

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

EUGENIA

AP 7 - Verfüll- und Verschlusskonzepte

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

EUGENIA

AP 7 - Verfüll- und Verschlusskonzepte

Dr. André Lommerzheim

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 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.

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	9
2 Grundlagen: Sicherheitsnachweis und der Verschluss des Endlagers	11
2.1 Internationale Prinzipien der Endlagerung	11
2.2 Grundlagen der Verfüll- und Verschlusskonzepte	12
2.3 Allgemeine Anforderungen an Behälterkonzepte (technische Barrieren)	14
2.4 Allgemeine Anforderungen an Verfüll- und Verschlusskonzepte (geotechnische Barrieren)	16
3 Endlager im Tonstein	19
3.1 Belgien	20
3.1.1 Endlagerkonzept	20
3.1.2 Verfüll- und Verschlusskonzepte	24
3.1.2.1 Funktion und Design	24
3.1.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion	26
3.1.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept	26
3.1.3 Behälter	30
3.1.3.1 Anforderungen an die Abfallgebinde	31
3.1.3.2 Gebindematerialien und -design	31
3.1.3.3 Nachweis der Funktionalität	32
3.1.4 Verfüllen von Einlagerungsstrecken	33
3.1.4.1 Anforderungen	33
3.1.4.2 Verfüllmaterialien	34
3.1.4.3 Technisches Konzept zur Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial	35
3.1.4.4 Nachweis der Funktionalität	37
3.1.5 Verfüllen von Verbindungsstrecken	38
3.1.5.1 Anforderungen	38
3.1.5.2 Verfüllmaterialien	38
3.1.5.3 Technisches Konzept zur Verfüllung	38
3.1.5.4 Nachweis der Funktionalität	38
3.1.6 Verschlüsse von Strecken und Bohrlöchern	39
3.1.6.1 Anforderungen	39
3.1.6.2 Verschlussmaterialien und -design	39
3.1.6.3 Technisches Konzept	40
3.1.6.4 Nachweis der Funktionalität	40

3.1.7	Schachtverschluss	40
3.1.7.1	Anforderungen	40
3.1.7.2	Verschlussmaterialien und -design	42
3.1.7.3	Technisches Konzept	42
3.1.7.4	Nachweis der Funktionalität	42
3.2	Frankreich	43
3.2.1	Endlagerkonzept	43
3.2.2	Verfüll- und Verschlusskonzepte	46
3.2.2.1	Funktion und Design	46
3.2.2.2	Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion	47
3.2.2.3	Sicherheitsnachweiskonzept	47
3.2.3	Behälter	50
3.2.3.1	Anforderungen an die Endlagergebinde	50
3.2.3.2	Gebindematerialien und -design	51
3.2.3.3	Nachweis der Funktionalität	53
3.2.4	Verfüllen und Verschluss von Einlagerungszellen	53
3.2.4.1	Anforderungen	53
3.2.4.2	Technisches Konzept zum Verschluss der Einlagerungszellen	57
3.2.4.3	Nachweis der Funktionalität	58
3.2.5	Verfüllen von Verbindungsstrecken	59
3.2.5.1	Anforderungen	59
3.2.5.2	Verfüllmaterial	60
3.2.5.3	Technisches Konzept	60
3.2.6	Verschluss von Strecken	61
3.2.6.1	Anforderungen	61
3.2.6.2	Verschlussmaterialien und -design	62
3.2.6.3	Technisches Konzept zur Errichtung des Verschlusses	63
3.2.6.4	Nachweis der Funktionalität	64
3.2.6.5	Beschreibung der Erstellung des Stützenden Versatzes	65
3.2.6.6	Behandlung der Auflockerungszone	66
3.2.7	Schachtverschluss	67
3.2.7.1	Anforderungen an den Verschluss	67
3.2.7.2	Verschlussmaterialien und -design	67
3.2.7.3	Technisches Konzept zur Errichtung der Schachtverschlüsse	70
3.2.7.4	Nachweis der Funktionalität	71
3.3	Schweiz	71
3.3.1	Endlagerkonzept	72
3.3.2	Verfüll- und Verschlusskonzepte	74

3.3.2.1	Funktion und Design	74
3.3.2.2	Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion	76
3.3.2.3	Sicherheitsnachweiskonzept	76
3.3.3	Behälter	79
3.3.3.1	Anforderungen an die Abfallgebinde	79
3.3.3.2	Gebindematerialien und -design	79
3.3.3.3	Nachweis der Funktionalität	81
3.3.4	Verfüllen von Einlagerungsstrecken	82
3.3.4.1	Anforderungen an das Verfüllen von Einlagerungsstrecken	82
3.3.4.2	Puffer- und Verfüllmaterial	82
3.3.4.3	Technisches Konzept für die Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial	83
3.3.4.4	Nachweis der Funktionalität	84
3.3.5	Verfüllen von Verbindungsstrecken	85
3.3.5.1	Anforderungen	85
3.3.5.2	Verfüllmaterialien	86
3.3.5.3	Technisches Konzept zur Verfüllung	86
3.3.5.4	Nachweis der Funktionalität	86
3.3.6	Verschlüsse von Strecken	86
3.3.6.1	Anforderungen	86
3.3.6.2	Verschlussmaterialien und -design	87
3.3.6.3	Technisches Konzept	88
3.3.6.4	Nachweis der Funktionalität	88
3.3.7	Schacht- und Rampenverschlüsse	89
3.3.7.1	Anforderungen	89
3.3.7.2	Verschlussmaterialien und Design	89
3.3.7.3	Technisches Konzept	91
3.3.7.4	Nachweis der Funktionalität	91
4	Endlager in Kristallingesteinen	93
4.1	Finnland	94
4.1.1	Endlagerkonzept	94
4.1.2	Verfüll- und Verschlusskonzept	96
4.1.2.1	Funktion und Design	96
4.1.2.2	Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion	98
4.1.2.3	Sicherheitsnachweiskonzept	98
4.1.3	Endlagerbehälterkonzept	100
4.1.3.1	Anforderungen an die Endlagergebinde	100
4.1.3.2	Gebindematerialien und -design	101

4.1.3.3	Nachweis der Funktionalität	102
4.1.4	Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbohrungen und -strecken	103
4.1.4.1	Einlagerungsbohrlöcher	103
4.1.4.2	Verfüllen von Einlagerungsstrecken	105
4.1.4.3	Verschlüsse von Einlagerungsstrecken	110
4.1.4.4	Bohrlochverschlüsse	112
4.1.4.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Grubengebäudeteilen	113
4.2	Schweden	114
4.2.1	Endlagerkonzept	115
4.2.2	Verfüll- und Verschlusskonzepte	118
4.2.2.1	Funktion und Design	118
4.2.2.2	Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion	120
4.2.2.3	Sicherheitsnachweiskonzept	121
4.2.3	Endlagerbehälterkonzept	124
4.2.3.1	Anforderungen an die Endlagergebinde	124
4.2.3.2	Gebindematerial und -design	125
4.2.3.3	Nachweis der Funktionalität	126
4.2.4	Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbohrungen und -strecken	126
4.2.4.1	Einlagerungsbohrlöcher	126
4.2.4.2	Einlagerungsstrecken	130
4.2.4.3	Temporäre Verschlüsse von Einlagerungsstrecken	134
4.2.4.4	Bohrlochverschlüsse	137
4.2.4.5	Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Grubengebäudeteilen	139
5	Endlager im Salz	141
5.1	Endlagerkonzept	142
5.2	Verfüll- und Verschlusskonzept	146
5.2.1	Funktion und Design	146
5.2.2	Nachweiskonzept für die Barrierenfunktionen	149
5.2.3	Sicherheitsnachweiskonzept	152
5.3	Endlagerbehälter	156
5.3.1	Anforderungen an die Endlagergebinde	156
5.3.2	Gebindematerialien und -design	159
5.3.3	Nachweis der Funktionalität	162
5.4	Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbereichen	163
5.4.1	Verfüllen von Einlagerungsstrecken	163
5.4.1.1	Anforderungen	163

5.4.1.2	Verfüllmaterialien	164
5.4.1.3	Technisches Konzept zur Verfüllung	164
5.4.1.4	Nachweis der Funktionalität	165
5.4.2	Verschluss von Einlagerungsbohrlöchern	166
5.4.2.1	Anforderungen	166
5.4.2.2	Verschlussmaterial und -design	167
5.4.2.3	Technisches Konzept	169
5.4.2.4	Nachweis der Funktionalität	169
5.5	Streckenverschlüsse	170
5.5.1	Anforderungen	170
5.5.2	Verschlussmaterialien und -design	172
5.5.3	Technisches Konzept	175
5.5.4	Nachweis der Funktionalität	175
5.6	Verfüllen des restlichen Grubengebäudes	177
5.6.1	Verfüllmaterialien	177
5.6.2	Technisches Konzept und Nachweis der Funktionalität	178
5.7	Schachtverschlüsse	178
5.7.1	Anforderungen	178
5.7.2	Verschlussmaterialien und Design	180
5.7.3	Technisches Konzept	183
5.7.4	Nachweis der Funktionalität	183
6	Zusammenfassung	187
	Tabellenverzeichnis	191
	Abbildungsverzeichnis	193
	Abkürzungsverzeichnis	197
	Literaturverzeichnis	199

1 Einleitung

Seit Beginn der Endlagerforschung besteht internationales Einvernehmen in der Einschätzung, dass radioaktive Abfälle durch die Einlagerung in tiefen geologischen Formationen langfristig und sicher vom Lebensraum des Menschen und seiner Umwelt isoliert werden können /1-6/, /1-7/. So wurden weltweit Konzeptentwicklungen und Planungen für die Endlagerung von wärmeentwickelnden, mittel- und hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen durchgeführt. Der Entwicklungsstand der Endlagerprojekte ist sehr unterschiedlich und reicht von der Erarbeitung konzeptioneller Pläne und beginnenden geologischen Erkundungen zur Standortvorauswahl bis zu fertigen Konzepten und bereits festgelegten Endlagerstandorten. Skandinavische Länder, wie Schweden und Finnland, verfolgen Endlagerprojekte in Kristallingesteinen und erkunden derzeit mögliche Standorte. Demgegenüber haben Länder, die Endlager für wärmentwickelnde Abfälle in Tonformationen planen, wie Frankreich, Belgien und die Schweiz, Konzepte entwickelt, aber noch keinen Standort ausgewählt.

In Deutschland wurde bereits in den 60er Jahren die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Salzformationen im tiefen geologischen Untergrund favorisiert und aufgrund eines schrittweisen, kriteriengestützten Auswahlverfahrens 1977 der Standort Gorleben für Erkundungsarbeiten ausgewählt. Die Planungen für ein potentiell Endlager im Salzstock Gorleben wurden 1998 letztmalig aktualisiert /1-1/. Seit Mitte der 80er Jahre werden im Rahmen von Grundlagenforschung zudem Untersuchungen zur Endlagerung in alternativen Wirtsgesteinen durchgeführt.

Ziel der Endlagerung ist der Schutz von Mensch und Natur vor Auswirkungen durch die radioaktiven Inventare der eingelagerten radioaktiven Abfälle ohne zukünftigen Generationen unzulässige Belastungen aufzubürden /1-2/, /1-5/. Zur Einhaltung dieser Schutzziele sollen das Austreten kontaminierter Fluide und Gase aus dem Endlager in die Biosphäre dauerhaft verhindert werden.

Das Grundprinzip für das entsprechende Sicherheitskonzept stellt das Multibarrierenkonzept dar /1-6/, /1-7/, /1-8/. Bei diesem Konzept wird durch die Abfallform sowie eine Kombination von technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren, die sich in ihrer Funktion ergänzen, sichergestellt, dass es zu keiner unzulässigen Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre kommen kann. Neben der Wahl eines geeigneten Standortes (geologische Barriere) sind das anforderungsgerechte Verpacken der Abfälle (technische Barrieren) und weitere ingenieurtechnische Maßnahmen zur Ver- oder Behinderung einer Schadstoffausbreitung (geotechnische Barrieren) die Voraussetzungen für den langzeitsicheren Einschluss der Abfälle. Maßstab für die Funktionalität des Multibarrierensystems ist die hinreichende Rückhaltung der Nuklide wie sie von der Internationalen Atomenergie-Organisation /1-2/ formuliert und in internationalen und nationalen Regelungen übernommen wurden /1-3/, /1-4/.

Die Barrierenwirksamkeit basiert auf verschiedenen physikalischen und chemischen Mechanismen einzelner Barrieren sowie auf einer partiellen Redundanz und einer relativen funktionalen Unabhängigkeit der Maßnahmen. Bewertungsmaßstab ist die Integrität der Bar-

rieren, die die Fähigkeit der Barriere beschreibt, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie ggf. das Austreten kontaminierter Fluide und Gase aus dem Endlager in die Biosphäre durch die Barriere dauerhaft zu verhindern /1-9/.

Hierfür werden das jeweilige Sicherheitskonzept, das daraus abgeleitete Schließungskonzept und die erforderlichen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen eines Endlagers an die spezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und an Art und Menge des radioaktiven Inventars angepasst. Die Relevanz der technischen und geotechnischen Barrierentypen sowie ihre spezifischen Anforderungen und Funktionen variieren für die einzelnen Wirtsgesteinstypen sehr. Prinzipiell kann zwischen zwei Wirtsgesteinstypen unterschieden werden:

- Bei Endlagern in Kristallingesteinen müssen die technischen und geotechnischen Barrieren so ausgelegt werden, dass sie die Isolation der Abfälle langfristig gewährleisten;
- bei Endlagern in kriechfähigen Gesteinen (Salz und Tonstein) übernimmt das Wirtsgestein nach einigen Hundert oder Tausend Jahren selber die Funktion der Isolation.

Ziel des FuE-Vorhabens „EUGENIA“ ist es, den international erreichten Stand von Wissenschaft und Technik bei der Planung und Realisierung von Endlagern für wärmentwickelnde Abfälle insbesondere in den Wirtsgesteinen Salz sowie Ton- und Kristallingesteinen darzustellen. In 9 Arbeitspaketen werden verschiedene Aspekte der internationalen Endlagerplanung und -realisierung behandelt.

Der vorliegende AP-Bericht beschreibt die Verfüll- und Verschlusskonzepte und -maßnahmen für fortgeschrittene Endlagerkonzepte in folgenden Ländern:

- Belgien (Endlager in Tongesteinen),
- Frankreich (Endlager in Tongesteinen),
- Schweiz (Endlager in Tongesteinen),
- Schweden (Endlager in Kristallingesteinen),
- Finnland (Endlager in Kristallingesteinen), und
- Deutschland (Endlager in Salzgesteinen).

2 Grundlagen: Sicherheitsnachweis und der Verschluss des Endlagers

2.1 Internationale Prinzipien der Endlagerung

Der aktuelle Stand der internationalen Diskussion zu sichertechnischen Fragen bei der Endlagerung radioaktiver Stoffe spiegelt sich in Empfehlungen der Fachorganisationen IAEA, OECD/NEA und ICRP wider.

Die Grundprinzipien der Entsorgungsstrategie sind die Konzentration und der Einschluss radioaktiver Abfälle im tiefen geologischen Untergrund, um dadurch eine Isolation dieser Stoffe von der Biosphäre erreichen /1-6/, /1-7/. Der langzeitsichere Einschluss kann dabei durch eine Reihe von Maßnahmen sichergestellt werden, wie z. B. die Abfallform, die Verpackung, Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sowie die Geologie des Wirtsgesteins. Diese Maßnahmen bilden zusammen das Multibarrierensystem, von dessen Wirksamkeit die Qualität der Isolation der Abfälle von der Biosphäre bestimmt wird.

Endlager müssen so ausgelegt werden, dass sie die Betriebssicherheit und die Langzeitsicherheit gewährleisten /1-7/. Dabei wird die Betriebssicherheit durch technische Eigenschaften und betriebliche Überwachung sichergestellt. Die Langzeitsicherheit wird durch technische, geotechnische und geologische Barrieren gewährleistet. Aufgrund der inhärenten, passiven Sicherheit sind während der Nachbetriebsphase keine langfristigen Überwachungsmaßnahmen erforderlich.

Die Ziele der Endlagerung sind /1-7/:

- Die radioaktiven Abfälle so lange einzuschließen, bis ein Großteil der (kurzlebigen) Aktivität zerfallen ist,
- die Isolierung der Abfälle von der Biosphäre und die Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager,
- die Vermeidung signifikanter Freisetzungen von Radionukliden in die Biosphäre, und
- das Sicherstellen, dass mögliche zukünftige Strahlenexpositionen in der Biosphäre auf einem akzeptablen niedrigen Niveau liegen.

Ziel der Endlagerung ist es nicht, den absoluten und vollständigen Einschluss und die Isolation der Abfälle für alle Zeiten zu garantieren /1-7/.

Im Hinblick auf das radiologische Schutzziel bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle hat die ICRP in mehreren Artikeln die Grundsätze des Strahlenschutzes festgelegt /2-1/, /2-2/. Das Grundprinzip während der Betriebsphase ist, dass die Strahlendosen für das Personal und die Bevölkerung so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar sein sollen (ALARA-Prinzip). Maßnahmen zur Optimierung des Strahlenschutzes schließen auch die Behälterabschirmung sowie das umgehende Verfüllen und Abwerfen voller Einlagerungsbereiche ein. Für die Nachbetriebsphase wird nicht ausgeschlossen, dass geringe Mengen an Radionukliden aufgrund einer langsamen Verringerung der Barrierenfunktion durch Fluid- oder Gastransport in

die Biosphäre gelangen können. Zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen derartiger Freisetzungen in der Nachbetriebsphase empfiehlt die ICRP als Bewertungsmaßstab eine Individualdosis von 0,3 mSv/a für die effektive Dosis oder ein Risikoäquivalent von 10^{-5} pro Jahr.

Die Sicherheit des Endlagers während der Nachbetriebsphase hängt von einer Kombination aus Standorteigenschaften, der Qualität des Endlagerdesigns und der Endlagerbehälter sowie der anforderungsgerechten Umsetzung des Designs ab. Diese Elemente bilden das Multibarrierensystem, bei dem die Barrieren unterschiedliche Sicherheitsfunktionen übernehmen und sich gegenseitig ergänzen. Somit sind ein umfassendes wissenschaftliches Verständnis, gute Ingenieurplanungen, die Anwendung geeigneter technischer und betrieblicher Grundsätze, umfassende und robuste Sicherheitsbewertungen sowie die Anwendung eines umfassenden Qualitätssicherungssystems Voraussetzungen zur Einhaltung der Ziele.

2.2 Grundlagen der Verfüll- und Verschlusskonzepte

Im Bereich der Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle hat sich der internationale Stand von Wissenschaft und Technik in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. So ist einerseits das konzeptuelle Grundverständnis dafür, welche Prozesse in der Nachbetriebsphase eines Endlagers ablaufen werden und welche Sicherheitsfunktionen dabei von natürlichen und technischen/geotechnischen Barrieren übernommen werden müssen, wesentlich gewachsen. Die Methodik für die Modellierung und Bewertung der Endlagersysteme und speziell der Radionuklidausbreitungs- und -rückhalteprozesse wurde weiterentwickelt. Andererseits hat der Kenntnisstand über die Barriereneigenschaften verschiedener Wirtsgesteinstypen erheblich zugenommen. Darüber hinaus wurde die technische Realisierbarkeit für verschiedene Komponenten der Endlagersysteme durch umfangreiche technische Großversuche nachgewiesen.

Basierend auf Standortdaten und Endlagerplanungen ist durch einen Sicherheitsnachweis die Einhaltung konventioneller und radiologischer Schutzziele für die Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers zu belegen. Dabei ergeben sich vielfältige Anforderungen an den Bau, Betrieb und die Stilllegung des Endlagers. Die Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des Endlagers sind bereits für die Betriebszeit von Bedeutung, ihre Hauptfunktion liegt aber in der Gewährleistung des sicheren Einschlusses der Abfälle während der Nachbetriebsphase. Für den Langzeitsicherheitsnachweis werden mögliche zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems prognostiziert (Szenarien) und entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in wahrscheinliche und gering wahrscheinliche Szenarien unterschieden. Das Sicherheits- und Verschlusskonzept des Endlagers muss die Anforderungen, die sich aus diesen Szenarien ergeben, erfüllen. Der entsprechende Nachweis wird durch Modellrechnungen geführt.

Die Relevanz der verschiedenen Barrieren für die Isolation des radioaktiven Inventars unterscheidet sich je nach Wirtsgestein. Dabei hat das Wirtsgestein in allen Fällen eine langfristige Schutzfunktion zur Erhaltung der Barriereneigenschaften und der langfristig sicheren Lagerungsbedingungen für die Endlagerbehälter.

Das Verschlusskonzept eines Endlagers besteht aus folgenden Elementen:

- Technische Barrieren (Abfallform und Endlagerbehälter): dient dazu, die enthaltenen radioaktiven Stoffe während des Transportes und nach der Einlagerung sicher und dicht zu umschließen. Für die Nachbetriebsphase sehr unterschiedliche Relevanz, z. B. im Kristallingestein wesentliche Barriere mit einer angenommenen Integrität von ca. 100.000 Jahren, im Salz nur kurzzeitig relevant (wenige 100 Jahre)
- Geotechnische Barrieren:
 - Schachtverschlüsse: Unter den geotechnischen Barrieren haben die Schachtverschlüsse für alle Arten von Wirtsgesteinen eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung, da die Schächte die geologische Barriere perforieren und eine direkte Verbindung zwischen dem Endlagerbergwerk und der Biosphäre darstellen. Der Schachtverschluss muss einen Fluidtransport sowohl aus dem Endlager nach über Tage wie auch aus dem Deckgebirge nach unter Tage dauerhaft verhindern.
 - Streckenverschlüsse: Abschluss der Einlagerungsbereiche vom restlichen Grubengebäude zur Vermeidung von Lösungszutritten.
 - Hohlraumversatz: Hauptfunktionen sind die Verringerung des Hohlraumvolumens im Grubengebäude (das zutretenden Lösungen zur Verfügung steht) und die mechanische Stabilisierung der geologischen Barriere. In den Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern übernimmt der Versatz auch die Ableitung der Wärme der eingelagerten Abfälle und – in Hartgesteinen – eine Barrierenfunktion gegen Lösungszutritt.
 - Bohrlochverschlüsse: Während der Betriebsphase die Funktion einer radiologischen Abschirmung und langfristig der dichte Einschluss der Endlagerbehälter im Bohrloch

Die Isolation der Radionuklide von der Biosphäre wird in Kristallingesteinen langfristig von den technischen und geotechnischen Barrieren übernommen, während sie diese Funktion in kriechfähigen Ton- und Salzgesteinen nur über einen begrenzten Zeitraum von wenigen Hundert bis Tausend Jahren übernehmen müssen.

- Geologische Barrieren:
 - Kristallingesteine sind mechanisch standfest, was für die Standsicherheit des Grubengebäudes während der Betriebszeit günstig ist und während der Nachbetriebsphase eine mechanische Schutzfunktion für die Abfallgebinde darstellt. Andererseits sind diese Gesteine aber von – häufig wasserführenden – Klüften und Spalten durchdrungen, so dass die Rückhaltefunktionen für die radioaktiven Inventare von technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten sind.
 - Tone und Tonsteine sind wasserundurchlässig und können Radionuklide adsorbieren. Sie weisen daher ein hohes Einschluss- und Isolationspotential für radioaktive Abfälle auf. Um auszuschließen, dass sich diese positiven Eigenschaften unter dem Einfluss hoher Temperaturen reduzieren, werden maximal zulässige Grenztemperaturen für die einzulagernden wärmentwickelnden Abfälle festgelegt. Die Standfestigkeit von Tonen (Plastizität) ist abhängig von ihrem Diageneseegrad und die Mineralogie. Plastische Tone erfordern einen Ausbau zur Stabilisierung der Grubenräume. Bei der Schließung

wird der Ausbau im Bereich von Barrieren entfernt, um eine rasche und dichte Verbindung zwischen Barriere und Gebirge herzustellen. Der hierfür erforderliche Zeitraum liegt bei weichen, plastischen Tonen bei wenigen Jahren bis Zehnern Jahren während er bei festeren Tonsteinen einige Hundert bis Tausend Jahre betragen kann. Daher sind die technische und geotechnische Barrieren für einen raschen Einschluss der Abfälle auch in diesen Gesteinen während der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase von großer Bedeutung.

- Demgegenüber können stark kriechfähige Salzgesteine in wenigen Jahren (Bohrlochlagerung) bis einigen Zehner Jahren (Streckenlagerung) durch einen vollständigen Einschluss der Abfälle selber für eine Isolation der Schadstoffe von der Biosphäre sorgen. Zu den für die Endlagerung günstigen Eigenschaften von Salzgesteinen zählen die Dichtheit und die Trockenheit, die einen Stofftransport ausschließen. Darüber hinaus verfügt Salzgestein über ein plastisches Verformungsverhalten, das mit steigender Temperatur – etwa durch wärmeentwickelnde Abfälle – und steigendem Druck zunimmt. Somit werden die radioaktiven Abfälle langfristig durch das Wirtsgestein vollständig eingeschlossen. Dennoch bleibt Salzgestein nach einer Auffahrung von Grubenräumen standfest, so dass während der gesamten Endlagerbetriebszeit kein stützender Ausbau erforderlich ist. Technische und geotechnische Barrieren dienen zur Gewährleistung des Einschlusses der radioaktiven Abfälle während der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase.

In allen Wirtsgesteinen sind die Schächte eines Endlagers von besonderer sicherheitstechnischer Bedeutung, da sie direkte Verbindungen zwischen dem Endlager und der Biosphäre darstellen /1-9/. Sowohl ein relevanter Fluidzutritt von über Tage als auch ein Fluidaustritt aus dem Endlager muss dauerhaft verhindert werden. Daher bestehen die Schachtverschlüsse aus Komponenten, die die Dichtfunktion gewährleisten, sowie aus solchen, die die Lagestabilität des Dichtelementes sicherstellen. Weiterhin muss die Langzeitstabilität der verwendeten Baumaterialien gewährleistet sein.

2.3 Allgemeine Anforderungen an Behälterkonzepte (technische Barrieren)

Endlagerbehälter haben generell die Funktion, über einen längeren Zeitraum einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten und einen Zutritt von Wasser auszuschließen. Die Relevanz dieser Funktion für die Langzeitsicherheit ist je nach dem Isolationspotential des Wirtsgesteins unterschiedlich groß. Die größte Bedeutung haben die Behälterkonzepte für das Sicherheitssystem ist in Kristallingesteinen, deren Isolationspotential am geringsten ist.

Unabhängig vom Wirtsgestein wird die Auslegung der Endlagerbehälter durch die folgenden Faktoren bestimmt:

- Art der Konditionierung der Abfälle (Einschluss in eine Glasmatrix, Zementierung, komplette Brennelemente oder gezogene Brennstäbe, Verwendung von Primärbehältern, etc.)
- das Aktivitätsinventar der Abfälle,

- die Wärmeentwicklung der Abfälle,
- die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Wirtsgesteinsformation des Endlagers,
- Funktion und Wirkungsweisen der übrigen geotechnischen Barrieren,
- Schutzziele, denen die Endlagerbehälter entsprechen sollen, wie z. B.
 - Erhalt der Integrität der Behälter bei definierten Störfällen während des Einlagerungsbetriebes, wie Absturz während der Handhabung, Brand des Transport- oder Handhabungsgerätes etc.,
 - Einhaltung von Leckraten bezüglich des Austrittes von Gasen, und
 - Erhalt der Integrität der Behälter über lange Zeiträume (Korrosionsfestigkeit, Druckfestigkeit etc.)

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

Die behälterspezifischen Anforderungen ändern sich während der verschiedenen Phasen des Endlagerbetriebes und in der Nachbetriebsphase. Durch Sicherheitsanalysen ist zu belegen, dass die Endlagerbehälter ihre Funktion im Gesamtsystem der geotechnischen und geologischen Barrieren zu jeder Zeit erfüllen.

Die folgenden Behälteranforderungen ergeben sich aus der Betriebs- und der Langzeitsicherheit des Endlagers:

- aus Gründen der betrieblichen Sicherheit müssen die Behälter eine möglichst große Abschirmwirkung haben oder ein innerbetrieblicher Transportbehälter muss diese Aufgabe übernehmen,
- die ausgewählten Materialien müssen in ausreichender Menge zu vertretbaren Kosten verfügbar sein, und zwar zum Teil über viele Jahrzehnte,
- die Behälterwerkstoffe müssen längerfristig korrosionsbeständig sein und dem Gebirgsdruck standhalten sowohl im Normalbetrieb als auch unter Störfallbedingungen,
- die ausgewählten Werkstoffe müssen gegenüber der radioaktiven Strahlung aus dem Abfallinventar stabil sein,
- das Behälterinventar darf nicht zu einer Wärmentwicklung führen, die die zulässigen Temperaturen für das umgebende Puffermaterial und das Wirtsgestein überschreitet, und
- die technische Herstellung des Endlagerbehälters muss sicher und reproduzierbar zu den geforderten Qualitätsmerkmalen sein.

Aufgrund dieser Anforderungen werden international nur metallische Werkstoffe für Endlagerbehälter eingesetzt. Die Korrosionsbeständigkeit kann entweder durch den Einsatz von korrosionsfesten Stählen bzw. durch eine entsprechende Wandstärke bei Verwendung von unlegierten Stählen gewährleistet werden. Bei der letzteren Variante ist zu berücksichtigen, wie sich der Effekt einer höheren Gasmengenentwicklung durch die Metallkorrosion auf die

Endlagersicherheit auswirken kann. Bei der Einlagerung von Brennstabkokillen und HAW-Kokillen können diese durch einen Overpack oder eine Ummantelung geschützt werden, um der Korrosion und insbesondere dem Gebirgsdruck über lange Zeit standhalten zu können.

2.4 Allgemeine Anforderungen an Verfüll- und Verschlusskonzepte (geotechnische Barrieren)

Der Verfüllung und dem Verschluss eines Endlagers fällt die Aufgabe zu, die Integrität der durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzten, geologischen Barriere wieder herzustellen und das Endlager vor dem unbeabsichtigten Zutritt von Personen zu sichern. Die geotechnischen Barrieren bilden dabei eine bedeutende hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall. Angestrebt wird nicht allein ein vollständiger Einschluss der Endlagerbehälter, sondern auch eine ausreichende Rückhaltung bzw. die Verzögerung des Transports der im Versagensfall aus den Behältern freigesetzten Radionuklide. Durch die geotechnischen Barrieren soll über sehr lange Zeiträume der Schadstofftransport durch Konvektion vermieden sowie durch Diffusion eingegrenzt werden. Weiterhin soll der Transport von korrosiven Substanzen zum Endlagerbehälter minimiert sowie ein günstiges chemisches Umfeld bezüglich der Korrosionsraten gewährleistet werden.

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

Die einzelnen Barrieren sollen in ihrer Art und Beschaffenheit verschieden und so bemessen sein, dass eine vorhergesehene oder unvorhergesehene Schwächung einer Barriere durch die Rückhaltewirkung der anderen Barrieren aufgefangen wird. Die Barrieren wirken zeitlich gestaffelt. Im Normalfall können auch bei einem Flüssigkeitszutritt zum Endlager potentiell korrosive Fluide die Endlagerbehälter aufgrund des Barrierensystems nicht erreichen.

Solange der Endlagerbehälter dicht ist, ist die Rückhaltewirkung der Glasmatrix (HAW) oder des Brennstoffs (ausgediente Brennelemente) ungeschmälert gewährleistet und andere Barrieren werden nicht beansprucht. Erst nach Versagen der Endlagerbehälter kommt das Abfallglas respektive der Kernbrennstoff in Kontakt mit Wasser, und die langsame Freisetzung durch Auflösung setzt ein. Mit dem Beginn der Auflösung kommt dann die Rückhaltewirkung der geotechnischen Barrieren zum Tragen. Für viele Nuklide wird der Diffusionsfluss durch das Erreichen der Löslichkeitsgrenze an der Innenseite der Barriere stark eingeschränkt. Der Grossteil der Radionuklide zerfällt bereits im Abfallglas respektive in den Brennstäben oder in der umgebenden Barriere. Erst nach einem Durchbruch der Nuklide

durch die geotechnische Barriere kommt die Rückhaltungswirkung der Geosphärenbarriere ins Spiel.

Eine weitere Funktion der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen ist eine gebirgsmechanische Stabilisierung. Um langfristig eine Ausweitung der Auflockerungszone um die Hohlräume zu vermeiden, muss ein Verschluss dauerhaft den Gebirgsdruck aufnehmen können. Bei der Verwendung von quellfähigen Verfüll- und Verschlussmaterialien dürfen keine zu hohen Quelldrücke entstehen, die zu einem Aufbrechen des Wirtsgesteins führen können.

An die Verfüll- und Verschlussmaterialien werden folgende allgemeine Anforderungen gestellt /2-3/.

- sie müssen in entsprechenden Mengen von gleicher Qualität / Eigenschaft verfügbar sein,
- sie müssen verarbeitbar sein und mit verfügbarer Technologie eingebaut werden können,
- chemische Kompatibilität mit dem Wirtsgestein,
- Langzeitstabilität im chemo-physikalischen Milieu des Wirtsgesteins,
- mechanische Stabilität entsprechend dem Gebirgsdruck und dem während der Nachbetriebsphase maximal zu erwartenden hydraulischen Druck,
- geringe hydraulische Leitfähigkeit,
- ausreichende thermische Leitfähigkeit,
- Sorptionsvermögen für Radionuklide, und
- prognostizierbares Langzeitverhalten.

Diese Anforderungen ergeben sich aus folgenden Sicherheitsfunktionen:

- vollständige Umhüllung eines jeden Endlagerbehälters,
- Verhindern der Bewegung und chemischer Modifikationen des Grundwassers in Behälternähe, so dass die Behälterkorrosion begrenzt wird,
- Verzögerung des Radionuklidtransportes bis in den Bereich der Diffusion durch Radionuklidsorption und durch eine günstige Veränderung der Grundwassereigenschaften,
- Einhaltung von Grenztemperaturen am Kontakt Puffer/Wirtsgestein um Mineralumwandlungen im Wirtsgestein zu minimieren und Dampfbildung im Porenwasser zu verhindern.

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

3 Endlager im Tonstein

Einen Überblick über den internationalen Stand der Endlagerung im Tonstein geben die GEIST-Studie /2-3/, 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 wird /3-1/.

Im Tonstein bestehen folgende spezifische Anforderungen an einen Endlagerbehälter:

- Aus langzeitsicherheitlichen Gründen muss der Behälter während der Periode, in der das Abfallinventar durch radioaktiven Zerfall Wärme produziert, intakt bleiben, d. h. korrosions- und druckresistent sein. Dieser Zeitraum schwankt je nach Abfallinventar zwischen einigen 100 und wenigen 1.000 Jahren.
- Die Temperatur an der Behälteroberfläche darf 100°C nicht überschreiten, um Siedeeffekte des Porenwassers im umgebenden Puffermaterial (Bentonit) zu vermeiden. Der Siedeeffekt kann zu einer Anreicherung von Salz an der Oberfläche der Behälter führen, wodurch Korrosion einsetzt. Außerdem kann bei Temperaturen über 100°C die Barrierenwirkung des Puffermaterials beeinträchtigt werden.

Die Einhaltung dieser Anforderungen wird durch folgende Maßnahmen sichergestellt:

- Geringe Beladung der Behälter mit ausgedienten Brennelementen bzw. HAW,
- Korrosionsbeständigkeit der Endlagerbehälter durch die Verwendung korrosionsbeständiger Stähle, durch entsprechende Wandstärken unlegierter Stähle oder durch entsprechende Overpacks bzw. Ummantelungen. Bei der Verwendung unlegierter Stähle ist aber eine erhöhte Gasbildung durch die Korrosion zu berücksichtigen, die sich auf die Endlagersicherheit auswirken kann.

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. Die für diese Barrieren erforderliche Standzeit umfasst somit wenige 1.000 Jahre. Eine Sonderrolle unter den geotechnischen Barrieren spielt der Schachtverschluss, da der Schacht eine direkte Verbindung zwischen dem Endlager und der Biosphäre darstellt. Daher wird für den Schachtverschluss eine Langzeitbeständigkeit von mehreren 10.000 bis 100.000 Jahren gefordert.

Im Folgenden werden die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in Belgien, Frankreich und der Schweiz dargestellt.

3.1 Belgien

3.1.1 Endlagerkonzept

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 /3-2/, /3-4/, /3-18/. Dabei wird einerseits die Endlagerung der HAW aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelement (Referenzoption) und andererseits die kombinierte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung untersucht. Entsprechende Konzepte wurden in der SAFIR-2-Studie beschrieben und die technische Machbarkeit in der PRACLAY-Studie untersucht /3-13/. Aufgrund erster Ergebnisse der PRACLAY-Studie wurde das SAFIR-2-Konzept bezüglich des Behälterkonzeptes und der Verfüllung der Einlagerungsstrecken weiterentwickelt („Supercontainer-Konzept“ /3-18/).

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 /3-4/. Die Einhaltung dieser Randbedingung wird durch die folgende Maßnahmen gewährleistet:

- entsprechende Abkühlzeit der HAW bzw. ausgedienten Brennelemente vor der Einlagerung,
- Abstand zwischen den Containern in der Einlagerungsstrecke,
- Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. durch das Layout des Endlagers, und
- thermische Eigenschaften des Nahfeldes.

Das vorgesehene Endlager besteht aus einem Streckennetz in der Boom-Clay-Formation in einer Teufe von ca. 230 m /3-4/. Der Zugang zum Endlager wird durch zwei Schächte gebildet. Untertage sind die Schächte durch eine Verbindungsstrecke verbunden (Abbildung 3-1). Von den Schächten gehen beidseitig rechtwinklig zur Verbindungsstrecke zwei Hauptstrecken ab. Diese Hauptstrecken bilden den Zugang zu dem Endlagerfeld für verglaste HAW und ausgedienten Kernbrennstoff auf der einen Seite von den Schächten und zu dem Endlagerfeld für LILW auf der anderen Seite. Die Dimensionierung der Schächte und der Strecken erfolgt auf der Grundlage praktischer, technischer, ökonomischer und sicherheitsrelevanter Erwägungen.

Die Endlagerung der Behälter mit verglasten HAW erfolgt in Strecken mit einem Durchmesser von 2,70 m und einer Länge von ca. 800 m (Abbildung 3-1). Die Einlagerungsstrecken liegen rechtwinklig zu den Hauptstrecken und werden von diesen in drei Felder geteilt. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 40 m, um die mittlere Temperaturerhöhung der Wirtsformation auf 6 °K zu begrenzen /3-4/.

Das SAFIR-2-Konzept hat folgendes Verfüllkonzept für die Einlagerungsstrecken vorgesehen: Die Einlagerungsstrecken werden mit vorgefertigten Betonelementen mit einer Stärke von ca. 25 cm sowie mit vorgefertigten, kompaktierten Bentonitblöcken in einer Stärke von 70 cm ausgebaut (Abbildung 3-2). In der Mitte des Bentonitpuffers wird ein 10 mm starkes Endlagerrohr aus Austenitstahl mit einem Außendurchmesser von 508 mm montiert, das aus einzelnen Segmenten wasserdicht zusammengeschweißt wird. In das Einlagerungsrohr werden die Endlagerbehälter ohne Zwischenraum einer hinter dem anderen eingebracht. Vor dem Einbringen der Endlagerbehälter wird der Bentonitpuffer zwischen Betonausbau und Endlagerrohr bis zur Sättigung gewässert. Um den Quelldruck des Bentonits am Austritt in die Hauptstrecken aufzunehmen, wird der Ringspalt an den Hauptstrecken verschlossen. Nach Füllung eines Einlagerungsrohres wird dieses verschlossen /3-4/.

Im Supercontainer-Konzept /3-18/ werden die in einen Overpack (30 mm unlegierter Stahl) 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. Die verbleibenden Hohlräume zwischen dem Betonausbau und dem Supercontainer werden mit Zement oder anderen Verfüllmaterial (z. B. Bentonit-Sand-Gemische) verschlossen.

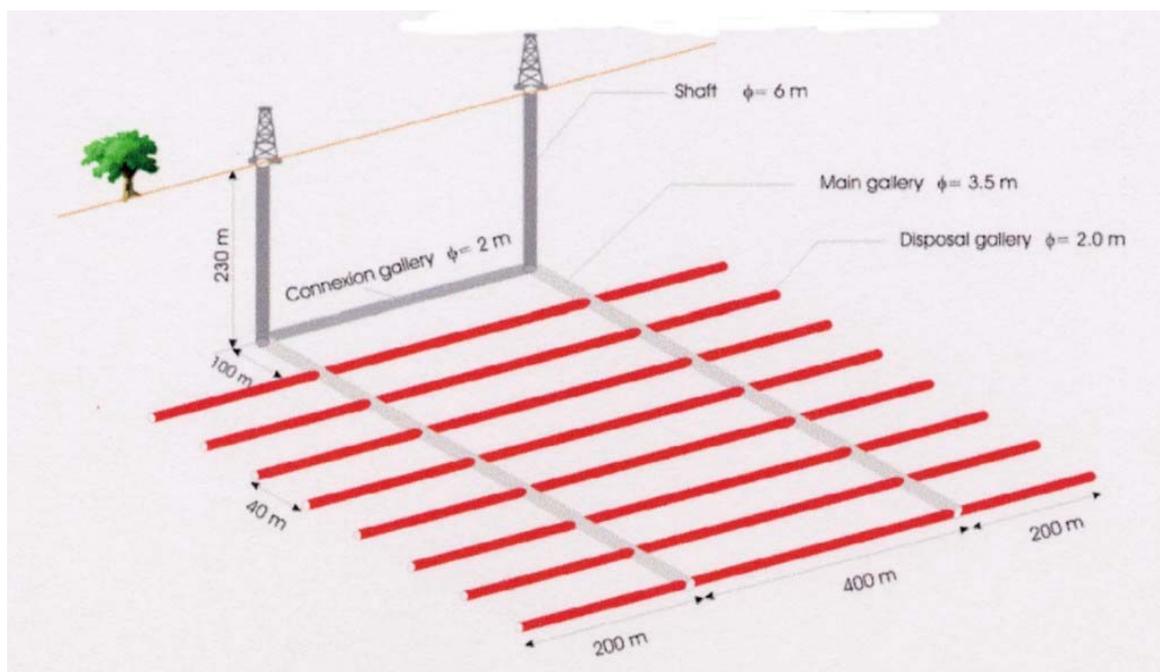


Abbildung 3-1: Endlager für verglaste HAW /3-4/

Das Einlagerungskonzept für Behälter mit ausgedienten Brennelementen ähnelt dem oben dargestellten Konzept für HAW, berücksichtigt aber die größere Länge der Endlagerbehälter (5 m anstelle 1,6 m) und die höhere Wärmeleistung der Behälter. Dementsprechend wurde der Winkel zwischen den Hauptstrecken und den Einlagerungsstrecken reduziert, der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken erhöht, und die Anzahl der Behälter je Einlagerungsstrecke reduziert.

Entsprechend dem SAFIR-2-Projekt werden in Einlagerungsstrecken für ausgediente Brennelemente nach dem Betonausbau jeweils vier Endlagerrohre in quadratischer Anordnung eingebaut (Abbildung 3-3). Der Hohlraum zum Betonausbau und zwischen den vier Einlagerungsrohren wird mit Bentonitformsteinen verfüllt. Bei Einlagerung von ausgedienten MOX-Brennelementen wird jeweils ein Einlagerungsrohr in der Mitte der Strecke angeordnet.

Im Supercontainer-Konzept werden 4 Brennelemente bzw. 1 MOX-Brennelement in einen Overpack gefüllt und von einem 70 cm starken Zementmantel umgeben. Die Streckenverfüllung erfolgt mit Zement oder anderen Materialien.

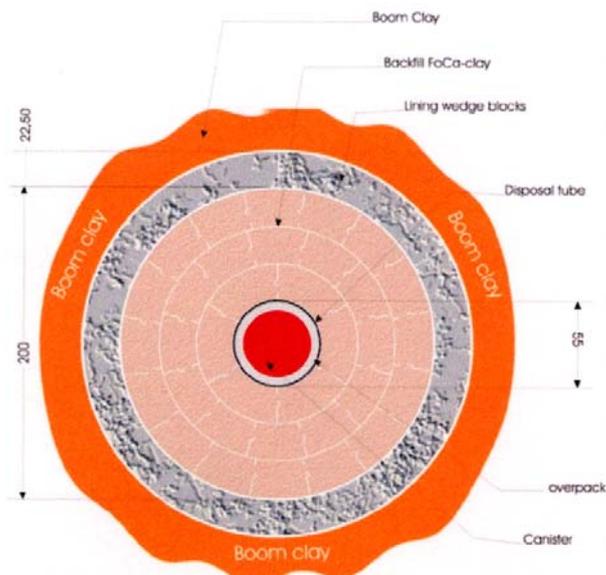


Abbildung 3-2: Querschnitt durch eine Endlagerungsstrecke für verglaste HAW, SAFIR-2-Konzept /3-4/

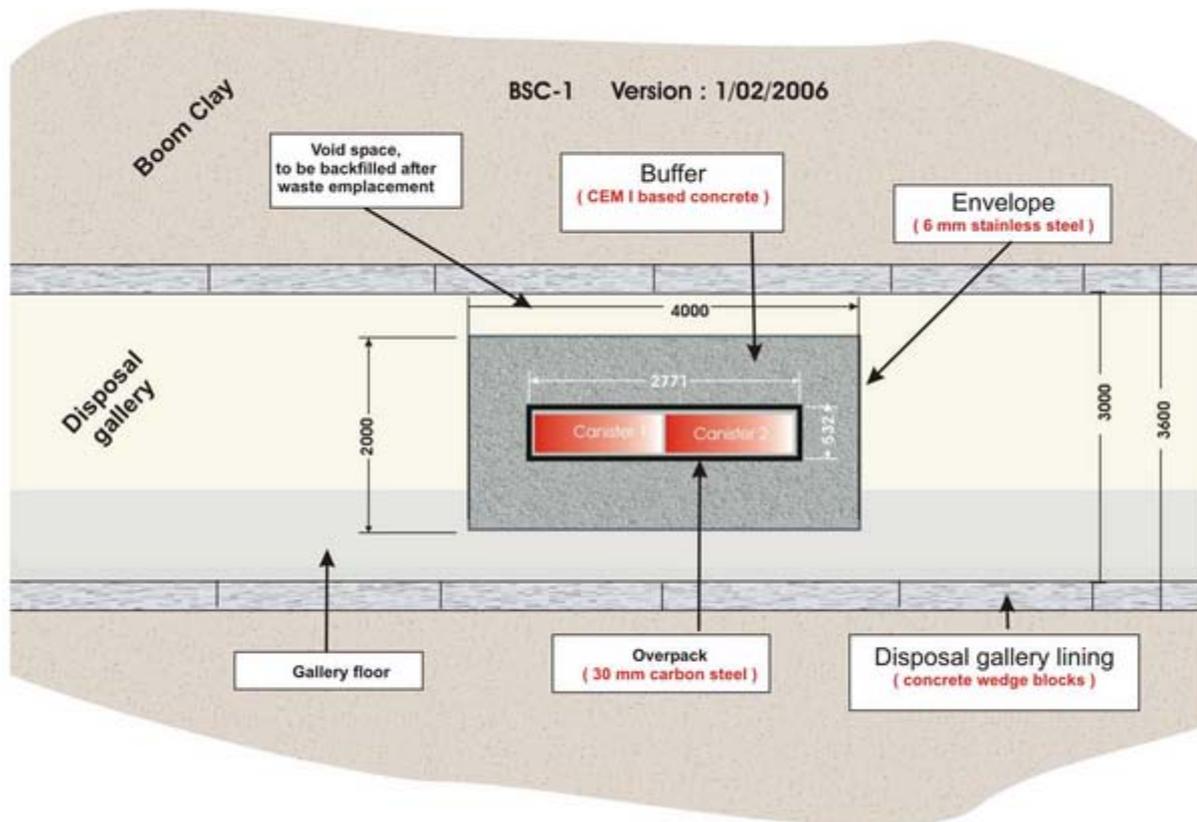


Abbildung 3-3: Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für verglaste HAW, Supercontainer-Konzept /3-18/

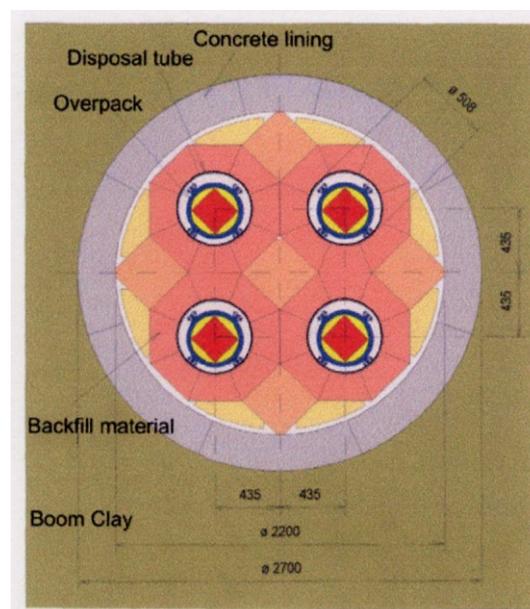


Abbildung 3-4: Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /3-4/

3.1.2 Verfüll- und Verschlusskonzepte

3.1.2.1 Funktion und Design

Bei Endlagern in Tongesteinen wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars in erster Linie durch das Wirtsgestein sichergestellt. Bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz wieder vollständig verschlossen sind, bilden die geotechnischen Barrieren eine bedeutende hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall und verschließen potenzielle Wegsamkeiten.

Aus Standort- und Abfallinventardaten, dem Endlagerdesign, dem Betriebskonzept, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie den gesetzlichen Sicherheitskriterien und Schutzzieleiten sich Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen ab. Das Multibarrierensystem des belgischen Endlagerkonzeptes besteht aus den folgenden Komponenten:

- Geologische Barriere: Tongestein
- Technische Barrieren:
 - Abfallform (Glasmatrix, UO₂-Matrix)
 - Abfallgebinde einschließlich Overpack bzw. Supercontainer
- Geotechnische Barrieren:
 - Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Puffermaterial
 - (Streckenausbau wird nicht als Barriere betrachtet)
 - Streckenverschlüsse in Hauptstrecken
 - Verfüllung der Hauptstrecken zwischen den Verschlüssen und dem Schacht
 - Schachtverschlüsse

Die Abfallform sorgt für einen langzeitigen Einschluss der Radionuklide, da auch bei einer Beschädigung des Behälters und dem Eindringen von Feuchtigkeit die Auslaugung der Abfallmatrix nur sehr langsam fortschreitet. Die Abfallgebinde werden im belgischen Endlagerkonzept dafür ausgelegt, dass sie während des Betriebes und für die ersten 500 Jahre (HAW) bzw. 2.000 Jahre (ausgediente Brennelemente) der Nachbetriebsphase den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars gewährleisten.

Das Verfüll- bzw. Puffermaterial, das die Abfallgebinde umgibt, soll einerseits eine Schutzfunktion für den Behälter haben und andererseits bei einer Beschädigung des Behälters die Freisetzung von Radionukliden verzögern bzw. begrenzen.

Im Unterschied dazu dienen die Verfüllmaßnahmen in den Haupt- und Verbindungsstrecken der geomechanischen Stabilisierung der Grubenräume. Die Abdichtung erfolgt in diesen Strecken durch Verschlussbauwerke, die an sicherheitstechnisch relevanten Punkten im

Grubengebäude angeordnet werden. Sie vermeiden einerseits eine Ausbreitung von Lösungen, die z. B. über einen undichten Schachtverschluss eingedrungen sind, in die Einlagerungsbereiche und verzögern bzw. begrenzen andererseits eine Ausbreitung kontaminierten Lösungen aus den Einlagerungsbereichen im Grubengebäude. Weiterhin trennen sie die Einlagerungsbereiche unterschiedlicher Abfallarten ab, um so unerwünschte Wechselwirkungen zu vermeiden. Streckenverschlüsse bestehen aus drei Elementen: einem Dichtelement aus Ton, das beidseitig durch Widerlager aus Zement stabilisiert wird. Vor der Errichtung einer Barriere wird der Streckenausbau in diesem Bereich entfernt, um eine bündige Anbindung an das Gebirge zu erreichen. Aus Gründen der Redundanz werden in einer Strecke immer zwei Barrieren nacheinander angeordnet. Entsprechend der raschen Gebirgskonvergenz in den Tonsteinen ist die Funktion der Streckenverschlüsse vor allem in der frühen Nachbetriebsphase wichtig (Abbildung 3-5).

Da durch die Schachtverschlüsse potentielle Wegsamkeiten zwischen der Biosphäre und dem Endlager verschlossen werden, kommt diesen Barrieren eine besonders hohe sicherheitstechnische Bedeutung zu. Daher bestehen hohe Anforderungen an die Lösungs- und Gasdichtheit wie auch an die Langzeitstabilität (minimale Standzeit zwischen einigen Tausend Jahren bis zu 100.000 Jahren). Das Design der Schachtverschlüsse entspricht dem der Streckenverschlüsse und besteht aus einem Dichtelement und zwei Widerlagern. Der restliche Schacht wird zur mechanischen Stabilisierung mit Verfüllmaterial versetzt.

Aus einer theoretischen Studie /3-16/ zur Untersuchung der Einflüsse eines Verschlusses auf die hydromechanischen Verhältnisse im umgebenden Tonstein ergaben sich folgende Ziele für die Durchführung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen:

- Da die radialen und tangentialen Spannungen für die Gasmigration besonders kritisch sind, muss das ursprüngliche Spannungsfeld im Gebirge soweit wie möglich wieder hergestellt werden.
- Die Auffahrung von Strecken oder Schächten sollte so schonend wie möglich erfolgen, damit die Tiefe der Auflockerungszone minimiert wird und so das spätere Verfüllen und Verschließen erleichtert wird.
- Der anfängliche Quelldruck des Verschlussmaterials muss so kalibriert werden, dass für Radial- und Tangentialspannungen die gleichen Minimalwerte in der Auflockerungszone auftreten.
- Die Merkmale des Ablaufes bei der Auffahrung und dem Ausbau der Strecken müssen für die optimale Planung der Verschlussmaßnahmen genau bekannt sein.
- Die Entspannung des umgebenden Gebirges bei der Errichtung eines Verschlusses soll minimiert werden.

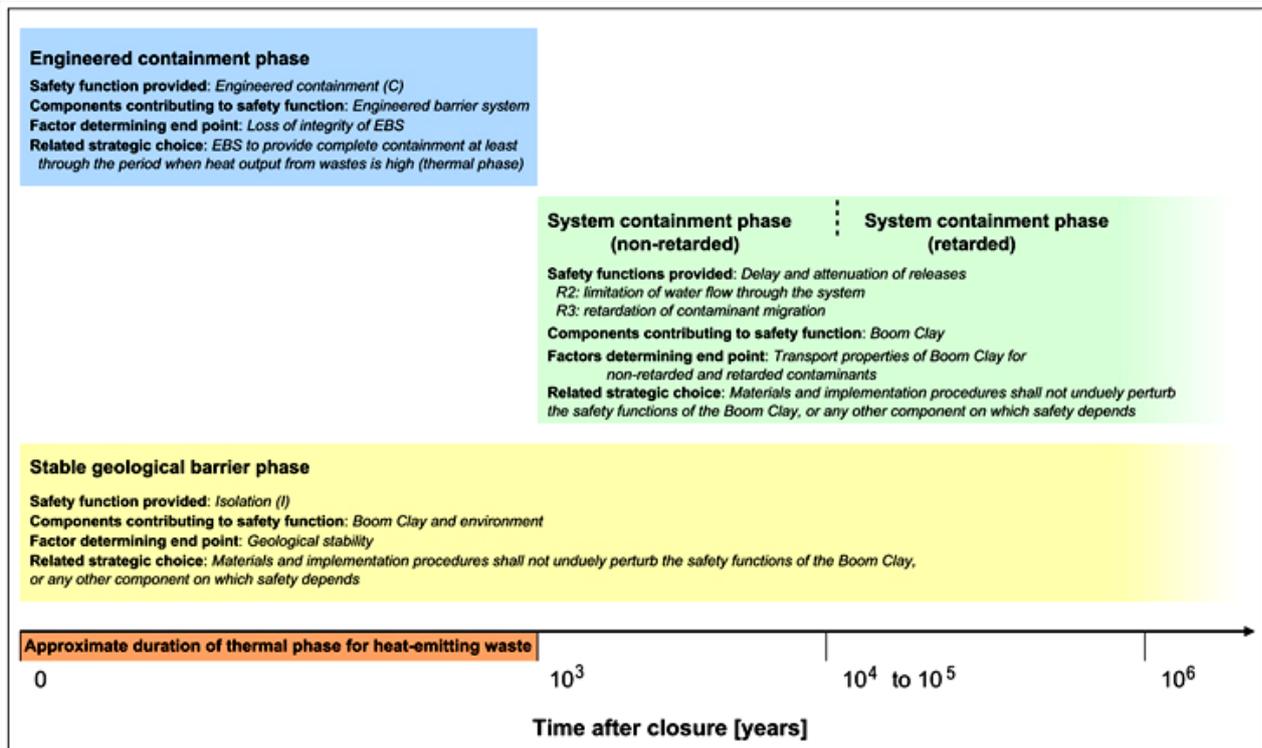


Abbildung 3-5: Langzeitsicherheitsfunktionen der Elemente des Multibarrierensystems /3-4/

3.1.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion

Für das SAFIR-2-Konzept wurde die technische Machbarkeit und die Funktionalität der Barrieren durch In-situ-Versuche und Laborexperimente nachgewiesen (RESEAL-Projekt /3-12/, PRACLAY-Projekt /3-13/). Dabei wurden umfangreiche geotechnische Messprogramme durchgeführt, um einerseits Daten über die Funktion der Barrieren wie auch Umgebungseinflüsse zu sammeln. Mit diesen Daten wurden Rechenmodelle validiert, die künftig die Modellierung der Prozesse in den Barrieren und ihrem Umfeld erlauben. Somit wurden die Grundlagen für ein Nachweiskonzept für die Funktion der Bentonitbarrieren geschaffen. Die Identifizierung sensibler und kritischer Parameter und die Festlegung entsprechender Grenz- bzw. Werte ist aber noch nicht abgeschlossen.

Entsprechende Untersuchungen für das Supercontainer-Konzept stehen noch aus.

3.1.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

Studien zur Sicherheitsbewertung der geologischen Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen in einer Tonformation werden in Belgien seit ca. 30 Jahren durchgeführt. Die letzte Sicherheitsbewertung findet sich in der SAFIR-2-Studie /3-4/. Eine umfassende Neubewertung unter Berücksichtigung des neuen Supercontainer-Konzeptes /3-18/ hat noch nicht stattgefunden.

Das Sicherheitsnachweiskonzept von ONDRAF/NIRAS orientiert sich am internationalen Stand von Wissenschaft und Technik, wie er z. B. in IAEA und NEA-Berichten zusammengefasst wird /1-7/, /1-8/, /1-9/. Wesentliche Elemente des Sicherheitsnachweiskonzeptes sind:

- Standort- und Endlagercharakterisierung sowie Modellierung der aktuellen Verhältnisse (Datenbasis und Standort- sowie Prozessmodellierung),
- Ableitung möglicher zukünftiger Entwicklungen (Langzeitprognosen und Szenarienanalyse),
- Bewertung zukünftiger Entwicklungen des Gesamtsystems unter Berücksichtigung verschiedener Ungewissheiten (Konsequenzenanalyse, deterministische und probabilistische Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen),
- Interpretation und sicherheitstechnische Bewertung der Ergebnisse.

Die Grundlagen für die Sicherheitsbewertung wurden aus den Ergebnissen von Forschungs- und Demonstrationsvorhaben abgeleitet, in denen sicherheitstechnisch relevante Prozesse im Endlager untersucht und die technische Machbarkeit vorgesehener technischer Maßnahmen nachgewiesen wurden:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| – Mine-by Test /3-5/ | Ermittlung der Auflockerungszone sowie Wechselwirkung zwischen Ausbau und Ton mit allen entsprechenden zeitabhängigen Prozessen |
| – BACCHUS /3-6/ | Ermittlung des Verhaltens von Ton aufgrund thermischer Beeinflussung durch wärmeentwickelnde Abfälle |
| – CERBERUS /3-5/ | Simulation der Nahfeldeffekte bei der Einlagerung eines HAW-Behälters nach 50 Jahren Abkühlung |
| – CACTUS /3-7/ | Erhitzerversuch im Ton |
| – ATLAS /3-8/ | Vergleich des rheologischen Verhaltens von Ton in einem Temperaturfeld |
| – MEGAS /3-9/ | Auswirkungen der Gasbildung auf das Wirtsgestein Ton |
| – OPHELIE Mock-up Test /3-10/ | Erhitzerversuch mit besonderem Focus auf die technische Barriere |
| – ARCHIMEDE /3-11/ | Charakterisierung des Porenwassers und des Bodens einschließlich organischer Substanzen |
| – PHEBUS /3-11/ | Wechselwirkungen des Tones beim Kontakt mit Luft |
| – RESEAL /3-12/ | Nachweis des Verschlusses von Bohrlöchern und der Schachtverschluss im plastischen Ton |
| – PRACLAY /3-13/, /3-14/ | Machbarkeitstest für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Ton |
| – CORALUS /3-26/ | Korrosionstest von HAW-Glas in Ton |

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studien können die einzelnen Komponenten des Multibarrierensystems einer Bewertung unterzogen werden.

Demonstrationsversuche für das neue Supercontainer-Konzept sollen im Zuge des FP6 ESDRED-Projektes durchgeführt werden /3-18/.

Die Glasmatrix hochradioaktiver Abfälle besitzt eine hohe Langzeitstabilität. Die Auslaugung derartiger Matrices im geochemischen Milieu des Boom Clay sowie mögliche Wechselwirkungen mit Materialien der technischen und geotechnischen Barrieren wurden analysiert /3-20/, /3-26/. FoCa-Clay und Boom Clay besitzen ähnliche geochemische Eigenschaften. Die Langzeitstabilität des HAW-Glases kann durch silikatische Beimischungen zum FoCa-Clay noch erhöht werden. Die hohen pH-Werte bei einer Verwendung von Portland-Zement als Puffermaterial sind für die Stabilität des HAW-Glases ungünstig. Durch Optimierung der Zementzusammensetzung kann der pH-Wert aber reduziert werden /3-18/.

Die Korrosion des Behälter- und des Overpackmaterials (unlegierter Kohlenstoffstahl und austenitischer Stahl) im geochemischen Milieu des Boom Clay sowie des FoCa-Clay wurde bei In-situ-Versuchen analysiert. Ergänzend wurden Laboruntersuchungen und Modellrechnungen durchgeführt /3-19/. Dabei wurde die Eignung der vorgesehenen Behältermaterialien bestätigt. Bei Verwendung eines Bentonit-Puffermaterial erfolgt die Begrenzung der Behälterkorrosion vor allem durch die Vermeidung eines Lösungszutritts. Die alternative Verwendung von Portland-Zement führt zu einem günstigen alkalischen Milieu, das die Behälterkorrosion minimiert /3-17/.

Für die Langzeitsicherheitsbewertung wichtige physiko-chemische Prozesse zur Auswahl von Verfüll- und Puffermaterialien in den Einlagerungsstrecken sind – neben der oben genannten Auslaugung von HAW-Abfällen und der Korrosion von Behälter und Overpack – eine ausreichend hohe Wärmeleitfähigkeit, die Gasmigration, der Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide sowie die Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein und seine chemische Kompatibilität. Für das SAFIR-2-Projekt wurde in der Einlagerungsstrecke ein Puffer aus Bentonit vorgesehen, bei der Weiterentwicklung dieses Konzeptes wurde zu einem Puffer aus Portland-Zement übergegangen, da dieser zu einem günstigen chemischen Milieu führt, das die Behälterkorrosion minimiert. Die Datenbasis für die Verwendung von Bentonitpuffer in Einlagerungsstrecken ist sehr umfangreich, wobei neben Erfahrungen aus den BACCHUS /3-6/, /3-15/, RESEAL /3-12/ und dem PRACLAY-Projekten /3-13/ auch auf entsprechende internationale Erfahrungen vieler Länder zurückgegriffen werden kann. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand werden die langzeitsicherheitlichen Kriterien für die Auswahl des Puffermaterials – wie thermische, hydraulische, mechanische und chemische Eigenschaften – durch den Bentonit weitgehend erfüllt, während betriebliche Kriterien z. Z. noch nicht umfassend beurteilt werden können /3-17/. Im langzeitsicherheitlichen Bereich besteht noch Forschungsbedarf bzgl. chemischer Aspekte (Stabilität von Ton unter hypersalinen und stark alkalischen Bedingungen, gekoppelte, temperaturabhängige Prozesse in Ton) und physikalischer Aspekte (Zersetzung von Ton mit der Zeit, Eigenschaften von zersetzten Tonen, Gastransportmechanismen in Ton, Kompatibilität von Ton mit Stahl und Langzeitentwicklung von Porosität und Permeabilität).

Der Kenntnisstand über Zementverfüllmaterialien und das Supercontainer-Konzept ist noch nicht in gleichem Maße durch Versuche abgedeckt wie für das Bentonit-Konzept /3-17/. Mehrere Demonstrationsversuche sind im Rahmen des FP6 ESDRED-Projektes geplant /3-18/.

Grundlegende Untersuchungen über die Eigenschaften von Zementmaterialien liegen in großem Umfang vor, doch sind viele endlagerspezifische Aspekte noch nicht oder unzureichend untersucht. So sind im chemischen Bereich die folgenden Punkte offen:

- die Zementphasenchemie bei hohen Temperaturen
- die Auswirkungen von Zerfallsprodukten auf den Stofftransport,
- das Verhalten einiger Radionuklide bei hohen pH-Werten,
- die Auswirkungen mikrobieller Aktivitäten,
- der Ablauf von Sorption und Ausfällung,
- das alkalische Milieus und seine Auswirkungen auf das Wirtsgestein.

Im hydrogeologischen Bereich sind die folgenden Aspekte zu untersuchen:

- Die Entwicklung von Porosität und Permeabilität,
- Räumlichen Heterogenitäten und Risse
- Kompatibilität und Wechselwirkungen mit anderen Materialien, wie z. B. Ton

Eine wesentliche Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung des festgelegten Temperaturkriteriums (100 °C) für das Verfüll- und Verschlussmaterial /3-4/. Die Hauptargumente für die Festlegung des Temperaturkriteriums sind:

- Vermeidung einer möglichen Verdampfung von Wasser, das in Poren an einzelnen Stellen zwischen Endlagerrohr/Overpack und Verfüllmaterial vorhanden sein könnte;
- Verminderung einer Mineralumwandlung und -zersetzung;
- Verminderung der Wirkung von Kombinationseffekten von thermischen, hydrologischen, mechanischen, mineralogischen, physikalischen und chemischen sowie Transportprozessen;
- Verringerung der Korrosionsrate der Endlagerbehälter;
- Erleichterungen bei der Bestimmung von Kenndaten in Labors;
- da die Migration von Radionukliden bei hohen Temperaturen nur sehr gering erforscht ist, ist die Vorhersage des Verlaufes komplexer Prozesse ist bei hohen Temperaturen mit großen Unsicherheiten behaftet.
- die Anfälligkeit von Messsystemen, die für das Endlagermonitoring eingesetzt werden sollen, ist bei niedrigeren Temperaturen geringer.

Modellrechnungen haben ergeben, dass die Einhaltung dieses Kriteriums wird durch eine entsprechende Beladung der Behälter bzw. eine entsprechende Abklingzeit der Abfälle so-

wie durch eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit des Verfüll-/Puffermaterials gewährleistet werden kann.

Die Bewertung der Langzeitsicherheit des Endlagers ist durch ein schrittweises und iteratives Herangehen gekennzeichnet. Ein wesentlicher Aspekt ist die Prognose und Bewertung möglicher zukünftiger Ereignisse und Prozesse (FEP), die zu Strahlenexpositionen in der Biosphäre führen können und zu Szenarien kombiniert werden. In der SAFIR-2-Studie wurden zwei Gruppen von Szenarien betrachtet /3-4/:

- Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers (= Referenzszenarium), welche eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit hat. Bei der Langzeitsicherheitsanalyse wurde kein Kredit von den Primärverpackungen, den Einlagerungsrohren sowie der Verfüllung und dem Betonausbau der Endlagerstrecke genommen. Bei der Bewertung der effektiven Mächtigkeit der Tonbarriere wurde eine Störungszone berücksichtigt. Weiterhin wurde unterstellt, dass der Stofftransport hauptsächlich durch molekulare Diffusion erfolgt. Beim Stofftransport wird die Sorption in der Tonbarriere sowie die Verdünnung, Dispersion und Sorption in Grundwasserführenden Schichten berücksichtigt. die Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre erfolgt durch den Abfluss des Grundwassers in Flüsse oder andere Oberflächengewässer, die Verunreinigung des Bodens durch Grundwasser und die Grundwassergewinnung.
- Szenarien einer gestörten Entwicklung des Endlagers, die eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben, bei ihrem Eintreten trotzdem signifikanten Einfluss auf das Endlagersystem haben könnten. In dieser Szenariengruppe werden ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (Bohrung), Klimaeinflüsse (Eiszeit), Kluftbildung im Bereich des Endlagers, das Versagen technischer und geotechnischer Barrieren und der Transport von Radionukliden in der Gasphase betrachtet.

Verfüll- und Verschlussmaßnahmen müssen die Anforderungen der normalen wie auch der gestörten Entwicklung abdecken.

3.1.3 Behälter

Für das belgische Endlagerkonzept wurden im Rahmen des Vorhabens SAFIR 2 die Endlagerung von HAW-Kokillen in Overpacks sowie für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente dünnwandige Endlagerbehälter vorgeschlagen /3-4/.

Zwischenzeitlich wurde ein weiteres Behälterkonzept für die Endlagerung von HAW-Kokillen und von ausgedienten Brennelementen vorgestellt: ein sogenannter Supercontainer (Abbildung 3-3 /3-18/). Bei diesem Behältertyp wird der mit HAW-Kokillen oder mit ausgedienten Brennelementen beladene Overpack durch eine Betonschicht ummantelt.

3.1.3.1 Anforderungen an die Abfallgebinde

Die Temperatur an der Grenze Overpack / Puffermaterial darf 100°C nicht überschreiten. Die Integrität der HAW- und BE-Endlagergebinde soll mindestens für die sogenannte Heizperiode, d. h. die Zeit, in der die Erwärmung des Nahfeldes mehr als 10 K gegenüber der Temperatur der ungestörten Formation beträgt, erhalten bleiben. Die Zeitdauer dieser Periode wird für verglaste Abfälle mit ca. 300-500 Jahren und für ausgediente Brennelemente mit ca. 2.000 Jahren angegeben. Während die dünnwandigen Endlagerbehälter keine relevante Barriere darstellen, ist der Overpack während seiner Standzeit die entscheidende Barriere für die Rückhaltung der Radionuklide.

