

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

***Internationale Endlagerkonzepte
im Wirtsgestein Ton (A1)***

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Dezember 2004

Projektleiter: W. Filbert
DBE TECHNOLOGY GmbH

Zusammengestellt von: W. Filbert

Bearbeiter: E. Biurrun
W. Filbert
J. Ziegenhagen
DBE TECHNOLOGY GmbH

L. Fleckenstein
M. Hampe
J. Kutowski
Deutsche Gesellschaft zum
Bau und Betrieb von Endlagern
für Abfallstoffe mbH (DBE)

DBE TECHNOLOGY GmbH

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

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

Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (GEIST)“ wurde ein Endlagerkonzept im Tongestein entworfen und dem für Steinsalz vorliegenden Konzept gegenübergestellt. Dabei wurden die charakteristischen Unterschiede zwischen einem generischen Endlager für hochaktive Abfälle im Salz und einem in Tongestein herausgearbeitet. Insbesondere wurden die Besonderheiten des Wirtsgesteins Ton hinsichtlich der Technik, der Sicherheit und der Kosten analysiert und offene Fragen identifiziert. Die Gegenüberstellung konzentrierte sich auf den Bereich des Endlagers. Im vorliegenden Anlagenband A1 der Studie wurden zum Thema internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung fanden dabei die zugrundeliegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweiskonzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierbarkeit der Endlager.

Belgien

In Belgien werden 7 Kernkraftwerksblöcke an 2 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallsspektrum ist mit dem deutschen vergleichbar. Je nach Endlagerszenarium sind entweder nur verglaste Abfälle oder verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente werden jeweils einzeln in einen dünnwandigen Overpack endlagergerecht verpackt. Belgien betreibt ein Untertagelabor in Boom-Ton im SCK/CEN Nuclear Research Center in Mol. Das dort durchgeführte Forschungsprogramm soll die Machbarkeit und die Langzeitsicherheit der Endlagerung in geologischen Formationen demonstrieren. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder für verglaste Abfälle und für ausgediente Brennelemente in einer Teufe von 230 m zwischen 2 Zugangsschächten vor. Das Endlager wird der Neigung 1°- 2° der Tonformation folgend ausgerichtet. Die Einlagerung der Endlagergebäude erfolgt in horizontalen bentonitummantelten Stahlröhren in mit Betonformsteinen ausgebauten runden Strecken. Die Auslegung erfolgt auf der Basis des Temperaturkriteriums von 100 °C, das im als technische Barriere eingesetzten Verfüllmaterial Bentonit nicht überschritten werden darf. Der Nachweis der Langzeitsicherheit erfolgt schrittweise und iterativ. Hierzu werden Szenarien entwickelt und bewertet. Ausgegangen wird von den Szenarien „normale Entwicklung des Endlagers“ als Referenzszenarium und „gestörte Entwicklung des Endlagers“. Die Sicherheitsbewertung für das Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers beruht auf der Berechnung der Individualdosis einer kritischen Gruppe und auf die Bewertung von Sicherheitsindikatoren. Die Szenarien zur gestörten Entwicklung werden z. Zt. untersucht. Der Betriebsbeginn des Endlagers wird nach 50 – 60 Jahren Abkühlzeit für wärmeentwickelnden HAW und die ausgedienten Brennelemente für das Jahr 2035 angestrebt.

Schweiz

In der Schweiz werden 5 Kernkraftwerksblöcke an 4 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Es sind sowohl verglaste Abfälle als auch ausgediente Brennelemente endzulagern. Die verglasten Abfälle und die ausgedienten Brennelemente sollen in massive Endlagerbehälter mit verschweißtem Deckel endlagergerecht verpackt werden. Seit 1988 wird in der Schweiz als Alternative zum Wirtsgestein Granit der Opalinuston untersucht. Hierzu wurde am Mont Terri, Kanton Jura ein Unterlagelabor parallel zu einem Autotunnel errichtet und der Opalinuston im Züricher Weinland untersucht. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 650 m, erreichbar über einen Schacht und eine Rampe, vor. Die Einlagerungstrecken werden mit einer Neigung von ca. 7° folgend der Tonformation errichtet. Die Einlagerung der Endlagergebäude erfolgt in mit Ankern und Netzen gesicherten runden Einlagerungstrecken. Die Endlagergebäude werden mit Bentonit umgeben. Die Auslegung erfolgte auf der Basis der Einhaltung eines 100 °C Kriteriums im Wirtsgestein. Hinsichtlich des Sicherheitsnachweiskonzepts ist die Einhaltung der Prinzipien der Endlagerung sowie der Schutzziele zu jeder Stufe des Bewilligungsverfahrens (Rahmen-, Bau-, Betriebs- und Verschlussbewilligung) mit entsprechenden Sicherheitsanalysen nachzuweisen. Mit den Sicherheitsanalysen ist darzulegen, welche Vorgänge und Ereignisse auf das Endlagersystem im Laufe der Zeit einwirken könnten, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen abzuleiten. Vorgänge und Ereignisse mit extremer Unwahrscheinlichkeit und solche, die bedeutend schwerwiegendere nicht-radiologische Konsequenzen haben, sowie absichtliche menschliche Eingriffe in das Endlagersystem brauchen in der Sicherheitsanalyse nicht betrachtet zu werden. Der Betriebsbeginn des Endlagers wird um das Jahr 2050 als erforderlich angesehen.

