt wesentlich leichter Radionuklide freigesetzt werden. Die Brennelemente müssen deshalb über sehr lange Zeiträume gegenüber Wasserzutritten abgedichtet sein.

Frankreich übernimmt für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in Granit das skandinavische Konzept KBS-3, das die Verwendung von zwei 4,5 bzw. 5,25 m langen Typen von Endlagerbehältern mit einer 50 mm starken Kupferwandung vorsieht (Abbildung 5-5) /2-15/. Der Behälterdurchmesser beträgt 0,65 bzw. 1,15 m. Im Inneren des Behälters werden die Brennelemente durch einen Stahleinsatz gehalten, der so ausgelegt ist, dass dem petrostatischen Druck nach der Versiegelung der Einlagerungszelle standhält. Aufgrund des Kammerabstands ist auch ohne den Zusatz von Neutronen absorbierenden Materialien die Unterkritikalität gewährleistet. Die Kupferwandung sichert eine Behälterstandzeit von ca. einer Million Jahre.



Abbildung 5-5: Kupfercontainer

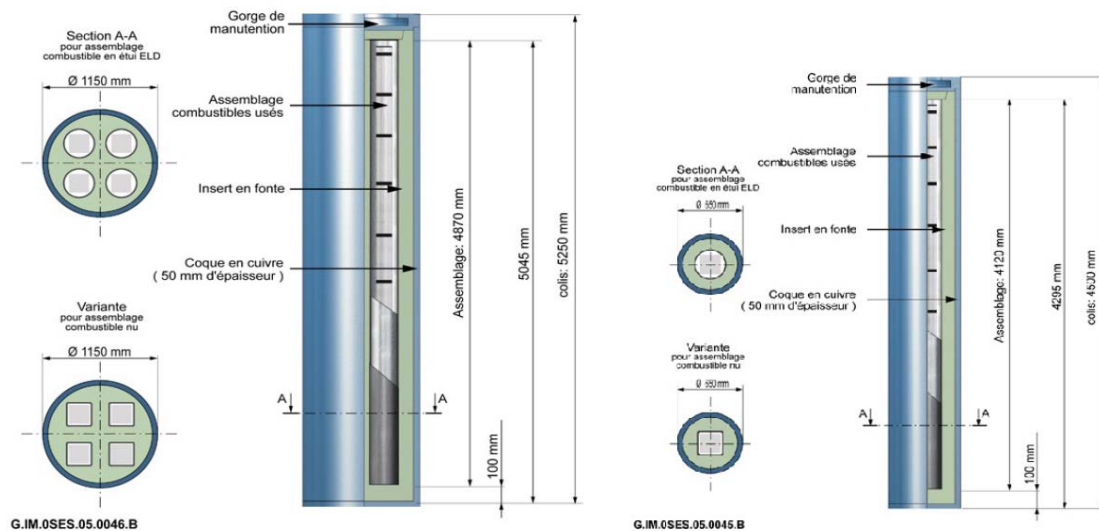


Abbildung 5-6: Behältertypen für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-15/

Aus Gründen des betrieblichen Strahlenschutzes sollen für den innerbetrieblichen Transport zylindrische Abschirmbehälter aus Stahl und Neutronen-absorbierendem Material mit einer Wandstärke von ca. 200 mm eingesetzt werden (Abbildung 5-7). Der zweiteilige Behälter ist 6 m lang und hat einen Durchmesser von 1,7 m. Sein Gewicht beträgt im unbeladenen Zustand 30 t, im beladenen 75 t. Der Transport zum Schacht soll mit dem gleichen Fahrzeug erfolgen, das auch für den Transport der verlasten Abfälle eingesetzt werden soll.

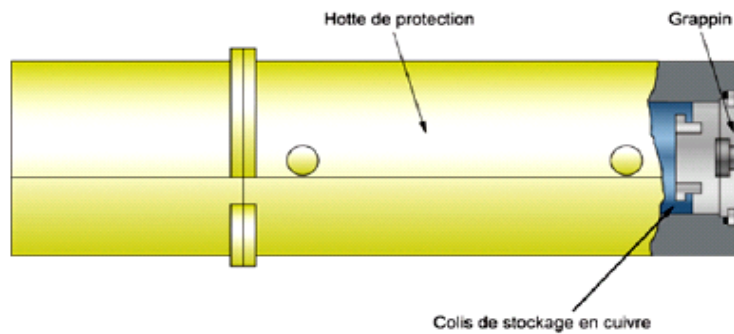


Abbildung 5-7: Transportbehälter für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-15/

Auf der Einlagerungssohle soll der Behälter von einem anderen Transportfahrzeug (Abbildung 5-8) aufgenommen und in die Nähe des Einlagerungsbohrloches gebracht werden. Das Radfahrzeug ist ca. 12 m lang, ca. 4 m breit, ca. 3,8 m hoch und ca. 40 t schwer. Es besitzt eine mechanische Vorrichtung, um den Behälter auf das Einlagerungsfahrzeug zu schieben.

Das Einlagerungsfahrzeug ist ca. 12 m lang, 3,7 m breit und 4,6 m hoch. Sein Gewicht beträgt im unbeladenen Zustand ca. 70 t, im beladenen ca. 145 t. Es besitzt eine abgeschirmte Kabine und eine abgeschirmte Handhabungsvorrichtung, die den Transportbehälter aufnimmt.

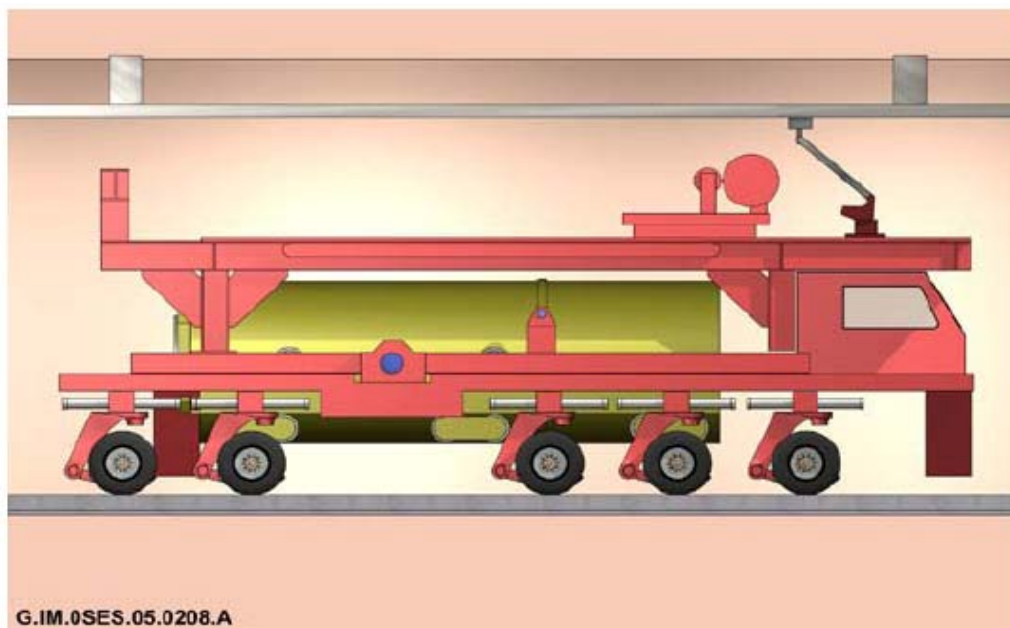


Abbildung 5-8: Transportfahrzeug für untertage – Frankreich /2-15/

Gemäß dem vorgesehenen Einlagerungsablauf übernimmt das Einlagerungsfahrzeug den Transferbehälter vom Transportfahrzeug und positioniert ihn durch gleichzeitiges Schieben und Kippen über dem Einlagerungsbohrloch (Abbildung 5-9). Nach Öffnen des Transportbehälters wird der Endlagerbehälter mittels eines Greifers in das Bohrloch abgelassen.

Anschließend wird das Bohrloch durch einen Bentonitblock verschlossen und der Transferbehälter wird auf das Transportfahrzeug geschoben und nach über Tage gebracht.

Die oben dargestellten Planungen für den Transport- und die Einlagerung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen befinden sich im Konzeptstadium. Prototypen wurden noch nicht angefertigt und erprobt.

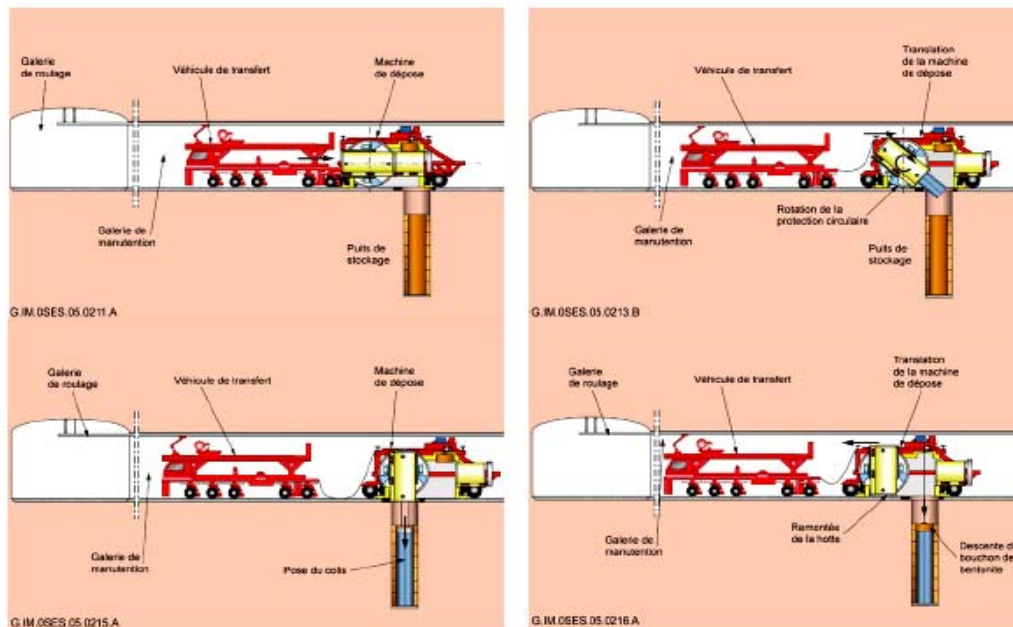


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung der Einlagerung ausgedienter Brennelemente in ein Bohrloch – Frankreich /2-15/

5.1.2 Endlagerkonzept für Ton

Die Primärbehälter werden in Endlagerbehälter aus nicht legiertem Stahl vom Typ P235 mit einer Wandstärke von 55 mm verpackt (Abbildung 5-10). Es sind zwei Behältertypen mit Längen von 1291 mm und 1607 mm und Durchmessern von 655 mm und 590 mm vorgesehen. Der gewählte Stahl-Typ verfügt über gute Schweiß Eigenschaften. Der mit dem Behälter verschweißte Deckel besitzt zur Handhabung eine Nut. Der Behälter ist im Hinblick auf die Einlagerung in horizontalen Bohrlochern mit keramischen Gleitkufen versehen. Im beladenen Zustand besitzt der kurze Behälter ein Gewicht von 1645 kg, der lange Behälter von 1965 kg.

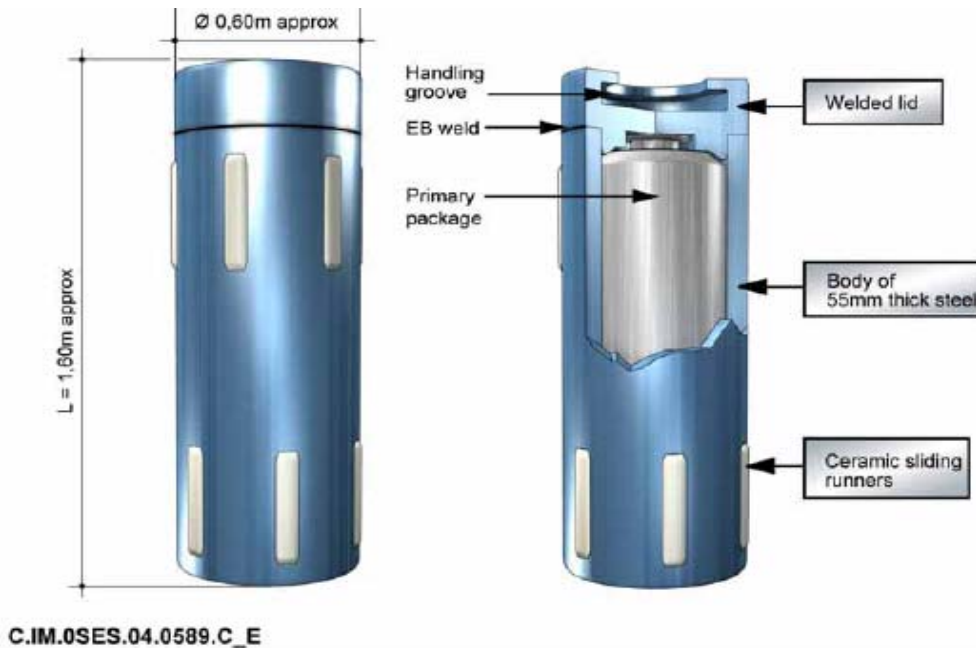


Abbildung 5-10: Endlagerbehälter für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle – Frankreich /2-24/

Von den wichtigsten Komponenten der Transport- und Einlagerungstechnik – Transportbehälter, Shuttle-Fahrzeug, Bohrlochschleuse und Roboter zum Einschieben des Endlagerbehälters – wurden Prototypen gebaut, die z. Z. im Großversuch erprobt werden /5-1/.

Der Endlagerbehälter wird in einem abgeschirmten Transportbehälter mit 400 mm starken Wänden aus Stahl und PPB (Polyethylen mit Zusatz von Bor) nach untertage transportiert (Abbildung 5-11). Der Behälter besitzt eine Eingangsschleuse und in seinem Inneren befindet sich ein Roboter, der den Endlagerbehälter in das horizontale Bohrloch schiebt und dort platziert.

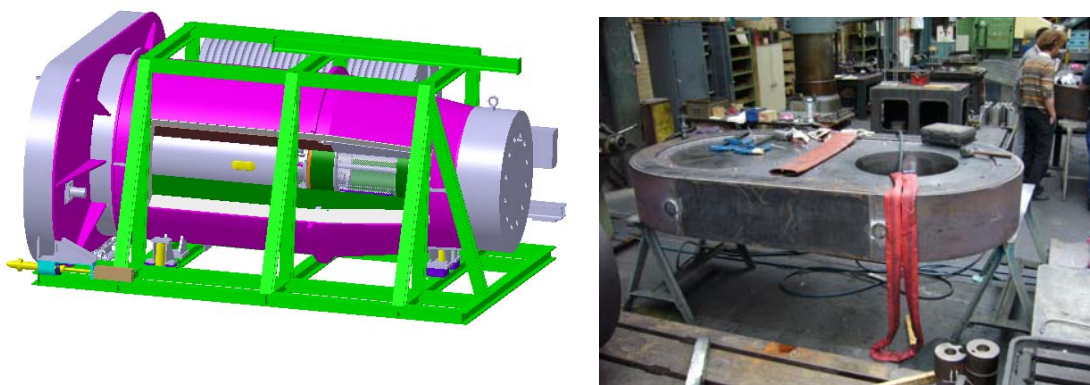


Abbildung 5-11: Konzept des abgeschirmten Transportbehälters mit Eingangsschleuse und Roboter im Inneren (links), Fertigung der Schleuse des Prototyps – Frankreich /5-1/

Der Transportbehälter soll durch Radfahrzeuge, wie sie auch für das Granit-Konzept vorgesehen sind, bis in die Nähe des Einlagerungsbohrloches transportiert werden /2-24/. Dort wird der Behälter von einem weiteren Fahrzeug („docking shuttle“) übernommen (Abbildung 5-12). Für jede Abfallart (nicht und schwach wärmeentwickelnde Abfälle, wärmeentwickelnde Abfälle, ausgediente Brennelemente) sind spezielle Arten von Shuttle, deren Eigenschaften von den unterschiedlichen Transportbehältern und dem Andockmechanismus abhängen. Aufgrund ihrer Länge können die Transportbehälter für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle quer zur Streckenrichtung transportiert werden (Abbildung 5-13), so dass sie für den Einlagerungsvorgang nicht gedreht werden müssen. Der Behälter wird bis zum Eingang des Einlagerungsbohrloches gebracht und nach Querverschiebung an der Bohrlochschleuse andockt, wobei eine Verbindung zwischen den Schiebetüren des Behälters und denen der Bohrlochschleuse entsteht. Die Schleusentüren werden zusammen mit den Behältertüren mit Hilfe des am Behälter befindlichen Motors geöffnet.



Abbildung 5-12: Prototyp eines „docking shuttle“-Fahrzeugs – Frankreich /5-1/

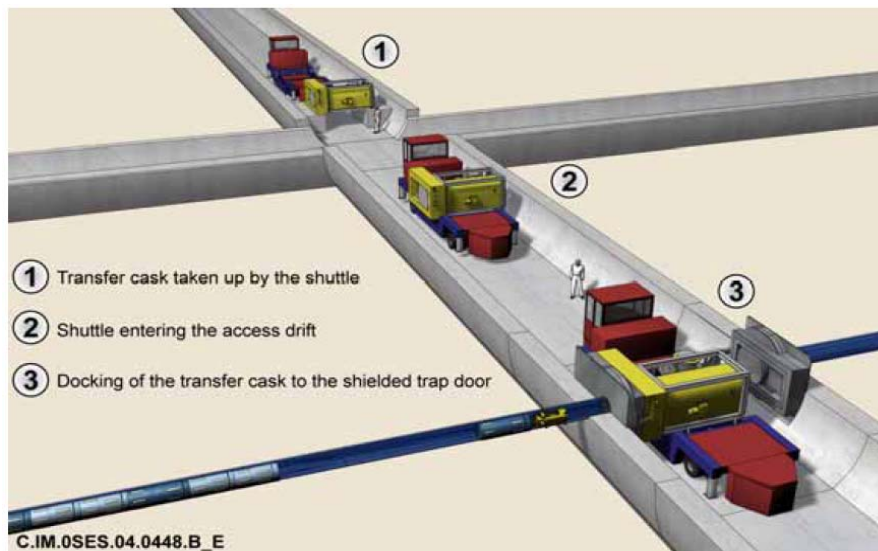


Abbildung 5-13: Andocken eines Transportbehälters an der Bohrlochschleuse – Frankreich /2-24/

Nach dem Öffnen der Schleusentüren wird der Endlagerbehälter mit Hilfe des im Transportbehälter befindlichen Roboters in das ca. 100 m lange Einlagerungsbohrloch geschoben und dort an die gewünschte Position gebracht. Je Bohrloch sind acht Endlagerbehälter mit sieben sandgefüllten Abstandshaltern vorgesehen.

Zum Einbringen der Endlagerbehälter in Bohrlöcher wurden zwei Arten von Schieberobotern gebaut und erprobt. Sie können sowohl für die Einlagerung als auch für eine eventuelle Rückholung der Abfallbinde eingesetzt werden /2-24/.

Das Zurückholen des Roboters erfolgt mit Hilfe einer am Transportbehälter befindlichen Seilwinde.

Der derzeit im Großversuch erprobte Schieberoboter wird mit Hilfe zweier, durch Druckluft aufblasbarer ringförmiger Kammern im Bohrloch verspannt, wodurch der hierfür erforderliche Druck gleichmäßig auf die Verrohrung des Einlagerungsbohrloches verteilt wird /2-24/ (Abbildung 5-14). Anschließend wird der Behälter durch einen hydraulischen Schieber am Kopf des Roboters schrittweise um ca. 1 m verschoben. Dabei wird das Gerät nach Entspannen der hinteren Kammer und Einspannen der vorderen Druckluftkammer bis zum Behälter gezogen. Wenn der Roboter dann wieder mit der hinteren Kammer verspannt ist, kann der Schiebevorgang wiederholt werden.

In einem Großversuch mit einem 100 m langen simulierten Einlagerungsbohrloch in St. Chamond wurde der gesamte Einlagerungsablauf vom Andocken des Transportbehälters auf dem Shuttle bis zur Einlagerung und dem anschließenden Zurückziehen des Schieberoboters erfolgreich erprobt /5-1/ (Abbildung 5-15). Es wurden auch Versuche mit leicht gekrümmten Bohrlöchern durchgeführt, wobei keine Probleme bei der Einlagerung aufgetreten sind.



Abbildung 5-14: Schieberoboter Typ 2; links im eingefahrenen und rechts im ausgefahrenen Zustand – Frankreich /2-24/



Abbildung 5-15: Versuchsstand zur Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in St. Chamond – Frankreich /5-1/

Ausgediente Brennelemente

Die Primärbehälter mit den ausgedienten Brennelementen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden, um einen Kontakt der Brennelemente mit Wasser in der Periode, in der die Temperatur der Behälter über 80 °C liegt, zu verhindern /2-24/. Es sind zwei zylindrische Behältertypen aus nicht legiertem Stahl vom Typ P235 vorgesehen.

Der erste Behälter mit einer Wanddicke von 110 mm besitzt einen Durchmesser von ca. 1250 mm und eine Länge von 4500 mm bis 5400 mm (Abbildung 5-16). Das Gewicht beträgt

35 t bis 43 t. In den Endlagerbehältern befindet sich ein Einsatz aus Eisen, der folgende Funktionen hat:

- Aufnahme des Außendruckes auf den Endlagerbehälter
- Vermeidung der Bildung kritischer Massen,
- Fixieren der Brennelemente bei minimalem freien Volumen, und
- Unterstützung der Wärmeabfuhr an die Umgebung.

Der Endlagerbehälter kann einerseits Primärbehälter mit Brennelementen aufnehmen und andererseits können die Brennelemente auch ohne Primärbehälter in den Endlagerbehälter geladen werden. Vor dem Aufbringen des Deckels wird auf den Eiseneinsatz eine 10 mm dicke Stahlscheibe geschweißt.

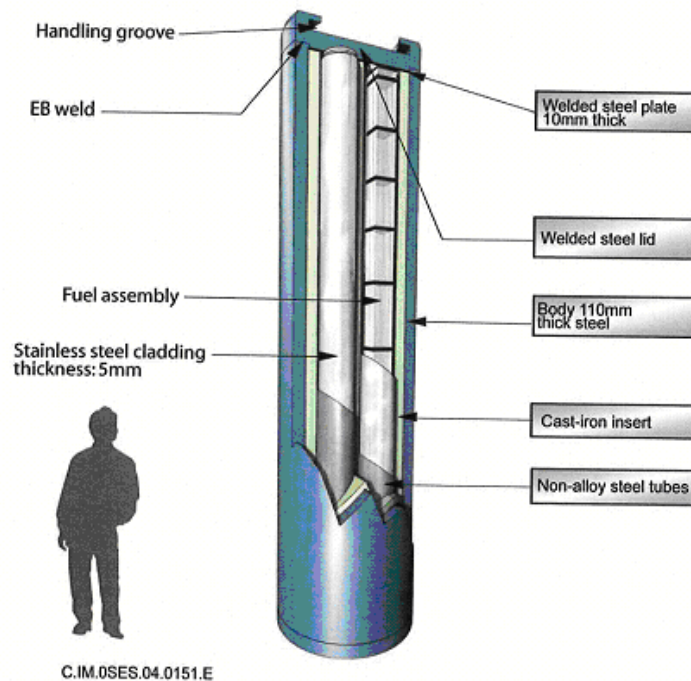


Abbildung 5-16: Endlagerbehälter für vier Brennelemente – Frankreich /5-2/

Der zweite Endlagerbehältertyp mit einer Wandstärke von 120 mm hat einen Durchmesser von 620 mm und eine Länge zwischen 4500 und 5400 mm (Abbildung 5-17). Er besitzt ein Gewicht von 8 t bis 10 t. Der Behälter ist für die Aufnahme jeweils eines Brennelements vorgesehen. Vor dem Aufbringen des Deckels wird auf den Eiseneinsatz eine 10 mm dicke Stahlscheibe geschweißt. Der Behältermantel ist an beiden Enden mit keramischen Stützgleitern und im mittleren Teil mit keramischen Führungsgleitern für den Luftkissentransport versehen.

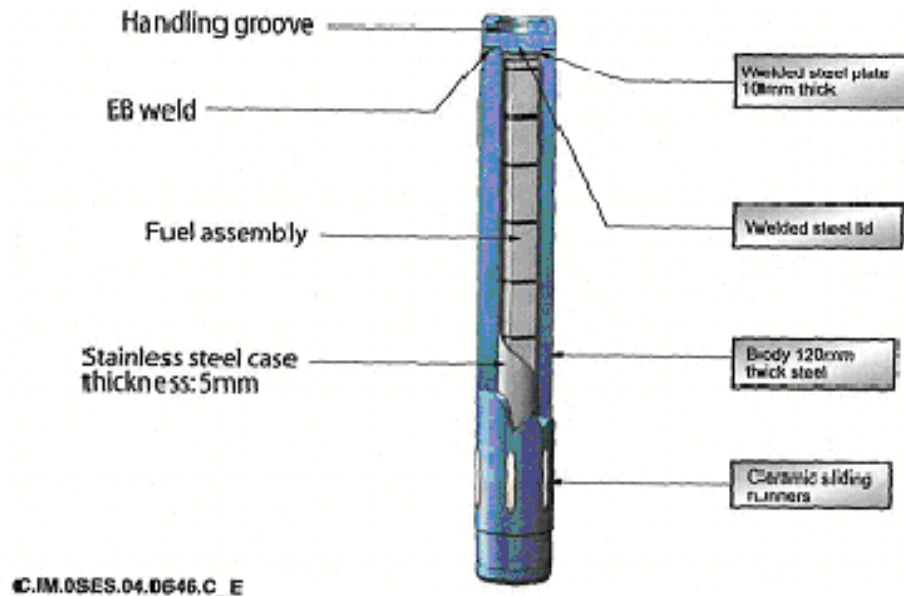


Abbildung 5-17: Endlagerbehälter für ein MOX- oder ein Uranoxid-Brennelement – Frankreich /2-24/

Für den Transport nach untertage wird der Endlagerbehälter in einen abgeschirmten Transportbehälter verladen /2-24/. Dieser Transportbehälter entspricht dem entsprechenden Behälter für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle, wurde aber den Abmessungen des Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente angepasst. Das Gesamtgewicht eines beladenen Transportbehälters beträgt 105 t.