Die Pufferschicht, die beim Supercontainer Teil des Behälters ist, soll dazu beitragen, eine Behälterkorrosion zu vermeiden oder zu minimieren. Außerdem muss der Puffer eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit aufweisen ($> 1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) und zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide beitragen.

3.1.3.2 Gebindematerialien und -design

Im Rahmen des Vorhabens SAFIR 2 wird die Endlagerung von HAW-Kokillen in Overpacks aus Austenitstahl (AISI 316L hMo) mit einer Wandstärke von 30 mm vorgeschlagen (Abbildung 3-6).

Für die Option der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente sind dünnwandige BE-Endlagerbehälter aus Stahl (Werkstoffbezeichnung: AISI 316, Wandstärke: 9,5 mm) vorgesehen (Abbildung 3-6). Nach Beladung der Behälter werden Behälterkörper und -deckel miteinander verschweißt. Der verbleibende Hohlraum des Behälters wird durch eine Öffnung im Deckel mit Sand verfüllt und die Deckelöffnung anschließend mit einem Stopfen verschlossen, der wiederum mit dem Deckel verschweißt wird /3-22/.

Beim Supercontainer-Konzept werden die radioaktiven Abfälle in zylindrische Overpacks aus unlegiertem Stahl (Wandstärke: 30 mm) verpackt und anschließend der Deckel verschweißt (Abbildung 3-7). In ein Overpack können entweder 2 HAW-Kokillen oder 4 Uran-Brennelemente oder 1 MOX-Brennelement verpackt werden. Die Overpacks werden in eine Betonabschirmung mit einer Wandstärke von 70 cm verpackt, die wiederum von einer Stahlhülle mit einer Wandstärke von 6 mm umschlossen wird. Durch die Betonumhüllung soll die Korrosion der Overpacks um mindestens 1.000 Jahre verzögert werden.

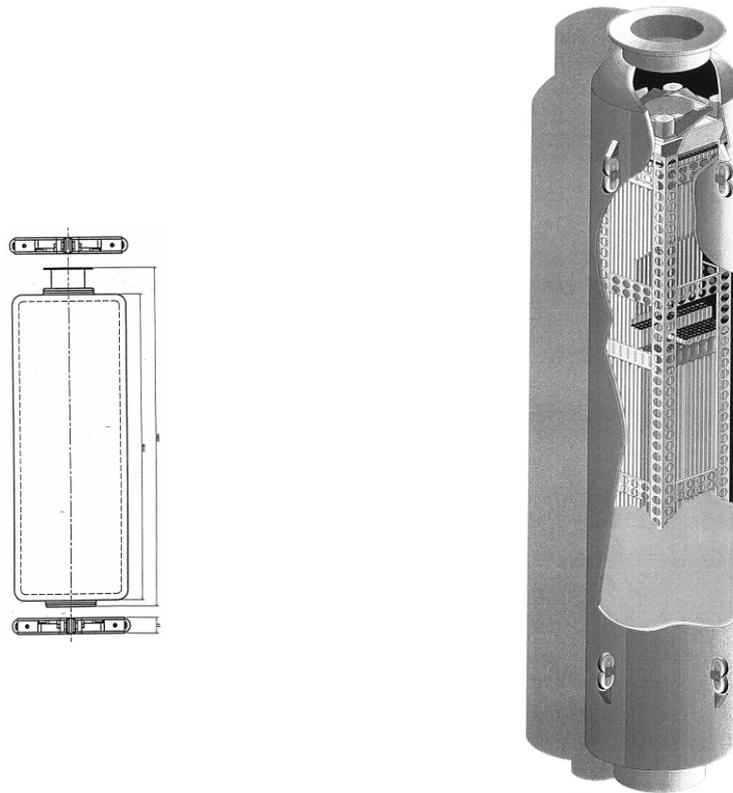


Abbildung 3-6: Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (links) und für ausgediente Brennelemente (rechts) (SAFIR-2-Konzept)

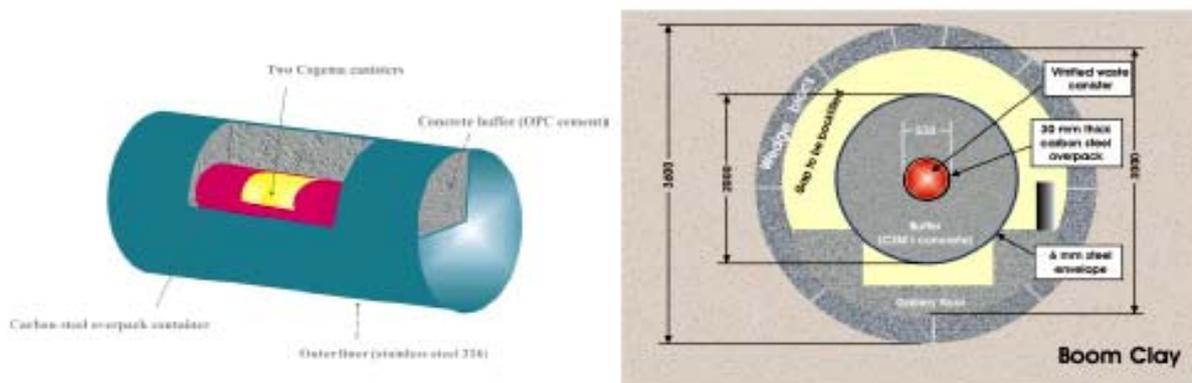


Abbildung 3-7: Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (links), Einlagerungskonzept (Supercontainer-Konzept) /3-27/

3.1.3.3 Nachweis der Funktionalität

Die Einhaltung des Temperaturkriteriums von 100°C an der Oberfläche wird durch eine entsprechende Beladung der Behälter und Abklingzeit der hochradioaktiven Abfälle bzw. Brennelemente, durch eine ausreichende Wärmeleitung des umgebenden Puffermaterials sowie den Abstand zwischen den Gebinden in der Einlagerungsstrecke sichergestellt. Der Nachweis erfolgt durch thermische Modellrechnungen.

Weiterhin wurden Versuche zur Auswahl geeigneter Füllsande, zum Verschweißen des Behälterdeckels sowie des Verschlusses der Füllöffnung und Modellrechnungen zur mechanischen Stabilität der beladenen und mit Sand gefüllten Endlagerbehälter unter Endlagerbedingungen durchgeführt /3-21/. Hierdurch wurde die Wirksamkeit der Sandfüllung und Verfahren zum endlagergerechten Verschließen der Behälter nachgewiesen.

Die Standzeit der Behälter wurde aus Ergebnissen von In-situ-Untersuchungen zur Korrosion des Behälter- und des Overpackmaterials im geochemischen Milieu des Boom Clay sowie des FoCa-Clay abgeleitet /3-19/. Bei Verwendung eines Bentonit-Puffermaterials erfolgt die Begrenzung der Behälterkorrosion vor allem durch die Vermeidung eines Lösungszutritts.

Die alternative Verwendung von Portland-Zement führt zu einem günstigen alkalischen Milieu, das die Behälterkorrosion minimiert /3-17/. Das Verhalten des Zements bei hohen Temperaturen und die Wechselwirkung mit Radionukliden wird z. Z. untersucht.

3.1.4 Verfüllen von Einlagerungsstrecken

3.1.4.1 Anforderungen

Es wurde eine Vielzahl von Anforderungen an Verfüllmaterialien für Einlagerungsstrecken festgelegt /3-4/, /3-17/:

- Thermische Eigenschaften:
 - Wärmeleitfähigkeit hoch genug ($> 1,7 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$), um einen Wärmestau zwischen Behälter und Verfüllmaterial zu vermeiden
- Hydraulische Eigenschaften:
 - geringe Durchlässigkeit für Wasser,
 - ausreichende Durchlässigkeit für Gas, um das Aufbauen eines hohen Gasdrucks durch Behälterkorrosion zu vermeiden
- Mechanische Eigenschaften:
 - Tragfähigkeit für den Behälter,
 - Plastizität zur Dämpfung von Behälterbelastungen,
 - Stabilisierung der Einlagerungsstrecke
- Chemische Eigenschaften:
 - Sorption freigesetzter Radionuklide, im Ton nur von untergeordneter Bedeutung, da das Wirtsgestein bereits sehr gute Sorptionseigenschaften aufweist
 - Gewährleistung einer günstigen Umgebung während der Standzeit des Behälters und Vermeidung des Zutritts von Lösungen zum Behälter, die zur Korrosion bzw. zur Auslaugung aus der Abfallmatrix führen könnten
 - Langzeitstabilität

- Puffereigenschaften zur Stabilisierung der Chemie der Porenflüssigkeit
- Kolloid-Filtration
- Kompatibilität mit dem Wirtgestein
- Kompatibilität mit dem Abfall
- Betriebliche Kriterien:
 - Handhabbarkeit im Normalbetrieb und bei Änderungen,
 - betriebliche Sicherheit,
 - Verfügbarkeit,
 - Kosten,
 - Strahlenschutzeigenschaften,
- Strategische Kriterien:
 - Forschungsbedarf,
 - Gesetzliche Anforderungen,
 - Erfahrung.

Im SAFIR-2-Konzept übernimmt das Verfüllmaterial sowohl die Funktion des Puffers um den Behälter wie auch die Funktion der Hohlräumverfüllung zwischen Behälter und Streckenausbau.

Im Supercontainer-Konzept sind diese beiden Funktionen getrennt: der Puffer ist Teil des Behälters und ummantelt direkt den Overpack mit HAW/BE /3-25/. Darüber hinaus ist der Resthohlraum zwischen dem Container und dem Streckenausbau mit Verfüllmaterial zu schließen. Den Anforderungen an den Puffer im Supercontainer-Konzept umfassen die Vermeidung der Behälterkorrosion, eine ausreichende Wärmeleitfähigkeit und die Rückhaltung freigesetzter Radionuklide.

Wesentliche Anforderungen an die Resthohlraumverfüllung im Supercontainer-Konzept sind:

- Eine dauerhafte mechanische Stabilisierung der Einlagerungsstrecke,
- Ein chemischer Schutz des Puffers (Erhaltung eines pH-Wertes < 12,5),
- Vermeiden eines Verlustes von Füllmaterial aus defekten BE-Behältern, und
- Kompatibilität mit dem Wirtsgestein und den anderen Barrieren.

3.1.4.2 Verfüllmaterialien

Im SAFIR-2-Konzept wurde als Verfüll- bzw. Puffermaterial in Einlagerungsstrecken ein quellfähiger Ca-Bentonit, der FoCa-Clay, favorisiert. Die Auswahl dieses Tons erfolgte auf-

grund positiver Ergebnisse bei Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit (2 W/m*K /3-3/, Boom Clay: 1,69 W/m*K) und Permeabilität (10^{-13} m/s /3-24/, Boom Clay: 10^{-12} m/s). Weiterhin besitzt der FoCa-Clay günstige Sorptionseigenschaften im Hinblick auf die Rückhaltung von Radionukliden. Der FoCa-Clay wird im Pariser Becken abgebaut und erhält sein Quellvermögen durch einen Gehalt von ca. 40 Gew.-% Beidellit (Smektit). Er ist chemisch kompatibel mit dem Boom Clay. Abhängig von der Kompaktierungsdichte kann der FoCa-Clay Quelldrücke zwischen 4 – 5 MPa entwickeln /3-24/. Durch eine Beimischung von Quarzsand zum Ton kann das Quellvermögen begrenzt werden, um den Quelldruck dem lithostatischen Druck in der Umgebung anzupassen.

Zum Verfüllen von Einlagerungsstrecken sind Blöcke aus FoCa-Clay, Sand und Graphit vorgesehen, die mit einem Druck von 61 MPa vorkompaktiert sind (im PRACLAY-Projekt Blöcke aus: 60 % FoCa-Clay, 35 % Sand und 5 % Graphit). Durch eine Zumischung von Graphit und durch eine Sättigung mit Wasser erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials bis auf 4 W/m*K. Auch eine Erhöhung der Sorption bestimmter Radionuklide bzw. die Verzögerung der Auslaugung der Abfallglasmatrix kann durch Zuschlagstoffe (z. B. Zeolite, gemahlener Granit oder Basalt) erreicht werden /3-3/, /3-16/. Alternativ zu den Bentonitblöcken wurde die Verwendung von Mischungen aus hochkompaktierten FoCa-Clay-Pellets und -Pulver untersucht /3-21/.

Im Supercontainer-Konzept wird zwischen dem Puffermaterial, das eine 70 cm starke Behälterummantelung aus Portland-Zement ist, und dem Verfüllmaterial zum Verschließen der Resthohlräume zwischen dem Behälter und dem Streckenausbau unterschieden. Im ESDRED-Projekt werden z. Z. verschiedene Verfüllmaterialien auf ihre Eignung untersucht: Sand (80 %)-Kalk (20 %)-Gemisch, Sand (95/90 %)-Zement (5/10 %)-Gemische, Na-Bentonit (MX-80) (85 %)-Zement (15 %)-Gemisch, MX-80 (75 %)-Sand(25 %)-Gemisch und reiner MX-80 /3-18/.

3.1.4.3 Technisches Konzept zur Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial

Technische Konzepte für die Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterialien in Einlagerungsstrecken werden im Zuge des ESDRED-Projektes untersucht /3-18/. Im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit ist die im Zuge des SAFIR-2-Projektes vorgesehene Verfüllung mit Bentonitblöcken wesentlich anspruchsvoller als eine Verfüllung mit zementbasiertem Material entsprechend dem Supercontainer-Konzept.

Im SAFIR-2-Projekt ist die Einlagerungsröhre(n) mit einer 70 cm starken Schicht aus vorgefertigten und vorkompaktierten Bentonitblöcken umgeben. Der 25 cm starke Streckenausbau aus Betonelementen hat keine langzeitsicherheitliche Funktion. Er dient nur der Streckenstabilisierung während der Auffahrung und dem Endlagerbetrieb. Im Unterschied hierzu ist die Bentonitverfüllung der Einlagerungsstrecken ein wesentlicher Bestandteil des geotechnischen Barrierensystems. Der Bentonit verhindert den Zutritt von Lösungen zum Behälter, stabilisiert das geochemische Milieu, stellt eine optimale Wärmeabfuhr vom Behälter sicher und kann zur Rückhaltung von Radionukliden bei Undichtwerden eines Behälters beitragen. Das Verfüllkonzept sieht vor, die Bentonitblöcke in den Einlagerungsstrecken vor dem Ein-

bringen der hochradioaktiven Abfälle zu bewässern, um so ein Quellen des Tones und ein Verschließen von Hohlräumen sowie eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit zu erreichen. Im PRACLAY-Projekt erfolgte die Bewässerung durch Wasserleitungen an der Kontur. Durch das anschließende Quellen des Tons hat sich der Hohlraum zwischen dem Streckenausbau und den Bentonitblöcken komplett geschlossen. In den Forschungsprojekten erfolgte der Einbau der Bentonitblöcke bislang manuell. Verfahren für die großtechnische Anwendung sollen in künftigen Großversuchen entwickelt werden /3-17/.

Alternativ zur Verfüllung mit Bentonitblöcken werden auch Konzepte untersucht, bei denen Bentonitblöcke mit Bentonit-Pellets und Pulver kombiniert werden oder die Verfüllung nur mit einem Gemisch aus Pellets und Pulver erfolgt /3-21/. Während die Verwendung von vorgefertigten Blöcken die Einhaltung von Qualitätsstandards erleichtert, ist eine Verfüllung mit Pellets und Pulver ist technisch einfacher (z. B. verblasen) und anpassungsfähig an alle räumlichen Konfigurationen /3-17/. Die praktische Anwendung geeigneter Einbringtechniken wird im Zuge des ESDRED-Projektes erprobt (Abbildung 3-8, /3-27/). So wurden in mehreren Versuchen unterschiedliche Arten von trockenem granularem Verfüllmaterial (Sand, Bentonit, 75/25 Mischung Bentonit/Sand, Mischungen Bentonit/Zement und Sand/Zement) in den Hohlraum zwischen dem Versuchsbehälter und die Streckenkontur verblasen. Abgesehen von der Sand/Zement-Mischung waren alle Versuche erfolgreich und haben die erforderliche Verfüllung aller Hohlräume erreicht /3-27/.



Abbildung 3-8: Test zum Einblasen trockener Verfüllmaterialien: Verblas-Fahrzeug (links und Mitte) und Vorratsbehälter der Verblasmaschine (rechts) /3-27/

Bei der Einbringung von zementbasierten Verfüllmaterialien kann auf bekannte Techniken (z. B. Pumpen) zurückgegriffen werden /3-17/. In einem Großversuch im Zuge des ESDRED-Projektes wurde beim Verfüllen mit einer Zementpumpe ein Verfüllungsgrad des ursprünglichen Hohlräume um den Behälter von fast 100 % erreicht /3-27/. Im Endlagerbetrieb ist für die Resthohlraumverfüllung der Einlagerungsstrecken vorgesehen, die Strecken in ca. 30 m lange Abschnitte zu unterteilen und durch eine Abmauerung zu verschließen. Das Zementmaterial wird über Leitungen in den Einlagerungsbereich gepumpt. Die Leitungen werden vor Aushärten des Verfüllmaterials wieder gezogen. Der Verfüllvorgang des Abschnitts soll innerhalb von 4 Tagen abgeschlossen sein /3-17/.

Für den Abschluss der Verfüllung einer Einlagerungsstrecke zur Hauptstrecke hin ist ein Betonverschluss vorgesehen /3-23/.



Abbildung 3-9: Test zur Zementverfüllung: Behältermodell mit zentralem Erhitzer (links) und Einschalung (Mitte). Nach Abschluss des Pumpversuches zeigt ein Schnitt durch das Modell die vollständige Verfüllung der Hohlräume mit Zement (rechts).

3.1.4.4 Nachweis der Funktionalität

Nachweise der Funktionalität der Verfüllmaterialien werden im Zuge von Großprojekten in Kombination mit Laboruntersuchungen erbracht. So konnte nachgewiesen werden, dass die verwendeten Herstellungsverfahren für Bentonitblöcke und für Bentonit-Pellets und Pulver auch für eine Produktion in industriellen Maßstab geeignet sind /3-4/, /3-17/. Beide Materialien erfüllen auch die betrieblichen Anforderungen an ihre Verwendung.

So konnte prinzipiell nachgewiesen werden, dass Na-Bentonite die Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises an Verfüll- und Verschlussmaterialien erfüllen (BACCHUS, RESEAL und PRACLAY-Projekte). Der konturbündige Anschluss zwischen Verfüll- und Verschlussmaterialien und der Hohlraumkontur ergibt sich durch das Quellen der Tonminerale bei der Aufsättigung mit Wasser. Die Wärmeleitfähigkeit liegt deutlich über $1,7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, die Permeabilität ist vergleichbar der des Boom-Clay und die Tonminerale besitzen ein hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide. Somit wird ein konvektiver Stofftransport verhindert und ein Stofftransport durch Diffusion begrenzt. Dies gilt auch bei einem Zutritt von Lösungen zum Endlager. In dieser Situation minimiert der Bentonit-Puffer den Transport von korrosiven Substanzen zum Endlagerbehälter und gewährleistet somit ein günstiges chemisches Umfeld bezüglich der Behälter-Korrosion.

Durch die Großversuche im Rahmen des ESDRED-Projektes wird nicht nur die technische Machbarkeit sondern auch die Funktionalität der Verfüllmaßnahmen nachgewiesen /3-27/.

3.1.5 Verfüllen von Verbindungsstrecken

3.1.5.1 Anforderungen

Aufgrund der abweichenden sicherheitstechnischen Bedeutung bestehen an das Versatzmaterial in Verbindungsstrecken die folgenden Anforderungen:

- ein rheologisches Verhalten, das die mechanische Stabilität der Strecke sicherstellt, und
- eine chemische Kompatibilität mit dem Wirtsgestein.

Eine weitere Spezifizierung der Anforderungen an das Verfüllmaterial ist noch erforderlich (z. B. die Einbaudichte oder die mechanischen Anforderungen).

3.1.5.2 Verfüllmaterialien

Die Verfüllung von Verbindungsstrecken soll mit einem Ton-Sand-Gemisch erfolgen. Das Mischungsverhältnis soll so eingestellt sein, dass nur ein geringer Quelldruck auftritt /3-4/. Eine Spezifizierung geeigneter Gemische wurde noch nicht durchgeführt. Als Tonkomponente kann der oben beschriebene FoCa-Clay oder andere Tone verwendet werden.

3.1.5.3 Technisches Konzept zur Verfüllung

Vor der Verfüllung der Haupt- und Verbindungsstrecken wird der Streckenausbau entfernt, damit das Gebirge durch die Konvergenz auf das Verfüllmaterial auflaufen kann und dieses verdichtet. Die Einbringung des Verfüllmaterials kann in Schütt-, Blas- oder Schleudertechnik erfolgen, wobei der Firstspalt durch das Einblasen von Verfüllmaterial geschlossen werden kann. Voraussetzung für die Einhaltung der mechanischen Anforderungen ist der qualitätsgesicherte Einbau des Verfüllmaterials mit vorgegebener Einbaudichte und gemäß weiterer Anforderungen.

Prinzipiell entspricht die vorgesehene Streckenverfüllung bergbautechnischen Standards. Abweichungen ergeben sich aus den endlagerspezifischen Anforderungen, die aber noch in der Entwicklung sind. Großversuche zur Streckenverfüllung wurden noch nicht durchgeführt.

3.1.5.4 Nachweis der Funktionalität

Die Kompatibilität von Ton-Sand-Gemischen mit dem Boom Clay sowie die prinzipiellen mechanischen Eigenschaften dieser Gemische wurde im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Verfüllung von Einlagerungsstrecken nachgewiesen (s. o.). Eine Bewertung der Funktionalität kann nur erfolgen, wenn ein geeignetes Mischungsverhältnis von Sand und Bentonit festgelegt wurde.

3.1.6 Verschlüsse von Strecken und Bohrlöchern

3.1.6.1 Anforderungen

Entsprechend der SAFIR-2-Studie /3-4/ bestehen an ein Verschlussbauwerk die folgenden Anforderungen:

- Der Verschluss muss so ausgelegt sein, dass er die hydraulischen Durchlässigkeit im gesamten Hohlraum begrenzt. Dabei soll die hydraulische Durchlässigkeit wenigstens der des Wirtsgesteins entsprechen.
- Der Verschluss muss dem lithostatischen Druck im umgebenden Gestein standhalten.
- Der Verschluss muss so ausgelegt sein, dass seine Langzeitstabilität und seine Permeabilität unter den hydraulischen und Gasdruckgradienten in der Größenordnung des vertikalen Druckgradienten durch das Wirtsgestein gewährleistet ist.
- Die geomechanischen Veränderungen durch die Verschlüsse müssen auf eine Wiederherstellung der ursprünglichen mechanischen Verhältnisse im Wirtsgestein abzielen.
- Die Standortwahl des Verschlusses muss die lokalen geomechanischen Verhältnisse berücksichtigen.
- Die erforderliche Standdauer des Verschlusses wird durch die Ergebnisse der Sicherheitsanalysen und allgemeine Vorgaben für die Erstellung des Endlagers bestimmt.
- Die Barriere darf nicht die Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins beeinträchtigen.
- Die Redundanz der Verschlüsse ist ein Kernelement des Schließungskonzeptes. Daher müssen wenigsten zwei Verschlüsse hintereinander in jedem Schacht und jeder Hauptstrecke errichtet werden. Weiterhin soll zur Vermeidung einer Wechselwirkung zwischen stark wärmeentwickelnden Abfällen und mäßig wärmeentwickelnden Abfällen ein weiterer Verschluss zwischen den jeweiligen Einlagerungsbereichen errichtet werden.

3.1.6.2 Verschlussmaterialien und -design

Die Verschlussbauwerke werden aus einem Dichtelement bestehen, das beidseitig durch Betonwiderlager stabilisiert wird. Die wichtigsten Eigenschaften der erforderlichen Dichtelementes sind die sehr geringe Durchlässigkeit für Gas und Wasser, um beim Undichtwerden des Schachtverschlusses einen Wasserzutritt zum Endlagerbereich zu vermeiden. Weiterhin soll der Austritt radioaktiver Gase begrenzt werden. Sicherheitsstudien haben gezeigt, dass die Radionuklidrückhaltungseigenschaften der Verschlussmaterialien für die Wirksamkeit des Endlagersystems nur von untergeordneter Bedeutung ist. Die Hauptbarriere für die Rückhaltung der Radionuklide ist das Wirtsgestein.

Ein geeignetes Dichtmaterial für Strecken- und Bohrlochverschlüsse ist der FaCa-Clay, der auch auf seine Eignung als Verfüllmaterial für die Einlagerungsstrecken untersucht wird (vgl. Kap. 3.1.4.2). Der FoCa-Clay kann in zwei unterschiedlichen Formen als Verschlussmaterial

genutzt werden: als Mischung aus quellenden Ton-Pellets und -Pulver und in Form von hochverdichteten Bentonitblöcken (RESEAL-Projekt /3-11/).

3.1.6.3 Technisches Konzept

Im RESEAL-Projekt wurde die Machbarkeit eines Schachtverschlusses aus FoCa-Clay-Pellets und Pulver demonstriert. Das technische Konzept ist aufgrund der anderen räumlichen Ausrichtung (vertikal statt horizontal) aber nicht unmittelbar auf einen Streckenverschluss übertragbar. In Strecken ist vor allem der bündige Anschluss der Barriere an die Kontur schwieriger.

Der Streckenausbau wird in dem Bereich, wo der Verschluss errichtet werden soll, demonstriert. Weiterhin wird die Auflockerungszone an der Streckenkantur entfernt. Dies ist erforderlich, um einen optimalen Kontakt zwischen dem Wirtsgestein und dem Verschluss sicherzustellen. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten an der Streckenfirste ist es schwierig, eine dichte Anbindung der Barriere zu erzielen. Die Verteilung der radialen Spannungen im Verschluss wird aufgrund der Spannungsverteilung im Gebirge und der Einwirkung des eigenen Gewichts auf die Barriere asymmetrisch sein. Es wird ein Verdichtungsverfahren eingesetzt werden, um das Dichtmaterial in die Mitte des Verschlusses einzubringen. Wahrscheinlich wird ein Verfahren mit kreisförmiger Kompaktion verwendet werden.

Im RESEAL-Projekt wurde der Verschluss eines horizontalen Bohrlochs mit vorkompaktierten Bentonitblöcken erfolgreich erprobt. Die Permeabilität des Verschlusses war dabei um den Faktor 10 niedriger als im Wirtsgestein /3-12/.

Ein Großversuch zum Nachweis der technischen Machbarkeit wurde für beide technischen Konzepte noch nicht durchgeführt.

3.1.6.4 Nachweis der Funktionalität

Da die Materialien für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken (SAFIR-2-Variante) mit dem Dichtmaterial für die Strecken- und Bohrlochverschlüsse identisch sind, können die entsprechenden Nachweise, z. B. für die Permeabilität, den Quelldruck, die mechanische Stabilität und die Kompatibilität mit dem Wirtsgestein sowie zur Herstellbarkeit und zur Anwendung hier übernommen werden.

3.1.7 Schachtverschluss

3.1.7.1 Anforderungen

An den Schachtverschluss werden folgende Hauptanforderungen gestellt:

- Die Permeabilität sollte der der Wirtformation entsprechen. Etwas höhere Werte (max. $3 \cdot 10^{-10}$ m/s) können zulässig sein, wenn die Sicherheitsanalysen zeigen, dass auch unter diesen Bedingungen die Dosis-Kriterien bzw. Risikokriterien eingehalten werden.
- Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht ist eine wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses.
- Der Verschluss des Schachtes soll den maximal zu erwartenden Gas- und Wasserdrücken in der Endlagertiefe widerstehen.
- Der Schachtverschluss muss den durch die Konvergenz der Wirtformation hervorgerufenen Spannungen widerstehen können.
- Die minimale Standzeit des Verschlusses soll zwischen einigen Tausend Jahren bis zu 100.000 Jahren liegen.

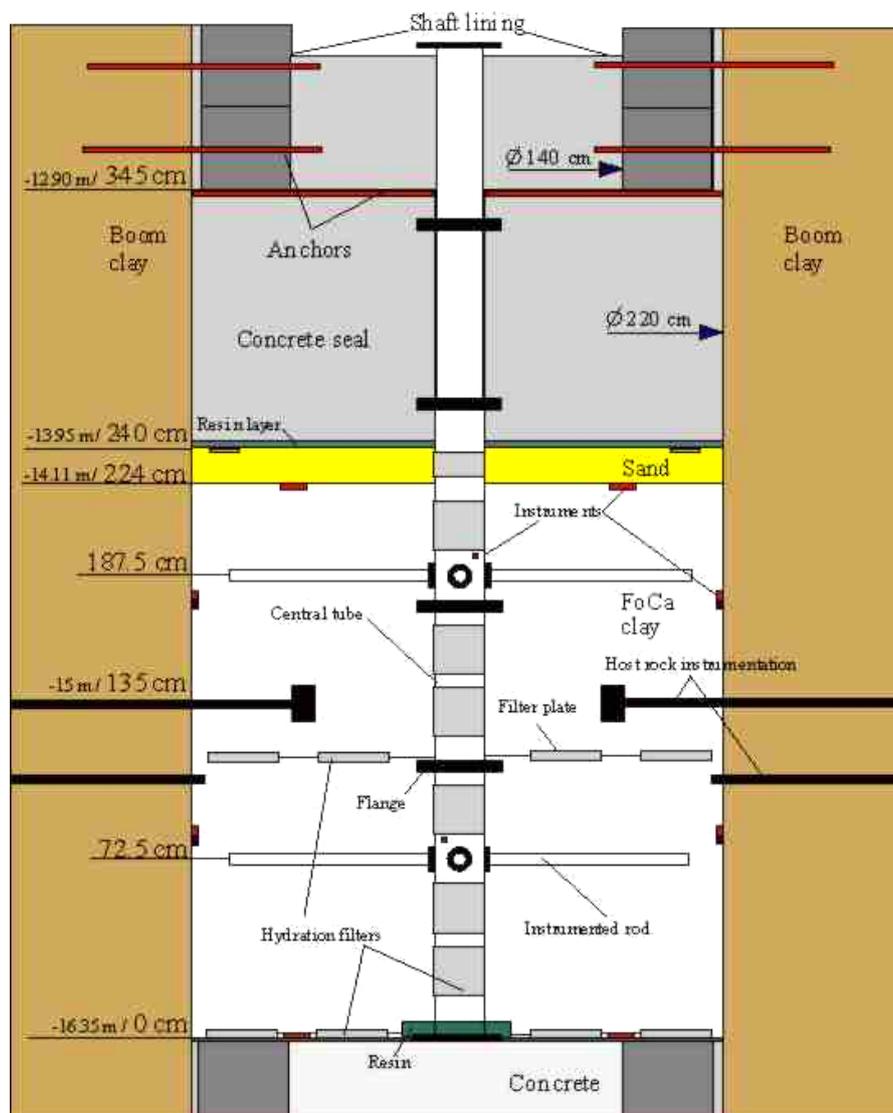


Abbildung 3-10: Versuchsaufbau des RESEAL-Projektes zur Erprobung des Einbaus eines Schachtverschlusses /3-12/

3.1.7.2 Verschlussmaterialien und -design

Das Konzept für den Schachtverschluss entspricht dem Konzept für das Verfüllen und Verschließen der Hauptstrecken. Demnach besteht der Schachtverschluss aus einem Dichtelement aus hochkompaktierten FoCa-Clay-Komponenten (Pellets/Pulver), dünnen Harzschichten unter und über dem Bentonitdichtelement sowie Betonwiderlagern über und unter dem Dichtelement (Abbildung 3-10, RESEAL-Projekt, /3-12/).

Der Rest des Schachtes wird mit Beton oder einem Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt.

3.1.7.3 Technisches Konzept

Der Einbau eines Schachtverschlusses wurde im RESEAL-Projekt erprobt /3-12/. Zunächst werden die tieferen Teile des Schachtes mit Beton oder einem Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt. Im für den Verschluss vorgesehenen Schachtbereich wird dann der Ausbau entfernt und die Auflockerungszone weggeschnitten. Anschließend wird ein Betonwiderlager gegossen, dass mit einer Harzschicht abgedichtet wird bevor ein Gemisch aus FoCa-Clay- Pellets und Pulver eingebracht wird. Das Einbringen des Bentonitmaterial erfolgt relativ einfach durch Schütttechnik. Die erforderliche Einbaudichte wird durch das Verdichten mit einer Vibrationsplatte erreicht. Am Top des Dichtelementes wurde im RESEAL-Projekt zur weiteren Abdichtung eine Harzschicht eingebracht. Zum Abschluss des Verschlusses folgt ein zusätzliches Betonwiderlager. Das Aufsättigen des Bentonits erfolgt durch das Porenwasser des angrenzenden Wirtsgesteins. Dieser Prozess verläuft allerdings sehr langsam und dauert mehrere Jahre.

3.1.7.4 Nachweis der Funktionalität

Während des RESEAL-Projekts wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, um die geomechanischen, hydraulischen (Lösungs- und Gasfluss) und hydromechanischen Eigenschaften des Dichtelementes und des umgebenden Wirtsgesteins zu bestimmen /3-12/.

Nach Abschluss der Sättigung des Dichtelementes besaß das ursprünglich heterogene Pellet/ Pulver-Gemisch eine homogene Dichte sowie einheitliche hydraulische und Quelleigenschaften. Aus dem Pulver zwischen den Pellets hatten sich keine bevorzugten Transportpfade entwickelt.

Die im Versuch nachgewiesene hydraulische Leitfähigkeit des FoCa-Clays lag eine Größenordnung unter der des Boom Clay ($1.3 \cdot 10^{-13}$ m/s); diese Leitfähigkeit kann durch eine stärkere Verdichtung des Gemisches weiter reduziert werden. Der Quelldruck betrug bei einer Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ 6.5 MPa. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der Schachtverschluss den maximal zu erwartenden Gas- und Wasserdrücken widerstehen kann.

3.2 Frankreich

3.2.1 Endlagerkonzept

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 2025 das Endlager in Betrieb gehen soll /3-28/. Das Endlager soll am Standort 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 /3-29/. Gemäß gesetzlicher Anforderung ist bei der Endlagerplanung eine mögliche Rückholung der Abfälle zu berücksichtigen /3-30/. Das Endlagerkonzept enthält daher eine Reihe von technischen Lösungen, die eine Rückholung in den einzelnen Phasen des Endlagerprozesses ermöglichen, bzw. erleichtern. Das Grundprinzip dabei ist die Reversibilität der einzelnen Einlagerungsschritte.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Betriebs- und Langzeitsicherheit des Endlagers ist die Einhaltung der festgelegten Temperaturkriterien für das Puffermaterial bzw. die Wirtsgesteinsformation. Aus entsprechenden Untersuchungen wird abgeleitet, dass eine Temperaturbelastung von ca. 100 °C über einen Zeitraum von ca. 10.000 Jahren nur geringfügige bzw. keine irreversiblen Veränderungen des Verfüllmaterials und des Wirtsgesteins hervorruft. Daher wurde festgelegt, dass an der Kontaktgrenze zwischen Puffermaterial und Tongestein eine Temperatur 90 °C nicht überschritten werden soll und dass diese Temperatur nach 100.000 Jahren unter 70 °C gesunken sein soll /3-29/.

Die Endlagerung soll in einer Teufe von ca. 500 m erfolgen, wobei die Über- und Untertageanlagen beim Referenzkonzept durch 4 Schächte miteinander verbunden werden (Abbildung 3-11) /3-29/. 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 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 von den einzulagernden Abfalltyp aus zehn bis zu einigen Hundert Endlagerungszellen 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 Detailausführung an die verschiedenen Abfallarten angepasst.

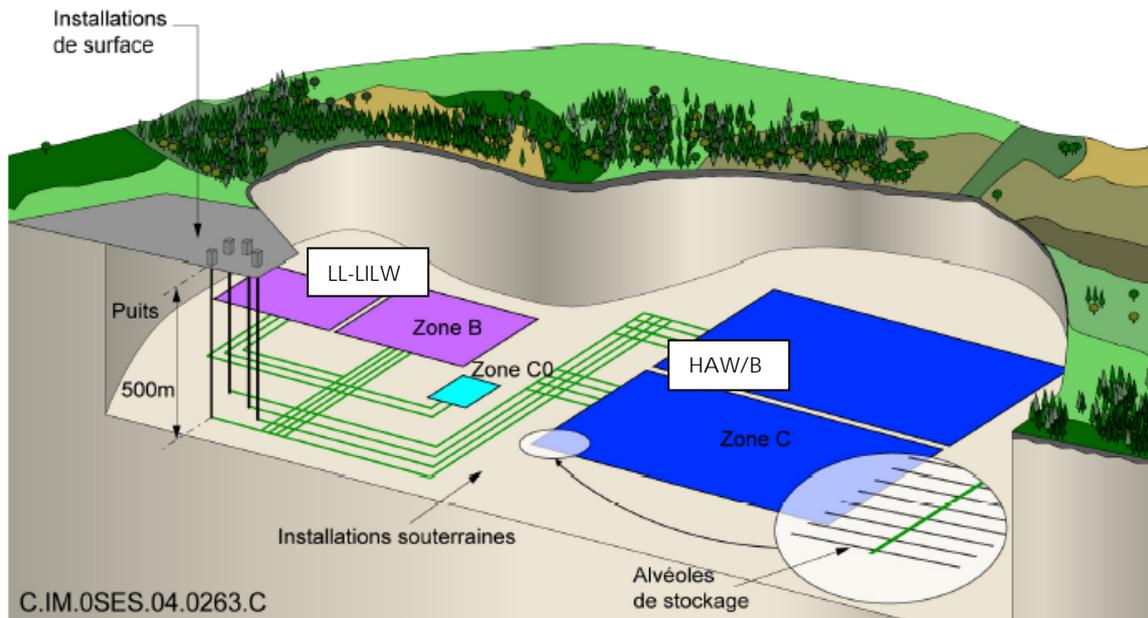


Abbildung 3-11: Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers /3-31/

Bei der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen 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 3-12). 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 Metallpfropfen und einem Bentonit-Beton-Stopfen. Der Metallpfropfen ist mit einer Keramikschicht überzogen, um galvanische Effekte beim Kontakt mit dem Gleitrohr zu vermeiden. Er soll eine eventuelle Rückholung der Gebinde erleichtern.

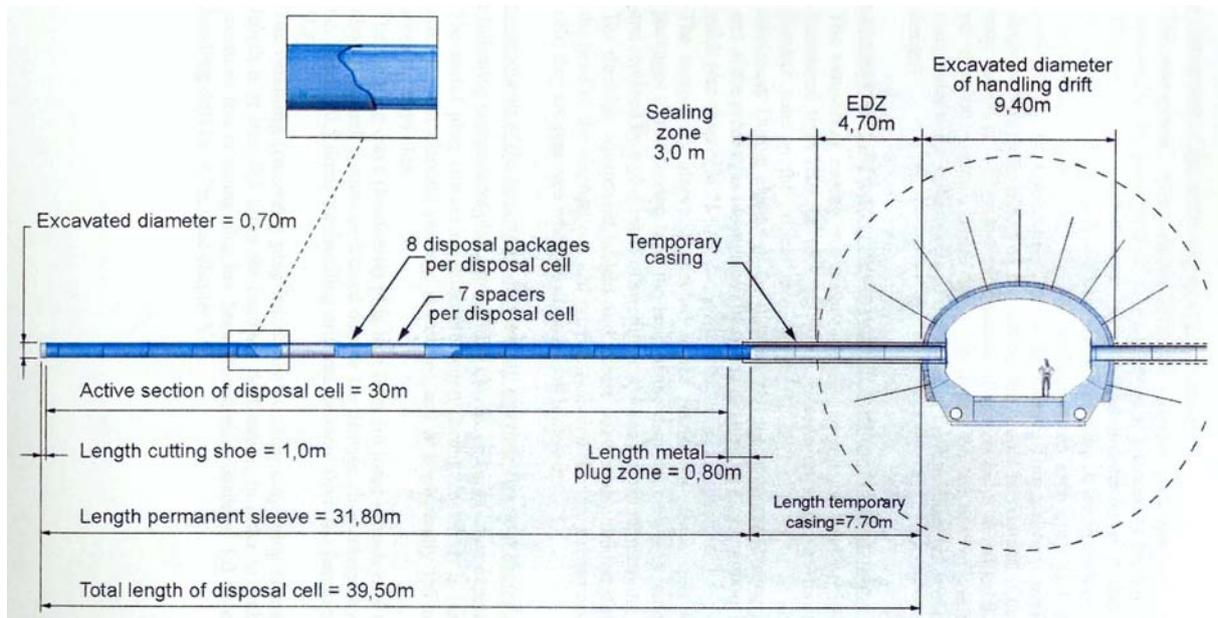


Abbildung 3-12: Einlagerungszelle für verglaste HAW /3-29/

Die Endlagerzellen für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente stellen ebenfalls horizontale Bohrungen dar, deren Abmessungen (Durchmesser 2,6 bis 3,2 m, Länge 43 bis 46 m) dem einzulagernden Brennelementtyp angepasst werden (Abbildung 3-13). Der Abstand zwischen den Bohrlochachsen variiert in Abhängigkeit von der Wärmeleistung der Gebinde zwischen 22,5 m und 24 m. Das Bohrloch ist mit einem 25 bis 30 mm starken, perforierten Metallrohr verkleidet. Durch die Perforierung soll der Zutritt von Feuchtigkeit und damit das Wiederaufsättigen des Bentonitpuffers mit Wasser ermöglicht werden.

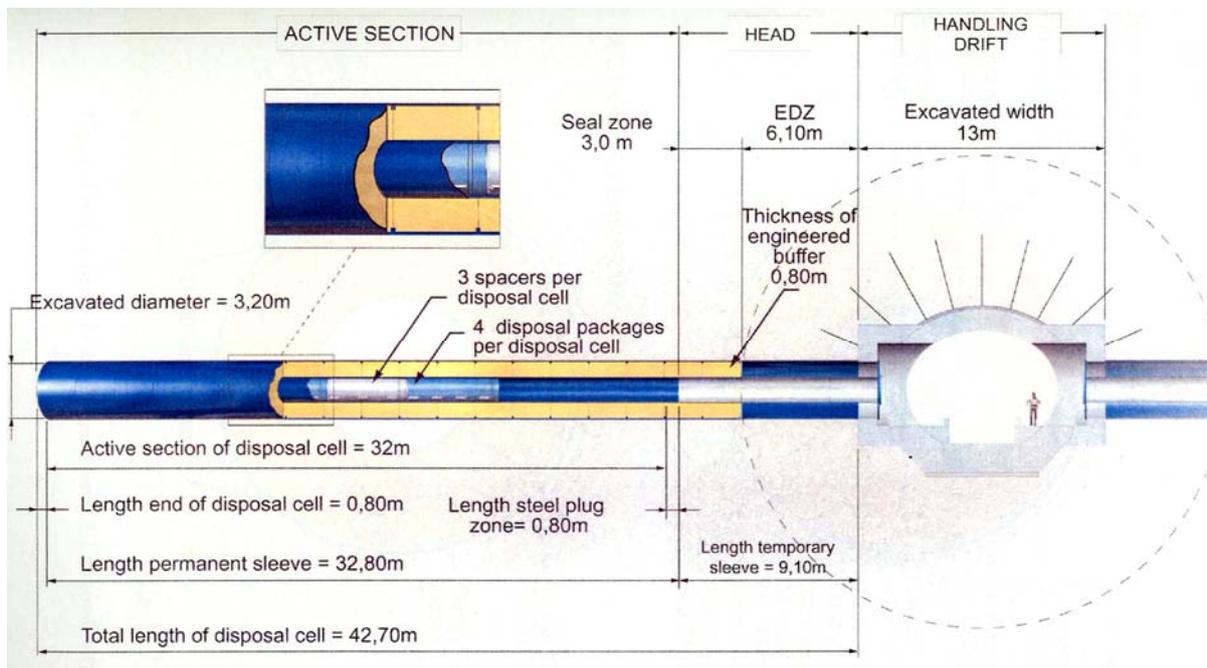


Abbildung 3-13: Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/

In das Metallrohr wird eine Bentonitauskleidung eingebracht, die aus 80 cm starken Bentonitringen zusammengesetzt wird (Abbildung 3-13). Die Bentonitringe werden aus einer Mischung mit 70 % Bentonit und 30 % Sand gefertigt. Im Innern der Bentonitauskleidung befindet sich das Einlagerungsrohr aus dem gleichen Kohlenstoffstahl, aus dem die Endlagerbehälter gefertigt werden, mit einer Wandstärke von 25 mm. Das Einlagerungsrohr soll Korrosion und Druck 1.000 Jahre lang widerstehen.

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

Das Verschlusskonzept für die befüllte Einlagerungszelle entspricht dem Konzept für verglaste Abfälle und besteht aus Bentonit, Beton und Stahlelementen.

3.2.2 Verfüll- und Verschlusskonzepte

3.2.2.1 Funktion und Design

Wie in allen Endlagern in Tongesteinen übernimmt auch im französischen Langzeitsicherheitskonzept das Wirtsgestein die Funktion der Hauptbarriere für den dauerhaften Einschluss des radioaktiven Inventars. Die Integrität der durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzten, geologischen Barriere soll durch die Züge von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen zu errichtenden technischen und geotechnischen Barrieren wiederhergestellt werden.

Die vorgesehene Schließung des Endlagers soll in mehreren Schritten ablaufen, wobei einerseits die Rückholbarkeit und andererseits das kontinuierliche Abwerfen befüllter Endlagerteile zu berücksichtigen sind. Daher laufen Endlager- und Schließungsbetrieb über weite Zeiträume parallel. Im Hinblick auf den Schließungsbetrieb des Endlagers werden das Design des Grubengebäudes und die Abläufe so gestaltet, dass die Langzeitverformung des Tons minimiert, der Grundwasserfluss begrenzt und das Endlager unterteilt wird /3-42/.

Diese Anforderungen werden durch verschiedene Maßnahmen erfüllt. So wird die Minimierung der mechanischen Deformation des Tons vor allem durch das Verfüllen der Strecken gewährleistet. Die Begrenzung des Grundwasserflusses wird durch die Errichtung von Verschlüssen erzielt. Dazu werden verschiedene Verschlussbauwerke an Punkten errichtet, die ihre Effektivität und Redundanz erhöhen und dadurch das Endlager aufteilen.

Jede Verschlussmaßnahme bildet den Teil eines schrittweisen Vorgehens im Endlagerablauf-Management. Dabei markiert jede Art von Verschlussbauwerk einen Schritt im Ablauf.

So ist es geplant, dass dem Verschluss der Einlagerungszellen die Verfüllung der Zugangsstrecke folgen wird. Wenn die entsprechenden Einlagerungszellen und Zugangsstrecken befüllt und verschlossen sind, kann entschieden werden, ob das Endlagermodul abgeworfen werden soll. Hierfür ist es erforderlich, die Verbindungsstrecken mit den anderen Endlagermodulen durch Barrieren zu verschließen.

Die letzten beiden Verschlussmaßnahmen sind die Verschlüsse der Verbindungsstrecken zwischen den Endlagermodulen und den Schächten sowie der Bau der Schachtverschlüsse. Verschlüsse, die in schachtnahen Strecken errichtet werden, unterstützen die Funktion der Schachtverschlüsse.

Bergbau-Erfahrungen haben gezeigt, dass verfüllte oder verschlossene Strecken wieder aufgewältigt werden können, sofern Vorkehrungen getroffen werden, um die Integrität des Streckenausbaus wiederherzustellen, wenn ein Teil der Strecke freigeräumt wurde.

3.2.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion

Ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion wurde noch nicht entwickelt. Dies hängt mit dem konzeptuellen Stand der meisten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen zusammen. Die Anforderungen an die meisten Maßnahmen sind noch qualitativ oder semiquantitativ. Eine Konkretisierung und Spezifizierung wird mit dem weiteren Fortschritt der Arbeiten erfolgen.

Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und Funktionalität der Schließungsmaßnahmen konzentrieren sich momentan auf die Verschlussbauwerke, die in sehr ähnlicher Form für Einlagerungsstrecken, Verbindungsstrecken und Schächte vorgesehen sind /3-29/. Weiterhin ist die ANDRA auch an internationalen FuE-Projekten (z. B. ESDRED) zur Endlagerung in Ton beteiligt und kooperiert mit einer Vielzahl von Endlagergesellschaften (z. B. ONDRAF-NIRAS, NAGRA). Da auch bei Endlagerkonzepten für Kristallingesteine auf Bentonitbarrieren zurückgegriffen wird, können die hier gewonnenen Erfahrungen teilweise ebenfalls verwendet werden.

An Hand der vorliegenden Daten werden Rechenmodelle validiert und verifiziert, die künftig die Modellierung der Prozesse in den Barrieren und ihrem Umfeld erlauben. Die Identifizierung sensibler und kritischer Parameter und die Festlegung spezifischer Grenz- bzw. Zielwerte ist aber für das französische Konzept noch nicht abgeschlossen.

3.2.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

Der von der ANDRA erstellte Sicherheitsnachweis /3-34/ entspricht dem entsprechenden international akzeptierten Stand von Wissenschaft und Technik. Er basiert auf den Hauptelementen „Eingangsrößen und Randbedingungen“ (Abfallaufkommen, Regelwerk, Standort/Geosynthese, Forschungsergebnisse etc.), „Funktionsanalyse incl. Festlegung von Sicherheitsfunktionen“, „Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung“ sowie „Sicherheitsbewertung“ incl. der Szenarienentwicklung, Modellrechnungen und Unsicherheitsbetrachtungen. Im letzten genannten Schritt wird analysiert, ob das gewählte Endlagerkonzept den Anforderungen an den Schutz der Menschen und der Umwelt über die gesamte Dauer der Existenz des Endlagers gerecht wird. Für diesen Nachweis werden sowohl qualitative als auch quantitative Sicherheitsanalysen vorgenommen.

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

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

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

Es werden zwei Kategorien von Szenarien betrachtet:

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

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

- Phänomene, die zu einer Unterbewertung der berechneten Exposition führen können, müssen berücksichtigt werden.
- Die Parametrisierung der relevanten Phänomene muss konservativ sein.
- Die Modelle müssen, wenn auch in vereinfachter Form, auf Daten basieren, die auf identifizierten Prozessen oder physikalischen Aspekten beruhen.
- Die Modelle müssen durch eine komplexe phänomenologische Darstellung untermauert sein, die die getroffenen Vereinfachungen und angenommenen konservativen Parameter abstützt.

Grundlage für die qualitativen Langzeitsicherheitsanalysen ist die Referenzentwicklung, die basierend auf den Entwicklungen in der Vergangenheit sowie durch Analogie- und Plausibilitätsschlüsse eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung beschreibt. Entsprechend den Ungewissheiten bezüglich der künftigen Entwicklung werden dabei für alle relevanten Prozesse Bandbreiten angenommen.

In einem weiteren Schritt wurden folgende alternative Szenarien betrachtet:

- Defekt einer oder mehrerer geotechnischer Barrieren,
- Defekt mehrerer Endlagerbehälter infolge Herstellungsfehlers,
- Human Intrusion: Erkundungsbohrung von der Oberfläche in eine Endlagerzelle,
- Sehr ungünstige Entwicklung (alle Sicherheitsfunktionen reduziert).

Bei der Bewertung der Einhaltung der Schutzziele werden neben den berechneten Schadstofffreisetzungen auch weitere Sicherheitsindikatoren sowie Modellkonservativitäten berücksichtigt.

Eine wesentliche Grundlage für den Sicherheitsnachweis liefert die umfangreiche Forschungstätigkeit im Bereich des Untertagelabors in Bure (Meuse / Haute-Marne), in der die für die Endlagerung relevanten Wirtsgesteinseigenschaften und Prozesse sowie Auswirkungen bergbaulicher Aktivitäten und der Endlagerung untersucht werden. Wichtige Programme sind:

- **SUG** (Scientific survey during drift opening): Geologische Untersuchungen beim Auffahren der Strecken
- **GIS** (In situ geomechanical characterisation of argillite): In situ-Untersuchungen des geomechanischen Verhaltens des Tons
- **REP** (Hydromechanical response of argillite to shaft sinking): hydromechanisches Verhalten des Tons beim Schachtteufen
- **REG** (Hydromechanical response of argillite to drift opening): hydromechanisches Verhalten des Tons beim Streckenvortrieb
- **TER** (Argillite response to thermal constraints): thermische Eigenschaften des Tons
- **PEP** (Permeability and porewater pressure): Permeabilität und Porenwasserdruck des Tons
- **PAC** (Water sampling for chemical and isotopic analyses): Analyse der Chemie und der Isotopenzusammensetzung von Wässern im Ton
- **DIR** (Characterisation of diffusion and retention in argillites): Diffusion und Rückhaltung von Tracern im Ton

Weitere Forschungsprogramme laufen gemeinsam mit ONDRAF/NIRAS und NAGRA in den Untertagelaboren in Mol (Belgien) und in Mont Terri (Schweiz).

3.2.3 Behälter

3.2.3.1 Anforderungen an die Endlagergebäude

HAW-Gebäude

Die Primärbehälter der Abfälle sind entsprechend betrieblichen Erfordernissen ausgelegt und erfüllen daher nicht die Anforderungen, die sich im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ergeben. Das Erfordernis von Endlagerbehältern ergibt sich aus phänomenologischen Aspekten der thermischen Phase während der die Temperatur nach Erreichen des Maximums kontinuierlich abfällt. Die dabei auftretenden Phänomene verstärken Umwandlungen der Glasmatrix, beeinflussen das Verhalten eingeschlossener Radionuklide und schwächen den Primärbehälter in Hinblick auf die Korrosion /3-33/.

Bezüglich der Umwandlung der Matrix berücksichtigen Glaslösungsmodelle eine Kontrolle der Prozesskinetik durch Silizium-Lösung und eine parallel dazu ablaufende Radionuklidfreisetzung. Die Lösungsgeschwindigkeit erhöht sich dabei mit zunehmender Temperatur. Bezüglich dem Verhalten der Radionuklide müssen die thermomechanischen Phänomene beherrscht werden, die das chemische Gleichgewicht steuern. Die vorhandene Datenbasis umfasst aber nur einen Temperaturbereich bis 80°C. Neben der Löslichkeit sind auch die Sorption an feste Oberflächen und der Stofftransport im Wasser durch Diffusion temperaturabhängig. So erhöht sich die Diffusionsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur.

Alle genannten Phänomene sind an einen Kontakt des Abfalls mit Wasser gebunden. Das Auftreten von Kondenswasser aus den Tonen kann in den Einlagerungszellen langfristig nicht ausgeschlossen werden. Bei dem Kontakt mit einem Behälter kann es durch die hohe Radioaktivität der Abfälle zur Radiolyse und einem hohen Oxidationspotential kommen. Durch die einsetzende Korrosion kann der Behälter schließlich undicht werden und die eindringende Lösung kann zu einer Zusetzung der Gasmatrix mit den Radionukliden führen.

Auf Grund der Temperatursensitivität der Glasmatrix, der relativen Unsicherheit des Radionuklidverhaltens bei Temperaturen über 80°C und dem Korrosionsrisiko für den Primärbehälter wurde ein Endlagerbehälter als Overpack vorgesehen, der einen Wasserzutritt zur Glasmatrix während der thermischen Phase (1.000 Jahre) verhindern soll. Um diese Schutzfunktion erfüllen zu können, muss die Behälterwand so dimensioniert sein, dass sie der Korrosion über den vorgesehenen Zeitraum widerstehen kann. Weiterhin muss der Endlagerbehälter einen Außendruck von 12 MPa tolerieren. Entsprechend der Temperaturbegrenzung für das Wirtsgestein wird der Endlagerbehälter auf eine Temperatur von max. 100°C ausgelegt.

Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Das Erfordernis der Wasserdichtheit und der Langzeitstabilität zur Vermeidung einer Korrosion des Behälterinventars gilt auch für Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente. Entsprechend dem langsameren Temperaturabklingverhalten der Brennelemente beträgt die

erforderliche Standzeit in diesem Fall aber 10.000 Jahre. Wichtig ist, dass das Design des Endlagerbehälters die Kritikalitätssicherheit auch langfristig sicherstellt.

3.2.3.2 Gebindematerialien und -design

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht in Abhängigkeit von den physikalisch-chemischen Kenndaten der Abfälle, der Abfallkonditionierung, der Kritikalität, der Wärmeleistung und der Gaserzeugung mehrere Behältertypen vor.

Verglaste HAW

Für verglaste HAW werden 7 Primärbehältertypen vorgesehen (C01 bis C0.2 und C1 bis C4). Die Maße schwanken zwischen 0,57 und 1,34 m (Länge) sowie 0,39 und 0,50 m (Durchmesser). Alle Behälter sind aus rostfreiem Stahl gefertigt, werden – mit Ausnahme der C0.1 Behälter – mit einem verschweißten Deckel verschlossen und sind wasserdicht.

Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter beträgt ca. 500 kg, der gefüllte, kleinere C0.1 Behälter wiegt 90 kg. Die Zwischenlagerzeit der Behälter ist in Abhängigkeit von der Wärmeleistung zwischen 20 Jahren (C0) und 70 Jahren (C3/4) gestaffelt.

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in 3 verschiedene Typen von Endlagerbehältern aus nichtlegiertem Stahl (Typ P235) verpackt werden (Abbildung 3-14). Die Abmessungen dieser Behälter schwanken zwischen 0,59 bis 0,66 m (Durchmesser) und 1,34 und 1,65 m (Länge). Das Gewicht liegt zwischen 1,7 und 2,0 t. An der Außenseite der Behälter sind keramische Gleiter angebracht.

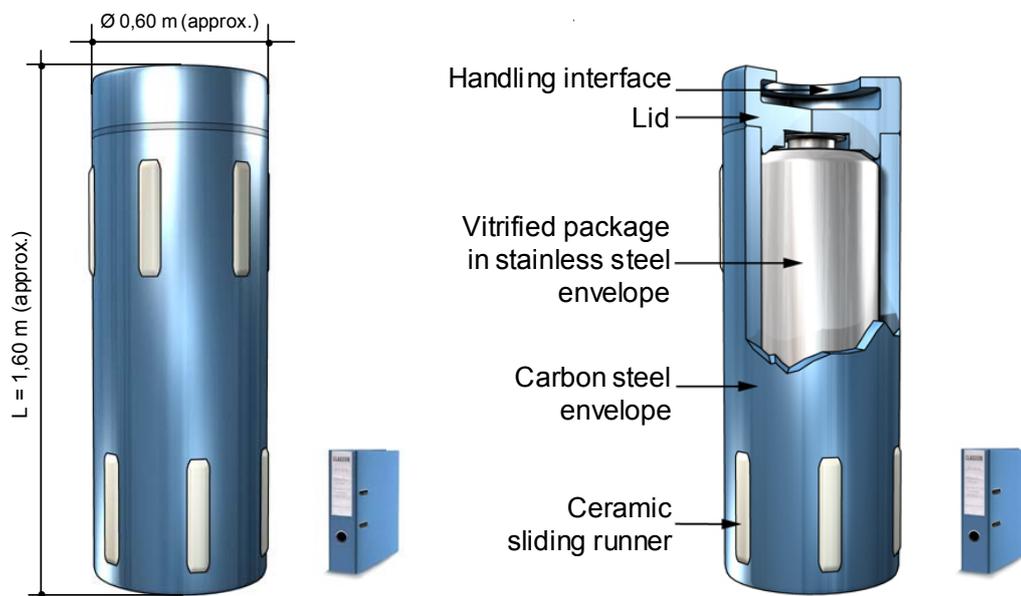


Abbildung 3-14: Typischer Endlagercontainer für verglaste hochaktive Abfälle /3-29/

Ausgediente Brennelemente

Entsprechend den verschiedenen Brennelementtypen sind 5 Primärbehältertypen für ausgediente Brennelemente vorgesehen. Die Primärbehälter sollen mit Helium gefüllt werden, um die Wärmeabfuhr der Brennelemente zu erhöhen. Die Wärmeleistung eines Behälters mit Uranoxid- und Natururanoxid-Brennelementen beträgt nach 60 Jahren Abklinglagerung ca. 1400 W bis 1600 W und fällt nach 1000 Jahren auf ca. 180 W ab.

Die MOX-Brennelemente werden einzeln verpackt. Die Wärmeentwicklung eines entsprechenden Behälters beträgt nach 90 Jahren Abklingzeit ca. 1100 W und verringert sich auf ca. 200 W nach 1000 Jahren.

Die Primärbehälter mit den ausgedienten Brennelementen sollen in zwei Endlagerbehältertypen verpackt werden. Alternativ ist auch ein direktes Umladen der Brennelemente in die Endlagerbehälter möglich. Ein kleinerer Behälter mit 0,6 m Durchmesser und 4,5 bzw. 5,4 m Länge ist für MOX-Brennelemente und UO₂-Brennelemente mit höherer Wärmeleistung vorgesehen. Alle anderen Brennelemente kommen in Behälter mit einem Durchmesser von 1,26 m und einer Länge von 4,5 bis 5,4 m (Abbildung 3-15). An der Außenseite der Behälter sind keramische Gleiter angebracht. Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Ausschluss eines Kontaktes der Brennelemente mit Wasser während des Zeitraumes von 10.000 Jahren, in dem die Temperatur der Behälter über 80 °C liegt. Weiterhin muss der Behälter einem Außendruck von 19 MPa widerstehen.

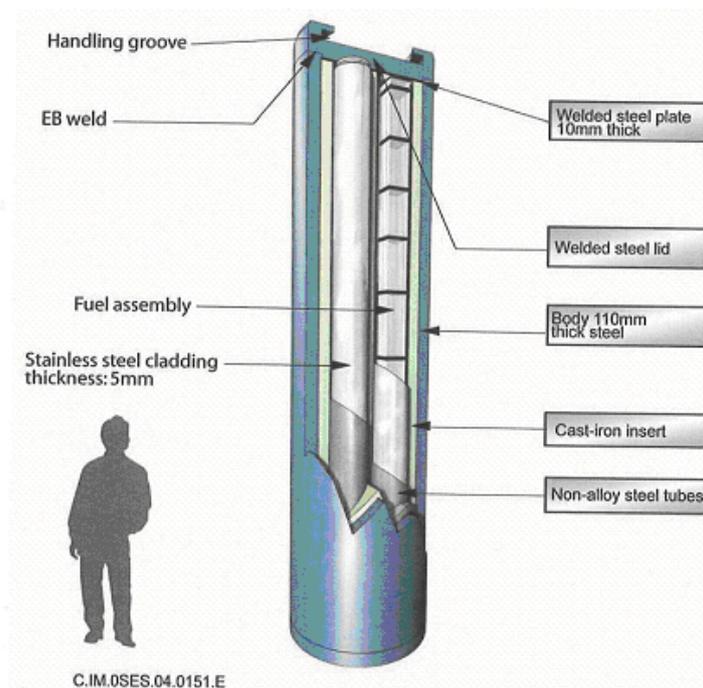


Abbildung 3-15: Endlagerbehälter für vier Uranoxid-Brennelemente /3-29/

3.2.3.3 Nachweis der Funktionalität

Die Auswahl eines unlegierten Stahls für die Endlagerbehälter sowohl für verglaste Abfälle wie auch für ausgediente Brennelemente ergibt sich aus den umfangreichen Erfahrungen bei der Bearbeitung, beim Schweißen und im Hinblick auf die Korrosion dieses Materials. Weiterhin ist der Korrosionsprozess sehr gut prognostizierbar.

Die Korrosion des Stahls in Wasser wird aufgrund umfangreicher Versuche gut verstanden und kann durch Modelle gut abgebildet und prognostiziert werden. Mittel- und langfristig ist die großflächige Korrosion der wesentliche Prozess, dessen Geschwindigkeit durch validierte Modelle abgeleitet werden kann. Die vor allem bei Anwesenheit von Sauerstoff auftretende lokale Korrosion durch Rostfraß verliert längerfristig rascher an Bedeutung als die großflächige Korrosion. Schließlich ist das Risiko spezifischer Korrosion durch spannungs- oder wasserstoffinduzierte Rissbildung gering im Vergleich zu anderen Korrosionsmechanismen. Archäologische Analoga mit einem Alter von mehr als 2.000 Jahren bestätigten die Bewertung korrosiver Prozesse und belegen die Dauerhaftigkeit von Stahl über bedeutende Zeiträume /3-35/. Da die Modelle zur Stahlkorrosion im Hinblick auf die Wasserchemie tolerant sind, erfordern sie eine geringere Genauigkeit bei der Angabe der Umweltbedingungen. Außerdem sind sie im Hinblick auf die Zusammensetzung des Metalls, seinen strukturellen Status und die Oberflächenverhältnisse wenig empfindlich. Dies begrenzt das Risiko, dass daraus folgende Fehler besonders im Bereich der Schweißnaht die Dichtheit und Beständigkeit des Behälters verschlechtern.

Praktische Erfahrungen zeigen außerdem, dass sich nicht legierte Stähle problemlos und mit sehr gutem Ergebnis schweißen lassen. Z. Z. wird das Elektronenstrahl-Schweißverfahren in Vakuum für das Schweißen des Behälterdeckels und -bodens bevorzugt. Dieses Verfahren wurde im industriellen Maßstab an dicken Metallkörpern erprobt. Bezüglich der Qualität der erzeugten Schweißnaht hat die thermisch beeinträchtigte Zone (TAZ) nur eine geringe Ausdehnung, was auch aufzeigt, dass die TAZ metallurgische Qualitäten ähnlich dem Ausgangsmaterial aufweist. Das Vacuum-Schweißen reduziert das Risiko von Kälterissen.

3.2.4 Verfüllen und Verschluss von Einlagerungszellen

3.2.4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Maßnahmen für das Verfüllen und den Verschluss der Einlagerungsstrecken umfassen im Wesentlichen vier Punkte /3-29/:

- Die Wärmeabfuhr aus den Abfallgebinden (bei Verwendung von Puffermaterial),
- das Herstellen / Stabilisieren günstiger physikalisch-chemischer Umweltbedingungen,
- die Kontrolle hydraulischer Phänomene, und
- die mechanische Stabilisierung der Einlagerungszelle.

Um mineralogische Umwandlungen der Tonminerale zu vermeiden, soll die Temperatur in den Einlagerungszellen und im Wirtsgestein 100°C nicht überschreiten. Oberhalb dieser Temperatur sind die resultierenden Phänomene und ihre Wechselwirkungen komplexer und nicht vollständig verstanden. Tonminerale verlieren bei mineralogischen Umwandlungen vieler ihrer günstigen Eigenschaften, müssen derartige Umkristallisationen infolge langzeitiger Wärmeinwirkung verhindert werden. Aufgrund von Versuchen im Untertagelabor in Bure /3-33/ wurde als zusätzliche Anforderung abgeleitet, dass die Temperatur nach 1.000 Jahren unter 70°C sinken soll.

Eine weitere Anforderung an das Verfüllmaterial ist eine Stabilisierung der physikochemischen Umweltbedingungen in einem Milieu, das die Korrosion des Endlagerbehälters und der Abfallmatrix begrenzt.

Wasserzirkulation ist einerseits für die Behälter- und Abfallkorrosion und andererseits für einen Radionuklidtransport verantwortlich. In den blinden Bohrlöchern der Einlagerungszellen treten keine Druckhöhenunterschiede auf, so dass der sehr geringe, natürliche Wasserfluss in der Wirtsgestein das einzige relevante hydraulische Phänomen ist. Nach Abschluss der Wiederaufsättigung des Verfüllmaterials mit Wasser stellen sich wieder die natürlichen hydraulischen Verhältnisse ein. Der über die Zugangsstrecken fließende Wasseranteil soll durch die Verwendung eines Verfüllmaterials mit geringer Permeabilitäten sehr stark begrenzt sein. Die Permeabilität soll gleich oder niedriger als im angrenzten Wirtsgestein sein.

Darüber hinaus sollen freigesetzte Radionuklide durch Sorptionseigenschaften des Verfüllmaterials zurückgehalten werden.

Die Auswirkungen der Gasbildung auf das Verfüllmaterial und das Wirtsgestein hängen in erster Linie von der Korrosionsrate ab. Ist die Korrosion gering, so befinden sich Gasbildungsrate und Migrationsgeschwindigkeit im Gleichgewicht und das Verfüllmaterial wird nicht beeinträchtigt. Liegt die Gasbildungsrate höher, so kann es zur Bildung von Mikrorissen im Verfüllmaterial kommen.

Das quellfähige Tonmaterial des Dichteelementes soll während der Wiederaufsättigung mit Wasser einen Quelldruck von 1 bis max. 13 MPa (ab dieser Größe entstehen Spannungsrisse im Wirtsgestein) entwickeln. Angestrebt werden sollen Drucke unter 7 MPa, die den geostatischen Drücken des Wirtsgesteins in 500 m Tiefe entsprechen.

Die gesetzlich geforderte Rückholungsoption erfordert eine Integrität der Einlagerungsbehälter sowie aller Einbauten der Einlagerungszellen über einige Hundert Jahre.

Puffer und Verschlussmaterialien

HAW-Einlagerungszelle

Die Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle werden in eine Einlagerungsröhre ohne Puffermaterial unmittelbar eingeführt. Der Verschluss der Einlagerungszellen erfolgt durch

einen Metallverschluss (Strahlenschutz während des Betriebes), ein 3 m langes Dichtelement aus quellfähigem Ton sowie einen Betonverschluss (Abbildung 3-16). Die Permeabilität des Dichtelementes soll so niedrig wie möglich sein. Die Gesamtdurchlässigkeit der Dichtung wird von 3 Faktoren bestimmt: die Auflockerungszone des angrenzenden Wirtsgesteins, die Durchlässigkeit des Verschlusses und die Kontaktzone zwischen Wirtsgestein und Verschluss.

Die Auflockerungszone im Bereich der Einlagerungszelle wird durch die Ausrichtung parallel zur Hauptspannung des Wirtsgesteins, eine schonende Auffahrtstechnik und eine Positionierung des Dichtelementes außerhalb der Auflockerungszone der Zugangsstrecke minimiert. Versuche haben gezeigt, dass die Permeabilität des Wirtsgesteins unter diesen Bedingungen im Umfeld der Einlagerungszelle bei $5 \cdot 10^{-11}$ m/s liegt. Durch Materialkriechen werden sich in der Folgezeit die Mikrorisse wieder schließen und die Permeabilität weiter reduzieren.