Frankreich

In Frankreich werden 59 Kernkraftwerksblöcke an 19 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Die Menge der Abfälle ist deutlich größer. Je nach dem, wie intensiv wieder aufgearbeitet wird, schwankt je nach Endlagerszenarium der Anteil an endzulagernden verglasten Abfällen bzw. ausgedienten Brennelementen. Verglaster Abfall und ausgediente Brennelemente werden in Primärbehälter verpackt. Die Primärbehälter werden wiederum in Endlagerbehälter (Overpacks) zur Erreichung der Endlagerfähigkeit eingebracht. Seit 1999 wird ein Untertagelabor in Bure (Department Haute-Marne) errichtet. Die Forschungsstätte wird auf der 490 m-Sohle im Callov-Oxford-Ton errichtet. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von ca. 485 m verbunden über mehrere Schächte und eine Rampe mit den Tagesanlagen vor. Die runden Einlagerungstrecken werden mit einem Metallrohr stabilisiert. In das Metallrohr werden Bentonitringe eingebracht, in denen wiederum ein inneres Metallrohr eingebracht wird. Dieses

innere Rohr wird mit Endlagergebinden befüllt. Auch hier werden zur Auslegung 100 °C als Grenztemperatur angenommen. Im Sicherheitsnachweiskonzept soll durch qualitative und quantitative Sicherheitsanalysen nachgewiesen werden, dass das gewählte Endlagerkonzept den Anforderungen an den Schutz der Menschen und der Umwelt über die gesamte Dauer der Existenz des Endlagers gerecht wird. Dabei wird auch ein Referenzszenarium der ungestörten Entwicklung und ein verändertes Szenarium der gestörten Entwicklung, verursacht durch zerstörende Ereignisse oder Phänomene betrachtet. Für eine Realisierung des geologischen Endlagers liegt zur Zeit noch kein Terminplan vor.

Spanien

In Spanien werden 9 Kernkraftwerksblöcke an 7 Standorten betrieben. Das entstehende Abfallspektrum ist auch dort mit dem deutschen vergleichbar. Es sind auch hier verglaste Abfälle sowie ausgediente Brennelemente in Overpacks endzulagern. Die Endlagerkonzeption sieht Einlagerungsfelder in einer Teufe von 250 m vor, erreichbar über 3 Schächte und eine Rampe. Verglaste Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken mit einem Durchmesser von 2,4 m endgelagert. Die festgelegte Grenztemperatur für das Verfüllmaterial ist 100 °C. Die Endlagerstrecke wird mit Bentonitblöcken ausgebaut und in die zentrale Position ein Einlagerungsrohr zur Befüllung mit den Endlagergebinden eingebracht. 2010 wird das spanische Parlament auf der Basis bis zu diesem Zeitpunkt erreichter Forschungsergebnisse entscheiden, wie mit den Abfällen verfahren wird. Zu Planungszwecken wird von einer Inbetriebnahme des Endlagers im Jahre 2035 ausgegangen. Die Bestimmung eines Standortes oder die Festlegung einer Wirtsformation wird zur Zeit nicht durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einleitung	10
2	Belgien	13
2.1	Endlagerszenarien	13
2.1.1	Endlagerszenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“	15
2.1.2	Endlagerszenarium „Direkte Endlagerung“	15
2.2	Behälterkonzepte und -materialien	16
2.2.1	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	16
2.2.2	Endlagerbehälter für HAW aus der Wiederaufarbeitung	18
2.3	Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall	21
2.4	Einlagerungskonzepte	22
2.5	Beschreibung des Forschungsstandortes Hades	23
2.5.1	Geologische Situation	24
2.5.2	Hydrogeologie	29
2.5.3	Petrographie	30
2.5.4	Erkundungsmethoden und Forschungsarbeiten	31
2.6	Endlagerauslegung/-technik	40
2.6.1	Endlagerung verglaster HAW	41
2.6.2	Endlagerung ausgedienter Brennelemente	42
2.6.3	Einlagerungstechnologie	46
2.6.4	Verfüll- und Verschlusskonzept	48
2.6.5	Auffahrtechnik	50
2.6.6	Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik	52
2.7	Sicherheitsnachweiskonzept	54
2.7.1	Temperaturkriterium	54
2.7.2	Bewertung der Langzeitsicherheit	56
2.8	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	60
2.9	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	60
3	Schweiz	62
3.1	Endlagerkonzept	64
3.2	Endlagerbehälter für HAW und MAW aus der Wiederaufarbeitung und ausgediente Brennelemente	64
3.3	Einlagerungskonzepte	67
3.4	Basisdaten des Forschungsstandortes Mont Terri	73
3.4.1	Geologische Situation	73
3.4.2	Petrographie	74
3.4.3	Mineralogie	77
3.4.4	Erkundungsmethoden und Forschungsarbeiten	77
3.4.5	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	82