Der Transport bis in die Nähe des Einlagerungstunnels erfolgt mit den gleichen Geräten und auf die gleiche Art und Weise, wie sie für die verglasten Wiederaufarbeitungsabfälle beschrieben wurden. Aufgrund der größeren Länge von Transport- und Endlagerbehälter wird der Behälter aber längs transportiert und erst unmittelbar vor der Einlagerstrecke um 90° gedreht. Gegenüber dem Einlagerungsbohrloch wird in der Zufahrtsstrecke eine Nische erstellt, die das Drehen ermöglicht (Abbildung 5-18).

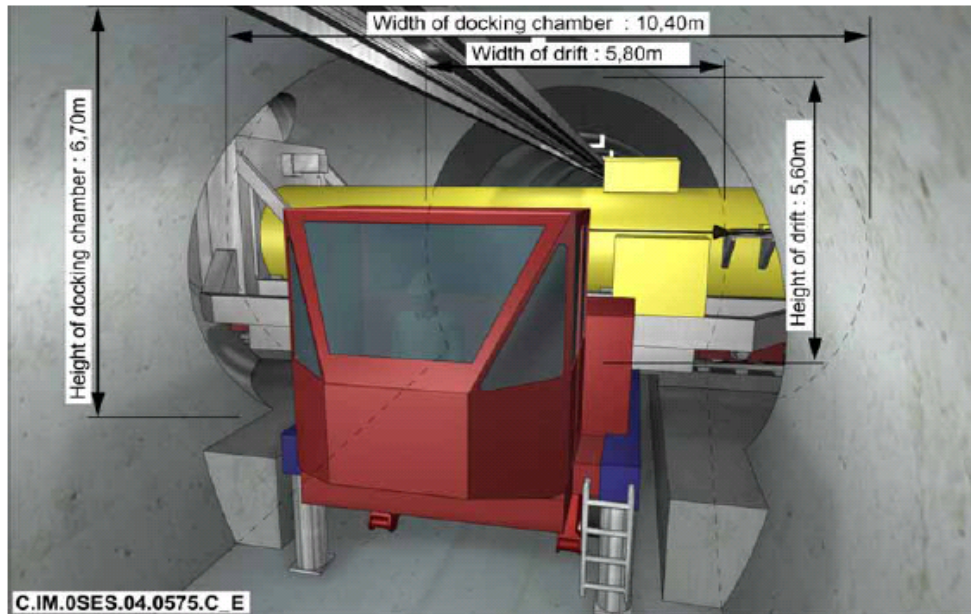


Abbildung 5-18: Einlagerung eines Endlagergebundes für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-24/

Die Einlagerungsbohrlöcher haben Durchmesser von 3,2 m bzw. 2,6 m und eine Länge von 43 m bzw. 46 m, wovon 32 m bzw. 35 m als Einlagerungsbereiche genutzt werden. Als Vorbereitung für die Einlagerung werden die verrohrten Bohrlöcher mit einer Auskleidung aus Bentonitringen versehen. Zum Einbringen in die Bohrlöcher, das mit Luftkissenfahrzeugen erfolgt, werden die Bentonitringe zu Vierer-Einheiten zusammengefasst. Diese Technik wurde in einem Großversuch in Beaumont Hague erprobt /5-3/ (Abbildung 5-19).



Abbildung 5-19: Großversuch zum Einbringen von Bentonitringen in Großbohrlöcher in Beaumont Hague – Frankreich /5-3/

Im Zentralteil der Bentonitauskleidung befindet sich das Einlagerungsrohr. In jedes Einlagerungsbohrloch werden drei bis vier Endlagergebinde mit dazwischen liegenden Abstandshaltern eingelagert.

Nach dem Andocken des Transportbehälters an die Bohrlochschleuse und dem Öffnen der Schiebetüren mittels eines am Behälter befindlichen Motors wird der Endlagerbehälter mit Hilfe eines ferngesteuerten Roboters aus dem Behälter in die Strecke geschoben /2-24/. Für das Einbringen des Behälters in das Bohrloch wurden drei Alternativen untersucht (Abbildung 5-20):

- Gleiten des Behälters auf Keramikrufen und Schieben mit einem Roboter entsprechend (Abbildung 5-14),
- Schieben eines mit Rollen versehenen Endlagerbehälters mit Hilfe eines selbstfahrenden, hydraulischen Roboters, und
- Schieben des Endlagerbehälters durch einen Roboter mit Hilfe der Luftkissenteknik.

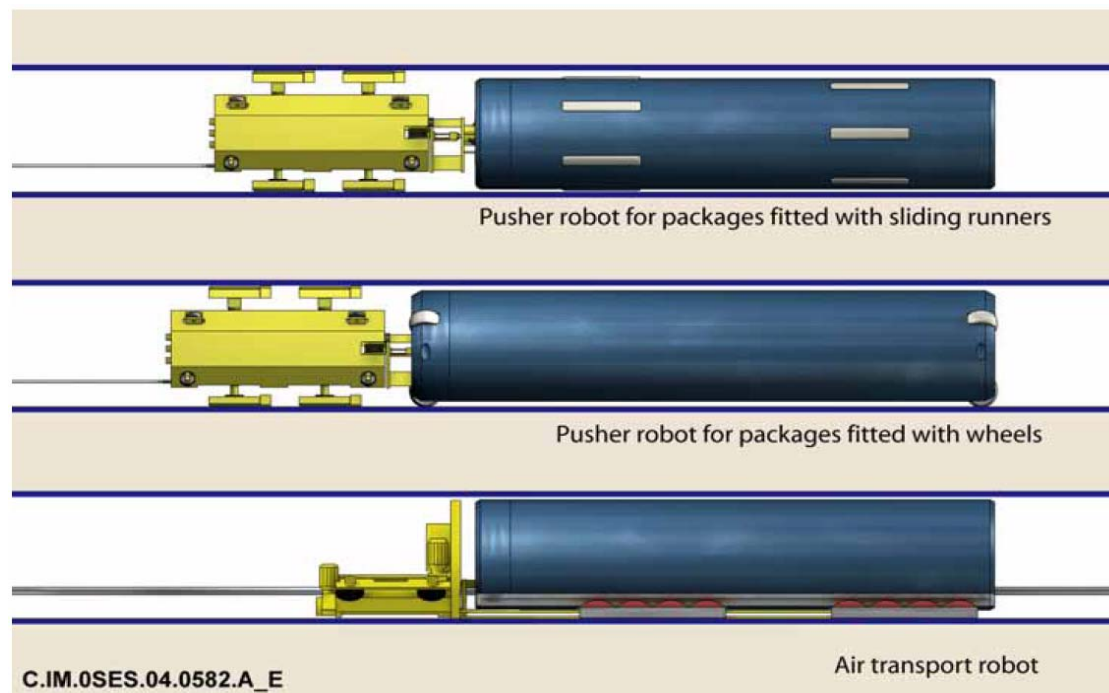


Abbildung 5-20: Untersuchte Möglichkeiten für das Einschleiben eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente in den Einlagerungstunnel – Frankreich /2-24/

Für die kleineren Behälter mit einem Gewicht von ca. 10 t und einer Länge von ca. 4,6 m ist ein Schieben auf Keramikrufen unter Verwendung eines hydraulischen, selbstfahrenden Roboters möglich. Der Vorgang wurde bereits bei den verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen beschrieben.

Für die größeren Behälter mit einem Gewicht von ca. 43 t und einer Länge von ca. 5,4 m müssten bei Anwendung der Gleittechnik auf Rufen Roboter mit einer enormen Schubkraft entwickelt werden. Der Einbau von Rädern in die Behälter würde ihre Produktion erschweren

und ihre Länge und damit ihr Gewicht erhöhen. Daher wird für die Einlagerung dieser Behälter die Luftkissentech­nik bevorzugt, die sowohl in Frankreich wie auch in Schweden durch Demonstrationsversuche untersucht wurde.

Für die Anwendung der Luftkissentech­nik wird die folgende Ausrüstung benötigt /2-24/:

- ein mobiler Roboter (Luftkissentransporter) (Abbildung 5-21),
- fest am Transportbehälter installierte Einrichtungen (Winden für das Rückholkabel, den Druckluftschlauch und das Elektrokabel), und
- ein Kompressor am Einlagerungsfahrzeug.

Der Luftkissentransporter ist ca. 7 m lang sein, wobei ca. 5,5 m auf das mit Luftkissenmodu­len bestückte Ladegestell und ca. 1,5 m auf Elektrofahrzeug entfallen. Für den Behälter­transport wird das Ladegestell, das mit ca. 12 Luftkissen bestückt ist, unter den Behälter geschoben (Abbildung 5-22). Beim Positionieren der Luftkissenmodule und Anheben des Behälters sorgen ca. 50 mm hohe Schienen, auf denen der Behälter ruht, für den erforderli­chen Freiraum. Jedes Luftkissenmodul besteht aus einem ringförmigen Gummisockel, dessen Krümmung auf den Behälterdurchmesser abgestimmt ist. Nach dem Aufblasen der Gummisockel um ca. 20 mm mit einem Druck von ca. 4 bar wird der Behälter angehoben. Die Luft entweicht dann und bildet ein Luftkissen, das den Behälter um wenige Zehntel Milli­meter anhebt, wodurch sich dieser in einem Schwebезustand befindet und ohne großen Aufwand bewegt werden kann.

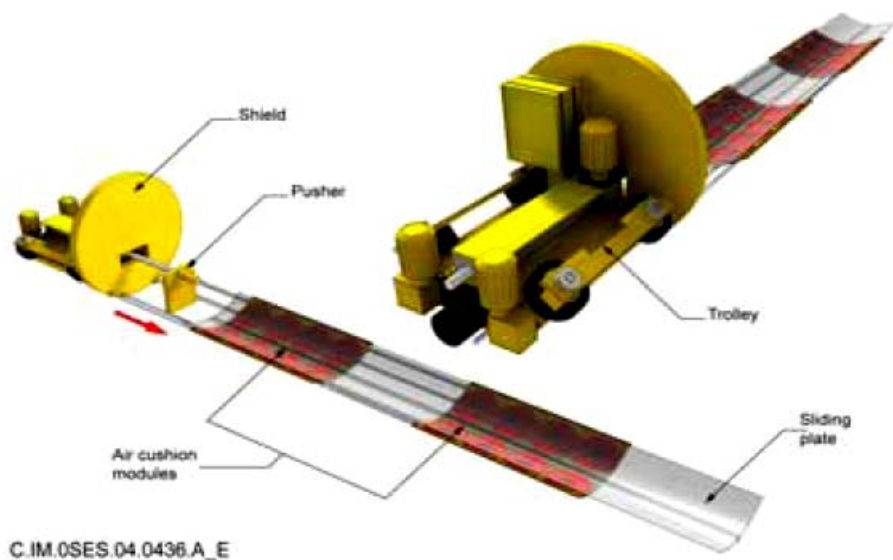


Abbildung 5-21: Luftkissentransporter – Frankreich /2-24/

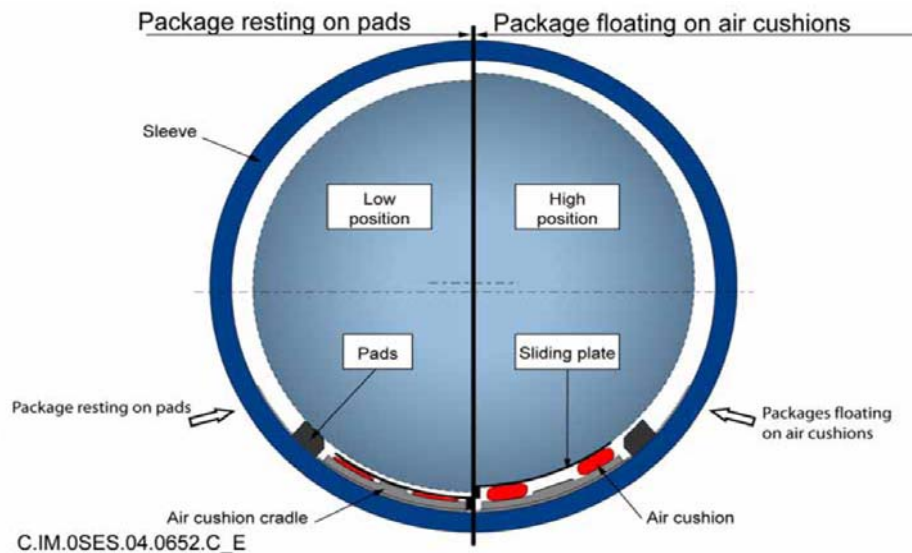


Abbildung 5-22: Positionieren der Luftkissenmodule und Anheben des Behälters – Frankreich /2-24/

Das Verschieben des Behälters und das Verfahren des Luftkissentransporters erfolgen durch eine bereifte Elektroeinheit, die sich am Luftkissentransporter befindet (Abbildung 5-21). Sie ist über Kabel, Schläuche und Seile mit dem Transportbehälter und dem Einlagerungsfahrzeug verbunden. Das Verfahren erfolgt mit Rädern, das Verschieben mit einem hydraulischen Stempel in 1 m-Schritten. Die erforderliche Schubkraft beträgt weniger als 1 t, so dass die Masse des Luftkissentransporters und die Reibung der Räder als Gegengewicht ausreichen.

Der Einlagerungsablauf zum Einbringen eines Endlagerbehälters mit ausgedienten Brennelementen wurde in einem Großversuch in Beaumont Hague erfolgreich erprobt /5-3/ (Abbildung 5-23).



Abbildung 5-23: Demonstrationsversuch zur Einlagerung von Brennelement-Behältern in Beaumont Hague – Frankreich /5-3/

5.2 Schweden

In Schweden ist für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in Kristallingesteinen das Endlagerkonzept KBS-3 mit der Verwendung von Kupferbehältern vorgesehen /2-9/. Der Referenzbehälter hat eine Wandstärke von 50 mm, alternativ wurde noch ein Behälter mit einer Wandstärke von 30 mm betrachtet (Abbildung 2-3). Im Inneren befindet sich ein Einsatz aus Gusseisen, der einerseits die Brennelemente (4 DWR oder 12 SWR) fixiert und andererseits den Behälter stabilisiert. Die Behälter sind für die Einlagerung in horizontalen oder vertikalen Bohrlöchern vorgesehen (Kap. 2.1.1). Referenzkonzept ist die Variante KBS-3V /2-9/.

Die Einlagerungsstrecken besitzen eine Länge von ca. 265 m. In der Streckensohle werden 8 m lange Vertikalbohrungen mit einem Durchmesser von ca. 1,75 m abgeteuft. Der Abstand der Bohrlöcher beträgt ca. 6 m, so dass je Strecke ca. 40 Bohrungen erstellt werden. Die Sohle der Einlagerungsbohrlöcher wird durch eine Zementschicht nivelliert und anschließend mit einer Kupferplatte abgedeckt. Dann beginnt die Vorbereitung der Bohrlöcher für die Einlagerung mit dem Einbringen der Bentonitblöcke und -ringe mit Hilfe eines Brückenkrans /5-4/. Die Herstellung und Handhabung der Bentonitelemente wurde in Demonstrationsversuchen erprobt.

Das Endlagerkonzept sieht den Transport der Endlagerbehälter in einem abgeschirmten Transportbehälter in horizontaler Lage über die Rampe zum Einlagerungsort vor. Detailplanungen des Transportbehälters und des -fahrzeugs wurden noch nicht durchgeführt. Am Einlagerungsort wird der Endlagerbehälter vom Transportbehälter an die Abschirmungshülle der Einlagerungsmaschine übergeben (Abbildung 5-24). Über dem Einlagerungsbohrloch wird die Abschirmungshülle dann in eine vertikale Position geschwenkt und nach Öffnen des Deckels der Endlagerbehälter mit Hilfe eines Greifers in das Einlagerungsbohrloch abgelassen. Abschließend wird das Bohrloch mit Bentonitblöcken verschlossen. Ein Prototyp der Einlagerungsmaschine wurde im Untertagelabor in Äspö in Versuchen erprobt.

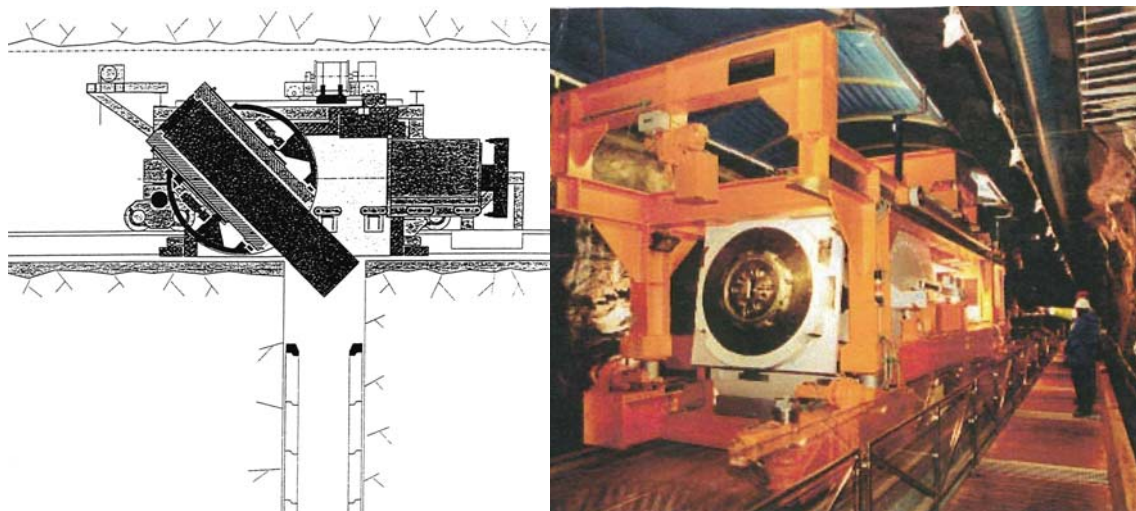


Abbildung 5-24: Einlagerungsmaschine für das Konzept KBS-3 V. Schematische Darstellung des Positionieren des Behälters (links), Prototyp URL Äspö (rechts) – Schweden

Alternativ zur Endlagerung in Vertikalbohrlöchern wird auch die Endlagerung in 300 m langen Horizontalbohrlöchern bzw. -strecken untersucht (Abbildung 2-5). Für dieses Konzept wird der Einsatz eines sogenannten „Supercontainers“ untersucht, der aus einem Bentonitummantelten Endlagerbehälter in einem perforierten Stahlzylinder besteht. Die Gesamtlänge des 45 t schweren Supercontainers beträgt 5,5 m (Abbildung 2-4). Die Herstellung der Supercontainer soll in den Tagesanlagen des Endlagers erfolgen und erfordert hier entsprechende Anlagen für die Herstellung der Bentonitelemente, die Behälterherstellung und das Umladen vom Transportbehälter in den Supercontainer /5-5/. Ein zusätzlicher Abschirmbehälter ist für den Transport des Supercontainers nicht erforderlich. Der Supercontainer wird mit einem Transportfahrzeug zur Einlagerungsstrecke gebracht. Die Funktionalität und Handhabung des Supercontainers wird derzeit im Untertagelabor Äspö erprobt /2-11/, /5-5/ (Abbildung 5-26). Die Supercontainer sollen bei der Einlagerung auf einem Wasserkissenfahrzeug liegen und mit Hilfe eines Schieberoboters positioniert werden (Abbildung 5-25). Die Entscheidung für ein Wasserkissenfahrzeug ergibt sich daraus, dass die Anwendung des Luftkissenverfahrens aufgrund der rauen Oberfläche der Stollenwandung sehr große Luftmengen erfordern würde, um die Behälter zum Schweben zu bringen.

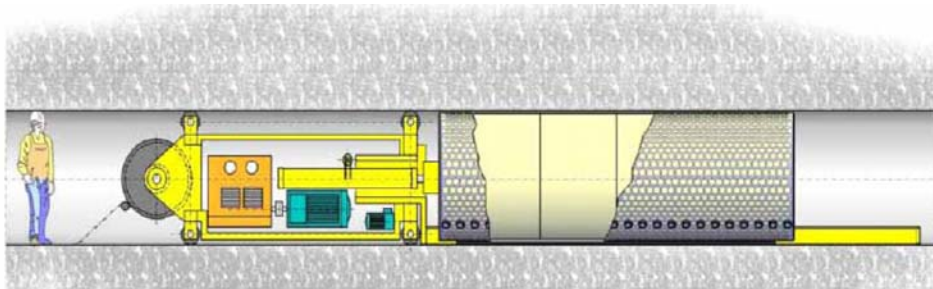


Abbildung 5-25: Schubroboter mit Wasserkisstechnologie zur Einlagerung der „Supercontainer“ – Schweden /2-11/



Abbildung 5-26: Erprobung der Einlagerungsmaschine für Supercontainer im Untertagelabor Äspö – Schweden /5-5/

5.3 Finnland

Das finnische Endlagerkonzept lehnt sich eng an die schwedischen Planungen an und favorisiert ebenfalls das KBS-3V-Konzept /2-12/ (vgl. Kap. 2.1.2). Auch das Konzept der Kupferbehälter ist ähnlich, doch werden entsprechend den drei Reaktortypen auch 3 Behältertypen mit unterschiedlicher Länge benötigt. Hieraus ergeben sich abweichende Geometrien der Einlagerungsbohrungen und der Bohrloch- und Streckenabstände. Wie in vielen anderen Aspekten der Endlagerforschung kooperiert POSIVA auch bei der Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik eng mit SKB. Dementsprechend kann hier auf die obigen Ausführungen zu den schwedischen Planungen verwiesen werden (Kap. 5.1.2).

5.4 Belgien

Das belgische Referenzkonzept der Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Ton sieht die Streckenlagerung sogenannter Supercontainer in Strecken mit vermindertem Querschnitt vor /2-21/. Im Unterschied zum skandinavischen Supercontainer-Konzept für Kristallingesteine besteht beim belgischen Supercontainer-Konzept für Ton die Ummantelung aus einem 60-70 cm starken Zementpuffer. Zur Erhöhung der Festigkeit und zum Schutz vor chemischen Einflüssen aus dem Boom Clay wird die Zementhülle mit einem 6 mm starken Stahl liner umgeben. In den zentralen Hohlraum der Ummantelung kann ein Overpack mit zwei HAW-Kokillen, vier DWR-Brennelemente oder einem MOX-Brennelement eingebracht werden. Anschließend wird der Ringraum zwischen Overpack und Zementmantel sowie der Bereich oberhalb des Overpacks mit Zement vergossen. Schließlich wird der Deckel des Stahl liners verschweißt. Durchmesser und Länge des Supercontainers werden dabei dem jeweils vorgesehenen Abfallgebinde angepasst (Durchmesser 1,6 – 2,1 m, Länge 4,2 bis 6,2 m). Das Gewicht des Supercontainer schwankt dementsprechend zwischen 25 und 35 t. Aufgrund des Zementmantels ist keine zusätzliche Abschirmung des Behälters während des innerbetrieblichen Transportes notwendig.

In mehreren Studien wurden verschiedene Optionen zum Transport von Supercontainern analysiert und verglichen /2-21/. Abschließend ergaben sich für die Luftkissenteknik die meisten Vorteile: Leichte Bedienbarkeit und Manövrierbarkeit, Robustheit, geringster Platzbedarf und sichere Energieversorgung. Es wurde eine grundlegende Designstudie für den Schacht- und Untertagettransport des Supercontainers mit Hilfe eines Luftkissentransporters durchgeführt. Ein besonderer technischer Aspekt des Konzeptes ist dabei die Luftversorgung des Transporters unter Berücksichtigung des beschränkten Raumes in den Strecken. Für die Zugangsstrecke ist eine „Luftschiene“ vorgesehen, auf der sich die Luftversorgung an einem auf Schienen laufenden Gerüst mit dem Transporter bewegt. In den engeren Einlagerungsstrecken kann eine Versorgung des Luftkissentransporters über eine Druckluftleitung erfolgen. An Versorgungspunkten wird ein Luftschlauch des Transporters, der auf einer Trommel aufgerollt ist, angeschlossen. Alle 100 m muss die Verbindung gelöst und am nächsten Punkt angeschlossen werden.

Die Einlagerung der Supercontainern in die Einlagerungsstrecke soll mit Schieberobotern erfolgen, wie sie in Schweden und Frankreich entwickelt wurden. Nach Einbringen des Behälters wird der Resthohlraum mit Zement verfüllt (Abbildung 5-27).

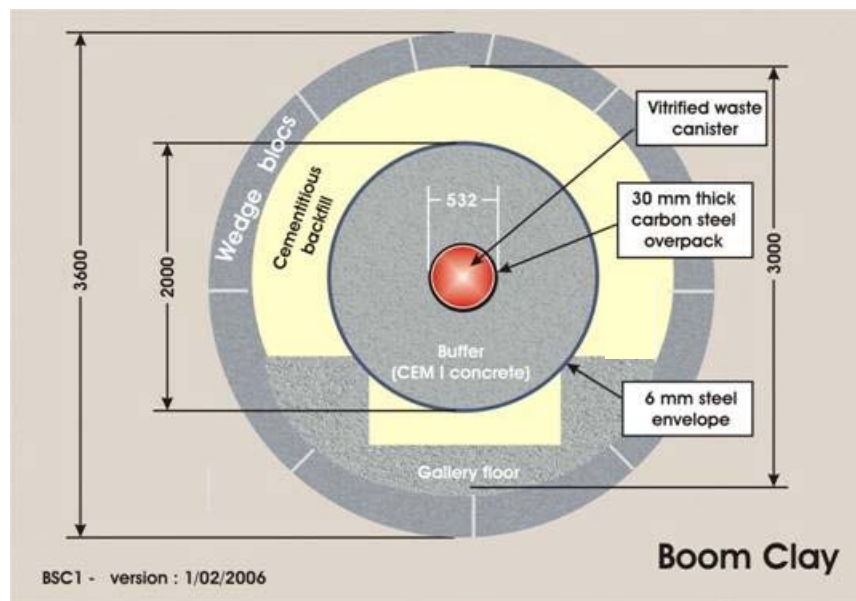


Abbildung 5-27: Schnitt durch eine Einlagerungsstrecke mit HAW-Supercontainer – Belgien /2-20/

Alternativ wird zum Supercontainer das Konzept der Lagerung von Overpacks in vertikalen Bohrlöchern untersucht /5-6/. Bei diesem Konzept wird das System der künstlichen Barrieren so einfach wie möglich gehalten und dem Boom Clay die Hauptbarrierefunktion zugewiesen wird. Die Einlagerung erfolgt in Bohrlöchern, die von der Einlagerungsstrecke aus senkrecht nach unten gebohrt werden und einen Overpack aufnehmen können (vergleichbar dem KBS-3V-Konzept). Die Bohrlöcher werden zu ihrer Stabilisierung sofort nach ihrer Erstellung mit einer Verrohrung aus Edelstahl versehen. Der Bohrlochabstand wird etwa 5 m betragen. Nach seiner Befüllung wird das Bohrloch mit einem Betonstopfen und einem Edelstahldeckel abgeschlossen. Hierüber folgt ein Betonblock, der mit der Sohle flurgleich abschließt (Abbildung 5-27).