Für das Dichtelement wird als Baumaterial Bentonit vom MX80-Typ (oder vergleichbares Material) vorgesehen. Gründe für die Materialwahl sind die Plastizität (bis zu einer Sandzumischung von 50 %), die geringe Permeabilität, das Quellvermögen, die ausreichende Wärmeleitfähigkeit (1,5 W aufgesättigt), das Sorptionsvermögen für Radionuklide und die Kompatibilität mit dem Wirtsgestein. Bei Versuchen mit einem Gemisch aus 80 % Kunigel-Bentonit und 20 % Sand wurde eine Permeabilität von 10^{-11} m/s nachgewiesen. Nach einer Wiederaufsättigung des Tons schließen sich die Mikrorisse im Material durch das Quellen und Materialkriechen wieder und die Permeabilität sinkt bis auf Werte von ca. 10^{-12} m/s. Somit liegt die Permeabilität des Dichtelementes geringfügig unter der Permeabilität des Wirtsgesteines. Noch geringere Permeabilitäten sind bei Verwendung anderer Bentonit-Typen (z. B. MS80) und bei höherer Verdichtung möglich.

Der potentielle Quelldruck wächst mit der mittleren Trockendichte des Tons. Der Quelldruck des Materials für das Dichtelement wird durch Beimischung von Sand auf wenige MPa eingestellt werden. Dadurch wird die Einlagerungszelle mechanisch stabilisiert und die Durchlässigkeit an der Kontaktfläche zwischen Dichtelement und Wirtsgestein minimiert.

Der vordere Teil der Einlagerungszelle wird durch ein Betonwiderlager abgeschlossen.

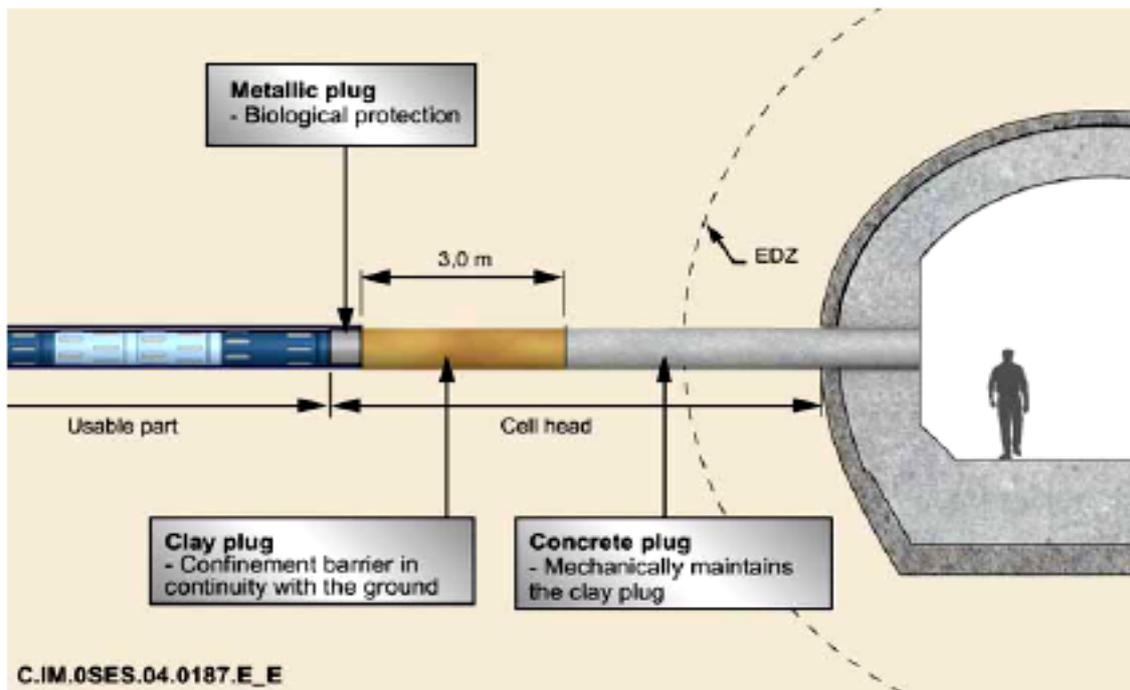


Abbildung 3-16: Verschlusskonzept für eine HAW-Einlagerungszelle /3-29/

Einlagerungszelle für ausgediente Brennelemente

Im Unterschied zur HAW-Einlagerungszelle wird bei der Einlagerung ausgedienter Brennelemente in den perforierten Außenliner zunächst ein 0,8 cm starker Bentonitpuffer eingebracht, der die Einlagerungsröhre umschließt, in die die Endlagerbehälter eingebracht werden (Abbildung 3-17). Der Bentonitpuffer besteht aus vorgefertigten Bentonitringen, die mit einem Druck von 80 MPa kompaktiert wurden und aus 70 % MX80-Bentonit und 30 % Sand mit einem Wassergehalt von 12 % bestehen. Das kompaktierte Material hat eine Rohdichte von ca. 2,2 g/cm³ /3-43/. Die Permeabilität bleibt trotz der Sandzumischung unter 10⁻¹³ m/s. Der Quelldruck des Puffers wird durch die Mischung auf 1 bis 7 MPa begrenzt.

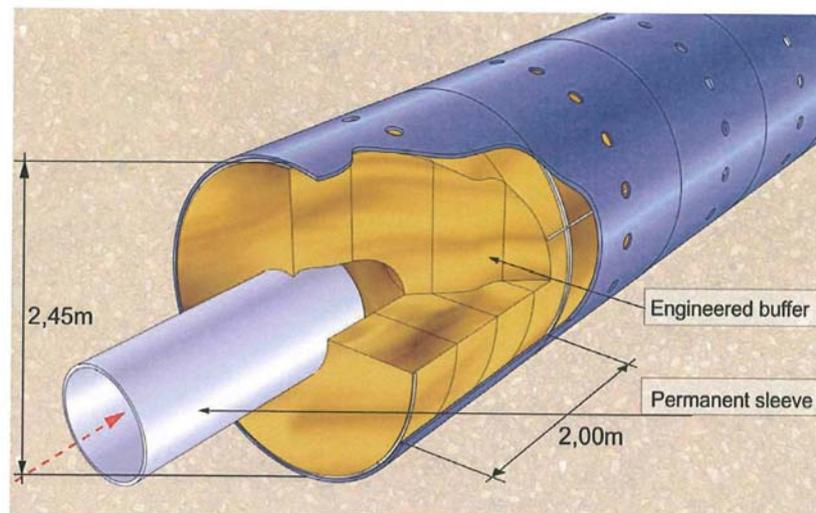


Abbildung 3-17: Schematischer Aufbau einer Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/

3.2.4.2 Technisches Konzept zum Verschluss der Einlagerungszellen

HAW-Einlagerungszelle

Nachdem die Einlagerungsröhre mit Abfallgebinden gefüllt ist, wird das Ende des Rohres aus Strahlenschutzgründen mit einem 0,35 m starken Metallstopfen verschlossen. Der Stopfen ist mit einer Keramikschicht versehen, um eine Kontaktkorrosion zu vermeiden und die Rückholbarkeit der Endlagerbehälter zu erleichtern. Für die Einbringung des Stopfens wird ein Einlagerungsroboter verwendet.

Anschließend wird die zeitweilige Stahlauskleidung im Anfangsbereich der Zelle entfernt, die für die Einlagerungsoperation erforderlich war. Dadurch ist im Bereich des 3 m langen Dichtelementes ein direkter Kontakt zwischen Wirtsgestein und Dichtmaterial möglich. Aufgrund der geringen Stabilität des Wirtsgesteins nach Entfernen des Ausbaus muss das Tonmaterial in Form von vorgefertigten, hochkompaktierten Blöcken oder einem Gemisch aus Pellets und Pulver eingebracht werden. Da das Pellet/Pulver-Gemisch – im Unterschied zu den Blöcken – in die Bohrungen konturbündig eingebracht werden kann, wird diese Option zur Erstellung des Dichtelementes in den Bohrlöchern bevorzugt. Die Einbringung des Materials kann entweder pneumatisch oder mit einer Förderschnecke erfolgen. Abschließend wird das Material mit einem Kolben mechanisch verdichtet. Dieser Bentonitstopfen hat für eine Zeitspanne von 1.000 bis 10^6 Jahren die Hauptbarrierefunktion in diesem Bereich der Einlagerungszelle.

Der restliche Bereich der Einlagerungszelle bis zur Zugangsstrecke wird mit Beton ausgegossen. Die Einbringung von Spritzbeton wird z. Z. im Rahmen des ESDRED-Projektes in einem Großversuch erprobt. Dieser Betonverschluss hat in der Anfangsphase die Funktion, eine Verformung des Bentonitstopfens zu verhindern und dient nach der Sättigung des Ben-

tonits als mechanischer Einschluss des Bentonits und Permeabilitätsbarriere. Die Zeitdauer der Barrierenwirkung dieses Verschlusses wird auf ca. 10^6 Jahre geschätzt.

Einlagerungszelle für ausgediente Brennelemente

In den Einlagerungszellen für ausgediente Brennelemente ist das Einlagerungsrohr mit einem Bentonitpuffer umgeben, der aus vorgefertigten Ringen mit einem Gewicht von jeweils ca. 5 t besteht. Sie werden in Paketen zu jeweils vier Ringen zusammengefügt und mit Hilfe einer Schubeinrichtung mit Luftkissenfahrwerk in die Bohrlöcher geschoben. Am Kopf der Einlagerungszelle sind über den letzten Behälter hinaus noch Bentonitringe auf 3 m Länge positioniert, die als Dichtelement für den Verschluss vorgesehen sind. Bis zur Zugangsstrecke schließen sich als Rückhaltebarriere für das quellende Puffermaterial Bentonringe an. Nach Abschluss der Einlagerung wird der temporäre vordere Teil der Einlagerungsrohre gezogen und das verbleibende Bohrloch in der gleichen Weise verschlossen, wie das Bohrloch der HAW-Einlagerungszelle (Abbildung 3-18).

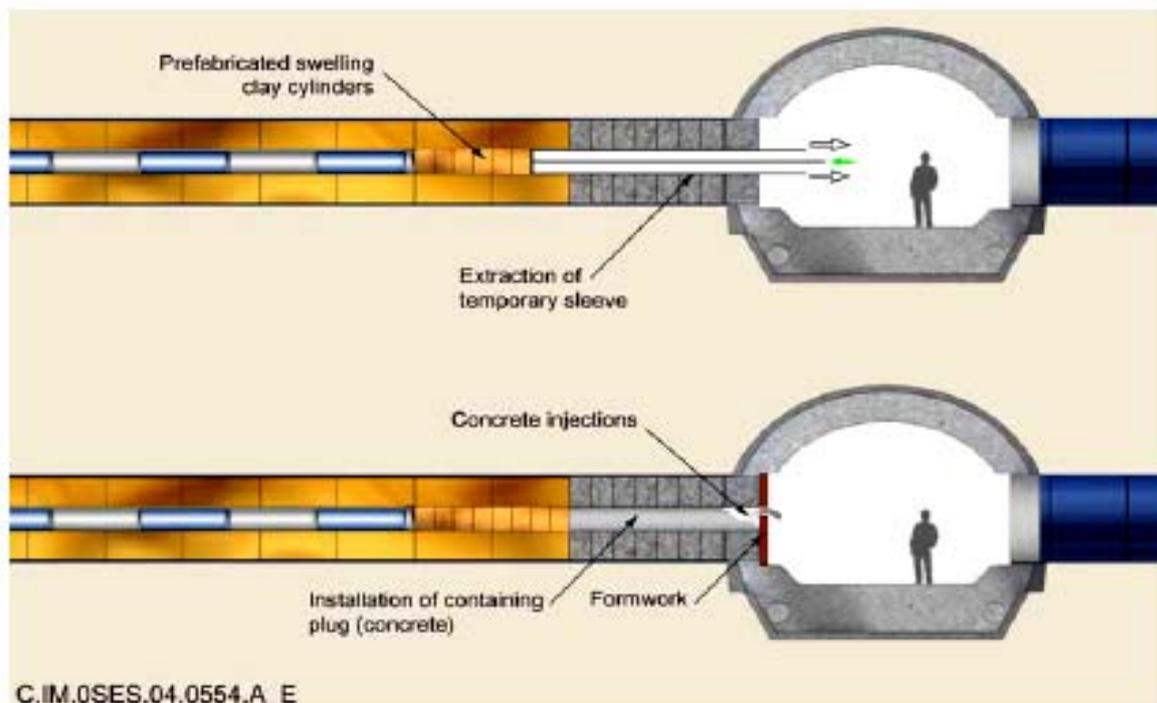


Abbildung 3-18: Verschließkonzept für eine Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/

3.2.4.3 Nachweis der Funktionalität

Die Kriterien für die Funktionalität der verschiedenen Elemente der Einlagerungszellen sind in vielen Fällen noch qualitativ oder semiquantitativ. Grundlegende Nachweise der technischen Machbarkeit und der Funktionalität wurden im Zuge von Großprojekten in Kombination mit Laboruntersuchungen und Modellrechnungen erbracht.

Die Endlagerröhre ist erster Linie für eine mögliche Rückholbarkeit der Abfälle wichtig. Ihre Stabilität über einige 100 Jahre wurde durch Korrosionsmodelle nachgewiesen, die an Laborversuchen und Archäologischen Analoga validiert wurden /3-35/.

Versuche im Untertagelabor in Bure haben bestätigt, dass die Auflockerung in der Kontur der Einlagerungszelle durch schonende Auffahrungstechniken minimiert werden kann /3-36/. Gleichzeitig wurde das Wiederverheilen von Rissen in der Auflockerungszone analysiert.

Im TSX-Großversuch für die Erstellung von Streckenverschlüssen wurde nachgewiesen, dass Na-Bentonite die Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises an Verfüll- und Verschlussmaterialien erfüllen /3-37/. Der konturbündige Anschluss zwischen Verschlussmaterial und der Hohlraumkontur ergibt sich durch das Quellen der Tonminerale bei der Aufsättigung mit Wasser. Das verwendete Gemisch aus Kunigel-Bentonit und Sand (80 %/20 %) erfüllte alle Anforderungen bezüglich der Wärmeleitfähigkeit und der Permeabilität (etwas unterhalb der Permeabilität des angrenzenden Gebirges). Durch Laborversuche und Modellrechnungen wurde gezeigt, dass bei einer Verwendung von MX-80-Bentoniten in einer Mischung mit 30 % Sand noch geringere Permeabilitäten von $<10^{-13}$ m/s zu erzielen sind /3-38/. Somit wird ein konvektiver Stofftransport zwischen der Einlagerungszelle und der Zugangsstrecke verhindert und ein Stofftransport durch Diffusion begrenzt.

Bezüglich der Herstellung von hochkompaktierten Bentonitblöcken im industriellen Maßstab stützt sich die ANDRA einerseits auf entsprechende Erfahrungen in Schweden /3-39/, /3-40/ und Japan /3-41/ sowie andererseits auf Erfahrungen im Zuge eines ESDRED-Projektes /3-43/.

Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern sowie des Puffers in den Einlagerungszellen für ausgediente Brennelemente werden durch Großversuche im Zuge der europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen /3-29/.

3.2.5 Verfüllen von Verbindungsstrecken

3.2.5.1 Anforderungen

Die Streckenverfüllung muss – für den Fall, dass der Streckenausbau während der Nachbetriebsphase bricht – in der Lage sein, den Gebirgsdruck abzustützen /3-29/. Dies ist erforderlich, um die Langzeitverformung des Gesteins zu minimieren und so eine Ausbreitung der Auflockerungszone um die Grubenräume zu vermeiden oder zu beschränken.

Ein Bruch des Streckenausbaus kann sich aus der Tonkonvergenz ergeben. Wenn die Hohlräume, die nach der Verfüllung der Strecken offen geblieben sind, durch Gebirgsverformungen geschlossen sind, kompaktiert das Verfüllmaterial und entwickelt eine zunehmende Tragwirkung bis das Gleichgewicht zwischen dem Verfüllmaterial und dem umgebenden Gebirge erreicht ist. Potentielle Schädigungen des Gebirges können während dieses Prozesses von zwei Faktoren abhängen: der Größenordnung der Gesamtverformung und der Belastungsgeschwindigkeit. In diesem Fall ist der letztere Faktor der entscheidende:

eine unmittelbare rasche Entspannung kann bei kleinen Verformungen zu signifikanten Schäden des Gebirges führen, während sehr langsame Verformungen auch bei hohen Verformungsbeträgen zu keiner Gesteinsschädigung führen. Hieraus ergeben sich zwei Anforderungen an die Verfüllung:

- Die Resthohlräume müssen minimiert werden und
- das Verfüllmaterial muss ein ausreichendes mechanisches Tragverhalten vom Zeitpunkt der Einbringung an haben. Seine Festigkeit nimmt zu, wenn es durch die Gebirgskonvergenz verdichtet wird. Nach Forschungsergebnissen ist ein anfängliches Deformationsmodul von 10 MPa ausreichend.

In der Umgebung von Streckenverschlüssen soll das Verfüllmaterial – im Fall einer langfristigen Zerstörung der Betonwiderlager – außerdem eine mechanische Einschlussfunktion erfüllen (vgl. Kap. 3.2.6.5 Stützender Versatz).

3.2.5.2 Verfüllmaterial

Für die Verfüllung von Strecken ist die Wiederverwendung von Aushubmaterial, das bei der Grubengebäudeauffahrung angefallen ist, vorgesehen. Hierfür wird das Material nach einer Lagerung an der Oberfläche auf eine Korngröße von 20 mm gebrochen. Sein Wassergehalt ist nahe am normalen Proctor Optimum, d. h. 10 bis 15 %. Ziel ist es, zum Zeitpunkt des Einbaus eine Trockendichte des Verfüllmaterials von wenigsten $1,6 \text{ g/cm}^3$ und ein Quellvermögen von 1 % oder etwas mehr zu haben.

3.2.5.3 Technisches Konzept

Das Verfüllmaterial wird zunächst an der Tagesoberfläche aufbereitet bevor es zum Verfüllort transportiert wird. Es wird durch horizontale Verdichtung im unteren Teil der Strecke mit ansteigenden geneigten Lagen im oberen Teil der Strecke eingebracht. Die horizontale Verdichtung des Verfüllmaterials kann mit Verwendung von Standardmaschinen aus dem Straßenbau erfolgen. Für schräge Lagen ist es möglich, einen Stampfer zu verwenden, der am Ende des beweglichen Arms eines Baggers angebracht ist.

Die schräge Verdichtung von Verfüllmaterial wurde in einem Demonstrationsversuch erprobt. Dabei wurde in einer Strecke mit Betonausbau eine hydraulische Ramme zur Verdichtung von reinem Ton und von Ton/Sand-Gemischen eingesetzt (Abbildung 3-19). Dabei wurden Trockendichten von mehr als $1,7 \text{ g/cm}^3$ erzielt. Im firstnahen Bereich kann zur Resthohlraumverfüllung zusätzlich Material eingeblasen werden.



Abbildung 3-19: Versuche zur Streckenverfüllung im Untertagelabor Bure (Meuse/Haute-Marne, Frankreich)

3.2.6 Verschluss von Strecken

3.2.6.1 Anforderungen

Die geotechnischen Barrieren zum Streckenverschluss tragen wesentlich zum langzeitsicheren Einschluss der Abfallinventare im Endlager bei. Jeder Streckenverschluss besteht aus einem Dichtelement aus quellfähigem Ton, das in der geotechnischen Barriere die geringe hydraulische Durchlässigkeit gewährleistet, und aus Betonwiderlagern, die das Dichtelement mechanisch stabilisieren (Abbildung 3-20).

An den quellfähigen Ton für das Dichtelement bestehen dieselben Anforderungen, wie für das Material zum Verschluss einer Einlagerungszelle (Kap. 3.2.4.1). Das Quell- und Verformungsverhalten von Ton bei Kontakt mit Wasser stellt sicher, dass sich Resthohlräume nach der Errichtung des Dichtelementes geschlossen werden und ein bündiger Kontakt mit der Streckenkontur entsteht. Weiterhin ist die sehr geringe Permeabilität ($<10^{-12}$ m/s) wichtig, die verhindert, dass Wasser in den Strecken zirkulieren kann. Außerdem soll das verwendete Tonmaterial mit dem umgebenden Tongestein chemisch kompatibel und langzeitstabil sein.

Die hydromechanischen Eigenschaften des Dichtelementes können durch das Variieren von Herstellungsverfahren und durch die Materialrezeptur an die Standortanforderungen angeglichen werden. Der initiale Quelldruck soll 3 MPa betragen. Über den gesamten Funktionszeitraum der Barriere soll der Quelldruck 1 MPa nicht unterschreiten und 13 MPa nicht überschreiten.

Die Betonwiderlager müssen so ausgelegt werden, dass sie dem Quelldruck des Tons mechanisch widerstehen. Da die Funktion der Betonwiderlager durch chemische Einflüsse langfristig beeinträchtigt werden können, sollen die mechanischen Eigenschaften der Streckenverfüllung 20-30 m vor und hinter dem Verschlussbauwerk gegenüber der Standverfüllung so weit erhöht werden, dass die Streckenverfüllung langfristig die Stützwirkung der Betonwiderlager übernehmen kann (Stützender Versatz).

3.2.6.2 Verschlussmaterialien und -design

Jeder Streckenverschluss besteht aus einem Dichtelement aus quellfähigem Ton, das in der geotechnischen Barriere die geringe hydraulische Durchlässigkeit gewährleistet, und Betonwiderlagern, die das Dichtelement mechanisch stabilisieren (Abbildung 3-20). Die mechanischen Eigenschaften der Streckenverfüllung werden 20-30 m vor und hinter dem Verschlussbauwerk gegenüber der Standverfüllung erhöht, um – bei einem Versagen der Betonwiderlager – zum mechanischen Einschluss der Barriere beizutragen.

Wie bei den Verschlüssen für die Einlagerungszellen (Kap. 3.2.4.2) soll MX 80-Bentonit (oder ein vergleichbarer Tontyp) aufgrund seiner günstigen Materialeigenschaften verwendet werden /3-29/. Diese Eigenschaften schließen die sehr geringe Permeabilität (10^{-13} m/s), die Plastizität, das Quellvermögen und das Rückhaltevermögen für Radionuklide ein. Das Quell- und Verformungsverhalten von Ton bei Kontakt mit Wasser stellt sicher, dass sich die Aussparungen füllen, die bei der Errichtung des Dichtelementes gelassen wurden und dass ein bündiger Kontakt mit der Streckenkantur entsteht. Sobald der Ton gequollen ist, ist kein Wasserfluss durch das Dichtelement möglich. Eine besonders geringe Permeabilität von 10^{-13} m/s hat der MS80-Bentonit. Es handelt sich dabei um einen natürlichen Na-Smectit, der in Wyoming (USA) abgebaut wird. Der natürliche Charakter und die chemische Kompatibilität des Verschlussmaterials mit dem umgebenden Tongestein garantieren die Langzeitstabilität.

Da der potentielle Quelldruck des Tons mit seiner mittleren Trockendichte in der Barriere wächst, ist nach Laboruntersuchungen eine Trockendichte von 1,4 bis 1,5 g/cm³ erforderlich, um den geforderten initialen Quelldruck von 3 MPa zu erreichen /3-29/. Die Trockendichte hängt von der Kompaktionsrate des Tons ab, die wiederum eine Funktion des Herstellungsverfahrens ist. Es ist vorgesehen, das Dichtelement aus vorgefertigten, hoch kompaktierten Bentonitblöcken oder aus hoch kompaktierten Bentonitpellets mit zugemischtem Bentonitpulver zu erstellen. Im Hinblick auf die Rezeptur erhöht zum Beispiel die Zumischung von Sand die Kompaktion und verbessert die mechanischen Eigenschaften des Materials ohne die Permeabilität zu erhöhen. Günstig ist eine Zumischung von 20 bis 30 % Sand.

Damit der Ton des Dichtelements bei Wasserzutritt einen Quelldruck entwickelt und erhält, muss das Material an seinem Standort eingeschlossen sein. Daher ist es Aufgabe der Betonwiderlager den Quelldruck des Dichtelementes mechanisch zu widerstehen (3 MPa). Hieraus ergibt sich die Anforderung, dass der Streckenverschluss nur gegen Druck ausgelegt sein muss. Daher soll das Widerlager eine konische Form haben und aus hochfestem, nicht armierten Beton errichtet werden, der langzeitbeständig sein muss. Der vorgesehene hochfeste Beton hat eine höhere Dichte und geringere Permeabilität als konventioneller Beton, so dass die Menge des durchdringenden Wassers und damit die Zersetzung des Betons reduziert wird. Weiterhin wird aufgrund der fehlenden Armierung eine Rissbildung durch sich ausdehnende Korrosionsprodukte vermieden. Durch die geringe Durchlässigkeit der Betonelemente erfolgt die Wiederaufsättigung des Dichtelementes langsam, stetig und gut prognostizierbar. Bei einem plötzlichen Anstieg des Wasserdrucks schützen die Betonelemente das Dichtelement vor Erosion.

Da die Eigenschaften des Betons durch langzeitige chemische Einflüsse beeinträchtigt werden können, soll in diesem Fall ein stützender Versatz die Aufgabe des Betons bei der Rückhaltung des Dichtelementes übernehmen.

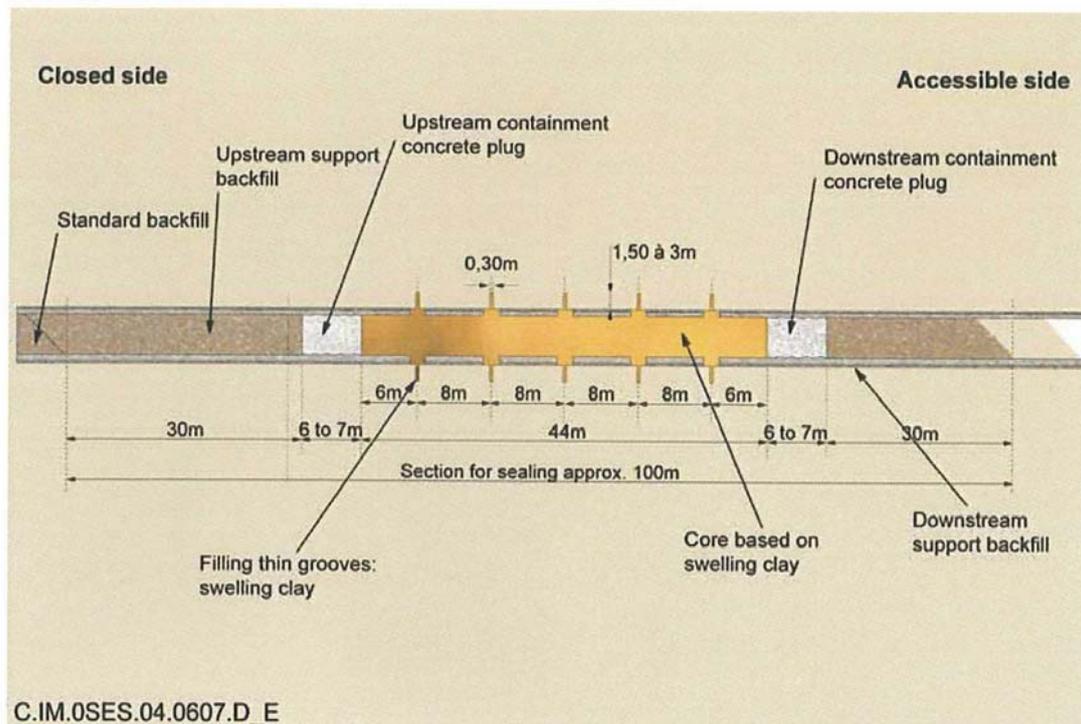


Abbildung 3-20: Konzept eines Streckenverschlusses

3.2.6.3 Technisches Konzept zur Errichtung des Verschlusses

Voraussetzung für die Errichtung eines Streckenverschlusses ist das Entfernen aller Streckeneinrichtungen, wie dem Ausbau, den Schienen, der Fahrbahn sowie Leitungen und Kabeln. Dies ist erforderlich, damit sich an diesen Einrichtungen keine Fließpfade während der Nachbetriebsphase ausbilden. Aus dem selben Grund wird die Auflockerungszone um die Strecke entfernt.

Die Errichtung eines Streckenverschlusses aus vorgefertigten hochkompaktierten Bentonitblöcken wurde durch einen Großversuch (Tunnel Sealing Experiment – TSX) im kanadischen Untertagelabor erprobt (Abbildung 3-21) /3-29/.



Abbildung 3-21: Großversuch TSX zur Errichtung des Dichteelementes eines Streckenverschlusses im kanadischen Untertagelabor /3-29/

Die Einbringung der Blöcke erfolgte im Versuch manuell. Bei einer Durchführung dieser Arbeiten im industriellen Maßstab würden größere Bentonitblöcke und Maschinen eingesetzt. Um die Verfüllung der Strecke zu verbessern und um ein homogeneres Dichtelement zu erhalten, wurden die randlichen Hohlräume mit Bentonitpulver oder einem Gemisch von Bentonitpellets und Bentonitpulver verfüllt. Die Einbringung erfolgte mit der im Bergbau erprobten Einblastechnik.

Zur Erstellung der konischen Form der Betonwiderlager erfolgt zunächst ein entsprechender Nachschnitt der Streckenkontur. Anschließend wird das Widerlager hinter einer Abmauerung mit Beton vergossen.

3.2.6.4 Nachweis der Funktionalität

Es wurden bisher nur zwei quantitative Kriterien für die Funktionalität eines Streckenverschlusses definiert: eine Permeabilität von $< 10^{-11}$ m/s und eine Trockendichte von 1,4 bis 1,5 g/cm³, um einen initialen Quelldruck von 3 MPa zu erreichen. Darüber hinaus besteht eine Reihe von qualitativen oder semiquantitativen Kriterien. Grundlegende Nachweise der technischen Machbarkeit und der Funktionalität wurden im Zuge von Großprojekten in Kombination mit Laboruntersuchungen und Modellrechnungen erbracht.

Besonders relevant ist in diesem Zusammenhang der TSX-Großversuch für die Erstellung von Streckenverschlüssen im Untertagelabor in Kanada, bei dem ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt wurde /3-37/. Neben der Funktionalität von Na-Bentoniten wurden hier technische Verfahren für die Erstellung der Barrieren erprobt.

Die Herstellung einer Barriere aus vorgefertigten, hoch kompaktierten Bentonit / Sand-Blöcken und die Resthohlraumverfüllung mit Bentonitpulver oder einem Gemisch von Bentonitpellets und Bentonitpulver wurden erfolgreich erprobt. Es konnte gezeigt werden, dass sich Resthohlräume durch den Quelldruck nach Wiederaufsättigen des Dichtmaterials schließen. Die Funktionalitätskriterien Permeabilitäten und Trockendichte wurden beide im Versuch erfüllt /3-38/. Bei Untersuchungen im Untertagelabor in Mont Terri (Schweiz) hat sich gezeigt, dass Risse in der Auflockerungszone um die Strecke durch den Gebirgsdruck und den Quelldruck des Tons verheilen. Zusammenfassend wurde nachgewiesen, dass das vorgesehene Design der Streckenbarrieren dazu geeignet ist, einen advektiven Stofftransport durch das Streckennetz des Endlagers zu verhindern.

Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern werden durch Großversuche im Zuge der europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen /3-29/.

3.2.6.5 Beschreibung der Erstellung des Stützenden Versatzes

Wie der Streckenausbau können auch die Betonwiderlager langfristig durch chemische Einflüsse in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. In diesem Fall soll der Stützende Versatz die mechanische Einschlussfunktion für das Dichtelement übernehmen /3-29/.

Das Funktionsprinzip des Stützenden Versatzes zielt darauf ab, die Bewegung des Dichtelementes durch Materialreibung an der Streckenkontur zu begrenzen. Daher muss der Versatz steif sein und eine erhöhte Reibung aufweisen. Mechanische Anforderung ist das Abtragen eines Drucks von 20 MPa bei einem Neigungswinkel von 40°. Diese Eigenschaften werden durch ein Mischungsverhältnis Ton/Sand von 50/50 erreicht. Der Ton stammt aus der Streckenauffahrung und wird wie bei der konventionellen Streckenverfüllung auf eine Korngröße von 20 mm gemahlen.

Die Länge des Bereiches mit Stützendem Versatz (ca. der vierfache Streckenquerschnitt) erlaubt es, die Reibung zwischen dem Versatz und der Streckenkontur, die eine Folge des Quelldrucks des Dichtelementes ist, auszugleichen.

Die Einbringungstechnik für den Stützenden Versatz ist dieselbe wie bei der Standardstreckenverfüllung (Kap. 3.2.5.3).

3.2.6.6 Behandlung der Auflockerungszone

Die Vermeidung advektiver Lösungsflüsse durch die Auflockerungszone, die sich um alle Grubenräume bildet, ist ein wichtiger langzeitsicherheitlicher Aspekt. Wenn eine Auflockerungszone eine höhere hydraulische Leitfähigkeit als das umgebende Gestein besitzt, kann sie zu Umläufigkeiten im Bereich von Barrieren führen und somit deren Funktion beeinträchtigen.

Daher wird die Auflockerungszone im Bereich von Streckenverschlüssen entfernt und so ein direkter Kontakt zwischen dem unbeschädigten Wirtsgestein und dem quellfähigen Dichtelement der Barriere hergestellt /3-29/. Durch das Quellen des Dichtelementes und die Konvergenz des Wirtsgesteins werden die Auflockerungen verschlossen und die ursprünglichen Eigenschaften des Wirtsgesteins wieder hergestellt. Dieser Prozess wurde bei Untersuchungen im Untertagelabor Mont Terri (Schweiz) beobachtet.

Eine alternative Vorgehensweise sieht bei wesentlich ausgedehnteren Auflockerungszonen eine Unterbrechung der mit ihr verknüpften hydraulischen Wegsamkeiten durch 1,5 bis 3,0 m tiefe und 0,3 m breite Schlitzlöcher vor, die mit gering permeablem, quellfähigem Ton (MX80) verfüllt werden. Hierfür wird der Streckenausbau im Bereich der Schlitzlöcher auf einer Breite von 1,3 m entfernt. Die Schlitzlöcher sollen durch besonders schonende Verfahren erstellt werden, so dass die neuen Auflockerungszonen lokal sehr begrenzt und untereinander nicht verbunden sind.

Das entsprechende Verfahren wurde durch Experimente in den Untertagelaboren in Mont Terri (Schweiz: EZ-A-Versuch) und in Bure (Meuse/Haute Marne, Frankreich: KEY-Versuch) erprobt (Abbildung 3-22) /3-29/. Dabei wurde einerseits die technische Machbarkeit der Schlitzlöcherherstellung und andererseits die Funktionalität im Hinblick auf die Unterbrechung der Auflockerungszone nachgewiesen. Die Schlitzlöcher können mit Hilfe eines mechanischen Manipulators mit vorgefertigten, hoch kompaktierten Blöcken befüllt werden. Diese Blöcke können Gewichte von einigen 100 kg bis zu einigen Tonnen haben. Resthohlräume können durch das Einblasen von Bentonit-Pulver verfüllt werden.



Abbildung 3-22: Großversuch zur Erstellung von Schlitzen zur Unterbrechung der Auflockerungszone (KEY-Versuch) im Untertagelabor in Bure (Frankreich) /3-29/

3.2.7 Schachtverschluss

3.2.7.1 Anforderungen an den Verschluss

Das Verschlusskonzept für den Schacht sieht zwei Dichtelemente mit Widerlagern sowie eine Restverfüllung mit Versatzmaterial vor /3-29/. Der untere Endlagerverschluss soll das Endlager vom Deckgebirge trennen. Zu diesem Zweck soll das Dichtelement aus quellfähigem Ton eine möglichst geringe Permeabilität aufweisen ($<10^{-12}$ m/s). Der Quelldruck soll beim Einbau entsprechend der Minimalspannung im Wirtsgestein 7 MPa nicht überschreiten.

Unterhalb dieses Dichtelementes ist ein umfangreiches Widerlager zu errichten, das die restliche Schachtsäule stabilisiert. Oberhalb des Dichtelementes ist ein weiteres Betonwiderlager zu erstellen, das das Dichtelement während der Wiederaufsättigung mit Wasser stabilisiert.

Ein zweiter Schachtverschluss ist im Deckgebirge so anzuordnen, dass die wasserführende Deckgebirgsschichten getrennt werden.

3.2.7.2 Verschlussmaterialien und -design

Der Schacht soll durch zwei Verschlüsse und Verfüllmaterial verschlossen werden (Abbildung 3-23).

Das Schachttiefste sowie die ersten Zehner m der angrenzenden Strecken werden mit Beton verfüllt. Dieses Betonelement dient der Stabilisierung der ganzen überlagernden Schachtsäule und ist das Widerlager für den darüber angeordneten unteren Schachtverschluss. Dieses Verschlussbauwerk wird im oberen Teil der Wirtsgesteinsformation (Oxford-Ton) angeordnet, da die Tone hier mechanisch stabiler sind als im mittleren Teil der Formation.

Untersuchungen haben ergeben, dass beim Abteufen eines Schachtes keine größere Auflockerungszone entstehen wird /3-29/. Vor dem Einbau des Dichtelementes wird in den jeweiligen Schachtabschnitt der Ausbau entfernt, damit das Dichtmaterial in unmittelbarem Kontakt mit dem Wirtsgestein kommt.

Wie bei allen Verschlussbauwerken so soll auch für das Schichtelement im Schacht ein MX80-Bentonit (oder vergleichbares Material) eingesetzt werden. Diese Materialwahl wird durch die gleichen günstigen Materialeigenschaften (geringe Permeabilität, Quellvermögen, Plastizität) begründet wie bei den Streckenverschlüssen. Um den angestrebten Quelldruck von 7 MPa zu erreichen, muss das Bentonit/Sand-Gemisch eine Trockendichte von $1,95 \text{ g/cm}^3$ beim Einbau aufweisen. Aufgrund der hohen Dichte wird das Dichtmaterial eine Permeabilität von 10^{-12} bis 10^{-13} m/s erreicht und somit die entsprechende Anforderung erfüllt /3-29/. Das Material kann als vorgefertigte, hoch kompaktierte Blöcke oder als Gemisch von Pellets und Pulver eingebracht werden. Während die Bentonitblöcke sofort die angestrebte Trockendichte aufweisen, erfordert die Einbringung von Pellets und Pulver eine mechanische Nachverdichtung, um die Zielwert zu erreichen.

Das Gewicht des überlagernden Materials trägt wesentlich zum Einschluss des Dichtelementes bei, trotzdem wird oberhalb des Dichtelementes ein Betonwiderlager errichtet, das das Dichtelement während der Wiederaufsättigung mit Wasser stabilisiert. Dieses Widerlager wird nach dem lokalen Entfernen des Schachtausbaus durch eine 5 m breite konische Verbreiterung im angrenzenden Gebirge verankert. (Abbildung 3-24).

Dieser erste Schachtverschluss wird bis zur Obergrenze der Oxford-Kalke durch Verfüllmaterial überlagert, das wie in den Strecken aus tonigem Ausbruchmaterial und Sand besteht.

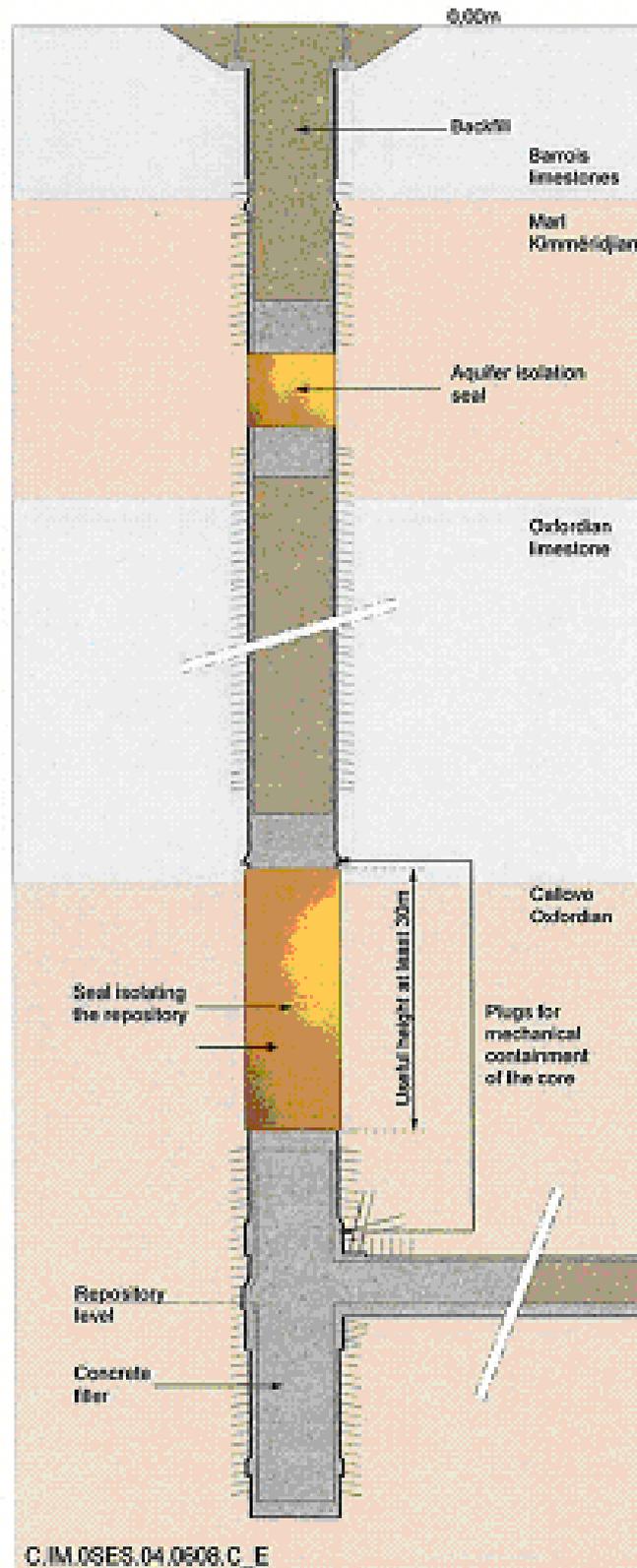


Abbildung 3-23: Französisches Konzept für den Schachtverschluss in Ton

Aufgabe des zweiten Schachtverschlusses, der oberhalb der Verfüllsäule folgt, ist es, die drei wasserführende Deckgebirgsschichten (Oxford-Kalk, Kimmeridge-Kalk und Tithon-Kalk) zu trennen. Der Aufbau dieses 10 bis 15 m hohen Schachtverschlusses aus zwei Betonwi-

derlagern und einem Dichtelement entspricht dem unteren Verschluss. Die oberen Schachtabschnitte werden bis zur Oberfläche wieder mit tonigem Ausbruch und Sand verfüllt.

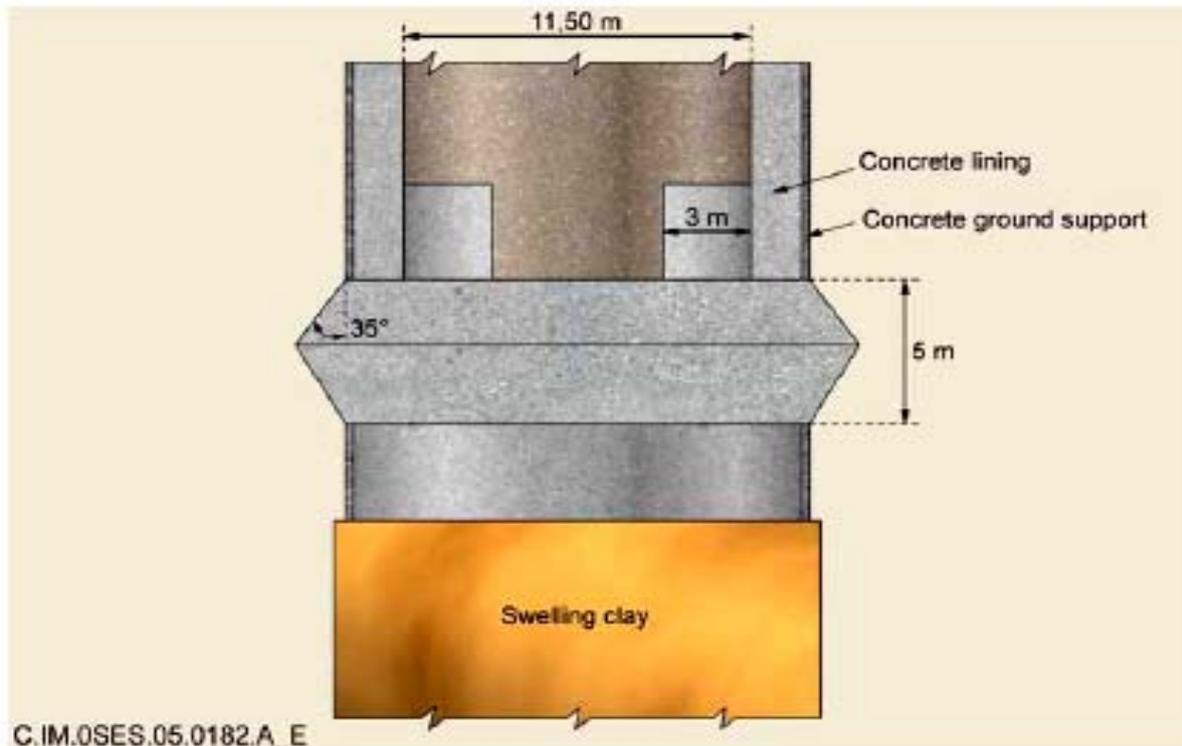


Abbildung 3-24: Oberes Betonwiderlager über dem unteren Schachtverschluss /3-29/

3.2.7.3 Technisches Konzept zur Errichtung der Schachtverschlüsse

Vor der Errichtung der Verschlüsse werden zunächst alle Schachteinbauten entfernt. Anschließend wird der untere Teil des Schachtes bis zum vorgesehenen Niveau des ersten Dichtelementes mit Beton vergossen.

Im Bereich des Dichtelementes wird der Schachtausbau im 2 m-Schritten sukzessive entfernt und parallel dazu der Bentonit eingebracht. Dieses Vorgehen dient der Betriebssicherheit und soll die nicht gestützte Höhe der Schachtwand minimieren. Bei Bedarf kann die Schachtwand mit einer kleinen Teilschnittmaschine nachgearbeitet und anschließend temporär mit Maschendraht und Ankern gesichert werden. Bei der Erstellung des Dichtelementes aus Bentonitblöcken werden die vorgefertigten ca. 4,5 t schweren Elemente mit einem Greifer positioniert.

Wenn das Dichtelement aus Pellets und Pulver erstellt werden soll, muss das eingeschüttete Material mechanisch nachverdichtet werden. Das entsprechende Verfahren wurde im RESEAL-Projekt /3-12/ und im Großversuch bei der Schließung des Schachtes Salzdetfurth II erprobt /3-32/.

Ein alternatives Konzept für die Erstellung des Dichtelementes sieht vor, mechanisch verstärkte Ausbauringe im Schacht zu belassen und den Ausbau nur in 7 m Abständen zu entfernen.

Nach Fertigstellung des Dichtelementes wird das Widerlager vor Ort betoniert. Anschließend wird das Verfüllmaterial in horizontalen Lagen von einigen Zehner Metern in den Schacht geschüttet und dann verdichtet.

3.2.7.4 Nachweis der Funktionalität

Entsprechend den Ähnlichkeiten mit den Verschlüssen für Einlagerungs- und Verbindungsstrecken kann z. T. auf die entsprechenden Nachweise zurückgegriffen werden.

So wurde der Funktionalitätsnachweis für die Na-Bentonite durch Labor- und In-situ-Versuche (TSX-Großversuch) erbracht /3-37/. Der konturbündige Anschluss zwischen Verschlussmaterial und der Hohlraumkontur ergibt sich durch die Plastizität und das Quellen der Tonminerale bei der Aufsättigung mit Wasser. Entsprechend dem vertikalen Verlauf ist die Einbringung und das konturbündige Verfüllen mit dem Tonmaterial in den Schächten einfacher als in den horizontalen Strecken. Während die Bentonitblöcke sofort die angestrebte Trockendichte aufweisen, erfordert die Einbringung von Pellets und Pulver eine mechanische Nachverdichtung, um den Zielwert zu erreichen. Die Material- und Qualitätsanforderungen sowie die technischen Verfahren zur Erstellung des Dichtelementes wurden im RESEAL-Projekt /3-12/ und im Großversuch bei der Schließung des Schachtes Salzdetfurth II /3-32/ ermittelt. Zwei einfache Verfahren zur Qualitätskontrolle der Einbaudichte sind die markscheiderische Volumenkontrolle und die Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls. Die niedrigsten Permeabilitätswerte $<10^{-12}$ m/s ergaben sich bei Verwendung eines Gemisches aus MX-80-Bentoniten und Sand /3-38/.

Bezüglich der Herstellung von hoch kompaktierten Bentonitblöcken im industriellen Maßstab stützt sich die ANDRA einerseits auf entsprechende Erfahrungen in Schweden /3-39/, /3-40/ und in Japan /3-41/ sowie andererseits auf Erfahrungen im Zuge eines ESDRED-Projektes /3-43/.

Die technische Machbarkeit und die Funktionalität von Betonwiderlagern wird durch Großversuche im Zuge der europäischen ESDRED-Projektes erprobt und nachgewiesen /3-29/.

3.3 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 /3-44/.

Gleichzeitig wurde vom Bundesrat die Ausdehnung der Untersuchungen auf Sedimentgesteine gefordert. Von der Nagra wurden dazu Gesteinsformationen der Unteren Süßwassermolasse und des Opalinustons untersucht und der Opalinuston als perspektivische Gesteinsformation ausgewählt. Die seit 1997 laufenden Untersuchungen des Opalinuston 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 /3-45/.

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

3.3.1 Endlagerkonzept

Als Referenzgestein für die Endlagerung in Ton wurde der Opalinuston im Zürcher Weinland ausgewählt /3-45/. Die geologischen Verhältnisse wurden durch Bohrungserkundung und Laboruntersuchungen analysiert. Die Permeabilitäten des Opalinuston sowie der liegenden und hangenden Sedimente betragen 10^{-13} m/s. Nach den Ergebnissen von Spannungsmessungen sind bei der Errichtung eines Endlagers keine bergbaulichen Schwierigkeiten zu erwarten /3-46/.

1999 wurde vom Schweizer Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation die Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) eingesetzt, die das Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung entwickelt hat, das Endlagerung und Reversibilität verbindet. Basierend auf diesem Prinzip wurde in der Schweiz ein Endlagerkonzept für HAW und ausgedienten Brennelementen im Opalinus-Ton entwickelt, das in Abbildung 3-25 dargestellt ist /3-47/. Das Endlager ist in der Mitte der Opalinustonschicht in einer Teufe von ca. 650 m angeordnet. Es ist über eine Rampe und einen Schacht mit der Oberfläche verbunden, die beide über einen Betonausbau gesichert werden. In der Betriebsphase dient die Rampe den Transport der Abfallgebände nach untertage.

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 BE 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 Zwischenlagerzeit der Inventare und die Beladung der Behälter sowie 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

von 7 m und eine Höhe von 9 m. Nach der Einlagerung werden die Resthohlräume mit Zement verfüllt.

3.3.2 Verfüll- und Verschlusskonzepte

3.3.2.1 Funktion und Design

Grundlage des Sicherheits- und Verschlusskonzeptes ist das Multibarrierensystem, das sich aus den bekannten technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren zusammensetzt.

Die erste technische Barriere des Multibarrierensystems ist die Abfallform. Bei ausgedienten Brennelementen sind die Radionuklide in Brennstoffpellets und in den Zirkaloy-Hülsen eingeschlossen. Beide Elemente weisen nur geringe Korrosionsraten auf. Bei den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung wird der Einschluss der Radionuklide durch die Borosilikat-Glasmatrix übernommen, die ebenfalls eine sehr geringe Korrosionsrate aufweist.

Die Endlagerbehälter verhindern für beide Abfallarten einen Lösungszutritt und eine Radionuklidfreisetzung über einen Zeitraum von wenigstens 1000 Jahren. Weiterhin erzeugen die Korrosionsprodukte ein reduzierendes Milieu, das die Löslichkeiten der Radionuklide reduziert. Außerdem werden an den Korrosionsprodukten Radionuklide adsorbiert.

Die Endlagerbehälter werden auf einem Lager aus hochkompaktierten Bentonitblöcken in der Mitte der Einlagerungsstrecke positioniert. Der Resthohlraum wird mit Bentonitgranulat verfüllt. Der Bentonitpuffer trägt durch die lange Wiederaufsättigungszeit des Bentonits und durch die Plastizität, die ein Wiederverheilen von Rissen nach einer mechanischen Belastung sicherstellt, zum Einschluss des Abfallinventars bei. Durch die geringe Permeabilität des Bentonits ist ein konvektiver Lösungstransport zum oder vom Endlagerbehälter ausgeschlossen. Der diffusive Stofftransport erfolgt im Bentonit sehr langsam. Weiterhin werden die Radionuklide durch die Sorptionseigenschaften des Puffermaterials zurückgehalten. Die Löslichkeit der Radionuklide im Porenwasser ist gering.

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

- Die Einlagerungsstrecken für ausgediente Brennelemente und hochradioaktive Abfälle sowie die Einlagerungstunnel für langlebige mittelradioaktive Abfälle werden während des Einlagerungsbetriebs verfüllt und versiegelt.
- Nach einer ersten Überwachungsphase werden die Hauptstrecken und der Schacht verfüllt und durch Verschlussbauwerke gesichert.
- Am Schluss werden die noch offenen Grubenräume sowie die Rampe verfüllt und ebenfalls durch Verschlussbauwerke gesichert.

Das Streckennetz des Grubengebäudes sowie der Schacht und die Rampe stellen potentielle Wegsamkeiten für den Zu- oder Austritt von Lösungen während der Nachbetriebsphase dar. Deshalb werden alle sicherheitstechnisch relevanten Stellen, wie die Einlagerungsstrecken, die Hauptstrecken, die Strecke zum ILW-Lager, die Rampe und der Schacht durch Verschlussbauwerke abgedichtet. Ziel der Verschlussbauwerke ist es, in Verbindung mit der streckenweisen Verfüllung, die Barrierenwirkung des durch Bergbauaktivitäten verletzten Wirtsgesteins als Transportbarriere möglichst wieder herzustellen und eine gebirgsmechanische Stabilisierung zu erzielen. Alle Verschlussbauwerke sind als hydraulische Barrieren konzipiert, um einen Wasserzutritt zu den Einlagerungsstrecken zu vermeiden bzw. freigesetzte Radionuklide aus dem Abfallinventar zurückzuhalten. Daher sieht das Grundkonzept dieser Barrieren ein Bentonit-Dichtelement und eine Stabilisierung durch Widerlager vor. Das restliche Grubengebäude wird zur mechanischen Stabilisierung und Hohlraumreduzierung mit einem Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt.

Das wesentliche Element für den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Inventare in einem Endlager in Tonstein ist das Wirtsgestein, das ein Wasserstauer ist und somit einen advektiven Stofftransport ausschließt. Weitere wichtige Gesteinseigenschaften sind die mechanische Stabilität und die Selbstheilungseigenschaften (Plastizität) des Tons. Der Radionuklidtransport wird durch die Sorptionseigenschaften und die Kolloidfiltration des Tons stark reduziert. Die Bedeutung des Deckgebirges liegt vor allem im Schutz des Wirtsgesteins und der geotechnischen Barrieren, z. B. vor eiszeitlicher Erosion. Im Deckgebirge findet außerdem ebenfalls eine Sorption freigesetzter Radionuklide sowie eine Verdünnung im Grundwasser statt.

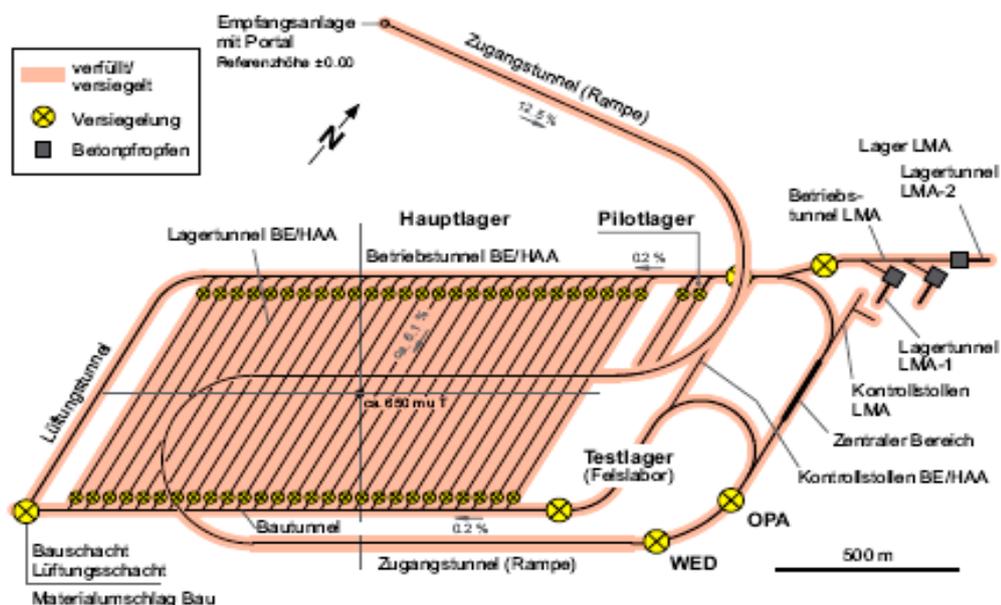


Abbildung 3-26: Verfüll- und Verschlusskonzept für ein Endlager für hoch- und mittelradioaktive Abfälle im Opalinuston /3-45/

3.3.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion

Ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion wurde noch nicht entwickelt. Dies hängt mit dem konzeptuellen Stand der meisten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen zusammen. Die Anforderungen an die meisten Maßnahmen sind noch qualitativ. Eine Konkretisierung und Spezifizierung wird mit dem weiteren Fortschritt der Arbeiten erfolgen.

Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und Funktionalität der Schließungsmaßnahmen konzentrieren sich momentan auf die Verfüllung und den Verschluss von Einlagerungsstrecken /3-45/, /3-51/. Da die Verfüll- und Verschlussmaterialien der anderen Barrieren weitgehend identisch sind, können die bei den Versuchen für Einlagerungsstrecken gewonnenen Daten auch auf andere Verfüll- und Verschlussmaßnahmen übertragen werden. Weiterhin ist die NAGRA auch an internationalen FuE-Projekten (z. B. ESDRED) zur Endlagerung in Ton beteiligt und kooperiert mit einer Vielzahl von Endlagergesellschaften. Da auch bei Endlagerkonzepten für Kristallingesteine auf Bentonitbarrieren zurückgegriffen wird, können die hier gewonnenen Erfahrungen teilweise ebenfalls verwendet werden.

An Hand der vorliegenden Daten werden Rechenmodelle validiert und verifiziert, die künftig die Modellierung der Prozesse in den Barrieren und ihrem Umfeld erlauben. Die Identifizierung sensibler und kritischer Parameter und die Festlegung spezifischer Grenz- bzw. Zielwerte für das Schweizer Konzept ist aber noch nicht abgeschlossen.

3.3.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

Das in der Opalinus-Ton-Studie angewendete Sicherheitsnachweiskonzept basiert auf den folgenden Schritten /3-45/:

- Identifizierung der Absichten, Ziele, Schwerpunkte und Randbedingungen für den Sicherheitsnachweis
- Identifizierung der Endlager- und Bewertungsprinzipien,
- Entwicklung einer Methodik für die Erstellung des Sicherheitsnachweises,
- Festlegung des Endlagersystems,
- Ermittlung des Kenntnisstandes über das System und seine Entwicklung einschl. der Unsicherheiten,
- Untersuchung der Sensitivitäten des Systems und Identifizierung der Bewertungsfälle,
- Bewertung der Erstellung des Endlagersystems durch die Analyse der Bewertungsfälle,
- Zusammenstellung von Argumenten und Anleitung für künftige Schritte, und
- Bewertung des Sicherheitsnachweises.

Die Ziele und Randbedingungen für den Sicherheitsnachweis ergeben sich aus den gesetzlichen Anforderungen, die die HSK definiert hat /3-49/:

Prinzipien der Endlagerung

- Die Endlagerung radioaktiver Abfälle darf nur eine geringe zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung zur Folge haben.
- Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist der Schutz der Umwelt so zu gewährleisten, dass die Artenvielfalt nicht gefährdet und die Nutzung von Bodenschätzen nicht unnötig eingeschränkt wird.
- Die Risiken für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Schweiz dürfen auch im Ausland und in Zukunft nicht höher sein, als sie in der Schweiz heute zulässig sind.
- Die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren zu gewährleisten.
- Allfällige Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen eines Endlagers oder Rückholung der Abfälle dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren nicht beeinträchtigen.
- Die Vorsorge für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle ist eine Aufgabe, die der heutigen nutznießenden Gesellschaft zukommt und die nicht auf künftige Generationen überwältzt werden darf.

Schutzziele

- Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0,1 mSv überschreiten.
- Das aus einem verschlossenen Endlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.
- Nach dem Verschluss eines Endlagers sollen keine weiteren Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein. Das Endlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können.

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

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

In der Opalinus-Ton-Studie ist die Methodik zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers in Tonstein dargelegt /3-45/. Dieses Nachweiskonzept orientiert sich an internationalen Standards der IAEA /1-3/ und OECD/NEA /1-8/. Die nationalen Empfehlung für den Sicherheitsnachweis sind in den HSK-Richtlinien definiert /3-49/. Grundlagen für den Sicherheitsnachweis sind ein ausreichendes wissenschaftliches Verständnis des Systems, eine systematische und definierte Methodik zur Durchführung der Analyse, die Identifizierung vielfältiger Argumente für die Sicherheit und die Bewertung der technischen Machbarkeit des Projektes.

Zur Vertiefung der wissenschaftlichen Kenntnisse über das Wirtsgestein und relevante Prozesse bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tongestein werden seit 1989 umfangreiche Forschungsarbeiten im Untertagelabor Mont Terri durchgeführt /3-45/, /3-50/. Schwerpunkte der Untersuchungen sind:

- Die Erprobung und Verbesserung von Bohrmethoden und Messtechniken,
- die Entwicklung von neuen Messapparaturen und Messtechniken in allen Versuchsbereichen,
- Machbarkeitsstudien von Messmethoden,
- Machbarkeitsstudien für geotechnische Barrieren,
- hydrogeologische Versuche,
- hydrochemische Untersuchungen, und
- gebirgsmechanische Versuche.

Viele dieser Forschungsprojekte werden in Kooperation mit anderen internationalen Endlagerorganisationen durchgeführt.

Ein weiteres Element des Sicherheitsnachweises ist das von der EKRA entwickelten Konzept der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung, das die Errichtung folgender Endlagerelemente vorsieht (Abbildung 3-27, /3-45/):

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

Dieses Konzept kombiniert die Notwendigkeit einer passiven Sicherheit, die durch die geologische Endlagerung sichergestellt wird, mit einer vorsichtigen schrittweisen Umsetzung, um gesellschaftliche Anforderungen und technische Unsicherheiten abzudecken. Das Erprobungsendlager dient dazu, durch In-situ-Versuche für den Betrieb und die Schließung des Endlagers relevante Daten zusammen zu sammeln. Diese Daten werden ergänzt durch Informationen

aus dem Pilotendlager, die das Verhalten des Barrierensystems, den Nachweis von Modellannahmen und den Machbarkeitsnachweis für die Schließung des Endlagers umfassen.

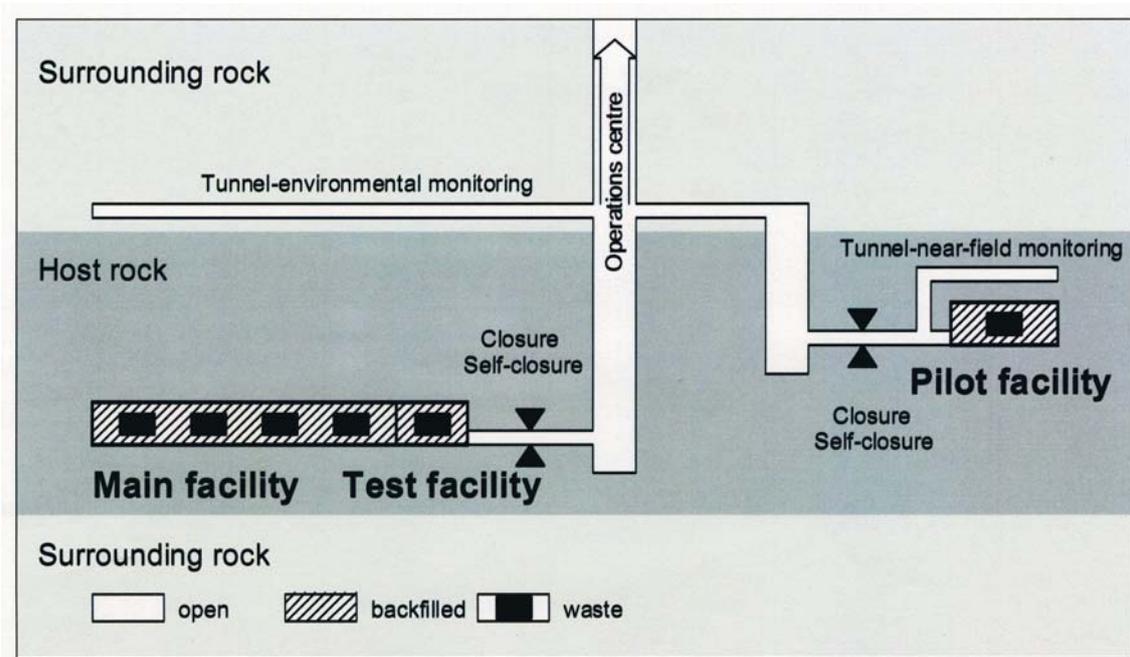


Abbildung 3-27: Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung

3.3.3 Behälter

3.3.3.1 Anforderungen an die Abfallgebände

Der Endlagerbehälter dient dem sicheren und dichten Einschluss des radioaktiven Inventars und soll eine Standzeit von mindestens 1.000 Jahren aufweisen. Während dieser Zeit muss er dem Gebirgsdruck sowie korrosiven Porenlösungen im umgebenden Puffer standhalten. Bei der Wahl des Behältermaterials ist eine mögliche Gasbildung infolge Korrosion (z. B. bei Stahl) zu begrenzen. Weiterhin darf der Behälter nur soweit mit wärmeentwickelnden Abfällen beladen werden, dass im äußeren Bereich des Bentonit-Puffers eine Grenztemperatur von 125°C nicht überschritten wird.

3.3.3.2 Gebindematerialien und -design

Die Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente enthalten entweder 4 DWR-BE oder 9 SWR-BE. Das Referenzkonzept sieht einen Stahlguss-Behälterkörper mit einer Wandstärke von ca. 150 mm vor (Abbildung 3-28, /3-45/, /3-48/). Für die unterschiedlichen BE-Typen sind Behältervarianten mit Längen von 4,0-4,9 m vorgesehen. Behälterkörper, -boden und -deckel sollen separat gefertigt und dann verschweißt werden. Die Mindeststandzeit der BE-Endlagerbehälter beträgt ca. 1.000 Jahren.

Ein alternatives Behälterkonzept sieht – in Anlehnung an das Behälterkonzept der SKB – einen Kupferbehälter (Wandstärke: 30 bis 50 mm) mit einem Innenbehälter aus Gusseisen mit Kugelgraphit vor /3-48/. Der Deckel des Innenbehälters wird mit dem Behälterkörper verschraubt. Die Standzeit eines solchen Kupferbehälters wird mit mindestens 100.000 Jahren angegeben. Die aufgrund der Korrosion abgeschätzten Standzeiten liegen bei mehr als 1 Mio. Jahren /3-45/.

Die HAW-Endlagerbehälter sind Edelstahlbehälter mit einer Wandstärke von 250 mm (Abbildung 3-28, /3-45/). Als Material für den mit Blei abgeschirmten Behälter wurden alternativ Titan, Tantal, Hasteloy B und Austenitstahl (Stahl 1.4439) untersucht. Behälterkörper und -deckel werden verschweißt. Die Behälter enthalten eine Kokille mit verglastem hochradioaktivem Abfall aus der Wiederaufarbeitung. Ihre Mindeststandzeit beträgt 1.000 Jahre.

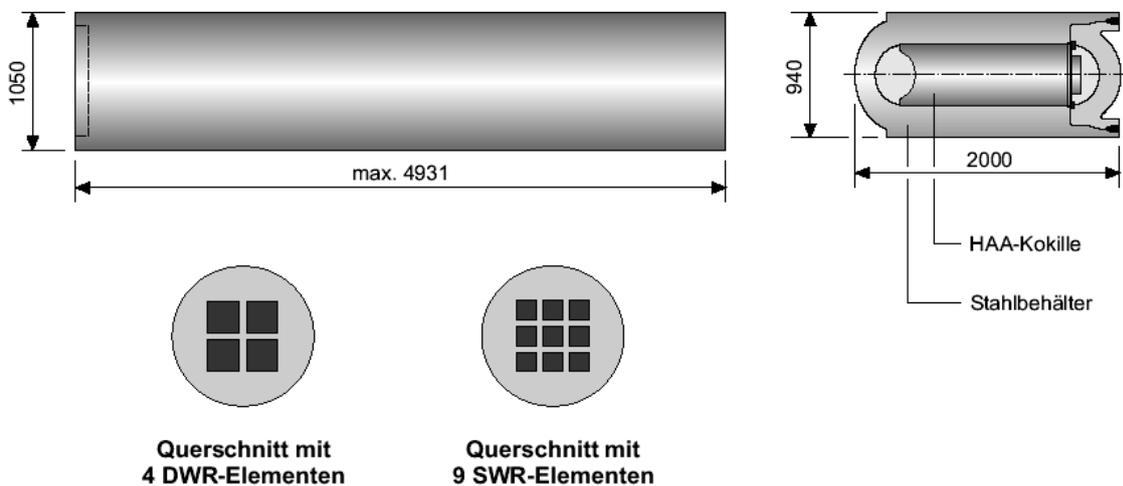


Abbildung 3-28: Endlagerbehälter (Stahlbehälter) für ausgediente Brennelemente (links) und HAW-Kokillen (rechts), Abmessungen in mm /3-45/

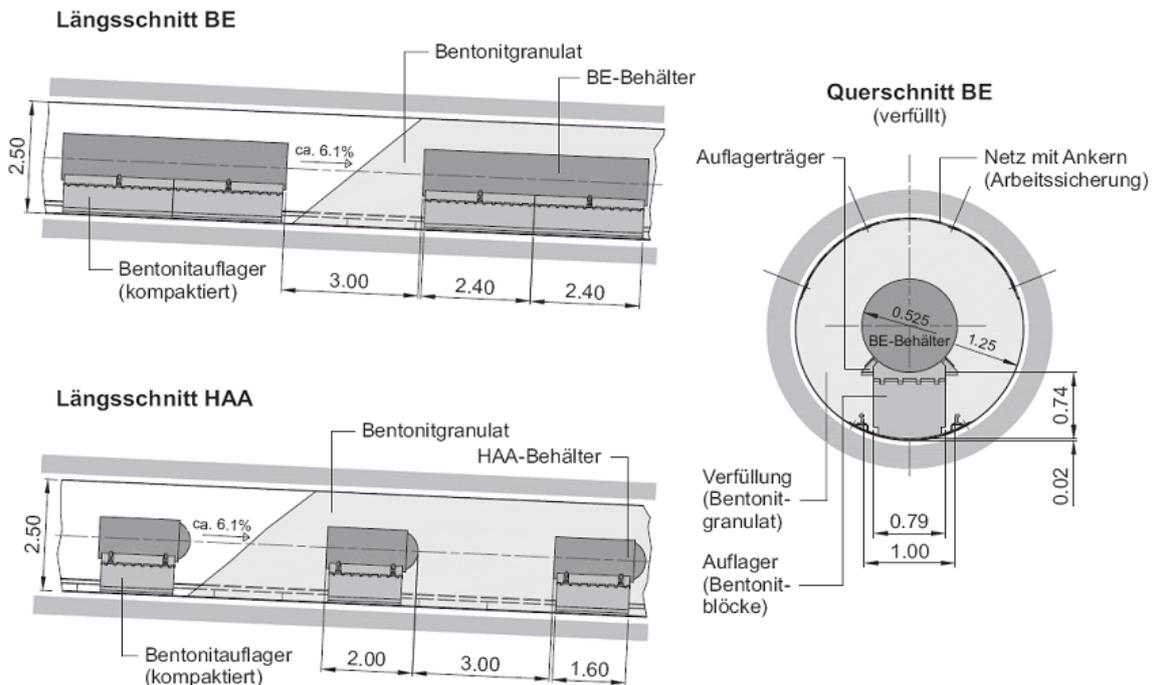


Abbildung 3-29: Einlagerung von BE- und HAA-Endlagerbehältern, Abmessungen in m /3-51/

Die Beladung der Behälter und die Zwischenlagerung der Inventare wird im Hinblick auf die Grenztemperatur von 125°C im äußeren Bereich des Bentonitbuffers festgelegt.