3.5	Projekt Züricher Weinland, Bohrung Benken	83
3.6	Endlagerauslegung/-technik	83
3.6.1	Einlagerungstechnologie	83
3.6.2	Verfüll- und Verschlusskonzept	84
3.6.3	Auffahrtechnik	84
3.6.4	Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik	85
3.7	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	85
3.8	Sicherheitsnachweiskonzept	85
3.9	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	86
4	Frankreich	87
4.1	Endlagerszenarien	88
4.2	Behälterkonzepte und -materialien	94
4.2.1	Behälter für Abfallkategorie CU - Brennelemente	95
4.2.2	Behälter für Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle	97
4.3	Endlagerkonzept	100
4.3.1	Endlagerung Abfallkategorie C (verglaster HAW)	103
4.3.2	Endlagerung Abfallkategorien CU1 und CU2 (ausgedienter Kernbrennstoff)	105
4.4	Beschreibung des Forschungsstandortes in Bure/Haute Marne	107
4.4.1	Geologische Situation	108
4.4.2	Petrographie und Petrophysikalische Eigenschaften des Tonschiefers der Callov-Oxford Stufe	110
4.4.3	Erkundungsmethoden und geplante Forschungsarbeit	113
4.5	Einlagerungstechnologie	119
4.5.1	Einlagerung von Gebinden Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle	120
4.5.2	Einlagerung von Gebinden Abfallkategorie C – Ausgediente Brennelemente	121
4.6	Verfüll- und Verschlusskonzept	121
4.7	Auffahrtechnik und Errichtung der Einlagerungsstrecken bzw. –zellen	122
4.8	Terminplan für die Realisierung des Endlagers	123
4.9	Sicherheitsnachweiskonzept	123
4.10	Kosten und wesentliche Kostenfaktoren	125
5	Spanien	126
5.1	Endlagerinventar	127
5.2	Behälterkonzepte und -materialien	129
5.2.1	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	129
5.2.2	Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle	132
5.2.3	Abschirmbehälter	133
5.3	Endlagerkonzept	134
5.4	Verfüll- und Verschlusskonzepte	135

6	Literaturverzeichnis	137
7	Abbildungsverzeichnis	145
8	Tabellenverzeichnis	147
9	Abkürzungsverzeichnis	149
10	Verzeichnis der Anlagenbände	150

1 Einleitung

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

Untersuchungen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salz werden in der Bundesrepublik Deutschland seit mehr als 30 Jahren durchgeführt. Im Rahmen einer Vorstudie fasste das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie 1979 den bis dahin vorliegenden Kenntnisstand zur Direkten Endlagerung zusammen. In dem auf diesen Ergebnissen aufbauenden Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt Andere Entsorgungstechniken wurde in den Jahren 1981 bis 1984 ein technisches Konzept für die Direkte Endlagerung entwickelt und ein umfassender Vergleich der beiden Entsorgungswege mit und ohne Wiederaufarbeitung angestellt. Die Bundesregierung entschied auf Grundlage der dabei erzielten Ergebnisse, die Arbeiten zur Direkten Endlagerung bis zur Anwendungsreife weiterzuführen. In diesem Zusammenhang wurden von 1985 bis 1993 sowohl Demonstrationsvorhaben als auch systemanalytische Arbeiten durchgeführt. Während in den Demonstrationsversuchen technische Komponenten entwickelt und erprobt wurden, dienten die Systemanalyse Mischkonzept (SAM) /1-1/ und die Systemanalyse Endlagerkonzepte (SEK) /1-2/ dazu, für unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen vollständige Entsorgungssysteme zu erarbeiten und hinsichtlich Sicherheit, technischer Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu bewerten.