Eine Alternative zu Lagerung in vertikalen Bohrlöchern stellt die Einlagerung in horizontale Bohrlöcher dar, die in festen Abständen links und rechts der Strecke gebohrt werden /5-6/. Dies hat den Vorteil, dass die Abfälle in der Mitte der Boom Clay-Formation bleiben und ein ausreichender Abstand zu den Liegendschichten erhalten bleibt. Die Nachteile bestehen zum einen darin, dass bei den Bohrarbeiten die Schwerkraft nicht ausgenutzt werden kann und zu anderen darin, dass beim Einbringen des Behälters in das Bohrloch die Reibungskräfte zwischen Behälter und Bohrlochwandung überwunden werden müssen.

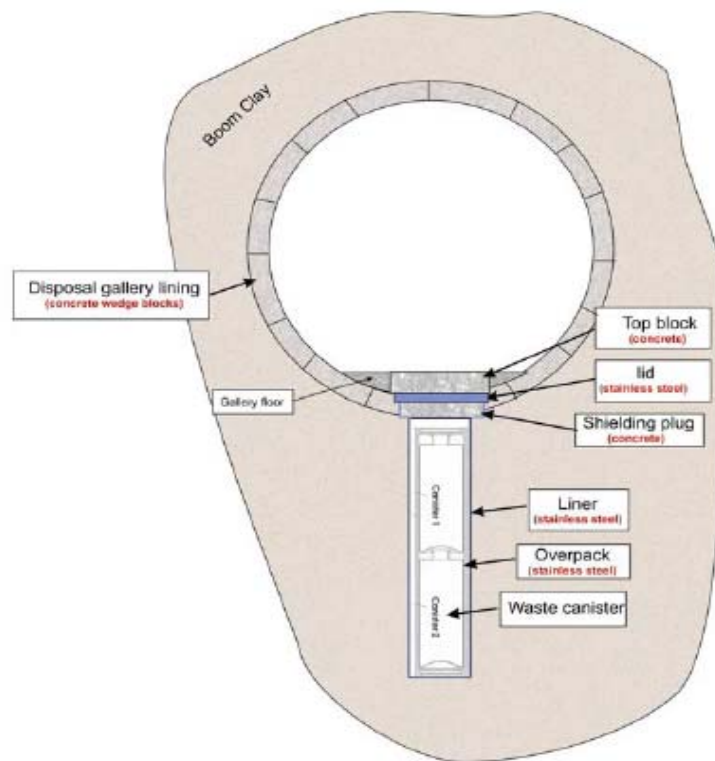


Abbildung 5-28: Lagerung eines Overpacks in einem senkrechten Bohrloch – Belgien /5-6/

Aus Strahlenschutzgründen muss der Transport der Overpacks in einem abgeschirmten Transportbehälter erfolgen. Als Transportmethode ist die Luftkissenteknik vorgesehen. Für den Einlagerungsvorgang in das senkrechte Bohrloch ist eine Maschine vorgesehen, wie sie im KBS-3-Projekt Schwedens entwickelt wurde (vgl. Kap. 5.2, Abbildung 5-2).

Ein weiteres Alternativkonzept ist die „Lagerung in Strecken mit vermindertem Querschnitt (Sleeve design)“ /5-6/. Durch die Verringerung des Streckendurchmessers auf ca. 2,25 m sollen die gebirgsschädigenden Einflüsse durch die Streckenauffahrung minimiert werden. Bei diesem Konzept werden Bentonithülsen in die Strecke eingebracht, wobei jeder Hülse für die Aufnahme eines Overpacks vorgesehen ist (Abbildung 5-29). Die Bentonithülsen werden mit Hilfe sogenannter Schlüsselsteine gegeneinander ausgerichtet und verbunden. Für die Fertigung der Bentonithülsen müssen neue Technologien entwickelt werden. Denkbar ist die Produktion aus kalt gepressten Bentonitringen.

Bei der Einlagerung in Strecken mit vermindertem Querschnitt 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. Nach dem Einlagern eines Overpacks wird die Einlagerungsstrecke aus Gründen des Strahlenschutzes mit einem temporären Stopfen verschlossen.

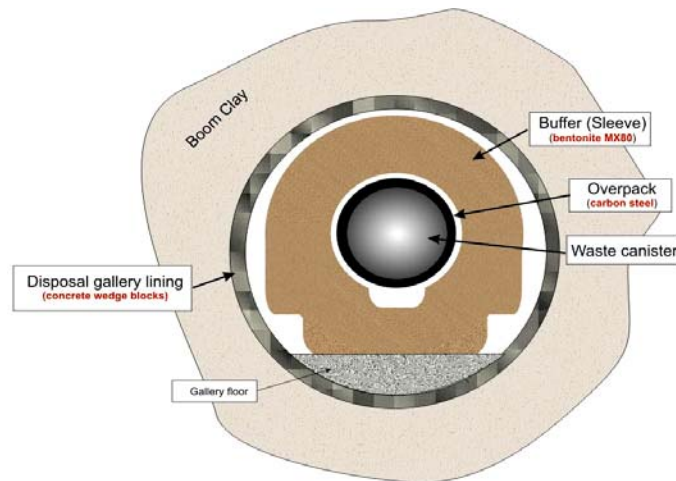


Abbildung 5-29: Einlagerung von Overpacks in Bentonithülsen (Sleeve design) – Belgien /5-6/

5.5 Schweiz

Das Schweizer Endlagerkonzept für den Opalinuston sieht die Endlagerung ausgedienter Brennelemente, verglaster hochaktiver Abfälle und langlebiger mittelaktiver Abfälle vor /3-20/. Der aus Stahl gefertigte Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente hat einen Durchmesser von 1,05 m und eine Länge von ca. 5 m (Abbildung 5-30). Er kann entweder vier DWR- oder neun SWR-Elemente aufnehmen. Der Endlagerbehälter für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle hat einen Durchmesser von 0,94 m und eine Länge von 2,0 m (Abbildung 5-31). Er kann eine Kokille mit verglastem Abfall aufnehmen.

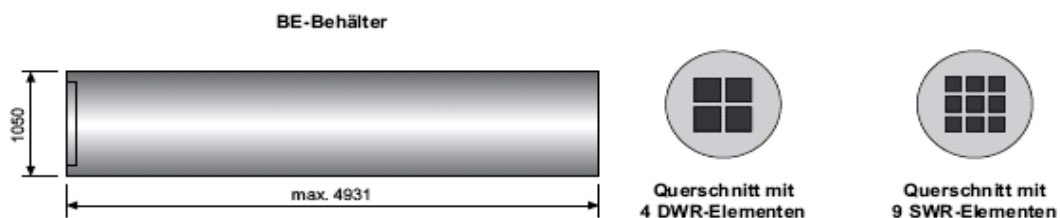


Abbildung 5-30: Links Außenansicht und rechts Querschnitte von BE-Behältern – Schweiz /3-20/

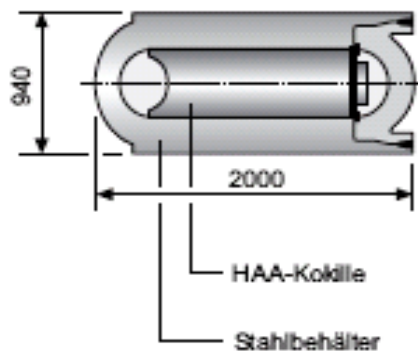


Abbildung 5-31: Behälter für hochaktive Abfälle – Schweiz /3-20/

Die Endlagerbehälter werden aus Strahlenschutzgründen in einen abgeschirmten Transportbehälter verladen und so innerbetrieblich weiter transportiert.

Die Endlagerbehälter werden liegend auf kompaktierten Bentonitblöcken in den Einlagerungsstollen mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern entlang der Stollenachse platziert. Die Auflager werden extern hergestellt und einsatzbereit angeliefert. Sie bestehen aus kompaktierten, gegenseitig verzahnten Bentonitblöcken und werden auf einer Bodenschale aus abgekantetem Lochblech zusammengestellt (Abbildung 5-32). Vor der letzten Bentonitschicht wird ein weiteres, an den Rändern auf- bzw. abgebogenes Lochblech eingelegt und mit dem anderen an vier Stellen verschraubt, so dass eine stabile Transporteinheit entsteht. Die Auflagerträger bestehen aus Stahl.

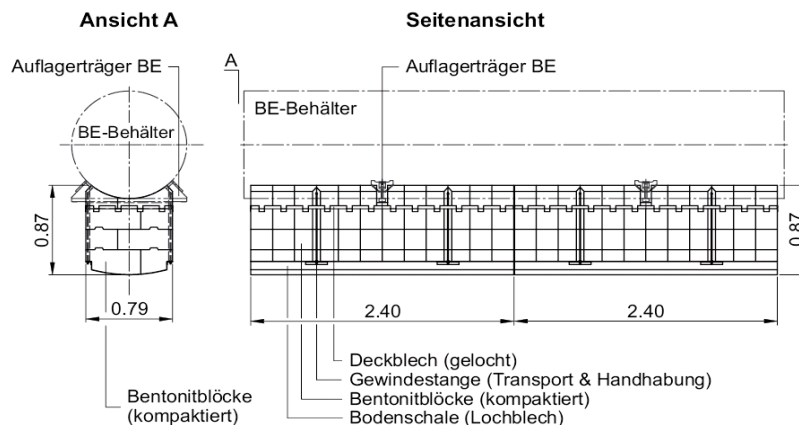


Abbildung 5-32: Bentonitaufleger mit Auflagerträger für einen BE-Behälter; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/

Für einen Brennelement-Behälter sind zwei Auflager mit je 2,4 m Länge, für einen Behälter für verglaste Abfälle ein Auflager mit 1,6 m Länge erforderlich. Beide Behältertypen benötigen je zwei Auflagerträger.

Der Transport von Abfallgebinden soll im Schweizer Endlagerkonzept grundsätzlich gleisgebunden und fernbedient erfolgen. Der ebenfalls gleisgebundene Materialtransport kann fernbedient oder manuell durchgeführt werden. Der Transport von den Tagesanlagen zu den untertägigen Einlagerungsorten erfolgt mit zwei Zahnradlokomotiven über eine Rampe mit 12,5 % Neigung (Abbildung 5-33). Die Zahnradstrecke wird für folgende Lasten ausgelegt:

- Normalbetrieb abwärts 84 t, Geschwindigkeit 18 km/h
 aufwärts 45 t, Geschwindigkeit 22 km/h
- Ausnahmebetrieb aufwärts 60 t, Geschwindigkeit reduziert.

Unter Ausnahmebetrieb wird der Rücktransport einlagerungsbereiter Abfallgebinde verstanden. Die Lokomotive wird aus Sicherheitsgründen immer talseitig angehängt.

Der untertägige Transport durch den beinahe horizontal verlaufenden Betriebstunnel wird von einer Stollenlokomotive durchgeführt (Abbildung 5-34).



Abbildung 5-33: Zahnradlokomotive in Doppeltraktion – Schweiz /3-20/



Abbildung 5-34: Stollenlokomotive – Schweiz /3-20/

Zahnrad- und Stollenlokomotive arbeiten im Verbundbetrieb, wobei die Stromversorgung sowohl durch Stromeinspeisung über eine Stromschiene als auch über einen eingebauten Akkumulator, der bei Abwärtsfahrten durch Energierückgewinnung weitgehend wieder aufgeladen wird, erfolgen kann. Auf der Rampe, im Betriebszugang und im Betriebstunnel erfolgt die Energieversorgung durch eine Stromschiene. Im zentralen Bereich, am Abzweig und der Schleuse für die Einlagerungsbereiche für ausgediente Brennelemente und verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle sowie am Abzweig und der Umladestation für die langlebigen mittelradioaktiven Abfälle wird mit Akku gefahren.

Für Rangierarbeiten im Bereich der Abzweigungen und der Schleuse wird eine manuell gefahrene Akkulokomotive (Abbildung 5-35) eingesetzt.



Abbildung 5-35: Akkulokomotive für Rangierarbeiten – Schweiz /3-20/

Die Vorgänge für das Einlagern der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen und verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen sind im Prinzip gleich /3-20/. Unterschiede ergeben sich nur durch die Abmessungen und Gewichte der Behälter.

Der Umladebereich vor den Einlagerungsstrecken verfügt über zwei Gleise und ist mit zwei Schleusentoren versehen. Auf dem Gleis B (Abbildung 5-36) befindet sich zu Beginn des Umladevorgangs der Hydraulikwagen und das Umsetzgerät. Auf dem Gleis A (Ansicht A) wird der Einlagerungstrolley mit der Windenlokomotive bis auf die Höhe des Umsetzgerätes in die Schleuse eingefahren. Die Halterungen für die Bentonitaufleger werden eingehängt und manuell befestigt.

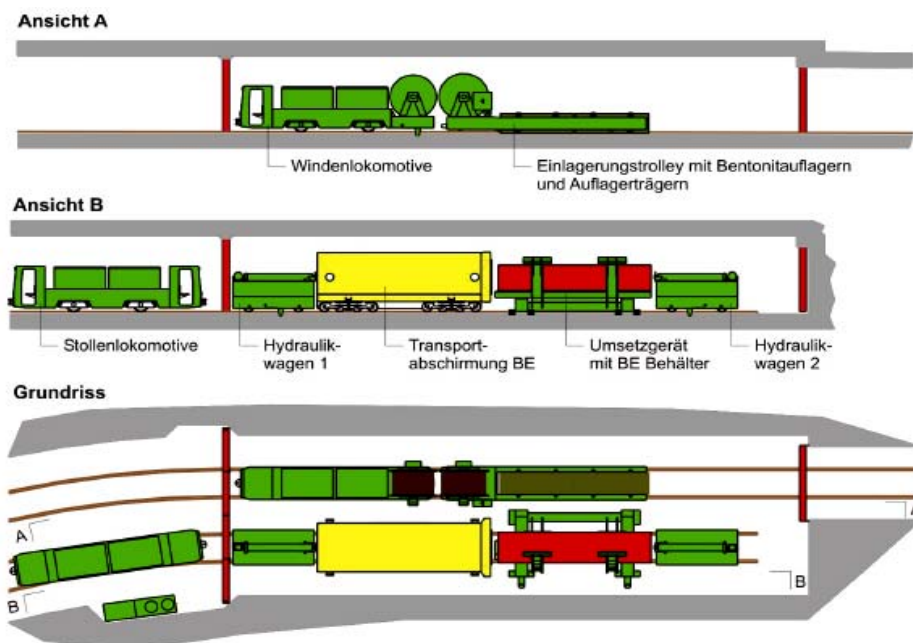


Abbildung 5-36: Situation in der Schleuse des Einlagerungsbereiches bei der Anlieferung von Endlagerbehältern – Schweiz /3-20/

Der Plattformwagen mit den Bentonitauflagern und Auflagerträgern wird mit der Akkulokomotive auf Gleis B ebenfalls bis zum Umsetzgerät gebracht. Hier werden die Auflager mit dem am Plattformwagen montierten Ladekran in den Einlagerungstrolley gehoben. Der Plattformwagen wird aus der Schleuse herausgefahren und die Windenlok schiebt den Einlagerungstrolley in die Beladeposition neben dem Umsetzgerät.

Mit der Stollenlokomotive wird ein Wagen mit einem BE-Behälter vom zentralen Bereich herangefahren und vor dem Einbiegen in die Abzweigung ein Hydraulikwagen zwischenhängt. Diese Konstellation wird auf Gleis B in die Schleuse gebracht und mit dem Umsetzgerät verbunden. Die Stollenlok wird abgekoppelt und aus der Schleuse gefahren. Sämtliche Strom- und Hydraulikverbindungen werden hergestellt und auf ihre Funktion hin überprüft.

Nachdem die Sicherungsbolzen vom Verschluss der Transportabschirmung entfernt wurden und die Betriebspersonen die Schleuse verlassen haben, laufen die nächsten Schritte fernbedient ab.

Die Transportabschirmung wird geöffnet und der Endlagerbehälter mit Hilfe des Hydraulikzylinders des Hydraulikwagens auf das Umsetzgerät geschoben.

Der Endlagerbehälter wird dann mit dem hydraulischen Umsetzgerät auf die Auflagerträger des Einlagerungstrolleys gehoben. Der Einlagerungstrolley transportiert den Endlagerbehälter in die Einlagerungsstrecke, wobei die Fortbewegung im horizontalen Teil über einen eigenen Elektroantrieb, im geneigten Teil gravitativ, gesichert durch die Winde, erfolgt. Der Behälter und das Bentonitauflager werden nach Erreichen der Lagerposition abgesetzt und der Trolley mit der Winde aus der Strecke gezogen.

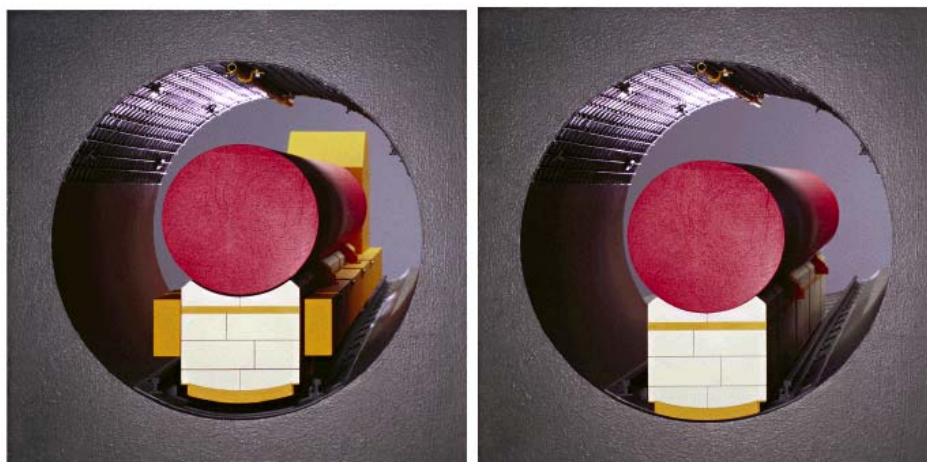


Abbildung 5-37: Einfahren eines Endlagerbehälters mit Bentonitauflager: Einfahren im Bild links; bereit zum Einbringen der Verfüllung (Bentonitgranulat) im Bild rechts (Modellfoto) – Schweiz /3-20/

Nach Ankunft des Trolleys in der Schleuse werden die Halterungen der Bentonitauflager manuell entfernt und der Trolley mit der Windenlokomotive in eine Abstellposition im Betriebstunnel gefahren.

Die technischen Planungen für die gemäß Einlagerungsablauf erforderlichen Komponenten befinden sich im Konzeptstadium.

Beim Hydraulikwagen handelt es sich um ein leichtes Fahrgestell, auf das ein horizontal und teleskopartig ausfahrbarer Hydraulikzylinder montiert ist (Abbildung 5-38).

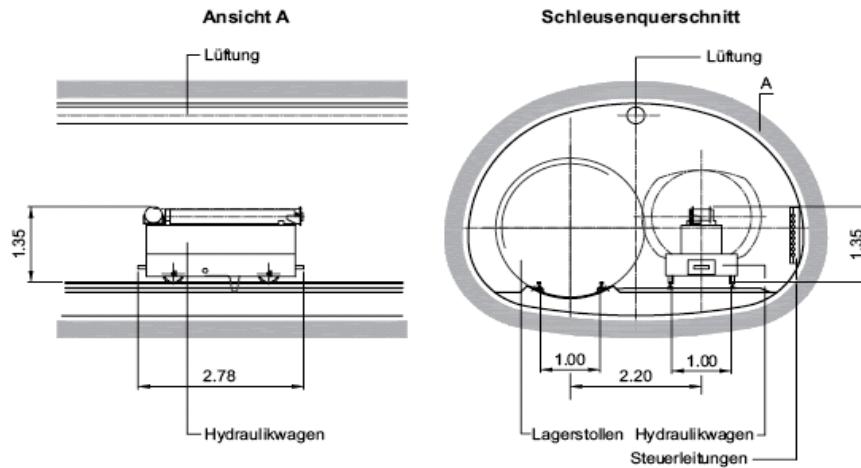


Abbildung 5-38: Längs- und Querschnitt durch den Hydraulikwagen, Abmessungen in m – Schweiz /3-20/

Das Umsetzgerät besteht aus einem konkav geformten, kräftigen Unterbau zur Aufnahme des Behälters (Abbildung 5-39). Er ist mit zwei hydraulischen Greifern versehen, mit denen die bis ca. 30 t schweren Behälter sicher und präzise auf den Einlagerungstrolley umgesetzt werden können.

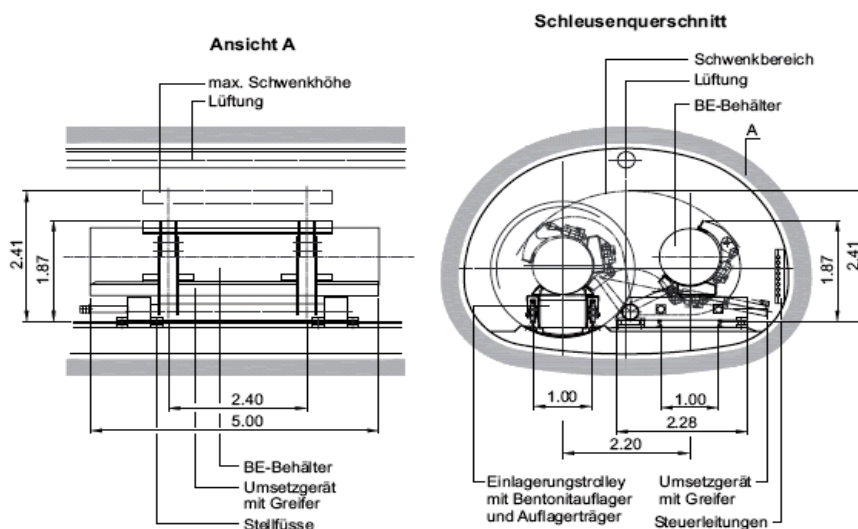


Abbildung 5-39: Umsetzgerät für HAW/BE-Endlagerbehälter in der Schleuse; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/

Der Einlagerungstrolley ist ein Gerät aus zwei über den Schienen laufenden Hohlprofilen, die die Radsätze enthalten und die auf der Seite des Antriebes und der Kabelrolle torsionssteif

verbunden sind (Abbildung 5-40). Auf der gegenüber liegenden Seite und zwischen den Hohlträgern ist der Trolley offen. Er besitzt einen eigenen elektrischen Fahrtrieb und kann gegenüber der Schiene um mehrere Zentimeter angehoben und ebenso abgesenkt werden. Um die Bentonitaufleger tragen zu können, sind auf den Trägerinnenseiten entsprechende Abkantbleche vorhanden, die vor Rangiermanövern im Anschlussstollen entfernt werden. Zur direkten Lasteinleitung in die kräftigen Längsträger und dadurch unmittelbar in die Räder und Schienen werden die Abfallbehälter von zwei Auflagerträgern auf dem Trolley gehalten. Über die Kabelrolle wird der Trolley mit der erforderlichen elektrischen Energie und den nötigen Steuersignalen versorgt.

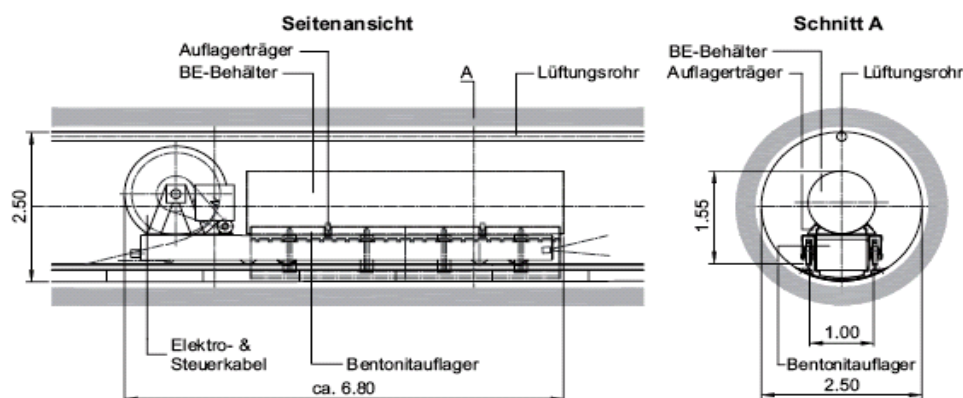


Abbildung 5-40: Seitenansicht und Schnitt durch eine Einlagerungsstrecke mit Einlagerungstrolley; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/

Die Winde, mit der der Einlagerungstrolley und der Verfüllwagen während des Einfahrens in die Einlagerungsstrecke gesichert und herausgezogen werden, ist auf eine akkubetriebene Stollenlokomotive, die sog. Windenlokomotive, montiert (Abbildung 5-41).