Die Endlagerbehälter werden in den Einlagerungsstrecken auf Bentonitauflagern abgelegt. Anschließend wird der Resthohlraum der Strecke mit Bentonitgranulat verfüllt (Abbildung 3-29).

3.3.3.3 Nachweis der Funktionalität

Das Design der stählernen Endlagerbehälter für BE und HAA befindet sich z. Z. im Konzeptstadium mit der Möglichkeit der Herstellung des Behälterkörpers und der grundlegenden Strukturausführung für eine isotrope Belastung /3-48/. Das Korrosionsverhalten wurde durch Modellrechnungen, Labor- und In-situ-Versuche sowie den Vergleich mit natürlichen Analoga bewertet /3-45/. Demnach ist für die Stahlbehälter in dem erwarteten chemischen Milieu eine Standzeit von mindestens 1.000 Jahre (wahrscheinlich 10.000 Jahre) sichergestellt. Weiterhin haben die Untersuchungen ergeben, dass der Stahl auch nach einer Beschädigung des Behälters eine chemische Barriere bildet, die reduzierende Verhältnisse sicherstellt. Außerdem sorbieren die Korrosionsprodukte des Behälters freigesetzte Radionuklide.

Die Details der Auslegung der Verschlüsse für die Endlagerbehälter wurden noch nicht festgelegt, doch könnte es sich um versenkte Verschlüsse handeln, die verschweißt werden /3-48/. Spezielle Untersuchungen zum Schweißen, den Spannungen an der Schweißnaht und anisotrope Belastungsszenarios wurden noch nicht untersucht. Es wird erwartet, dass man im Zuge zukünftiger Optimierungsschritte durch die umfangreichen industriellen Erfahrungen

in der Stahlverarbeitung zu einem hinreichenden Verständnis in den genannten Punkte kommt.

Der alternativ betrachtete Kupferbehälter basiert auf dem Design für das schwedische SKB-Konzept /3-52/. Alle Bewertungen bezüglich der Funktionalität basieren auf den entsprechenden Untersuchungen von SKB (siehe Kap.4.2.3). Als besonders vorteilhaft werden bei diesem Konzept die lange Standzeit von wenigsten 100.000 Jahren und die fehlende Gasbildung durch Korrosion angesehen /3-45/.

3.3.4 Verfüllen von Einlagerungsstrecken

3.3.4.1 Anforderungen an das Verfüllen von Einlagerungsstrecken

Entsprechend der großen sichertechnischen Bedeutung bestehen an das Puffermaterial zum Verfüllen der Einlagerungsstrecken eine Vielzahl von Anforderungen:

- So muss die Wärmeleitfähigkeit des Puffermaterials ausreichend sein, um einen Wärmestau zwischen Behälter und Puffer zu vermeiden und um die Grenztemperatur von 125°C im äußeren Bereich des Puffermaterials einzuhalten.
- Die Durchlässigkeit für Wasser muss gering sein, die Durchlässigkeit für Gas ausreichend, um die Entstehung von Überdrücken zu verhindern.
- Die mechanischen Eigenschaften des Puffermaterials müssen geeignet sein, um die Einlagerungsstrecke zu stabilisieren und das als Auflager verwendete Material muss das Behältergewicht tragen. Weiterhin muss das Material plastisch sein, um Behälterbelastungen zu dämpfen.
- Das Puffermaterial muss mit dem Wirtsgestein und dem Abfall kompatibel sein. Es soll freigesetzte Radionuklide zurückhalten und ein günstiges chemisches Milieu erhalten, dass die Behälterkorrosion und die Radionuklidmobilisierung begrenzt.
- Das Puffermaterial muss entsprechend den Standortbedingungen langzeitstabil sein.
- Im Betrieb muss das Material leicht handhabbar sein sowie eine gute Verfügbarkeit und angemessene Kosten aufweisen. Weiterhin soll das Material gesetzlichen Anforderungen genügen, es müssen bereits Erfahrungen über den Umgang vorliegen und der Forschungsbedarf muss begrenzt sein.

3.3.4.2 Puffer- und Verfüllmaterial

Im Opalinus-Tonprojekt wurde plastischer Bentonit als Puffer-/Verfüllmaterial in Einlagerungsstrecken ausgewählt, wobei besonders Smektitreiche Montmorillonite als geeignet angesehen werden. Hauptkriterien waren die geringe hydraulische Leitfähigkeit, das Quellvermögen und die Plastizität /3-45/. Die Langzeitstabilität des Bentonits kann durch eine große Zahl natürlicher Analoga belegt werden /3-52/, /3-53/.

Während die Auflager der Endlagerbehälter aus hoch kompaktierten Bentonitblöcken mit einer Trockendichte von $1,75 \text{ t/m}^3$ bestehen, wird der restliche Teil der Strecke mit hoch verdichteten, granularen Bentonitpellets verfüllt. Das Bentonitgranulat hat eine Trockendichte der einzelnen Granulat Körner von $2,2 \text{ g/cm}^3$, so dass die mittlere Trockendichte der Verfüllung ca. $1,5 \text{ g/cm}^3$ beträgt.

Die thermische Leitfähigkeit des Bentonits wird von der Einbaudichte und der Wassersättigung bestimmt. „Trockener“ Bentonit mit einem Wassergehalt von 2 %, der sowohl bei der Herstellung der Bentonitblöcke wie auch der Bentonitpellets verwendet wird, hat nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,4 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Nach der Einbringung des Materials in die Einlagerungsstrecke ist die Wiederaufsättigung des Bentonits durch das Porenwasser des Opalinustons ein relativ langsam fortschreitender Prozess /3-54/. Im Zuge des „Engineered Barrier“-Projekts, das im Untertagelabor in Mont-Terri durchgeführt wurde, wurde auch eine künstliche Aufsättigung des Bentonits mit Wasser erprobt /3-55/. Die Bentonit-Pellets entwickeln mit zunehmender Wassersättigung schnell eine homogene Mikrostruktur. Bei vollständiger Wassersättigung tritt ein Quelldruck von 2 bis 4 MPa bei einer hydraulischen Leitfähigkeit von 10^{-12} m/s auf. Durch die Gebirgskonvergenz wird der Bentonit zusätzlich bis zu einer Dichte von max. $2,15 \text{ g/cm}^3$ kompaktiert. Die Permeabilität reduziert sich dabei auf 10^{-13} m/s und die Wärmeleitfähigkeit erhöht sich auf $>1,4 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Eine weitere Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist durch eine Beimischung von Graphit möglich.

Aufgrund der hohen Gasbildungsraten, die vor allem aufgrund der Behälterkorrosion zu erwarten sind, und den niedrigen Diffusionsraten durch den Bentonit ist davon auszugehen, dass, sobald der Gasdruck den Quelldruck des Bentonits plus den lithostatischen Druck überschreitet, Risse im Bentonit aufreißen werden, durch die das Gas abfließen kann. Aufgrund der Plastizität des Bentonits werden diese Risse anschließend wieder verheilen.

3.3.4.3 Technisches Konzept für die Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial

Technische Konzepte zur Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial wurden im Zuge der Opalinus-Tonstudie erarbeitet und analysiert /3-51/.

Die Bentonitauflager werden in einem entsprechenden Werk vorgefertigt und einsatzbereit angeliefert. Sie bestehen aus hochkompaktierten, gegenseitig verzahnten Bentonitblöcken, die von einem Auflagerträger aus Stahl gehalten werden. Die Bentonitauflager werden mit dem darauf abgelegten Endlagerbehälter mittels Einlagerungstrolley in die Strecke gefahren und an der Einlagerungsposition abgesetzt (Abbildung 3-30). Nach dem Ausfahren des Einlagerungstrolleys kann anschließend das Verfüllen mit dem Bentonitgranulat beginnen. Hierfür wird ein Verfüllwagen eingesetzt, der 11 m^3 Granulat fasst und eine Verfüllleistung von $14 \text{ m}^3/\text{h}$ aufweist (Abbildung 3-31). Er ist so konstruiert, dass er eingelagerte Abfallgebinde überfahren und dadurch mit seinen Entladerohren den Anschluss an den bestehenden Verfüllabschnitt herstellen kann. Das Granulat wird seitlich mit je einem Förderband zu den Entladerohren transportiert, von wo es mit Spiralförderern in die Strecke eingebracht wird. Mit fortschreitender Verfüllung wird der Wagen kontinuierlich zurückgezogen. Der Verfüllfortschritt wird mit TV-Kamera und Lasermessgerät überwacht bzw. gesteuert. Eine

Verstaubung der Geräte wird einerseits durch Einpressen des Granulats in die bereits eingebracht Verfüllung und andererseits durch Absaugen der Luft durch ein Lüftungsrohr vermieden. Die Energieversorgung des Verfüllwagens erfolgt über Elektro- und Steuerkabel, welches auf einer Trommel auf dem Wagen montiert ist.

Für den Abschluss der Verfüllung einer Einlagerungsstrecke zur Hauptstrecke hin ist ein Verschlussbauwerk vorgesehen (Abbildung 3-33).

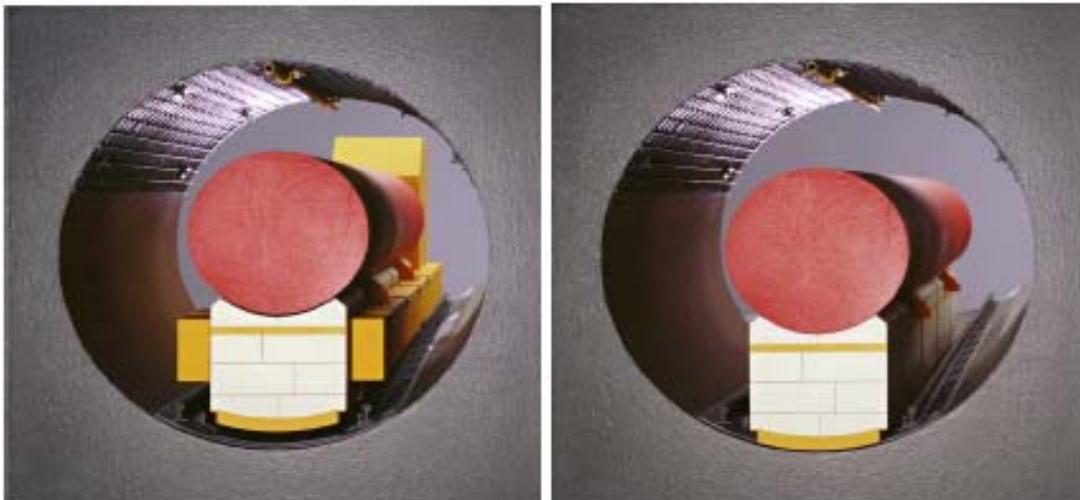


Abbildung 3-30: Einfahren eines Endlagerbehälters mit Bentonitauflager in die Einlagerungsstrecke.

Bild links: Absetzen durch den Einlagerungstrolley, Bild rechts: bereit zum Einbringen des Bentonitgranulates /3-51/

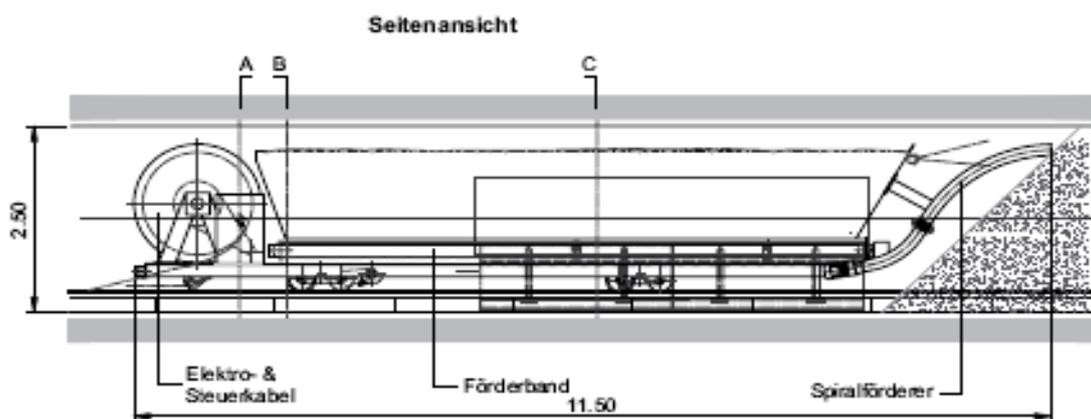


Abbildung 3-31: Verfüllwagen für Bentonitgranulat /3-51/

3.3.4.4 Nachweis der Funktionalität

Bereits 1992 wurden erfolgreich Versuche zur Herstellung von Bentonitgranulat mit hoher Schüttdichte durchgeführt /3-45/.

Von 2000-2003 wurde ein weiterer Großversuch im Maßstab 1 : 1 im Untertagelabor in Mont Terri durchgeführt. Dabei wurde das Systemverhalten Bentonitblockauflager – Bentonitgranulatverfüllung – Hezelement – Wassereinwirkung in einem In-situ-Versuch untersucht /3-55/, /3-45/. Es konnte gezeigt werden, dass Bentonitgranulat in der erforderlichen Qualität im industriellen Maßstab hergestellt werden kann. Für die Einbringung wurden die drei alternative Förderband, Spiralförderer und pneumatische Einbringung untersucht. Die besten Ergebnisse erbrachte dabei der Spiralförderer. Wenn dieser bis in das Verfüllgut reicht, und dies ist als Qualitätssicherungsmaßnahme notwendig, kommt es – wie erwartet – nur zu einer geringen Staubentwicklung. Im Versuch konnte eine weitgehend homogene Verfüllung mit einer Dichte von 1,4-1,5 g/cm³ über den gesamten Streckenquerschnitt in einem Arbeitsgang erzielt werden (Abbildung 3-32). Anschließend wurde das Verfüllmaterial durch an der Streckenkontur verlegte Leitungen bewässert. Der resultierende Quelldruck des Verfüllmaterials führte zu einer Selbstverheilung der Auflockerungszone um die Strecke.

2006 wurde ein weiterer Verfüllversuch mit Bentonitgranulat an einem Stahlmodell im Maßstab 1 : 1,25 durchgeführt, wobei die Aggregatgröße, die Fraktionsverteilung und die Einbringtechnik (Twin-Spiralförderer) geändert wurden /3-55/.

Aufgrund der Ergebnisse der genannten Großversuche können Messprogramme für den Nachweis der Funktionalität in künftigen Versuchen festgelegt und entsprechende Computerprogramme validiert und verifiziert werden.



Abbildung 3-32: Großversuche zur Verfüllung von Einlagerungsstrecken

Links: Spiralförderer, Mitte: Verfüllen der Strecke mit Bentonitgranulat, Rechts: Versuchsanordnung vor Einbringen des Bentonitgranulats mit Bentonitauflagerblöcken, Behälter mit Hezelement und perforierten Bewässerungsrohren

3.3.5 Verfüllen von Verbindungsstrecken

3.3.5.1 Anforderungen

Die Verfüllung der Verbindungsstrecken dient der Resthohlraumminimierung und der mechanischen Stabilisierung der Strecken /3-45/, /3-51/. Das Verfüllmaterial muss mit dem Wirtsgestein kompatibel sein. Eine weitere Spezifizierung der Anforderungen an das Verfüllmaterial ist noch erforderlich (z. B. Einbaudichte oder die mechanischen Anforderungen).

3.3.5.2 Verfüllmaterialien

Die Verfüllung von Verbindungsstrecken soll mit einem Bentonit-Sand-Gemisch erfolgen. Um den Quelldruck zu begrenzen, ist ein Mischungsverhältnis von 30 % Bentonit und 70 % Sand vorgesehen.

Alternativ sollen aber auch noch andere Mischungsverhältnisse und Materialien untersucht werden.

3.3.5.3 Technisches Konzept zur Verfüllung

Ein Konzept zur Einbringung der Verfüllung in den Verbindungsstrecken ist noch festgelegt. Hierfür kommen die entsprechenden Standardverfahren des Bergbaus (Schütt-, Blas- und Schleudertechnik) in Frage. Voraussetzung für die Einhaltung der mechanischen Anforderungen ist der qualitätsgesicherte Einbau des Verfüllmaterials mit vorgegebener Einbaudichte und gemäß weiterer Anforderungen.

3.3.5.4 Nachweis der Funktionalität

Entsprechend dem konzeptuellen Stand der Streckenverfüllung und der bisher nur qualitativen Anforderungen an die Streckenverfüllung wurde noch kein Nachweiskonzept entwickelt.

3.3.6 Verschlüsse von Strecken

3.3.6.1 Anforderungen

Durch die Verschlüsse soll, in Verbindung mit der streckenweisen Verfüllung, die Barrierenwirkung des durch Bergbauaktivitäten beeinträchtigten Wirtsgesteins als Transportbarriere wieder hergestellt werden. Daher sind an sicherheitstechnisch relevanten Stellen Verschlüsse einzubauen, die als hydraulische Barrieren konzipiert sind. Weiterhin sollen die Barrieren eine gebirgsstützende Wirkung haben, um Bruch-, Auflockerungs- und Verformungserscheinungen des streckennahen Gebirgsbereiches entgegen zu wirken.

Alle Verschlussbauwerke bestehen aus einem Dichtelement und den statischen Widerlagern.

Das Bemessungskriterium für das Dichtsystem ist das Unterschreiten eines bestimmten, durch hydrodynamische Modellrechnungen festzulegenden kritischen Volumenstroms. Dadurch wird die kombinierte Wirkung der Durchlässigkeit des Dichtsystems und der Auflockerungszone sowie der hydraulische Gradient berücksichtigt.

Die Widerlager dienen der Aufnahme bzw. Ableitung der durch den Flüssigkeits- bzw. Quelldruck hervorgerufenen Kräfte in das Gebirge. Zur konstruktiven Gestaltung und Bemessung sind neben den Belastungen detaillierte geotechnisch/felsmechanische Angaben notwendig.

An die Verschlussbauwerke in den Hauptstrecken besteht die Anforderung, dass diese Bauwerke für ein Zeitraum von wenigsten 100 Jahren in der Lage sind, einen Wasserzutritt bzw. einen Wasseraustritt aus den Endlagerbereichen zu verhindern.

3.3.6.2 Verschlussmaterialien und -design

Die vorgesehenen Positionen für die Verschlussbauwerke sind Abbildung 3-26 zu entnehmen. Grundelemente der Verschlussbauwerke sind Dichtelemente und Widerlager. Als Material für die Dichtelemente sind aufgrund der geringen Durchlässigkeiten, des Quellvermögens, der Langzeit- und Erosionsbeständigkeit Bentonit bzw. Mischungen aus Bentonit und Zuschlagstoffen vorgesehen. Als Material für die Widerlager werden je nach den Anforderungen an die Langzeitstabilität

- für kürzere bis mittlere Zeiträume: Beton oder
- für hohe Langzeitstabilität: Trockenmauerwerk aus Natursteinen bzw. das Einbringen von Schotterkies aus Basalt, Diabas oder Granit mit entsprechenden Übergangsschichten

verwendet. Das Design der Barrieren wird ihrer jeweiligen Position im Endlager und ihrer Funktion angepasst /3-51/.

Die Verschlussbauwerke der Einlagerungsstrecken für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente verfügen über ein 12 m langes Hauptdichtelement aus Bentonitgranulat, das sich unmittelbar an die verfüllte Strecke anschließt. Anschließend folgen ein statisches Widerlager aus Schotter und ein zweites Dichtelement mit einer Bentonit/Sand-Verfüllung (Abbildung 3-33). Zur Hauptstrecke hin wird das Verschlussbauwerk durch eine Betonwand abgeschlossen.

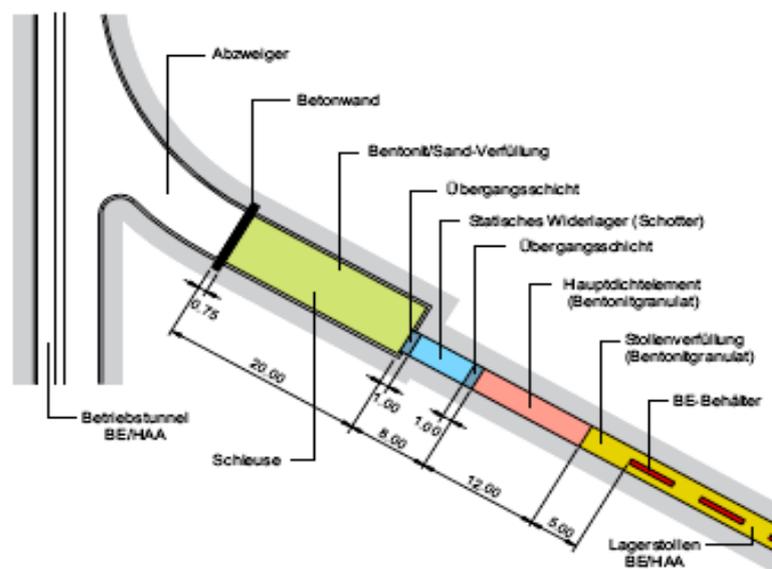


Abbildung 3-33: Design für den Verschluss einer Einlagerungsstrecke

Die Lagertunnel für langlebige mittelaktive Abfälle werden nach der Resthohlraumverfüllung mit Zement mit einem Betonpfropfen verschlossen.

Die Verschlussbauwerke in den Hauptstrecken (Bautunnel und Betriebstunnel, vgl. Abbildung 3-26) sollen wenigstens 100 Jahre als hydraulische Barriere gegen zutretende Wässer aus anderen Teilen Endlagers oder gegen potenziell kontaminierte Wässer aus den Lagerbereichen dienen /3-51/. Das 30 m lange Dichtelement besteht aus kompaktiertem Bentonitgranulat oder aus Bentonitblöcken und verfügt zum Lastabtrag beidseitig über Betonwiderlager.

3.3.6.3 Technisches Konzept

Das technische Konzept für die Errichtung der Verschlussbauwerke basiert auf den praktischen Erfahrungen bei den Großversuchen zur Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial in die Einlagerungsstrecken (vgl. Kap. 3.3.4.3).

Die Verschlussbauwerke der Einlagerungsstrecken für hochradioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente, werden bereits während der Betriebsphase sukzessive nach dem Abschluss der Behältereinlagerung und der Verfüllung einer Einlagerungsstrecke errichtet /3-51/. Dabei wird die Streckenverfüllung fortgeführt und am Ende durch ein Widerlager aus Schotter ergänzt. Der ehemalige Eingangs- und Schleusenbereich wird als zusätzliches Dichtelement mit einem Bentonit/Sand-Gemisch verfüllt und durch eine Betonmauer abgeschlossen.

In ähnlicher Weise werden auch die Lagertunnel für langlebige mittelaktive Abfälle während der Betriebsphase nach Abschluss der Einlagerung und der Verfüllung mit Zement durch einen Betonpfropfen verschlossen.

Die Verschlüsse der Hauptstrecken werden am Schluss der Überwachungsphase errichtet sobald die Streckenverfüllung bis zu den vorgesehenen Barrierenpositionen fortgeschritten sind. Hierfür wird zunächst der Streckenausbau demontiert und die Auflockerungszone von der Streckenkontur entfernt. Vorgesehen ist ein Nachschnitt von ca. 0,5 bis 1,0 m. Nach Gießen des Betonwiderlagers kann das Dichtelement mit einer Verfüllmaschine für Bentonitgranulat oder einer adäquaten Technik bei der Verwendung von Bentonitblöcken eingebracht werden (Abbildung 3-32). Abschließend wird das zweite Betonwiderlager gegossen.

3.3.6.4 Nachweis der Funktionalität

Verschlussbauwerke wurden noch nicht im Großversuch errichtet und erprobt. Doch da die Materialien für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit dem Dichtmaterial der Verschlussbauwerke identisch sind, können die entsprechenden Nachweise z. B. für die Permeabilität, den Quelldruck, die mechanische Stabilität und die Kompatibilität mit dem Wirtsgestein sowie zur Herstellbarkeit und zur Anwendung hier übernommen werden.

3.3.7 Schacht- und Rampenverschlüsse

3.3.7.1 Anforderungen

Den Verschlüssen von Schacht und Rampe kommt besondere Bedeutung zu, da sie zwei direkte Verbindungen zwischen den Einlagerungsbereichen und der Biosphäre dauerhaft versiegeln soll. Es werden daher sowohl an die Dichtelemente wie auch an den Lastabtrag durch die Widerlager sehr hohe Anforderungen gestellt. So sollte die Permeabilität des Dichtelements mindestens der des Wirtsgesteins entsprechen und die Widerlager müssen den maximal zu erwartenden Gesteins-, Wasser- und Gasdrücken dauerhaft widerstehen können. Die hochkompaktierten Bentonitblöcke für die Dichtelemente sollen eine Dichte aufweisen, die ausreicht, um einen Quelldruck von 9 MPa erzeugen /3-45/. Durch diesen Druck soll die Gebirgskonvergenz gebremst und die Entstehung einer neuen Auflockerungszone vermieden werden.

Die überwiegend qualitativen Anforderungen an die Schacht- und Rampenverschlüsse müssen durch die Definition exakter Kriterien in Zukunft noch konkretisiert werden. Grundlagen hierfür können die Ergebnisse der Standortuntersuchungen und In-situ-Versuche für Verschlussbauwerke sowie die Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit sein.

3.3.7.2 Verschlussmaterialien und Design

Die vorgesehenen Materialien für die Verschlussbauwerke in Schacht und Rampe entsprechen den Materialien für die untertägigen Barrieren und Verfüllmaßnahmen.

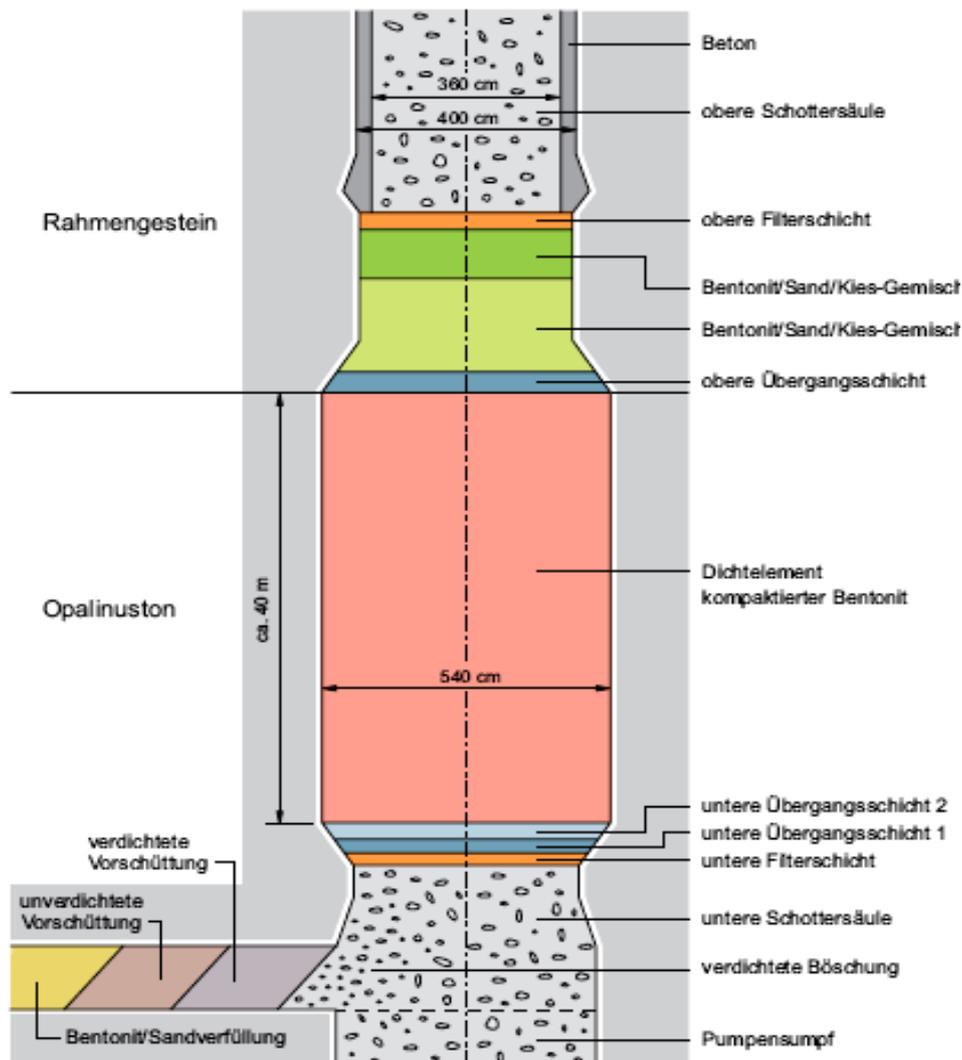


Abbildung 3-34: Konzept für den Schachtverschluss /3-51/

Es sind zwei Schachtverschlüsse vorgesehen: einer im Opalinus-Ton dicht oberhalb des Einlagerungsniveaus und der zweite zum Verschluss des Aquifers des Wedelsandsteins im Deckgebirge. Der Schacht wird durch eine setzungsstabile Schottersäule gefüllt, die als Widerlager für den ca. 60 m langen Verschluss dient. Das 40 m lange Hauptdichtelement besteht aus hochkompaktiertem Bentonit als Granulat oder Blöcke. Oberhalb dieses Hauptdichtelementes schließt sich noch eine zweite ca. 12 m starke Schicht aus Bentonit, Sand und Kies an.

In ähnlicher Weise sind zwei Verschlussbauwerke für die Rampe vorgesehen: eines im Opalinus-Ton und das zweite im Bereich des Wedelsandsteins. Das Design der Barrieren entspricht dem der Schachtverschlüsse. Die Widerlager sollen aus langzeitändigem Schotter erstellt werden. Für das Dichtelement sind hochkompaktierte Bentonitblöcke vorgesehen /3-45/.

Zur Verfüllung der Rampe wird ein Bentonit-Sand-Gemisch eingesetzt.

3.3.7.3 Technisches Konzept

Während das technische Konzept für die Errichtung der Verschlussbauwerke in der Rampe ebenfalls auf den praktischen Erfahrungen bei den Großversuchen zur Einbringung von Puffer- und Verfüllmaterial in die Einlagerungsstrecken basiert (vgl. Kap. 3.3.4.3), ergeben sich für den Schachtverschluss entsprechend dem vertikalen Schachtverlauf Abweichungen.

Die Schachtverschlüsse werden bereits zum Ende der Überwachungsphase errichtet. Dafür werden zunächst die tieferen Schachtteile mit setzungsstabilem Schotter verfüllt. Im Bereich des Schachtfüllortes wird durch z. T. verdichtete Vorschüttungen der Anschluss an die verfüllte Strecke hergestellt (Abbildung 3-34). Im Bereich der vorgesehenen Position des Verschlussbauwerkes wird der Schachtausbau entfernt und der darunter liegende aufgelockerte Gebirgsbereich (ca. 1 m) weggeschnitten. Die konturbündige Einbringung des Bentonits im Bereich des Dichtelementes ist – da die Gravitation hier parallel zur Längsachse des Verschlusselementes wirkt und alle Bereich des Querschnitts gut zugänglich sind – in einem Schacht prinzipiell leichter als in einer Strecke. Eingebrachtes Bentonitgranulat wird einerseits gravitativ verdichtet und kann zudem problemlos maschinell weiter verdichtet werden.

Die Rampe wird als letztes verfüllt und verschlossen sobald die Entscheidung für den endgültigen Verschluss des Endlagers getroffen wurde. Das technische Konzept für die Errichtung der beiden Verschlussbauwerke orientiert sich am Konzept für Verfüllung/Verschluss der Einlagerungsstrecken und die Barrieren in den Hauptstrecken /3-51/. Auch hier wird vor der Errichtung des 80 m langen Verschlussbauwerkes der Streckenausbau demontiert und die Auflockerungszone von der Streckenkontur entfernt und eine Betonmauer errichtet. Anschließend wird zunächst das Widerlager aus Schotter, dann das Dichtelement aus Bentonitblöcken, schließlich das zweite Widerlager aus Schotter und eine Abschlusswand aus Beton errichtet.

Die detaillierten Maßnahmen zur Abdichtung der Aquifere im Deckgebirge werden aufgrund der Ergebnisse des Rampenbaus bzw. Schachtabteufens festgelegt.

3.3.7.4 Nachweis der Funktionalität

Die Errichtung von Schacht- oder Rampenverschlüssen wurde noch nicht im Großversuch errichtet und erprobt. Doch da die Materialien für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit dem Dichtmaterial der Schacht- oder Rampenverschlüsse identisch sind, können die entsprechenden Nachweise z. B. für die Permeabilität, den Quelldruck, die mechanische Stabilität und die Kompatibilität mit dem Wirtsgestein sowie zur Herstellbarkeit und zur Anwendung hier übernommen werden.

4 Endlager in Kristallingesteinen

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 (Onkalo), Schweden (Oskarshamn/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 Abfallbinde 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 vor. Um die günstigen Eigenschaften des Ton-Puffers (Quellvermögen, Plastizität, geringe Permeabilität, ausreichende Wärmeleitfähigkeit, Sorptionsvermögen für Radionuklide) langfristig zu erhalten, werden auch 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.

Auch in Kristallingesteinen spielt der Schachtverschluss eine Sonderrolle unter den geotechnischen Barrieren, da der Schacht die geologische Barriere perforiert und eine direkte Verbindung zwischen dem Endlager und der Biosphäre herstellt. Die Langzeitbeständigkeit des Schachtverschlusses muss daher mehrere 10.000 bis 100.000 Jahre umfassen.

Im folgenden werden die für ein Endlager vorgesehenen Verfüll- und Verschlusskonzepte in Finnland und in Schweden dargestellt.

4.1 Finnland

Die Arbeiten zur geologischen Endlagerung der ausgedienten Brennelemente wurden ca. 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 /4-1/.

Zur Frage der Rückholbarkeit legt eine von STUK (Behörde für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit) auf der Grundlage der Regierungsentscheidung von 1999 über die Sicherheit der Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes erlassene Regelung fest, dass in der Nachbetriebsphase eine Rückholung der Abfallgebinde über die Periode möglich sein muss, in der die technischen Barrieren einen vollständigen Einschluss der endgelagerten radioaktiven Substanzen zu gewährleisten haben /4-2/. 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.

Im Forschungs- und Entwicklungsprogramm der POSIVA wurde eine Endlagerplanung unter Berücksichtigung der Rückholung vorgesehen /4-3/. Weiterhin muss die Langzeitsicherheit des Endlagers ohne irgendwelche Anforderungen im Hinblick auf ein Monitoring gesichert sein. Bezüglich der Rückholbarkeit beabsichtigt Finnland eine Zusammenarbeit mit der SKB in Schweden.

4.1.1 Endlagerkonzept

POSIVA orientiert sich bezüglich des Endlagerkonzeptes für ausgediente Brennelemente in einer Granitformation am KBS-3 Konzept der schwedischen SKB /4-1/. Das Referenzkonzept sieht die Einlagerung der Endlagerbehälter in vertikalen Bohrlöchern vor (KBS-3V).

Bei den Endlagerplanungen wurden ein einsöhliges Endlager in einer Tiefe von –420 mNN als Referenzkonzept betrachtet /4-1/.

Wesentliche Kriterien für die Auslegung des Endlagers sind /4-1/:

- Die Lebensdauer der Behälter unter den im Endlager zu erwartenden Bedingungen soll mindestens 100.000 Jahre betragen.
- Die Behälter müssen einem hydrostatischen Druck von 14 MPa sowie einem Lastdruck von 30 MPa – resultierend von einer angenommenen 3 km dicken Eisschicht während einer Eiszeit – standhalten.
- Die Oberflächentemperatur der Behälter soll derart sein, dass eine Temperatur von weniger als 100 °C im Verfüllmaterial Bentonit eingehalten werden kann.
- Die Konstruktion und Standfestigkeit der Behälter müssen eine Rückholung der Behälter aus dem Endlager gestatten, wenn dies als notwendig oder zweckmäßig erachtet wird.

Das Grubengebäude des Endlagers besteht aus einem System von Transport- und Einlagerungsstrecken, die über eine Zugangsrampe und sechs Schächte mit der Oberfläche verbunden sind (Abbildung 4-1). Die untertägigen Anlagen werden sich in einen Kontrollbereich (in dem gerade 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 4-1). Die mit 25 m Abstand aufgefahrenen Einlagerungsstrecken haben – in Abhängigkeit von den einzulagernden Abfallgebänden – einen Querschnitt von 12,6 bis 14,0 m² und eine maximale Länge von 350 m /4-1/.

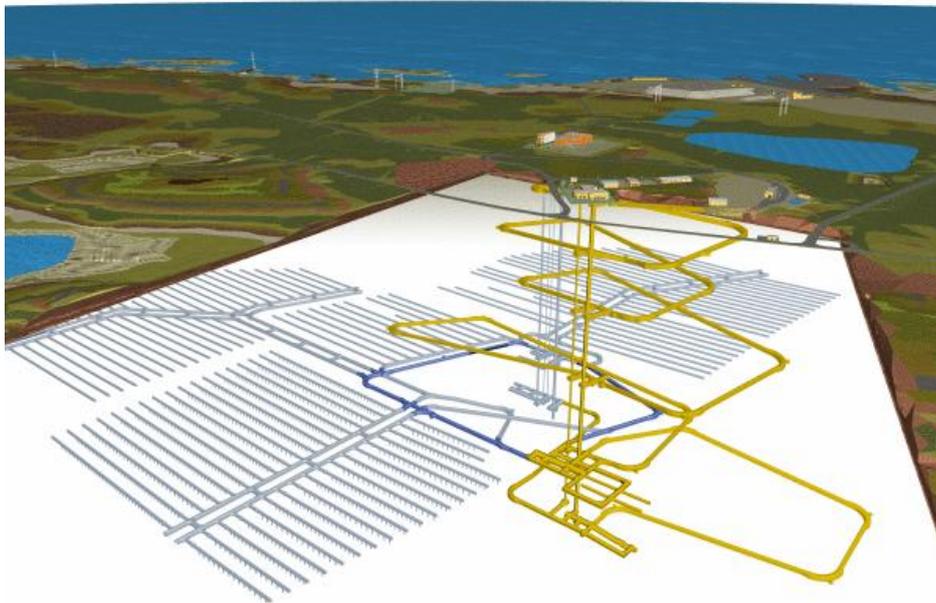


Abbildung 4-1: Endlager Olkiluoto – Schematisches Layout /4-4/

In den Boden der Einlagerungsstrecken werden Einlagerungsbohrlöcher mit einem Durchmesser von 1,75 m und einer Tiefe von 6,6 und 8,2 m (je nach Behältertyp) niedergebracht (Abbildung 4-2). In das Bohrloch wird zunächst eine Bodenschicht Bentonit und dann vorgefertigte Bentonitringe eingebracht. Nach dem Einsetzen des Endlagerbehälters wird der verbleibende Hohlraum ebenfalls mit Bentonit verfüllt. Der Bohrlochabstand variiert je nach der Wärmeleistung der Behälter zwischen 8,6 und 11,0 m. Die Strecken- und Bohrlochabstände werden so ausgewählt, dass die Temperaturgrenze von 100 °C für den Bentonitpuffer nicht überschritten wird. (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 4-1). Die mit 25 m Abstand aufgefahrene Einlagerungsstrecken haben – in Abhängigkeit von den einzulagernden Abfallgebinden – einen Querschnitt von 12,6 bis 14,0 m² und eine maximale Länge von 350 m /4-1/.

In den Boden der Einlagerungsstrecken werden Einlagerungsbohrlöcher mit einem Durchmesser von 1,75 m und einer Tiefe von 6,6 und 8,2 m (je nach Behältertyp) niedergebracht (Abbildung 4-2). In das Bohrloch wird zunächst eine Bodenschicht Bentonit und dann vorgefertigte Bentonitringe eingebracht. Nach dem Einsetzen des Endlagerbehälters wird der verbleibende Hohlraum ebenfalls mit Bentonit verfüllt. Der Bohrlochabstand variiert je nach der Wärmeleistung der Behälter zwischen 8,6 und 11,0 m. Die Strecken- und Bohrlochabstände werden so ausgewählt, dass die Temperaturgrenze von 100 °C für den Bentonitpuffer nicht überschritten wird.

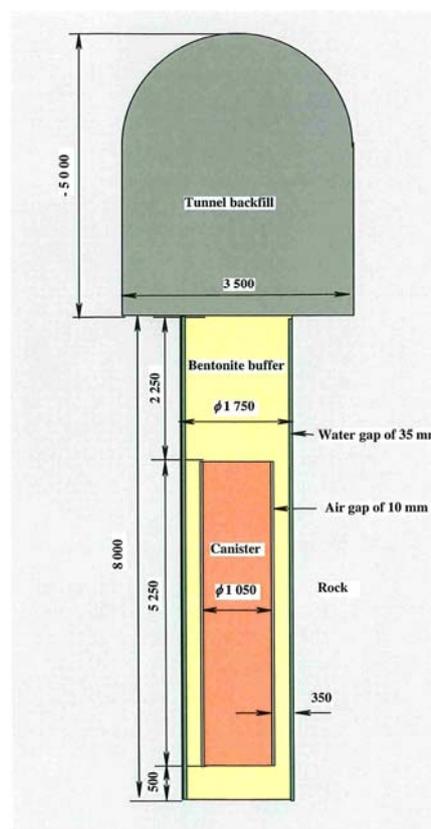


Abbildung 4-2: Schnitt durch eine verfüllte Einlagerungsbohrung /4-4/

4.1.2 Verfüll- und Verschlusskonzept

4.1.2.1 Funktion und Design

Wie eingangs bereits erwähnt, basiert das Multibarrierensystem in Kristallingesteinen im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren. Das Wirtsgestein selber hat aufgrund seiner Klüftigkeit und Wasserführung nur eine untergeordnete Rückhaltefunktion für das radioaktive Inventar.

Basierend auf der Analyse der standortspezifischen Verhältnisse und langzeitsicherheitlicher Betrachtungen wurden Sicherheitsfunktionen identifiziert, die durch die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen umzusetzen sind. Eine grundlegende Anforderung ist der Verschluss von potentiellen Zutritts- bzw. Freisetzungspfaden für Lösungen, die durch das Grubengebäude geschaffen werden. Weiterhin wurden die folgenden Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen identifiziert /4-5/:

- Geringe hydraulische Leitfähigkeit,
- hohes Radionuklidsorptionsvermögen,
- chemische und mechanische Langzeitstabilität im Milieu des Wirtsgesteins,
- ausreichende Dichte und geringe Komprimierbarkeit,
- keine negativen Auswirkungen auf die Funktion anderer Barrieren,

Die erste technische Barriere ist die Abfallform bestehend aus den Brennstoffpellets und den sie einschließenden Zirkaloy-Hülsen. Diese beide Elementen weisen nur geringe Korrosionsraten auf. Der sie einschließende Endlagerbehälter ist durch eine Kupferbeschichtung langzeitkorrosionsbeständig und verhindert somit über wenigstens 100.000 Jahren einen Lösungszutritt zu den ausgedienten Brennelementen.

Wie bei den Endlagerkonzepten in Ton so spielt auch bei den Konzepten in Kristallingesteinen die Verwendung von Bentonit oder vergleichbaren Tonen als Verfüll- und Verschlussmaterial zur Erstellung geotechnischer Barrieren eine wesentliche Rolle. Dabei wird auch hier von den günstigen Eigenschaften des Materials (Plastizität, Quellvermögen, geringe Permeabilität und Radionuklidsorption) Kredit genommen. Um eine Auswaschung der Dichtelemente zu verhindern und eine Langzeitfunktion der Barrieren zu gewährleisten, muss die Barriere durch lösungsstabile Komponenten ergänzt werden.

Die Verfüllung und der Verschluss von Einlagerungsbohrungen und – sobald alle Bohrungen einer Strecke verfüllt sind – auch der Einlagerungsstrecken erfolgt bereits während der Betriebsphase. Auch der Abwurf ganzer Einlagerungsfelder ist nach Abschluss der Einlagerung im jeweiligen Bereich durch den Verschluss der entsprechenden Hauptstrecken bereits in der Betriebsphase möglich.

Das Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrungen und -strecken ist Schwerpunkt eines Forschungsprogramms (BACLO), das POSIVA gemeinsam mit der schwedischen SKB durchführt /4-4/. Im Zuge dieses Programms wurden geeignete Verschlussmaterialien untersucht, Errichtungstechniken erprobt, die Funktionalität des jeweiligen Barrierendesigns analysiert und die technische Machbarkeit nachgewiesen.

Nach Abschluss der Betriebsphase sind noch die Hauptstrecken, die Infrastrukturräume, die Zugangsrampe und die Schächte zu verfüllen und an sichertechnisch sensiblen Punkten (Störungsbereiche, Verbindungen zur Biosphäre) durch Verschlussbauwerke zu versiegeln. Detailplanungen wurden für diese Verfüll- und Verschlussmaßnahmen noch nicht durchge-

führt. Prinzipiell sollen sie sich an den umfassend untersuchten Verfüll- und Verschlusskonzepten für die Einlagerungsbohrlöcher und -strecken orientieren /4-4/.

4.1.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion

Es wurde der Entwurf eines Nachweiskonzeptes für verschiedene Schließungskonzepte entwickelt /4-5/. Dabei wurden einerseits Auslegungskriterien für die verschiedenen Maßnahmen abgeleitet und andererseits Methoden zum Nachweis der Erfüllung dieser Anforderungen beschrieben. Die entscheidenden Eigenschaften der Barrieren sind die Komprimierbarkeit, die hydraulische Leitfähigkeit, der Quelldruck, die Langzeitstabilität und die Vermeidung ungünstigen Auswirkungen auf andere Barrieren.

Die Grundlagen für dieses Nachweiskonzept wurden im Zuge des BACLO-Projektes erarbeitet, bei dem die Barriereneigenschaften wurde im Hinblick auf die nukleare Sicherheit, den Strahlenschutz und die Langzeitsicherheit bewertet wurden. Die folgenden quantitativen Kriterien wurden für den Nachweis der Barrierenfunktion in Einlagerungsbereichen festgelegt /4-6/:

- um einen Grundwasserfluss zu vermeiden soll der Quelldruck des Verfüllmaterials wenigstens 0,1 MPa betragen,
- um die Advektion des Grundwassers zu begrenzen soll die hydraulische Leitfähigkeit des Materials unter 10^{-10} m/s sein,
- um eine Reduzierung der Dichte des Puffermaterials in den Einlagerungsbohrlöchern zu vermeiden, soll das Kompressionsmodul des Verfüllmaterials wenigstens 10 MPa sein.

Um diese Kriterien zu erfüllen, muss ein materialspezifisches Dichtekriterium eingehalten werden, dass für verschiedene Bentonittypen zwischen $1,18 \text{ g/cm}^3$ und $1,51 \text{ g/cm}^3$ und für Bentonit-Sand bzw. Gesteinsbruch-Mischung zwischen $1,56$ und $1,85 \text{ g/cm}^3$ liegt. Die Nachweisverfahren sind in /4-5/ beschrieben.

4.1.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

Wie andere Länder, orientiert sich POSIVA bei der Entwicklung des Sicherheitsnachweiskonzeptes ebenfalls an den Vorschlägen der IAEA /1-7/ und NEA /1-8/ für den „Safety Case“. Weiterhin werden Anforderungen der finnischen Behörde für Strahlung und nukleare Sicherheit (STUK) berücksichtigt.

Der Nachweis ist als eine Synthese von Beweisen, Analysen und Argumenten vorgesehen, die die Sicherheit der vorgesehenen Anlage quantifiziert und begründet sowie das Vertrauensniveau abschätzt /4-4/, /4-10/, /4-12/. Im Zuge des Sicherheitsnachweises sollen 10 Berichte erstellt werden (Abbildung 4-3):

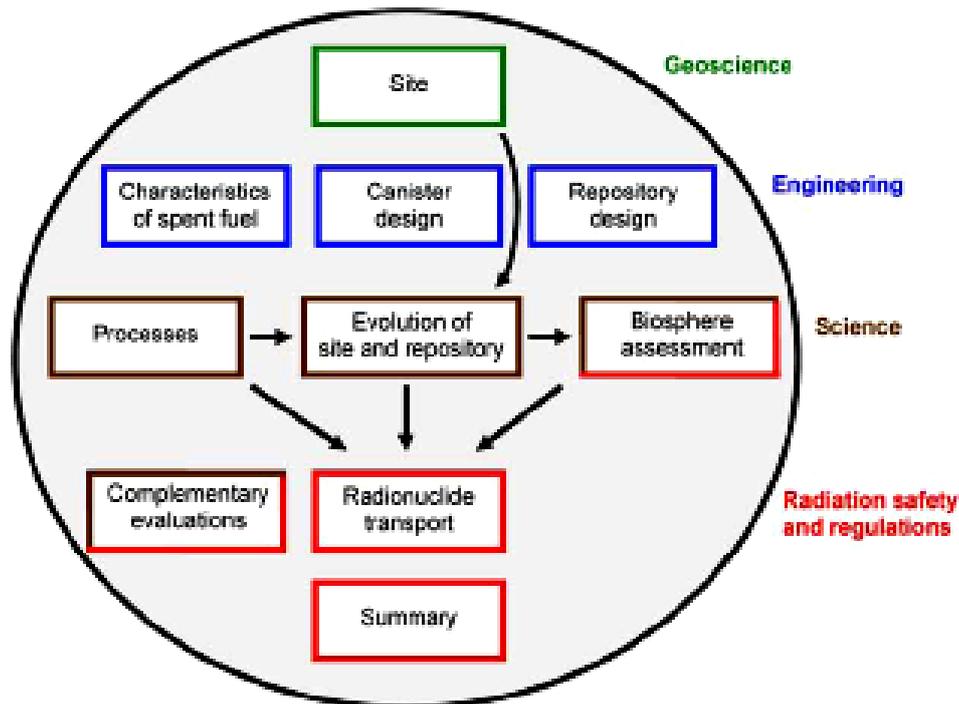


Abbildung 4-3: Im Zuge des Sicherheitsnachweises zu erstellende Berichte.
Die Farben markieren die Art der Berichte und die Pfeile zeigen den Hauptdatenfluss an Erkenntnissen und Daten zwischen den Berichten /4-10/

- Der Standortbericht („Site“) beschreibt die derzeitigen Standverhältnisse und die Entwicklung in der Vergangenheit sowie die Störung der Verhältnisse durch die Errichtung des Untertagelabors ONKALO.
- Die Berichte „Eigenschaften der Brennelemente“, „Behälterdesign“ und „Endlagerdesign“ beschreiben die technischen Komponenten des Endlagersystems.
- Der Bericht „Abläufe“ diskutiert Eigenschaften, Ereignisse und Abläufe (FEP), die das Endlagersystem beeinflusst.
- Der Bericht „Entwicklung des Standortes und des Endlagers“ beschreibt die Entwicklung des Endlagersystems von der Einlagerung des ersten Behälters bis weit in die Zukunft.
- Die radiologische Sicherheit und die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen wird in den Berichten „Biosphärenbewertung“, „Radionuklidtransport (Sicherheitsbewertung)“ und „Ergänzende Bewertung der Sicherheit (z. B. natürliche Analoga)“ dargestellt.
- Der Bericht „Zusammenfassung“ resümiert die wesentlichen Ergebnisse und Argumente des Sicherheitsnachweises.

Die Berichte werden entsprechend dem Projektfortschritt periodisch überarbeitet, im Mittel alle drei Jahre.

Die bei der Sicherheitsbewertung zugrunde gelegte Normalentwicklung (Referenzszenario) geht davon aus, dass alle geotechnischen und technischen Barrieren entsprechend ihrer

Auslegung funktionieren und alle (oder fast alle) Behälter über den Nachweiszeitraum intakt bleiben. Weiterhin werden zwei Klimaentwicklungen (ein Eiszeit-Szenario und ein Szenario der globalen Erwärmung) berücksichtigt. Radionuklidtransport-Rechnungen wurden noch nicht durchgeführt.

Die weniger wahrscheinliche Alternativentwicklung unterstellt eine Beschädigung einiger Behälter.

Der vorgesehene Zeitplan für die Erstellung des Sicherheitsnachweises ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

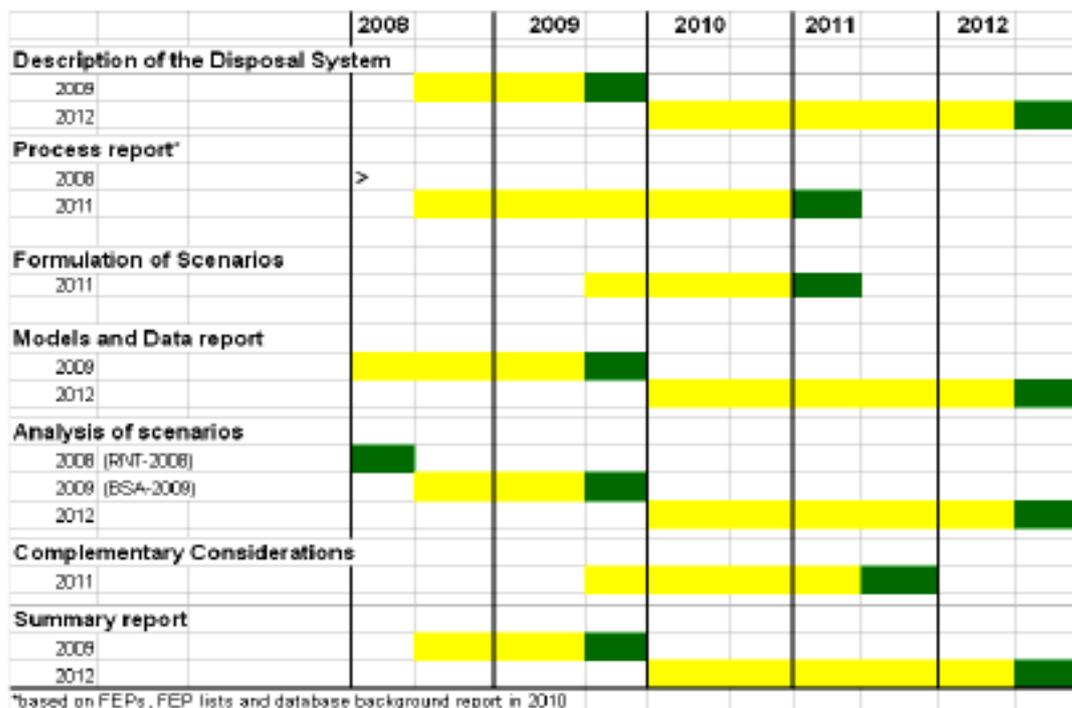


Abbildung 4-4: Zeitplan für die Erstellung des Sicherheitsnachweises /4-12/

4.1.3 Endlagerbehälterkonzept

4.1.3.1 Anforderungen an die Endlagergebäude

Die folgenden Auslegungsanforderungen wurden festgelegt, um die gesetzliche Anforderungen nach einem langzeitsicheren Einschluss der ausgedienten Brennelemente zu gewährleisten /4-4/:

- Die Standzeit des Behälters soll unter den Endlagerbedingungen wenigstens 100.000 Jahre betragen /4-11/.

- Die maximale Dosis an der Außenfläche des Behälters soll kleiner als 1 Gy/h sein, um die Radiolyse von Grundwasser und die Beeinträchtigung des Puffermaterials zu vermeiden.
- Die ausgedienten Brennelemente im Endlagerbehälter sollen unkritisch bleiben, auch wenn sich der Hohlraum im Behälter mit Wasser füllt.
- Die Temperatur an der Behälteroberfläche soll so sein, dass die Temperatur im Puffermaterial unter 100°C bleibt, um Umbildungen des Bentonits zu vermeiden.
- Der Behälter soll einem isostatischen Druck von 14 MPa widerstehen, der sich aus dem hydrostatischen Druck von 7 MPa in –400 bis –700 m Tiefe unter der Oberfläche sowie einem Quelldruck von 7 MPa durch das Quellen des Bentonitpuffers zusammensetzt.
- Der Behälter soll außerdem einem Druck von 30 MPa widerstehen, was dem maximalen Druckzuwachs durch einen 3 km dicken Gletscher während einer Eiszeit entspricht.
- Die Dicke des Kupferoverpacks soll den Belastungen durch den Umgang und Betrieb während der Einlagerungsphase standhalten.
- Der Behälter soll nicht die Funktion anderer Komponenten des technischen Barrierensystems beeinträchtigen.
- Das Design und die Langzeitbeständigkeit des Behälters sollen – falls erforderlich – eine Rückholung der ausgedienten Brennelemente aus dem Endlager ermöglichen.

4.1.3.2 Gebindematerialien und -design

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

Entsprechen den unterschiedlichen Abmessungen der in den Kernkraftwerken eingesetzten Brennelemente sind drei Behältertypen vorgesehen (Abbildung 4-5). Sie enthalten entweder 4 (EPR) oder 12 Brennelemente (BWR, VVER-440).



Abbildung 4-5: Finnland – Varianten von kupferummantelten Behältern für ausgediente Brennelemente (von links nach rechts): BWR-BE, VVER 440-BE und EPR-BE /4-4/

Boden und Deckel der Guss-Innenbehälter haben – mit Ausnahme des 70 mm dicken Bodens für den EPR-Behälter – eine Stärke von 50 mm.

Die Endlagerbehälter haben einen Durchmesser von 1,05 m, eine Länge von 3,6 bis 5,25 m, eine Wandstärke von 48 mm sowie Gesamtgewichte von 18,6 bis 29,1 t /4-4/. Die Korrosionsschutzschicht besteht aus sauerstofffreiem, hoch leitenden Kupfer mit der Beimischung von 30 bis 70 ppm Phosphor. Der Stahleinsatz besteht aus Sphäroguss der Bezeichnung EN-GJS-400-15U.

Gemäß dem Endlagerkonzept soll die Temperatur an der Oberfläche der Behälter 100 °C nicht überschreiten. Auf der Grundlage der thermischen Berechnungen wurde daher die Anfangswärmeleistung der Endlagerbehälter bei Einlagerung auf 1370 W für VV-440 BE, 1700 W für BWR-BE und 1830 W für EPR-BE begrenzt /4-4/.

4.1.3.3 Nachweis der Funktionalität

Die Behälterentwicklung und die dabei erfolgenden Nachweise für ihre Funktionalität werden meist in Kooperation mit der schwedischen SKB durchgeführt.

Das Korrosionsverhalten von Kupfer wurde unter Endlagerbedingungen untersucht und bewertet /4-11/, /4-13/. Demnach ist für die Kupferbehälter in dem erwarteten chemischen Milieu eine Standzeit von mindestens 100.000 Jahre (wahrscheinlich >1.000.000 Jahre) sichergestellt.

Die Verformbarkeit des Stahls EN-GJS-400-15U für den Innenbehälter ist nach der Norm EN 1563 für Teile mit Wandstärken von 60-200 mm wie folgt spezifiziert: Streckfestigkeit

240 MPa, Zugfestigkeit 370 MPa und Bruchdehnung 11 %. Die mechanischen Anforderungen an die Stabilität des Innenbehälters werden durch diese Eigenschaften abgedeckt. Die Kollapsdrucklast des Innenbehälters wurde mit numerischen Methoden analysiert, um zu verifizieren, dass die Wahrscheinlichkeit eines Behälterbruchs unter Endlagerbedingungen auf einem akzeptablen niedrigen Niveau ($<10^{-3}$) liegt /4-15/. Die Modellrechnungen werden durch Druckversuche der SKB an kompletten Endlagerbehältern ergänzt und bestätigt /4-16/.

4.1.4 Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbohrungen und -strecken

4.1.4.1 Einlagerungsbohrlöcher

4.1.4.1.1 Anforderungen

In Anlehnung an entsprechende SKB-Studien wurde die folgenden Anforderungen an das Puffermaterial in den Einlagerungsbohrlöchern festgelegt /4-9/:

- Stabile und günstige chemische und mechanische Eigenschaften,
- keine Eigenschaften, die die Funktion anderer Barrieren beeinträchtigen,
- Quelldruck von 1-10 MPa,
- hydraulische Leitfähigkeit $<10^{-10}$ m/s,
- ausreichende Permeabilität für Gase,
- Wärmeleitfähigkeit $>1,3$ W/mK,
- ausreichende Plastizität und Verformbarkeit um Gebirgsbewegungen zu dämpfen,
- die Fähigkeit Kolloide zu filtern,
- chemische Pufferkapazität, und
- die Begrenzung des Transportes von korrosiven Stoffen und Radionukliden durch Sorption und durch eine geringe Diffusivität.

4.1.4.1.2 Puffermaterial und -design

Als Puffermaterial für die Einlagerungsbohrlöcher ist aufgrund der günstigen Materialeigenschaften ein quellfähiger Bentonit vorgesehen /4-4/. Diese Festlegung basiert auf den umfangreichen Untersuchungsergebnisse zu verschiedenen Bentoniten, die in vielen Ländern erzielt wurden. Für die finnischen Untersuchungen wurden als Referenzmaterialien ein Na-Bentonit (MX-80) aus Wyoming (USA) und ein Ca-Bentonits (CA-N) von der Insel Mikos (Griechenland) ausgewählt. Durch umfangreiche Laboranalysen wurden chemophysikalischen Eigenschaften dieser Materialien unter den Standortbedingungen in Olkiluoto untersucht. Entscheidend ist dabei der Chemismus der salinaren Tiefenwässer /4-4/. Schwerpunkte der Forschungsarbeiten waren Untersuchungen des Sorptionsvermögens, der Wärmeleitfähigkeit, der Permeabilität und des Quellvermögens sowie die Verarbeitung des

Bentonits. Eine Festlegung auf die Verwendung eines Bentonit-Typs für das Referenzkonzept ist noch nicht erfolgt.

Die Einlagerungsbohrlöcher haben einen Durchmesser von 1,75 m bei einer Tiefe von 6,6 bis 8,2 m (Abbildung 4-2). Die Löcher werden mit Bentonitscheiben bzw. -ringen verfüllt, die bei der Herstellung mit einem Druck von 100 MPa komprimiert wurden. Die Dichte der Bentonitelemente beträgt nach der Aufsättigung mit Wasser 2 g/cm^3 bei einer Wärmeleitfähigkeit von $1,3 \text{ W/m/K}$ /4-1/. Dabei sorbiert der Na-Bentonit größere Wassermengen als der Ca-Bentonit und wird sich langfristig in einen Na-Ca-Mischbentonit mit abweichenden Eigenschaften umwandeln. In Abhängigkeit von hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins wird die Wiederaufsättigung des Puffermaterials im Bohrloch und das Erreichen des maximalen Quelldrucks einige Jahre bis einige 1.000 Jahre dauern. Der maximale Quelldruck erhöht sich mit zunehmender Dichte der Bentonitelemente und reduziert sich mit zunehmender Salinität des zutretenden Wassers /4-4/.

4.1.4.1.3 Technisches Konzept zum Einbringen des Puffermaterials

Vor der Einbringung des Puffermaterials wird das Einlagerungsbohrloch gereinigt und inspiert /4-1/. Die Sohle des Bohrlochlochs wird durch eine 5-10 cm starke Zementschicht horizontal nivelliert, um zu verhindern, dass die unteren Bentonitscheiben durch die Auflast des Behälters und die anderen Bentonitringe brechen. Auf der Zementschicht wird eine Kupferscheibe platziert, um den Bentonitpuffer vor Grundwasser zu schützen, das den Zement durchdringt.

Die Bentonitelemente sollen mit einer Transport- und Einbaumaschine eingebracht werden. Dabei wird nach der Vorbereitung des Bohrlochs an der Sohle zunächst eine 40 cm starke Bentonitscheibe abgelegt, über die dann – je nach der Länge des einzulagernden Endlagerbehälters – 9-12 Bentonitringe gestapelt werden, die den Endlagerbehälter umschließen. (Abbildung 4-2). Anschließend wird die Geradlinigkeit des Bentonitbaus durch das Ablassen eines Dummy-Behälters überprüft, wobei eine vertikale Toleranz der Ringe von $\pm 5 \text{ mm}$ akzeptiert wird /4-1/. Falls erforderlich, kann der Bentonitbau nachbearbeitet werden. Anschließend kann der Endlagerbehälter in das Bohrloch abgelassen werden und das Bohrloch durch 5 weitere Bentonitscheiben aufgefüllt werden.

Zwischen der Bentonitelementen und der Bohrlochwand befindet sich ein 25-35 mm breiter Spalt, zwischen den Bentonitringen und dem Behälter ein Spalt von 10 mm /4-1/. Nach dem Einbau kann in die Spalten Süßwasser („technisches Wasser“) eingebracht werden, um das Quellen des Bentonits zu beschleunigen und so die Spalten zu verschließen /4-9/. Weiterhin soll das Wasser dazu beitragen, die Wärmeabfuhr aus den Endlagerbehältern in der ersten Zeit zu verbessern.

4.1.4.1.4 Nachweis der Funktionalität

Die prinzipielle Eignung von Bentonit als Puffermaterial und die Herstellung der Bentonit-scheiben und -ringen wurden in einer Reihe von Projekten verschiedener Endlagerorganisationen nachgewiesen /4-17/, /4-18/.

Um die Eignung eines Bentonitpuffers für die jeweiligen Endlagerkonzepte und Standortbedingungen zu verifizieren, haben POSIVA und SKB im Rahmen des gemeinsamen BACLO-Programms verschiedene Varianten für das Material und die Einbringtechnik für die Verfüllung von Einlagerungsbohrungen und -strecken untersucht /4-5/, /4-6/. Die durchgeführten Arbeiten umfassen Laboruntersuchungen, Modellrechnungen, In-situ-Versuche sowie Produktionsversuche für die hochkompaktierten Bentonitelemente /4-5/, /4-6/, /4-9/. Bei den In-situ-Versuchen wird durch begleitende Messprogramme eine umfangreiche Datenbasis über den Einsatz des Bentonitmaterials, die Wechselwirkungen mit standortspezifischen Einflüssen und technische Aspekte gewonnen. Dieses Datenmaterial wird die Grundlage für die Validierung und Verifizierung entsprechender Computerprogramme sowie für die Fortführung des Programms zum Nachweis der Funktionalität und technischen Machbarkeit für Einbringung des Puffermaterials in die Einlagerungsbohrlöcher sein. Eine abschließende Bewertung der alternativen Bentonittypen sowie des Pufferkonzeptes wurde noch nicht durchgeführt, da die Versuche noch andauern.

Auch bei der Entwicklung des technischen Konzeptes für Transport und Einbringung des Puffermaterials befindet sich POSIVA noch in der Planungsphase. Im Hinblick auf eine Eignung für den Transport der Bentonitelemente werden z. Z. Luftkissenfahrzeuge untersucht, für die Einbringung in den Bohrlöcher wird die Eignung von Portalkranen analysiert. Der Bau von Prototypen und die Durchführung von technischen Erprobungen ist für die nächsten Jahre vorgesehen. Vergleichbare technische Entwicklungen und Erprobungen wurden von ANDRA und SKB auch für Einbringung von Puffermaterial in horizontale Bohrlöcher durchgeführt /4-20/.

4.1.4.2 Verfüllen von Einlagerungsstrecken

4.1.4.2.1 Anforderungen

Die Hauptfunktionen der Verfüllung der Einlagerungsstrecken sind es einerseits zu vermeiden, dass die Strecken und die Auflockerungsstrecken signifikante Transportpfade während der Nachbetriebsphase werden und andererseits das Puffermaterial und die Endlagerbehälter in den Bohrlöchern an ihren Plätzen zu halten. Weiterhin soll das Verfüllmaterial die Strecken mechanisch stabilisieren.

Um diese Funktionen auszuüben muss das Verfüllmaterial in den Einlagerungsstrecken die folgenden Anforderungen einhalten /4-9/:

- Die hydraulische Leitfähigkeit soll kleiner als 10^{-10} m/s sein,

- der Quelldruck soll nicht kleiner als 200 kPa sein, und
- die Komprimierung des Verfüllmaterials durch das Quellen des Puffermaterials im Einlagerungsbohrloch soll nicht so groß sein, dass die Dichte des wassergesättigten Puffers oberhalb des eingelagerten Behälters auf weniger als 1,95 g/cm³ absinkt (Kompressionsmodul ≥ 10 MPa).

4.1.4.2.2 Verfüllmaterial

POSIVA und SKB untersuchen gemeinsam im Rahmen des BACLO-Programms verschiedene Varianten für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken /4-5/, /4-6/. Als Tonkomponente wurden die petrophysikalischen Eigenschaften verschiedene Na- und Ca-Bentonite in Laborversuchen analysiert. Eine Festlegung auf einen Bentonit-Typ ist noch nicht erfolgt.