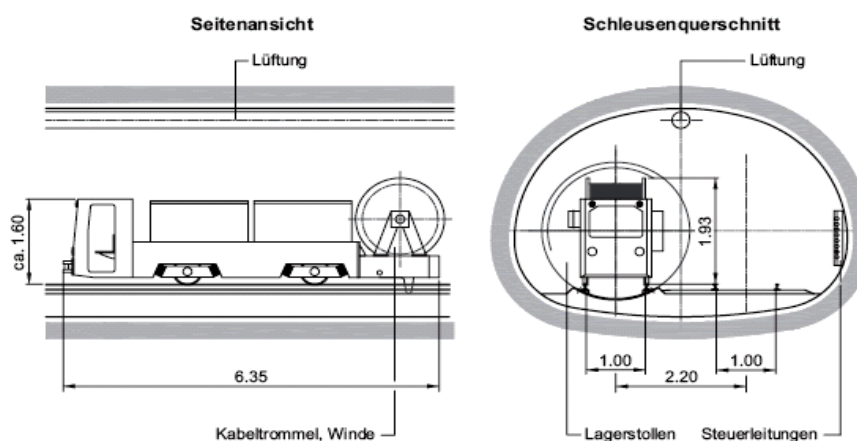


Abbildung 5-41: Seitenansicht und Schnitt durch den Schleusenbereich einer Einlagerungsstrecke mit Windenlokomotive; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/

5.6 Deutschland

Das deutsche Konzept für die Endlagerung mittel- und hochaktiver Abfälle im Salz sieht die Verwendung von 8 Typen von Endlagergebinden vor /2-30/:

verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle:	HAW-Kokille und CSD-B
Hülsen- und Strukturteile:	CSD-C
Ausgediente Brennelemente:	POLLUX, BSK
Brennelemente aus Forschungsreaktoren:	CASTOR AVR/THTR, MTR2, KNK

Während die HAW-Kokille, CSD-B, CSD-C und BSK als nicht abgeschirmte Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung vorgesehen sind (Abbildung 5-42), ist der abgeschirmte POLLUX-Behälter für die Streckenlagerung gedacht. Für die CASTOR-Behälter wurde noch kein Einlagerungskonzept entwickelt.

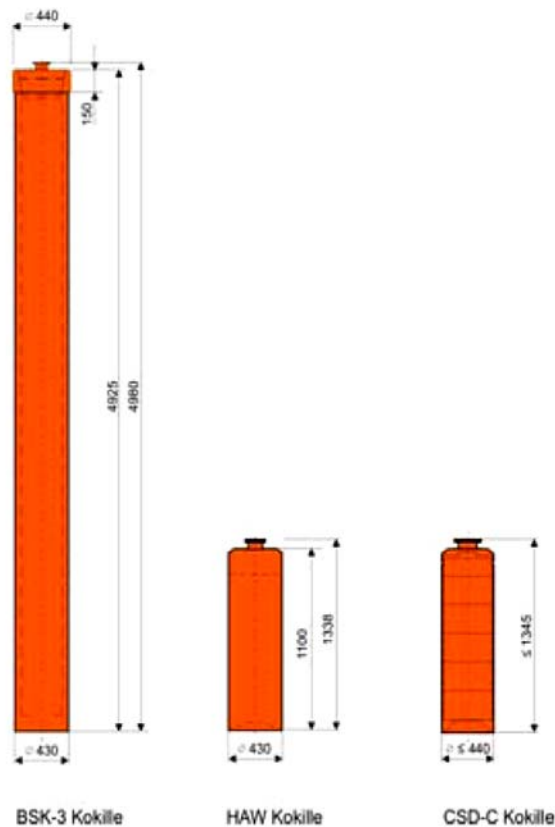


Abbildung 5-42: Nicht abgeschirmte Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung in Salz – Deutschland

Das Referenzkonzept für die Endlagerung in Salz sieht die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen in POLLUX-Behältern und die Lagerung von HAW-Kokillen in 300 m tiefen Bohrlöchern vor /2-29/. Aktualisierungen dieses Konzeptes berücksichtigen auch wei-

tere Behältertypen /2-30/. Die technische Machbarkeit dieses Konzeptes wurde durch zahlreiche Demonstrationsversuche nachgewiesen.

Die Anlieferung der Abfallbinde zum Endlager soll in Transporteinheiten per Bahn bzw. per Lkw erfolgen. In der Umladeanlage werden die ausgedienten Brennelemente aus dem CASTOR-Behälter in POLLUX-Behälter bzw. in BSK 3 und anschließend in den abgeschirmten Transferbehälter umgeladen. Die CASTOR-Behälter mit Brennelementen aus den Forschungsreaktoren werden vermutlich direkt endgelagert. Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung werden zum Transport in abgeschirmte Transferbehälter umgeladen.

Vom Transferbehälter für eine BSK 3 wurde ein Prototyp gebaut und im Zuge von Demonstrationsversuchen erprobt /3-34/ (Abbildung 5-43). Der 5,2 m lange und 45 t schwere, zylindrische Behälterkörper besteht aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Die Wanddicke und der Wandaufbau sind entsprechend den verkehrsrechtlichen Anforderungen an Typ B(U)-Behälter im Hinblick auf die mechanische Festigkeit (Fallversuche), die Feuerfestigkeit (Brandtests) sowie die Gamma- und Neutronenabschirmung ausgelegt /5-7/, /5-8/. In der Behälterwand befinden sich zwei Bohrungsreihen auf unterschiedlichen Teilkreisen, die mit Polyethylenstäben zur Neutronenmoderation gefüllt sind. Die Neutronenabschirmung im Boden- und Deckelbereich wird jeweils durch plattenförmig ausgebildete Neutronenmoderatoren gewährleistet. Der Behälterkörper schließt kopf- und fußseitig mit Behälterschleusen ab. Die Schleusenkörper sind in Edelstahl ausgeführt und mit dem Behälterkörper verschraubt. Die Flachschieber der Behälterschleusen sind in geschlossener Stellung durch zwei in den Seitenwänden eingelassene Verriegelungsbolzen gesichert /3-34/. Der Transferbehälter hat keine eigenen Stelleinheiten zum Entriegeln und Betätigen der Flachschieber. Öffnungs- und Schließvorgänge des Behälters werden bodenseitig mit Stelleinheiten der Bohrlochschleuse und deckelseitig mit denen der Einlagerungsvorrichtung (Abschirmhaube) ausgeführt. Dazu werden die Öffnungsbolzen der Bohrlochschleuse und der Stelleinheit der Abschirmhaube bei den Aufsetzvorgängen in entsprechende Öffnungen der Flachschieber eingeführt und entriegeln diese. Fußseitig sind die Öffnungsbolzen der Bohrlochschleuse Teil des Bohrlochschiebers und kopfseitig Teil der Abschirmhaube. Mit dem Öffnen des Bohrloches und der Abschirmhaube erfolgt gleichzeitig das Öffnen des Transferbehälters. Zu seiner Handhabung besitzt der Transferbehälter vier zylinderförmige Tragzapfen.

Innerbetriebliche Transporte der Endlager- bzw. Transferbehälter sollen über- und untertage mit unterschiedlichen Plateauwagen durchgeführt werden.

Der Plateauwagen für den Transferbehälter für BSK 3 wurde im Rahmen des aktuellen FuE-Vorhabens zur Demonstration der Bohrlochlagerung entwickelt, gebaut sowie im Zuge von Demonstrationsversuchen erprobt /3-34/. Der Plateauwagen wird vierachsig ausgeführt und erhält zur Fortbewegung durch stationär installierte Flurfördereinrichtungen unten in Rahmenmitte eine Mitnahmevorrichtung und für den Einsatz eines Zugfahrzeuges jeweils stirnseitig eine Kupplung.



Abbildung 5-43: Plateauwagen mit Transferbehälter für BSK 3 – Deutschland

Der Transferbehälter für HAW-Kokillen und CSD-C wird, abgesehen von der Länge (ca. 2 m), in der Konzeption dem Transferbehälter für den Transport der Brennstabkokille (BSK) entsprechen. Zur Zeit wird im Rahmen des FuE-Vorhabens „DENKMAL“ ein entsprechender Transferbehälter geplant und gefertigt /2-30/ (Abbildung 5-44). Auch der zum Transport erforderliche zweiachsige Plateauwagen existiert z.Z. nur im Konzept.

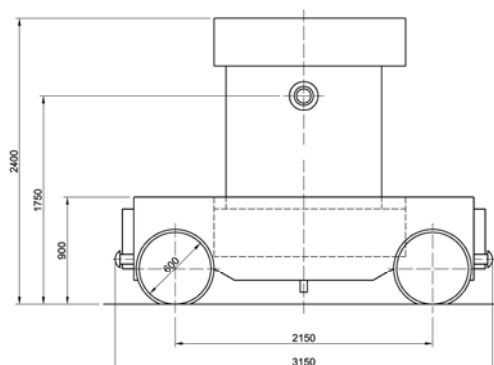


Abbildung 5-44: Plateauwagen mit Transferbehälter für HAW-Kokillen und CSD-C – Deutschland /2-30/

Der abgeschirmte POLLUX-Behälter wurde zur Endlagerung von ausgedienten Brennelementen entwickelt, ein Prototyp wurde gebaut und im Versuch erprobt. Der POLLUX-Behälter kann die Brennstäbe von bis zu 10 DWR- oder bis zu 30 SWR-Brennelementen aufnehmen (Abbildung 5-45). Er verfügt über einen Innenbehälter aus Feinbaustahl, der die Büchsen mit den Brennstäben aufnimmt und mit einem verschraubten Primär- und einem verschweißten Sekundärdeckel verschlossen ist. Ein äußerer Abschirmbehälter aus Gusseisen bewirkt eine zusätzliche Reduzierung der Gamma- und der Neutronendosisleistung. Weiterhin genügt der Behälter im Hinblick auf seine mechanische Stabilität den verkehrrechtlichen Anforderungen an einen Typ B(U)-Behälter.

Der POLLUX-Behälter hat einen Durchmesser von etwa 1,50 m, eine Länge von 5,50 m und im beladenen Zustand ein Gewicht von ca. 65 t.

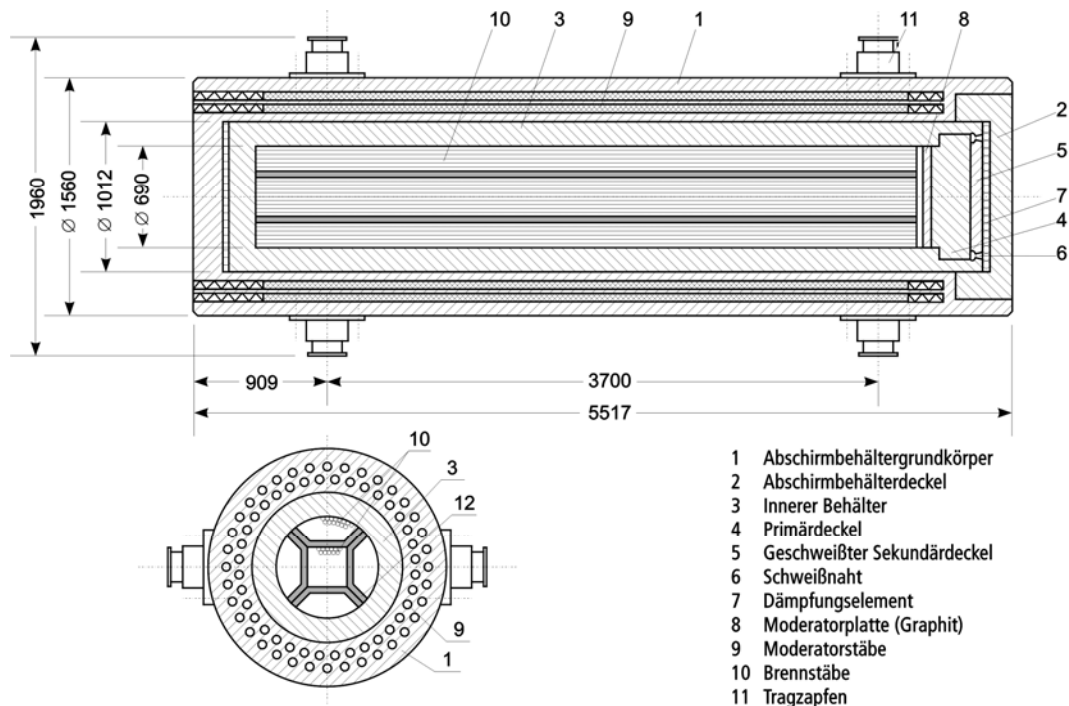
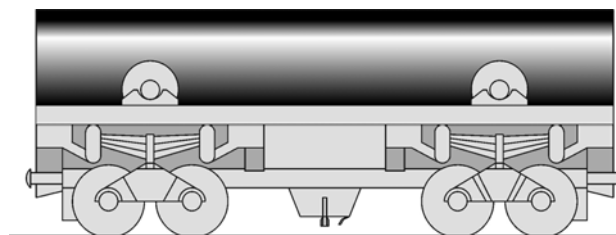


Abbildung 5-45: Endlagerbehälter POLLUX für ausgediente Brennelemente – Deutschland /2-30/

Für den innerbetrieblichen Transport des POLLUX-Behälters wurde im Rahmen von Demonstrationsversuchen in den 90er Jahren ein Plateauwagen gebaut und erprobt /5-9/ (Abbildung 5-46). Dieser Wagen verfügt über ein spezielles Laufwerk, das bei Niederflurwagen der Deutschen Bundesbahn angewandt wird und den Lastschwerpunkt um ca. 40 cm senkt.



max. Masse des Plateauwagens	20 t
max. Masse des Behälters	65 t
max. Masse der Transporteinheit	85 t
max. Länge	6300 mm
max. Breite	2000 mm
Höhe mit Behälter	2500 mm

Abbildung 5-46: Maße und Gewichte des Plateauwagens mit POLLUX-Behälter – Deutschland /5-9/

Da der Transport der Transporteinheiten nach Untertage mit der Schachtförderanlage erfolgen soll und der Schachttransport von Gewichten von bis zu 85 t (Plateauwagen mit POLLUX-Behälter) zum damaligen Zeitpunkt noch nicht Stand der Technik war, musste der Nachweis der technischen Machbarkeit durch einen Demonstrationsversuch geführt werden /5-9/. Hierfür wurde unter Berücksichtigung weiterer endlagerrelevanter Anforderungen eine Achtseil-Schachtförderanlage mit Gegengewicht entwickelt. Der Förderkorb wurde mit einem beweglichen, absetzbaren Zwischenboden ausgestattet und zusätzliche Arretierungen für das Be- und Entladen des Förderkorbboden vorgesehen. Eine Analyse bestehender Anlagen zeigte, dass bis auf wenige Komponenten der Stand der Technik für eine entsprechende Schachtförderanlage verfügbar war. Für die verbleibenden Komponenten wurde eine Demonstrationsversuchsanlage entwickelt, um für diese den Stand der Technik zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde eine Versuchsanlage im Maßstab 1:1 aufgebaut (Abbildung 5-47). Nach 2000 Zyklen des Be- und Entladens des Förderkorbes sowie des Anhebens und Aufsetzens des Förderkorbes mit Nutzlast wurde der Nachweis des Standes von Wissenschaft und Technik erbracht. Darüber hinaus wurde während der Demonstrationsversuche auch die Zuverlässigkeit des zerstörungsfreien Bremssystems für die Beherrschung des schweren Übertreibens des Förderkorbes nachgewiesen.

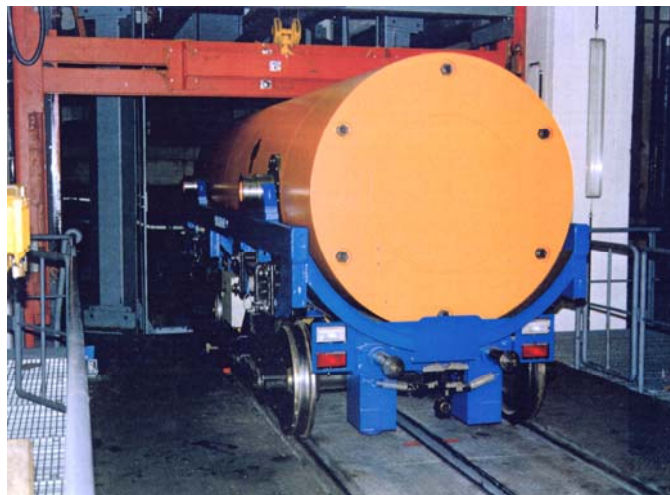


Abbildung 5-47: Demonstrationsversuch zum Schachttransport von POLLUX-Behältern – Deutschland

Den Transport der Plateauwagen zwischen Schacht und Einlagerungsfeld übernehmen batteriegetriebene Lokomotiven wie sie auch im Gewinnungsbergbau eingesetzt werden.

Der sichere Transport und die Einlagerung von POLLUX-Behältern in horizontalen Strecken des Endlagerbergwerkes wurden in einem zweiten Demonstrationsversuch gezeigt. Zum Abheben der Behälter vom Plateauwagen und zum Ablage in der Strecke wurde eine elektrisch betriebene Einlagerungsvorrichtung neu entwickelt, die auf dem Prinzip eines Portalkrans basiert (Abbildung 5-48). Die Einlagerungsvorrichtung kann mit Hilfe eines Plateauwagens an die jeweils geforderte Position in der Einlagerungsstrecke transportiert werden. Das System hat seine Zuverlässigkeit und technische Einsatzreife nach ca. 2000 Einlagerungs- und Rückholvorgängen im Versuch bewiesen. Nach Abschluss der Einlagerung wird der Resthohlraum der Einlagerungsstrecke mit Salzgrus verfüllt. Das Verfüllen soll

mit einem Schleudertruck erfolgen, wobei dieser Arbeitsschritt ebenfalls in einem Versuch erprobt wurde (Abbildung 5-49).

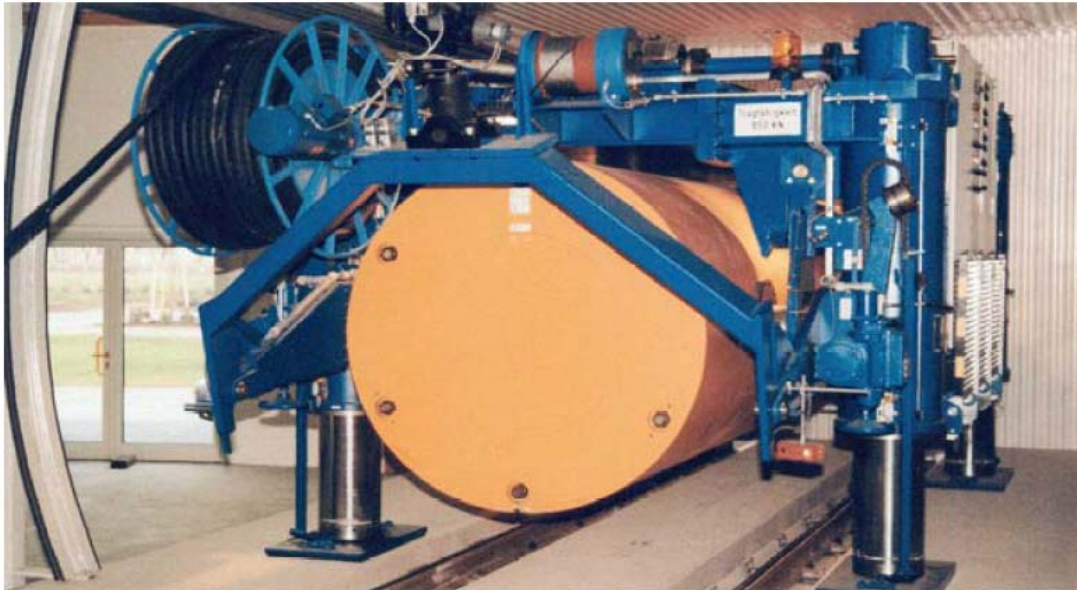


Abbildung 5-48: Einlagerungsmaschine für POLLUX-Behälter – Deutschland /5-9/



Abbildung 5-49: Streckenverfüllung mit einem Schleudertruck – Deutschland /5-9/

Die für den Einlagerungsvorgang von Endlagerbehältern in untertägige vertikale Bohrlöcher erforderliche Endlagertechnik wurde ebenfalls neu entwickelt, gebaut und z.Z. in Demonstrationsversuchen für BSK 3-Kokillen erprobt /3-34/. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Anwendbarkeit dieser Technik auch auf andere Behälter (HAW-, CSD-C- und CSD-B-Kokillen, Tripel-Pack) untersucht.

Die BSK 3-Kokille wird in einem Transferbehälter mit Plateauwagen zur Einlagerungsstrecke transportiert (Abbildung 5-43).

Die Einlagerungsstrecken werden in ihren Abmessungen der vorgesehenen Transport- und Einlagerungstechnik angepasst /2-30/ (vgl. Kap. 3.3.3.3). Zum Schwenken des Transferbe-

hälters in die Vertikalposition wird über dem Bohrloch in der Streckenfirste ein Ausbruch erstellt und der Bohrlochmund ist in einem 3 m tiefen Schachtkeller in der Streckensohle abgesenkt (Abbildung 2-14). Das Bohrloch wird aus Strahlenschutzgründen mit einer Bohrlochschleuse verschlossen, die nur geöffnet werden kann, wenn an die Schleuse ein Transferbehälter angedockt ist (Abbildung 3-37).

Über dem Bohrloch wird die Einlagerungsvorrichtung positioniert. Diese wird von einer Batterielokomotive mit Hilfe eines Plateauwagens von Bohrloch zu Bohrloch transportiert (Abbildung 5-50). Die Einlagerungsvorrichtung ist mit allen Handhabungseinrichtungen zur Übernahme des Transferbehälters vom Plateauwagen und zum Einlagern der BSK 3-Behälter in das Bohrloch ausgerüstet. Sie besteht aus fünf Hauptteilen:

- Hubportal
- Klapprahmen
- Schwenkwerk
- Kokillenhubwerk mit Abschirmhaube
- Steuerstand

Zur Übergabe des Transferbehälters fährt der Plateauwagen in das Hubportal der Einlagerungsvorrichtung in die Lastaufnahmeposition ein, woraufhin der Behälter von der Einlagerungsvorrichtung durch Einschwenken der beiden Klapprahmen übernommen wird (Abbildung 5-46). Mit dem Hubportal wird der Transferbehälter vom Plateauwagen abgehoben. Der Plateauwagen fährt aus der Einlagerungsvorrichtung und gibt diese frei. Danach senkt das Hubportal in die Stellung „Schwenken“ ab. Anschließend wird der Transferbehälter aufgerichtet (Abbildung 5-51). Mit einer weiteren Senkbewegung des Hubportals erfolgt das Einstellen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse. Im nächsten Schritt setzt die Abschirmhaube auf den Transferbehälter auf. Mit dem Absenkvorgang erfolgt eine mechanische Koppelung des Verschlussschiebers des Transferbehälters mit den Stellteilen des in der Abschirmhaube integrierten Stellenantriebs.



Abbildung 5-50: Versuchsstand Landesbergen mit der Einlagerungseinrichtung für die Bohrlochlagerung (blau, links) sowie die Grubenlok mit dem Transferbehälter auf einem Plateauwagen – Deutschland

Zum Entladen der BSK 3-Kokille aus dem Transferbehälter in das Bohrloch sind folgende Schritte erforderlich. Der Transferbehälter wird kopfseitig geöffnet und der Kokillengreifer schlägt an die Kokille an. Diese wird anschließend so weit angehoben, dass der bodenseitige Schieber des Transferbehälters unbelastet ist und Behälter und Bohrloch geöffnet werden können. Die Kokille wird in das Bohrloch bis zur endgültigen Lagerposition eingefahren, abgesetzt und der Greifer entriegelt. Nach dem Zurückfahren des Kokillengreifers in die Abschirmhaube wird das Bohrloch und beidseitig der Transferbehälter geschlossen.

Das Hubportal hebt dann den Transferbehälter von der Bohrlöschleuse und schwenkt ihn anschließend wieder in die waagrechte Position. Anschließend wird der Transferbehälter in die höchste Position gehoben, der Plateauwagen in das Hubportal gefahren und der Behälter übergeben. Mit dem Entriegeln und Abschwenken des Klapprahmens und der Freigebe zum Abtransport des entladenen Transferbehälters ist der Einlagerungsvorgang abgeschlossen.

Nach der Einlagerung einer Kokille wird mittels eines Behälters Salzgrus in das Bohrloch eingebracht, um den Ringraum zu verfüllen.



Abbildung 5-51: Demonstrationsversuch zur Bohrlochlagerung von BSK 3-Kokillen in Landesbergen
Links Drehen des Transferbehälters mittels Einlagerungsmaschine durch den Bohrlochkeller in eine vertikale Position, rechts Aufsetzen des Transferbehälters auf die Bohrlochschleuse. – Deutschland

Da die unteren Kokillen nicht dafür ausgelegt sind, das Gewicht der gesamten Säule zu tragen, werden zur Ableitung der Gewichtskräfte nach jeweils fünf Kokillen Stützelemente eingebaut, die entsprechend dem eingelagerten Behältertyp ausgelegt werden. Für BSK 3-Kokillen müssen die Stützelemente über eine Tragfähigkeit von ca. 26 t verfügen, für HAW- und CSD-C-Kokillen von ca. 5 t. Sofern diese Tragfähigkeit nicht zu realisieren ist, werden die Stützelemente nach einer geringeren Anzahl von Kokillen eingebaut.

Der Bereich oberhalb der letzten Kokille wird mit Salzgrus verfüllt, so dass ein Bohrlochstopfen von ca. 9 m Länge entsteht. Anschließend werden die Einbauten des Bohrlochkellers ausgebaut und dieser mit Salzbeton verfüllt.

6 Strahlenschutzmaßnahmen

Der Schutz von Mensch und Natur vor den Gefahren durch ionisierende Strahlen ist das Ziel der Endlagerung radioaktiver Stoffe. Während für die langzeitige Einhaltung des Schutzziels passiv-inhärente Maßnahmen zum Einschluss der Abfallstoffe erforderlich sind, müssen während des Endlagerbetriebs aktive Strahlenschutzmaßnahmen ergriffen werden, um die Bevölkerung und das Betriebspersonal zu schützen. Diese Strahlenschutzmaßnahmen sind unabhängig von der geologischen Formation, sondern richten sich nach den vorgesehenen Abfallinventaren und Transport- und Lagerbehältern sowie den im Endlager vorgesehenen Arbeitsabläufen, wie z. B. Umladung, Konditionierung, Pufferlagerung, Transport und Endlagerung. Der Schutz der Bevölkerung ergibt sich in erster Linie daraus, dass alle Arbeiten mit radioaktiven Stoffen in abgeschirmten Gebäuden stattfinden und dass die radioaktiven Stoffe zu jeder Zeit sicher eingeschlossen sind. Für die Strahlenexposition des Betriebspersonals ist entscheidend, wie die jeweiligen Betriebsabläufe gestaltet werden und in welcher Art und in welchem Umfang Abschirmmaßnahmen, Automatisierung und Fernbedienung eingesetzt werden.

Während die Sicherheitsprinzipien im Bereich der Kerntechnik und des Strahlenschutzes international einheitlich sind, erfolgen die Ausgestaltung der Genehmigungen und der Aufsicht für Endlager entsprechend den jeweiligen nationalen Gesetzgebung, der Behördenstrukturen und politisch-sozialer Strategien /6-1/. Dabei korrespondiert der jeweilige Entwicklungsstand der Gesetzgebung und der Behördenstrukturen mit dem entsprechenden Stand der nationalen Entsorgung der radioaktiven Abfälle. In der Europäischen Union wird eine Vereinheitlichung der Regelungen in diesem Bereich angestrebt. Zu diesem Zweck werden EURATOM-Richtlinien erlassen, die in das nationale Regelwerk zu übernehmen sind.

In Deutschland sind die wesentlichen Regelungen für den Strahlenschutz in kerntechnischen Anlagen einschließlich den Endlagern im Atomgesetz /6-2/, der Strahlenschutzverordnung /6-3/ und den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk /6-4/ formuliert. In den folgenden Ausführungen wird exemplarisch auf das deutsche Regelwerk Bezug genommen. Doch gibt es vergleichbare Regelungen und Strahlenschutzmaßnahmen für alle europäischen Länder. Daher sind die Grundlagen für die Strahlenschutzkonzepte für alle europäischen Endlagerkonzepte weitgehend identisch. Da die Entwicklung von Strahlenschutzkonzepten einen bereits sehr weit fortgeschrittenen Stand bei der Endlagerplanung erfordern, liegen nur von wenigen Ländern derartige Konzepte vor. Die vorliegenden Konzepte sind weitgehend identisch und unterscheiden sich nur im Detail bei Strahlenschutzmaßnahmen, die sich aus den jeweils verwendeten Behälter- und Gerätetypen sowie aus zusätzlichen Tätigkeiten, z. B. dem Umladen aus dem Transportbehälter in einen Endlagerbehälter oder in einen innerbetrieblichen Transferbehälter, ergeben. Die im folgenden dargestellten Strahlenschutzprinzipien des deutschen Endlagerkonzeptes sind auf alle Endlagerkonzepte adaptierbar.

Wesentliche Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen während des Endlagerbetriebs sind:

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

Strahlenschutzbereiche

Die Strahlenschutzverordnung /6-3/ fordert aufgrund der Direktstrahlung sowie möglichen Kontaminationen durch die Abfallgebinde eine Einteilung des Endlagers in die folgenden Strahlenschutzbereiche:

- Sperrbereiche,
- Kontrollbereiche und
- Überwachungsbereiche.

Sperrbereiche sind die Teile des Kontrollbereiches, in denen die Ortsdosisleistung höher als 2 mSv/h sein kann. Dies ist die Umladezelle (heiße Zelle) in der Umladehalle.

Kontrollbereiche sind die Bereiche, in denen die Möglichkeit besteht, dass Personen im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 6 mSv bei einem Aufenthalt von 40 Stunden je Woche und 50 Wochen im Kalenderjahr erhalten können (§ 36 StrlSchV). Die Möglichkeit der Strahlenexposition besteht überall dort, wo Abfallgebinde gehandhabt und gelagert werden. Alle diesen Bereichen lüftungstechnisch nachgeschalteten Räume werden ebenfalls zum Kontrollbereich erklärt.

Besteht die Gefahr, dass Personen im Kalenderjahr höhere effektive Dosen als den Grenzwert von 1 mSv erhalten, so sind diese Bereiche als Überwachungsbereiche festzulegen (§ 36 StrlSchV). Dazu gehören:

- Alle übertägigen Anlagen und Gebäudeteile auf dem Gelände des Einlagerungsschachtes, die nicht zum Kontrollbereich gehören.
- Alle untertägigen Anlagenteile, die nicht Bestandteil des Kontrollbereichs sind.

Außerhalb des Betriebsgeländes darf die durch Emissionen über Abluft oder Abwasser hervorgerufene Strahlenexposition 0,3 mSv//a und die effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung 1 mSv/a nicht überschreiten.

Gebindeeingangskontrolle des Strahlenschutzes

Die Gebindeeingangskontrolle wird vom Strahlenschutzpersonal durchgeführt und ist eine Vorsorgemaßnahme zum Schutz des Betriebspersonals, um sicherzustellen, dass die zulässigen Kontaminations- und Ortsdosisleistungsgrenzwerte bei der Annahme, Handhabung und Endlagerung der angelieferten Gebinde eingehalten werden. Gegebenenfalls wird eine Dekontamination der Behälter durchgeführt.

An den aus den Transportbehältern entladenen Endlagergebinden für die Bohrlochlagerung werden innerhalb der Umladezelle Wischtestproben genommen und zur Auswertung aus der Umladezelle ausgeschleust. Bei Überschreiten von innerbetrieblich festzulegenden Grenzwerten werden die Endlagergebinde vor ihrem Umladen in die innerbetrieblichen Transferbehälter dekontaminiert.

Kontaminationsüberwachung

Oberflächenkontaminationen sind dort möglich, wo Endlagergebinde umgelagert, gehandhabt, transportiert und eingelagert werden. Nicht festhaftende Oberflächenkontamination kann durch Luft oder Wetter in andere Bereiche verschleppt werden. Nach den Strahlenschutzgrundsätzen des § 6 StrlSchV ist jede unnötige Kontamination von Personen, Sachgütern oder der Umwelt zu vermeiden. Dies erfordert eine genaue Überwachung von Arbeitsflächen, die Verhinderung von Kontaminationsverschleppung und vorbeugende Maßnahmen im Umgang mit kontaminierten Gegenständen. Entsprechend dem Minimierungsgebot (§ 6 StrlSchV) sind Kontaminationen auch unterhalb der in § 44 StrlSchV festgesetzten Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.

Bei der Überwachung von Oberflächen im Kontrollbereich werden Routineüberwachungen und Bedarfsüberwachungen durchgeführt.

Die Routineüberwachung erfolgt im Kontrollbereich in zeitlich festgelegten oder durch den betrieblichen Ablauf im Endlager festgelegten Kontrollintervallen. Die Bedarfsüberwachung wird in zeitlich nicht festgelegten Intervallen durchgeführt. Die Messungen werden angefordert (z. B. bei Wartungs-, Reparatur und Umrüstarbeiten) oder sie werden vom Strahlenschutz angeordnet, sobald es Hinweise auf Kontaminationen aus den routinemäßig durchgeführten Messungen gibt. Personen, Transportfahrzeuge und Betriebsmittel und -stoffe, die den Kontrollbereich verlassen, werden auf Kontaminationen überprüft. Werden Kontaminationen, die über den festgelegten Grenzwerten liegen, festgestellt, so sind entsprechende Dekontaminierungs- und Entsorgungsmaßnahmen durchzuführen. Die Grenzwerte richten sich nach der Strahlenschutzverordnung /6-3/ und bei den Transportfahrzeugen und -behältern, die die Anlage verlassen, nach der Gefahrgutverordnung für Straße und Eisenbahn /6-6/. Fester betrieblicher Abfall, dessen Ausmessung zu aufwendig ist, wird als kontaminierter Abfall entsorgt. Flüssige Abfälle werden auf Aktivitätskonzentrationen überprüft und entsprechend behandelt.

Überwachung der Ortsdosis und Ortsdosisleistung

Die wesentliche Quelle der einlagerungsbedingten Strahlenexposition des Betriebspersonals ist die Direktstrahlung der Endlagergebinde, die sich aus Neutronen- und Gammastrahlung zusammensetzt. Ziele der Überwachungsmessungen sind:

- Ermittlung von Personendosen durch die amtlichen und nicht amtlichen, am Körper getragenen Dosimeter, sowie
- Erfassung der Strahlungsfelder, um Betriebsabläufe nach den Gesichtspunkten der Dosisminimierung zu gestalten. Hierzu werden an ausgewählten Punkten Ortsdosisleistungen und deren Zeitintegral, d. h. Ortsdosen, gemessen. Die Ergebnisse werden vom Strahlenschutzpersonal ausgewertet und dokumentiert.

Die gemischten Neutronen- und Gammastrahlungsfelder machen eine getrennte Überwachung der Neutronen- und Gammastrahlungsfelder mit unterschiedlichen Dosimetern erforderlich. Die Ortsdosisüberwachung erstreckt sich auf Teile des Kontroll- und Überwachungsbereiches. Die Standortauswahl der Dosimeter orientiert sich an folgenden Messzielen:

- Überwachung der Arbeitsbereiche des Betriebspersonals,
- Überwachung der Transportwege der Endlagergebinde innerhalb der Anlage,
- Vergleich der Ortsdosen mit gemessenen, zeitintegrierten Ortsdosisleistungen, und
- Überwachung als Vergleichsmöglichkeit mit der im Beweissicherungsprogramm ermittelten Grundbelastung.

Bei der Ortsdosisleistungsüberwachung unterscheidet man zwischen stationären Messungen und mobilen Bedarfsmessungen. Beide Messverfahren verfolgen unterschiedliche Aufgaben.

Die stationären Messungen werden kontinuierlich durchgeführt und ermöglichen eine ständige Überwachung des gewünschten Standortes. Sie dienen der Überwachung der Arbeitsbereiche des Betriebspersonals und der Überwachung der Transportwege der Endlagergebinde. Die dafür verwendeten Messgeräte verfügen über eine Messwertanzeige und dienen als Warngerät bei Überschreitung der eingestellten Warnschwellen. Die Messergebnisse können z. B. auch in einer zentralen Warte dargestellt und dokumentiert werden.

Bei Bedarfsmessungen an beliebigen Orten, die durch die stationären Anlagen nicht oder nicht ausreichend abgedeckt werden, werden vom Strahlenschutz tragbare, netzunabhängige Geräte für die Messung der Gamma- und Neutronenstrahlung bereitgehalten.

Überwachung der Raumluft und der Wetter

Das Ablösen und Aufwirbeln eventueller nicht festhaftender Kontaminationen an den Gebinden führt zu Luftkonzentrationen, die zwar sehr gering sind, aber doch über den Inhalationspfad zur Strahlenexposition beitragen können.

Die Verpackung der Brennstäbe in dicht verschweißten Endlagerbehältern gewährleistet, dass es im bestimmungsgemäßen Betrieb keine bedeutsamen Freisetzungen aus den Endlagergebinden gibt. Dennoch wird die Raumlufte auf den Transportwegen über- und untertage und in besonderen Bereichen (z. B. Einlagerungsbereich) überwacht. Die Überwachung erstreckt sich auf flüchtige Radionuklide wie Tritium, Kohlenstoff und Edelgase sowie auf aerosolgetragene radioaktive Stoffe, die mit Hilfe von mobilen Festfiltergeräten gesammelt und im Labor ausgemessen werden.

Personenüberwachung

Eine externe Strahlenexposition aus Neutronen- und Gammastrahlung ist bei der Handhabung der radioaktiven Abfälle nicht zu vermeiden. Die Höhe dieser Exposition ist abhängig von der Aufenthaltszeit in der Nähe der Gebinde, dem Abstand vom Gebinde und der radialen Dosisleistungsverteilung der jeweiligen Gebinde sowie eventuellen Streustrahlungsanteilen.

Bei allen im Kontrollbereich tätigen Personen wird die Personendosis mit amtlichen und zusätzlich mit betrieblichen Dosimetern bestimmt. Bei besonderen Arbeiten, z. B. in Gebindenähe bei erhöhter Ortsdosisleistung, können zusätzlich Alarm- und Teilkörperdosimeter verwendet werden.

Neben der Messung der Personendosis kann die durch externe Strahlenexposition verursachte Körperdosis aufgrund der Aufenthaltszeit von Personen in Bereichen mit bekannter Ortsdosisleistung abgeschätzt werden. Auf diese Weise können z. B. die Ergebnisse der Messung der Personendosis überprüft werden.

Eine regelmäßige Inkorporationskontrolle ist aufgrund der Bedingungen im Endlager (gasdicht verschweißte Endlagerbehälter) und der geschilderten Strahlenschutzmaßnahmen (Gebindeeingangskontrolle, Überwachung der Oberflächenkontamination an Arbeitsplätzen, Wetter- und Raumlufteüberwachung) nicht vorgesehen. Sollten Gründe für einen Inkorporationsverdacht vorliegen, so kann eine externe Untersuchung durchgeführt werden.

Da die Kontaminationsgefährdung als gering eingestuft wird, ist eine regelmäßige Kontaminationskontrolle des Personals nur an den Kontrollbereichsausgängen vorgesehen. Diese Kontrolle erfolgt mit Hand-Fuß-Kleidermonitoren oder mit Ganzkörperkontaminationsmonitoren.

Emissionsüberwachung

Da die Endlagerbehälter dicht verschweißt sind, ist während des bestimmungsgemäßen Betriebes mit keiner Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem Endlagerbehälter zu rechnen. Eine Freisetzung während des bestimmungsgemäßen Betriebes in der Umladehalle, auf dem Transportweg oder in der Einlagerungskammer ist daher nur möglich, wenn die Oberfläche des Endlager- oder Transportbehälters radioaktiv kontaminiert ist. Eine Oberflächenkontamination wird jedoch durch die Gebindeeingangskontrolle festgestellt und beseitigt.

Die ausziehenden Wetter werden entsprechend der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen überwacht /6-5//6-5/. Wegen der geringen zu erwartenden Konzentration scheidet direktanzeigende Überwachungsgeräte aus. Aus dem Abwetterstrom im Wetterkanal werden daher Proben entnommen und geeigneten Sammelgeräten zugeführt. Im Messraum befinden sich ein Jod-Sammler, ein H-3/C-14-Sammler, ein Festfiltergerät mit kontinuierlich betriebem Detektor und evtl. ein Kr-85-Monitor.

Die Abluft aus der Umladezelle wird über den Kamin abgeleitet. Auch hier ist beim normalen Betriebsablauf mit keiner Aktivitätsfreisetzung zu rechnen. Daher wird die Abluft auch nicht über Filter geleitet. Lediglich wenn nach einem Transportunfall der Verdacht besteht, dass der Behälter nicht mehr dicht ist, werden Filter in den Abluftweg geschaltet. Auch hier werden aus dem Abluftstrom Proben genommen und im Messraum analysiert.

Radionuklide im Abwasser könnten z. B. durch das Abwaschen von Oberflächenkontamination bei Dekontaminations- und Reinigungsarbeiten oder durch Labortätigkeiten auftreten. Die Abwässer aus dem Kontrollbereich über und untertage werden daher in Sammel tanks geleitet und dort ausgemessen. Bei Überschreiten der zulässigen Aktivitätskonzentration werden die Abwässer einer kerntechnischen Abwasserbehandlungsstation zugeführt. Eine eventuell erforderliche aufwendige Überwachung des Abwassers nach KTA 1540 ist abhängig von der Abwassermenge.

Immissionsüberwachung

Die Überwachung der Immissionen in der Umgebung des Endlagers ergänzt die Aktivitätsabgabenüberwachung. Sie wird vom Betreiber der Anlage außerhalb des Anlagenzaunes entsprechend der Vorschriften der REI /6-5/ durchgeführt.

Die Überwachung auf Direkt- oder Streustrahlung geschieht mit Hilfe von Thermolumineszenzdosimetern. Da sich die zu erwartenden Ortsdosen mit zunehmender Entfernung vom Schachtgelände sehr schnell reduzieren werden, genügt in Abhängigkeit von der Ortsdosis eventuell eine Überwachung des Anlagenzaunes des Endlagergeländes und der näheren Umgebung außerhalb des Anlagenzaunes.

Zur Überprüfung der über den Abluftpfad freigesetzten Radionuklide werden Aerosolproben der bodennahen Luft am ungünstigsten Aufpunkt genommen. Die Auswertung der Aerosolproben erfolgt gammaspektrometrisch. Wegen der geringen Aktivitätsfreisetzung über den Luftpfad genügt für die Aerosol-Probenahmefrequenz ein dreimonatiger Rhythmus mit 6x14-tägiger Sammelzeit pro Jahr. Bei besonderen Ereignissen kann die Probenahmefrequenz den Gegebenheiten angepasst werden oder es können mit Hilfe von mobilen Aerosolsammlern zusätzliche Aerosolproben genommen werden.

Luftgetragene Radioaktivität kann sich, vor allem wenn sie an Staub gebunden ist, durch trockene Ablagerung (fall-out) oder durch Niederschläge (wash-out bzw. snow-out) auf Boden oder Bewuchs ansammeln und dort zu einer Oberflächenkontamination führen. In Anlehnung an die Regelungen der REI /6-5/ werden zweimal jährlich Proben von Boden und

Bewuchs am ungünstigsten Einwirkungsort und an einer wenig beaufschlagten Referenzmessstelle genommen.

Zur Überwachung des Wasserpfades wird das Oberflächengewässer im Bereich des Vorfluters ausgemessen. Hierfür werden automatisch arbeitende Probennahmeeinrichtungen vor und hinter der Einleitstelle installiert.

7 Wettertechnik

Die erforderliche Wettertechnik eines Endlagers richtet sich im wesentlichen nach den klimatischen Verhältnissen an der Tagesoberfläche, dem Layout, der Größe und der Tiefenlage des Grubengebäudes sowie nach Art und Umfang der untertage eingesetzten Geräte und der Abfallströme der wärmentwickelnden Abfälle.

7.1 Frankreich

Die französische Endlagerplanung für Ton schließt das folgende Wetterkonzept ein /2-24/:

Primärer Wetterstrom durch Gebläse an der Oberfläche

Die Wetter werden mit Hilfe von Lüftern in den Personentransportschacht und in den Versorgungsschacht eingblasen und durch Ventilatoren am ausziehenden Wetterschacht abgesaugt. Diese Anordnung stellt einen ständigen Überdruck in den Wetterzuleitungen sicher.

Bewetterung im vollen Querschnitt und Abwetterführung in einer Lutte oder einer Abwetterstrecke

Die Frischwetter werden durch den vollen Querschnitt der Strecken geführt. In dieser Weise werden sowohl die mit dem Einlagerungsbereich verbundenen Strecken als auch die für Baumaßnahmen vorgesehenen Strecken mit Frischluft versorgt. Die Abwetterführung erfolgt durch Lutten an der Streckenfirste oder, wenn dies aufgrund der Höhe der eingesetzten Fahrzeuge nicht möglich ist, durch gesonderte Abwetterstrecken (Abbildung 7-1). Im Brandfall kann der Rauch über zahlreiche Klappen abgesaugt und abgeführt werden.

Die durch die einziehenden Schächte einströmende Frischluft wird in mehrere Wetterströme aufgeteilt. Die Strecken mit Einlagerungsaktivitäten besitzen eine eigene von den Baustrecken unabhängige Frischluftversorgung. Hierdurch gelangen Staub und Rauch, die durch die Bauarbeiten erzeugt werden, nicht in die Einlagerungsbereiche.

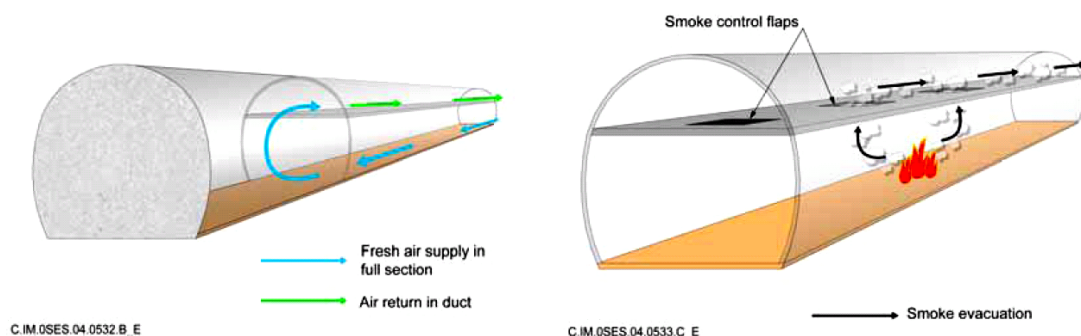


Abbildung 7-1: Bewetterung über die Strecke und Abführung der Wetter über einen Kanal an der Firste – Frankreich /2-24/

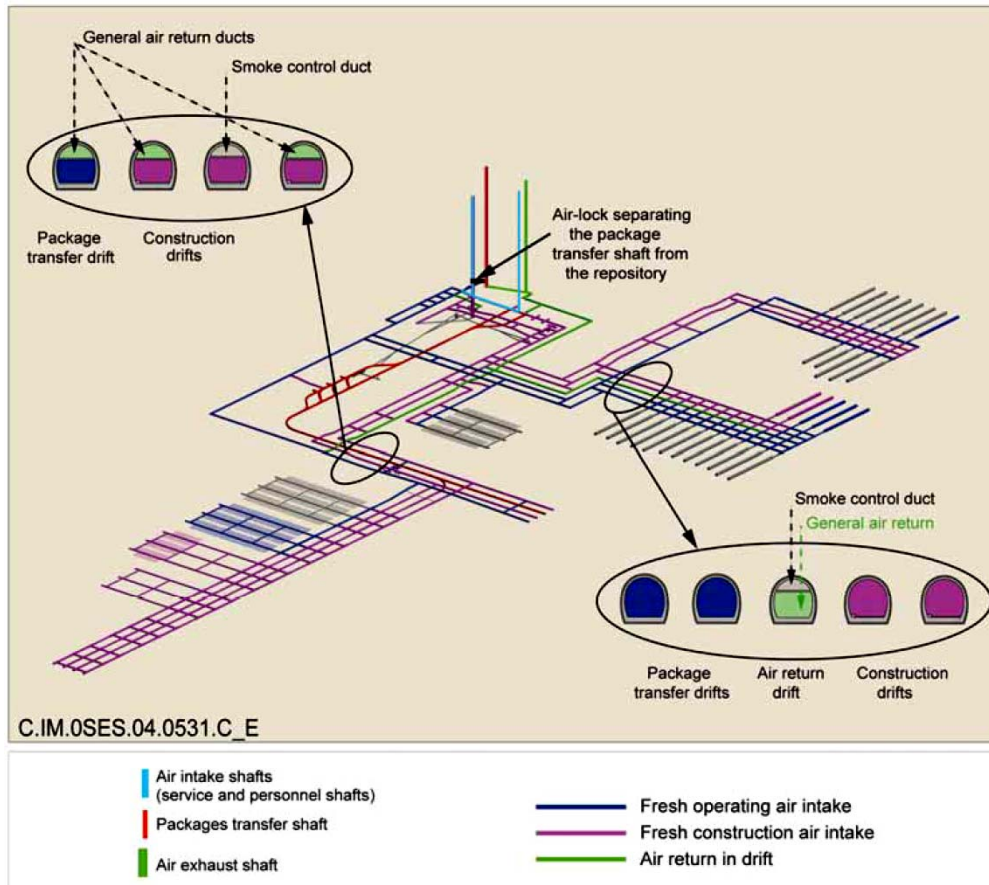


Abbildung 7-2: Wetterungsprinzip des französischen Endlagerkonzeptes – Frankreich /2-24/

Die Abwetter werden aus allen Bereichen in einem Wetterkanal gesammelt und zum ausziehenden Abluftschacht geführt (Abbildung 7-2).

Im Hinblick auf einen eventuellen Absturz radioaktiver Gebinde erhält der Einlagerungsschacht eine eigene Wetterversorgung. Er ist durch eine Schleuse vom restlichen Endlager betrennt.

Eine vorläufige Abschätzung der für den Endlagerbetrieb erforderlichen Wettermengen hat einen Bedarf von ca. 500 m³/s ergeben.

Bewetterung vom Einlagerungsbereichen

In den Einlagerungsbereichen werden die Abschnitte mit gefüllten oder z. Z. in Einlagerungsbetrieb befindlichen Kammern, mit im Bau befindlichen Kammern sowie die Abwetterstrecke durch Wetterbarrieren voneinander getrennt (Abbildung 7-3). Die Wettersperren können durch Wetterschleusen vom Personal passiert werden. In den Baubereichen wird die Abluft über Lutten zur Baustrecke zurückgeführt. In den in Betrieb befindlichen Bereichen strömt die Frischluft über den Streckenquerschnitt ein, während die Abluft über eine andere Strecke oder durch spezielle Kanäle zurückgeleitet wird. Die Abwetter werden durch den Abwetterkanal der Behältertransportstrecke abgeführt. Die Wettergeschwindigkeiten

werden so ausgelegt, dass sie in Bereichen, in denen sich Personal aufhält, 3 m/s nicht überschreiten und in den Abwetterstrecken und Lutten ca. 8 m/s bis 10 m/s betragen.

Die bereits gefüllten Einlagerungsbereiche werden weiterhin mit einer verminderten Rate von ca. 2 m³/s bewettert.