Als Vorzugsvariante für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken wird derzeit eine Verfüllung mit einem Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein im Verhältnis 30 zu 70 Gew.% angesehen /4-8/. Der Gesteinsbruch wird aus Ausbruchmaterial des Bergwerks hergestellt werden (in Olkiluoto: Glimmergleis, Granite, Pegmatite und Diabase). Die beim Brechen angestrebte Korngröße soll zwischen 0-10 mm liegen. Es ist vorgesehen, die Qualität des Bentonits, des Gesteinsbruchs und der Mischung durch ein QS-System zu überprüfen.

Das 30/70-Gemisch erfüllt alle oben genannten Anforderungen bzgl. hydraulischer Leitfähigkeit, Quelldruck und Komprimierbarkeit. Das Material würde in Lagen in die Strecken gekippt und in-situ maschinell kompaktiert.

Alternativ wurde auch eine Verfüllung mit vorkompaktierten Bentonitblöcken und -pellets untersucht /4-7/. Fertigungsversuche mit unterschiedlichen Kompaktionsdrücken haben ergeben, dass ein Kompaktionsdruck von 30 MPa ausreichend ist, um anforderungsgerechte Bentonitblöcke mit einem Wassergehalt von 7,5-8,0 % und Trockendichten von 2,0-2,2 g/cm³ herzustellen (Abbildung 4-6). Zum Einebnen der Streckensohle vor dem Einbau der Blöcke soll ein 15/85 %-Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein verwendet. Dieses Material soll so eingebracht werden, dass die hydraulische Leitfähigkeit 10^{-10} m/s unterschreitet.

Bei der Herstellung von Bentonitpellets wurden nur Dichten von 1,1-1,3 g/cm³ erreicht. Höhere Dichten wären durch eine Trocknung des Bentonits vor der Kompaktion und durch eine optimierte Korngrößenverteilung zu erreichen.



Abbildung 4-6: Testblöcke aus Bentonit /4-6/

4.1.4.2.3 Technisches Konzept zum Einbringen des Verfüllmaterials

Generell soll die Verfüllung abschnittsweise, entsprechend dem Verlauf der Einlagerung erfolgen. Ein teilweises Verfüllen der Einlagerungsstrecken entsprechend dem Einlagerungsfortschritt und der Auslegung der Endlagerfelder kann möglich sein. Als Vorbereitung auf die Streckenverfüllung wird die Betonfahrbahn, alle Leitungen und Installationen sowie loses Gestein an der Streckenkantur entfernt.

Nach der Prüfung und vergleichenden Bewertung von 7 Alternativkonzepten für die Verfüllung der Einlagerungsstrecke wurde die in-situ-Kompaktion von lagenweise eingebrachtem Verfüllmaterial als günstigstes Konzept bewertet /4-5/. Alternativ wird noch die Verfüllung mit vorkompaktierten Bentonitelementen weiter betrachtet.

In-situ-Kompaktion

Bevorzugtes Material für die in-situ-Kompaktion ist ein Gemisch aus 30 % Bentonit und 70 % Gesteinsbruch, das trocken eingebracht werden soll /4-8/. Die Herstellung des Gesteinsbruchs und die Herstellung einer homogenen Mischung mit dem Bentonit wurde in Versuchen erprobt. In-situ-Versuche haben gezeigt, dass die Trockendichte (bei ca. 12 % Wassergehalt), die im Bergwerk erreicht werden kann, bei 90-95 % der Trockendichte liegt, die unter Laborbedingungen erreicht wurden. Die In-situ-Trockendichte des 30/70-Gemisches liegt daher bei 1,7-1,8 g/cm³.

Die Einbringung wurde bei einem In-situ-Versuch im Untertagelabor Äspö erprobt. Dabei wurde das Verfüllmaterial mit einem Radlader zunächst angeschüttet und dann zu einer ca. 15-25 cm starken und um 35° geneigten Flächen verteilt. Das erforderliche Gemischvolumen für eine derartige Lage beträgt ca. 5-6 m³. Das Verdichten des eingebrachten Verfüllmaterial erfolgte durch eine Verdichterplatte, die an einem hydraulischen Telekoparm eines Baggers

montiert war /4-8/ (Abbildung 4-7). Die Verdichterplatte wog 414 kg, die Vibrationsfrequenz betrug 43 Hz und die Amplitude 2,7 mm. Zum Verdichten des Materials im firstnahen Bereich wurde eine Verdichterplatte mit den folgenden Werten eingesetzt: 400 kg, 43 Hz und 3 mm Amplitude. Um ein Abgleiten zu vermeiden, wird die Oberfläche der eingebrachten Lage aufgeraut bevor die nächste Schicht eingebracht wird. Die bei den In-situ-Versuchen erzielten Materialdichten schwankten in verschiedenen Bereichen des Streckenquerschnitts zwischen 1,30 und 1,77 g/cm³ und erhöhten sich von der Kontur zur Mitte hin.

Die Gesamtdauer aller Tätigkeiten für das Erstellen einer Lage (incl. Transport, Abladen, Verteilen und Umbau der Geräte am Ausleger des Baggers, Verfahren der Geräte, Dichtemessungen) beträgt ca. 70-80 min, so dass der vorgesehene Verfüllfortschritt von 4,4 m/Tag etwa 15-18 Arbeitsstunden erfordert. Es wurden außerdem alternative Verfahren untersucht, um den Verfüllprozess zu beschleunigen. Dabei wurde speziell die Materialeinbringung über Förderbänder und mit Betonpumpen betrachtet. Diese Verfahren wurden aber noch nicht in der Praxis erprobt.



Abbildung 4-7: Bagger mit Telekoparm, der auch mit einer Verdichterplatte ausgerüstet werden kann /4-6/

Verfüllung mit Bentonitblöcken

Das Alternativkonzept sieht eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit vorgefertigten Bentonitblöcken und eine Hohlräumverfüllung mit Bentonitpellets vor.

Zur Vorbereitung der Verfüllung wird nach dem Entfernen der Fahrbahn und aller Installationen die Streckensohle mit einem 15/85-Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein eingeebnet /4-7/. Dies ist erforderlich, damit die Blöcken ohne Lücken zum Boden sowie untereinander eingebracht werden können.

Die Verfüllung der Strecken erfolgt durch das Einstapeln von Bentonitblöcken (30 x 30 x 40 cm), wobei im Firstbereich bogenförmige Blöcke eingesetzt werden /4-7/. Dadurch kann der vorgesehene Streckenquerschnitt zu ca. 90 % mit Blöcken verfüllt werden. Resthohlräume an der Streckenkantur werden mit Bentonitpellets verfüllt. Dadurch ergibt sich eine mittlere Trockendichte von 2,05-2,10 g/cm³ bzw. bei Berücksichtigung von Erosionsverlusten von < 2,0 g/cm³. Daher werden die oben genannten Anforderungen bzgl. hydraulischer Leitfähigkeit, Quelldruck und Kompressionsmodul erfüllt. Noch unsicher ist, ob sich zwischen den Bentonitblöcken sowie zwischen den Bentonitblöcken und den Bentonit-

pellets eine Dichtehomogenisierung einstellt und ob das Risiko besteht, dass zwischen den Blöcken bzw. den Blöcken und der Streckenkantur Fließspfade entstehen können. Diese Fragen werden im Zuge des BACLO-Projektes untersucht.

Für das Stapeln der Bentonitblöcke kann ein Gabelstapler bzw. ein Kranwagen eingesetzt werden (Abbildung 4-8). Für Resthohlraumverfüllung mit Bentonitpellets kann zentrifugales Pelletschleudersystem oder ein pneumatisches System eingesetzt werden. SKB hat den Prototyp eines zentrifugales Pelletschleudersystems erprobt (Abbildung 4-9). Dabei konnte die prinzipielle Eignung des Systems für die Einbringung von Bentonitpellets nachgewiesen werden.

Die für den geplanten Endlagerbetrieb vorgesehene effektive Verfüllrate von 5 m/Tag erfordert eine Arbeitszeit von 19,5 Stunden/Tag.

Insgesamt müssen noch viele offene Fragen für eine abschließende Bewertung dieser Verfülloption geklärt werden. Außerdem muss die technische Machbarkeit noch durch In-situ-Versuche nachgewiesen werden /4-7/.



Abbildung 4-8: Streckenverfüllung mit Bentonitblöcken durch einen Kranwagen mit einer Gabel am Hydraulikarm /4-6/



Abbildung 4-9: Pelletschleuder /4-6/

4.1.4.2.4 Nachweis der Funktionalität

Kriterien und Nachweismethoden für die Bewertung der Funktionalität von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen wurden im Zuge des BACLO-Projektes entwickelt /4-5/.

Um den Nachweis für die Einhaltung des Kompressionskriteriums zu erfüllen, sind einerseits Laborversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Materials und andererseits Modellrechnungen zur Bestimmung der Dichte, die erforderlich ist, damit die Dichte des Puffermaterials im Bohrloch nicht beeinträchtigt wird, erforderlich.

Die Einhaltung der Kriterien „hydraulische Leitfähigkeit“ und „Quelldruck“ durch ein Verfüllmaterial kann mit Hilfe von Proctor-Versuchen im Labor überprüft werden /4-5/. Da beide Kriterien dichteabhängig sind, kann auch ermittelt werden, welche Minimaldichte bei der Einbringung des Materials erreicht werden muss.

Weitere Kriterien zur prinzipiellen Eignung eines Verfüllmaterials sind die „Langzeitstabilität“ und die „Vermeidung ungünstiger Auswirkungen auf andere Barrieren“. Die Einhaltung dieser Kriterien werden im Zuge des Langzeitsicherheitsnachweises überprüft /4-4/.

Das Kriterium „technische Machbarkeit“ wurde durch Herstellungsversuche für Bentonitblöcke und -pellets, die Erprobung von Geräten für die Durchführung der Verfüllmaßnahmen sowie die versuchsweise Durchführung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Untertagelabor überprüft. Während die Herstellung geeigneter Bentonitblöcke und -pellets demonstriert werden konnte, ist die Entwicklung technischer Geräte für die Verfüllung sowie die Demonstration geeigneter Einbringtechniken noch nicht abgeschlossen.

4.1.4.3 Verschlüsse von Einlagerungsstrecken

4.1.4.3.1 Anforderungen

Die Verschlüsse am Eingang von Einlagerungsstrecken sind von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit. Der Verschluss wird darauf ausgelegt, einen Wassertritt durch den Verschluss oder das angrenzende Gebirge zu verhindern. Daher muss der Verschluss einem hydrostatischen Druck von 5 MPa (entsprechend einer Tiefe von 500 m) sowie einem zusätzlich Quelldruck des Verfüllmaterials von 0,5 MPa standhalten. Weiterhin muss der Verschluss langzeitstabil sein und darf durch seine Eigenschaften nicht die Funktion anderer Barrieren beeinträchtigen. Der in der Barriere verwendete Zement muss mit dem salinaren Grundwasser kompatibel sein und darf beim Abbinden nur eine geringe Hydratationswärme erzeugen.

4.1.4.3.2 Verschlussmaterial und -design

Das Verschlussbauwerk am Zugang der Einlagerungsstrecken wird aus verschiedenen langzeitstabilen Elementen bestehen, die als Widerlager und Dichtelemente fungieren sollen. Zur Aufnahme und Abtrag der erwarteten Drucke wird das Bauwerk eine keilförmige Gestalt haben und 6 m lang sein (Abbildung 4-10). Der Verschluss wird durch einen Einschnitt im Gebirge verankert.

Das Widerlager soll aus Beton (Portland-Zement, Gehalt 250 kg/m³) mit einer Stahlbewehrung von 50 kg/m³ erstellt werden /4-4/. Um die Funktion anderer technischer Barrieren nicht zu beeinträchtigen, soll der verwendete Zement einen möglichst niedrigen pH-Wert (< 11) aufweisen.

Das Dichtelement soll aus hochkompaktierten Bentonitblöcken errichtet werden. Diese Bentonitblöcke entsprechen in ihrer Zusammensetzung und Herstellung den Bentonitelementen, die auch als Alternativkonzept zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken vorgesehen sind (Kap. 4.1.4.2.2). Es wird sich vermutlich um ein Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein im Verhältnis 30 zu 70 Gew.% handeln.

4.1.4.3.3 Technisches Konzept zum Errichten der Verschlussbauwerke

Ein technisches Konzept für die Errichtung der Verschlussbauwerke am Eingang der Einlagerungsstrecken wurde noch nicht entwickelt. Die meisten erforderlichen Arbeitsschritte stellen aber Standardbaumaßnahmen im Bergbau / Tunnelbau dar, wie der Streckennachschnitt mit der Vertiefung zur Verankerung des Widerlagers des Verschlusses oder das Erstellen der stahlbewehrten Betonelemente. Das Konzept zur Erstellung der Dichtelemente aus Bentonitblöcken kann sich an dem entsprechenden Verfahren zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitblöcken orientieren (Kap. 4.1.4.2.3).

4.1.4.3.4 Nachweis der Funktionalität

Das oben beschriebene Konzept für Streckenverschlüsse wurde noch nicht durch einen Demonstrationsversuch erprobt. Somit ist die Funktionalität dieses Systems bisher nur durch Modellrechnungen bzw. durch die Erprobung von Einzelkomponenten, wie z. B. die Bentonitblöcke, unvollständig nachgewiesen.

Die Funktionalität von Bentonitblöcken für die Abdichtung von Strecken wurde im Rahmen des BACLO-Projektes nachgewiesen /4-7/. Es konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen an mechanische und hydraulische Eigenschaften sowie an den Quelldruck erfüllt werden. Auch konnte die Herstellung der Bentonitblöcke im industriellen Maßstab demonstriert werden. Da der vorgesehene Streckenquerschnitt nur zu ca. 90 % mit Blöcken verfüllt werden kann, müssen die Resthohlräume an der Streckenkontur mit Bentonitpellets verfüllt werden. Die Funktionalität dieser kombinierten Verfüllung mit Blöcken und Pellets ist noch nicht nachgewiesen. So ist unsicher, ob sich innerhalb der Bentonitbarriere eine Dichteho-

mogenisierung einstellt und ob das Risiko besteht, dass zwischen den Blöcken bzw. den Blöcken und der Streckenkontur Fließpfade entstehen können. Diese Fragen werden durch zukünftige Arbeiten im Zuge des BACLO-Projektes untersucht. Geräte für die effektive Einbringung der Bentonitbarriere befinden sich noch in der Entwicklung.

Ein Nachweis der Funktionalität des Bentonitwiderlagers kann erst nach der Festlegung auf eine geeignete, langzeitstabile Betonrezeptur geführt werden. Bei der Errichtung der Barriere kann auf umfangreiche Erfahrungen im Berg- und Tunnelbau mit der Herstellung vergleichbarer Betonelemente zurückgegriffen werden.

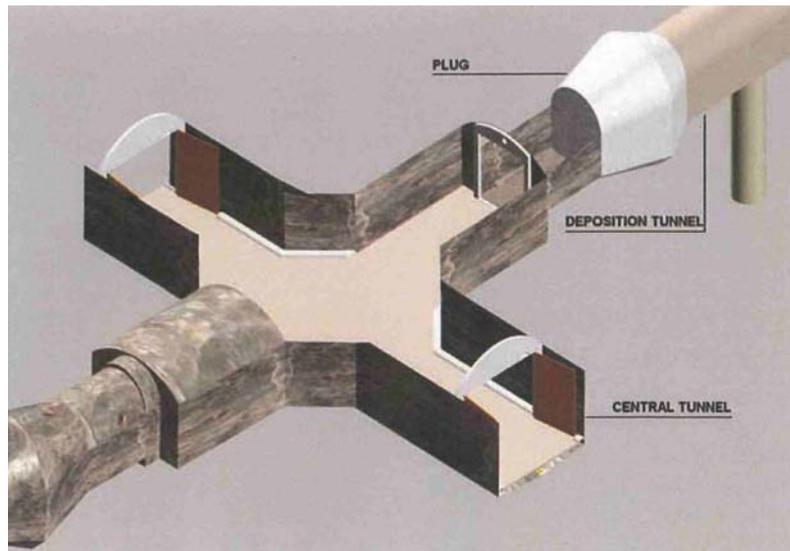


Abbildung 4-10: Verschluss der Einlagerungsstrecken /4-4/

Für den Verschluss von Einlagerungsbohrungen und -strecken sind eine Reihe unterschiedlicher Lösungen in Diskussion.

4.1.4.4 Bohrlochverschlüsse

4.1.4.4.1 Anforderungen

Im Zuge der Standorterkundung werden mehrere 100 m lange Bohrungen abgeteuft, die während der Nachbetriebsphase als potenzielle Wegsamkeiten für einen Lösungszutritt zum Endlager bzw. für eine Freisetzung kontaminierter Lösungen aus dem Endlager wirken könnten. Ziel des Bohrlochverschlusses ist die dauerhafte Unterbrechung dieses Transportpfades.

4.1.4.4.2 Verschlussmaterial und -design

Das Grundprinzip des Bohrlochverschlusses besteht aus einem perforierten Kupferrohr, das in das Bohrloch eingeführt wird. Anschließend wird das Rohr mit hoch kompaktierten Bento-

nitblöcken gefüllt. Der Bentonit beginnt durch das Wasser, das durch die Perforationen des Rohres eindringt, aufzuquellen und schließlich durch die Öffnungen auszutreten. Letztlich ist die Röhre komplett in homogenen Ton eingebettet. Der Verschluss wird an Stellen, wo das Bohrloch Störungszonen durchschneidet, durch Zementpfropfen stabilisiert

Bohrlochverschlüsse ober- und unterhalb des Endlagerlevels werden entsprechend der Hydrogeologie verschieden ausgelegt. Der oberste Teil eines Tiefbohrlochs sollte mit einem Material verschlossen werden, das dem Quelldruck von unten standhält und gleichzeitig mechanischen Belastungen von oben, wie Intrusion, Erosion und Vergletscherung widersteht. Bohrlöcher mit einer Tiefe über 800 m müssen im tiefen Teil durch chemisch stabile Materialien verschlossen werden, wie Quarzsand stabilisiert durch eine geringe Menge eines Niedrig-pH-Zementes.

4.1.4.4.3 Technisches Konzept zum Nachweis der Funktionalität

Die Funktionalität des Bohrlochverschlusskonzeptes bestehend aus einer perforierten, mit Bentonit gefüllten Kupferröhre wurde bereits in den 80er Jahren durch das internationale Stripa-Projekt nachgewiesen /4-21/.

Eine grundlegende Voraussetzung für das Einbringen eines Bohrlochverschlusses ist das Reinigen des Bohrlochs von allen Hindernissen und die Stabilisierung in aufgelockerten Gebirgsbereichen. Die Ermittlung der Bohrlochbereiche, die stabilisiert werden müssen, erfolgt an Hand von Bohrkernen, Ergebnissen von geophysikalischen Messungen oder durch die Befahrung mit einer Bohrlochkamera.

An der Vorbohrung für den Hauptschacht des ONKALO Untertagelabors wurde ein Versuch zum Bohrlochverschluss durchgeführt /4-22/. Im Zuge des Versuches wurde die technische Machbarkeit für alle Phasen der Erstellung des Bohrlochverschlusses nachgewiesen. Der eingebrachte Verschluss besteht aus den folgenden Elementen: An der Bohrlochsohle wurden zunächst ca. 20 m Kies eingefüllt, dann 5 m eines Quarz/Zement-Gemisches sowie ein 10 m langes Bentonit-Dichtelement, das nach oben von einer 5 m mächtigen Quarz/Zementlage überdeckt wird. Das restliche Bohrloch wurde bis zur Oberfläche mit Portland-Zement verfüllt. Während des phasenweisen Schachtabteufens wurde die insgesamt 550 m tiefe Bohrung sukzessive freigelegt, so dass die Qualität und Funktionalität der Verschluss-elemente im Bohrloch untersucht werden konnte.

4.1.4.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Grubengebäudeteilen

Für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Teilen des Grubengebäudes (Verbindungsstrecken, Infrastrukturräume, Rampe, Schächte) existieren z. Z. aber nur Grobkonzepte. Es ist vorgesehen, die Rahmen des BACLO-Programms für die Einlagerungsstrecken entwickelten Verfüll- und Verschlusskonzepte in ähnlicher Weise auch in den anderen Teilen des Grubengebäudes einzusetzen /4-4/. Eine Festlegung auf die Verfüllmate-

rialien und die Einbringtechnik soll bei der Vorbereitung des Langzeitsicherheitsnachweises 2009 erfolgen.

Verschlussbauwerke aus Bentonit und Beton sind für Standorte geplant, an denen im Grubengebäude eine Störungszone angeschnitten wird. Außerdem sind ca. 10 m lange Barrieren aus Beton, Bentonit und Gesteinsbruch in den Schächten und der Rampe vorgesehen. Diese Barrieren sollen das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in das Endlager verhindern, potentielle Transportpfade durch die Auflockerungszone der verfüllten Strecken unterbrechen und der Eislast der nächsten Eiszeit widerstehen.

4.2 Schweden

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

Seit 2002 werden die beiden potentielle Standorte Forsmark und Laxemar bezüglich ihrer Eignung für die Errichtung eines geologischen Endlagers für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente in einer Granitformation untersucht. Eine Auswahl des Standortes soll bis 2009 erfolgen /4-23/.

Die Schwedische Gesellschaft für Kernbrennstoffe und Abfallentsorgung (SKB) hat entsprechend den Vorgaben der SKI /4-24/ Untersuchungen und Planungen für die Endlagerung der ausgedienten Kernbrennstoffe durchgeführt. Dabei wird von einer stufenweisen Errichtung des Endlagers ausgegangen:

- Errichtung und Betrieb eines Untertagelabors im Hartgestein, um Endlagertechniken zu erproben und der Funktionsfähigkeit der technischen Barrieren nachgewiesen werden kann.
- Errichtung eines Demonstrationsendlagers mit ca. 5 – 10 % des vorgesehenen Gesamtinventars und mit entsprechender Überwachung des Endlagersystems. Nach der Einlagerung von ca. 200 – 400 Containern soll eine Bewertung des Endlagersystems erfolgen. Bei einem positiven Ergebnis wird die Einlagerung fortgesetzt.
- Einlagerung in das eigentliche 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. Wenn aber ein Eingriff in ein Endlager erfolgen soll oder Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung vorgesehen werden, sind den kerntechnischen Aufsichtsbehörden SKI und SSI entsprechende Sicherheitsbewertungen dieser Maßnahmen 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 /4-25/.

4.2.1 Endlagerkonzept

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 /4-26/, /4-27/, /4-28/ und /4-29/ (Abbildung 4-11):

- 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).

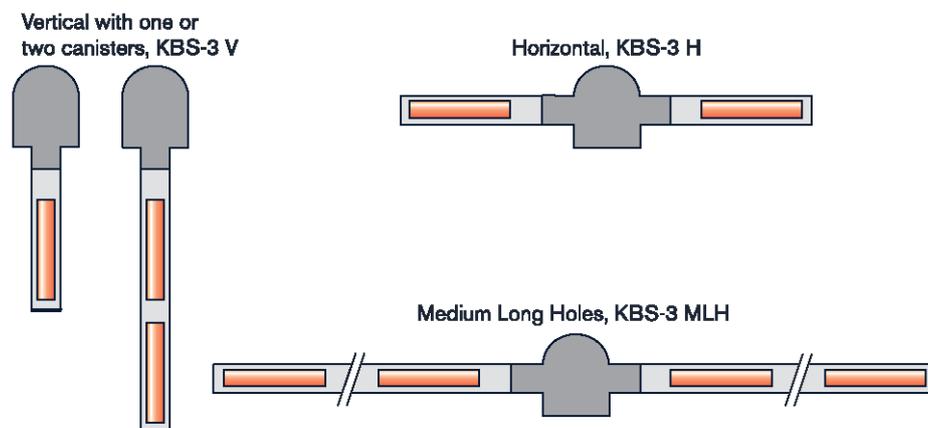


Abbildung 4-11: Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente /4-34/

Aufgrund eines Konzeptvergleichs wurde das Konzept KBS-3V als Referenzkonzept ausgewählt /4-28/.

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 der Material- und Personalförderung dient, während die anderen Schächte (2 im Zentralteil, einer am entferntesten Ende des Endlagers) für die Bewetterung genutzt werden /4-30/. (Abbildung 4-12).

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.

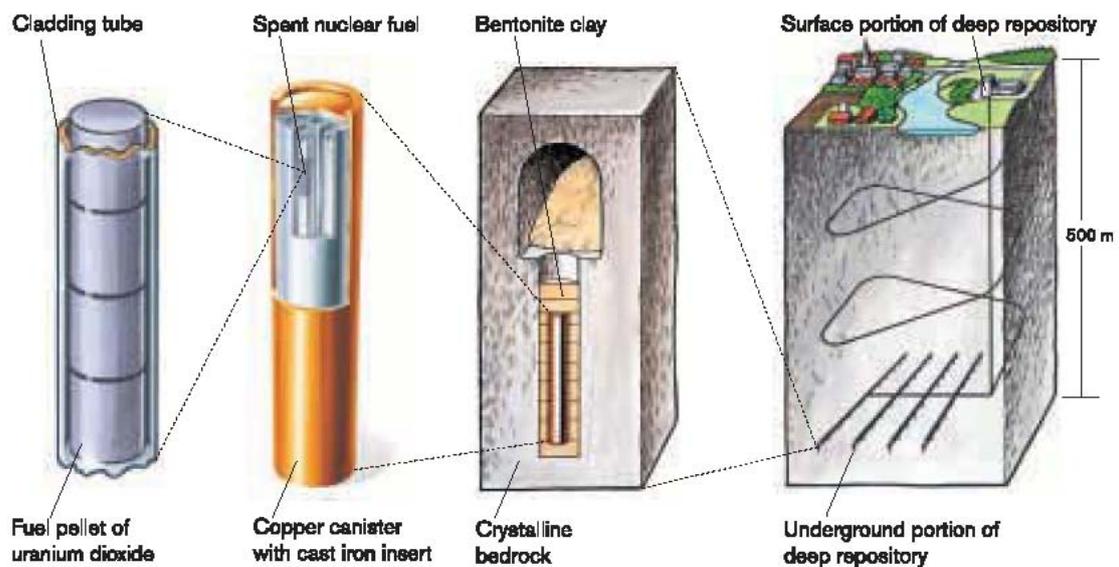


Abbildung 4-12: Endlagerkonzept KBS3-V /4-34/

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 4-13). 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.

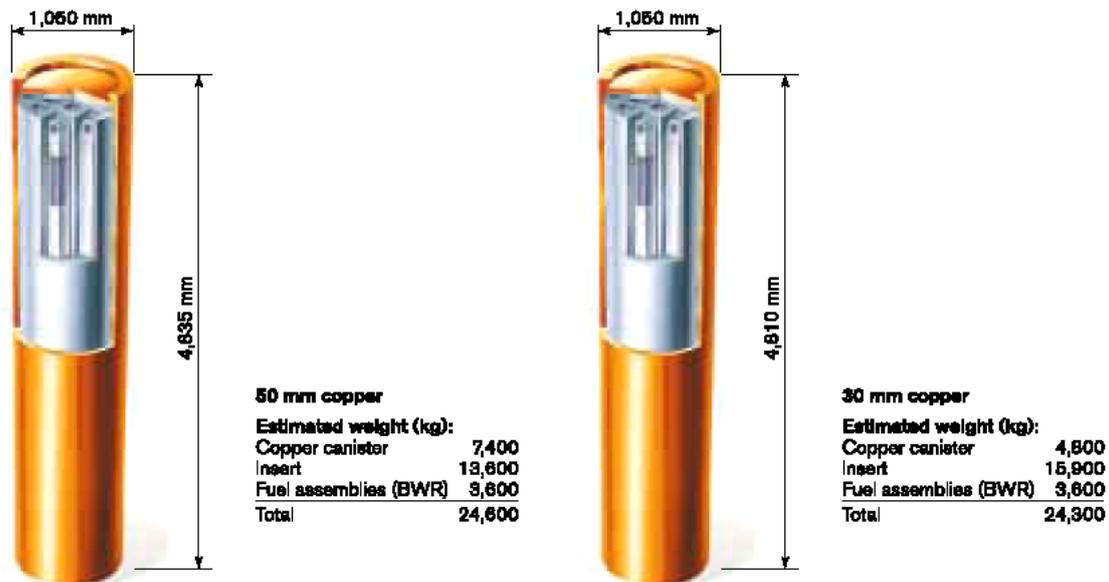


Abbildung 4-13: Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente /4-31/.

Der linke Behälter entspricht dem Referenzkonzept.

Aufgrund von Temperaturbegrenzungen für das Puffermaterial soll die Temperatur an der Oberfläche der Container 100 °C nicht überschreiten /4-32/. Dies wird durch eine Abklingzeit für die Brennelemente von ca. 40 Jahren vor der Endlagerung sichergestellt werden.

Das Endlagerkonzept KBS3-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 /4-30/ (Abbildung 4-12).

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 4-14). Die Funktionalität und Handhabung des Supercontainers wird derzeit im Untertagelabor Äspö erprobt /4-36/. Der Supercontainer soll in ca. 300 m lange horizontale Bohrungen des Endlagers eingebracht werden (Abbildung 4-15). Dabei werden zwischen den Containern Distanzblöcke eingesetzt /4-29/. Für dieses Konzept wurden auch Untersuchungen zur Rückholbarkeit durchgeführt.

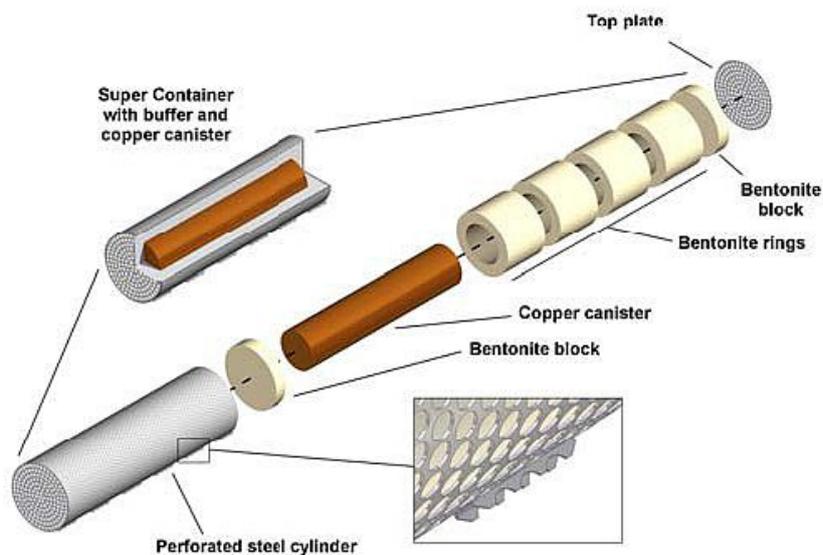


Abbildung 4-14: Aufbau eines Supercontainers /4-33/

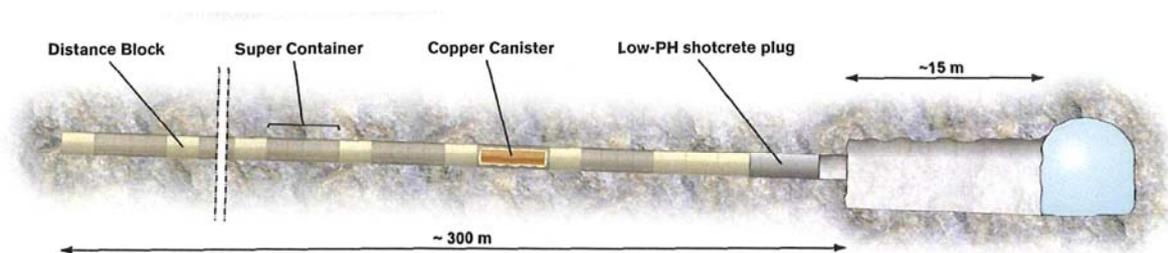


Abbildung 4-15: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) /4-33/

4.2.2 Verfüll- und Verschlusskonzepte

4.2.2.1 Funktion und Design

Da das Wirtsgestein in Kristallingesteinen aufgrund seiner Klüftigkeit und Wasserführung nur eine geringe Einschluss- und Rückhaltefunktion für das radioaktive Inventar hat, basiert das Multibarrierensystem im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren.

Ausgehend von den Ergebnissen der Standortanalysen in Forsmark und Laxemar sowie langzeitsicherheitlichen Betrachtungen wurden Sicherheitsfunktionen identifiziert, die durch die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen umzusetzen sind. Ein grundlegendes Ziel ist die Rückhaltung des radioaktiven Inventars durch den Verschluss von potentiellen Zutritts- bzw. Freisetzungspfaden für Lösungen, die durch das Grubengebäude geschaffen wurden. Um

dieses Ziel zu erreichen, müssen die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen u. a. die folgenden Anforderungen erfüllen /4-35/:

- Geringe hydraulische Leitfähigkeit,
- hohes Radionuklidsorptionsvermögen und Vermeidung des Kolloidtransportes,
- chemische und mechanische Langzeitstabilität im Milieu des Wirtsgesteins,
- ausreichende Dichte und geringe Komprimierbarkeit, und
- keine negativen Auswirkungen auf die Funktion anderer Barrieren.

Von wesentlicher Bedeutung für den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars ist die Integrität des Kupferbehälters, der langzeitkorrosionsbeständig ist und somit über wenigstens 100.000 Jahren einen Lösungszutritt zu den ausgedienten Brennelementen verhindert. Von der hohen Widerstandsfähigkeit der Abfallform (Brennstoffpellets und Zirkaloy-Hülsen) muss nur im Fall einer Beschädigung des Behälters Kredit genommen werden.

Daher ist es eine wichtige Aufgabe des Puffers einen Zutritt korrosiver Lösungen zu den Endlagerbehältern zu verhindern und ein geochemisches Milieu zu erhalten, das die Korrosion behindert. Als Material für den Puffer wie auch für andere Verfüll- und Verschlussmaßnahmen sind Bentonit oder vergleichbare Tone vorgesehen. Dabei wird auch hier von den günstigen Eigenschaften des Materials (Plastizität, Quellvermögen, geringe Permeabilität und Radionuklidsorption) Kredit genommen. Um eine Auswaschung der Dichtelemente zu verhindern und eine Langzeitfunktion der Barrieren zu gewährleisten, muss die Barriere durch lösungsstabile Komponenten ergänzt werden.

Im Referenzkonzept KBS-3V erfolgt die Verfüllung und der Verschluss von Einlagerungsbohrungen und – sobald alle Bohrungen einer Strecke verfüllt sind – auch der Einlagerungsstrecken bereits während der Betriebsphase. Auch der Abwurf ganzer Einlagerungsfelder ist nach Abschluss der Einlagerung im jeweiligen Bereich durch den Verschluss der entsprechenden Hauptstrecken bereits in der Betriebsphase vorgesehen.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept für das Alternativkonzept KBS-3H unterscheidet sich auf Grund des abweichenden Layouts der Einlagerungsbereiche in einigen Punkten vom Referenzkonzept. So ist der Bentonitpuffer bereits Teil des Supercontainers. Zwischen die Supercontainer werden Distanzblöcke aus Bentonit geschoben und die 300 m langen horizontalen Einlagerungsbohrungen werden durch Verschlüsse aus Niedrig-pH-Zement abgeschlossen. Auch bei diesem Konzept werden die Einlagerungsbohrungen und Zugangsstrecken bereits während der Betriebsphase abgeworfen.

Das Verfüllen und Verschließen von Einlagerungsbohrungen und -strecken ist Schwerpunkt eines Forschungsprogramms (BACLO), das SKB und POSIVA gemeinsam im Felslabor Äspö durchführen /4-35/, /4-36/. Im Zuge dieses Programms wurden geeignete Verschlussmaterialien untersucht, Errichtungstechniken erprobt, die Funktionalität des jeweiligen Barrierendesigns analysiert und die technische Machbarkeit nachgewiesen.

Nach Abschluss der Betriebsphase sind noch die Hauptstrecken, die Infrastrukturräume, die Zugangsrampe und die Schächte zu verfüllen und an sichertechnisch sensiblen Punkten (Störungsbereiche, Verbindungen zur Biosphäre) durch Verschlussbauwerke zu versiegeln. Detailplanungen wurden für diese Verfüll- und Verschlussmaßnahmen noch nicht durchgeführt. Prinzipiell sollen sie sich an den umfassend untersuchten Verfüll- und Verschlusskonzepten für die Einlagerungsbohrlöcher und -strecken orientieren /4-34/.

4.2.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion

Entsprechend dem Sicherheitskonzept für das geplante Endlager wurden die Sicherheitsfunktionen und Kriterien für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen für die technischen und geotechnischen Barrieren festgelegt /4-34/, /4-38/. Aus diesen Kriterien ergeben sich Auslegungsanforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen. Weiterhin wurden Methoden zum Nachweis der Erfüllung dieser Anforderungen beschrieben /4-35/, /4-37/. Die entscheidenden Eigenschaften der Barrieren sind die Komprimierbarkeit, die hydraulische Leitfähigkeit, der Quelldruck, die Langzeitstabilität und die Vermeidung ungünstiger Auswirkungen auf andere Barrieren.

Die Grundlagen für dieses Nachweiskonzept wurden im Zuge des BACLO-Projektes erarbeitet, bei dem die Barriereigenschaften im Hinblick auf die nukleare Sicherheit, den Strahlenschutz und die Langzeitsicherheit bewertet wurden. Die bisherigen Untersuchungen konzentrieren sich auf das Puffermaterial in den Einlagerungsbohrlöchern und das Verfüllmaterial in den Einlagerungsstrecken. Für das Puffermaterial wurden die folgenden quantitativen Kriterien festgelegt /4-38/:

Funktionsindikator	Kriterium	Begründung	Nachweis
Hydraulische Leitfähigkeit	$K < 10^{-12}$ m/s	Begrenzung des Stofftransportes auf diffusionsbestimmte Prozesse	Proctor-Zylinder angepasst für Messungen der hydraulischen Leitfähigkeit /4-37/
Quelldruck	$p > 1$ MPa	Sicherstellung der Dichtheit und des Selbstverheilens	Proctor-Messungen (Ödometer) /4-37/
Maximaltemperatur	$T < 100^\circ\text{C}$	Sicherstellung der dauerhaften Erhaltung der günstigen Eigenschaften des Puffers	Modellrechnungen, Temperaturmessungen
Minimaltemperatur	$T > 0^\circ\text{C}$	Vermeiden des Gefrierens	Modellrechnungen
Quelldruck um den ganzen Behälter	$p > 0,2$ MPa	Vermeiden eines Einsinkens des Behälters	Proctor-Messungen (Ödometer) /4-37/
Pufferdichte um den ganzen Behälter	$\rho > 1,8$ g/cm ³	Ausschluss mikrobieller Aktivität	Proctor-Messungen (Ödometer) /4-37/
	$\rho > 1,65$ g/cm ³	Vermeidung eines Kolloidtransportes durch den Puffer	
	$\rho < 2,1$ g/cm ³	Schutz des Behälters vor Scherbewegungen des Gebirges	

Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken hat im Wesentlichen zwei Hauptfunktionen /4-35/:

- zu vermeiden, dass sich in den Strecken bevorzugte Transportwege für den Lösungstransport bilden und
- sicherzustellen, dass das quellende Puffermaterial an seiner vorgesehenen Position im Bohrloch bleibt und sich die Dichte des Puffers nicht reduziert.

Um die Einhaltung dieser Funktionen sicherzustellen, muss der Quelldruck des Verfüllmaterials wenigstens 0,1 MPa betragen, die hydraulische Leitfähigkeit soll unter 10^{-10} m/s liegen und das Kompressionsmodul des Verfüllmaterials soll wenigstens 10 MPa betragen. Da alle diese Materialeigenschaften dichteabhängig sind, wurden für die verschiedenen Verfüllkonzepte materialspezifische Dichtekriterien entwickelt /4-35/.

4.2.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

SKB berücksichtigt bei ihrem Langzeitsicherheitsnachweiskonzept (SR-Can, /4-34/, /4-39/) einerseits die Vorschläge von IAEA /1-7/ und NEA /1-8/ und wertet andererseits die Ergebnisse von Langzeitsicherheitsstudien in der Schweiz, Finnland, Belgien, Japan, USA, Kanada und Frankreich aus. Weiterhin werden Anforderungen der schwedischen Aufsichtsbehörde für Kerntechnik (SKI) und des Schwedischen Instituts für Strahlenschutz (SSI) berücksichtigt.

Das Hauptziel des Sicherheitsnachweises ist die Untersuchung, ob das Endlager langfristig radiologisch sicher ist. Der Nachweis gilt als geführt, wenn die für die Nachbetriebsphase abgeschätzten Strahlenexpositionen die gesetzlichen Anforderungen erfüllen. Die primäre Sicherheitsfunktion des KBS-3-Endlagers ist daher der (fast) vollständige Einschluss der Abfälle über den ganzen Nachweiszeitraum. Der Langzeitsicherheitsnachweis quantifiziert und begründet aufgrund einer Synthese von wissenschaftlichen und technischen Beweisen, Analysen und Argumenten die Sicherheit der vorgesehenen Anlage. Durch diese Vorgehensweise sollen die Glaubwürdigkeit und das Vertrauen in die Ergebnisse erhöht werden. Ein wesentlicher Punkt ist in diesem Zusammenhang die Darstellung des Verständnisses aller Merkmale, Ereignisse und Prozesse des Endlagersystems (FEP) und seiner zukünftigen Entwicklung.

Die 10 Hauptschritte des Sicherheitsnachweises werden durch den Hauptbericht /4-34/ und 9 ergänzende Berichte dargestellt:

- Die Identifizierung relevanter Faktoren unter Berücksichtigung früherer Sicherheitsbewertungen und unter Berücksichtigung des OECD-FEP-Katalogs und den FEP-Katalogen aus den Langzeitsicherheitsbewertungen in anderen Ländern /4-40/.
- Die Beschreibung des Ausgangszustandes des Systems (Endlagerdesign, Geosphäre, Biosphäre) /4-41/.
- Die Beschreibung der externen Bedingungen umfasst 3 Kategorien: „Klimaabhängige Aspekte“ /4-45/, „großräumige geologische Prozesse und Effekte“ /4-46/ sowie „zukünftige menschliche Tätigkeiten“ /4-42/.

- Die Beschreibung der relevanten Prozesse: die Identifizierung der für die Langzeitentwicklung des Systems relevanten Prozesse basiert auf der FEP-Ermittlung. Die Eigenschaften der Prozesse, der Zeitrahmen, in dem sie relevant sind, die Kopplung mit anderen Prozessen sowie die Art ihrer Berücksichtigung bei der Sicherheitsbewertung werden dokumentiert /4-43/, /4-38/. Dabei werden sowohl kurz- wie auch langfristige Entwicklungen analysiert und bewertet.
- Die Definition von Sicherheitsfunktionen, Sicherheitsfunktionsindikatoren und Sicherheitsfunktionsindikator-Kriterien (Abbildung 4-16) /4-34/.
- Die Zusammenstellung von Eingangsdaten /4-44/. Die für eine Quantifizierung der Endlagerentwicklung und bei Expositionsrechnungen benötigten Daten werden in einem strukturierten Prozess ausgewählt. Dieser Prozess sowie die verwendeten Daten einschließlich der Unsicherheiten werden dargestellt.
- Die Definition und Analyse der Referenzentwicklung: Als Referenzentwicklung wird eine plausible Entwicklung des Endlagersystems verstanden. In einem ersten Schritt wird das Isolationspotential des Systems über die Zeit analysiert, woraus sich eine Darstellung der Entwicklung des Gesamtsystems und eine Bewertung der Sicherheitsfunktionen ergeben /4-34/. Wenn die erwartete Entwicklung darauf hinweist, dass eine Freisetzung radioaktiver Stoffe nicht auszuschließen ist, wird das Rückhaltepotential des Endlagers und der Umgebung untersucht und potentielle Strahlenexpositionen für die Nachbetriebsphase abgeschätzt. Die Auswirkung der Beschädigung mehrerer Behälter wird untersucht, obwohl sie sich nicht aus der Referenzentwicklung ergibt. Diese Untersuchungen dienen dazu, die Rückhalteigenschaften des Systems zu analysieren.
- Die Auswahl von Szenarien. Gemäß den gesetzlichen Anforderungen wird ein umfassendes Hauptszenario definiert, das auf der Referenzentwicklung basiert. Bei der Auswahl zusätzlicher Szenarien spielen die Sicherheitsfunktionen des Endlagers und die Sicherheitsfunktionsindikatoren eine wichtige Grundlage. Für jede Sicherheitsfunktion wird eine Bewertung vorgenommen, ob es eine vernünftigerweise anzunehmende Situation gibt, bei der die Sicherheitsfunktion nicht aufrecht erhalten bleibt. Wenn dies der Fall ist, wird das entsprechende Szenario in die Risikobewertung des Endlagers aufgenommen. Durch die Aufsummation der Risiken aller Szenarien ergibt sich das Gesamtrisiko. Unter den ausgewählten Szenarien befinden sich gesetzlich geforderte Szenarien (unbeabsichtigtes menschliches Eindringen) sowie Szenarien und Varianten, die die Bedeutung verschiedener Komponenten des Endlagers untersuchen /4-34/.
- Die Analyse ausgewählter Szenarien. Das Hauptszenario wird im Wesentlichen im Hinblick auf die Referenzentwicklung analysiert. Die zusätzlichen Szenarien konzentrieren sich auf Faktoren, die potentiell zu Situationen führen, bei denen die fragliche Sicherheitsfunktion nicht erhalten bleibt. Die Analyse erfolgt durch einen Vergleich mit der Entwicklung des Hauptszenarios. Für alle Szenarios wird eine Risikoabschätzung vorgenommen.
- Die Zusammenfassung und Bewertung. Dieser Schritt schließt die Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse verschiedener Szenarienanalysen, die Ableitung von Schlüssen bezüglich der Sicherheit gemäß gesetzlicher Kriterien sowie die Rückkopplung zwischen der Auslegung, dem Standorterkundungsprogramm und dem Forschungs- und Entwicklungsprogramm von SKB ein.

Es wurden zwei Varianten der Referenzentwicklung analysiert:

- Eine Basisvariante, bei der Umweltbedingungen während der ersten 120.000 Jahre denen während der letzten Eiszeit entsprechen. Für den Folgezeitraum bis zu 1 Mio. Jahre wird ein siebenmaliges Wiederholen dieses Eiszeitzyklus angenommen.
- Eine Treibhaus-Variante, bei der die klimatischen und die Umweltbedingungen durch die anthropogene Produktion von Treibhausgasen beeinflusst wird.

Die Sicherheitsanalyse wurde unter Berücksichtigung dieser Umweltbedingungen für vier Zeitschritte durchgeführt:

- Die Auffahrungs- und Betriebsphase,
- die ersten 1.000 Jahre nach der Schließung des Bergwerks mit dem gemäßigten Klimaabschnitt des Eiszeitzyklus,
- der restliche Teil des Eiszeitzyklus (120.000 Jahre), und
- die folgenden Eiszeitzyklen bis zu 1 Mio. Jahre nach der Schließung des Endlagers.

Die Sicherheitsbewertung behandelt Aspekte des Klimas, der Biosphäre sowie der thermomechanischen, hydraulischen und chemischen Situation in der Geosphäre und im Barrierensystem.

Die bei der Sicherheitsbewertung zugrunde gelegte Normalentwicklung (Referenzszenario) geht davon aus, dass alle geotechnischen und technischen Barrieren entsprechend ihrer Auslegung funktionieren und alle (oder fast alle) Behälter über den Nachweiszeitraum intakt bleiben.

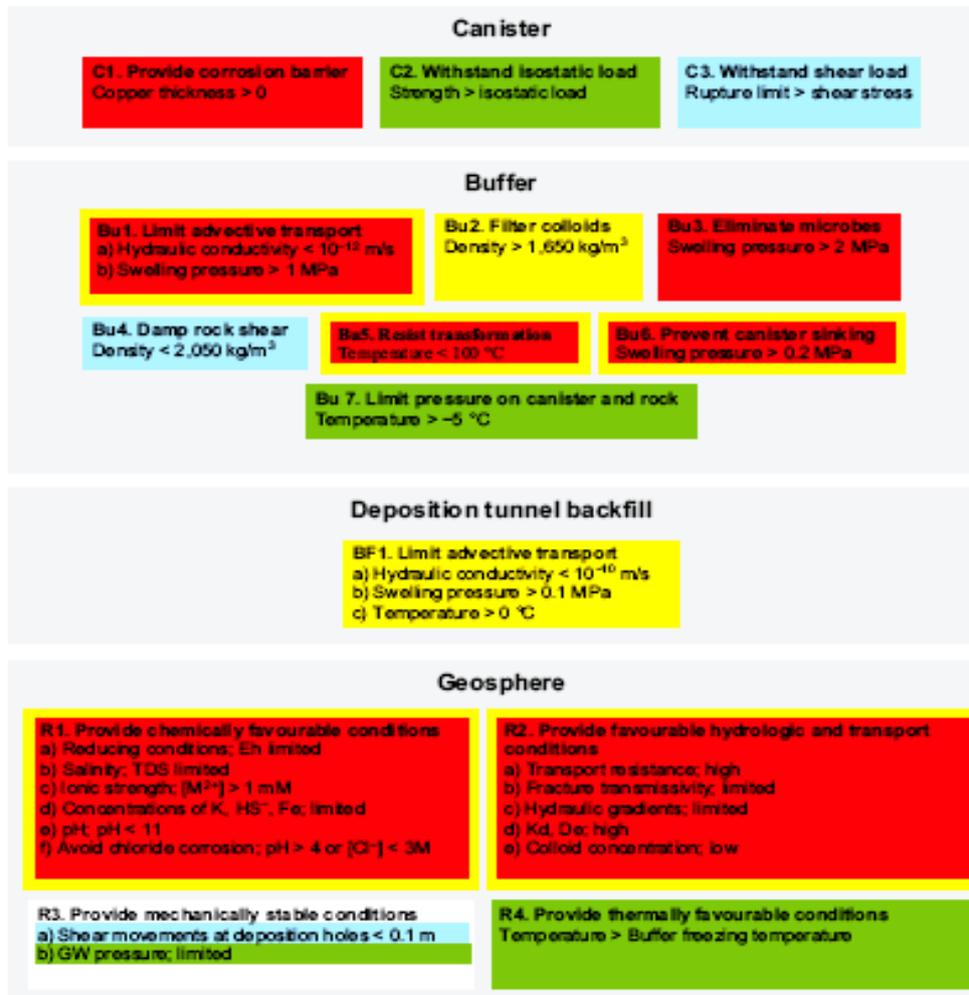


Abbildung 4-16: Das Sicherheitssystem für das KBS3-Endlagerkonzept
Sicherfunktionen der einzelnen Barrieren (Fettdruck) sowie Sicherheitsfunktionsindikatoren und -kriterien. Die rot, grün und blau markierten Funktionen tragen zu den Sicherheitsfunktionen des Behälters bei, gelb zur Rückhaltung im Endlagerbereich. Viele Funktionen sind für beides relevant.

Weniger wahrscheinliche Alternativentwicklungen unterstellen Beeinträchtigungen der Funktion des Puffers in den Einlagerungsbohrlöchern und Beschädigungen einiger Behälter durch Korrosion, durch isostatischen Druck oder durch Scherbewegungen.

4.2.3 Endlagerbehälterkonzept

4.2.3.1 Anforderungen an die Endlagergebände

Ziel des Endlagerbehälters ist es, die in ihm enthaltenen ausgedienten Brennelemente über sehr lange Zeiträume sicher einzuschließen. Um dieses Ziel zu erreichen und um die entsprechenden gesetzliche Anforderungen einzuhalten, wurden die folgenden Auslegungsanforderungen festgelegt:

- Die Standzeit des Behälters soll unter den Endlagerbedingungen wenigstens 100.000 Jahre betragen (Dicke der Kupferschicht min. 50 mm).
- Die maximale Dosis an der Außenfläche des Behälters soll kleiner als 1 Gy/h sein, um die Radiolyse von Grundwasser und die Beeinträchtigung des Puffermaterials zu vermeiden.
- Die ausgedienten Brennelemente im Endlagerbehälter sollen unkritisch bleiben, auch wenn sich der Hohlraum im Behälter mit Wasser füllt.
- Die Temperatur an der Behälteroberfläche soll so sein, dass die Temperatur im Puffermaterial unter 100°C bleibt, um Umbildungen des Bentonits zu vermeiden.
- Der Behälter soll einem isostatischen Druck von 14 MPa widerstehen, der sich aus dem hydrostatischen Druck im Endlagerniveau sowie dem Quelldruck des Bentonitpuffers ergibt.
- Der Behälter soll außerdem einem Druck von 30 MPa standhalten, was dem maximalen Druckzuwachs durch einen 3 km dicken Gletscher während einer Eiszeit entspricht.
- Die Dicke des Kupferoverpacks soll den Belastungen durch den Umgang und Betrieb während der Einlagerungsphase standhalten.
- Der Behälter soll nicht die Funktion anderer Komponenten des technischen Barrierensystems beeinträchtigen.

4.2.3.2 Gebindematerial und -design

Entsprechend dem KSB-3 Konzept sind für die Endlagerung der ausgedienten Brennelemente Doppelbehälter vorgesehen (Abbildung 4-13). Der innere Behälter aus Kugelgrafitguss soll die mechanische Stabilität sichern, der äußere Kupferbehälter die chemische. Der Deckel des inneren Behälters wird verschraubt und der Deckel des Kupferbehälters verschweißt. Boden und Deckel der Guss-Innenbehälter haben eine Stärke von 50 mm.

Die Endlagerbehälter haben einen Durchmesser von 1,05 m, eine Länge von 4,84 m, eine Wandstärke von 50 mm sowie Gesamtgewichte von 24,6 t /4-39/. Die Korrosionsschutzschicht besteht aus sauerstofffreiem, hoch leitenden Kupfer entsprechend dem Standard EN1976:1988. Der Stahleinsatz besteht aus Sphäroguss der Bezeichnung EN-GJS-400-15U und ist in einer Version für 12 SWR-Brennelemente und einer Version für 4 DWR-Brennelemente verfügbar.

Um die zulässige Oberflächentemperatur der Behälter nicht zu überschreiten, wurde auf der Grundlage von thermischen Berechnungen die Anfangswärmeleistung der ausgedienten Brennelemente in einem Endlagerbehälter zum Zeitpunkt der Einlagerung auf 1700 W begrenzt /4-39/.

4.2.3.3 Nachweis der Funktionalität

Der Nachweis der Funktionalität des vorgesehenen Endlagerbehälters wird im Zuge eines umfangreichen FuE-Programms geführt, das neben Materialuntersuchungen die Aspekte Fertigung, Verschluss, Transport und Einlagerung abdeckt /4-36/. Viele Arbeiten erfolgen in Kooperation mit der finnischen Endlagergesellschaft POSIVA.

Das Korrosions- und Kriechverhalten von Kupfer wurde unter Endlagerbedingungen untersucht und bewertet /4-36/. Demnach ist für die Kupferbehälter in dem erwarteten chemischen Milieu eine Standzeit von mindestens 100.000 Jahre (wahrscheinlich >1.000.000 Jahre) sichergestellt.

Die Verformbarkeit des Stahls EN-GJS-400-15U für den Innenbehälter ist nach der Norm EN 1563 für die vorgesehene Wandstärke spezifiziert. Die mechanischen Anforderungen an die Stabilität des Innenbehälters werden durch diese Eigenschaften abgedeckt. Die Kollapsdrucklast des Innenbehälters wurde mit numerischen Methoden analysiert, um zu verifizieren, dass die Wahrscheinlichkeit eines Behälterbruchs unter Endlagerbedingungen auf einem akzeptablen niedrigen Niveau ($<10^{-3}$) liegt. Die Modellrechnungen werden durch Druckversuche an kompletten Endlagerbehältern ergänzt und bestätigt.

Weiterhin wurde die Fertigung der einzelnen Behälterkomponenten erfolgreich erprobt. Zum Verschließen des Behälterdeckels wurden die Verfahren Reibbandschweißen (FSW) und Elektrodenstrahlschweißen (EBW) vergleichend untersucht. Aufgrund der Versuchsergebnisse wurde das FSW-Verfahren als Referenzverfahren ausgewählt. Aufgrund der entscheidenden Bedeutung der Behälter für den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Inventare sind umfangreiche Qualitätskontrollen aller Behälterkomponenten und der Schweißnähte durchzuführen. Hierfür geeignete zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren (NDT) befinden sich derzeit noch in der Erprobung /4-36/.

4.2.4 Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbohrungen und -strecken

4.2.4.1 Einlagerungsbohrlöcher

4.2.4.1.1 Anforderungen

Die Hauptfunktionen des Puffermaterials in den Einlagerungsbohrlöchern umfassen

- den mechanischen Schutz des Behälters (durch eine ausreichende Plastizität und Verformbarkeit des Puffers werden Gebirgsbewegungen gedämpft),
- das Vermeiden eines Wasserzutritts (geringe hydraulische Leitfähigkeit) und
- die Rückhaltung freigesetzter Radionuklide aus defekten Behältern (durch Radionuklid-sorption und die Fähigkeit Kolloide zu filtern).

Außerdem dürfen die Eigenschaften des Puffermaterials nicht die Funktion anderer Barrieren beeinträchtigen. Zur Überprüfung der Einhaltung dieser Funktionen wurden eine Reihe von Funktionskriterien definiert (Abbildung 4-16):

- Quelldruck > 1 MPa,
- hydraulische Leitfähigkeit $< 10^{-12}$ m/s,
- maximale Temperatur $< 100^\circ\text{C}$
- Wärmeleitfähigkeit $> 1,3$ W/mK,
- Dichte des Puffers muss größer als die Dichte des Behälters sein (noch zu quantifizieren)
- Dichte $> 1,8$ g/cm³ und $< 2,1$ g/cm³

4.2.4.1.2 Puffermaterial und -design

Quellfähiger Bentonit ist aufgrund der günstigen Materialeigenschaften als Puffermaterial für die Einlagerungsbohrlöcher vorgesehen /4-37/. Für die weitere Spezifikation wurden vier Bentonittypen (Na- und Ca-Bentonite) analysiert und schließlich ein Na-Bentonit (MX-80) aus Wyoming (USA) und ein Ca-Bentonit (CA-N) von der Insel Mikos (Griechenland) als Referenzmaterialien ausgewählt /4-39/. Bei den Laboranalysen wurden speziell die chemophysikalischen Eigenschaften dieser Materialien unter dem Einfluss von salinaren Tiefenwässern /4-37/. Schwerpunkte der Forschungsarbeiten waren Untersuchungen des Sorptionsvermögens, der Wärmeleitfähigkeit, der Permeabilität und des Quellvermögens sowie die Verarbeitung des Bentonits. Eine Festlegung auf die Verwendung eines Bentonittyps für das Referenzkonzept ist noch nicht erfolgt.

Die Einlagerungsbohrlöcher haben einen Durchmesser von 1,75 m bei einer Tiefe von 7,8 m (Abbildung 4-17). Die Löcher werden mit Bentonitscheiben bzw. -ringen verfüllt, die bei der Herstellung mit einem Druck von 100 MPa komprimiert wurden. Die Höhe der Bentonitscheiben beträgt 0,500 m, die der Bentonitscheiben 0,315 m. Beide haben einen Durchmesser von 1,690 m /4-39/. Eine Scheibe wird unterhalb des Endlagerbehälters eingebracht, 9 Ringe umgeben den Behälter und vier Scheiben schließen das Bohrloch nach oben ab.

Ein wichtiges Ziel bei der Herstellung der Elemente des Puffermaterials und der folgenden Einbringung in das Bohrloch ist es, eine Dichte von 1,95-2,05 g/cm³ für den wassergesättigten Puffer sicherzustellen. Die erzielte Dichte hängt von den Ringspalten zwischen Behälter und Puffer (5 mm) sowie Puffer und Gestein (30 mm) ab, die bei der Einbringung verbleiben. Diese Ringspalte können entweder offen gelassen oder mit Bentonitpellets verfüllt werden. Eine Verfüllung mit Bentonitpellets verhindert das Hereinbrechen von Gestein und beschleunigt das Schließen des Spalts beim Quellen des Bentonits /4-34/. In Abhängigkeit von den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins wird die Wiederaufsättigung des Puffermaterials im Bohrloch und das Erreichen des maximalen Quelldrucks einige Jahre bis einige 1.000 Jahre dauern. In-situ-Versuche in fünf Bohrlochern im Prototyp-Endlager haben gezeigt, dass die erforderliche Dichte erreicht wird /4-36/.

An der Sohle des Bohrlochs wird zur Nivellierung der Pufferelemente eine Grundplatte aus Niedrig-pH-Zement mit einer Stärke von 5-10 cm erstellt /4-39/. Dies ermöglicht das problemlose Einbringen des Behälters in die vertikal ausgerichteten Bentonitelemente. Die Entwicklung eines hierfür geeigneten Zementes ist noch nicht abgeschlossen. Auf der Zementplatte wird eine mehrere mm starke Kupferplatte positioniert, um die Bentonitelemente vor Grundwasser zu schützen, das den Zement durchdringt. Zwischen der Zementscheibe und dem Gestein verbleibt ein Ringspalt, in dem Grundwasser gesammelt und abgepumpt werden kann solange der Endlagertunnel offen ist.

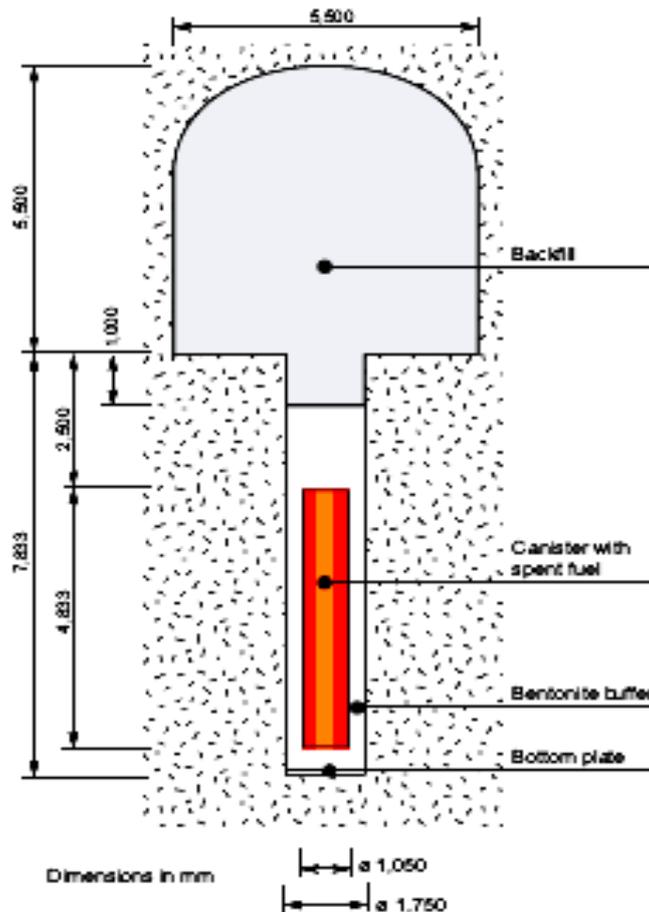


Abbildung 4-17: Verfülltes Einlagerungsbohrloch mit Behälter /4-34/

4.2.4.1.3 Technisches Konzept zum Einbringen von Puffermaterial

Da das Einbringen des Puffermaterials möglicherweise erst einige Monate nach dem Erstellen des Bohrlochs erfolgt, muss das mit Grundwasser vollgelaufene Bohrloch zunächst leer gepumpt werden. Vor Beginn der Arbeiten wird das Einlagerungsbohrloch gereinigt und inspiziert /4-39/. Dann wird zunächst die Bodenplatte aus Zement gegossen, die nach dem Aushärten durch eine Kupferplatte abgedeckt wird.

Die Bentonitelemente sollen mit einer Einbaumaschine eingebracht werden (Abbildung 4-18). Dabei wird nach der Vorbereitung des Bohrlochs an der Sohle zunächst eine 50 cm starke Bentonitscheibe abgelegt, über die dann 9 Bentonitringe gestapelt werden, die den Endlagerbehälter umschließen. (Abbildung 4-12). Anschließend wird die Geradlinigkeit des Bentonitausbaus überprüft. Falls erforderlich, kann der Bentonitausbau nachbearbeitet werden. Anschließend kann der Endlagerbehälter in das Bohrloch abgelassen werden und das Bohrloch durch 4 weitere Bentonitscheiben aufgefüllt werden.

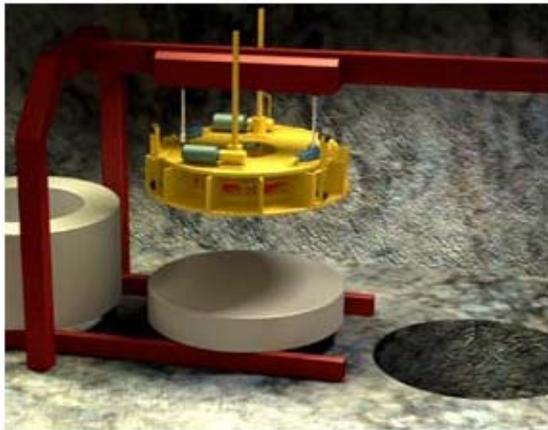


Abbildung 4-18: Prototyp eines Geräts zum Einbringen von Bentonitelementen in die Einlagerungsbohrlöcher /4-36/ (links), Versuchseinlagerung eines Endlagerbehälters im Untertagelabor in Äspö (rechts).

4.2.4.1.4 Nachweis der Funktionalität

Um die Eignung eines Bentonitpuffers für die jeweiligen Endlagerkonzepte und Standortbedingungen zu verifizieren, haben POSIVA und SKB im Rahmen gemeinsamer Forschungsprogramme verschiedene Varianten für das Material und die Einbringtechnik für die Verfüllung von Einlagerungsbohrungen und -strecken untersucht /4-35/, /4-36/, /4-37/, /4-38/. Die durchgeführten Arbeiten umfassen Laboruntersuchungen, Modellrechnungen, In-situ-Versuche im Äspö-Untertagelabor und im Prototyp-Endlager sowie Produktionsversuche für die hochkompaktierten Bentonitelemente. Bei den In-situ-Versuchen wird durch begleitende Messprogramme eine umfangreiche Datenbasis über den Einsatz des Bentonitmaterials, die Wechselwirkungen mit standortspezifischen Einflüssen und technische Aspekte gewonnen. Dieses Datenmaterial wird die Grundlage für die Validierung und Verifizierung entsprechender Computerprogramme sowie für die Fortführung des Programms zum Nachweis der Funktionalität und technischen Machbarkeit für Einbringung des Puffermaterials in die Einla-

gerungsbohrlöcher sein. Eine abschließende Bewertung der alternativen Bentonittypen sowie des Pufferkonzeptes wurde noch nicht durchgeführt, da die Versuche noch andauern.

Bei der Entwicklung von Fertigungsverfahren für die erforderlichen Bentonitelemente wurden uniaxiale und isostatische Verfahren untersucht (Abbildung 4-19), wobei die Entwicklung von geeigneten Pressen auch für die Herstellung großer Komponenten noch nicht abgeschlossen ist /4-36/. Methoden und Technologien für die Herstellung von Pellets sowie körnigem Material sind bekannt und auf dem kommerziellen Markt verfügbar.

Auch bei der Entwicklung des technischen Konzeptes für den Transport und die Einbringung des Puffermaterials befindet sich SKB noch in der Planungsphase. Im Hinblick auf eine Eignung für den Transport der Bentonitelemente werden z. Z. Luftkissenfahrzeuge untersucht, für die Einbringung in den Bohrlöcher wird die Eignung von Portalkranen analysiert (Abbildung 4-18). Der Bau von Prototypen und die Durchführung von technischen Erprobungen ist für die nächsten Jahre vorgesehen. Vergleichbare technische Entwicklungen und Erprobungen wurden auch für die Einbringung von Supercontainer in horizontale Bohrlöcher durchgeführt.



Abbildung 4-19: Fertigung von Bentonitringen /4-47/

4.2.4.2 Einlagerungsstrecken

4.2.4.2.1 Anforderungen

Die Hauptfunktionen des Verfüllmaterials in den Einlagerungsstrecken umfassen

- das quellende Puffermaterial und den in ihm eingeschlossenen Endlagerbehälter in ihrer Position im Bohrloch zu halten,
- zu vermeiden, dass die Strecken zu Fließpfaden für das Grundwasser und Transportwegen für Radionuklide werden sowie
- die Strecke zu stabilisieren.

Weiterhin soll das Verfüllmaterial durch seine Eigenschaften nicht die Funktion anderer Barrieren beeinträchtigen. Zur Überprüfung der Einhaltung dieser Funktionen wurden folgende Funktionskriterien definiert /4-39/:

- Kompressibilität > 10 MPa (zur Begrenzung der Ausdehnung des Puffermaterials),
- hydraulische Leitfähigkeit 10^{-10} m/s (zur Begrenzung des advektiven Lösungstransportes),
- Quelldruck: > 0,1 MPa (zur Gewährleistung der Homogenität)
- Minimaltemperatur >0° C (zum Vermeiden des Gefrierens).

4.2.4.2.2 Verfüllmaterial und Design

Im Zuge des gemeinsamen POSIVA/SKB-Forschungsprojektes BACLO wurden 6 verschiedene Konzepte für die Verfüllung von Einlagerungsstrecken analysiert und bewertet /4-35/. Als Ergebnis wurden zwei Konzepte identifiziert, die weiter untersucht werden sollen:

Beim Konzept A erfolgt die Verfüllung mit einem Gemisch aus quellfähigem Bentonit und einem Ballastmaterial (Gesteinsbruch mit einer maximalen Korngröße von 20 mm). Das Mischungsverhältnis Bentonit/Ballast beträgt 30/70. Im Unterschied dazu wird im Konzept B nur quellfähiger Bentonit eingebracht /4-35/.

Bezüglich der Bewertung des Bentonits wurde auf die Ergebnisse der Untersuchungen zurückgegriffen, die für die Eignung als Puffermaterial in Bohrlöchern durchgeführt wurden /4-39/. Von den vier analysierten Bentonittypen wurden ein Na-Bentonit (MX-80) aus Wyoming (USA) und ein Ca-Bentonit (CA-N) von der Insel Milos (Griechenland) als Referenzmaterialien ausgewählt. Für Versuche wurde außerdem der deutsche Friedland-Ton (Na-Bentonit) verwendet. Bewertungskriterien waren dabei die chemo-physikalischen Eigenschaften dieser Materialien unter dem Einfluss von salinaren Tiefenwässern (1,5 % Salzgehalt), wobei für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken vor allem die Kompressibilität, die hydraulische Leitfähigkeit und das Quellvermögen relevant sind. Eine Festlegung auf die Verwendung eines Bentonit-Typs für das Referenzkonzept ist noch nicht erfolgt.