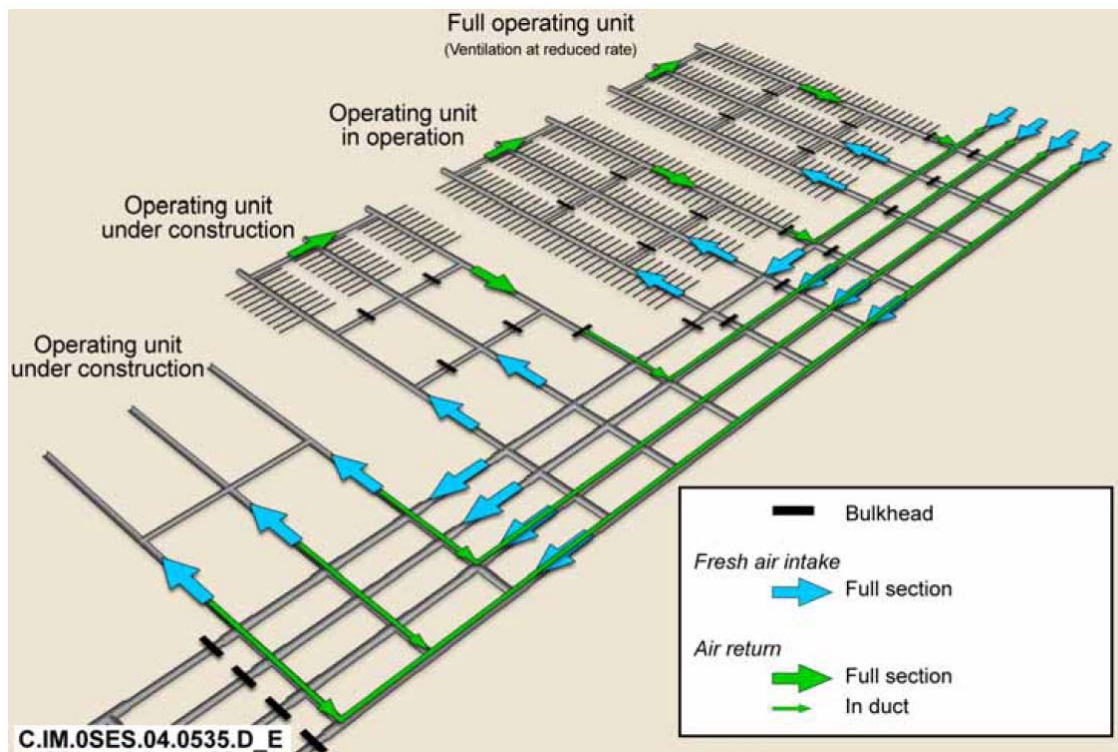


Abbildung 7-3: Bewetterung eines Einlagerungsbereiches für wärmeentwickelnde Abfälle, französisches Endlagerkonzept /2-24/

7.2 Schweiz

Die Bewetterung der untertägigen Anlagen des Schweizer Endlagerkonzepts für Ton beruht während des Einlagerungsbetriebs bzw. der Lagererweiterung auf folgenden Grundprinzipien /3-20/ (Abbildung 7-4):

- Die Bewetterungsanlage versorgt alle Lagerteile mit Frischluft, deren Zufuhr vom Lüftungsgebäude im Portalbereich durch den vollen Querschnitt der Rampe erfolgt. Verunreinigte oder erwärmte Luft wird vom Arbeitsort abgesaugt und über Tunnel / Stollen oder Lutten in den Lüftungsschacht und von dort an die Oberfläche gebracht.
- An ausgewählten Orten werden Ventilatoren, Luftverteiler, Rückschlag- und Brandschutzklappen sowie Filter eingebaut.
- Eine Druckstaffelung in den Anlagen untertage wird durch Absaugen der Luft an den Stollen- / Tunnelenden erreicht. Luft fließt somit immer über den vollen Querschnitt in die Lagertunnel und -stollen hinein sowie über Lüftungsrohre aus diesen heraus.

- Die Lüftung ist so konzipiert, dass dem unverkleideten Fels in den Lagerstollen für wärmeentwickelnde Abfälle nie Feuchtigkeit zugetragen, sondern immer Feuchtigkeit entzogen wird.
- Das Bewetterungskonzept wird unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse aus großen Brandfällen in Tunneln (Montblanc, Gotthard etc.) in ein entsprechendes Sicherheitskonzept eingebunden.

Unter Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen an der Oberfläche, der Stoßtemperaturen entlang der Rampe, den voraussichtlich untertage zu erwartenden Wärmequellen sowie der entsprechenden Richtlinie für Untertagearbeiten in feuchtwarmem Klima wurde eine benötigte Frischluftmenge von ca. 50.000 m³/h berechnet.

Die Untersuchungen zeigen ferner, dass die Luft vor dem Einblasen nach untertage weder im Winter vorgewärmt noch im Sommer vorgekühlt werden muss. In der Regel ist die zugeführte Luft in der Lage, Feuchtigkeit aus dem Fels bzw. der Betonauskleidung aufzunehmen. Temporäre Kondensation im oberen Bereich der Rampe ist nur bei Gewitterregen oder extremen Nebeltagen zu erwarten, falls die relative Luftfeuchtigkeit nahe 100 % liegt.

Aufgrund der relativ langen Rampe sind sowohl die täglichen als auch die jährlichen Temperaturschwankungen bereits im zentralen Bereich der Rampe kaum noch wahrnehmbar. Die Temperatur im zentralen Bereich wird aufgrund von Modellrechnungen bei ca. 24 °C erwartet.

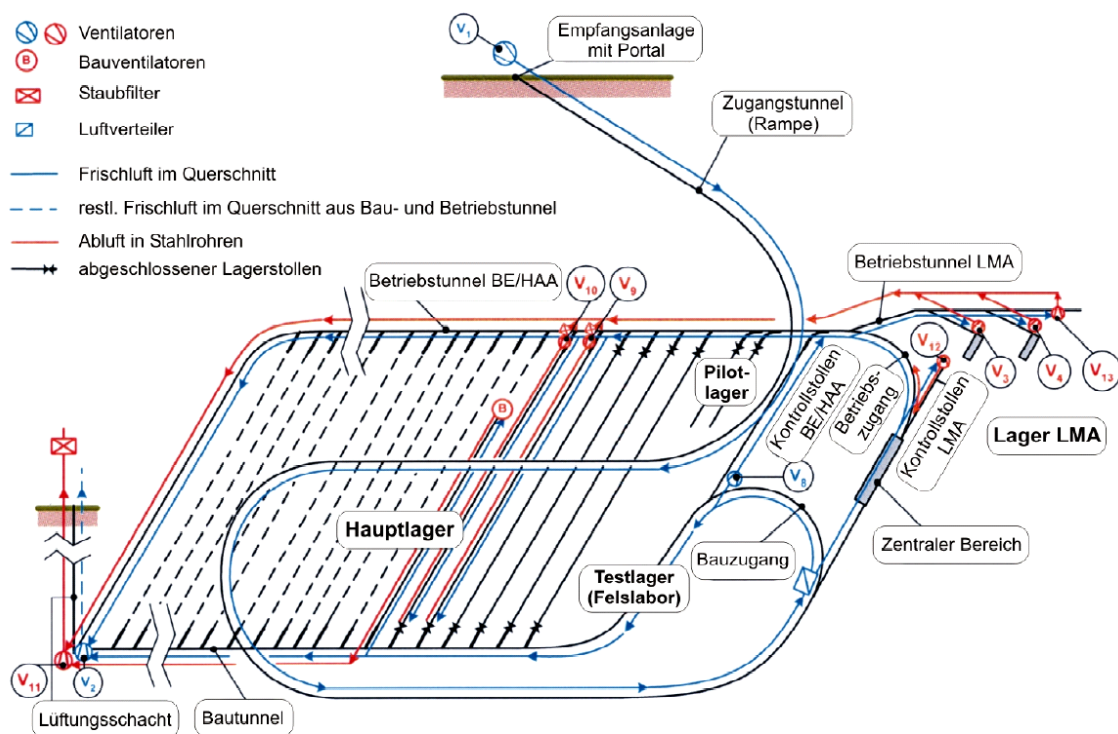


Abbildung 7-4: Bewetterungsschema für das geplante Endlager im Opalinuston – Schweiz /3-20/

Der Wetterstrom wird durch die Rampe bis zur Abzweigung Bau geleitet, wo er sich aufteilt (Abbildung 7-4):

- Ein Teil der Wetter fließt über den zentralen Bereich und den Betriebszugang in den Betriebstunnel, wo einerseits die Lagertunnel für nicht bis schwach wärmeentwickelnde Abfälle und andererseits die Einlagerungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle versorgt werden. An den Enden der Einlagerungsstrecken wird die Luft als Abluft abgesogen und über Lüftungsrohre durch die Betriebs- und Lüftungstunnel und den Schacht an die Oberfläche gebracht. Ein Teil des Luftstromes des Einlagerungsbereiches belüftet den verbleibenden Teil des Betriebstunnels und fließt im Vollquerschnitt durch den Lüftungstunnel und den Schacht zur Erdoberfläche.
- Der restliche Teil des Frischwetterstroms wird in den Bereich der Bauaktivität geleitet, wobei im Bereich des Bauzugangs ein geringer Teil zur Versorgung des Kontrollstollens für die Einlagerungsbereiche sowie des Testlagers (Felslabor) abgezweigt wird. Vom Bautunnel gelangt ein Teil der Frischluft zum Vortriebsbereich in den Lagerstollen wo sie als Abluft abgesogen und in Lüftungsrohren über den Schacht an die Oberfläche gebracht wird. Der andere Teil fließt im Bautunnel weiter zum Materialumschlag am Schachtfuß und von dort über den Schachtquerschnitt nach oben.

Die aus den Einlagerungsbereichen abgesogene Luft wird kontinuierlich radiologisch überwacht und beim Feststellen volatiler Nuklide automatisch über einem im By-Pass vorgesehenen Filter geführt.

7.3 Deutschland

Im deutschen Endlagerkonzept für Salz ist ein Schacht als einziehender und ein Schacht als ausziehender Wetterschacht vorgesehen /2-29/. Die ehemalige Erkundungssohle liegt 30 m oberhalb der Einlagerungssohle und kann als Abwettersohle genutzt werden. Der vorgesehene Wetterstrom beträgt ca. 15.300 m³/min, wobei für den Einlagerungs- und Auffahrungsbereich ca. 5.300 m³/min und für den Infrastrukturbereich ca. 10.000 m³/min bereitzustellen sind. Bei diesen Wettermengen treten im durchgehenden Wetterstrom Trockentemperaturen von bis zu ca. 48 °C auf. Dies begrenzt die tägliche Arbeitszeit der in diesen Bereichen tätigen Beschäftigten laut Arbeitschutzregelungen (Klima-Bergverordnung) auf 6,5 Stunden.

Zur Einhaltung einer strikten Trennung von Überwachungs- und Kontrollbereich ist es erforderlich, zwischen dem Kontrollbereich (Einlagerungsbereich) und dem Überwachungsbereich (Auffahrungsbereich) stets eine zum Kontrollbereich gerichtete Wetterströmung aufrecht zu erhalten oder zwischen diesen Bereichen eine wettertechnische Trennung durch ein Wetterbauwerk sicher zu stellen. Der Auffahr- und der Einlagerungsbereich können saugend oder blasend sonderbewettert werden.

Die Einlagerungsfelder werden vermutlich Einlagerungsstreckenlängen zwischen ca. 130 m und ca. 250 m aufweisen (vgl. Kap. 2.3). Die maximale Länge einer Luttenleitung mit 800 mm Durchmesser zur Bewetterung einer POLLUX-Einlagerungsstrecke liegt bei ca.

250 m. Daraus ergibt sich, dass bei den Einlagerungsfeldern für die Streckenlagerung mehr als ein Wetterbohrloch je Feld erforderlich ist, um die Abwetter über die Erkundungssohle zum ausziehenden Wetterschacht zu führen.

Für das in Kap. 2.3 dargestellte Grubengebäude gibt es verschiedene Bewetterungskonzepte, von denen im Folgenden zwei beschrieben werden sollen /2-29/. Sie gewährleisten während des normalen Betriebes die strikte Trennung zwischen Überwachungs- und Kontrollbereich. Bei hohen Außentemperaturen in Verbindung mit einem Ausfall des Hauptgrubenlüfters können sich evtl. Teilkreiswetterläufe entwickeln, in denen eine Richtungsumkehr der Wetter stattfinden kann. Untersuchungen hierzu müssen zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden.

Bei den Bewetterungskonzepten wurde zugrunde gelegt, dass der Transport der Einlagerungsgebilde über die nördliche Richtstrecke erfolgt, die somit zum Kontrollbereich gehört, während die südliche Richtstrecke den Transportweg des Überwachungsbereiches darstellt (Abbildung 2-12). Diese Zuordnung ergibt sich aus der Anbindung der Richtstrecken an die Schächte.

Das Bewetterungskonzept A nutzt die südliche Richtstrecke als Frischwetterzubringer und die nördliche Richtstrecke als Abwetterstrecke für Wetter aus der Auffahrung und aus der Einlagerung.

Die blinden Einlagerungstrecken werden blasend bewettert. Zwischen dem Auffahr- und dem Einlagerungsbetrieb verläuft der Übergang vom Überwachungs- zum Kontrollbereich. Dieser Übergang benötigt kein Wetterbauwerk, da die wettertechnische Trennung durch den am ausziehenden Wetterschacht angelegten Unterdruck (Hauptgrubenlüfter) stets aufrecht erhalten wird. Die Abwetter werden über die nördliche Richtstrecke zum Schacht geführt (Abbildung 7-5).

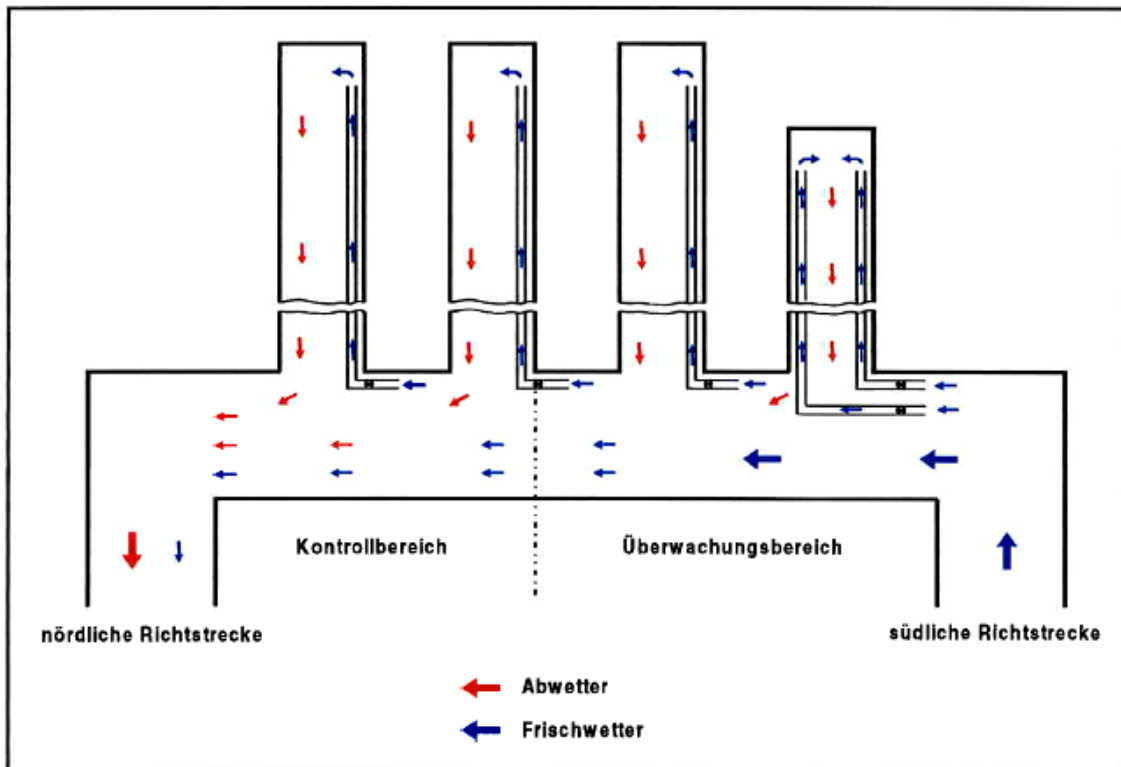


Abbildung 7-5: Bewetterungskonzept A für das Endlagerkonzept Gorleben – Deutschland /2-29/

In den Einlagerungsfeldern wird die Sonderbewetterung blasend durchgeführt. Bei der Streckenauffahrung im Überwachungsbereich erfolgt dies über zwei Lütten mit 1200 mm Durchmesser und jeweils einem Lüfter; im bereits aufgefahrenen Strecken über Lütten mit 600 mm Durchmesser und jeweils einem Lüfter.

Die Strecken des Kontrollbereiches werden über jeweils eine Spirallüttenleitung mit 800 mm Durchmesser, an die zwei Lüfter parallel angeschlossen werden, bewettert.

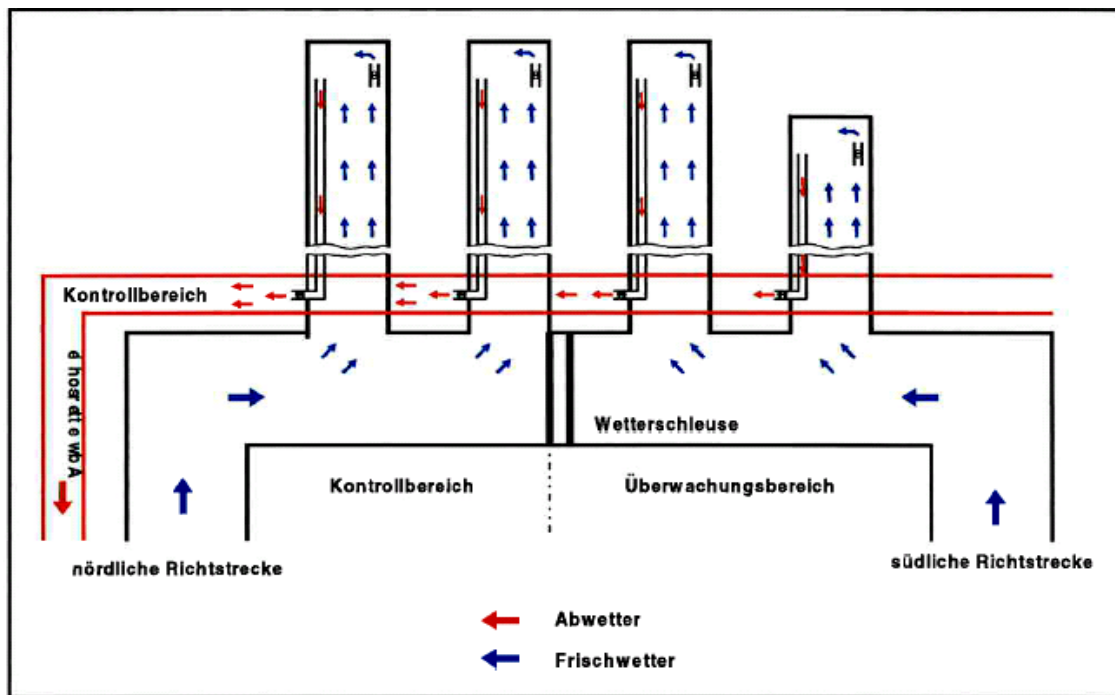


Abbildung 7-6: Bewetterungskonzept B für das Endlagerkonzept Gorleben – Deutschland /2-29/

Beim Bewetterungskonzept B dienen die südliche und nördliche Richtstrecke als Frischwetterzubringer und die Erkundungssohle als Abwetterstrecke /2-29/. Die sich in Auffahrung befindenden bzw. bereits aufgefahrenen Einlagerungsstrecken werden saugend bewettert. Die saugenden Luttentouren werden durch Wetterbohrlöcher mit ca. 1,4 m Durchmesser bis zur Abwettersohle (Erkundungssohle) geführt (Abbildung 7-6).

Die wettertechnische Trennung zwischen Auffahrungs- und Einlagerungsbetrieb erfolgt durch eine Wetterschleuse. Die Frischwetter für den Einlagerungsbereich werden über die nördliche Richtstrecke über Luttenleitungen in die Einlagerungsstrecken gesaugt. Die saugenden Luttentouren werden über ein Wetterbohrloch an die Abwettersohle angeschlossen. Die Wetterschleuse wird der Einlagerung folgend im Querschlag versetzt.

Die Lüfter sind auf der Abwettersohle an die Abwetterbohrlöcher angeschlossen und arbeiten im Saugbetrieb. Im Einlagerungsbetrieb treten bei dieser Betriebsweise zwei Bewetterungszustände der Einlagerungsstrecken auf. Im Versatzbetrieb beträgt die Wettermenge ca. 850 m³/min, während der Einlagerung und Befahrung ca. 150 m³/min.

Beim Auffahren treten wesentlich mehr Bewetterungszustände auf, so dass an die Bewetterungsanlagen besondere Anforderungen gestellt werden müssen.

In den Einlagerungsfeldern wird die Sonderbewetterung während der Auffahrung der Einlagerungsstrecken saugend über eine Blechluttenleitung mit 1400 mm Durchmesser und einem Lüfter durchgeführt. Bei der Bewetterung der bereits aufgefahrenen Einlagerungsstrecken des Überwachungsbereiches sind jeweils zwei parallel angeordnete Lüfter erforderlich, da die erforderlichen, unterschiedlichen Wettermengen nicht von einem Lüfter erbracht wer-

den können. Am Streckenende ist eine zusätzliche Lüftung vorgesehen. Nach Abschluss der Auffahrung werden die Lüfter an das Abwetterbohrloch angeschlossen.

Im Kontrollbereich erfolgt die saugende Bewetterung über eine Blechluttenleitung mit 800 mm Durchmesser, an die zwei Lüfter parallel angeschlossen werden.

7.4 Belgien

Im bisherigen belgischen Endlagerkonzept stellt der Personenbeförderungsschacht gleichzeitig den einziehenden Wetterschacht dar /2-20/. Neuere Berechnungen haben gezeigt, dass aufgrund einer stärkeren Wärmebelastung der Wetter infolge eines Mehranfalls wärmeentwickelnder Abfälle eine größere Dimensionierung des Personenbeförderungsschachtes oder der Bau eines gesonderten Wetterschachtes erforderlich ist /5-6/.

Die Grundidee des Bewetterungskonzeptes ist es, eine Vermischung der Wetterströme des Kontrollbereiches und des Überwachungsbereiches zu vermeiden /2-20/.

Der Kontrollbereich wird über den Personenbeförderungsschacht oder evtl. einen gesonderten Wetterschacht versorgt. Der Wetterstrom bewegt sich durch die Hauptstrecke, wo er in der Nähe eines Wettertores zum Überwachungsbereich abgesaugt wird. Von hier erfolgt die Weiterleitung über Lutten bis zum Fuße des Einlagerungsschachtes, wo die Luft über eine mit HEPA-Filtern (**H**igh **E**fficiency **P**articulate **A**irfilter) ausgestattete Anlage abgesaugt wird. Der Überwachungsbereich wird über Lutten, die den Luftstrom hinter der Wettertür zwischen Überwachungs- und Kontrollbereich einblasen, bewettert. Von hier strömen die Wetter durch die Hauptstrecke zum Bauschacht, um durch ihn an die Atmosphäre abgegeben zu werden.

Das Bewetterungssystem stellt im Kontrollbereich einen niedrigeren Luftdruck gegenüber dem Überwachungsbereich und einen niedrigeren Luftdruck im Bauschacht gegenüber der Atmosphäre sicher. Der Wetterstrom des Kontrollbereiches kann auch gefiltert an die Umwelt abgegeben werden.

Die oben gemachten Aussagen gelten in Bezug auf die Einlagerung in Strecken mit verringertem Querschnitt (sleeve concept). Im Falle einer Lagerung in senkrechten Bohrlöchern sind Schweißarbeiten erforderlich, so dass eine permanente Belüftung mit groß dimensionierten Zubringerlüftern nötig ist.

8 Entwässerungstechnik

Der Wasserhaltung kommt sowohl beim Bau der untertägigen Anlagen als auch im Einlagerungsbetrieb, in dem ein Einfließen von Wasser in die Einlagerbereiche vermieden werden muss, eine besondere Bedeutung zu. Dabei sind einerseits Wasserzuflüsse aus dem Deckgebirge und andererseits aus dem Wirtsgestein (vor allem in Kristallingesteinen) zu prüfen und zu bewerten.

8.1 Tongestein

Tongesteine sind Wasserstauer und führen meist nur im Bereich von Störungen geringe Wassermengen (Kap. 2.2). Außerdem können im Tonstein fossile Formationswässer auftreten. An allen potenziellen Tonstandorten finden sich im Deckgebirge oberhalb des Wirtsgesteins wasserführende Schichten.

Für das Schweizer Endlagerkonzept für Ton (Kap. 2.2.3) ist es vorgesehen, das Eindringen von Oberflächenwasser über die Rampe oder den Schacht durch eine flutungssichere Platzierung des Tunnelportals und des Schachtkopfes zu verhindern /3-20/.

Eine weitere Möglichkeit des Wasserzutritts besteht durch grundwasserführende Deckgebirgsschichten in die Rampe und den Schacht. Wie in Kap. 3.2.2 dargestellt, sind in der Unteren Süßwassermolasse und im Oberen Malm wasserführende Schichten zu erwarten. Das Auffahrungskonzept für die Rampe wurde diesem Risiko angepasst. Um das Risiko eines unerwarteten Wassereinbruches zu minimieren, werden vorlaufende Erkundungsbohrungen durchgeführt und wasserführende Bereiche mit 30 m bis 50 m langen, schirmartig nach außen gerichteten Injektionsbohrungen mit Zement abgedichtet. Zusätzlich werden die Bereiche mit wasserführenden Schichten nach der Auffahrung durch einen zweischaligen Ausbau mit zwischenliegender Wasserisolation gesichert /3-20/.

Trotz Abdichtungsinjektionen zutretendes Restwasser wird gefasst, mittels Drainage zu einer Pumpanlage in ca. 430 m Teufe geleitet und schließlich zur Oberfläche gepumpt. Die Pumpanlage wird entsprechend den erwarteten Wassermengen, die aus dem Bau der Rampe bekannt sind; mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen ausgelegt. Eine weitere Pumpanlage wird am tiefsten Punkt des Testlagers als Reserve eingerichtet.

Beim Bau des Schachtes wird eine Pumpanlage zum Hochpumpen des Restwassers im Schachtfuß bzw. Pumpensumpf installiert.

Die Abzweigung der Baustrecke von der Rampe wird konstruktiv so ausgebildet, z. B. durch eine Drainage / Schwelle, dass das Wasser, das von der in 430 m Teufe befindlichen Pumpe nicht erfasst wurde, zur Pumpanlage im Testlager fließt. Ist auch diese überfordert, wird das Wasser nach Durchfließen der Baustrecke im Pumpensumpf der Schachtanlage gefasst und nach oben gefördert.

Erfolgt ein Wasserzutritt über den Schacht, dann stehen, ebenfalls gestaffelt, zwei Pumpanlagen im Pumpensumpf und im Testlager zur Verfügung.

Im Notfall kann darüber hinaus der mit Spritzbeton verkleidete, geneigte Bautunnel als Retentionsvolumen genutzt und dadurch wertvolle Zeit zur Einleitung entsprechender Gegenmaßnahmen gewonnen werden kann. Das Volumen des Bautunnels beträgt ca. 30.000 m³. Bei einem Wasserzufluss von z. B. 100 l/s dauert das Auffüllen dieses Tunnels mehr als 80 Stunden.

Alle mit Abfällen gefüllten Lagerstollen sind an ihren beiden Enden mit Verschlüssen gesichert. Während des Betriebes sind in der Regel zwei, maximal drei Einlagerungsstrecken für wärmeentwickelnde Abfälle offen und mit Einlagerungsarbeiten belegt. Diese könnten notfalls, z. B. im Bereich der Streckenverzweigungen, kurzfristig und temporär verschlossen werden.