Die Einbringung des Verfüllmaterials erfolgt in beiden Konzepten in geneigten Lagen von ca. 20 cm Stärke, die beginnend von der Firste zur Sohle hin verdichtet werden. Für beide Konzepte wird neben der in-situ-Kompaktion des Materials auch die alternative Einbringung von vorgefertigten hochkompaktierten Bentonit- bzw. Bentonit-/Ballastblöcken untersucht.

4.2.4.2.3 Technisches Konzept

Generell soll die Verfüllung der Einlagerungsstrecke abschnittsweise, entsprechend dem Verlauf der Einlagerung, erfolgen und bereits in der Betriebphase beginnen. Als Vorbereitung auf die Streckenverfüllung werden zunächst die Betonfahrbahn, alle Einbauten sowie loses

Gestein an der Streckenkantur entfernt. Für die Verfüllung werden die Alternativkonzepte In-situ-Kompaktion sowie vorgefertigte Blöcke untersucht /4-36/.

In-situ-Kompaktion

Bevorzugtes Material für die in-situ-Kompaktion ist ein Gemisch aus 30 % Bentonit und 70 % Gesteinsbruch, das trocken eingebracht werden soll /4-35/. Die Herstellung des Ballastmaterials aus Ausbruchmaterial von der Auffahrung sowie die Herstellung einer homogenen Mischung mit dem Bentonit wurde in Versuchen erprobt. In-situ-Versuche haben gezeigt, dass die Trockendichte (bei ca. 12 % Wassergehalt), die im Bergwerk erreicht werden kann, bei 90-95 % der Trockendichte liegt, die unter Laborbedingungen erreicht wurden. Die In-situ-Trockendichte des 30/70-Gemisches liegt daher bei 1,7-1,8 g/cm³.

Die Einbringung wurde bei mehreren In-situ-Versuchen im Untertagelabor Äspö erprobt /4-48/, /4-49/, /4-50/, /4-51/. Dabei wurde das Verfüllmaterial mit einem Radlader zunächst angeschüttet und dann zu einer ca. 20 cm starken und um 35° geneigten Flächen verteilt. Anschließend wurde das eingebrachte Verfüllmaterial mit einer Verdichterplatte, die an einem hydraulischen Teleskoparm eines Baggers montiert war, verdichtet (Abbildung 4-7). Bei den Versuchen wurden verschiedene Verdichterplatten mit unterschiedlichen Gewichten, Vibrationsfrequenzen und Amplituden eingesetzt. Vor dem Einbringen der nächsten Schicht wurde die Oberfläche der eingebrachten Lage aufgeraut, um ein Abgleiten zu vermeiden. Weitere Details zu den Einbringversuchen finden sich in Kap. 4.1.4.2.3. Bei den Versuchen ergaben sich in verschiedenen Bereichen des Streckenquerschnitts wechselnde Materialdichten, wobei eine Zunahme zur Streckenmitte zu beobachten war.

Ein wichtiger Aspekt bei der Vorbereitung der Strecke für die Verfüllung ist das Abdichten von Wasserzutrittspunkten. Wenn ein Wasserzutritt nicht völlig vermieden werden kann, können Fließkanäle im Verfüllmaterial ausgewaschen werden („piping“) /4-35/. Wird dann der Wasserfluss entlang der Strecke schließlich an einem Verschluss unterbrochen, so muss die Quellfähigkeit des Verfüllmaterials groß genug sein, um die Fließkanäle wieder zu verschließen.

Entsprechend einer Einlagerungsfrequenz von einem Behälter pro Tag müssten pro Tag etwa 6 m Einlagerungsstrecke verfüllt werden. Dies ist aber keine absolute Anforderung, da der Einlagerungs- und Verfüllbetrieb parallel in mehreren Strecken erfolgen kann. Andere Faktoren, wie z. B. Änderungen in der Wasserführung des Gebirges und das Quellen des Puffermaterials im Einlagerungsbohrloch können aber auch eine höhere Verfüllraten erfordern, doch wurden dafür noch keine Kriterien entwickelt.

Verfüllung mit Bentonitblöcken

Das Alternativkonzept sieht eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit vorgefertigten, hochkompaktierten Bentonit- bzw. Bentonit-/Gesteinsbruchblöcken und eine Hohlraumverfüllung mit Bentonitpellets vor. Dabei werden rechteckige Bentonitblöcke mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 40 cm eingestapelt. Im Firstbereich können zur besseren konturbündigen Verfüllung möglicherweise auch bogenförmige Blöcke eingesetzt werden. Es wird von einem

möglichen Verfüllungsgrad des Streckenquerschnitts mit vorgefertigten Blöcken von ca. 70-86 % ausgegangen. Der Resthohlraum wird bis auf 2 % mit Bentonitpellets verfüllt. Dabei kann eine mittlere Trockendichte der Verfüllung von 1,70-1,85 g/cm³ bei einer Verfüllung mit Friedland-Ton bzw. von 1,84-2,02 g/cm³ bei Verfüllung mit einem 30/70-Gemisch aus Bentonit und Steinbruch erreicht werden /4-34/. Noch unsicher ist, ob sich zwischen den Bentonitblöcken sowie zwischen den Bentonitblöcken und den Bentonitpellets eine Dichtehomogenisierung einstellt und ob das Risiko besteht, dass zwischen den Blöcken bzw. den Blöcken und der Streckenkantur Fließpfade entstehen können. Diese Fragen werden im Zuge des BACLO-Projektes untersucht.

Für den Einbau der Blöcke in der Strecke kann eine ähnliche Technik eingesetzt werden, wie für das Einbringen der Bentonitblöcke in die Einlagerungsbohrlöcher. Vorgesehen ist ein Kran mit einem Greifer an einem Teleskoparm (Abbildung 4-8). Zwei Systeme werden auf ihre Eignung für die Einbringung von Bentonitpellets untersucht: ein zentrifugales Pelletschleudersystem und ein pneumatisches System. Der Prototyp eines zentrifugalen Pelletschleudersystems konnte bereits erfolgreich getestet werden (Abbildung 4-9).

Zur Klärung der offenen Fragen bei der Verfüllung mit Bentonitblöcken ist demnächst ein Großversuch im Äspö-Untertagelabor geplant /4-36/.

4.2.4.2.4 Nachweis der Funktionalität

Die Funktionalität der Verschlusskonzepte wurde in einer Vielzahl von In-situ- und Laboruntersuchungen sowie Modellrechnungen analysiert und bewertet. Nachweiskriterien und -methoden für die Bewertung der Funktionalität wurden im Zuge des Forschungsprojektes BACLO entwickelt und bewertet /4-35/, /4-36/ und /4-38/.

Laborversuche mit 30/70-Gemischen (Konzept A) haben gezeigt, dass die geforderten mechanischen Eigenschaften (Kompressionsmodul > 10 MPa) eingehalten werden. Entscheidend sind dabei die mechanischen Eigenschaften des als Ballastmaterial eingesetzten kleingemahlten Kristallingesteins /4-35/. Da der Salzgehalt des Grundwassers nur die Tonfraktion beeinflusst, sind die mechanischen Eigenschaften von hydrochemischen Schwankungen nicht betroffen.

Für das Konzept B haben die Feldversuche ergeben, dass bei einer Verfüllung mit Friedland-Ton, der mit einer Trockendichte von 1,4-1,48 g/cm³ eingebaut werden konnte, das Kompressibilitätskriterium nicht eingehalten wurde. Es wird erwartet, dass sich bei einer höheren Einbaudichte auch die mechanischen Eigenschaften des Tons verbessern werden.

Der Quelldruck und die hydraulische Leitfähigkeit des Verfüllmaterials sind von der Dichte, dem Montmorillonit-Gehalt, sowie Art und Konzentration der Ionen im Grundwasser abhängig. Verfüllungen mit Gemischen aus Bentonit und Gesteinsbruch reagieren entsprechend dem geringeren Anteil an Montmorillonit sensibler auf das Eindringen salinärer Wässer als reine Tonverfüllungen /4-34/. Die Referenzverfüllmaterialien mit 30/70 Verfüllungen weisen Trockendichten von 1,93 g/cm³ auf, der Friedland-Ton von 1,78 g/cm³.

Oedometertests haben ergeben, dass die hydraulischen Eigenschaften des Friedland-Tons sehr unempfindlich gegenüber Schwankungen der Ionenkonzentration im Grundwasser sind. Friedland-Ton besitzt bei der angegebenen Trockendichte eine hydraulische Leitfähigkeit von 10^{-12} m/s und einen Quelldruck von ca. 3 MPa. Auch bei einer Trockendichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ werden die in Kap. 4.1.4.2.1 genannten Kriterien in höhersalinaren Grundwässern (bis 3,0-molare Lösungen) noch erfüllt.

Die Einhaltung der Kriterien für ein 30/70-Gemisch erfordert eine Trockendichte von wenigstens $1,85 \text{ g/cm}^3$ bei einer 1,2 molaren Grundwasserlösung. Dabei weist der CA-N-Bentonit günstigere Eigenschaften auf als der MX-80-Bentonit. Es werden produktionstechnische Maßnahmen diskutiert, um die Einhaltung der Kriterien „hydraulische Leitfähigkeit“ und „Quelldruck“ auch in höhersalinaren Lösungen sicherzustellen /4-35/.

Bei In-situ-Versuchen mit Verfüllmaterialien mit einer Trockendichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ wurden in 1,2 molarem Grundwasser die Kriterien „Kompressibilität“ und „Quelldruck“ erfüllt, während die hydraulische Leitfähigkeit über dem Kriterium lag.

Das Kriterium „technische Machbarkeit“ wurde durch Herstellungsversuche für Bentonitblöcke und -pellets, die Erprobung von Geräten für die Durchführung der Verfüllmaßnahmen sowie die versuchsweise Durchführung von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in einem Untertagelabor überprüft. /4-36/ Während die Herstellung geeigneter Bentonitblöcke und -pellets demonstriert werden konnte, ist die Entwicklung technischer Geräte für die Verfüllung sowie die Demonstration geeigneter Einbringtechniken noch nicht abgeschlossen.

4.2.4.3 Temporäre Verschlüsse von Einlagerungsstrecken

4.2.4.3.1 Anforderungen

Wenn alle Endlagerbohrlöcher einer Einlagerungsstrecke mit Endlagerbehälter befüllt sind, wird die Einlagerungsstrecke verfüllt und durch ein Verschlussbauwerk verschlossen. Dieser Verschluss wird benötigt bis die anderen Grubenräume des Endlagers ebenfalls verfüllt sind. Der Verschluss hat keine Langzeitfunktion, aber er wird darauf ausgelegt, dem Wasserdruck in der Endlagertiefe (5 MPa entsprechend einer Tiefe von 500 m) und dem Quelldruck des Verfüllmaterials (2 MPa) standzuhalten /4-36/. Weiterhin muss er in Strecken zu errichten sein, die einen Wasserzufluss von bis zu 10 l/min aufweisen. Er muss dicht genug sein, um Wasserpfade, die sich im Verfüllmaterial gebildet haben, soweit abzudichten, dass sie sich wieder schließen können. Axiale Risse dürfen im Verschluss nicht länger als 0,1 mm sein. Das Sickerwasser aus dem Zement muss einen $\text{pH} < 11$ aufweisen.

Obwohl der Verschluss nur eine temporäre Funktion hat, ist ein Rückbau nicht vorgesehen.

4.2.4.3.2 Verschlussmaterial und -design

Es werden z. Z. zwei Typen von Verschlussbauwerken zur Abdichtung des Zugangs von Einlagerungsstrecken untersucht /4-36/. Diese Verschlüsse unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Widerlager, mit denen sie an ihrem Standort fixiert werden sollen.

Beim ersten Typ (Abbildung 4-20) schließt sich an ein durch zwei Zementmauern stabilisiertes Dichtelement aus Bentonit ein halbschalenförmiges Betonwiderlager an, das in einem Einschnitt im Gebirge verankert wird. Die bei dem Verfüll- und Verschlussversuch in dem Prototyp Endlager des Untertagelabors Äspö errichteten Verschlüsse entsprechen diesem Typ /4-50/.

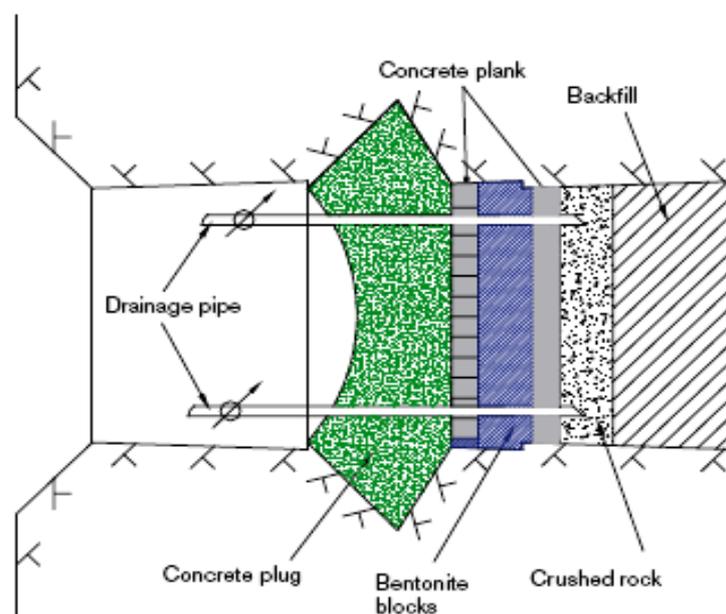


Abbildung 4-20: Schematische Darstellung eines bewehrten Verschlusses, der durch ein Widerlager im Gestein fixiert ist /4-36/

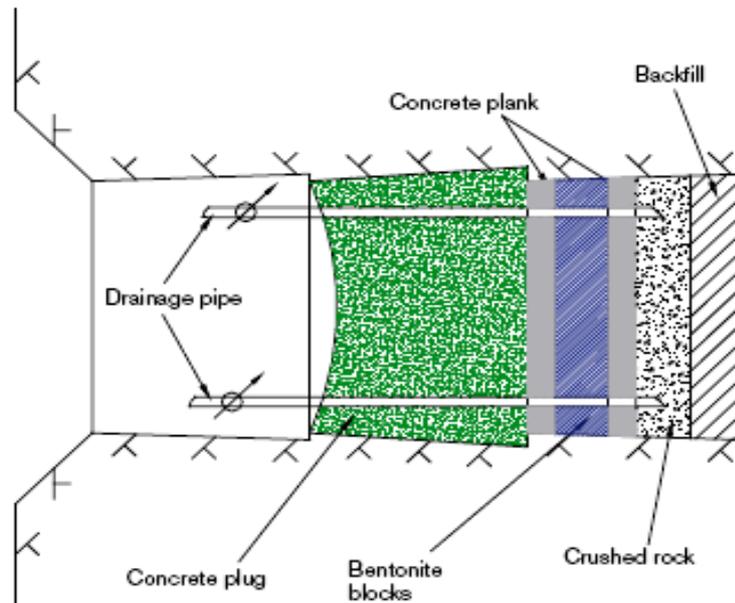


Abbildung 4-21: Schematische Darstellung eines Verschlusses, der die Reibung zwischen dem Verschluss und dem Gestein in seiner Lage gehalten wird /4-36/

Beim zweiten Verschlussstyp basiert die Fixierung des Bauwerks auf der erhöhten Reibung zwischen dem leicht keilförmigen Widerlager und dem Gebirge (Abbildung 4-21).

Der Aufbau aus verschiedenen Elementen, die als Widerlager und Dichtelemente fungieren sollen, und die verwendeten Materialien sind bei beiden Verschlussstypen identisch.

Die Widerlager sollen aus Beton errichtet werden, der eine Stahlbewehrung erhalten kann. Um die Funktion anderer technischer Barrieren nicht zu beeinträchtigen, soll der verwendete Zement einen möglichst niedrigen pH-Wert (< 11) aufweisen. Weiterhin soll der Zement selbstverdichtend sein und beim Abbinden möglichst wenig Hydratationswärme produzieren. SKB arbeitet seit 2004 an der Entwicklung eines Zementes mit einem niedrigen pH, doch konzentrierten sich diese Arbeiten auf Injektionszement, Spritzbeton und Zementverschlüsse für Forschungsbohrungen.

Das Dichtelement soll aus hochkompaktierten Bentonitblöcken errichtet werden. Diese Bentonitblöcke entsprechen in ihrer Zusammensetzung und Herstellung den Bentonitelementen, die auch als Alternativkonzept zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken vorgesehen sind (Kap. 4.2.4.2.2). Es wird sich vermutlich um ein Gemisch aus Bentonit und gebrochenem Gestein im Verhältnis 30 zu 70 Gew.% handeln.

4.2.4.3.3 Technisches Konzept zum Errichten der Verschlussbauwerke

Ein technisches Konzept für die Errichtung der Verschlussbauwerke am Eingang der Einlagerungsstrecken wurde noch nicht entwickelt. Die meisten erforderlichen Arbeitsschritte stellen aber Standardbaumaßnahmen im Bergbau/Tunnelbau dar, wie der Streckennach-

schnitt mit der Vertiefung zur Verankerung des Widerlagers des Verschlusses oder das Erstellen der stahlbewehrten Betonelemente. Das Konzept zur Erstellung der Dichtelemente aus Bentonitblöcken kann sich an dem entsprechenden Verfahren zur Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonitblöcken orientieren (Kap. 4.2.4.2.3).

4.2.4.3.4 Nachweis der Funktionalität

Von den zwei beschriebenen Konzepten für Streckenverschlüsse wurden für den Typ 1 erste Erfahrungen während des Verfüll- und Verschlussversuches im Prototyp Endlager des Untertage-labors Äspö gesammelt /4-50/. Weitere Demonstrationsversuche für beide Verschlusstypen sind vorgesehen /4-36/. Bisher beruht der Funktionalitätsnachweis für diese Systeme weitgehend auf Modellrechnungen bzw. auf der Erprobung von Einzelkomponenten, wie z. B. die Bentonitblöcke.

Die Funktionalität von Bentonitblöcken für die Abdichtung von Strecken wurde im Rahmen des BACLO-Projektes nachgewiesen /4-34/. Es konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen an mechanische und hydraulische Eigenschaften sowie an den Quelldruck erfüllt werden. Auch konnte die Herstellung der Bentonitblöcke im industriellen Maßstab demonstriert werden. Da der vorgesehene Streckenquerschnitt nur zu ca. 80 % mit Blöcken verfüllt werden kann, müssen die Resthohlräume an der Streckenkontur mit Bentonitpellets verfüllt werden. Die Funktionalität dieser kombinierten Verfüllung mit Blöcken und Pellets ist noch nicht nachgewiesen. Diese Fragen werden durch zukünftige Arbeiten im Zuge des BACLO-Projektes untersucht. Geräte für die effektive Einbringung der Bentonitbarriere befinden sich noch in der Entwicklung.

Ein Nachweis der Funktionalität des Bentonwiderlagers kann erst nach der Festlegung auf eine geeignete, langzeitstabile Betonrezeptur geführt werden. Bei der Errichtung der Barriere kann auf umfangreiche Erfahrungen im Berg- und Tunnelbau mit der Herstellung vergleichbarer Betonelemente zurückgegriffen werden.

4.2.4.4 Bohrlochverschlüsse

4.2.4.4.1 Anforderungen

Im Zuge der Standorterkundung werden einerseits von der Oberfläche mehrere 100 m lange Bohrungen abgeteuft, andererseits werden untertägige Bohrungen erstellt, um die Eigenschaften des Wirtsgesteins zu untersuchen. Da diese Bohrungen während der Nachbetriebsphase als potenzielle Wegsamkeiten für einen Lösungszutritt zum Endlager bzw. für eine Freisetzung kontaminierter Lösungen aus dem Endlager wirken könnten, ist es das sicherheitstechnische Ziel, dieses potentiellen Transportpfade durch Bohrlochverschlüsse langfristig zu verschließen /4-34/. Dabei sollte die hydraulische Leitfähigkeit des Verschlusses der des umgebenden, ungestörten Gebirges entsprechen. Eine langzeitige Beeinträchtigung der Funktion des Verschlusses kann nicht ausgeschlossen werden, doch

ist es das Ziel ein Verschlussmaterial zu verwenden, dass seine Beschaffenheit und Dichtigkeit lange behält.

4.2.4.4.2 Verschlussmaterial und -design

Das Grundprinzip des Bohrlochverschlusses besteht aus einem perforierten Kupferrohr, das in das Bohrloch eingeführt wird /4-36/. Anschließend wird das Rohr mit hoch kompaktierten Bentonitblöcken gefüllt. Der Bentonit beginnt durch das Wasser, das durch die Perforationen des Rohres eindringt, aufzuquellen und schließlich durch die Öffnungen auszutreten. Letztlich ist die Röhre komplett in homogenen Ton eingebettet. Der Verschluss wird an Stellen, wo das Bohrloch Störungszonen durchschneidet, durch Zementpfropfen stabilisiert. Untertägige Bohrungen werden am streckenseitigen Ende zusätzlich durch einen Zementpfropfen verschlossen.

Außerdem werden noch drei alternative Bohrlochverschlusskonzepte untersucht /4-36/:

- Das Einschlusskonzept, bei dem eine geschlossene Röhre, die mit kompaktiertem Bentonit gefüllt ist, in das Bohrloch abgelassen wird. Die Röhre verhindert einen Wasserkontakt des Bentonits während des Einbaus. Wenn die Röhre richtig positioniert ist, wird die Röhre an ihrem unteren Ende geöffnet, so dass sich der Bentonit am Grundwasser aufsättigen und aus der Röhre quellen kann. Dieses Konzept kann für lange und kurze Bohrlöcher verwendet werden.
- Bei dem Säulenkonzept werden zylindrische Bentonitblöcke, die durch Kupferschienen gehalten werden, in das Bohrloch abgelassen. Diese Konzept ist für bis zu 100 m lange Bohrungen mit beliebiger Ausrichtung vorgesehen.
- Das Pelletkonzept, bei dem hochkompaktierte Bentonitpellets (MX-80) in das Bohrloch eingebracht werden. Dieses Konzept kann nur bei steil abwärts gerichteten Bohrungen verwendet werden.

Bohrlochverschlüsse für tiefe, von der Oberfläche aus erstellte Erkundungsbohrungen bestehen – entsprechend den wechselnden hydrogeologischen Verhältnissen – aus verschiedenen Elementen. Im Langzeitsicherheitsnachweis für die Standorte Forsmark und Laxemar wurde folgende Verschlussaufbau für eine derartige Bohrung beschrieben /4-34/:

- 0-3 m: verdichteter Geschiebemergel,
- 3-50 m dem Bohrlochdurchmesser entsprechende Gesteinszylinder vom Standort,
- 50-60 m: kompaktierter Geschiebemergel,
- 60-100 m: Bentonitpellets sowie
- unterhalb von 100 m: hoch kompaktierter Bentonit in perforierten Kupferrohren.

Ein oberflächennaher Verschluss schützt die anderen Elemente des Bohrlochverschlusses und verhindert, dass sich der Bentonit nach oben ausdehnt. Gleichzeitig muss er aber auch den Umweltbedingungen, wie Klimaschwankungen und Gebirgsverformungen durch tektoni-

sche Bewegungen und Vereisung, widerstehen. Für diesen Verschluss werden zwei Konzepte untersucht: ein Verschluss aus bewehrtem Silica-Zement und ein Metallverschluss.

4.2.4.4.3 Technisches Konzept und Nachweis der Funktionalität

Die Funktionalität des Bohrlochverschlusskonzeptes bestehend aus einer perforierten, mit Bentonit gefüllten Kupferröhre wurde bereits in den 80er Jahren durch das internationale Stripa-Projekt nachgewiesen.

Eine grundlegende Voraussetzung für das Einbringen eines Bohrlochverschlusses ist das Reinigen des Bohrlochs von allen Hindernissen und die Stabilisierung in aufgelockerten Gebirgsbereichen /4-36/. Untersuchungen haben gezeigt, dass die für das Reinigen des Bohrlochs erforderliche Technik vorhanden ist. Als günstigstes Verfahren zur Stabilisierung des Bohrlochs hat es sich erwiesen, die Bohrung in den instabilen Bereichen aufzuweiten und dann mit Silica-Zement zu verfüllen. Durch diesen Zementstopfen wird dann ein Bohrloch mit dem Originaldurchmesser gebohrt. Diese Verfahren soll noch in Tiefbohrungen erprobt werden /4-36/. Alternativ werden auch noch Injektionsverfahren für die Stabilisierung aufgelockerter Gebirgsbereiche untersucht.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt mit POSIVA wurde die Erstellung und Funktionalität eines Bohrlochverschlusses an der 550 m tiefen Vorbohrung für den Hauptschacht des ONKALO Untertagelabors untersucht /4-36/. Dabei wurde die technische Machbarkeit für alle Phasen der Erstellung des Bohrlochverschlusses nachgewiesen. Weiterhin wurde der Bohrlochverschluss während des phasenweisen Schachtabteufens sukzessive freigelegt, so dass die Qualität und Funktionalität der Verschlusselemente im Bohrloch untersucht werden konnten.

4.2.4.5 Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Grubengebäudeteilen

Für Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Teilen des Grubengebäudes (Verbindungsstrecken, Infrastrukturräume, Rampe, Schächte) existieren z. Z. nur Grobkonzepte /4-36/. Generell ist vorgesehen, die im Rahmen des BACLO-Programms für die Einlagerungsstrecken entwickelten Verfüll- und Verschlusskonzepte in ähnlicher Weise auch in den anderen Teilen des Grubengebäudes einzusetzen /4-35/. Eine Festlegung auf die Verfüllmaterialien und die Einbringtechnik ist noch nicht erfolgt.

Die Hauptanforderung an die Verfüllung der Verbindungsstrecken ist es, die Verfüllung der Einlagerungsstrecken an ihren Einbauorten zu halten /4-36/. Die Verschlüsse der Schächte und der Rampe müssen im oberen Teil Phasen mit Permafrostklima widerstehen und sollen andererseits ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager verhindern. Weitere Anforderungen an die Barrieren werden sich aus künftigen Ergebnissen der Langzeitsicherheitsanalyse ergeben, die die Relevanz der einzelnen Zugänge des Endlagers für eine mögliche Radionuklidfreisetzung aus beschädigten Behältern analysiert.

5 Endlager im Salz

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 Anfang 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. Mit Standortuntersuchungen – zunächst von der Oberfläche – wurde 1979 begonnen. 1983 stimmte die Bundesregierung mit Kabinettsbeschluss vom 13. Juli 1983 der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben zu, die 1984 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 wurde umfangreiche Grundlagenforschung im Hinblick auf die physiko-chemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und Abfalltypen sowie systemanalytische Arbeiten zu Endlagerkonzepten durchgeführt. Als Ergebnis wurde Ende der 80er Jahre ein Referenzkonzept für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung festgelegt. Seit Anfang der 80er Jahre wurden die Forschungsarbeiten durch Demonstrationsversuche zum Nachweis der technischen Machbarkeit der Endlagerung im Salz ergänzt.

Im Zuge einer Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen zum Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im Jahr 1998 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. Das Gorleben-Moratorium wurde auch in der Novelle des Atomgesetzes vom 22.04.2002 gesetzlich festgeschrieben /5-1/.

Im Atomgesetz werden seit 2002 außerdem die zunächst parallel verfolgten Entsorgungsoptionen der Wiederaufarbeitung und der direkten Endlagerung ausgedienter Brennelemente auf die direkte Endlagerung beschränkt. Wiederaufarbeitungsabfälle und ausgediente Brennelemente werden gemäß der deutschen Endlagernomenklatur als wärmentwickelnde Abfälle zusammengefasst, schwach- und mittelradioaktive Abfälle bilden die Gruppe der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Eine Bewertung des derzeitigen Standes der Endlagerforschung durch die Reaktorsicherheitskommission (RSK) vom 31.03.2005 kam zu dem Schluss, dass bei einer Endlagerung in Salzformationen das Wirtsgestein die entscheidende Barriere für die Rückhaltung radioaktiver Stoffe darstellt, während die Standzeit des Behälters nur von untergeordneter Bedeutung ist. Es wird empfohlen die bestehenden Konzepte fortzuentwickeln und sicherheitstechnisch zu optimieren.

In Deutschland bestehen keine gesetzlichen Regelungen, die eine Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle vorsehen. Die deutschen Endlagerkonzepte sehen keine Maßnahmen zur

Ermöglichung oder Erleichterung einer Rückholung radioaktiver Abfälle vor. Untersuchungen zur Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus einem Endlager in tiefen geologischen Formationen wurden in Deutschland durchgeführt und dabei die möglichen Konsequenzen bezüglich der Endlagerauslegung und -sicherheit ausgewiesen /5-2/, /5-3/.

5.1 Endlagerkonzept

Das deutsche Endlagerkonzept im Salzgestein geht gemäß der Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben 1998 /5-4/ von der gemeinsamen Endlagerung von wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einem geologischen Endlager in einem Salzstock aus. Die Errichtung des Endlagers ist in einer Tiefe von ca. 870 m vorgesehen (Abbildung 5-1). 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, Schacht 2 dient dem Transport der radioaktiven Abfälle. 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 soll in räumlich getrennten Flügeln des Endlagers erfolgen. Die Lage der Einlagerungsfelder sowie die Länge der Einlagerungsstrecken ist an die Geologie des Salzstockes angepasst (Abbildung 5-2).

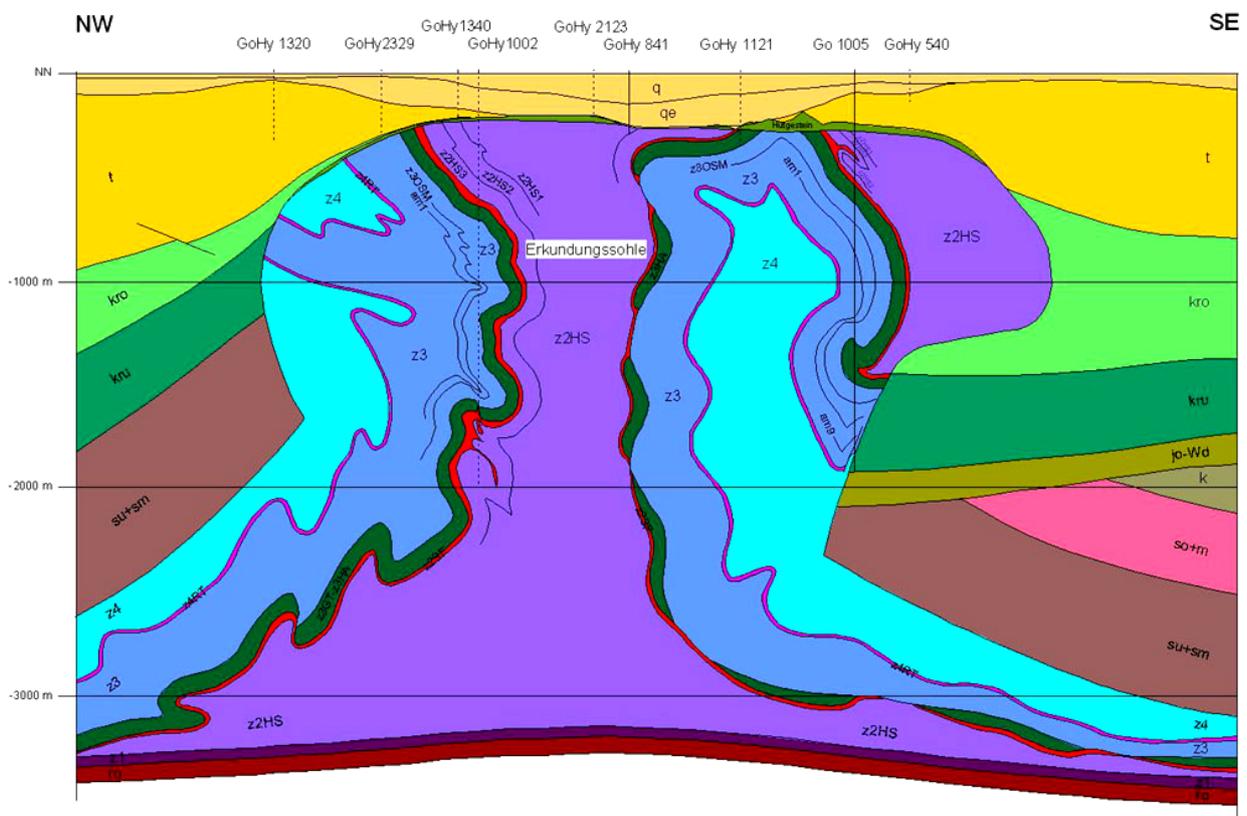


Abbildung 5-1: NW-SE-Vertikalschnitt durch die Salzstock Gorleben. Die heutige Erkundungssohle befindet sich in 840 m Tiefe, ca. 30 m über der möglichen Einlagerungssohle.

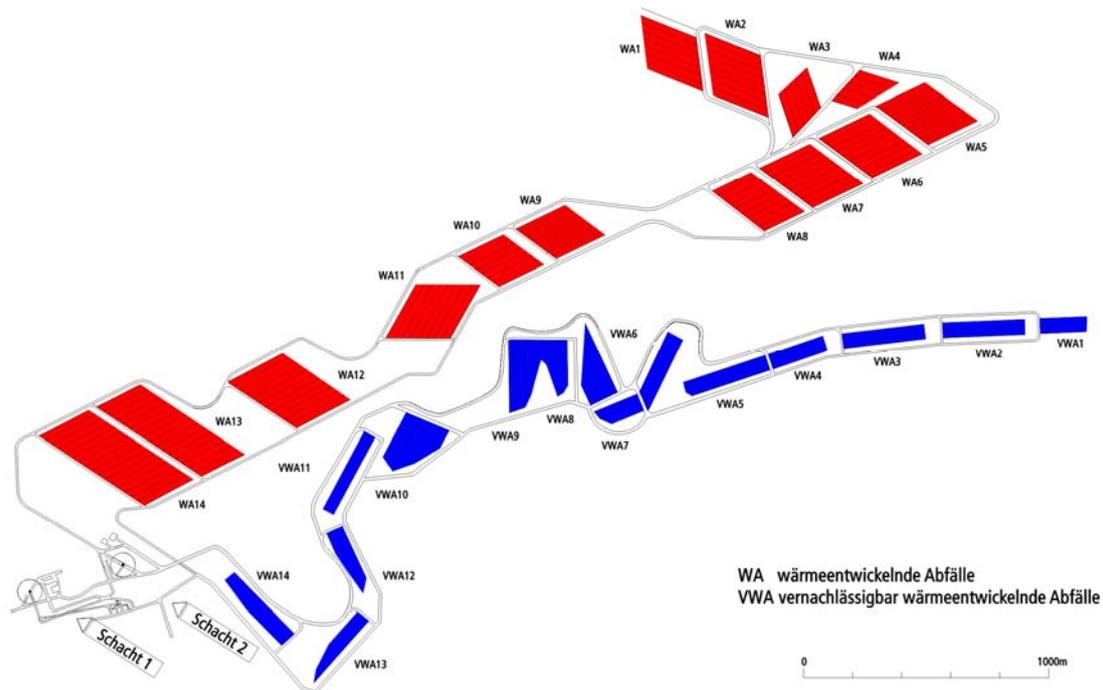


Abbildung 5-2: Gorleben Layout der Einlagerungsfelder. Rot: wärmeentwickelnde Abfälle, blau: vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Für die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle wurden drei Varianten betrachtet:

- Kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung, Bohrlochlagerung in 300 m tiefen Bohrlöchern;
- kombinierte Strecken- und Bohrlochlagerung, Bohrlochlagerung in 30 m tiefen, geneigten Kurzbohrlöchern;
- reine Bohrlochlagerung.

Streckenlagerung

Für die Streckenlagerung sind die folgenden Behältertypen für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente vorgesehen: POLLUX für SWR und DWR-Brennelemente sowie drei verschiedene Typen von CASTOR-Behältern für die Brennelemente aus Forschungsreaktoren. Die 8 Streckenlagerungsfelder haben entsprechend der Geologie variable Abmessungen und sind zwischen zwei Richtstrecken angeordnet. Sie sind durch Querschläge mit den Richtstrecken verbunden. 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 von POLLUX-Behältern wurde durch Demonstrationsversuche erfolgreich nachgewiesen. Nach erfolgter Einlagerung wird der Resthohlraum mit Salzgrus verfüllt. Anschließend wird in einem Abstand von ca. 6 m der nächste Behälter platziert bis eine Einlagerungstrecke gefüllt ist. Der Behälterabstand wur-

de anhand thermischer Berechnungen bestimmt, um die maximale Auslegungstemperatur (200 °C) bei der Endlagerung in Salz einzuhalten. Die Berechnungen wurden durch die Ergebnisse eines in-situ-Erhitzerversuchs bestätigt /5-5/.

Die Einlagerung beginnt mit 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.

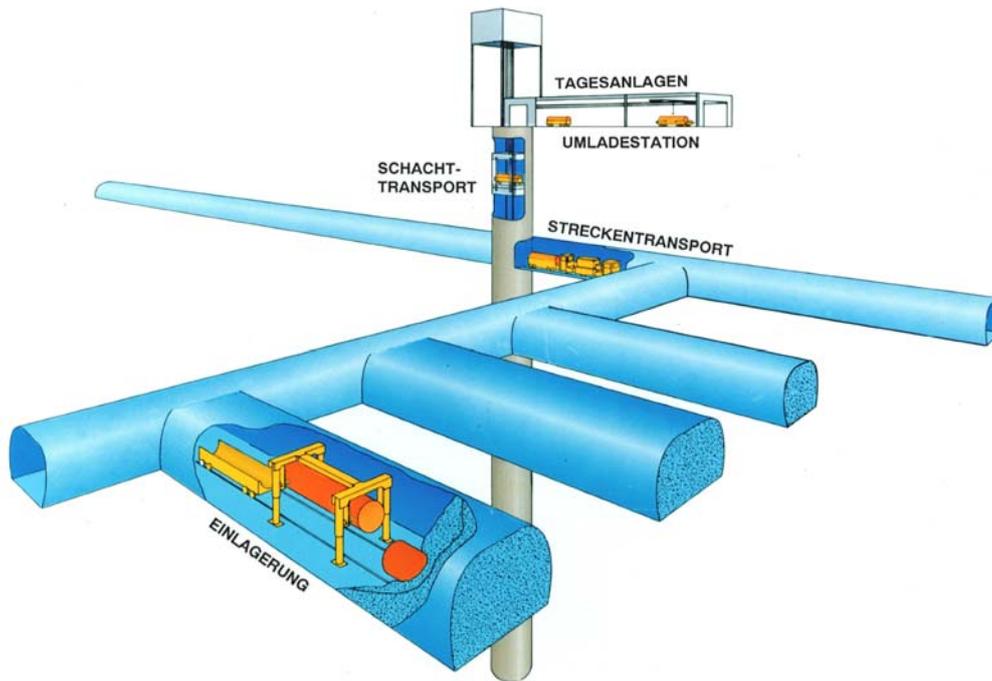


Abbildung 5-3: Schema der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern

Bohrlochlagerung in vertikalen Langbohrlöchern

Für die Einlagerung von wärmeentwickelnden unabgeschirmten Gebinden der Typen BSK 3 für ausgediente Brennelemente (=Endlagerbüchsen ELB-3 BE) sowie HAW, CSD-B und CSD-C-Kokillen ist die Bohrlocheinlagerung in vertikalen Bohrlöchern mit einer Länge von ca. 325 m möglich. Die nutzbare Bohrlöchlänge beträgt ca. 290 m. Nach Füllung eines Bohrloches mit Gebinden werden die oberen 10 m des Bohrlochs verfüllt und mit einem Verschluss abgedichtet.

Der Streckenquerschnitt wird den Erfordernissen der vorgesehenen Einlagerungsmaschine angepasst und misst 6,0 m x 6,6 m.

Für die Bohrlochlagerung werden die vorgesehenen Einlagerungsstrecken in regelmäßigen Abständen mit Bohrlöchern versehen, 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 Befüllung der Bohrlöcher beginnt am hinteren Ende einer Einlagerungsstrecke und endet

am Abzweig zum Querschlag. Die technische Machbarkeit der Bohrlochlagerung wird z. Z. durch einen Demonstrationsversuch nachgewiesen (Abbildung 5-4).

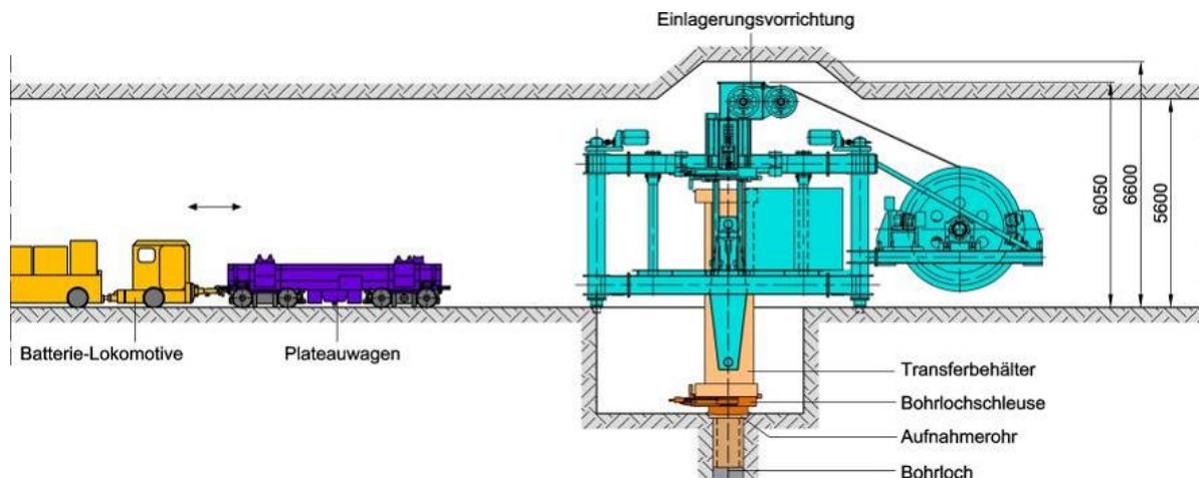


Abbildung 5-4: Technisches Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in tiefen Bohrlöchern (Maßangaben in mm)

Bohrlochlagerung in geneigten Kurzbohrlöchern

Die zweite Konzept für die Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnder, unabschirmter Gebinde sieht die Einbringung in 31 m lange Kurzbohrlöcher vor, die in einem Winkel von 45° geneigt sind. 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 des entsprechenden Einlagerungsequipment befindet sich noch im Konzeptstadium (Abbildung 5-5). Befüllung und Verschluss der Einlagerungsbohrungen sowie das Abwerfen der Einlagerungsstrecken erfolgt analog zum oben dargestellten Konzept für Tiefbohrungen.

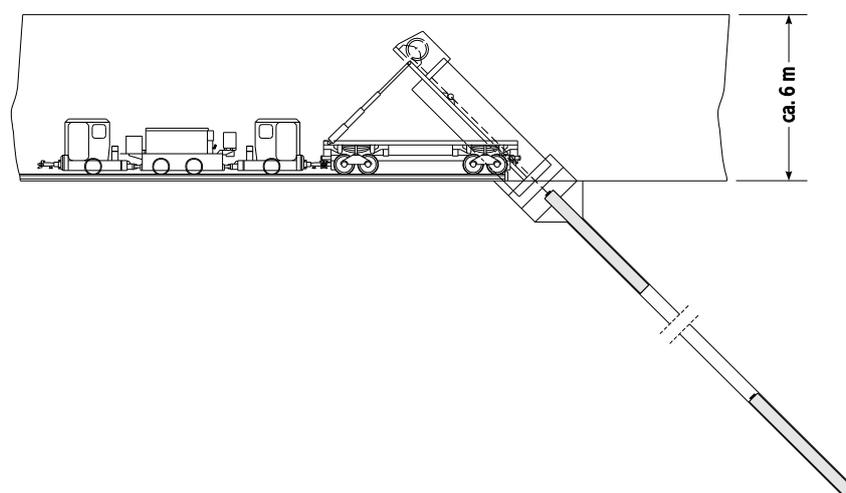


Abbildung 5-5: Technisches Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in geneigten Kurzbohrlöchern

5.2 Verfüll- und Verschlusskonzept

5.2.1 Funktion und Design

Bei Endlagerkonzepten in Salzgesteinen basiert der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Inventars auf dem Wirtsgestein. Wesentliches Ziel von Verfüll- und Verschlussmaßnahmen ist es daher, die Integrität der durch die bergbaulichen Aktivitäten verletzten, geologischen Barriere durch technischen und geotechnischen Barrieren wiederherzustellen. Bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz wieder vollständig verschlossen sind, bilden die geotechnischen Barrieren eine bedeutende hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall und verschließen potenzielle Wegsamkeiten.

Allgemeine Anforderungen an die Verfüllung des Endlagerbergwerkes und an Verschlussmaßnahmen sind in den „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ des Bundesinnenministeriums (BMI) von 1983 festgeschrieben /5-6/. Die Sicherheitsanforderungen werden z. Z. entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik überarbeitet /5-14/, /5-15/. Weitere Schutzziele ergeben sich aus dem kerntechnischen, wasserrechtlichen und bergrechtlichen Regelwerk /5-7/. Um die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen zu gewährleisten, wird unter Berücksichtigung der Standortbedingungen und des Endlagerkonzeptes ein Sicherheitskonzept erstellt (Abbildung 5-6). Dieses Sicherheitskonzept basiert auf dem „sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars“. Aus dem Sicherheitskonzept ergeben sich Anforderungen an die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen.

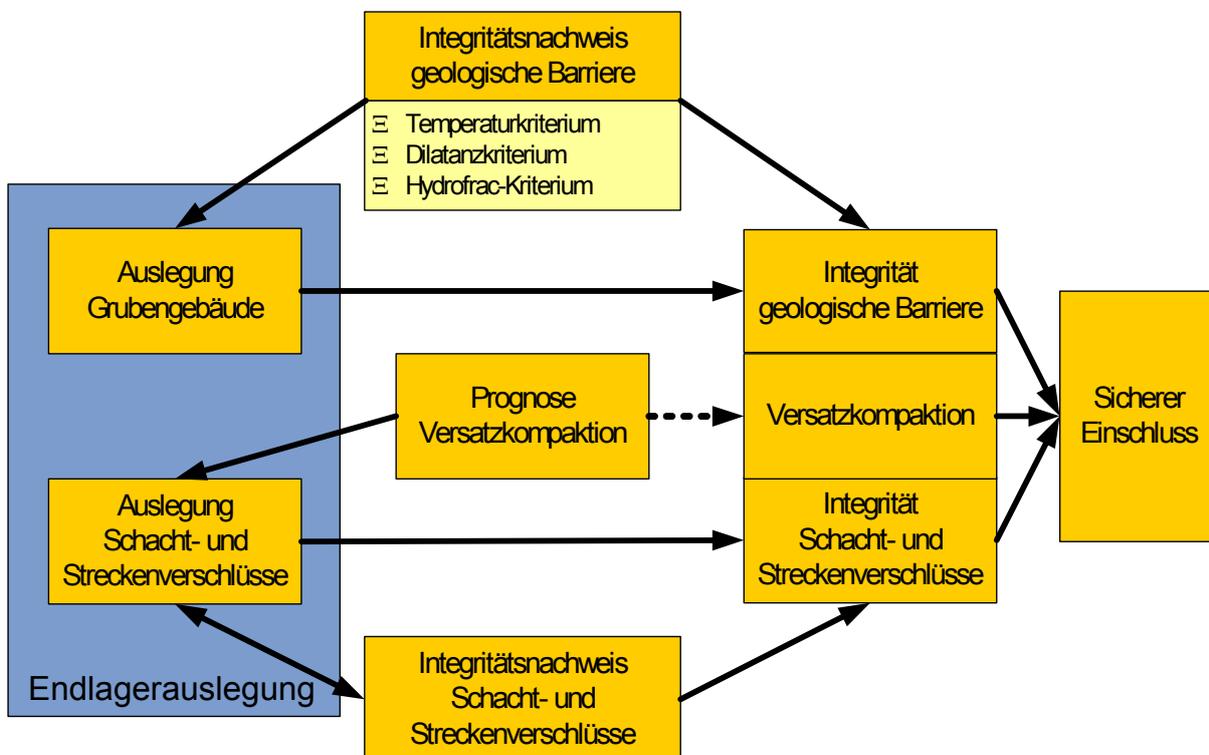


Abbildung 5-6: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“

Um die Einhaltung der Schutzziele sicherzustellen ergeben, muss durch die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen einerseits ein Zutritt von Lösungen zu den Einlagerungsbereichen und andererseits die Freisetzung von Radionukliden aus Einlagerungsbereichen in die Biosphäre soweit begrenzt werden, dass mögliche resultierende Strahlenexpositionen in der Biosphäre die gesetzlichen Anforderungen einhalten. vermieden werden.

Eine wesentliche Randbedingung zur Vermeidung einer Freisetzung von Kristallwasser aus den Salzen und zur Begrenzung der thermomechanischen Spannungen im Wirtsgestein ist das Temperaturkriterium von 200°C.

Es wurden folgende Schließungsstrategien festgelegt:

- Die Anzahl offener Einlagerungsräume ist zu minimieren. Weiterhin sind vorhandene Einlagerungshohlräume so rasch wie möglich zu befüllen und zu verschließen.
- Während oder nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ist der verbleibende Hohlraum in den Einlagerungsräumen mit geeignetem Versatzmaterial zu verfüllen.
- Versetzte Felder sind zur Vermeidung eines Lösungszutritts gegen offene Teile des Endlagerbergwerkes dicht abzuschließen.
- Mit Abfällen befüllte und mit Versatzmaterial verfüllte Einlagerungsstrecken sowie vollständig versetzte Felder werden abgeworfen.
- Nicht mehr benötigte Grubenräume werden versetzt, verschlossen und abgeworfen.

Weiterhin gelten für die Verfüllung des Resthohlraumes in den Einlagerungsbereichen sowie in den sonstigen Grubenräumen folgende spezifische Anforderungen:

- Mechanische Stabilisierung des Salzgebirges,
- Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen,
- Reduzierung des potentiellen Aufnahmevolumentens für Fluide (im Störfall),
- Minimierung der radiologischen Belastung des Personals in der Betriebsphase.

Da bei der Normalentwicklung eines Endlagers im Salz davon ausgegangen wird, dass keine Lösungen in die Einlagerungsbereiche vordringen können, besitzen die inneren Barrieren Abfallform (Glasmatrix und UO₂-Matrix) und die Endlagerbehälter nur eine untergeordnete Bedeutung für die Langzeitsicherheit. Lediglich während der Anfangszeit, in der das Wirtsgestein die Resthohlräume noch nicht wieder verschlossen hat und die geotechnischen Barrieren für den Verschluss des Endlagers sorgen, stellen die technischen Barrieren den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars sicher. In einem neuen Entwurf für die Sicherheitsanforderungen wird eine Behälterstandzeit von 500 Jahren gefordert /5-14/.

Die Verfüllung der Einlagerungsbereiche und der restlichen Grubenräume soll mit Salzgrus erfolgen, wobei die Eignung verschiedener Einbringtechniken gemäß den Anforderungen untersucht wurde /5-4/. Die Kompaktion des Salzgrus wird durch die Konvergenz des an-

grenzenden Gebirges erfolgen, wobei die Porosität und Permeabilität abnimmt bis der Ver-satz langfristig die gleichen Barriereigenschaften wie das Salzgebirge aufweist. In Einlagerungsstrecken und -bohrlöchern wird dieser Prozess durch die Wärmeentwicklung der Abfälle, die die Kriechgeschwindigkeit des Salzes erhöht, beschleunigt.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht, neben der Verfüllung aller Grubenräume, die Er-richtung von Verschlüssen an den Zugängen zu den Einlagerungsbereichen sowie in den Schächten vor. Diese Barrieren werden so angeordnet und hinsichtlich ihres hydraulischen Widerstandes und der Langzeitstabilität so ausgelegt, dass bei einer ungestörten Endlager-entwicklung kein Lösungszutritt über den Schacht und die verfüllten Strecken zu den radioaktiven Abfällen und keine Auspressung kontaminierter Lösungen über den gleichen Pfad erfolgen kann.

Die Streckenverschlüsse bestehen aus zwei Dichtelementen und einem Widerlager (Abbildung 5-7). Eine vorgeschaltete Stützmauer ist in erster Linie für die Errichtung des Bauwerks wichtig. Die Baumaterialien müssen mit dem Wirtsgestein kompatibel und lang-zeitstabil sein.

Da durch die Schachtverschlüsse potentielle Wegsamkeiten zwischen der Biosphäre und dem Endlager verschlossen werden, kommt diesen Barrieren eine besonders hohe sicher-heitstechnische Bedeutung zu. Daher bestehen spezielle Anforderungen an die Lösungs- und Gasdichtheit wie auch an die Langzeitstabilität. Das Design des Schachtverschlusses wird dem jeweiligen Deckgebirgsaufbau angepasst (Abbildung 5-8). Er ähnelt in seinem prin-zipiellen Aufbau mit Dichtelementen und Widerlagern dem Streckenverschluss, doch kommen hier aufgrund der abweichenden physikochemischen Verhältnisse durch den Kon-takt mit Grundwasser andere Materialien für die Dichtelemente und Widerlage zum Einsatz. Der restliche Schacht wird zur mechanischen Stabilisierung mit Verfüllmaterial befüllt.

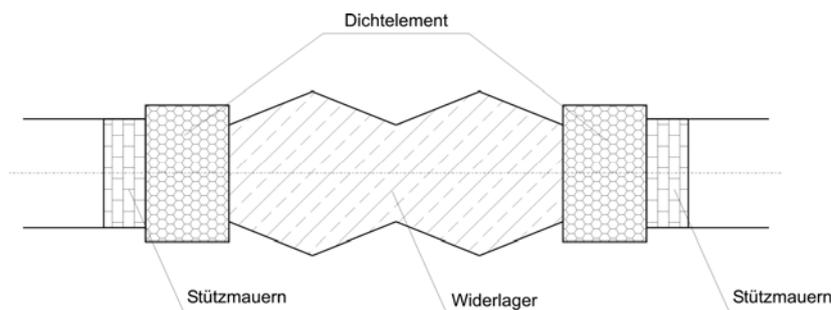


Abbildung 5-7: Prinzipskizze Streckenverschluss /5-4/

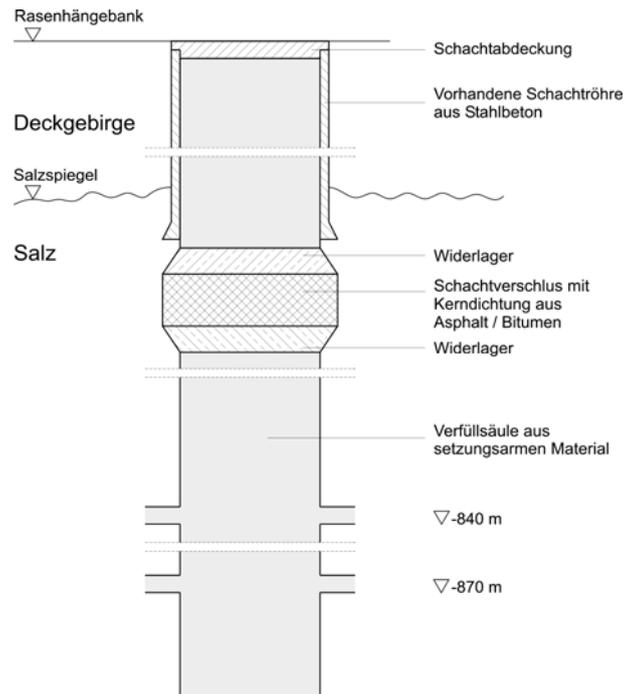


Abbildung 5-8: Prinzipskizze Schachtverschluss /5-4/

5.2.2 Nachweiskonzept für die Barrierenfunktionen

Der Nachweis für die Integrität und Funktionalität geotechnischer Barrieren gliedert sich in den Nachweis der aus der Langzeitsicherheitsanalyse vorgegebenen Anforderungen und den Nachweis der Bauwerksintegrität /5-10/ (Abbildung 5-9).

Bei den Stofftransportrechnungen des Langzeitsicherheitsnachweises werden geotechnische Barrieren als Strömungswiderstände abgebildet, wobei die Eingangsgrößen Querschnitt, Länge und Permeabilität der Barriere sind. Die Modellannahmen für die Barriereigenschaften, mit denen die Einhaltung des radiologischen Schutzziels nachgewiesen wurde, entsprechen den Anforderungen an die geotechnischen bzw. technischen Barrieren. Ein hoher Strömungswiderstand stellt die grundlegende Anforderung an die geotechnische Barriere dar. Dabei ist zu beachten, dass die geotechnische Barriere in Realität aus den drei Bereichen Abdichtungskörper, Kontaktzone zum Wirtsgestein und Auflockerungszone im Wirtsgestein Salzgebirge besteht, die parallel geschaltete Strömungswiderstände aufweisen (Abbildung 5-9). Für den Nachweis muss ein Querschnitt betrachtet werden, der alle drei Elemente beinhaltet. Aus dem Durchfluss kann eine mittlere Permeabilität der Barriere berechnet werden. Da die 3 Barrierenbereiche sehr unterschiedlichen Flächenanteile und eine abweichende Ausbildung aufweisen, wird für jeden Bereich der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes geführt /5-8/.

Der Nachweis der Bauwerksintegrität umfasst den Nachweis der Rissbeschränkung, der in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit umfasst (Abbildung 5-9). Des Weiteren ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit bzw. der Langzeitstabilität zu führen.

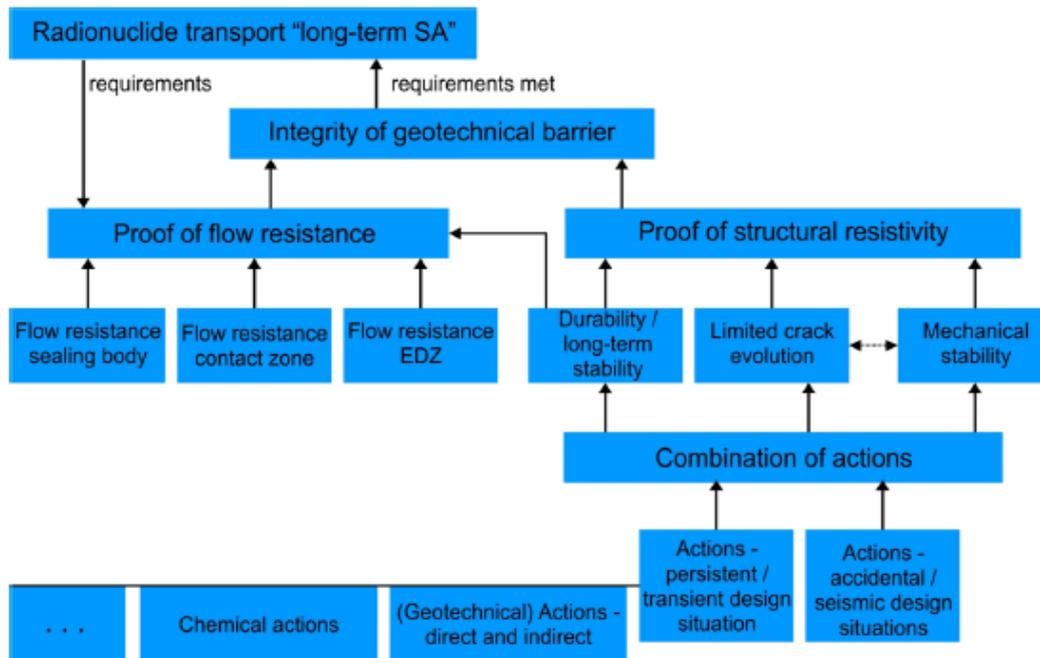


Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen der Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren /5-9/

Da in einem beschädigten Bauwerk die Permeabilität zunehmen kann, ist für geotechnische Barrieren aus Salzbeton der Nachweis der Rissbeschränkung zu führen, der in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit abdeckt. Außerdem muss im Zusammenhang mit dem Nachweis der Langzeitstabilität gezeigt werden, dass sich die Permeabilität in Folge chemischer Einwirkungen, die z. B. Materialkorrosion, nicht in unzulässiger Weise erhöht /5-8/.

Wenn für die im Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigten Barrieren ein ausreichend hoher hydraulischer Widerstand, die Standsicherheit und die Langzeitstabilität durch ingenieurtechnische Einzelnachweise mit hinreichender Zuverlässigkeit nachgewiesen werden kann, ist die Gültigkeit des Langzeitsicherheitsnachweises erbracht.

Aus dem Standort des Endlagers sowie den Betriebszuständen und den definierten Szenarien für das Endlager ergeben sich Beanspruchungen für die geotechnischen Barrieren und ihre Umgebung, die standortbezogen ausgewertet werden müssen. Diese Beanspruchungen leiten sich aus den Gebirgsverhältnissen, aus den bergbaulichen Tätigkeiten, der Einlagerung der Abfälle, Szenarien mit Fluidzu- bzw. -austritt sowie Seismizität ab. Die daraus abgeleiteten Gefährdungsbilder können Kombinationen der Beanspruchungen darstellen /5-10/.

Aufgrund des oben vorgestellten Konzeptes können deterministische und probabilistische Nachweise geführt werden.

Deterministische Nachweise wurden z. B. im Rahmen des ingenieurtechnischen Nachweises zur Integrität der Streckenabdichtungen im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

(ERAM) geführt /5-11/. Die Einzelnachweise basieren auf der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte und umfassen:

- den Nachweis eines ausreichend hohen Strömungswiderstandes im Baukörper, der Kontaktzone sowie der Auflockerungszone ($k < 10^{-18} \text{ m}^2$),
- den Nachweis der Rissbeschränkung für verschiedene Zeitpunkte und Belastungssituationen (abdeckend für den Nachweis der Standsicherheit). Darunter zählten u. a.:
 - Nachweis der Einhaltung einer maximalen Temperaturdifferenz im Baukörper zur Vermeidung von thermisch induzierten Rissbildungen während des Hydratationsprozesses,
 - Einhaltung des Festigkeitskriteriums des Baukörpers für einen frühen Nachweiszeitraum (bis 100 Jahre, \approx Lebensdauer üblicher Ingenieurbauwerke)
 - Einhaltung des Dilatanzkriteriums unter Ansatz der wirksamen Spannungen für Baukörper und Gebirge (ALZ) für den späten Nachweiszeitraum (ab 100 Jahre)
 - Einhaltung des Festigkeitskriteriums in der Kontaktzone für den frühen Nachweiszeitraum; maßgeblich ist geringfesteres Material
 - Einhaltung des Dilatanzkriteriums in der Kontaktzone für den späten Nachweiszeitraum unter Ansatz der wirksamen Spannungen
- Nachweis der Langzeitstabilität des verwendeten Baustoffs Salzbeton

Letztgenannter Nachweis konnte durch Untersuchungen des Korrosionsverhaltens erbracht werden. Voraussetzung für eine vernachlässigbare Korrosion war eine ausreichend geringe Anfangspermeabilität von $k < 10^{-18} \text{ m}^2$ /5-10/.

Da die Kontaktzone zwischen Gebirge und Bauwerk häufig ein Bereich erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ist, schreibt das Technische Regelwerk Untersuchungen zur Bestimmung des hydraulischen Widerstandes der Kontaktzone an vergleichbaren Bauwerken vor. Als vergleichbares Bauwerk zu den Streckenabdichtungen des ERAM konnte der ebenfalls aus Salzbeton errichtete Assen Vordamm dienen, an dem Permeabilitätsmessungen, Hydrofrac-Untersuchungen, Ultraschalluntersuchungen der Kontaktzone und Laborversuche (Scher- und Zugfestigkeit, etc.) durchgeführt wurden /5-10/. Die Permeabilitätsmessungen ergaben im Baukörper Werte von $k = 6 \cdot 10^{-19}$ bis $4,4 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$, in der Auflockerungszone von $k = 6,5 \cdot 10^{-21}$ bis $2 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ und in der Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge von $k < 10^{-18} \text{ m}^2$.

Die angewandte Methode der Teilsicherheitsbeiwerte nutzt akzeptierte Modelle, Kriterien und Verfahren. Dies ermöglicht Aussagen zum Sicherheitsniveau. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Nachweisführung besteht in der Möglichkeit der Anpassung an andere Rand- und Anfangsbedingungen.

Neben dem deterministischen Ansatz ist auch ein probabilistisches Nachweiskonzept für die Funktionalitätsbewertung von geotechnischen Barrieren möglich /5-12/. Dabei wird eine Ana-

lyse von Gefährdungsbildern (Kombinationen der im Nachweiszeitraum möglichen Einwirkungen) mittels mathematischer und physikalischer Modelle durchgeführt, so dass letztendlich eine quantitative Abschätzung der Sicherheit erfolgen kann (Abbildung 5-10). Mittels probabilistischer Verfahren können für Verschlussbauwerke Versagenswahrscheinlichkeiten für Grenzzustände, wie z. B. Abdichtung der Kontaktfuge, Durch- und Umströmung des Dichtelementes und Setzung der Schottersäule (bei Betrachtung eines Schachtverschlussbauwerkes), ermittelt werden. Unter Ansatz geschätzter Verteilungsparameter können auf die Lebensdauer bezogene Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Die resultierenden Ergebnisse hängen aber in einem hohen Maße von der Qualität der Eingangsparameter ab. Durch den Einsatz redundanter Verschlussysteme sowie eine Verbesserung der Kenntnis der Eingangsgrößen kann die Versagenswahrscheinlichkeit weiter reduziert werden.

5.2.3 Sicherheitsnachweiskonzept

Das deutsche Sicherheitsnachweiskonzept für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle im Salz wurde im Hinblick auf die Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich kürzlich einer umfassenden Neubewertung und Überarbeitung unterzogen /5-13/.

Ziel der Endlagerforschung sind die Führbarkeit des Sicherheitsnachweises und die technische Realisierbarkeit des Endlagers anzusehen. Aufbauend auf dem geologischen Standortmodell und dem technischen Endlagerkonzept, die zusammen als Referenzkonzept die notwendige Datenbasis verkörpern, ist der Nachweis der technischen Realisierbarkeit der im Sicherheitsnachweis getroffenen Annahmen bezüglich des Endlagers, seiner Komponenten und insbesondere der technischen Barrieren zu führen. Ein erfolgreicher Sicherheitsnachweis setzt daher die Einheit des Nachweises der Einhaltung der Schutzziele und der technischen Realisierbarkeit voraus (Abbildung 5-11). Neben quantitativen Nachweisen der Unterschreitung entsprechender Grenzwerte ergänzen dabei qualitative Argumente den Nachweis der Einhaltung der Schutzziele.

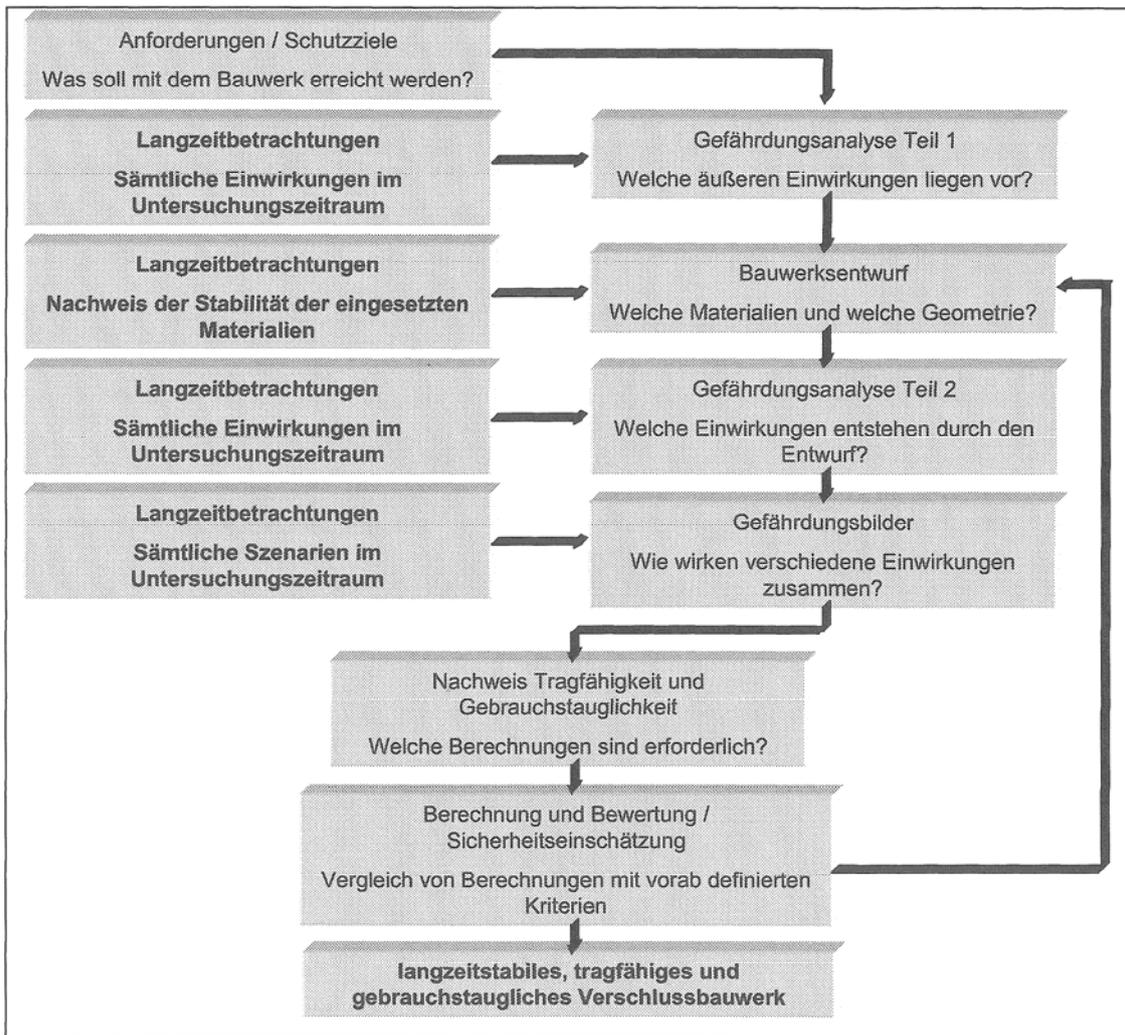


Abbildung 5-10: Algorithmus zu Entwurf und Bemessung untertägiger Verschlussbauwerke /5-12/

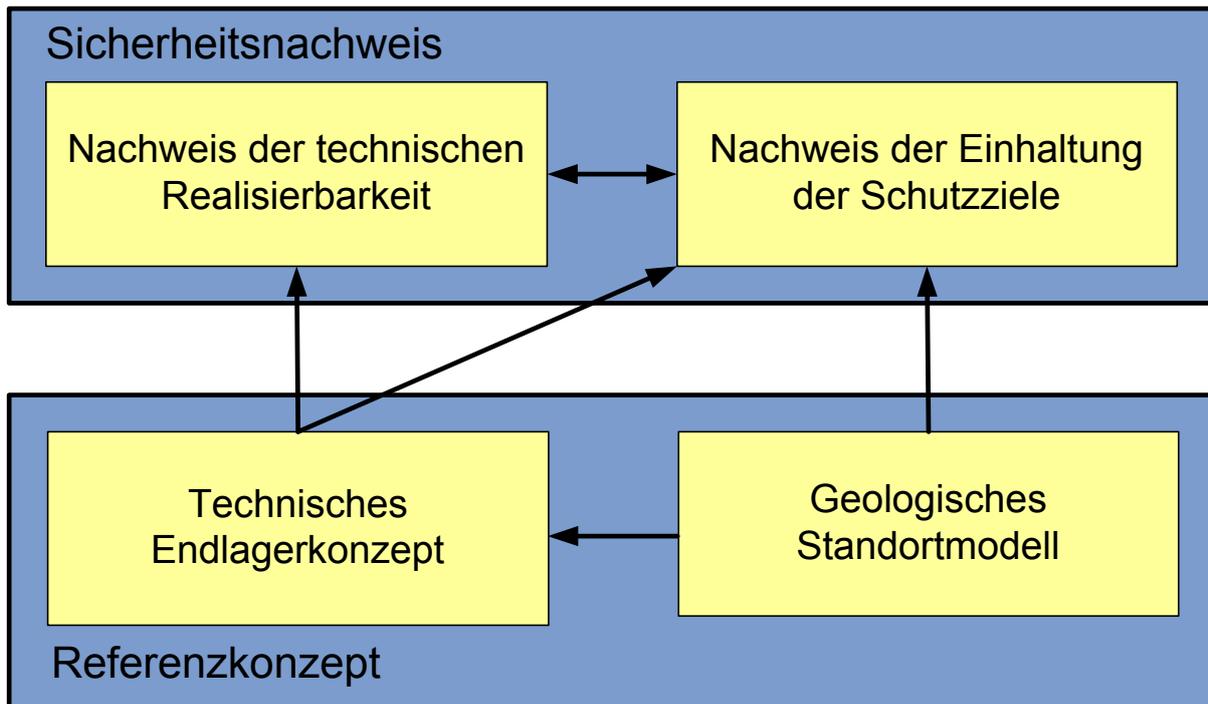


Abbildung 5-11: Methodik zur Führung des Sicherheitsnachweises /5-13/

Die maßgeblichen Bearbeitungsgrundlagen sind neben den quantitativen Schutzziele, deren Einhaltung nachzuweisen ist, das geologische Modell des Referenzstandortes, die Spezifikation der endzulagernden Abfälle und das technische Endlagerkonzept.

Der radiologische Langzeitsicherheitsnachweis stellt einen wesentlichen Aspekt des Sicherheitsnachweises dar. In der aktuellen Diskussion über die Revision der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Stoffe in Bergwerken“ /5-14/, /5-15/ wird in Anbetracht der Unsicherheiten von Sicherheitsanalysen und der Berechnung von Dosiswerten über sehr lange Zeiträume eine Festlegung von Dosisgrenzwerten für die Nachbetriebsphase als nicht sinnvoll betrachtet wird. Als geeignet wird dagegen ein Richtwert im Sinn eines radiologischen Sicherheitsindikators („constraint“ im Sinn der ICRP) angesehen. Gleichzeitig sollten entsprechend der extrem langen Betrachtungszeiträume die Eintrittswahrscheinlichkeiten zukünftiger Entwicklungen („Szenarios“) berücksichtigt werden. Dabei ist zwischen wahrscheinlichen, gering wahrscheinlichen und nicht mehr zu betrachtenden, äußerst gering wahrscheinlichen Entwicklungen zu unterscheiden. Für wahrscheinliche Entwicklungen wird ein Dosisrichtwert von 0,1 mSv/a diskutiert, für gering wahrscheinliche Entwicklungen hingegen höhere Dosisrichtwerte (z. B. 1 mSv/a) als auch Risikorichtwerte (z. B. $10^{-5}/a$).

Als Nachweiszeitraum wird für den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis 1 Mio. Jahre angesetzt.

Des Nachweis der Kritikalitätssicherheit erfolgt entsprechend den in der Kerntechnik üblichen Standards.

Ein Langzeitsicherheitsnachweis hat in Deutschland darüber hinaus auch die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele – Grundwasserschutz und Schutz der Tagesoberfläche – zu berücksichtigen. Der Grundwasserschutz vor chemisch-toxischen Stoffen basiert auf den Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes, der Grundwasserschutzverordnung sowie der untergesetzlichen Regelwerke, während sich die Anforderungen bezüglich des Schutzes der Tagesoberfläche aus dem Bergrecht ableiten.

Ein weiterer Teil der Sicherheitsnachweiskonzeptes ist die Einhaltung der Schutzziele auch während der Betriebsphase des Endlagers. Wesentliche Bestandteile des Betriebssicherheitsnachweises sind dabei der Nachweis der radiologischen und kerntechnischen Sicherheit entsprechend den Anforderungen des Atomgesetzes und der Strahlenschutzverordnung sowie der Nachweis der Bergbau- und Arbeitssicherheit gemäß den Anforderungen des Bundesberggesetzes und der bergrechtlichen bzw. Arbeitsschutzbestimmungen. Die Einhaltung der Anforderungen des Objektschutzes und des physischen Schutzes sowie der Spaltmaterialüberwachung (Safeguards) sind den Genehmigungsbehörden in speziellen geheimen Unterlagen nachzuweisen.

Die Methodik des Nachweises der radiologischen Langzeitsicherheit basiert auf der Betrachtung von möglichen Entwicklungen des Endlagersystems /5-13/. Dabei werden auch Szenarien berücksichtigt, die die Ausbreitung von Radionukliden in flüssiger oder Gasphase von den Abfallgebänden bis in die Biosphäre beschreiben. Die Szenarienentwicklung soll alle in den Grenzen menschlicher Vernunft denkbaren Entwicklungen des Endlagersystems abdecken. Andererseits ist es wichtig, die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien zu berücksichtigen. Bei extrem konservativen Annahmen, wie z. B. dem Anhydrit-Szenario, das eine Verbindung vom Endlager bis zu Deckgebirge über Hauptanhydrit unterstellt, kommen die Vorzüge von Salz als Wirtsgestein (z. B. Dichtheit und Selbstheilungsvermögen) und einschlusswirksame geologische Hauptbarriere nicht zum tragen. Nach aktuellen Untersuchungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) kann dieses Szenario für den Salzstock Gorleben ausgeschlossen werden, da der Hauptanhydrit hier während des Salzaufstiegs zerbrochen ist und nun als zerblockte, isolierte Schollen vorliegt, so dass der Anhydrit keine durchgängige Wegsamkeit bildet.

Das neue Konzept des Sicherheitsnachweises trägt – unter Berücksichtigung der Fortschritte beim Nachweis der Integrität der geologischen Barriere und der geotechnischen Barrieren – den Vorzügen und dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung (Abbildung 5-12):

- Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.

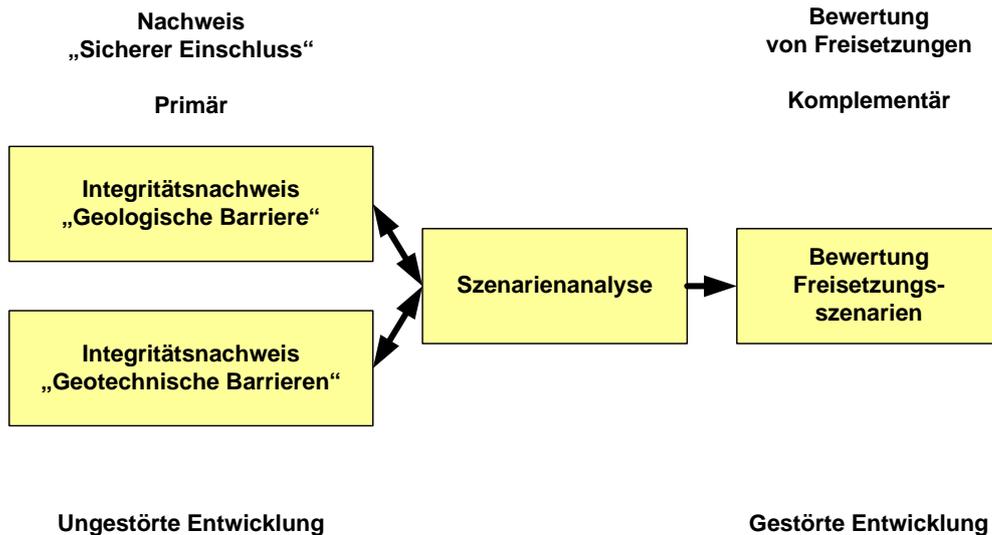


Abbildung 5-12: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis

- Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt für diejenigen Entwicklungen des Endlagersystems, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. Ob diese Entwicklungen wahrscheinlich, gering wahrscheinlich, oder auszuschließen sind, ist Ergebnis der Szenarienanalyse.

5.3 Endlagerbehälter

5.3.1 Anforderungen an die Endlagergebäude

Die Funktion der Endlagerbehälter besteht primär darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Stoffe während des Transportes und der Einlagerung sicher und dicht zu umschließen.

Für die Betriebsphase des Endlagers ergeben sich die Anforderungen an die Endlagerbehälter im Wesentlichen aus dem technischen Endlagerkonzept und dem jeweiligen Transport- und Handhabungssystem. Die Anforderungen für die Nachbetriebsphase ergeben sich aus dem Zeitpunkt, von dem an andere Barrieren einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten. Entsprechend den günstigen Einschlusseigenschaften des Salzes haben die Endlagerbehälter hier nur während der frühen Nachbetriebsphase vor Abschluss der Kompaktion des Versatzmaterials eine sicherheitstechnische Bedeutung.

Für die Nachbetriebsphase eines Endlagers in Salzformationen wurden bisher die folgenden Anforderungen für Endlagerbehälter definiert /5-16/ (vgl. Tabelle 5-1):

- Die Unterkritikalität ist auch für Nachbetriebsphase uneingeschränkt nachzuweisen.

- Begrenzung der Dosisleistung auf 10^4 Sv/h um die Beeinträchtigung des Wirtsgesteins durch Strahlenschäden und durch Gasbildungsmechanismen, insbes. durch Radiolyse, zu begrenzen.
- Dichter Einschluss der Gase im Behälter, der gleichzeitig als Integritätsnachweis gilt, vom Verschluss des Endlagers bis zum Wirksamwerden der geotechnischen und geologischen Barrieren. In dem neuen Entwurf für die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung wird die Integrität des Behälters für 500 Jahre gefordert /5-14/. Während dieses Zeitraums beträgt die zulässige Leckrate 10^{-3} mbar l/s (= 10^{-4} Pa.m³/s).
- Maximale Oberflächentemperatur des Behälters $\leq 200^\circ\text{C}$, um eine Freisetzung von Kristallwasser aus den Salzen und eine Wanderung von Laugeneinschlüssen im Salz entsprechend dem Temperaturgradienten zum Endlagerbehälter zu vermeiden.
- Mechanische Stabilität gegenüber dem Gebirgsdruck: für den POLLUX-Behälter auf max. 30 MPa definiert, für die Endlagerbehälter für Bohrlochlagerung noch nicht festgelegt.
- Langzeitstabilität gegenüber Korrosion bis zu dem Zeitpunkt, von dem an der umgebende Versatz einen dichten Verschluss gewährleistet. Im aktuellen Entwurf der „Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung radioaktiver Stoffe in Bergwerken“ wird eine Behälterstandzeit von 500 Jahren gefordert /5-14/.

Tabelle 5-1: Sicherheitstechnische Anforderungen an Endlagergebäude für die Betriebs- und Nachbetriebsphase im Endlager /5-10/

Sicherheitstechnische Anforderungen	Nachweiszeitraum bzw. Nachweispunkt	Betriebsphase		Nachbetriebsphase
		während des Einlagerungsvorgangs	bis zum Verschluss des Endlagers	
Unterkritikalität	Zeitraum des Langzeitsicherheitsnachweises	$k_{\text{eff}} \leq 0,95$		
Dosisleistung	Zeitpunkt der Einlagerung	$D_{\text{Gebindeoberfläche}} \leq 10^4 \text{ Sv/h}$		
Integrität (Dichtheit)	Bis zum Wirksamwerden der geotechnischen und geologischen Barrieren	Radiologisches Schutzziel für Einzelpersonen der Bevölkerung: effektive Dosis $< 0,1$ bzw. 1 mSv/s Leckrate $\leq 10^{-6} \text{ mbar}\cdot\text{l/s}$ $(\leq 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s})$ Nachweis nach Handhabung auch durch administrative bzw. technische Maßnahmen (z. B. Absaugung, Bewetterung)		
Temperatur	Während der transienten, d. h. thermischen Phase	$T_{\text{Gebindeoberfläche}} \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{Wirtsgestein}} \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$ (d. h. Temperatur an den Grenzflächen des Salzes zu den Endlagergebänden) $T_{\text{Brennstabhlrohr}} \leq 390 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $410 \text{ }^\circ\text{C}$ (evtl. abweichende Herstellerangaben) $T_{\text{Glastemperatur HAWA-Kokille}} \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$		
Gasbildung	Zeitraum des Langzeitsicherheitsnachweises	Ausschluss explosiver Gasgemische Nachweis durch firstbündige Verfüllung abgeworfener Grubenbaue und Bewetterung Ausschluss unzulässiger Gasüberdruck Nachweis der Gaspermeation des Wirtsgesteins und Berücksichtigung von Gasspeicherhölräumen		

5.3.2 Gebindematerialien und -design

POLLUX-Behälter

Die Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente erfolgt in selbstabschirmenden POLLUX-Behältern mit den Abmessungen 5,52 m x 1,96 m (Abbildung 5-13). Der zylindrische Behälter besteht aus einem Innenbehälter mit 16 cm Wandstärke und einem äußeren Abschirmbehälter mit 27 cm Wandstärke /5-16/. Der Behälter besitzt ein Doppeldeckelsystem, dessen Primärdeckel verschweißt und Sekundärdeckel verschraubt wird. Außerdem ist noch ein verschraubter Abschirmdeckel mit Moderatorplatte aufgesetzt. Der Innenbehälter sowie der Primär- und Sekundärdeckel bestehen aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210), der Außenbehälter sowie der Abschirmdeckel aus Sphäroguss GGG40 (Werkstoff 0.7040). Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit 2 DWR-BE, 6 SWR-BE oder 5 WWER-BE eingesetzt werden kann. Insgesamt kann der Behälter die Brennstäbe von 10 DWR-BE, 30 SWR-BE oder 25 WWER-BE aufnehmen. Im Außenbehälter befinden sich Bohrungen mit Polyethylenstäben zur Neutronenmoderation. Der POLLUX-Behälter wiegt leer 57,6 t und beladen 65 t. Zur Handhabung sind außen vier Tragzapfen angebracht.

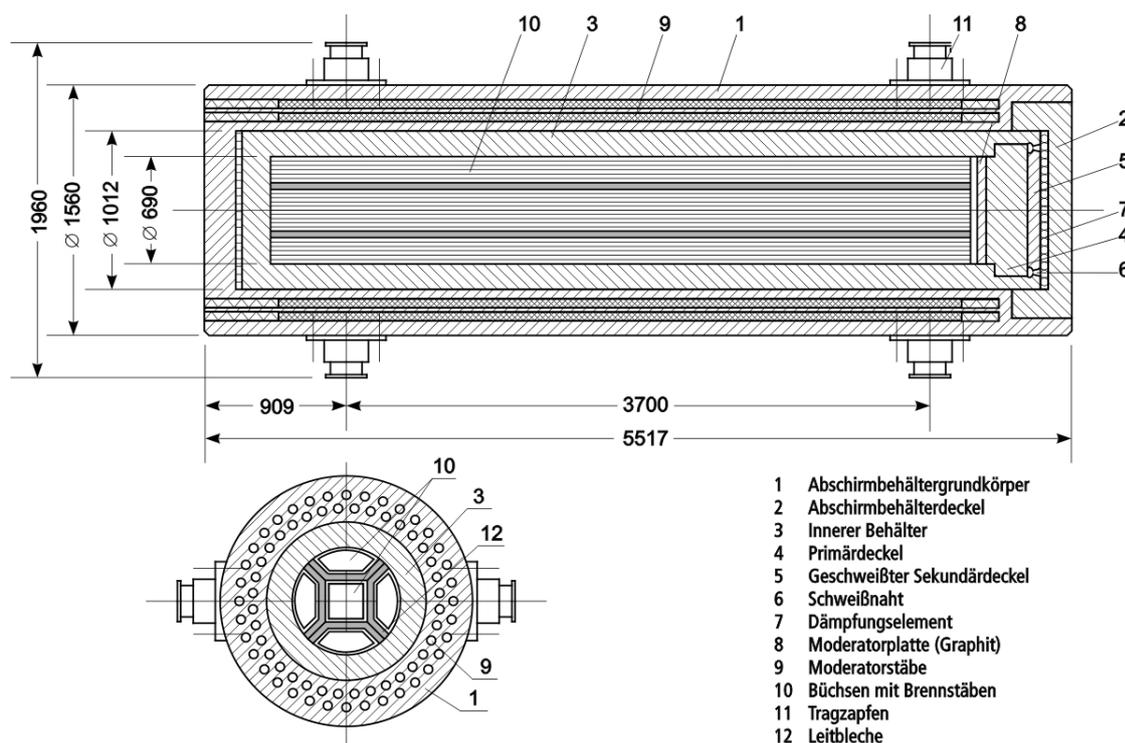


Abbildung 5-13: POLLUX-Behälter /5-16/

Brennstabkokille

Die Brennstabkokille BSK wurde für die alternative Bohrlochlagerung von ausgedienten Brennelementen entworfen /5-16/. Sie kann 3 DWR-BE, 9 SWR-BE oder 7,5 WWER-BE aufnehmen. Die Länge beträgt 4,98 m, der Durchmesser 0,44 m (oben) bzw. 0,43 m (unten) und die Wandstärke 40 mm. Der Behälter wird durch ein Doppeldeckeldichtsystem verschlossen, wobei der Primärdeckel verschraubt und der Sekundärdeckel verschweißt wird. Zur Handhabung weist der Sekundärdeckel einen Tragpilz auf. Der Boden wird angepresst oder angeschweißt. Im Inneren des Behälters befinden sich zwei Büchsen zur Aufnahme der Brennstäbe. Der Behälter besteht einschließlich der Deckel und des Bodens aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210), die Innenbüchsen bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4541). An der Unterseite des Primärdeckels befindet sich eine Moderatorplatte aus Polyethylen zur Neutronenabschirmung. Das Leergewicht der Kokille beträgt 2,9 t.

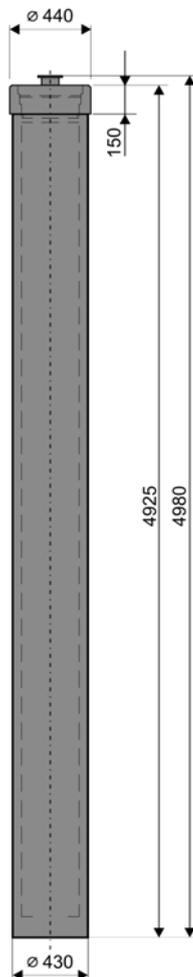


Abbildung 5-14: Brennstabkokille (BSK) /5-16/

Da die Brennstabkokille den gleichen Durchmesser wie die HAW-Kokille bzw. die CSD-B und CSD-C-Kokillen hat, kann Sie mit identischen Hebezeugen gehandhabt und in gleichkalibrige Bohrlocher eingelagert werden. Der Transport der nicht abgeschirmten Kokille erfolgt

in einem abgeschirmten Transferbehälter, der bezüglich der mechanischen Stabilität die Anforderungen des Verkehrsrechts erfüllt.

HAW-Kokille und CSD-B bzw. CSD-C-Kokillen

Die beim Wiederaufarbeitungsprozess entstehenden Spaltproduktlösungen werden aufkonzentriert und in einem keramischen Schmelzer mit Glasritze zu einem Borosilikatglasprodukt verarbeitet /5-16/. Es werden ca. 150 Liter flüssige Glasschmelze in die zylindrische HAW-Kokille mit einer Länge von 1,34 m, einem Durchmesser von 0,43 m und einer Wandstärke von 5 mm gefüllt (Abbildung 5-15). Boden und Deckel werden mit dem Behälterkörper verschweißt. Der Behälter besteht aus Edelstahl Z15CN24.13 (Werkstoff 1.4833). Zur Handhabung des Behälters weist der Deckel einen Traggilz auf. Das Leergewicht der Kokille beträgt 80 kg.

Die radioaktiven Reststoffe aus der Betriebsabwasseraufbereitung in Le Hague werden eingedampft und die Konzentrate in Borosilikatglas in einer CSD-B-Kokille eingeschlossen (Abbildung 5-15). Die Abmessungen und das Material entsprechen denen der HAW-Kokille.

Die Brennelementhülsen und Technologieabfälle aus der Wiederaufarbeitung werden zu Presslingen kompaktiert und in CSD-C-Kokillen gefüllt. Diese Edelstahlbehälter entsprechen hinsichtlich des Materials und weitgehend hinsichtlich des Designs den HAW- und CSD-B-Kokillen (Abbildung 5-15).

Es ist vorgesehen, für die Bohrlochlagerung je 3 Kokillen in Edelstahlhüllen einzuschließen, die in ihren Abmessungen der Brennstabkokille (s. o.) entsprechen (Triple-Pack). Der Transport der nicht abgeschirmten Kokillen erfolgt in einem abgeschirmten Transferbehälter, der bezüglich der mechanischen Stabilität die Anforderungen des Verkehrsrechts erfüllt.

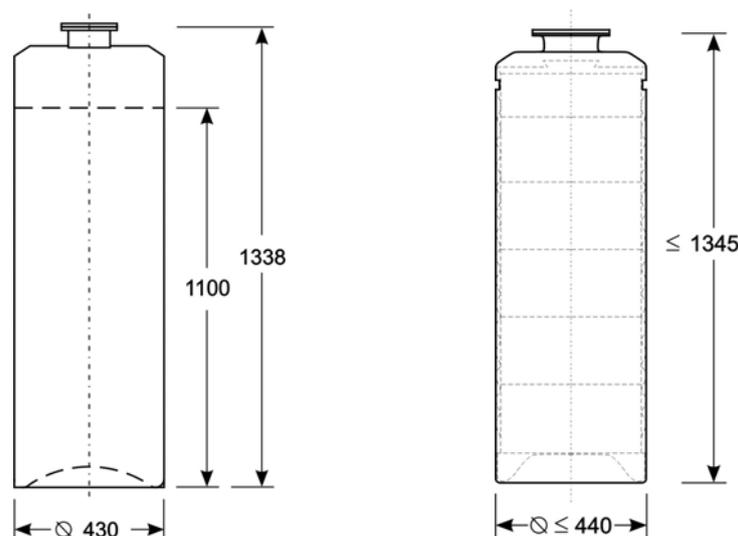


Abbildung 5-15: HAW- und CSD-B Kokille (links) und CSD-C-Kokille (rechts) /5-16/

5.3.3 Nachweis der Funktionalität

Von allen Endlagerbehältern wurden Prototypen anfertigt, so dass die Herstellungsverfahren erprobt wurden.

Für den Endlagerbetrieb wurde die Einhaltung der betrieblichen Anforderungen durch Demonstrationsversuche im Maßstab 1 : 1 für den POLLUX-Behälter Ende der Neunziger Jahre geführt, entsprechende Versuche für die Brennstabkokille laufen derzeit /5-16/.

Der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen für die Nachbetriebsphase basiert auf Laboruntersuchungen und Modellrechnungen. Weiterhin wurde mit dem POLLUX-Behälter ein Erhitzerversuch im Bergwerk Asse durchgeführt, der Aussagen zum Behälterverhalten unter endlagerspezifischen Bedingungen erlaubt /5-16/.

Alle verwendeten Behältermaterialien entsprechen EN-Normen und weisen daher ein definiertes und durch umfangreiche Erfahrungen im Stahlbau bekanntes Verformungs- und Korrosionsverhalten auf. Da die Verformbarkeit der Stahlsorten auch für die vorgesehenen Wandstärken spezifiziert sind, kann belegt werden, dass die mechanischen Anforderungen an die Behälter durch die vorgesehene Auslegung abgedeckt werden. Zudem liegen vom POLLUX-Behälter Erfahrungen von dem In-situ-Versuch vor. Die Einhaltung der Dichtheitsanforderungen wurde durch Druckversuche an kompletten Endlagerbehältern und Modellrechnungen belegt und bestätigt. Die Aussagen zur Einhaltung des Temperaturgrenzwertes und zur Temperaturabfuhr stützen sich vor allem auf Modellrechnungen, die mit Hilfe des In-situ-Versuches auf der Asse verifiziert wurden.

Während die endlagerspezifischen Funktionalitätsnachweise für den POLLUX-Behälter, die HAW-Kokille sowie die CSD-B und CSD-C-Kokillen bereits durchgeführt wurden, sind die entsprechenden Untersuchungen an der Brennstabkokille noch nicht abgeschlossen.

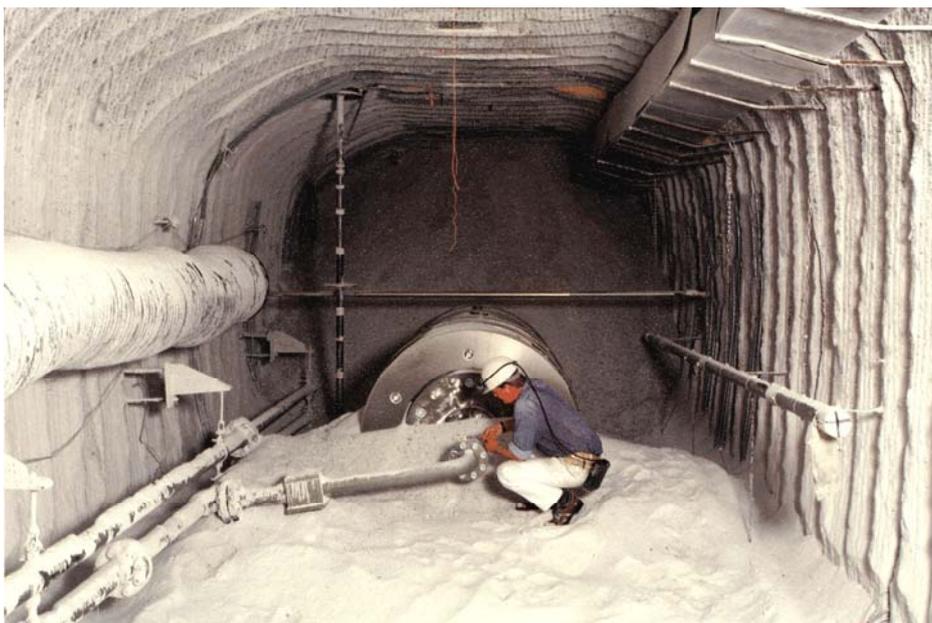


Abbildung 5-16: Erhitzerversuch an POLLUX-Behältern im Bergwerk Asse

5.4 Verfüllen und Verschluss von Einlagerungsbereichen

Entsprechend dem Verfüll- und Verschlusskonzept (Kap. 5.2) ist eine Hohlraumverfüllung der Einlagerungsstrecken zur Streckenlagerung, der Einlagerungsbohrlöcher sowie die Strecken oberhalb der Einlagerungsbohrlöcher und der Verbindungsstrecken mit Salzgrus vorgesehen. Die Einlagerungsbohrlöcher werden zusätzlich durch einen Verschluss abgedichtet.

5.4.1 Verfüllen von Einlagerungsstrecken

5.4.1.1 Anforderungen

Die generellen Anforderungen an die Verfüllung der Einlagerungsstrecken umfassen:

- die mechanische Stabilisierung des Salzgebirges,
- die Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen,
- die Reduzierung des potentiellen Aufnahmevolumentens für Fluide (im Störfall), und
- die Minimierung der radiologischen Belastung des Personals in der Betriebsphase.

Entsprechend der sich ändernden Umweltbedingungen und der Versatzeigenschaften bestehen unterschiedliche Anforderungen während verschiedener Phasen der Nachbetriebsphase. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Wärmefreisetzung des radioaktiven Abfälle während der ersten 10.000 Jahre. In den folgenden 50.000 Jahren findet der Temperaturausgleich mit dem Gebirge statt und die Versatzkompaktion wird abgeschlossen. Durch die Auslegung der Behälter und des Grubengebäudes wird vermieden, dass während der thermischen Phase eine Temperatur von 200°C überschritten wird, die zu einer Freisetzung von Kristallwasser führen könnte. Der genaue Zeitraum, ab dem der Versatz aufgrund der fortgeschrittenen Kompaktion Barrierenfunktion übernimmt, lässt sich mit dem momentanen Kenntnisstand nicht festlegen.

Spezielle Anforderungen an den Versatz ergeben sich durch die zu berücksichtigenden Prozesse und die daraus resultierende Materialbeanspruchung. Wichtige Einflussfaktoren sind die Gebirgskonvergenz, der radioaktive Zerfall des eingelagerten Abfalls sowie Lösungen und Gasen im Grubengebäude bzw. dem angrenzenden Gebirge. Zwischen diesen und weiteren Prozessen bestehen Wechselwirkungen, da z. B. die Gebirgskonvergenz durch das Temperaturfeld, Lösungen und Gase, das materialspezifische Verhalten des Versatzes, den Grundspannungszustand des Gebirges und der Lage benachbarter Abbaue beeinflusst wird.

Bei ungestörter Entwicklung des Endlagers sind die Konvergenzrate, der Stützdruck, die Temperatur, in geringem Umfang die Feuchtigkeit, Beanspruchung aus dem Siloeffekt sowie die Radiolyse als Einwirkungen auf den Versatz zu betrachten. Bei der gestörten Entwicklung können sich zusätzliche Einwirkungen aus Feuchtigkeit, ggf. einem gefluteten Zustand, dem Porendruck aus Gas oder/und Fluid, der Durchströmung mit Gas oder/und Fluid sowie

chemische Umwandlungen ergeben. Daraus lassen sich Anforderungen ableiten, die bezüglich der mechanische Stabilisierung der geologischen Barriere bestehen, der Ableitung der Zerfallswärme, des Strahlenschutzes, der Unterkritikalität, eines verfügbaren Volumens zur Gasspeicherung, des Explosionsschutzes, der Verringerung des potentiellen Aufnahmevermögens für Fluide und der Dichtheit gegenüber Fluiden, sei es aus dem Wirtsgestein oder den Fließwegen der vorhandenen Auffahrungen. Nicht alle funktionalen Anforderungen sind hinreichend konkretisierbar, z. B. wenn nur ein mittelbarer Zusammenhang zum Schutzziel besteht. So ist nicht die Temperatur Bestandteil der Sicherheitsanalyse sondern ihre Auswirkung auf die Materialeigenschaften.

Die weiteren Anforderungen lassen sich nicht quantifizieren. So ist z. B. die Abschätzung des erforderlichen Gasspeichervolumens (H_2 -Produktion durch die Korrosion der Endlagerbehälter) und ihre zeitliche Eingrenzung bei einer gestörten Entwicklung des Endlagers noch nicht erfolgt. Daher ist im Umkehrschluss auch noch unklar, ob der Versatz zum Ereigniszeitpunkt noch das erforderliche Porenspeichervolumen besitzt oder ob dieser durch eine Konzeptänderung geschaffen werden muss.

5.4.1.2 Verfüllmaterialien

Entsprechend dem Verfüll- und Verschlusskonzept (Kap. 5.2) wird Salzgrus als Versatz für den Einlagerungsbereich und die Zugangs- und Verbindungsstrecken angesetzt /5-10/. Es ist ein wirtsgesteinseigenes Material (im Einlagerungsbereich: Hauptsalz), welches aus dem aufgefahrenen Haufwerk gewonnen wird /5-4/. Der maximale Korndurchmesser beträgt ca. 100 mm. Bei der Einbringung findet meist eine Entmischung der Versatzfraktionen statt, wobei im unteren Streckenteil tendenziell Körnungen mit einem höheren Grobanteil vorlagen als im oberen Streckenteil. Das Kompaktionsverhalten wird aufgrund der Ausbildung von Stützlinsen durch den Grobkornanteil bestimmt, das hydraulische Verhalten mehr durch den Feinkornanteil. Versuche haben gezeigt, dass der Versatz bei Einsatz der vorhandenen Einbringtechniken eine Anfangsporosität von ca. 35 % aufweist. Die Kompaktion des Salzgrus bzw. die Entwicklung eines Stützdrucks an der Hohlraumkontur stellt sich abhängig von der Konvergenzrate an der Hohlraumkontur, der Temperatur und der Feuchte über der Zeit ein. Ein momentaner Forschungsschwerpunkt besteht darin, das Verhalten von Steinsalz unter dem Einfluss seiner Schädigung und möglichen Verheilung zu untersuchen /5-17/. Dieses Verhalten kann als Annäherung an das Materialverhalten von Salzgrus im Bereich sehr kleiner Restporositäten gesehen werden. Der Nachweis der Zulässigkeit einer Übertragung des Verhaltens von Steinsalzformationen auf das des Salzgrus ist noch nicht erbracht worden.

5.4.1.3 Technisches Konzept zur Verfüllung

Das Einlagerungskonzept für die Streckenlagerung sieht vor, dass unmittelbar nach Abschluss der Auffahrung der Einlagerungsstrecken mit der Einlagerung von POLLUX-Behältern begonnen wird /5-4/. Nach Einlagerung des einzelnen POLLUX-Behälters wird der verbleibende Resthohlraum um diesen Behälter mit Salzgrus verfüllt. Der Abstand Behälter innerhalb einer Strecke beträgt je nach Inventar und Zwischenlagerzeit mehrere Meter. Nach

Einlagerung des letzten Behälters wird die jeweilige Strecke vollständig mit Salzgrus verfüllt. Durch In-situ-Versuche wurde die Einbringung des Versatz als im Schleuderverfahren und im Blasverfahren erprobt /5-4/.

Beim Vergleich zwischen beiden Einbringverfahren werden die Salzkörner beim Blasverfahren im stärkeren Umfang zertrümmert, so dass damit der Feinkornanteil steigt /5-18/, /5-19/. Bei beiden Verfahren kommt es über der Streckenhöhe zu einer Entmischung der verschiedenen Salzfraktionen, was sich in der Kornverteilung widerspiegelt. Insbesondere im Sohl- und im Firstbereich der Strecke weist das Blasverfahren eine geringere Einbaudichte bzw. eine größere Bandbreite in der Einbaudichte auf als das Schleuderverfahren.

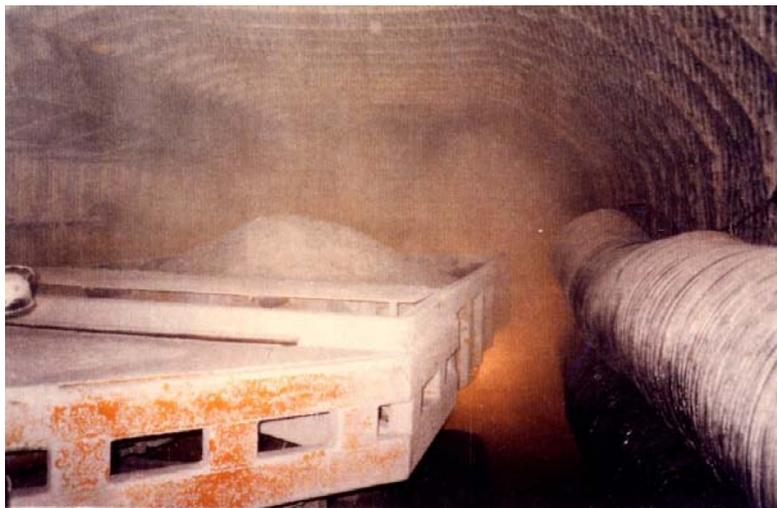


Abbildung 5-17: In-situ-Versuch zur Einbringung von Salzgrus mit einem Schleudertruck

5.4.1.4 Nachweis der Funktionalität

Da der gesetzlich geforderte Nachweiszeitraum 1 Mio. Jahre beträgt, muss der Funktionalitätsnachweis durch Modellrechnungen geführt werden, die durch In-situ-Versuche validiert und verifiziert werden müssen. Voraussetzung für eine hohe Prognosegenauigkeit sind Modelle, welche die wesentlichen Effekte abdecken und die ein robustes Verhalten aufweisen. Um die Übertragbarkeit zwischen Berechnung und Ausführung zu gewährleisten, muss bei der Bauausführung die Verwendung eines einheitlichen Material sichergestellt werden, welches mit in Grenzen vorgegebenem Feuchtegehalt und mit einer mittleren Einbringdichte konturbündig eingebaut wird. Zum Nachweis der Konturbündigkeit genügt im Fall der Streckenlagerung der Nachweis der Firstbündigkeit und der Bündigkeit im Bereich der Firstwölbung.

Die Validierung und Verifizierung des rechnergestützten Nachweises stützt sich z. Z. im Wesentlichen auf die Erhitzerversuche zur Streckenlagerung im Bergwerk Asse (BAMBUS-Projekt) /5-18/, /5-19/. Die hier über einen Zeitraum von 8,5 Jahren durchgeführten Untersuchungen zielten auf die Beschreibung des Versatzverhaltens ab. In einem nur leicht erwärmten Bereich in einer Entfernung von ca. 12 m zum letzten Behälter wurde über den Versuchszeitraum nur eine geringe Porositätsabnahme des Versatzes auf 25-35 % und ein

Versatzdruck unter 0,5 MPa beobachtet. Im heißen, behälternahen Bereich wurde nach Abschluss der Versuchsdauer eine Porosität zwischen 15 und 30 % sowie ein Versatzdruck von 1,5 bis 4 MPa beobachtet. Die Messungen ergaben, dass Wasser freigesetzt und transportiert wurde.

Die Versuche decken im Wesentlichen den Porositätsbereich zwischen der Einbauporosität und einer Porosität von ca. 0,1 im relevanten Temperaturbereich und für labortrockenes Material ab. Insgesamt entsprach die thermische Belastung weitgehend dem bei der Streckenlagerung anzutreffenden Verhalten, allerdings lagen die Belastungsgeschwindigkeiten im Versuch teilweise um mehrere Größenordnungen über den im Endlager relevanten Geschwindigkeiten.

Bei der Übertragung der Versuchsergebnisse in die Rechenmodelle zeigte sich /5-19/, dass

- das Kompaktionsverhalten des Salzgrus in heißen und kalten Streckenabschnitten nicht mit der gleichen Prognosegüte bestimmt werden konnte,
- das Kompaktionsverhalten i. a. überschätzt wurde, und
- Abweichungen in der Geschwindigkeit der Porositätsentwicklung zum Endzeitpunkt bestehen.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Kompaktionsprognose für die ungestörte Entwicklung eines Endlagers mit bergtrockenem Versatz im Rahmen eines Standsicherheitsnachweises mit den vorhandenen Stoffmodellen möglich ist.

Die Frage des Feuchtigkeitseinflusses ist sowohl für die ungestörte wie für die gestörte Entwicklung des Endlagers offen. Aus anderen Versuchen ist bekannt, dass Feuchtigkeit einen signifikanten Einfluss auf den Versatzdruck hat /5-10/.

Der vollständige Einschluss der Endlagerbehälter wurde im vergleichsweise kurzen Versuchszeitraum (8,5 Jahre) des genannten Versuchs nicht erreicht. Im Bereich des geschädigten Steinsalzes ist der Übergangsbereich vom dilatanten Steinsalz zur Verheilung ein Gebiet der momentanen Forschung /5-17/. Die gleiche Fragestellung ergibt sich bei geringen Porositäten beim Übergang des Salzgrusversatz zum Steinsalz.

5.4.2 Verschluss von Einlagerungsbohrlöchern

5.4.2.1 Anforderungen

Als das abschließende Element einer jeder Einlagerungsbohrung kommt dem Bohrlochverschluss die Funktion einer radiologischen Abschirmung in der Betriebsphase zu /5-16/. Weiterhin sollte während der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase eine hinreichend hohe Gaspermeabilität vorhanden sein, damit bei der Behälterkorrosion entstehende Gase entweichen können. Außerdem muss der Verschluss gegenüber dem Wärmeintrag, der durch die Abfallgebände vor allem während der ersten 10.000-50.000 Jahre produziert wird, me-

chanisch und chemisch beständig sein. Wie bei den Einlagerungsstrecken soll in den Einlagerungsbohrlöchern die maximale Temperatur am Kontakt Behälter-Verfüll-/Verschlussmaterial auf 200°C beschränkt bleiben.

Langfristig sollen die Bohrlochverschlüsse gemeinsam mit der Verfüllung im Ringspalt der Bohrlöcher den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe gewährleisten, so dass in der Nachbetriebsphase keine Fluide zu den Abfällen gelangen und auch nicht herausgepresst werden können /5-16/. Die Dichtheit gegen Lösungszutritt muss spätestens zum Ende der planmäßigen Lebensdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse erreicht werden und bis zum Ende des Betrachtungszeitraums erhalten bleiben. Dafür muss der Verschluss durch das auflaufende Gebirge zügig kompaktieren, um die erforderliche Lösungsdichtheit (Permeabilität $< 10^{-15} \text{ m}^2$) während der Nachbetriebsphase rasch zu erreichen, und weiterhin gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck mechanisch stabil sein. Im Fall einer gestörten Entwicklung des Endlagers können auf den Bohrlochverschluss von innen oder außen Lösungsdrucke von bis zu 20 MPa einwirken /5-10/. Bezüglich der Gasentwicklung muss der Verschluss entweder gegen den auftretenden Gasdruck (je nach Gebinde 3-20 MPa) oder für die Zeit der Gasentwicklung gasdurchlässig ausgelegt werden.

5.4.2.2 Verschlussmaterial und -design

Entsprechend dem Verfüll- und Verschlusskonzept (Kap. 5.2) ist Salzgrus als Versatz für den Ringspalt zwischen Bohrlochwand und Behälter sowie als Bohrlochverschluss oberhalb des zuletzt eingelagerten Behälters vorgesehen /5-16/. Der Salzgrus ist ein wirtsgesteinseigenes Material (im Einlagerungsbereich: Hauptsalz), welches aus dem aufgefahrenen Haufwerk gewonnen wird /5-4/. Entsprechend dem Ringspalt von 85 mm beträgt der maximale Korndurchmesser ca. 8 mm. Im Rahmen des z. Z. laufenden Forschungsprojektes REPOPERM wird die Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung des kompaktierenden Salzgrus in Bohrlochern untersucht.

Das Referenzkonzept zum Bohrlochverschluss sieht vor, dass das Bohrloch zum Ende der Nutzungsphase oberhalb der zuletzt eingelagerten Kokille über eine Länge von ca. 6 m mit Salzgrus verfüllt wird. Das Einbringen kann mittels Einlagerungsvorrichtung/Sondergefäß durch die Bohrlochschleuse hindurch erfolgen. Diese Technologie ist jedoch noch nicht erprobt.

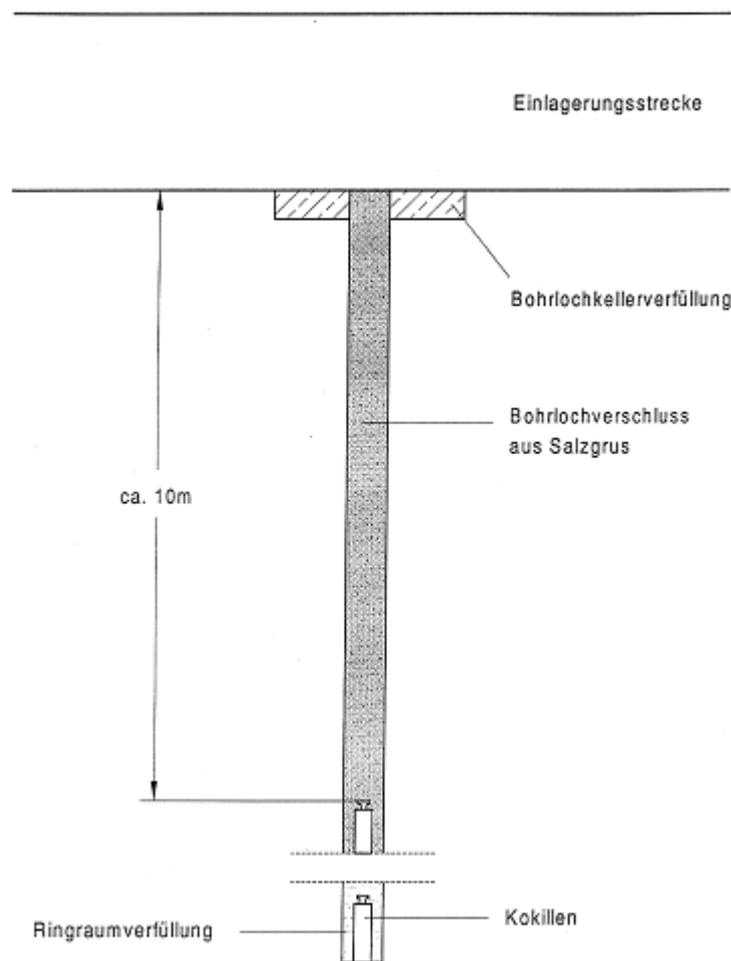


Abbildung 5-18: Verfüll- und Verschlusskonzept für ein Einlagerungsbohrloch

Grundlage des Konzeptes ist die Überlegung, dass der eingebrachte Salzgrus durch das auflaufende Gebirge kompaktiert wird und mittel- bis langfristig die Eigenschaften von Steinsalz annehmen wird. Aufgrund der geringen Permeabilität wäre dann bei gleichzeitiger Verheilung der Auflockerungszone der sichere Einschluss der Abfälle gewährleistet.

Wie Modellrechnungen für die Einlagerung von HAW-Kokillen gezeigt haben, wird durch eine 6 m mächtige Salzschiebt die Direktstrahlung im erforderlichen Umfang abgeschirmt. Ein entsprechender Nachweis wurde für die BSK 3 noch nicht geführt.

In welchem Umfang und in welchem Zeitraum der Salzgrus hinreichend kompaktiert wird, um einen ausreichenden hydraulischen Widerstand zu gewährleisten, kann bis jetzt nicht abschließend beurteilt werden. Im Rahmen des DEBORA Projektes reduzierte sich die Anfangsporosität von 36-38 % unter dem Einfluss von Gebirgsdruck und Temperatur im Laufe von 1 bzw. 1,2 Jahren auf 6-12 %. Die weitere Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung und die Eignung der vorhandenen Stoffmodelle zur modellmäßigen Abbildung und Prognose dieser Entwicklung muss noch untersucht werden. Somit ist auch eine abschließende Bewertung der Eignung des Verschlusskonzeptes momentan noch nicht möglich.

Eine mögliche Design-Änderung ist die Verwendung von Steinsalz-Formstücken die passgenau das Bohrloch verschließen, ggf. in Kombination mit zuvor eingebrachtem Salzgrus bzw. Salzgrus im Ringspalt. Hiermit könnte ein Einschluss der Abfälle schneller als mit der bisherigen Verschlussvariante erreicht werden. Durch Salzgrus im Ringspalt könnte eine für den Beginn der Nachbetriebsphase ausreichende Gasdurchlässigkeit erzielt werden.

5.4.2.3 Technisches Konzept

Die Verfüllung und der Verschluss des Bohrlochs wird im Endlagerbetrieb unmittelbar nach Einlagerung der letzten Kokille im Bohrloch erfolgen. Das Einbringen des Salzgrus kann mittels Einlagerungsvorrichtung oder Sondergefäß durch die Bohrlochschleuse hindurch durchgeführt werden /5-16/. Diese Technologie ist jedoch noch nicht erprobt. Auch für das alternative Verschlusskonzept mit Steinsalz-Formstücken ist die Einbringtechnik noch nicht erprobt.

Der Bohrlochkeller, der sich oberhalb der Einlagerungsbohrung und damit auch oberhalb des Bohrlochverschlusses befindet, wird abschließend mit Salzbeton oder einem anderen im Salzbergbau erprobten Baustoff verfüllt. Der Zeitpunkt der Verfüllung des Bohrlochkellers hängt davon ab, ob eine Zugänglichkeit des Bohrlochverschlusses während der gesamten Endlagerbetriebszeit zu gewährleisten ist. Eine derartige Anforderung bestimmt auch, wann die Einlagerungsstrecke oberhalb der Einlagerungsbohrlöcher mit Salzgrus verfüllt wird.

5.4.2.4 Nachweis der Funktionalität

Der Nachweis der ausreichenden Abschirmwirkung des Bohrlochverschlusses wird auf der Grundlage der Dosisleistung der eingelagerten Kokillen und der Halbwertsdicke von Salzgrus rechnerisch geführt.

Das Nachweiskonzept für geotechnische Barrieren gliedert sich in den Nachweis der aus der Langzeitsicherheitsanalyse vorgegebenen Anforderungen und den Nachweis der Bauwerksintegrität /5-9/, /5-10/. Dabei wird zur Bewertung des hydraulischen Widerstands der Dichtkörper, die Kontaktzone und die Auflockerungszone betrachtet. Der Nachweis der Bauwerksintegrität umfasst den Nachweis der Rissbeschränkung, der in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit einschließt. Weiterhin ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit bzw. der Langzeitstabilität zu führen.

Die Anwendung dieses Nachweiskonzepts auf den Bohrlochverschluss erfordert den Nachweis, dass – unter Berücksichtigung der Umwelteinwirkungen – durch die Salzgrus-Kompaktion eine hinreichend geringe Porosität und Permeabilität im Bereich des Bohrlochverschlusses erreicht wird. Wenn dieser Nachweis geführt ist, könnte für die drei Verschlussbereiche – Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone – eine Bewertung des hydraulischen Widerstands erfolgen. Allerdings ist es bisher nicht gelungen, den Nachweis einer ausreichenden Salzgruskompaktion zu führen /5-10/. Insbesondere für das Verhalten bei kleinen Porositäten und Permeabilitäten ist eine Prognose des Kompaktions-

verhaltens mit großen Unsicherheiten verbunden. Bezüglich der Verheilung der Auflocke-
rungszone besteht ebenfalls noch Forschungsbedarf.

Wichtige Grundlagen für den Funktionalitätsnachweis haben die Ergebnisse der Versuche zur Bohrlochlagerung im Rahmen des DEBORA-Projektes geliefert /5-18/, /5-20/. So konnte während der zwölf- bzw. vierzehnmonatigen Versuchsdauer in den Bohrlöchern eine Salzgruskompaktion von einer Einbauporosität von ca. 37 % auf 6 bis 12 % nachgewiesen werden. Der Versatzdruck erreichte am Ende des Versuchs in etwa das Niveau der Gebirgsspannung. Das im Versuch beobachtete thermomechanische Verhalten des Salzgrus konnte durch Rechenmodelle mit den vorhandenen Stoffgesetzen prinzipiell abgebildet werden /5-20/. Es zeigte sich aber auch, dass die Temperatur überschätzt wurde, Abweichungen in der Porositätsentwicklung auftraten und die Porositätsentwicklung im Bereich vollständiger Kompaktion weiterhin ungeklärt ist.

Zusammenfassend konnte durch das DEBORA-Projekt gezeigt werden, dass die Prognose für die ungestörte Entwicklung des Endlagers mit bergtrockenem Versatz im Rahmen eines Standsicherheitsnachweises mit den vorhandenen Stoffmodellen möglich ist. Die Auswirkungen des Feuchtigkeitseinflusses sind sowohl für die ungestörte wie für die gestörte Entwicklung des Endlagers zur teilweise bekannt. In Versuchen wurden beobachtet, dass Feuchtigkeit vor allem auf den Versatzdruck einen signifikanten Einfluss hat.

5.5 Streckenverschlüsse

Streckenverschlüsse stellen ein redundantes Dichtelement zu den Schachtverschlüssen dar. Ihre Aufgabe ist es, die Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers an noch festzulegenden Positionen abzudichten.

5.5.1 Anforderungen

Während der Betriebsphase bestehen an Streckenverschlüsse vor allem betriebliche Anforderungen hinsichtlich der Errichtung. Entscheidend ist eine anforderungsgerechte Errichtung im Rückbau entsprechend den langzeitsicherheitlichen Vorgaben. Hierfür ist ein qualitätsgesichertes Errichtungsverfahren anzuwenden. Es muss sichergestellt sein, dass die Dichtfunktion bereits zu Beginn der Nachbetriebsphase gewährleistet ist.

Für die Nachbetriebsphase ergeben sich die Anforderungen aus der erforderlichen Dichtfunktion der Endlagerdammbauwerke.

- standsicher gegen Gebirgsdruck
- standsicher bei möglichen Störfallszenarien
- technisch dicht gegenüber Fluiden
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien gegenüber korrosiven Lösungen und Gasen

- langfristig sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit
- thermische Stabilität der verwendeten Baumaterialien

Die genannten Anforderungen resultieren aus der Notwendigkeit der Einhaltung radiologischer und konventioneller Schutzziele.

Die erforderliche Standzeit für die Streckenverschlüsse konnte noch nicht festgelegt werden, da diese sich daraus ergibt, zu welchem Zeitpunkt die Kompaktion des Salzgrusversatzes so weit fortgeschritten ist, dass er den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleistet /5-10/. Wie oben bereits dargelegt, ist die Entwicklung der Salzkompaktion noch nicht abschließend geklärt. Die Standzeiten der Streckenverschlüsse werden aber für Einlagerungsbereiche mit Bohrloch- und Streckenlagerung verschieden sein, da für Einlagerungsbohrlöcher von einer schnelleren Versatzkompaktion und einem früheren Zeitpunkt des sicheren Einschlusses ausgegangen werden kann. Generell ist davon auszugehen, dass die Versatzkompaktion spätestens mit Abklingen der Wärmentwicklung der eingelagerten Abfälle, d. h. nach 10.000 bis 50.000 Jahren, abgeschlossen ist und dass daher aus dem anschließenden Nachweiszeitraum keine Anforderungen an die Streckenverschlüsse mehr resultieren. Eventuell aus dem Deckgebirge durch die Schächte eindringende Wässer werden sich in dem mit Salzgrus verfüllten Infrastrukturbereich aufsättigen, so dass diese Lösungen durch Ablaugung nicht mehr zu den zu diesem Zeitpunkt sicher eingeschlossenen Abfällen vordringen können.

Durch die Auslegung der Streckenverschlüsse ist sicherzustellen, dass im Falle einer gestörten Endlagerentwicklung mit einem Laugenzutritt zu den Abfällen die Volumenströme an kontaminierter Lauge durch die hydraulischen Widerstände der Strecken- und Schachtverschlüsse derart minimiert werden, dass die radiologischen Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden.

Der maximale Fluiddruck, der von den Schächten aus auf die Streckenverschlüsse einwirken kann, entspricht dem hydrostatischen Laugendruck. Als maximaler endlagerseitiger Druck – in Richtung des Schachtes – auf den Streckenverschluss ist ein Fluiddruck bis maximal zur Größe des petrostatischen Druckes infolge auflaufender Konvergenz möglich.

Die Streckenverschlüsse sind außerdem tragsicher gegenüber dem anstehenden Gebirgsdruck auszulegen. Dieser ergibt sich aus dem petrostatischen Teufendruck unter Berücksichtigung von möglichen Spannungsumlagerungen .

Die genannten Anforderungen an Streckenverschlüsse wurden für den Referenzstandort in ca. 870 m Teufe folgendermaßen spezifiziert:

- Gebirgsdruck in 870 m Teufe 19 MPa (= petrostatischer Druck), wobei infolge des steifen Einschlusses eine temporär höhere Belastung auftreten kann.
- Maximale Fluiddrücke schachtseitig entsprechend dem hydrostatischen Druck: 11 MPa. Da es sich in der Betriebsphase um ein offenes System handelt, ist ein schneller Druckaufbau möglich.

- Maximaler Fluiddruck endlagerseitig entsprechend dem petrostatischen Druck: 19 MPa
Da es sich in der Nachbetriebsphase um ein geschlossenes System handelt, findet ein langsamer Druckaufbau statt.
- Erwartete Temperaturentwicklung an den Barrierenstandorten entsprechend dem vorgesehenen Abfallinventar: 20 Jahre: 46°C, 50 Jahre: 56°C, 100 Jahre: 67°C, 200 Jahre: 76°C, 500 Jahre: 83°C und 1000 Jahre: 81°C.

5.5.2 Verschlussmaterialien und -design

Ein detailliertes Referenzkonzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager liegt momentan nicht vor.

Es existieren verschiedene Konzepte und Planungen zu Streckenverschlüssen für Endlager für ausgediente Brennelemente und hoch radioaktive Abfälle (HAW) sowie für Endlagern für schwach- bis mittlerradioaktive Abfälle im Salz /5-10/. Außerdem wurden im Kali- bzw. Steinsalzbergbau unterschiedliche Versuchsdämme sowie Dammbauwerken zum Abwerfen von Feldesteilen und/oder infolge von Laugeneinbrüchen errichtet (Tabelle 5-2, /5-21/). Den genannten Dammbauwerken des Kali- bzw. Steinsalzbergbaus ist gemein, dass alle dichten Dammbauwerke im Steinsalz liegen (Vermeidung von Umlösevorgängen), nur sehr lange Dämme von Anfang an dicht waren (Reduzierung des Einflusses lokaler Umläufigkeiten und hydraulischer Gradienten) sowie die Dichtheit aller kürzeren Dämme nachträglich durch Injektionen erzeugt wurde, wobei der Injektionsdruck der injizierten Suspension ungefähr den Teufendruck erreichte (Schließen von Rissen, Erfüllung des Fluidkriteriums).

Weitere Grundregeln für das Errichten von Streckenverschlüssen im Salz sind /5-22/:

- Standortwahl im geringdurchlässigen Gebirge wobei geologische Inhomogenitäten zu beachten sind.
- Bemessung der Dichtelemente nach der Gebirgsdurchlässigkeit im konturnahen Bereich. Bei bekannter Gebirgspermeabilität können anhand des maximal zulässigen Volumensstroms Aussagen zur erforderlichen Länge und Permeabilität des Dichtelementes getroffen werden. Falls die Permeabilität des anstehenden Gebirges dies nicht zulässt, sind Maßnahmen zur Gebirgsvergütung bzw. Abdichtung vorzusehen. Auf geomechanisch bedingte höhere Gebirgspermeabilitäten in Sohle und Firste sowie deren zeitliche Entwicklung ist zu achten.
- Berücksichtigung der geochemischen Randbedingungen, insbes. der Zusammensetzung der im Gebirge zuzitenden Lösung hinsichtlich der Korrosion verwendeter Baustoffe.
- Gebirgsschonender Nachschnitt der Gebirgskontur; für bestimmte Konzepte wird zusätzlich ein glatter Nachschnitt erforderlich (z. B. Einbau von Bentonitformsteinen).
- Trennung von Dichtelement und statischem Widerlager (wenn möglich),

- Redundante und diversitäre Auslegung der Dichtelemente und wenn möglich auch der statischen Widerlager. Ggf. können Dichtelemente auch statische Funktion übernehmen und umgekehrt.

Die bisher entwickelten Barrierenkonzepte beinhalten häufig eine Trennung der Bauteile hinsichtlich abdichtender (Dichtelement) und stützender/tragende Funktion (Widerlager) (Abbildung 5-7). Jedoch unterscheiden sie sich z. T. deutlich in der Anordnung dieser Elemente sowie den hierfür zum Einsatz kommenden Materialien (Tabelle 5-2). Als Baumaterialien für Widerlager und Dichtelemente werden verschiedene Arten von Salzbeton eingesetzt, die im Hinblick auf die Langzeitbeständigkeit in ihrer Zusammensetzung an die jeweils aufgeschlossenen Salzgesteine angepasst werden können. Daneben kommt in einigen Fällen auch Portlandzement zum Einsatz. Für Dichtelemente wird auch Bentonit oder Asphalt verwendet.

Für alle bislang errichteten Barrieren gilt, dass die standortspezifischen Druckbelastungen niedriger waren als die Druckbelastungen, die für den Referenzstandort des Endlagers geforderten maximalen Druckbelastungen. Wichtig ist, dass die Erfahrungen gezeigt haben, dass auch bei einem Lösungszutritt eine sofortige hydraulische Wirksamkeit bei geeigneter Auslegung erreicht werden kann (vgl. Damm Rocanville). Andererseits ist ebenso offensichtlich, dass eine Extrapolation der Aussagen zur Funktionstüchtigkeit auf den geforderten Nachweiszeitraum allein anhand der Beobachtungen von wenigen bis einigen Jahrzehnten nicht zulässig ist.

Im Rahmen der Aktualisierung des Konzeptes für ein Endlager in Gorleben wurde das folgende Konzept für Streckenverschlüsse in einem HAW-Endlager entwickelt /5-4/:

Die Streckenverschlüsse sollen demnach als prinzipiell zweiseitig belastbare Bauwerke errichtet werden, deren Dichtwirkung ab Beginn der Nachbetriebsphase gewährleistet sein muss. Um eine Standzeit der Barriere von ca. 10.000 Jahren sicherzustellen, sollen für die Errichtung Baumaterialien verwendet werden, deren Langzeitbeständigkeit aus Vorkommen in der Natur bekannt ist. Prinzipiell wurden Naturwerksteine (z. B. Basalt, Granit, Salzblöcke), Zuschlagstoffe (z. B. Sande, Kiese, Schotter), Bitumen/Asphalt, Beton oder Bentonit und Tone in Erwägung gezogen. Die spätere Festlegung auf die Baustoffe sollte anhand weiterer Untersuchungen erfolgen.

Die Barriere gliedert sich in ein zentrales Stützelement (Widerlager) und zwei an den Stirnseiten des Widerlagers befindliche Dichtelemente (Abbildung 5-7). Das zentrale, prismatoidförmige Widerlager sollte aus Beton errichtet werden, während für die Dichtelemente die Verwendung von Asphalt oder Bitumen vorgesehen war. Die Dimensionierung der Bauteilgrößen sollte über geomechanische Berechnungen und Standsicherheitsnachweise erfolgen, wobei die Wirkprinzipien im Labor und in-situ zu untersuchen sind.

Für die Schließung des Endlagers für schwach und mittelradioaktive Abfälle in Morsleben (ERAM) wurde ein abweichendes Konzept für die Streckenverschlüsse entwickelt /5-10/. Aus dem Langzeitsicherheitsnachweis ergeben sich für die Barrieren die beiden Anforderungen

querschnittsgemittelte Permeabilität $< 10^{-18} \text{ m}^2$ und eine nachgewiesene Standzeit von 5.000 bis 30.000 Jahren (je nach Lage der Barriere).

Tabelle 5-2: Zusammenstellung von Konzepten und bereits ausgeführten Streckenverschlussbauwerken in Salzgesteinen /5-21/

Bezeichnung	Konstruktive Gestaltung	Materialien	Nachweis der Funktions-tüchtigkeit
Dammbauwerk Leopoldshall	funktionale Trennung , Mauerwerksdamm, Holz- und Asphaltelemente	Ziegelmauerwerk mit Magnesia- und Portlandzementen, Asphalt, Holz	erbracht
Dammbauwerk Bismarckshall	keine funktionale Trennung Mauerwerksdamm, Einzelsegmente	Ziegelmauerwerk mit Magnesia- und Portlandzementen	keine belastbaren Angaben
Dammbauwerk Sachsen-Weimar	funktionale Trennung, Mauerwerksdamm, Tondichtelement	Klinkermauerwerk, Hochofenzement Tondichtung, Injektion mit Kieselsäure- und Salzlösung	eingeschränkt erbracht (nachträgliche Injektionen)
Versuchsdamm Hope	teilweise funktionale Trennung, prismenförmiges Widerlager, Asphalt als Außen- und Innendichtung	Salzbeton, Asphalt	keine belastbaren Angaben
Versuchsdamm Asse	funktionale Trennung, hydrostatisches Dichtsystem	Salzbeton, Asphalt	keine Belastung
WIPP Konzept 1990	keine funktionale Trennung, Kurzzeit und Langzeitelemente	Steinsalz, Beton	Bauwerk nicht ausgeführt
ERA Morsleben Konzept 1996	keine funktionale Trennung, gezielte Bewässerung	Bentonitformsteine	Bauwerk nicht ausgeführt
Dammbauwerk Immenrode	funktionale Trennung , dreifach kegelstumpfförmiges Widerlager	Solebeton, Bentonitformsteine	Bauwerk ohne Belastung
Versuchsdamm Sondershausen	funktionale Trennung, prismenförmiges Widerlager	Steinsalzbriketts, Bentonitformsteine Gussasphalt	eingeschränkt erbracht (Widerlagerversagen)
ERA Morsleben Konzept 2003	keine funktionale Trennung, Druckvorspannung	Salzbeton	Bauwerk nicht ausgeführt
Dammbauwerk „Rocanville“	funktionale Trennung, mehrfach kegelstumpfförmiges Widerlager, Dichtelemente	Magnesiabeton mit silikatischen Zuschlägen, Bentonit, Dowell Chemical Seal	erbracht

An den vorgesehenen Barrierestandorten wird vor der Errichtung die Auflockerungszone um die Strecken um 0,3 bis 0,5 m nachgeschnitten. Als Referenzmaterial für die im Rückbau zu errichtenden Barrieren ist der Salzbeton M2 vorgesehen. Querschnitt und Länge des Verschlusses ergeben sich aus den jeweiligen Standortbedingungen im ERAM. Wo für das Erreichen des erforderlichen hydraulischen Widerstandes größere Verschlusslängen erforderlich sind, wird der Barrierenkörper in einzelne Segmente mit Längen von $25 \pm 5 \text{ m}$ unterteilt. Die Segmente werden dann durch plastische Fugen (Salzgrus oder Salzbriketts mit einer Dicke von 0,5 - 1,0 m) voneinander getrennt, um potentielle Zwangsspannungen gering zu halten. Die Kontaktfugen werden nachträglich mit Zement zu injiziert. Durch Laboruntersuchungen und Modellrechnungen wurde nachgewiesen, dass der Salzbeton M2 unter den erwarteten geochemischen Verhältnissen langzeitstabil ist. Voraussetzung ist, dass aufgrund einer ausreichend niedrigen Anfangsporosität die Korrosionsfront und die damit

verbundene Zunahme der Permeabilität nur langsam voran schreitet und somit die Barriere über den Nachweiszeitraum funktionstüchtig bleibt.

5.5.3 Technisches Konzept

Wie bereits in Kap. 5.5.2 dargestellt, wurde noch kein Referenzkonzept für das deutsche Endlagerkonzept für hoch radioaktive Abfälle festgelegt. In Tabelle 5-2 ist eine Reihe von Projekten zusammengestellt, in denen Streckenverschlüsse in Salzbergwerken errichtet wurden. Soweit Nachweise der Funktionstüchtigkeit erbracht werden konnten, entsprechen sie nicht den Auslegungsanforderungen, die für einen Streckenverschluss in einem Endlager festgelegt wurden.

Ein Grobkonzept für die Errichtung von Streckenverschlüssen in einem Endlager finden sich in /5-4/. Vor der Herstellung des Verschlussbauwerkes ist der Standort im Detail zu untersuchen und eine schonende Entfernung der Auflockerungszone an der Streckenkontur durchzuführen. Die Lage der Verschlussbauwerke richtet sich nach den standortspezifischen Gegebenheiten. Sie sind in Bereichen mit potentiell wasserführenden Schichten (z. B. Anhydrit) sowie zum Abschluss der Einlagerungsfelder gegenüber möglichen Lösungszutritten im schachtnahen Bereich vorgesehen. Die Dimensionierung der Bauteilgrößen erfolgt durch geomechanische Auslegungsrechnungen und Standsicherheitsnachweise. Das technische Konzept für die Bauausführung richtet sich nach dem Barrierendesign und den vorgesehenen Baustoffen. Während im Hinblick auf den Umgang mit Salz- und Betonmaterialien umfangreiche Erfahrungen aus dem Kali- und Salzbergbau vorliegen, wurde die Verwendung anderer Dichtmaterialien (Bentonit, Bitumen/Asphalt) bisher nur in wenigen Versuchen in Salzbergwerken erprobt. Bei der Verwendung von Betonen ist es wichtig, auf Rezepturen zurückzugreifen, die im Hinblick auf ihren Chemismus mit den anstehenden Salzgesteinen kompatibel und langzeitstabil sind und beim Abbinden nur begrenzte Hydratationswärme und wenig Überschusswasser freisetzen.

Im Barrierenkonzept für das ERAM wird der Barrierenkörper bei Verschlusslängen von über 40 m in einzelne Segmente mit Längen von 25 ± 5 m unterteilt /5-10/. Die plastischen Fugen zwischen den Segmenten werden aus Salzgrus oder Salzbriketts mit einer Dicke von 0,5 - 1,0 m ausgeführt. Durch Manschettenrohre können die Kontaktfugen nachträglich mit Zement injiziert werden.

5.5.4 Nachweis der Funktionalität

Das Nachweiskonzept für die Barrierenfunktionen wurde bereits in Kap. 5.2.2 beschrieben. Da ein detailliertes technisches Konzept für Streckenverschlüsse in einem HAW-Endlager noch nicht festgelegt wurde, können bisher nur Aussagen zur Funktionalität von Einzelkomponenten getroffen werden, die möglicherweise Elemente eines künftigen Barrierenkonzept werden könnten.

Der Funktionalitätsnachweis für die vorgesehenen Baustoffe ist entsprechend den jeweiligen Standortbedingungen zu führen. Bezüglich der Verwendung arteigener Materialien (gepresste Salzbriketts oder natürliche Salzblöcke) bzw. Salz- und Sorelbetone kann der Nachweis durch chemisch-mineralogische Laborversuche und Modellrechnungen geführt werden. Für das Barrierenkonzept des ERAM wurde die Korrosion von Salzbeton unter dem erwarteten geochemischen Verhältnissen untersucht /5-23/. Die Untersuchungsergebnisse zur Langzeitstabilität von Salzbeton zeigen, dass bei einer ausreichend niedrigen Anfangspermeabilität die Funktionstüchtigkeit der Streckenabdichtung gewahrt bleibt, da unter diesen Umständen das Fortschreiten der Korrosionsfront und die damit verbundene Zunahme der Permeabilität ausreichend langsam verläuft.