Die Pumpanlagen werden durch eine redundant einspeisende Ringleitung mit elektrischer Energie versorgt bzw. bei Ausfall der externen Stromzufuhr durch ein Notstromaggregat. Die Pumpanlagen im Testlager und im Schachtfuß sind in doppelter Ausführung und mit eigenem Trafo vorgesehen.

Von zentraler Bedeutung für die Bewertung eines Wasserzutritts ist die Einwirkung des Wassers auf die Einbauten. Ist diese gering, wie dies bei den Anlagen, die innerhalb des Opalinus-Tons liegen, der Fall ist und in den nicht Wasser führenden Schichten der Zugänge erwartet werden kann, werden aufgrund der geringen übrigen Einwirkungen, der Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Projektierung, der Ausführung der Bauwerke sowie ihrem Betrieb kaum größere Unterhalts- und Wartungsarbeiten anfallen.

In wasserführenden und angrenzenden Zonen kann das Wasser aber zu Schäden führen, weshalb das anfallende Restwasser sauber gefasst und abgeleitet werden muss. Einer sorgfältigen Pflege der Drainageleitungen kommt deshalb eine sehr große Bedeutung zu. Die anfallende Wassermenge im Zugangs- und im Lüftungsschacht muss kontinuierlich überwacht und die Drainageleitungen periodisch durchgespült und, falls notwendig, in Stand gesetzt werden. Diese Instandhaltungsarbeiten können, je nach Situation und Alter der Anlage, recht aufwendig ausfallen.

Nach Abschluss der Einlagerung werden alle Lagerstollen und Lagertunnel verfüllt und durch Verschlussbauwerke gesichert.

Auch im Untertagelabor in Bure (Frankreich) wird das Wasser aus dem Deckgebirge mit einer Drainage gefasst und dann nach übertage gepumpt. Detaillierte Planungen für die Wasserhaltung in einen zukünftigen Endlager existieren nicht.

8.2 Kristallingesteine

Im Granit lässt sich das Durchdringen wasserführender Zonen nicht vollständig vermeiden, so dass versucht werden muss, die Klüfte mit Injektionsmaßnahmen so weit wie möglich zu verschließen (vgl. Kap. 2.1). Auch feine Haarrisse können beachtliche Wassermengen liefern. Bergwerke im Granit werden deshalb stets einen gewissen Wasserzutritt aufweisen. Daher werden die Strecken in der Regel mit einem Gefälle in Richtung Schacht versehen. Dort werden die Wässer dann im Pumpensumpf gesammelt und nach übertage gepumpt. Ist die Anlage geneigter Strecken nicht möglich, so werden die Wässer mittels Drainagesystem und Pumpen zum Schacht geleitet und von dort nach übertage gefördert.

8.3 Salzformationen

Salz ist als trockenes Wirtsgestein bekannt, so dass keine Wasserhaltung vorgesehen und erforderlich ist. Es gibt volumenmäßig begrenzte Laugenreservoirs (einige m³ bis wenige Hundert m³) im Salz, die fossile Wässer aus der Bildung der Salinarablagerungen darstellen. Werden durch Bohrungen oder Auffahrungen diese Laugenreservoirs angefahren, so wird die austretende Sole gesammelt und mit Containern nach übertage gebracht, wo sie entsorgt wird. Das in der Vergangenheit mehrfach aufgetretene Absaufen von Kali- und Steinsalzbergwerken ist in allen Fällen darauf zurückzuführen, dass die Salzbarriere bis an das wasserführende Deckgebirge abgebaut wurde und es dann zum Wasserzutritt aus dem Deckgebirge kam. Dies ist auch der Grund für die Wasserzutritte im Forschungsbergwerk Asse und im Endlager Morsleben, die ehemalige Gewinnungsbergwerke darstellen.

Wie oben für die Tongesteine dargestellt, sind auch die Salzstöcke von einem Deckgebirge überlagert, das wasserführende Schichten enthalten kann. Durch das wasserdichte Ausbauen der Schächte kann aber ein Wasserzutritt zu den Gruberräumen ausgeschlossen werden.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Arbeitspaketberichtes wurde der international erreichte Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich des Baus und Betriebes von Endlagern für wärmentwickelnde Abfälle in den Wirtsgesteinsformationen Salz-, Ton- und Kristallingesteine zusammengefasst. Die Grundlage bildeten die weit fortgeschrittenen Endlagerkonzepte in Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Schweden und der Schweiz.

Errichtung von Endlagerbergwerken in Kristallingestein

Bezüglich der Errichtung von Endlagerbergwerken für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen kann auf umfangreiche Erfahrungen zurückgegriffen werden, die weltweit im Bereich des Erzbergbaus sowie im Tunnelbau gesammelt wurden. Praktische Erfahrungen mit der Errichtung und dem Betrieb von Endlagerbergwerken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Kristallingesteinen liegen aus Schweden (SFR), Norwegen (Himdalen) und Finnland (Loviisa, Olkiluoto) sowie aus den Unterlagelaboren Äspö (Schweden) und Onkalo (Finnland) vor. Auf der Grundlage dieser praktischen Erfahrungen wurden auch für generische Endlagerkonzepte Planungen für die Errichtung und den Betrieb erstellt, so z. B. für das französische Konzept. Aufgrund der hohen mechanischen Stabilität der Kristallingesteine ist bei Beachtung der Spannungsverteilungen ein stabilisierender Ausbau von Grubenräumen meist nicht erforderlich. Wasserführende Klüfte erfordern aber bereichsweise Maßnahmen zur Abdichtung.

Die wesentlichen Techniken für das Schachtabteufen in kristallinen Wirtsgesteinen sind das Schachtbohrverfahren und das Bohr- / Sprengverfahren. Falls, z. B. im oberflächennahen Deckgebirge, lockere bzw. wasserführende Schichten oder Störungszonen durchteuft werden müssen, wird das Bohr-/Sprengverfahren mit Gefrier- oder Injektionsverfahren kombiniert um diese Gesteine abzudichten bzw. zu stabilisieren.

Vorlaufend zum Schachtabteufen findet eine Detailerkundung der Geologie und der hydrogeologischen Verhältnisse statt, um Details der Teufarbeiten zu planen sowie die Eignung der Gesteine für den Einbau verschiedener Einrichtungen zu überprüfen. Anschließend wird durch das Deckgebirge und die oberen, aufgelockerten Granitbereiche ein Vorschacht abgeteuft. Während der Teufarbeiten wird der Schachtstoß durch Netze, Anker und Spritzbeton gesichert und durch Injektionen stabilisiert und abgedichtet. In Abschnitten von 5 – 10 m wird der Schachtausbau aus Betonelementen nachgezogen. Sobald ein Schacht oder die Rampe abgeteuft und eine Strecke aufgefahren ist, können die übrigen Schächte auch im Raise-Bohrverfahren erstellt werden

Rampen wurden bisher, z. B. in den skandinavischen Projekten, meist im Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Wie bei den Schächten ist eine detaillierte Vorerkundung erforderlich. In den oberflächennahen Bereichen mit aufgelockerten und wasserführenden Gesteinen wird die Rampe durch einen Stahlbetonausbau gesichert. In tieferen Teilen reicht eine Sicherung durch Stahlnetze und Anker. Lediglich mechanisch instabile Bereiche oder Abschnitte mit Wasserzutritten werden hier durch Zementinjektionen sowie einen Betonausbau stabilisiert und abgedichtet.

Das Gerät und die Auffahrungsstrategien für die Auffahrung des Grubengebäudes entsprechen – abgesehen von den Einlagerungsbereichen – dem bergbaulichen Standard. Die Untersuchungen in den Untertagelaboren liefern wichtige Grundlagen für die Planung der Auffahrung des Endlagerbergwerks. Bei der Auffahrung wird überwiegend das flexible Bohr- und Sprengverfahren eingesetzt. Für das gebirgsschonende Auffahren langer Strecken eignen sich auch Vollschnittmaschinen, die allerdings einen sehr hohen Investitionsaufwand erfordern. Während der Streckenauffahrung findet immer eine vorlaufende geologische Erkundung statt, um wasserführende Störungen und Klüfte zu identifizieren und ggf. vor der Auffahrung durch Zementinjektionen abzudichten.

Einlagerungsbohrlöcher müssen einen Sicherheitsabstand zu wasserführenden Störungen einhalten. Für ihre Erstellung wurden eine modifizierte Mikrotunnelbohranlage sowie eine Bohranlage mit Flachbohrkopf erprobt.

Errichtung von Endlagerbergwerken in Ton und Tonstein

Die bergbauliche Gewinnung von Tonen ist auf relativ geringe Tiefen beschränkt, doch ist Ton bzw. Tonstein ein wesentliches Nebengestein im Kohlebergbau und darüber hinaus im Deckgebirge vieler Bergwerke verbreitet, so dass insgesamt zahlreiche bergbauliche Erfahrungen mit Tonen und Tonsteinen vorliegen. Weitere Erfahrungen ergeben sich aus dem Tunnelbau. Weltweit wurden noch keine Endlager in Tonsteinen eingerichtet, doch sind diese Gesteine bevorzugte Wirtsgesteine in Belgien, Frankreich und der Schweiz und werden in diesen Ländern in Untertagelaboren (Hades, Bure, Mont Terri) untersucht. Bei der Errichtung dieser Untertagelabore konnten wichtige bergbautechnische Erfahrungen bezüglich der Erstellung von Grubenräumen in potenziellen Wirtsgesteinen gesammelt werden.

Die Schächte der beiden Untertagelabore Bure (Frankreich) und Hades (Belgien) wurden mit dem Bohr- und Sprengverfahren erstellt. Dabei musste in Bure zum Durchteufen wasserführender Deckgebirgssichten das Gefrierverfahren eingesetzt werden. Bei den Teufarbeiten wurde die Schachtwand sukzessive mit Felsankern und Spritzbeton stabilisiert. Im Ton erfolgte der Schachtausbau mit Stahlbetonringen, die gemäß dem Gebirgsdruck dimensioniert wurden. Die Konzepte für die Schächte der Endlagerbergwerke orientieren sich an den Erfahrungen, die bei der Errichtung der Untertagelabore gemacht wurden. Eine Auffahrung mit dem Bohr- und Sprengverfahren sieht das Schweizer Endlagerkonzept auch für die Rampe vor. Nach Erstellen der Rampe soll der Schacht dann von unten nach oben im Raise-Bohrverfahren erstellt werden.

Für die Auffahrung von Grubenräumen im Ton ist in den meisten Endlagerprojekten der Einsatz von Teilschnittmaschinen vorgesehen. Alternativ ist auch gebirgsschonendes Sprengen möglich. Die Auffahrungskonzepte orientieren sich an den gebirgsmechanischen Eigenschaften der Tone und Tonsteine. In plastischen Tonen sollen die Auffahrung und der Ausbau sehr rasch erfolgen. Die Tonsteine in Bure und Mont Terri weisen eine höhere Druckfestigkeit auf, so dass hier zunächst eine Sicherung mit Ankern und Spritzbeton ausreicht. Für den Endausbau wurden gesteinspezifische Konzepte entwickelt, wie z. B. die Keilblocktechnik für den belgischen Boom Clay. Die Stärke des Ausbaus richtet sich nach den Anforderungen

an die jeweilige Strecke und ist z. B. in den Bereichen, die nach Abschluss des Betriebes als Standorte für Verschlussbauwerke vorgesehen sind, besonders hoch.

Die Wahl des Bohrverfahrens für die Erstellung von Einlagerungsbohrlöchern in Tonen bzw. Tongesteinen richtet sich nach den gesteinsmechanischen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins. In allen Fällen wird zunächst zur Erkundung der geologischen Situation eine Vorbohrung erstellt, die im Anschluss auf den Enddurchmesser erweitert wird. Für plastische und wenig standfeste Tone ist vor allem das Schneckenbohrverfahren ggf. kombiniert mit diskontinuierlichem Kernen geeignet. Tonsteine können meist mittels Rotary-Bohrverfahren komplett gekernt werden. Die Aufweitung der Bohrlöcher erfolgt in der Regel mit Schneckenbohrverfahren. Anschließend werden die Bohrungen durch eine Stahlverrohrung stabilisiert. Horizontalbohrungen, wie sie das französische Endlagerkonzept erfordern, sind am besten mit Horizontalbohrverfahren zu erstellen.

Da die Wahl des jeweiligen Errichtungsverfahrens vom Gestein und geologischen Umfeld abhängt und diese Parameter für das deutsche Konzepte noch nicht bekannt sind, ist eine Aussage, inwieweit die in anderen Ländern vorgesehenen Auffahrungskonzepte auf ein potentiell deutsches Endlagerkonzept in Ton angewendet werden könnten, z. Z. noch nicht möglich.

Errichtung von Endlagerbergwerken in Salzformationen

In Deutschland liegen umfangreiche Bergbau-Erfahrungen für Salzformationen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau vor. Zudem liefern das Forschungsbergwerk Asse und das Endlagerbergwerk Morsleben wichtige Erfahrungen über die Nutzung von Salzgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Diese Erfahrungen machte man sich auch bei der Auffahrung des Erkundungsbergwerks Gorleben zu nutze. Das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung im Salz basiert auf dem Arbeitsmodell für den Salzstock Gorleben und integriert das Erkundungsbergwerk. Zu den für den Bergbau positiven Eigenschaften des Salzes gehört seine hohe Standsicherheit, die einen Ausbau des Schachtes oder der Grubenräume in diesen Schichten meist überflüssig macht.

Aufgrund des wasserführenden Deckgebirges erforderte das Schachtteufen für das Erkundungsbergwerk Gorleben die Anwendung des Gefrierverfahrens. Nach Erstellen des Gefrierkörpers wurde in offener Bauweise ein ca. 21 m tiefer Vorschacht erstellt und mit Stahlbeton ausgebaut. Das anschließende Schachtteufen erfolgte in festeren Gesteinen mit Hilfe des Bohr- / Sprengverfahrens und in Lockersedimenten gebirgsschonend mittels Schacht-Kurz-Helix. Die Schächte wurden vom Deckgebirge bis ca. 90 m tief in die Salzformationen in verschiedenen Stufen mit Betonelementen und Stahlringen stabilisiert. Im Salinar ist der Schachtstoß mit Ankern und Maschendraht gegen Steinfall gesichert.

Das bestehende Erkundungsbergwerk soll in das spätere Endlagerbergwerk integriert und die derzeitige Erkundungssole später als Abwettersole genutzt werden. Das Streckennetz wird der komplexen geologischen Struktur des Salzstocks und der aus der Erkundung bekannten Verbreitung des Hauptsalzes angepasst. Vor dem Auffahren von Grubenräumen erfolgt eine Vorerkundung durch Bohrungen und EMR-Messungen, um Anhydrit- und Kali-

flözvorkommen sowie Laugen- und Gastaschen zu umgehen. Für das Endlagerbergwerk prinzipiell ein gebirgsschonendes Vortriebsverfahren mit Voll- oder Teilschnittmaschinen vorgesehen. Da sich Salz langfristig plastisch verformt, ist es erforderlich, die Hohlraumkonturen regelmäßig mit Teilschnittmaschinen oder Firstenfräsen nachzuschneiden bzw. zu berauben.

In mehreren Forschungsvorhaben wurde die technische Machbarkeit der Erstellung von 500 m tiefen Einlagerungsbohrungen mit einem Durchmesser von bis zu 60 cm in Trockenbohrtechnik nachgewiesen.

Tagesanlagen

Die Konzepte für die Tagesanlagen der verschiedenen europäischen Endlagerkonzepte sind einander sehr ähnlich. Die Anlagen gliedern sich in kerntechnische Anlagen (Empfangshalle, Pufferhalle, Heiße Zelle für Umladen / Reparatur, Schacht / Rampe für Abfalltransport), den industriell / bergbaulichen Bereich (Werkstätten, Lagerhallen, ggf. Einrichtungen zur Herstellung von Verfüll- / Verschlussmaterial, Versorgung etc.), den Verwaltungsbereich und die Halde. Das Design der kerntechnischen Anlagen richtet sich nach den vorgesehenen Abfalltypen (ausgediente Brennelemente, verglaste hochradioaktive Abfälle, wärmeentwickelnde mittelradioaktive Abfälle), die verwendeten Transport- und Endlagerbehälter sowie dem Konzept für den An- und Abtransport der Abfallgebände und den Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks. Bezüglich der Errichtung kann in vielen Aspekten auf Erfahrungen in anderen kerntechnischen Anlagen – z. B. Zwischenlagern und Konditionierungsanlagen – zurückgegriffen werden.

Die industriellen und bergbaulichen Tagesanlagen müssen die Anforderungen des Baurechts und des Bergrechts erfüllen. Hier werden überwiegend Anlagen, Systeme und Komponenten eingesetzt, die sich in Bergbau und Industrie bewährt haben. Neue endlagerspezifische Anlagen, z. B. zur Herstellung hochkompakter Bentonitelemente, wie sie einerseits als Puffer in Einlagerungsbohrungen oder -strecken und andererseits zum Verfüllen bzw. Verschießen abgeworfener Einlagerungsstrecken eingesetzt werden, wurden in verschiedenen Ländern in Pilotanlagen erprobt.

Transport- und Einlagerungssysteme

Für die technischen Systeme eines Endlagers kann z. T. auf bereits vorhandene Technik aus anderen Bereichen der kerntechnischen Entsorgung (Konditionierung, Zwischenlagerung, Transport) und des Bergbaus zurückgegriffen werden. Dies gilt z. B. für den übertägigen Straßen- oder Schienentransport, Kransysteme für die Handhabung von Abfallgebänden, Schachtförderanlagen sowie untertägige Transporteinrichtungen. Diese Einrichtungen müssen ggf. den endlagerspezifischen Anforderungen, wie z. B. Abmessungen und Gewichte der Endlagergebände mit oder ohne Transportabschirmung, sowie – die Bergbauanlagen – den kerntechnischen Sicherheitsanforderungen angepasst werden. Weitgehende Neuentwicklungen sind in der Regel für die Einlagerungssysteme erforderlich, da für sie sehr spezielle Anforderungen gemäß dem Einlagerungskonzept gelten, z. B. horizontale bzw. vertikale Bohrlochlagerung oder Streckenlagerung. Ihre Planung und die Entwicklung von Prototypen

erfordert einen weit fortgeschrittenen und sehr detaillierten Stand bezüglich der Standort-, Endlager- und Endlagergebindeplanungen.

Ausgehend von Bergbausystemen basiert das deutsche Konzept für den untertägigen Transport von Abfallgebinden auf Schienenfahrzeugen, wobei endlagerspezifische Anpassungen im Hinblick auf die Transportgewichte, das begrenzte Platzangebot und die Kurvenradien erforderlich waren. Von den erforderlichen Plateauwagen wurden Prototypen gefertigt und erfolgreich erprobt. Weiterhin wurde eine Schachtförderanlage geplant, gefertigt und in einem Großversuch erfolgreich erprobt, die den Transport von bis zu 85 t Nutzlast ermöglicht.

Daneben werden aufgrund der Handlichkeit und Flexibilität in einigen Konzepten anderer Länder auch Radsysteme favorisiert, deren Entwicklung sich aber noch im Konzeptstadium befindet.

Als platzsparende Transportvariante wird in den skandinavischen, französischen und belgischen Konzepten die Luft- bzw. Wasserkissentechnik vorgesehen. Diese Technik wird in der technischen Industrie bereits verbreitet für die Handhabung und den Transport schwerer Lasten eingesetzt. Für die Anwendung im Endlager sind die geringe Bauhöhe und die hohe Beweglichkeit, die z. B. ein Drehen auf der Stelle ermöglicht und somit an Abzweigungen/Kreuzungen keine großen Kurvenradien erfordern, wichtige Vorteile. Das Konzept kann sowohl für den übertägigen Transport wie auch den untertägigen Transport durch die Verbindungsstrecken und in den horizontalen Einlagerungsbohrungen genutzt werden. Prototypen für diese Systeme wurden in Frankreich und Schweden erfolgreich getestet.

Für alle Wirtsgesteinstypen gibt es Konzepte für die vertikale oder horizontale Bohrlochlagerung. Für das skandinavische KBS-3V-Konzept wurde ein System entwickelt, das Transport- und Einlagerungsfunktionen vereint. Von dieser Maschine wurde auch ein Prototyp gebaut und durch Versuche im Untertagelabor in Äspö erprobt. Eine modifizierte Variante wurde für das französische Konzept entwickelt.

Das deutsche Konzept für die Bohrlochlagerung in Salz wird z.Z. in einem Großversuch erprobt. Dafür wurden alle erforderlichen Systeme und Komponenten, wie die Transportabschirmung, der Portalwagen, die Einlagerungsmaschine sowie die Bohrlochschleuse, entwickelt, gebaut sowie erfolgreich erprobt. Die Einlagerungsvorrichtung erfüllt alle kern-technischen Anforderungen. Dieses Einlagerungssystem könnte prinzipiell auch in anderen Wirtsgesteinen, wie z. B. in Ton, eingesetzt werden.

Die skandinavischen und französischen Einlagerungskonzepte sehen die horizontale Bohrlochlagerung vor. In enger Kooperation zwischen den Endlagergesellschaften wurden hierfür geeignete Transport- und Einlagerungssysteme entwickelt. Großbehälter („Supercontainer“) sollen mit einem Luft- oder Wasserkissensystem transportiert und von Robotern in die Einlagerungsbohrlöcher geschoben werden. Dieses System wurde in Demonstrationsversuchen erfolgreich getestet.

In der Schweiz und in Belgien wurden Konzepte für die Streckenlagerung in Ton entwickelt. Während das belgische Supercontainer-Konzept an das skandinavische Konzept anlehnt, werden im Schweizer Konzept die Behälter auf Bentonitauflagern abgelegt. Die technischen Systeme des Schweizer Konzeptes existieren aber nur als Konzeptplanungen. Zwei weitere belgische Alternativkonzepte zur Streckenlagerung befinden sich bisher auch nur im Konzeptstadium.

Die Streckenlagerung ist das deutsche Referenzkonzept für die Endlagerung von POLLUX-Behältern mit ausgedienten Brennelementen im Salz. Die technische Machbarkeit wurde durch einen Großversuch nachgewiesen, wobei als Einlagerungsmaschine ein modifizierter Portalkran eingesetzt wurde. Im Zuge der Demonstrationsversuche wurde diese Einlagerungstechnik bis zur Genehmigungsreife entwickelt und erprobt.