Im Hinblick auf die Verwendung anderer Dichtmaterialien wie Bentonit und Bitumen bzw. Asphalt liegen nur geringere Erfahrungen für das Endlagermedium Salz vor. Ein Versuch zur Errichtung eines Verschlussbauwerkes mit einem Bentonitdichtelement im Bergwerk Sondershausen hat die Problematik und Sensibilität des Bentonits im Hinblick auf „Piping“ (Bildung von Strömungskanälen) gezeigt. Ein Aspekt, der die Langzeitstabilität von Bitumen bzw. Asphalt-Dichtungen beeinträchtigen kann, ist eine mikrobielle Degradation dieses Materials.

Die für Gorleben /5-4/ und das ERAM /5-10/ vorgeschlagenen Barrierenkonzepte wurden bisher noch nicht durch In-situ-Versuche erprobt. Bezüglich einiger Teilaspekte des Funktionalitätsnachweises kann auf Erfahrungen bei der Errichtung des Vordamms aus Salzbeton im Forschungsbergwerks Asse zurückgegriffen werden /5-10/. Permeabilitätsmessungen im Baukörper des Damms ergaben Werte von $6 \cdot 10^{-19}$ bis $4,4 \cdot 10^{-24}$ m², wobei Arbeitsfugen keine signifikant höhere Permeabilität aufwiesen. In der Auflockerungszone an der Streckenkontur wurden Werte von $6,5 \cdot 10^{-21}$ bis $2 \cdot 10^{-24}$ m² festgestellt und in der Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge Werte $< 10^{-18}$.

Der Großversuch „Verschlussbauwerk Sondershausen“ zur „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für Untertagedeponien im Salz“ hat eine Reihe offener Fragen bei der Gestaltung des Streckenverschlusses aufgeworfen. Dies betrifft z. B. die Aufsättigung des Beton mit Lösung, die Auslegung des langzeitstabilen Widerlagers und die Gestaltung der Asphaltdichtung /5-24/.

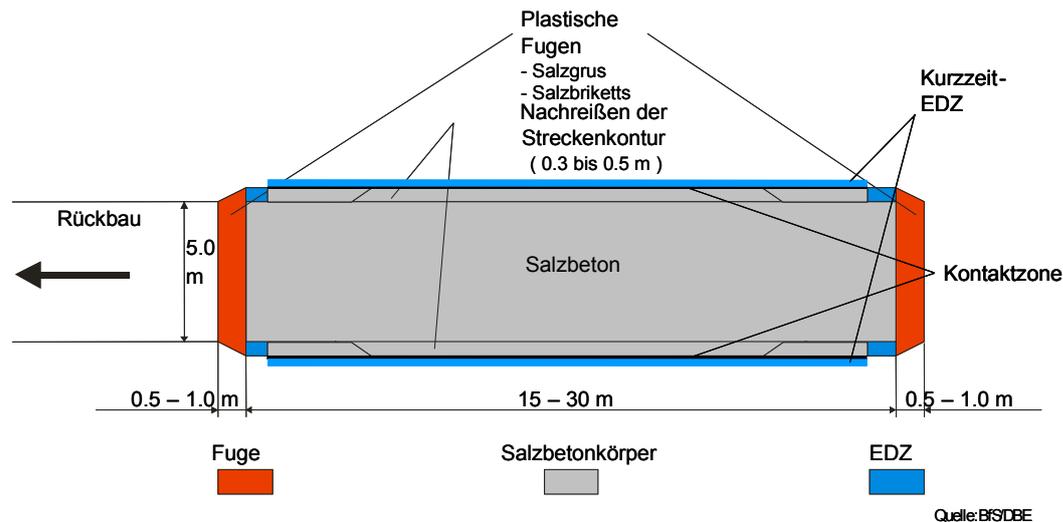


Abbildung 5-19: Konzept eines Streckenverschlusses für das Endlager Morsleben

5.6 Verfüllen des restlichen Grubengebäudes

Die generellen Anforderungen an die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes entsprechen weitestgehend den Anforderungen an die Verfüllung der Einlagerungsstrecken (Kap. 5.4.1) /5-4/:

- die mechanische Stabilisierung des Salzgebirges,
- die Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen,
- die Reduzierung des potentiellen Aufnahmevolumentums für Fluide (im Störfall), und
- die Minimierung der radiologischen Belastung des Personals in der Betriebsphase.

Die Hauptbedeutung der Verfüllung des restlichen Grubengebäudes liegt in der Stabilisierung des Salzgebirges und der Reduzierung des potentiellen Aufnahmevolumentums für Fluide bzw. dem langfristigen Verschluss potentieller Wegsamkeiten. Im Zusammenhang mit Szenarien, die einen Lösungszutritt über die Schächte postulieren, wird die Bedeutung der Verfüllung des Infrastrukturbereichs auch darin gesehen, dass sich nicht oder nur teilweise gesättigte Zutrittslösungen hier am Versatz aufsättigen und dann nicht mehr zu Auslaugungen im Nahfeld der Einlagerungsbereiche führen können. Die Ableitung der Zerfallswärme aus wärmeentwickelnden Abfällen ist für die einlagerungsbereichsfernen Grubenräume von geringerer Bedeutung.

5.6.1 Verfüllmaterialien

Wie bei der Verfüllung der Einlagerungsstrecken wird für die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes wirtsgesteinseigenes Material eingesetzt. Es handelt sich um Salzgrus mit einem maximalen Korndurchmesser von ca. 100 mm, der aus dem Haufwerk gewonnen

wird, das bei der Auffahrung der Grubenräume angefallen ist. Die Kompaktion des Salzgrus bzw. die Entwicklung eines Stützdrucks an der Hohlraumkontur stellt sich abhängig von der Konvergenzrate an der Hohlraumkontur, der Temperatur und der Feuchte über der Zeit ein.

5.6.2 Technisches Konzept und Nachweis der Funktionalität

Wie bereits in Kap. 5.4.1.3 beschrieben, wurde die Einbringung des Versatz als im Schleuderverfahren und im Blasverfahren durch In-situ-Versuche erprobt /5-4/. Dabei wurde mit dem Schleuderverfahren eine höhere Einbaudichte bzw. eine geringere Bandbreite in der Einbaudichte erzielt.

Der Funktionalitätsnachweis konnte bisher nur in Teilbereichen geführt werden (Kap. 5.4.1.4). Die Frage des Feuchtigkeitseinflusses auf den Versatz ist sowohl für die ungestörte wie für die gestörte Entwicklung des Endlagers noch offen. Weiterhin ist die Frage nach der Entwicklung der Porositäten und Permeabilität beim Übergang des Salzgrusversatzes zum Steinsalz in Abhängigkeit von der Gebirgskonvergenz noch ungeklärt /5-17/.

5.7 Schachtverschlüsse

5.7.1 Anforderungen

Da die Schächte eine Verbindung zwischen Biosphäre und Endlagerbergwerk darstellen und dabei die geologische Barriere durchörtern, ist es die Aufgabe des Schachtverschlusses die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wiederherzustellen.

Aus den Anforderungen des Regelwerks für Bergbau und Untertagedeponien wurden die folgenden Grundanforderungen für Schachtverschlüsse abgeleitet /5-25/:

- Schachtverschlüsse müssen Zuflüsse aus dem Deckgebirge in die untertägigen Hohlräume verhindern,
- sie müssen Austritte von Lösungen aus dem Grubengebäude in das darüber liegende Deckgebirge verhindern,
- eine Vollverfüllung der Schächte ist anzustreben bzw. verbindlich vorgeschrieben (Salzbergbau),
- die Setzungen dieser Verfüllsäule sind so gering wie möglich zu halten,
- durch entsprechende Maßnahmen ist ein Auslaufen der Verfüllsäule zu verhindern,
- soweit sicherheitstechnisch vertretbar sind alle Einbauten in Schächten und in den Zugangsstrecken zu entfernen,
- die eingebauten Konstruktionen müssen langzeitstabil und wartungsfrei sein.

Im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung wurden zusätzlich die folgenden funktionalen Anforderungen an den Schachtverschluss formuliert /5-16/:

- standsicher gegen Gebirgsdruck und mögliche Störfallmedien,
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien gegenüber korrosiven Lösungen und Gasen,
- einfache Wirkprinzipien der Bauteile,
- erprobte Komponenten / Bauteile,
- langfristig immer sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit (positiv überkritisches Verhalten).

Die Dichtwirkung sowie die Setzungsarmut der Stützsäule sind direkte funktionale Anforderungen, die übrigen Anforderungen werden aus den zu erwartenden Einwirkungen abgeleitet:

Die beidseitige Dichtwirkung gegenüber einem Lösungszutritt bzw. einem Lösungsaustritt gewährleistet die Einhaltung der Schutzziele „Schutz der Biosphäre vor Radionukliden“ und „Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen“. Hierbei ist der Nachweis der Einhaltung des radiologischen Schutzziels abdeckend für den Nachweis des Grundwasserschutzes. Die Setzungsarmut der Stützsäule soll einerseits die Lagestabilität und Integrität der aufliegenden Dichtelemente und andererseits die Einhaltung des Schutzziels „Schutz der Tagesoberfläche“ gewährleisten.

Die redundant und diversitär zu den Streckenverschlüssen angeordneten Schachtverschlüsse stellen die sicherheitstechnisch wichtigsten Verschlüsse dar, da sie den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wieder herstellen. Die Gewährleistung dieser Funktion ist über den gesamten Bemessungszeitraum nachzuweisen, der vom Zeitpunkt des Erreichens einer hinreichenden Kompaktion des Salzgrusversatzes, der den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleisten soll, abhängig ist. Dieser Zeitpunkt ist entsprechend dem derzeitigen Zeitpunkt der Forschung (vgl. Kap. 5.4.1.4) nicht mit hinreichender Sicherheit festzulegen. Deshalb wird der Bemessungszeitraum z. Z. mit dem gesamten Nachweiszeitraum gleichgesetzt.

Entsprechend den Streckenverschlüssen ergeben sich Anforderungen an die Schachtverschlüsse aus den örtlichen Gegebenheiten und Belastungsszenarien. Da die Schachtverschlüsse erst nach Abschluss des Betriebes und der Verfüllung aller Grubenräume errichtet werden, beziehen sich alle Anforderungen an Dichtheit und Stabilität auf die Nachbetriebsphase. Dichtheitsanforderungen bestehen bei einer ungestörten Endlagerentwicklung vor allen an die transiente Phase während der die Salzgrusverfüllung der Grubenräume kompaktiert. Nach Abschluss der Salzgruskompaktion ist der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet, da ist auch für diesen Zeitraum eine ausreichend niedrige Ablaugungsrate des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nachzuweisen. Dies erfordert beispielsweise die Betrachtung der Stabilität der sich einstellenden Fluid-Dichteschichtung im Bereich der permeablen Stützsäule des Schachtes gegenüber einem geothermisch induzierten potentiellen Strömungs- und Ablaugungsprozess.

Im Falle einer gestörten Endlagerentwicklung mit Lösungszutritt an die Abfälle werden durch die hydraulischen Widerstände von Strecken- und Schachtverschlüsse die Volumenströme an kontaminierter Lösung derart minimiert, dass die radiologischen Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden. Die gestörte Endlagerentwicklung betrachtet zwei abdeckende Szenarien:

- einen unbegrenzten Lösungszutritt aus der Biosphäre, und
- einen begrenzten Lösungszutritt aus Gebirgsreservoirien.

Die maximalen dabei auf die Barrieren einwirkenden Fluiddrucke entsprechen für die Biosphären-Wässer dem hydrostatischen Druck und für die Gesteinseinschlüsse dem petrostatischen Druck.

Der auf die Schachtverschlüsse einwirkende Gebirgsdruck ergibt sich aus dem petrostatischen Teufendruck unter Berücksichtigung von möglichen Spannungsumlagerungen.

5.7.2 Verschlussmaterialien und Design

Ein detailliertes Referenzkonzept eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager liegt momentan nicht vor.

Es gibt aber eine Reihe von Konzepten und Planungen für Schachtverschlüsse von Endlagern für verschiedene Arten radioaktiver Abfälle. Alle Konzepte beinhalten – ähnlich wie beim Streckenverschluss – Dichtelemente und stützende bzw. tragende Bauteile. Jedoch unterscheiden sich die Konzepte z. T. deutlich in der Anordnung der Elemente und die verwendeten Baumaterialien.

Schachtverschlusskonzept für das „Konzept Endlager Gorleben“ /5-4/

Das Schachtverschlusskonzept für das Konzept des Endlagers Gorleben besteht aus einem Dichtelement, das oben und unten durch ein Widerlager eingefasst wird und eine Verfüllung der restlichen Schachtsäule mit setzungsarmem Material (Abbildung 5-8).

Eine Festlegung bestimmter Baumaterialien ist nicht erfolgt. Für das Dichtelement werden Asphalt, Bitumen und Bentonite als mögliche Materialien genannt. Die Widerlager können aus Beton bestehen. Als setzungsarme Verfüllmaterialien für die Schachtsäule kommen Schotter oder im Salinar ggf. auch Salzgrus in Frage.

Im Bereich des Dichtelementes ist das Entfernen der Auflockerungszone am Schachtstoß vorgesehen. Das Dichtelement soll beidseitig gegen Lösungszuflüsse aus dem Deckgebirge und aus dem Bergwerk ausgelegt werden. Dies ist auch der Grund für die symmetrische Anordnung der Widerlager. Die Widerlager sollen der Aufnahme der Gebirgs- und Fluiddrucke dienen sowie die Lagestabilität des Dichtelementes gewährleisten. Das Verfüllmaterial dient

der mechanischen Stabilisierung des Schachtes. Es bestehen keine Anforderungen hinsichtlich der Dichtheit. Im Deckgebirgsbereich bleibt die Schachtröhre aus Stahlbeton im Schacht.

Schachtverschlusskonzept basierend auf dem Großversuch Salzdetfurth /5-25/

Basierend auf dem aktuellen Entwicklungsstand von Schachtverschlüssen und unter Berücksichtigung des In-situ-Großversuches Schachtverschluss Salzdetfurth /5-25/ wurde ein alternatives Verschlusskonzept für ein Endlager im Salz entworfen /5-25/. Dieses Konzept zeichnet sich vor allem durch drei Dichtelemente aus, die durch die obere und untere Füllsäule des Schachtes stabilisiert werden.

Die untere Füllsäule des Schachtes soll aus arteneigenem Material (Salzgrus) oder Schotter bestehen. Darüber folgt im Salinar ein Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit, das gegen Zuflüsse aus dem Grubengebäude abdichten soll. Im Übergangsbereich von Salinar und Hutgestein wird ein schotterstabilisiertes und dichtegeschichtetes Asphalt-dichtelement vorgesehen, um dem möglichen Fluiddruck von unten zu widerstehen. Zum Schutz gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge wird im Bereich Hutgestein/Deckgebirge ein Dichtelement aus Ton und Bentonit angeordnet. Die obere Füllsäule bis zur Tagesoberfläche soll aus einem Gemisch aus Schotter, Sand, Kies und Mineralgemisch hergestellt werden.

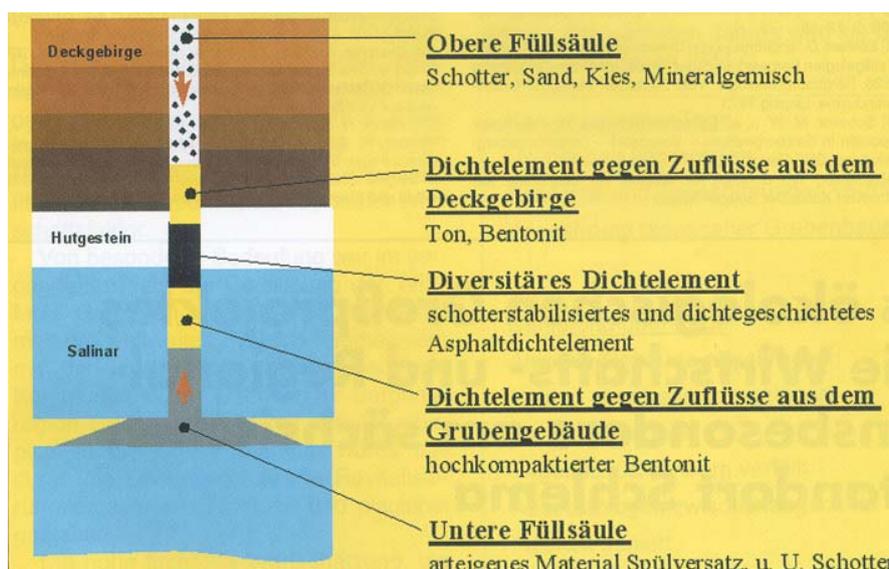


Abbildung 5-20: Konzept eines Schachtverschlusses für ein Endlager im Salz /5-25/

Konzept der Schachtverschlüsse für das Endlager Morsleben /5-27/

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Stilllegung des Endlagers für schwach und mittelradioaktive Abfallstoffe Morsleben (ERAM) wurde ein Konzept für die Verfüllung und den Verschluss der beiden Schächte Marie und Bartensleben erarbeitet /5-27/. Folgende Anforderungen an das Verschlussystem wurden definiert:

- Nachweis der Wirksamkeit des Verschlussystems über einen Zeitraum von 30.000 Jahren,
- Verschluss- und Verfüllmaterialien müssen langzeitstabil sein,

- die Materialauswahl ist an die Gebirgsverhältnissen und -eigenschaften anzupassen,
- durch die Barrierenwirkung soll der Volumenstrom auf max. 2 m³/a begrenzt werden,
- mögliche Umläufigkeiten zwischen Gebirge und Dichtelementen sind durch das Entfernen der Auflockerungszone zu begrenzen.

Bei der Entwicklung des Verschlusssystems wurde großer Wert auf die Redundanz der Barrieren, die Diversität der Dichtelemente und der Verschlussbaustoffe sowie die funktionale Trennung von statischen und dichtenden Aufgaben gelegt. Das Verschlusssystem besteht aus folgenden Elementen /5-27/:

1. Die obere Verfüllsäule dient zur Stützung des Schachtes im Deckgebirge und wird aus einem setzungsarmen Mineralgemisch hergestellt. Die hydraulische Leitfähigkeit des Mineralgemisches liegt im Bereich der niedrigsten Leitfähigkeit des Deckgebirges.
2. ein mehrteiliges Dichtelementesystem
 - a) Durch das Dichtelement 1, das aus Bentonit hergestellt wird, werden die Grubenbaue gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge abgedichtet. Die Quellfähigkeit des Bentonit bewirkt eine Abdichtung des Schachtquerschnittes und der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und anstehendem Gebirge.
 - b) Der Lastabtrag aus oberer Verfüllsäule und Dichtelement 1 ins Gebirge erfolgt durch den Schotter des kombinierten Widerlager-Dichtelementes 2. Der Porenraum des Schotters wird mit Asphalt/Bitumen gefüllt, so dass ein Zufluss von Deckgebirgschwässern verhindert wird. Das Asphalt/Bitumen-Gemisch wirkt als redundante und diversitäre Dichtung zum Dichtelement 1 (Bentonit).
 - c) Die Asphaltsicherung soll dauerhaft die beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente 2 und 3 voneinander trennen. Sie besteht aus Ton, der zwischen zwei Filterschichten angeordnet wird. Die obere Filterschicht besteht aus Feinsand, die untere aus Schotter, Sand und Feinsand. Damit die Tonschicht zwischen den beiden Filterschichten nicht austrocknet, wird die obere Filterschicht mit Lauge versetzt und die untere Filterschicht mit Asphaltplatten überdeckt.
 - d) Das kombinierte Widerlager-Dichtelement 3 entspricht in seiner Auslegung dem Widerlager-Dichtelement 2. Es dichtet den Schacht gegen Lauge aus dem Grubengebäude und trägt die Lasten von unten ins Gebirge ab.
3. Die untere Widerlagersäule wird aus einer setzungsarmen Hartgesteinsschottersäule hergestellt, die gegen Auslaufen in die Füllörter gesichert wird. Der obere Bereich des unteren Widerlagers (Asphaltsicherung) wird mit einer Zementsuspension verfestigt, damit darüber liegendes Material des Dichtelementesystems nicht eindringt (fungiert als Asphaltsicherung).

5.7.3 Technisches Konzept

Entsprechend dem frühen Stand der Konzeptentwicklung für die Schachtverschlüsse gibt es noch kein technisches Konzept für die Errichtung dieser Barrieren. Weder die Baumaterialien noch das Referenzkonzept und die standortspezifischen Anforderungen sind z. Z. festgelegt.

Allgemeine vorbereitende Maßnahmen für den Einbau des Schachtverschlusses sind der Rückbau aller Schachteinbauten im Salinar sowie das Entfernen der Auflockerungszone an der Schachtkontur im vorgesehenen Bereich des Dichtelementes. Nach dem vorläufigen Konzept /5-4/ soll die Schachtröhre im Bereich des Deckgebirges bestehen bleiben. Bei den späteren Planungen für das technische Konzept kann einerseits auf Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau /5-28/ und andererseits auf die Erfahrungen in Forschungsprojekten (z. B. Großversuch Schachtverschluss Salzdettfurth /5-26/) zurückgegriffen werden. Diese Erfahrungen decken die Auslegung und den Einbau von setzungsarmen Stützsäulen und Dichtelementen ab. Salinare Baustoffe besitzen die Besonderheit infolge ihrer rheologischen bzw. chemisch-mineralogischen Eigenschaften unter bestimmten Randbedingungen sowohl stützend als auch abdichtend wirken zu können. Der Einbau und die hierfür verwendete Technik ist vom Verschlusskonzept abhängig.

5.7.4 Nachweis der Funktionalität

Es wurde zwar z. Z. noch kein detailliertes Referenzkonzept für einen Schachtverschluss für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle festgelegt, doch gibt es eine Vielzahl von Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau sowie aus verschiedenen Forschungsprojekten die eine Beurteilung einzelnen Komponenten ermöglichen, die bei einem späteren Schachtverschlusskonzept eingesetzt werden könnten.

Entsprechend der sicherheitstechnischen Bedeutung der Schachtverschlüsse ist die Langzeitbeständigkeit dieser Barriere von besonderer Bedeutung. Zur Prognose und Bewertung des Langzeitverhaltens möglicher Baustoffe kann neben Versuchen und darauf aufbauenden Berechnungen auf natürliche und historische Analoga zurückgegriffen werden /5-25/.

An die Auslegung und den Verschluss von Schächten des Kali- und Steinsalzbergbaus bestehen z. T. ähnliche Anforderungen im Hinblick auf die Stabilisierung der Schächtsäule, die Lagestabilität der Dichtelemente und die Abdichtung gegen Deckgebirgswässer sowie gegen Wässer aus dem Bergwerk. Ausgehend von den generellen gesetzlichen Anforderungen werden die Auslegung und das Konzept dabei an die standortspezifischen Gegebenheiten angepasst /5-28/. Die hydraulische Leitfähigkeit der Dichtelemente soll dabei weitgehend den natürlichen hydrogeologischen Verhältnissen entsprechen und unter $5 \cdot 10^{-10}$ m/s liegen. Als Dichtmaterial wird in der Regel Ton verwendet, der mit einer druckseitig angeordneten Asphaltsschicht kombiniert wird. Beim Übergang von der Dichtung zum Verfüllmaterial werden gestaffelte Filterschichten vorgesehen. Die Lagestabilität der Dichtelemente wird z. T. durch Widerlager gewährleistet, z. T. stützen sich die Dichtelemente unmittelbar auf die Verfüllsäule.

Im Bergwerk Salzdettfurth wurde ein In-Situ-Großversuch zum Bau und zur Funktionstüchtigkeit flüssigkeitsdichter und langzeitstabiler Schachtverschlüsse im Salinar durchgeführt /5-26/. Das hier realisierte Verschlussbauwerk besaß ein gleitfähiges Dichtelement im oberen Salinarbereich, welches auf einer setzungsarmen Verfüllsäule als statisches Widerlager aufgesetzt (Abbildung 4-12). Für das Stützelement wurde Hartgesteinsschotter (Basalt, Körnung 32/80 mm, mittlere Einbaudichte $1,76 \text{ g/cm}^3$) und für das Dichtelement ein quellfähiger Ton auf Bentonit-Basis verwendet, der bei Flüssigkeitszutritt aufquillt und den Schachtquerschnitt abdichtet (Abbildung 5-21). Das Dichtelement bestand aus einem binären Bentonitgemisch aus Ca-Bentonit in Form von hochkompaktierten Briketts und Granulat mit Trockendichten von $1,7$ bis $1,75 \text{ g/cm}^3$. Beim Aufsättigen des Bentonits traten Quelldrücke von bis zu $1,2 \text{ MPa}$ auf. Die mittlere hydraulische Leitfähigkeit des Dichtelements betrug $4,4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

Die Dichtung war für einen Flüssigkeitsdruck von 7 MPa ausgelegt und konnte diesem Druck über 100 Tage standhalten. Als Beleg für die Langzeitstabilität von Bentonit in Salzgesteinen wird auf Salztone verwiesen, die über viele Millionen Jahre bereits abdichtend für das Salinar wirken. Die Langzeitstabilität des Schotters ergibt sich aus der Kompatibilität mit dem chemischen Milieu sowie aus Basaltintrusionen, die in verschiedenen Salzlagerstätten beobachtet wurden. Durch entsprechende Einbringtechniken bei Erstellung der Füllsäule konnte die angestrebte Einbaudichte und die Setzungsarmut der Verfüllung erreicht werden. Eine Optimierung des Einbaus der Verfüllsäule konnte bei späteren Versuchen im Schacht Ottos-hall erreicht werden (Einbaudichte $2,24 \text{ g/cm}^3$).

Die Studie hat ergeben, dass das in Salzdettfurth erprobte Konzept des Schachtverschlusses die Anforderungen an eine weitgehende Flüssigkeitsdichtheit und eine Langzeitbeständigkeit erfüllt. Die Eignung von Bentonit als Dichtelement für langzeitsichere Schachtverschlüsse wird, unter Berücksichtigung von Salzton als natürlichem Analogon, auch durch weitere Untersuchungen bestätigt. Die Transportprozesse von Gas durch die Bentonitbarriere werden noch erforscht, aber es steht fest, dass der Verschluss nicht vollständig gasdicht ist. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieses Versuches auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtes (Schachtdimensionen und Bemessungszeitraum) ist noch zu führen.

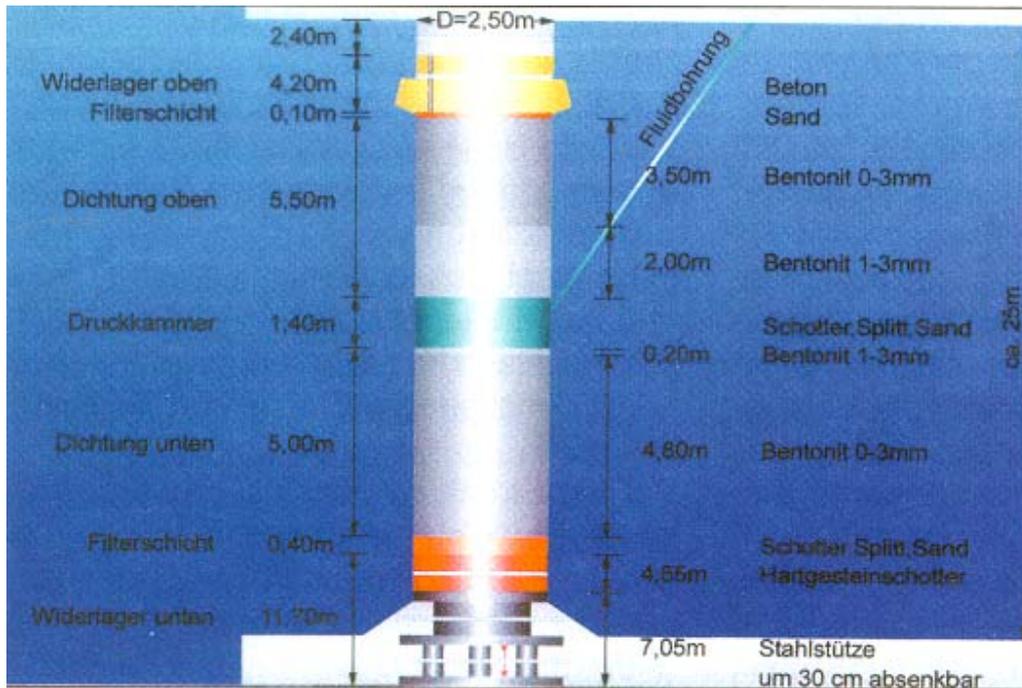


Abbildung 5-21: Bohrschachtversuch in Salzdörfurth zur Untersuchung von Dichtelementen mit binärem Calcium-Bentonit /5-26/

Das in Kap. 5.2.2 beschriebene Konzept für den Nachweis der Barrierenfunktion ist auch auf Schachtverschlüsse anwendbar.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Arbeitspaketberichtes des Projektes EUGENIA wurde der international erreichte Stand von Wissenschaft und Technik bei den Verfüll- und Verschlusskonzepten und -maßnahmen für fortgeschrittene Endlagerkonzepte in Belgien, Frankreich, Schweiz, Schweden, Finnland und Deutschland zusammengefasst. Die Endlagerplanungen wurden für Tone, Kristallingesteine und Salz durchgeführt.

Wirtsgestein Ton

Die Endlagerkonzepte von Belgien, Frankreich und der Schweiz wurden für tonige Wirtsgesteine entwickelt. Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept stellt im Ton das Wirtsgestein die entscheidende Barriere für den langzeitsicheren Einschluss des Radionuklidinventars dar. Einige wirtsgesteinsspezifischen Anforderungen sind für alle Konzepte gleich, so z. B. die Integrität der Behälters während der thermischen Phase (einige 100 bis wenige 1000 Jahre je nach Inventar) und ein Temperaturgrenzwert von 100°C an der Behälteroberfläche. Aufgrund ähnlicher Fragestellungen und Probleme kooperieren ONDRAF/NIRAS, ANDRA und NAGRA bei der Durchführung von Forschungsprojekten zur Klärung grundlegender Aspekte der Wirtsgesteinscharakteristika und der Endlagertechnik.

Die begrenzte Mächtigkeit der Tonformationen erfordert in allen Fällen horizontal ausgerichtete Endlagerkonzepte. Die Verfüll- und Verschlusskonzepte sehen eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Puffermaterial, Streckenverschlüsse, Verfüllung der restlichen Grubenräume und Schachtverschlüsse vor. Bei allen Referenzkonzepten werden die Behälter in den Einlagerungsstrecken bzw. -bohrungen zum Schutz der Behälter und zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide von einem Puffermaterial, meist Bentonit, umschlossen. Im belgischen Supercotainer-Konzept ist ein Betonpuffer Teil des Behälters.

Aufgrund günstiger Materialeigenschaften ist Bentonit auch das bevorzugte Baumaterial für alle geotechnischen Barrieren. Diese Barrieren bilden eine hydraulische, chemische und mechanische Schutzzone um den einzulagernden Abfall und verschließen potenzielle Wegsamkeiten bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz wieder vollständig verschlossen sind. Grundlagen für ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktionen werden z. Z. durch In-situ-Versuche und Laborexperimente geschaffen. Die Sicherheitsnachweiskonzepte orientieren sich alle am Stand von Wissenschaft und Technik, wie er z. B. in IAEA und NEA-Berichten zusammengefasst wird. Als Grundlage für die Sicherheitsbewertung wurden in allen Fällen umfassende Forschungs- und Demonstrationsversuche durchgeführt, um die sicherheitstechnisch relevanten Prozesse im Endlager zu untersuchen und die technische Machbarkeit vorgesehener technischer Maßnahmen nachzuweisen. Die bei den Sicherheitsnachweisen zugrunde gelegten Normalentwicklungen basieren auf der Entwicklung in der Vergangenheit und beschreiben durch Analogie- und Plausibilitätsschlüsse eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung. Dabei wird die Integrität der Behälter sowie der geotechnischen Barrieren unterstellt. Behälterdefekt, der Ausfall von Barrieren, Human Intrusion sowie andere ungünstige Entwicklungen werden als Alternativszenarien betrachtet.

Die Forschungsarbeiten für die Verfüll- und Verschlusskonzepte konzentrieren sich bei allen drei Endlagerorganisationen auf das Verfüllen und den Verschluss der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher. Bei einer Verwendung eines Bentonitpuffers wird dieser entweder als hoch kompaktierte Bentonitblöcke oder als Bentonitpellets in die Einlagerungsstrecke eingebracht. Während für den Verschluss der Einlagerungsstrecken bereits recht detaillierte Planungen und Versuche vorliegen, sind für die Verfüllung und den Verschluss der anderen Grubenräume nur Grobkonzepte entwickelt worden. Strecken- und Schachtverschlüsse bestehen demnach aus Bentonitdichtelementen und Betonwiderlagern. Die restlichen Hohlräume werden mit Ton (Ausbruchmaterial) oder einem Ton/Sand-Gemisch verfüllt. Schwerpunkte der Forschungsarbeiten bildeten umfangreiche Materialuntersuchungen an verschiedenen Bentonit-Varianten. Weiterhin wurden die Herstellung von Bentonitpellets und -blöcken sowie Einbringtechniken untersucht und durch Großversuche erprobt. Weitere Materialuntersuchungen werden an Betonvarianten durchgeführt.

Kristallingestein

In Schweden und Finnland wurden Oskarshamn/Forsmark und Onkalo als Endlagerstandorte für ausgediente Brennelemente in Kristallingesteinen festgelegt. Die Endlagerplanungen der Endlagergesellschaften SKB (Schweden) und POSIVA (Finnland) basieren auf dem schwedischen KBS-3-Konzept, das eine Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern vorsieht. Daher kooperieren SKB und POSIVA in vielen Forschungsprojekten zur Endlagerung.

Kristallingesteine bieten eine hohe mechanische Standfestigkeit, die die Abfallbinde während der Nachbetriebsphase schützt. Gleichzeitig sind die Gesteine aber von häufig wasserführenden Klüften durchzogen, so dass die Rückhaltefunktionen für die radioaktiven Inventare von technischen und geotechnischen Barrieren zu gewährleisten sind. Wesentliche Elemente des Sicherheitskonzeptes im Kristallingestein sind daher ein korrosionsresistenter Endlagerbehälter mit Standzeiten von wenigstens 100.000 Jahren sowie um den Endlagerbehälter ein Bentonitpuffer um den Lösungszutritt zum Behälter zu vermeiden oder zu verzögern. Neben diesen beiden Maßnahmen sehen die Verfüll- und Verschlusskonzepte eine Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Bentonit bzw. einem Bentonit/Gesteinsbruch-Gemisch sowie den Abschluss der Einlagerungsstrecken mit einem Verschlussbauwerk zu den Verbindungsstrecken hin vor. Für die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes und die Schächte wurden bisher nur Grobkonzepte entwickelt. Im Prinzip sollen die für die Einlagerungsstrecken entwickelten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen auch hier eingesetzt werden. Für die Verfüllung und den Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher und -strecken wurde ein Nachweiskonzept für die Barrierenfunktion entwickelt. Dieses Konzept basiert auf Sicherheitsfunktionen, Kriterien für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen und Methoden für den Nachweis. Während SKB bereits einen ersten Langzeitsicherheitsnachweis für Forsmark entsprechend dem internationalen Stand erstellt hat, hat POSIVA gerade erst mit der Erstellung eines derartigen Nachweises für Onkalo begonnen. Als Normalentwicklung wird unterstellt, dass alle Behälter und geotechnischen Barrieren entsprechend ihrer Auslegung funktionieren. Behälter- und Barrierendefekte werden als Alternativszenarien betrachtet.

Entsprechend ihrer Bedeutung für das Sicherheitskonzept bilden die Behälter und das Verfüllmaterial die Schwerpunkte für die Forschungsprogramme. Es wurde eine Reihe von Bentonitvarianten auf ihre Stabilität in den jeweils standortspezifischen hydrochemischen Milieus untersucht. Außerdem wird die Herstellung von Bentonitelementen sowie der Transport und Einbringung dieser Elemente in In-situ-Versuchen erprobt. Zement, der für Widerlager von Barrieren, zur Abdichtung von Störungen und Rissen durch Injektionen sowie als Puffer beim Supercontainerkonzept benötigt wird, soll einen möglichst niedrigen pH-Wert haben. Die entsprechenden Untersuchungen laufen noch.

Salzgesteine

Entsprechend vorteilhafter Eigenschaften von Salzgesteinen für die Endlagerung (Plastizität, Wärmeleitfähigkeit, Trockenheit) werden diese in Deutschland als potentielle Wirtsgesteine für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle untersucht. Seit 1979 wird der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Endlagerstandort erkundet. Parallel dazu wurde umfangreiche Grundlagenforschung im Hinblick auf das Wirtsgestein, Abfalltypen, systemanalytische Arbeiten zu Endlagerkonzepten sowie Demonstrationsversuche zur Endlagertechnik durchgeführt. Das Referenzkonzept sieht die Streckenlagerung ausgedienter Brennelemente und die Bohrlochlagerung hoch radioaktiver abfälle vor.

Das Schließungskonzept sieht die vollständige Verfüllung des Grubengebäudes mit Salzgrus vor. Außerdem werden die Einlagerungsbohrlöcher, die Verbindungsstrecken zwischen den Schächten und den Einlagerungsbereichen und die Schächten durch Verschlussbauwerke abgedichtet. Es wurde ein deterministisches Nachweiskonzept für die Integrität der geotechnischen Barrieren entwickelt. Hierdurch wird der Kompatibilitätsnachweis mit den Anforderungen des Langzeitsicherheitsnachweises geführt. Das deutsche Sicherheitsnachweiskonzept wurde entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik und den neuen „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Stoffe in Bergwerken“ überarbeitet. Im Hinblick auf die Unsicherheit von Langzeitprognosen wurden Dosisgrenzwerte durch Dosisrichtwerte im Sinn eines Sicherheitsindikators ersetzt sowie weitere Sicherheitsindikatoren abgeleitet. Dabei wird zwischen wahrscheinlichen und wenig wahrscheinlichen Entwicklungen unterschieden. Im Mittelpunkt des Nachweises steht der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere. Wenig wahrscheinliche Freisetzungsszenarien werden komplementär betrachtet.

Die bisherigen Versuche zu Verfüll- und Verschlussmaßnahmen konzentrieren sich auf die Entwicklung der petrophysikalischen Eigenschaften von Salzgrus bei der Streckenverfüllung unter dem Einfluss der wärmeentwickelnden Abfälle und der Gebirgskonvergenz. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Für die Verschlussbauwerke in Einlagerungsbohrlöchern, Verbindungsstrecken und Schächten wurden noch keine Referenzkonzepte festgelegt. Strecken- und Schachtverschlüsse werden Mehrkomponentenbauwerke mit Widerlagern und Dichtelementen sein. Das Design und die Baumaterialien wurden noch nicht festgelegt, so dass auch noch keine abdeckenden Funktionalitätsnachweise erstellt werden konnten.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist der Kenntnisstand bei der Behälterentwicklung sowie der Einlagerungskonzepte einschließlich dem Verschluss der Einlagerungsstrecken/-bohrlöcher für die Konzepte in allen Wirtsgesteinen weit fortgeschritten. Schwerpunkte der Forschung waren dabei die petrophysikalischen Eigenschaften des Verfüllmaterials und die Wechselwirkungen mit dem Endlagergebäude. Ein besonders umfangreicher Kenntnisstand liegt über die verschiedenen Bentonit-Varianten vor, die als Baumaterial für Dichtelemente in allen Wirtsgesteinen vorgesehen sind. Die entsprechende Einbringtechnik wird z. Z. in Großversuchen erprobt. Zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen in anderen Teilen des Grubengebäudes liegen bisher für alle Wirtsgesteine nur Grobkonzepte vor. Entsprechende Erweiterungen der Forschungsprogramme werden in der Zukunft durchzuführen sein.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	Sicherheitstechnische Anforderungen an Endlagergebäude für die Betriebs- und Nachbetriebsphase im Endlager /5-10/	158
Tabelle 5-2:	Zusammenstellung von Konzepten und bereits ausgeführten Streckenschlussbauwerken in Salzgesteinen /5-21/	174

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Endlager für verglaste HAW /3-4/	21
Abbildung 3-2:	Querschnitt durch eine Endlagerungsstrecke für verglaste HAW, SAFIR-2-Konzept /3-4/	22
Abbildung 3-3:	Längsschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für verglaste HAW, Supercontainer-Konzept /3-18/	23
Abbildung 3-4:	Querschnitt durch eine Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /3-4/	23
Abbildung 3-5:	Langzeitsicherheitsfunktionen der Elemente des Multibarrierensystems /3-4/	26
Abbildung 3-6:	Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (links) und für ausgediente Brennelemente (rechts) (SAFIR-2-Konzept)	32
Abbildung 3-7:	Endlagerbehälter für HAW-Kokillen (links), Einlagerungskonzept (Supercontainer-Konzept) /3-27/	32
Abbildung 3-8:	Test zum Einblasen trockener Verfüllmaterialien: Verblas-Fahrzeug (links und Mitte) und Vorratsbehälter der Verblasmaschine (rechts) /3-27/	36
Abbildung 3-9:	Test zur Zementverfüllung: Behältermodell mit zentralem Erhitzer (links) und Einschalung (Mitte).	37
Abbildung 3-10:	Versuchsaufbau des RESEAL-Projektes zur Erprobung des Einbaus eines Schachtverschlusses /3-12/	41
Abbildung 3-11:	Frankreich – Schematisches Layout des geplanten Endlagers /3-31/	44
Abbildung 3-12:	Einlagerungszelle für verglaste HAW /3-29/	45
Abbildung 3-13:	Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/	45
Abbildung 3-14:	Typischer Endlagercontainer für verglaste hochaktive Abfälle /3-29/	51
Abbildung 3-15:	Endlagerbehälter für vier Uranoxid-Brennelemente /3-29/	52
Abbildung 3-16:	Verschlusskonzept für eine HAW-Einlagerungszelle /3-29/	56
Abbildung 3-17:	Schematischer Aufbau einer Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/	57
Abbildung 3-18:	Verschlusskonzept für eine Endlagerzelle für ausgediente Brennelemente /3-29/	58
Abbildung 3-19:	Versuche zur Streckenverfüllung im Untertagelabor Bure (Meuse/Haute-Marne, Frankreich)	61
Abbildung 3-20:	Konzept eines Streckenverschlusses	63
Abbildung 3-21:	Großversuch TSX zur Errichtung des Dichtelementes eines Streckenverschlusses im kanadischen Untertagelabor /3-29/	64

Abbildung 3-22: Großversuch zur Erstellung von Schlitzten zur Unterbrechung der Auflockerungszone (KEY-Versuch) im Untertagelabor in Bure (Frankreich) /3-29/	67
Abbildung 3-23: Französisches Konzept für den Schachtverschluss in Ton	69
Abbildung 3-24: Oberes Betonwiderlager über dem unteren Schachtverschluss /3-29/	70
Abbildung 3-25: Endlagerdesign für hoch- und mittelradioaktive Abfälle im Opalinuston /3-45/	73
Abbildung 3-26: Verfüll- und Verschlusskonzept für ein Endlager für hoch- und mittelradioaktive Abfälle im Opalinuston /3-45/	75
Abbildung 3-27: Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung	79
Abbildung 3-28: Endlagerbehälter (Stahlbehälter) für ausgediente Brennelemente (links) und HAW-Kokillen (rechts), Abmessungen in mm /3-45/	80
Abbildung 3-29: Einlagerung von BE- und HAW-Endlagerbehältern, Abmessungen in m /3-51/	81
Abbildung 3-30: Einfahren eines Endlagerbehälters mit Bentonitauflager in die Einlagerungsstrecke.	84
Abbildung 3-31: Verfüllwagen für Bentonitgranulat /3-51/	84
Abbildung 3-32: Großversuche zur Verfüllung von Einlagerungsstrecken	85
Abbildung 3-33: Design für den Verschluss einer Einlagerungsstrecke	87
Abbildung 3-34: Konzept für den Schachtverschluss /3-51/	90
Abbildung 4-1: Endlager Olkiluoto – Schematisches Layout /4-4/	95
Abbildung 4-2: Schnitt durch eine verfüllte Einlagerungsbohrung /4-4/	96
Abbildung 4-3: Im Zuge des Sicherheitsnachweises zu erstellende Berichte.	99
Abbildung 4-4: Zeitplan für die Erstellung des Sicherheitsnachweises /4-12/	100
Abbildung 4-5: Finnland – Varianten von kupferummantelten Behältern für ausgediente Brennelemente (von links nach rechts): BWR-BE, VVER 440-BE und EPR-BE /4-4/	102
Abbildung 4-6: Testblöcke aus Bentonit /4-6/	107
Abbildung 4-7: Bagger mit Telekoparm, der auch mit einer Verdichterplatte ausgerüstet werden kann /4-6/	108
Abbildung 4-8: Streckenverfüllung mit Bentonitblöcken durch einen Kranwagen mit einer Gabel am Hydraulikarm /4-6/	109
Abbildung 4-9: Pelletschleuder /4-6/	109
Abbildung 4-10: Verschluss der Einlagerungsstrecken /4-4/	112
Abbildung 4-11: Einlagerungsvarianten für ausgediente Brennelemente /4-34/	115
Abbildung 4-12: Endlagerkonzept KBS3-V /4-34/	116

Abbildung 4-13: Varianten von kupferummantelten Endlagerbehältern für ausgediente Brennelemente /4-31/.	117
Abbildung 4-14: Aufbau eines Supercontainers /4-33/	118
Abbildung 4-15: Einlagerung von Supercontainern in horizontalen Bohrlöchern (KBS-3H-Konzept) /4-33/	118
Abbildung 4-16: Das Sicherheitssystem für das KBS3-Endlagerkonzept	124
Abbildung 4-17: Verfülltes Einlagerungsbohrloch mit Behälter /4-34/	128
Abbildung 4-18: Prototyp eines Geräts zum Einbringen von Bentonitelementen in die Einlagerungsbohrlöcher /4-36/ (links), Versuchseinlagerung eines Endlagerbehälters im Untertagelabor in Äspö (rechts).	129
Abbildung 4-19: Fertigung von Bentonitringen /4-47/	130
Abbildung 4-20: Schematische Darstellung eines bewehrten Verschlusses, der durch ein Widerlager im Gestein fixiert ist /4-36/	135
Abbildung 4-21: Schematische Darstellung eines Verschlusses, der die Reibung zwischen dem Verschluss und dem Gestein in seiner Lage gehalten wird /4-36/	136
Abbildung 5-1: NW-SE-Vertikalschnitt durch die Salzstock Gorleben.	142
Abbildung 5-2: Gorleben Layout der Einlagerungsfelder. Rot: wärmentwickelnde Abfälle, blau: vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle	143
Abbildung 5-3: Schema der Streckenlagerung von POLLUX-Behältern	144
Abbildung 5-4: Technisches Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in tiefen Bohrlöchern (Maßangaben in mm)	145
Abbildung 5-5: Technisches Konzept für die Einlagerung von Endlagergebinden in geneigten Kurzbohrlöchern	145
Abbildung 5-6: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“	146
Abbildung 5-7: Prinzipskizze Streckenverschluss /5-4/	148
Abbildung 5-8: Prinzipskizze Schachtverschluss /5-4/	149
Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen der Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren /5-9/	150
Abbildung 5-10: Algorithmus zu Entwurf und Bemessung untertägiger Verschlussbauwerke /5-12/	153
Abbildung 5-11: Methodik zur Führung des Sicherheitsnachweises /5-13/	154
Abbildung 5-12: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis	156
Abbildung 5-13: POLLUX-Behälter /5-16/	159
Abbildung 5-14: Brennstabkokille (BSK) /5-16/	160
Abbildung 5-15: HAW-und CSD-B Kokille (links) und CSD-C-Kokille (rechts) /5-16/	161

Abbildung 5-16: Erhitzerversuch an POLLUX-Behältern im Bergwerk Asse	162
Abbildung 5-17: In-situ-Versuch zur Einbringung von Salzgrus mit einem Schleudertruck	165
Abbildung 5-18: Verfüll- und Verschlusskonzept für ein Einlagerungsbohrloch	168
Abbildung 5-19: Konzept eines Streckenverschlusses für das Endlager Morsleben	177
Abbildung 5-20: Konzept eines Schachtverschlusses für ein Endlager im Salz /5-25/	181
Abbildung 5-21: Bohrschachtversuch in Salzdetfurth zur Untersuchung von Dichtelementen mit binärem Calcium-Bentonit /5-26/	185

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 Fisibles 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/ Filbert, W. & Engelmann, H.J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben. Abschlussbericht. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, Peine 1998.
- /1-2/ IAEA – International Atomic Energy Agency: The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111 – F, IAEA, Vienna, 1995
- /1-3/ IAEA – International Atomic Energy Agency: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management, INFCIRC/546, Vienna, 1997
- /1-4/ Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung), BGBl Teil II, Nr. 31, S. 1752, 1997
- /1-5/ IAEA – Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 120, IAEA, Vienna 1996.
- /1-6/ IAEA – Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste, Safety Series No. 99, Vienna 1989
- /1-7/ IAEA – Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements No. WS-R-4, Safety Standard Series, Vienna 2005.
- /1-8/ NEA – Post-Closure Safety Case for geological Repositories, Nature and Purpose, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and development, No. 3679, Paris 2004.
- /1-9/ GRS, BGR, DBETEC: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL), Forschungsprojekt des BMWI, FKZ 02 E 10065 + 02 E 10055, Peine 2008.
- /2-1/ ICRP – Radiation Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste, ICRP Publ. 77, Pergamon Press, Oxford and New York 1997.
- /2-2/ ICRP – Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publ. 81, Pergamon Press, Oxford and New York 2000
- /2-3/ DBE TECHNOLOGY GmbH – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein, Forschungsprojekt des BMWI, FKZ 02 E 9511, Peine 2004.
- /3-1/ Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO), Forschungsprojekt des BMWI, FKZ 02 E 10286 Peine 2009

Belgien

- /3-2/ J. B. Grupa and others "Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report", EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000
- /3-3/ J. Bel, F. Bernier "Temperature criterion related to clay based backfill materials in the framework of a geological repository of heat producing radioactive waste (HAW), Proceedings ASME 2001
- /3-4/ ONDRAF/NIRAS "Technical overview of the SAFIR 2 report", NIROND 2001-05 E, December 2001
- /3-5/ The CERBERUS and Mine-By-Test projects: Progress report for the period January 1 – June 30, 1996, Nirond 96/08, November 1996
- /3-6/ Neerdael, B., Meynendonckx, P., Voet, M., The Bacchus backfill experiment at the HADES underground research facility at Mol, Belgium, Final Report, EUR 14155 EN, EC 1992.
- /3-7/ Bernier, F. & Neerdael, B. (1996): Overview of in-situ thermomechanical experiments in clay: Concept, results an interpretation.- Engineering Geology 41 (1996), p. 51 – 64
- /3-8/ SCK/CEN (1996): Hades – Tour Guide Notebook.-4th Edition, February 1996.
- /3-9/ European Commission: Megas – Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks.- Final report, EUR 17453 EN, Brussels
- /3-10/ Verstricht, J.; De Bruyn, D. & Bereeper, B. (2001): Mock-up Simulation for the Demonstration of the Belgian High-Level radioactive Waste Disposal Concept.- Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 2001, Tucson.
- /3-11/ Littleboy, A.K., et. al.: Site Characterisation – Methods and Approaches.
- /3-12/ Volckaert, G., Dereeper, B., Put, M., Ortiz, L., Gens, A., Vaunat, J., Villar, M.V., Martin, P.L., Imbert, C., Lassabatère, T., Mouche, E. and Cany, F.: A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock. RE-SEAL project – Phase I. European Commission, Luxembourg, EUR 19612, 273 pp., 2000
- /3-13/ 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
- /3-14/ The Praclay Demonstration Experiment, Instrumentation Programme: Progress report for the period January 1 – June 30, 1992, Nirond 92/12, November 1992
- /3-15/ Volckaert, G., Bernier, F., Dardaine, M.: Demonstration of the in situ application of an industrial clay-based backfill material (Bacchus 2), Report EUR 16860 EN/FR, EC 1996.

- /3-16/ Volckaert, G., Bernier, F., Functional requirements for the seal and the material for shaft sealing, R-3125, SCK•CEN 1996.
- /3-17/ Bel, J.: Engineered barrier – Buffer construction technologies, Introduction and key considerations, ESDRED-workshop “Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste, 8-9 November 2006, Bucharest.
- /3-18/ 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.
- /3-19/ Kursten, B., Van Iseghem, P.: In situ Corrosion Studies on Candidate Container Materials for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Waste in Boom Clay, Corrosion/99, Paper No. 473, San Antonio, Texas, USA, NACE International, 1999
- /3-20/ Minet, Y., and Vernaz, E.: Modelling the durability of silica additives proposed to protect nuclear waste glass packages in geological repository; in Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXII, Mat. Res. Soc. Proc., vol. 556 , p.633 (1999).
- /3-21/ Verstricht, J., Demarche, M., Gatabin, C.: Development of a backfill material within the Belgian concept for geological disposal of high-level radioactive waste: an example of successful international cooperation, Proceedings, Tucson 2001.
- /3-22/ Dierick, C., Detilleux, M., Nuyt, G., Janssen, L., Demazy, G.: Synthesis of the technical feasibility evaluation of spent fuel conditioning in Belgium.- Proceedings WM'98, Tucson 1998.
- /3-23/ Verstricht, J., Demarche, M., De Bruyn, D.: Extension of the underground research facility for real-scale demonstration. Proceedings Tucson 2001.
- /3-24/ Volckaert, G., Bernier, F.: Functional requirements for the seal and the material for shaft sealing, R-3125, SCK•CEN 1996.
- /3-25/ ONDRAFT/NIRAS: EBS architecture for disposal of category B and C waste in Boom Clay: Progress Report on Activities between October 1st 2001 and December 31th 2002. ONDRAF/NIRAS report NIROND 2003-01, 2003.
- /3-26/ Valcke, E. et al.: CORALUS II-An integrated in situ corrosion test of alpha-active high-level waste glass – phase II. EUR report, European Commission, Luxembourg 2007.
- /3-27/ SCK CEN: Preliminary on-surface experiments for backfilling a HLW repository: The ESDRED project.- Scientific Report 2006, Operational Office, Mol.

Frankreich

- /3-28/ Planungsgesetz über die nachhaltige Entsorgung radioaktiver Materialien und Abfälle, No. 2006-739 vom 28. Juni 2006
- /3-29/ Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December 2005
- /3-30/ Gesetz über das Management radioaktiver Abfälle 91-1381 vom 30.12.1991
- /3-31/ B.R.W. Haverkate, J. Hart, A.D. Poley, Review of the horizontal emplacement technique concerning retrievability disposal cell concept, Petten, 20 January 2006
- /3-32/ K.P. Breidung, Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, Kali und Salz, BMBF-Kz.: 02C0516, Bad Salzdetfurth.
- /3-33/ Andra (2005) Spécification technique de besoin d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.SP.AHVL.02.132.
- /3-34/ Dossier 2005 Argile, Tome: Safety evaluation of a geological repository; ANDRA, December 2005
- /3-35/ Andra (2005) Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. Rapport Andra n° C.RP.ASCM.04.0015
- /3-36/ Su K. (2005) Le comportement mécanique d'alvéoles de stockage de déchets C et de combustibles usés dans le temps - Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASMG.03.109
- /3-37/ AECL (2005) Tunnel sealing experiment five year report. Rapport Andra n° G.RP.DPG.05.0002.
- /3-38/ Andra (2005) Conception, construction et fermeture d'alvéoles de stockage de déchets vitrifiés ou de combustibles usés en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.ASTE.04.0511
- /3-39/ SKB (1999) Clay Technology - Compaction of full size blocks of bentonite for the KBS-3 concept - Initial tests for evaluating the technique. Rapport SKB n° R-99-66.
- /3-40/ SKB (1994) Clay Technology - Heat conductivity of buffer materials. Rapport SKB n° TR 94-29.
- /3-41/ Kawakami S., Kanno T., Jintoku T., Ueda H., Kimoto T. (2001) Large-scale manufacturing test of monolithic buffer material for geological disposal of HLW, 9th International Conference on Nuclear Engineering, Nice.
- /3-42/ Andra (2005) Scellements et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde - Site de Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.NT.AHVL.04.0030.
- /3-43/ Gatabin, C., Guyot, J.L., Resnikow, S., Bosgiraud, J.M., Lone, L., Seidler, W. (2008): ESDRED Project Module 1. From Bentonite Powder to EB Units: an industrial Process. Int. Tech. Conf. On the Pract. Aspects of Deep Geolog. Disposal of Radioactive Waste, Prague, Czech Republic June 16-18, 2008

Schweiz

- /3-44/ Nagra: Projekt Gewähr, Vol. 1-9, Nagra Gewähr Report Series NGB 85-01/09, Nagra Wettingen, Switzerland 1985.
- /3-45/ 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.
- /3-46/ Fritschi M., Zuidema P., Status of the Swiss radioactive waste disposal programme; Proceedings, ASME 1999
- /3-47/ CROP "Swiss Country Annex for WP1 Design and construction of engineered barriers"
- /3-48/ Johnson, L.H. & King, F.: Technical Report 02-11, Canister Options for the Disposal of Spent Fuel, April 2003.
- /3-49/ HSK-Richtlinie R-21, Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Nov. 1993.
- /3-50/ Thury, M. & Bossart, P.: Mont Terri Rock Laboratory, Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997; Landeshydrologie und -geologie, Geologische Berichte Nr. 23, Bern, 1999.
- /3-51/ NAGRA, Technischer Bericht 02-02, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers (Entsorgungsnachweis), Nagra Wettingen, Schweiz, Dezember 2002.
- /3-52/ Müller, W., Alexander, R., Chapman, N.A., McKinley, I.G. & Smellie, J. (2000): Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues: lessons from nature and archaeology. Waste Management Series 2. Pergamon, Amsterdam.
- /3-53/ Pusch, R., Takase, H. & Benbow, S. (1998): Chemical processes causing cementation in heat-affected smectite – the Kinnekulle bentonite. SKB tech. Report TR-98-25. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- /3-54/ Pusch, R., Johnson, L.H. & Blümling, P.: Performance of strongly compressed MX-80 pellets under repository-like conditions. Clay microstructure and its importance to soil behaviour. Lund, 2002.
- /3-55/ Nold, A.L.: Example of a buffer system consisting of compacted bentonite blocks and granular bentonite pellets (Swiss concept). Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste (ESDRED). European Commission, Bucharest 2006.

Finnland

- /4-1/ Saanio, T., Kirkkomäki, T., Keto, P., Kukkola, T. & Raiko, H.: Preliminary Design of the Repository, Stage 2, Working Report 2006-94, POSIVA, Olkiluoto 2007.

- /4-2/ Long-term safety of the final disposal of spent fuel. STUK Guide YVL 8.4, Säteilyturvakeskus, 23 May 2001.
- /4-3/ 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.
- /4-4/ Pastina, B.&Hellä, P., Expected evolution of a spent fuel repository at Olkiluoto, POSIVA Report 2006-05, Olkiluoto 2006 (rev. Oct. 2007)
- /4-5/ Gunnarsson, D., Börgesson, L., Keto, P., Tolppanen, P. & Hansen, J.: Backfilling and Closure of the Deep Repository, Assessment of Backfill Concepts, Working Report 2003-77, POSIVA, Olkiluoto 2004.
- /4-6/ Gunnarsson, D., Morén, L., Sellin, P. & Keto, P.: Deep Repository – Engineered Barrier Systems, Assessments of Backfill Materials and Methods for Deposition Tunnels, Working Report 2006-64, POSIVA, Olkiluoto 2007.
- /4-7/ Keto, P. & Rönqvist, P.-E.: Backfilling of Deposition Tunnels, Block Alternative, Working Report 2006-89, POSIVA, Olkiluoto 2007.
- /4-8/ Keto, P.: Backfilling of Deposition Tunnels, In Situ Alternative, Working Report 2006-90, POSIVA, Olkiluoto 2007.
- /4-9/ Lempinen, A.: Swelling of the Buffer of KBS-3V Deposition Hole, Working Report 2006-77, POSIVA, Olkiluoto 2007.
- /4-10/ Vieno, T. & Ikonen, A.T.K. 2005. Plan for Safety Case of spent fuel repository at Olkiluoto. POSIVA Oy, Olkiluoto, Finland. POSIVA 2005-01.
- /4-11/ King, F. 2002. Corrosion of copper in alkaline chloride environments. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB); Stockholm, Sweden. SKB Technical Report TR-02-25.
- /4-12/ POSIVA Oy : Safety Case Plan 2008. POSIVA Oy, Olkiluoto, Finland. POSIVA 2008-05.
- /4-13/ Carlsson, T. & Muurinen, A.: Copper Corrosion in Bentonite: Studying of Parameters (ph, Eh/D2) of importance for Cu Corrosion. Working Report 2007-62, POSIVA, Olkiluoto 2007.
- /4-14/ Suikki, M. & Wendelin, T.: A Welding System for Spent Fuel Canister Lid. Working Report 2008-04, POSIVA, Olkiluoto 2008.
- /4-15/ Ikonen, K. : Mechanical analysis of cylindrical part of canisters for spent nuclear fuel. POSIVA Oy, Olkiluoto, Finland. POSIVA Working Report 2005-12.
- /4-16/ Nilsson, K.-F., Lofaj, F., Burström, M. & Andersson, C.-G.: Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm, Sweden. SKB Technical Report TR-05-18, 2005.
- /4-17/ Gatabin, C., Guyot, J.L., Resnikow, S., Bosgiraud, J.M., Londe, L. & Seidler, W.: From Bentonite Powder to EB units: an industrial process. Industrial Technical conference on the practical aspects of deep geological disposal of radioactive waste. Prague, Czech republic, June 16-18, 2008.

- /4-18/ Toguri, S., Asano, H., Takao, H., Matsuda, T. & Amesmiya, K.: Full-Scale demonstration of EBS construction technology, (I) Block, pellet and in-situ compaction method. Industrial Technical conference on the practical aspects of deep geological disposal of radioactive waste. Prague, Czech Republic, June 16-18, 2008.
- /4-19/ Asano, H., Toguri, S., Iwata, Y., Kawakami, S., Nagasawa, Y. & Yoshida, T.: Full-Scale demonstration of EBS construction technology, (II) Design, manufacturing and transportation of prefabricated EBS module (PEM). Industrial Technical conference on the practical aspects of deep geological disposal of radioactive waste. Prague, Czech Republic, June 16-18, 2008.
- /4-20/ Pettersson, S.: Air / water cushion technology. Technology Related to Deep Geological Disposal of High Level Long Lived Radioactive Waste (ESDRED). European Commission, Bucharest 2006.
- /4-21/ Pusch, R., Börgesson, L. & Ramqvist, G. 1985. Final Report of the Buffer Mass Test –Volume II: test results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). SKB, Stripa Project 85-12.
- /4-22/ Rautio, T. 2006. Borehole plugging experiment in OL-KR24 at Olkiluoto, Finland. POSIVA Oy, Eurajoki, Finland. POSIVA Working Report 2006-35.

Schweden

- /4-23/ 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
- /4-24/ Evaluation of SKB R&D Programme 89. The National Board for Spent Nuclear Fuel, Dnr 93/89, March 1990.
- /4-25/ 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
- /4-26/ Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. SKB Technical Report, TR 93-04.
- /4-27/ Autio J, Saunio T, Tolppanen P, Raiko H, Vieno T and Salo J-P. Assessment of alternative disposal concepts. POSIVA 96-12.
- /4-28/ Sandstedt H, Munier R and Pers K. Project Jade. Comparison of repository systems. SKB Technical Report, TR-01-17.
- /4-29/ Pettersson S et al. Research, development and demonstration programme for a KBS-3 repository with horizontal emplacement. SKB Report R-01-55 (in Swedish).
- /4-30/ 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
- /4-31/ Deep repository for spent nuclear fuel. SR-97 -Post closure safety. Main report Volume I and Volume II. SKB TR-99-06, November 1999

- /4-32/ Wiborgh M.: Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. SKB Technical Report, TR-99-28.
- /4-33/ Pettersson S. et al. Research, development and demonstration programme for a KBS-3 repository with horizontal emplacement. SKB Report R-01-55
- /4-34/ 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.
- /4-35/ Gunnarsson, D., Börgesson, L., Keto, P., Oy, S.R., Tolppanen, P., Infra, J.P., Hansen, J.: Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. SKB R-04-53, Juni 2004
- /4-36/ 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.
- /4-37/ Johannesson, L.E., Nilsson, U.: Deep repository – engineered barrier systems. Geotechnical behaviour of candidate backfill materials. Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. SKB R-06-73, November 2006.
- /4-38/ Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-18, September 2006.
- /4-39/ Interim main report of the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-04-11, August 2004.
- /4-40/ FEP report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-20, 2006.
- /4-41/ Initial state report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-21, 2006.
- /4-42/ Handling of future human actions in the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-24, 2006.
- /4-43/ Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-22, 2006.
- /4-44/ Data report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-25, 2006.
- /4-45/ Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-23, 2006.
- /4-46/ Geosphere process report for the safety assessment SR-Can. SKB Technical report TR-06-19, 2006.
- /4-47/ ESDRED; <http://www.esdred.info/>
- /4-48/ Gunnarsson, D., Johannesson, L.-E., Sandén, T., & Börgesson, L.: Field Test of tunnel Backfilling.- SKB HRL-96-28, 1996

- /4-49/ Gunnarsson, D., Johannesson, L.-E. & Börgesson, L.: Backfilling of the tunnel in the prototype repository. Results of pre-tests. Design of material, production, technique and compaction technique.- SKB IPR-01-11, 2001.
- /4-50/ Gunnarsson, D., Börgesson, L., Hökmark, H., Johannesson, L.-E. & Sandén, T.: Report on the installation of the backfill and plug test.- SKB IPR-01-17, 2001.
- /4-51/ Gunnarsson, D. & Börgesson, L.: Development of equipment, material and technique for backfilling tunnels in a nuclear waste disposal. Clays in Natural and Engineered Barriers for Nuclear Waste Confinement. International meeting in Reims 9-12 December 2002,. ANDRA. Abstracts, poster session – Laboratory Experiments, P-LE-04, P. 273-274, 2002.

Deutschland

- /5-1/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) – zuletzt geändert durch das Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität vom 22. April 2002 (BGBl. 2002 I S. 1351).
- /5-2/ Engelmann H.-J., Lommerzheim A., Biurrun E., Hubert R., Pöhler M.: „Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers“, DEAB T 57; DBE Februar 1995.
- /5-3/ J. Ziegenhagen et al.: „Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager (Z2.2.7/WS 1006/8489-2)“, Abschlußbericht, Mai 2005.
- /5-4/ Filbert, W; Engelmann, H.-J., Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben; Abschlussbericht, Rev. 01, DBE, Peine, 1998.
- /5-5/ Bechthold, W. (editor) Thermal simulation of drift emplacement (TSS) – Summary of interim results; Forschungszentrum Karlsruhe, September 1997.
- /5-6/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. Rdschr.d.BMI v.20.04.1983-RS-AGK 3-515 790/2.
- /5-7/ Lommerzheim, A.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Abschlussbericht zu AP9: Genehmigungstechnische Aspekte. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine 2008.
- /5-8/ Müller-Hoeppe, N., Jobmann, M., Polster, M., Schmidt, H.: The Role of Structural Reliability of Geotechnical Barriers of an HLW/SF Repository in Salt Rock within the Safety Case. OECD/NEA Symposium on Safety Cases for the Deep Disposal of Radioactive Waste – Where do we stand ?” Paris, 23.-25.01.2007.
- /5-9/ Müller-Hoeppe, N.: Backfilling and Sealing of Salt Repositories: Technical and Safety Aspects. IAEA/ITC/DBE TECHNOLOGY Workshop “Deep Geological Repositories in sedimentary Environments, Peine, 24.-27.09.2007.

- /5-10/ Kreienmeyer, M., Lerch, Ch., Polster, M., Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). AP 5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ 02 E 10065, Peine, April 2008.
- /5-11/ Mauke, R.; Müller-Hoeppe, N.; Wollrath, J.: Planning, Assessment and Construction of a Drift Seals in a Salt Repository – Overview of Investigations, Engineered Barrier Systems in the Context of the Entire Safety Case (EBS), OECD/NEA Workshop Proc. Sept. 12-15, 2006, Tokyo, Japan
- /5-12/ Wagner, K.: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2005.
- /5-13/ Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL). Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ 02 E 10065 + 02 E 10055, Peine, April 2008.
- /5-14/ BMU: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – Entwurf vom 29. Juli 2008, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anlage_1_2008_jul_entwurf_bmu.pdf
- /5-15/ Heller, W.: Neue Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung. atw 53.Jg. (2008), Heft 8/9, S. 568, Berlin 2008.
- /5-16/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M., 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. DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ 02 E 10065, Peine, April 2008.
- /5-17/ Hampel, A.: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Forschungszentrum Karlsruhe 2007.
- /5-18/ European Commission: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project) – Final Report. Nuclear Science and Technology, EUR 19124 EN. Luxembourg 1999.
- /5-19/ European Commission: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project) – Final Report. Nuclear Science and Technology, EUR 20621 EN. Luxembourg 2004.
- /5-20/ Rothfuchs, T. et al.: The DEBORA-Project : Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste – Phase II – Final Report. GRS-161, Braunschweig 1999.
- /5-21/ Wagner, K.: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. Dissertation TU Freiberg 2005.
- /5-22/ Kudla, W. & Gruner, M.: Streckenverschlüsse: Konzepte und Materialien. In: Untertägige Entsorgung, 7. Statusgespräch, Karlsruhe, 03-04.05.2006, Wiss. Berichte FZK-PTE Nr. 9, S. 1-22, Karlsruhe 2006.

- /5-23/ Herbert, H.-J. et al.: Alteration of non-metallic Barriers and evolution of solution chemistry in salt formations in Germany.- In: Engineered Barrier systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case: Process Issues, Workshop Proceedings, Las Vegas, NV/USAE, 14-17 September 2004. Paris: OECD/NEA, 2005, S. 111-123.
- /5-24/ Sitz, P. et al.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Verschlussbauwerkes unter realen Bedingungen. Abschlussbericht. BMBF-Vorhaben 02C05472 und 02C0902, 2003.
- /5-25/ Sitz, P.: Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten. Bergbaukolloquium Freiberg, Bergbau 11/2001.
- /5-26/ Breidung, K.P.: Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, Kali und Salz AG, Bad Salzdetfurth, 2002.
- /5-27/ Rauche et al.: Closure of the Morsleben Repository – Conceptual Design and Safety Proof of Shaft Sealing Systems. Poster. DISTEC 2004 Conference, Berlin, 26.-28. April 2004.
- /5-28/ Bodenstein et al.: Zehn Jahre Schachtverwahrung im Südharz-Kalirevier, Erfahrungen aus der Sicht von Planung und Ausführung. Glückauf 138, 4/2002, Essen 2002.