Technische Maßnahmen für den Betrieb

Die technischen Maßnahmen für den Betrieb des Endlagerbergwerks umfassen in allen Endlagerkonzepten vor allem die Installation der E-Technik, der Kommunikationstechnik, der Wettertechnik, der Sicherheits- und Überwachungstechnik (Strahlenschutz, Brandschutz), – in wasserführenden Gesteinen – der Wasserhaltung sowie das Abraummanagement. Die meisten dieser Maßnahmen basieren auf den bergbaulichen Standards werden aber – in den kerntechnischen Bereichen – an die endlagerspezifischen Anforderungen gemäß dem kerntechnischen Regelwerk angepasst. Dies gilt im Besonderen für die Sicherheits- und Überwachungstechnik sowie für die Wettertechnik und die Wasserhaltung – wobei eine Kontamination anderer Bergwerksbereiche und der Umgebung auszuschließen ist. An die Installation und den Betrieb der entsprechenden Systeme und Komponenten gelten hohe Qualitätsstandards, die auch eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung einschließen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Technische Daten von Schachtförderanlagen für schwere Lasten	42
Tabelle 3-2:	Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellierung – Schweiz /3-20/	66
Tabelle 4-1:	In den Tagesanlagen eines Endlagers erforderliche Transport- und Handhabungseinrichtungen (Deutsche Referenzkonzept, /2-30/)	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente – Schweden /2-9/	9
Abbildung 2-2:	Endlagerkonzept KBS-3 V – Schweden /2-9/	10
Abbildung 2-3:	Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente /2-10/.	10
Abbildung 2-4:	Aufbau eines Supercontainers – Schweden /2-7/	11
Abbildung 2-5:	Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) – Schweden /2-7/	12
Abbildung 2-6:	Endlager Olkiluoto -Schematisches Layout – Finnland /2-12/	13
Abbildung 2-7:	Französisches Endlagerkonzept in einer kristallinen Formation – Frankreich /2-15/	14
Abbildung 2-8:	Einlagerungskonzept für wärmeentwickelnde Abfälle in Bohrlöchern – Frankreich /2-16/	15
Abbildung 2-9:	Endlager für verglaste HAW – Belgien /2-20/	17
Abbildung 2-10:	Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für verglaste HAW, Supercontainer-Konzept – Belgien /2-21/	17
Abbildung 2-11:	Schematisches Layout des geplanten Endlagers – Frankreich /2-25/	19
Abbildung 2-12:	Einlagerungszelle für verglaste HAW – Frankreich /2-24/	20
Abbildung 2-13:	Endlagerdesign für hoch- und mittelradioaktive Abfälle im Opalinus-Ton – Schweiz /2-27/	22
Abbildung 2-14:	Streckenlagerung von Gebinden mit ausgedienten Brennelementen (BE) und verglasten hochaktiven Abfällen (HAA) – Schweiz /2-27/	22
Abbildung 2-15:	Deutsches Referenzkonzept für die Bohrlochlagerung in Ton /2-18/	23
Abbildung 2-16:	Geologischer Vertikalschnitt durch den Salzstock Gorleben – Deutschland.	25
Abbildung 2-17:	Arbeitsmodell Gorleben /2-29/	26
Abbildung 2-18:	Referenzkonzept im Salz für die Direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und von Wiederaufarbeitungsabfällen – Deutschland	27
Abbildung 2-19:	Prinzipskizze vom technischen Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in tiefe Bohrlöcher / Foto vom Versuchsstand zur Erprobung der Komponenten im Maßstab 1:1 – Deutschland /2-30/	28
Abbildung 2-20:	Prinzipskizze vom technischen Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in geneigte Kurzbohrlöcher – Deutschland /2-30/	29
Abbildung 3-1:	Polypgreifer	33

Abbildung 3-2:	Gefrierschachtverfahren /3-1/	35
Abbildung 3-3:	Lufthebebohrverfahren /3-1/	37
Abbildung 3-4:	Raise-Bohrkrone für die Erstellung des Personenschachtes für das Untertagelabor Onkalo – Finnland /3-13/	40
Abbildung 3-5:	Rampe des Untertagelabors Onkalo mit Anker- und Netzsicherung der Streckenwandung – Finnland /3-13/	41
Abbildung 3-6:	Stratigraphie des Standortes Bure – Frankreich /2-24//	43
Abbildung 3-7:	Geologisches Profil der Sondierbohrung Benken – Schweiz /3-20/	45
Abbildung 3-8:	Schnitt durch Schacht 2 des Untertagelabors HADES – Belgien /3-18/	47
Abbildung 3-9:	Schacht-Helix	48
Abbildung 3-10:	Schematische Darstellung des Ausbaus der Gorleben-Schächte – Deutschland	49
Abbildung 3-11:	Seitenkipplader /3-7/	52
Abbildung 3-12:	Teilschnittmaschine mit Querschneidkopf /3-1/	53
Abbildung 3-13:	Streckenbohrmaschine /3-20/	54
Abbildung 3-14:	Erstellung von Sprengbohrlöchern im Unterlabor Onkalo – Finnland /3-12/	57
Abbildung 3-15:	Baumartige Struktur der vom Schachtnahbereich zu den Einlagerungsmodulen führenden Verbindungsstrecken – Frankreich /2-15/	59
Abbildung 3-16:	Typische Querschnitte von Baustrecken – Frankreich /2-15/	59
Abbildung 3-17:	Tonbohrmaschine „Vetter“ in der Grube Lengemannschacht – Deutschland /3-21/	60
Abbildung 3-18:	Wassergehalt und einaxiale Druckfestigkeit ausgewählter europäischer Tonvorkommen /3-23/	61
Abbildung 3-19:	Querschnitt durch eine Verbindungsstrecke – Frankreich /2-24/	63
Abbildung 3-20:	Streckenquerschnitt an für Abdichtungsbauwerke vorgesehenen Streckenabschnitten – Frankreich /2-24/	63
Abbildung 3-21:	Teilschnittmaschine /3-20/	67
Abbildung 3-22:	Bohrjumbo zum Bohren der Löcher für den Sprengvortrieb /3-20/	67
Abbildung 3-23:	Teilschnittmaschine mit Vortriebsschild (oben), schematische Darstellung des Streckenvortriebs (unten). Untertagelabor Hades – Belgien /3-27/	69
Abbildung 3-24:	Engständiger Ausbau mit Stahlübungen, Untertagelabor HADES – Belgien /3-26/	70
Abbildung 3-25:	Schematische Darstellung der Sicherung einer Strecke durch das Einschieben von Stahl- oder Betonrohren – Belgien /3-26/	70

Abbildung 3-26: Betonausbau in Keilblocktechnik in der Verbindungsstrecke zwischen den Schächten des Untertagelabors HADES – Belgien /3-26/	71
Abbildung 3-27: Infrastrukturbereich und aufgefahrene Strecken des EB1 – Deutschland.	72
Abbildung 3-28: Geplante Erkundungsbereiche im Salzstock Gorleben – Deutschland /2-29/	72
Abbildung 3-29: Streckenquerschnitte der nördlichen (links) und südlichen Richtstrecke – Deutschland /2-30/	73
Abbildung 3-30: Querschnitte von Einlagerungsstrecken für die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern (links) und für die Bohrlochlagerung – Deutschland /2-30/	74
Abbildung 3-31: Teilschnittmaschine im Salz – Deutschland	74
Abbildung 3-32: Unausgebauter Grubenraum (Werkstatt) im Erkundungsbergwerk Gorleben – Deutschland	75
Abbildung 3-33: Schematische Darstellung des Erstellens eines Einlagerungsbohrlochs mittels Mikro-Tunnel-Bohrmaschine – Frankreich /2-25/	76
Abbildung 3-34: Test der Mikrotunnel-Bohrmaschine im Untertagelabor Onkalo – Finnland /3-13/	77
Abbildung 3-35: Bohrwerkzeug für die Erstellung von Einlagerungsbohrungen für wärmeentwickelnde Abfälle – Frankreich /2-24/	81
Abbildung 3-36: Phasen bei der Erstellung eines horizontalen Bohrlochs – Frankreich /2-24/	81
Abbildung 3-37: Bohrlochschleuse. Links Konzept, rechts Prototyp – Deutschland.	83
Abbildung 4-1: Übertägige Einrichtungen – Frankreich /2-15/	86
Abbildung 4-2: Gebäude für die Konditionierung schwach wärmeentwickelnder und wärmeentwickelnder Abfälle – Frankreich /2-15/	87
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Vorbereitung von Endlagerbehältern für die Einlagerung – Frankreich /2-24/	88
Abbildung 4-4: Vorbereitung der Endlagerbehälter mit ausgedienten Brennelementen für den Transport nach untertage – Frankreich /2-24/	89
Abbildung 4-5: Modell der Außenanlagen des Zugangsbereichs während des Einlagerungsbetriebs des Endlagers – Schweiz /3-20/	92
Abbildung 4-6: Modell der Anlagen im Schachtkopfbereich während des Einlagerungsbetriebs – Schweiz /3-20/	94
Abbildung 4-7: Tagesanlagen für ein Endlagerbergwerk am Standort Gorleben – Deutschland /2-29/	96
Abbildung 5-1: Endlagercontainer für verglaste HAW – Frankreich /2-15/	104
Abbildung 5-2: Schutzbehälter zum Transport zweier Endlagerbehälter und eines	

	Bentonitstopfens – Frankreich /2-15/	104
Abbildung 5-3:	Transportfahrzeug in der Strecke – Frankreich /2-15/	105
Abbildung 5-4:	Einlagerung eines Endlagerbehälters in ein vertikales Bohrloch – Frankreich /2-15/	106
Abbildung 5-5:	Kupfercontainer	107
Abbildung 5-6:	Behältertypen für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-15/	107
Abbildung 5-7:	Transportbehälter für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-15/	108
Abbildung 5-8:	Transportfahrzeug für untertage – Frankreich /2-15/	108
Abbildung 5-9:	Schematische Darstellung der Einlagerung ausgedienter Brennelemente in ein Bohrloch – Frankreich /2-15/	109
Abbildung 5-10:	Endlagerbehälter für verglaste Wiederaufarbeitungsabfälle – Frankreich /2-24/	110
Abbildung 5-11:	Konzept des abgeschirmten Transportbehälters mit Eingangsschleuse und Roboter im Inneren (links), Fertigung der Schleuse des Prototyps – Frankreich /5-1/	110
Abbildung 5-12:	Prototyp eines „docking shuttle“-Fahrzeugs – Frankreich /5-1/	111
Abbildung 5-13:	Andocken eines Transportbehälters an der Bohrlochschleuse – Frankreich /2-24/	112
Abbildung 5-14:	Schieberoboter Typ 2; links im eingefahrenen und rechts im ausgefahrenen Zustand – Frankreich /2-24/	113
Abbildung 5-15:	Versuchsstand zur Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in St. Chamond – Frankreich /5-1/	113
Abbildung 5-16:	Endlagerbehälter für vier Brennelemente – Frankreich /5-2/	114
Abbildung 5-17:	Endlagerbehälter für ein MOX- oder ein Uranoxid-Brennelement – Frankreich /2-24/	115
Abbildung 5-18:	Einlagerung eines Endlagergebindes für ausgediente Brennelemente – Frankreich /2-24/	116
Abbildung 5-19:	Großversuch zum Einbringen von Bentonitringen in Großbohrlöcher in Beaumont Hague – Frankreich /5-3/	116
Abbildung 5-20:	Untersuchte Möglichkeiten für das Einschieben eines Endlagerbehälters für ausgediente Brennelemente in den Einlagerungstunnel – Frankreich /2-24/	117
Abbildung 5-21:	Luftkissentransporter – Frankreich /2-24/	118
Abbildung 5-22:	Positionieren der Luftkissenmodule und Anheben des Behälters – Frankreich /2-24/	119
Abbildung 5-23:	Demonstrationsversuch zur Einlagerung von Brennelement-Behältern in Beaumont Hague – Frankreich /5-3/	119

Abbildung 5-24: Einlagerungsmaschine für das Konzept KBS-3 V. Schematische Darstellung des Positionieren des Behälters (links), Prototyp URL Äspö (rechts) – Schweden	120
Abbildung 5-25: Schubroboter mit Wasserkissentechnologie zur Einlagerung der „Supercontainer“ – Schweden /2-11/	121
Abbildung 5-26: Erprobung der Einlagerungsmaschine für Supercontainer im Untertagelabor Äspö – Schweden /5-5/	121
Abbildung 5-27: Schnitt durch eine Einlagerungsstrecke mit HAW-Supercontainer – Belgien /2-20/	123
Abbildung 5-28: Lagerung eines Overpacks in einem senkrechten Bohrloch – Belgien /5-6/	124
Abbildung 5-29: Einlagerung von Overpacks in Bentonithülsen (Sleeve design) – Belgien /5-6/	125
Abbildung 5-30: Links Außenansicht und rechts Querschnitte von BE-Behältern – Schweiz /3-20/	125
Abbildung 5-31: Behälter für hochaktive Abfälle – Schweiz /3-20/	125
Abbildung 5-32: Bentonitauflager mit Auflagerträger für einen BE-Behälter; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/	126
Abbildung 5-33: Zahnradlokomotive in Doppeltraktion – Schweiz /3-20/	127
Abbildung 5-34: Stollenlokomotive – Schweiz /3-20/	127
Abbildung 5-35: Akkulokomotive für Rangierarbeiten – Schweiz /3-20/	128
Abbildung 5-36: Situation in der Schleuse des Einlagerungsbereiches bei der Anlieferung von Endlagerbehältern – Schweiz /3-20/	128
Abbildung 5-37: Einfahren eines Endlagerbehälters mit Bentonitauflager: Einfahren im Bild links; bereit zum Einbringen der Verfüllung (Bentonitgranulat) im Bild rechts (Modellfoto) – Schweiz /3-20/	129
Abbildung 5-38: Längs- und Querschnitt durch den Hydraulikwagen, Abmessungen in m – Schweiz /3-20/	130
Abbildung 5-39: Umsetzgerät für HAW/BE-Endlagerbehälter in der Schleuse; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/	130
Abbildung 5-40: Seitenansicht und Schnitt durch eine Einlagerungsstrecke mit Einlagerungstrolley; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/	131
Abbildung 5-41: Seitenansicht und Schnitt durch den Schleusenbereich einer Einlagerungsstrecke mit Windenlokomotive; Abmessungen in m – Schweiz /3-20/	131
Abbildung 5-42: Nicht abgeschirmte Endlagerbehälter für die Bohrlochlagerung in Salz – Deutschland	132
Abbildung 5-43: Plateauwagen mit Transferbehälter für BSK 3 – Deutschland	134

Abbildung 5-44: Plateauwagen mit Transferbehälter für HAW-Kokillen und CSD-C – Deutschland /2-30/	134
Abbildung 5-45: Endlagerbehälter POLLUX für ausgediente Brennelemente – Deutschland /2-30/	135
Abbildung 5-46: Maße und Gewichte des Plateauwagens mit POLLUX-Behälter – Deutschland /5-9/	135
Abbildung 5-47: Demonstrationsversuch zum Schachttransport von POLLUX-Behältern – Deutschland	136
Abbildung 5-48: Einlagerungsmaschine für POLLUX-Behälter – Deutschland /5-9/	137
Abbildung 5-49: Streckenverfüllung mit einem Schleudertruck – Deutschland /5-9/	137
Abbildung 5-50: Versuchsstand Landesbergen mit der Einlagerungseinrichtung für die Bohrlochlagerung (blau, links) sowie die Grubenlok mit dem Transferbehälter auf einem Plateauwagen – Deutschland	139
Abbildung 5-51: Demonstrationsversuch zur Bohrlochlagerung von BSK 3-Kokillen in Landesbergen	140
Abbildung 7-1: Bewetterung über die Strecke und Abführung der Wetter über einen Kanal an der Firste – Frankreich /2-24/	149
Abbildung 7-2: Bewetterungsprinzip des französischen Endlagerkonzeptes – Frankreich /2-24/	150
Abbildung 7-3: Bewetterung eines Einlagerungsbereiches für wärmeentwickelnde Abfälle, französisches Endlagerkonzept /2-24/	151
Abbildung 7-4: Bewetterungsschema für das geplante Endlager im Opalinuston – Schweiz /3-20/	152
Abbildung 7-5: Bewetterungskonzept A für das Endlagerkonzept Gorleben – Deutschland /2-29/	155
Abbildung 7-6: Bewetterungskonzept B für das Endlagerkonzept Gorleben – Deutschland /2-29/	156

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 oberflächennahe Endlagerung (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	Brennstabkockille
B-Waste	Abfallkategorie für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die weder der Kategorie „A-Waste“ noch der Kategorie „C-Waste“ zuzurechnen 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 in 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
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.
SWR	Siedewasserreaktor
TRU	Transuran-Abfälle (USA)
tSM	Tonnen Schwermetall
UdSSR	Ehem. Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
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

- /1-1/ IAEA: Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste. Safety Series No. 99, Vienna 1989.
- /1-2/ IAEA: Geological Disposal of Radioactive Waste. Draft Safety Requirements No. WS-R-4, Safety Standard Series, Vienna 2005.
- /1-3/ Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). AP 3: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BMWi, Auftrags-Nr.: 9Y3215080000, Hannover 2009.
- /2-1/ 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.
- /2-2/ Evaluation of SKB R&D Programme 89. The National Board for Spent Nuclear Fuel, Dnr 93/89, March 1990.
- /2-3/ 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
- /2-4/ Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB Technical Report, TR 93-04.
- /2-5/ Autio J, Saunio T, Tolppanen P, Raiko H, Vieno T and Salo J-P. Assessment of alternative disposal concepts. POSIVA 96-12.
- /2-6/ Sandstedt H, Munier R and Pers K. Project Jade. Comparison of repository systems. SKB Technical Report, TR-01-17.
- /2-7/ Pettersson, S. et al. : Research, development and demonstration programme for a KBS-3 repository with horizontal emplacement. SKB Report R-01-55 (in Swedish).
- /2-8/ Pettersson, S., Widing, E. (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
- /2-9/ Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB Technical report TR-01-30. SKB, October 2006.
- /2-10/ Deep repository for spent nuclear fuel. SR-97 -Post closure safety. Main report Volume I and Volume II. SKB TR-99-06, November 1999.
- /2-11/ RD&D Programme 2007. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. SKB Technical Report TR-07-12, September 2007.
- /2-12/ Saanio, T., Kirkkomäki, T., Keto, P., Kukkola, T. & Raiko, H.: Preliminary Design of the Repository, Stage 2, Working Report 2006-94, POSIVA, Oikiluoto 2007.

- /2-13/ Long-term safety of the final disposal of spent fuel. STUK Guide YVL 8.4, Säteilyturvakeskus, 23 May 2001.
- /2-14/ 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, Olkiluoto 2003.
- /2-15/ ANDRA: Dossier 2005 Granite; Assets of Granite Formations for Deep Geological Disposal, 2005
- /2-16/ Köster, R. & Bechthold, W.: Thermische und thermomechanische Effekte bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen; Atomwirtschaft 1982
- /2-17/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST), Forschungsprojekt des BMWI, FKZ 02 E 9511, Peine 2004.
- /2-18/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO), Forschungsprojekt des BMWI, FKZ 02 E 10286 Peine 2008
- /2-19/ 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
- /2-20/ ONDRAF/NIRAS: Technical overview of the SAFIR 2 report, NIROND 2001-05 E, December 2001
- /2-21/ Bel, J.: Engineered barrier – Buffer construction technologies, example of an integrated prefabricated high pH buffer system – the Belgian concept of Supercontainer and associated backfill, ESDRED-workshop “Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste, 8-9 November 2006, Bucharest.
- /2-22/ Demarche, M. & Bernier, F. (2001): The Praclay Project: Demonstration of the Feasibility of the Belgian Reference Concept for HAW.- Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 2001, Tucson
- /2-23/ Planungsgesetz über die nachhaltige Entsorgung radioaktiver Materialien und Abfälle, No. 2006-739 vom 28. Juni 2006
- /2-24/ Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December 2005
- /2-25/ Haverkate, B.R.W., Hart, J. & Poley A.D.: Review of the horizontal emplacement technique concerning retrievability disposal cell concept, Petten, 20 January 2006
- /2-26/ Nagra: Projekt Gewähr, Vol. 1-9, Nagra Gewähr Report Series NGB 85-01/09, Nagra Wettingen, Switzerland 1985.
- /2-27/ Nagra: Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05, Nagra Wettingen, Switzerland 2002.

- /2-28/ Fritschi, M. & Zuidema, P.: Status of the Swiss radioactive waste disposal programme; Proceedings, ASME 1999
- /2-29/ Filbert, W. & Engelmann, H.J.: Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben", Abschlußbericht; DBE 1998.
- /2-30/ Bollingerfehr; W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen & Wehrmann, J.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). AP 1.2 – Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. FKZ 02 E 10286, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-28-2008-AB, Peine 2008.
- /2-31/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben Teil III. Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, Energie u. Geologie.--, Geol. Jb., C 73: 211 S., 50 Abb., 7 Tab., 5 Anl.; Stuttgart (Schweizerbart) 2008 (ISBN 978-3-510-95963-1).
- /2-32/ BGR: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen-Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover / Berlin, April 2007.
- /3-1/ Reuther, E.-U.: Lehrbuch der Bergbaukunde, Verlag Glückauf GmbH, Essen 1989
- /3-2/ Hennecke, J. & Weber, W.: Entwicklungsstand des Bohrens von Tages- und von Blindschächten. Glückauf, 127, 21/22, 978-988, Essen 1991.
- /3-3/ Smith, M.: Lufthebebohrverfahren – Entwicklung und Ausblick. Glückauf, 127, 1/2, 27-30, Essen 1991.
- /3-4/ Baumann, L., Böing, R. & Kappelmann, H.G.: Entwicklung neuer Vortriebsverfahren. Glückauf-Forschungshefte, 54, 2, 53-57, Essen 1993.
- /3-5/ Handke, D. & Maidl, R.: Anwendungsbereiche moderner Teilschnittmaschinen verschiedener Größenklassen im Tunnel- und Bergbau. Bergbau, 1, 5-10, 1990.
- /3-6/ Kurosch, T.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. – Münchner Geol. Hefte, B1, München 1996
- /3-7/ Kunze. G. & Petack, B.: Continuous Surface Miner – Neue Grenzen für sprengstoffloses Gewinnen von Festgestein. Baumaschinentechnik 2004, Forschung, Entwicklung, Innovation. Fachtagung Magdeburg, 27. und 28. Oktober 2004
- /3-8/ Wirth – Bohrtechnisches Handbuch; WIRTH – Maschinen- und Bohrgeräte-Fabrik GmbH, Erkelenz 2004
- /3-9/ Deilmann-Haniel Mining Systems GmbH, Schachtbohrgeräte. www.dhms.com/de/produkte/bohrgeraete/AVS0808B.pdf
- /3-10/ Deilmann-Haniel Shaft Sinking GmbH.
www.dh-shaftsinking.com/de/leistungen/raisebohren/index.php

- /3-11/ Kolditz, H.: Herstellung tiefer Großbohrlöcher zur Endlagerung umweltgefährdender Abfallstoffe im Salz; Glückauf Nr. 129, Heft 2 Seite 98 ff.; Eurajoki, Finland Essen 1993.
- /3-12/ Posiva: Onkalo – Underground Rock Characterisation Facility at Olkiluoto,. Posiva Oy, Olkiluoto 2008.
- /3-13/ www.posiva.fi
- /3-14/ Svemar, C., Petterson, S. & Hedmann, T.: Äspö Hard Rock Laboratory. WM'03 Conference, Febr. 23-27, Tucson 2003.
- /3-15/ Rhén, I., Bäckborn, G., Gustafson, G., Stanfors, R. & Wikberg, P.: Äspö HRL Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Summary report. TR 97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm 1997.
- /3-16/ www.skb.se
- /3-17/ Dossier 2005 Granite. Tome: Architecture and management of a geological repository. Andra, December 2005.
- /3-18/ Verstricht, J., Demarche, M. & De Bruyn, D.: Extension of the Underground Research Facility for real-scale demonstration. Waste Management '01, Proc. of the Int. Conf., Tucson, AZ (USA), 25 February – 01 March 2001.
- /3-19/ www.euridice.be
- /3-20/ NAGRA: Technischer Bericht 02-02. Projekt Opalinuston. Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Wetztingen Dezember 2002
- /3-21/ Bauer, S.: Gewinnungstechnologie im Tontiefbau. Vortrag geh. Am 08.02.2007 im Glas und Keramikmuseum Großalmerode.
- /3-22/ Bauer, S.: Untertägiger Tonabbau am Beispiel der Lagerstätte Großalmerode. Glückauf 142, Nr. 4, 154-158, Verlag Glückauf, Essen
- /3-23/ Anstad, C. & Kovari, K.: Untertagebau in quellfähigem Fels. – ETH Zürich, Forschungsauftrag 52/94, Zürich 2001
- /3-24/ NAGRA: Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Wetztingen 2002.
- /3-25/ Martin, C.D. & Lanyon, G.W.: EDZ in Clay Shale, Mont Terri: Technical Report TR 2001-01, Nagra, Wetztingen 2002
- /3-26/ Bastiaens, W. et al.: EURIDICE ; The connecting gallery ; Euridice Report 03-294, Dezember 2003
- /3-27/ Bastiaens, W. & Demarche, M.: The extension of the URF HADES: Realization and observations. WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ.
- /3-28/ Arnold, W.: Flachbohrtechnik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig-Stuttgart 1993.
- /3-29/ Autio, J. & Kirkkomäki, T.: Boring of full scale deposition holes using a novel blind boring method. POSIVA 96-07. Posiva Oy 1996.

- /3-30/ Holfelder, M. et al.: Bohrpfähle im Festgestein – Stand der Technik, Fachtagung Spezialtiefbau 2003. (<http://www.google.com/search?client=firefox-a&rls=org.mozilla%3Ade%3Aofficial&channel=s&hl=de&q=flachbohrkopf&lr=&btnG=Google-Suche>)
- /3-31/ Filbert, W. et al. : Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (FKZ 02 E 9511) GEIST; Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton (A2); DBE TECHNOLOGY, Dezember 2004.
- /3-32/ Schulz, J.: Ersteinsatz eines Prototyp-Schleusenbohrkopfes von 1 m Dm auf der Schachanlage Asse; Optimierung des Bohrprozesses für die Erstellung 300 m tiefer Bohrlöcher im Trockenbohrverfahren sowie die Analyse der Bohr- und Förderdaten. Diplomarbeit, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld 1987.
- /3-33/ Steinberg, S.: Weiterentwicklung und Erprobung der Trockenbohrtechnik zur Herstellung tiefer Bohrlöcher für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bericht über den Zeitraum 01.10.1990-31.12.1992. FZK: BMFT 02E8070, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH., Inst. Für Tief Lagerung, GSF-TL 37/93, Braunschweig 1993.
- /3-34/ Filbert, W., Bollingerfehr, W., Wehrmann, J. & Graf, R.: Optimization of Emplacement Technology for Spent Fuel. EAFORM 20.-23.10.2008, Session 13B, Tokio 2008.
- /3-35/ DBE: Systemanalyse Mischkonzept, Planung der Tagesanlagen, Technischer Anhang 1, Oktober 1989.
- /5-1/ Bosgiraud, J.M.: The French RD&D programme for HLW package transport and emplacement. Andra. Workshop on Transport and Emplacement Technologies for Radioactive Waste Packages. November 4-5, 2008, Peine.
- /5-2/ ANDRA: Dossier 2005. Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. 2005
- /5-3/ Thurner, E.: Transport and Emplacement Technologies for heavy waste packages using water / air cushion technology in Sweden and France. SKB. Workshop on Transport and Emplacement Technologies for Radioactive Waste Packages. November 4-5, 2008, Peine
- /5-4/ Pettersson, S.: Spent Nuclear Fuel Management Strategies in Sweden and the Deep Repository for Spent Fuel. ESDRED-Workshop: Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste, November 8-9, 2006, University Politehnica of Bucharest, Bucharest 2006.
- /5-5/ Pettersson, S.: Example of an integrated prefabricated system – The Swedish Super Container for KBS-3H concept. ESDRED-Workshop: Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste, November 8-9, 2006, University Politehnica of Bucharest, Bucharest 2006.
- /5-6/ Bel, J., de Brock, C., Giovannini, A., Van Cotthem, A. & Detilleux, M.: Alternative deep repository design for disposal of very high level waste in Belgium. WM'04 Conferences, February 29 – March 4, 2004, Tucson.

- /5-7/ Fopp, S., Graf, R. & Filbert, W.: Mechanische und thermische Analysen von Transferbehälter und Bohrlochschleuse zur Endlagerung abgebrannter Brennelemente in BSK 3. Jahrestagung Kerntechnik 2008, 27.-29. Mai, Hamburg.
- /5-8/ Tittelbach, S., Fopp, S., Graf, R. & Filbert, W.: Abschirmanalysen von Transferbehälter und Bohrlochschleuse zur Endlagerung abgebrannter Brennstäbe in BSK 3. Jahrestagung Kerntechnik 2008, 27.-29. Mai, Hamburg.
- /5-9/ Bollingerfehr, W. et al.: Transport- und Handhabungstechniken für radioaktive Abfallstoffe in Deutschland. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine 2007.
- /6-1/ Lommerzheim, A.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). AP 9: Genehmigungstechnische Aspekte. FKZ: 02 E 10065, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-31-2008-AP, Peine. 2008.
- /6-2/ Gesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie und den Schutz gegen die Gefahren (Atomgesetz AtG) vom 15.07.1985 (BGBl. I, 5. 1565), zuletzt geändert d. Art 8 des Gesetzes vom 06.01.2004 (BGBl. I, S. 2)
- /6-3/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I, 5. 1714) mit Berichtigung vom 22.04.2002 (BGBl. I, 5. 1459), zuletzt geändert d. Art. 2 der Verordnung vom 18. Juni 2002 (BGBl. I, S. 1869, (1903))
- /6-4/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 -RS-AGK3-515790/2 –
- /6-5/ Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen vom 30.06.1993 (GMBI. 1993 S. 29), ergänzt um die Anhänge B und C vom 20.12.1995 (GMBI. 1996 S. 9/10)
- /6-6/ Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße. 17. ADR-Änderungsverordnung vom 27. August 2004.