Seit 1979 wurde der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Endlager für alle Arten fester radioaktiver Abfälle untersucht. Über zwei Schächte und entsprechende Strecken wurde der Salzstock in 840 m Teufe bis zum Moratorium im Jahr 2000 großräumig erschlossen und geowissenschaftlich erkundet. Nach Feststellung der Eignung aufgrund der Erkundung sollte sich das atomrechtliche Genehmigungsverfahren mit dem Ziel der Errichtung und des Betriebes des Endlagers anschließen. Um dieses Ziel wirksam erreichen zu können, war es erforderlich, ein Konzept für eine durchzuführende Planung zu erstellen. Das Planungskonzept sollte parallel zur untertägigen Erkundung des Salzstockes durchgeführt werden und die Grundlage für standortspezifische Sicherheitsanalysen, die für den Eignungsnachweis des Salzstockes notwendig sind, bilden.

Ende der 90er Jahre wurde spezifisch für den Standort Gorleben auf Basis der bis dahin bekannten Erkundungsergebnisse und einer präzisierten Abfallprognose bis 2080 eine Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorleben /1-3/ erarbeitet. Insofern liegen Untersuchungs- und Planungsergebnisse für ein Endlager im Salz in einem hinrei-

chenden Tiefgang vor, der für eine vergleichende Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in anderen geologischen Formationen erforderlich ist.

Zielsetzung des nachfolgend beschriebenen Vorhabens ist es, die Grundlagen für eine Gegenüberstellung eines generischen Endlagers im Salz und eines im Tongestein unter vergleichbaren Randbedingungen zu schaffen. Dazu sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Konzepte herauszuarbeiten und ihre Auswirkungen in Bezug auf Sicherheit, technische Machbarkeit und Kosten etc. zu analysieren. Ausgehend von dieser allgemeinen Zielsetzung wurden umfangreiche Planungen und Untersuchungen durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse in einem zusammenfassenden Hauptband /1-4/ und 6 Anlagenbänden (A1 – A6) dargestellt.

Um einen Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton zu ermöglichen, wurde zunächst das deutsche technische Endlagerkonzept in Salz (Stand 1998) zusammenfassend dargestellt. Beschrieben wurde das zugrundegelegte Abfallmengenszenarium, die berücksichtigten Behälterkonzepte, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerflächenbedarf und Anforderungen an Verfüllmaßnahmen und -materialien sowie Verschlussmaßnahmen. Zur Aufstellung eines technischen Endlagerkonzeptes im Wirtsgestein Ton wurden danach die dazu vorhandenen bergmännischen Erfahrungen bei der Streckenauffahrung und beim Bohren ausgewertet, das Abfallmengenszenarium 2002 dargestellt, Behälterkonzepte und -materialien international und national ausgewertet, Endlagerauslegungen für POLLUX-Behälter, HAW- und Brennstabkokillen durchgeführt sowie ein Verfüll- und Verschlusskonzept aufgestellt. Der Vergleich der beiden technischen Endlagerkonzepte erfolgte in den Bereichen Bergbau in den Wirtsgesteinen, Endlagerbehälterkonzepte, erforderliche Endlagerflächen, Verfüll- und Verschlusskonzept sowie Kosten (Anlagenband 2) /1-5/.

Betrachtungen zur Sicherheit in der Betriebsphase wurden thematisch für den betrieblichen Strahlenschutz, hinsichtlich der Kritikalität beim Endlagerkonzept im Ton und für Safeguardsmaßnahmen in der Betriebsphase durchgeführt. Als eine erste Grundlage für die Einlagerungstechnologie wurde eine Abschirmrechnung für eine mit Bentonit ummantelte HAW-Kokille durchgeführt (Anlagenband 3) /1-6/.

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

Ein Vergleich der Wirtsgesteine Ton/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens schließen das Vorhaben ab. Darin enthalten sind die Anforderungen an ein Wirtsgestein, die geologische Situation im Süddeutschen Molassebecken und in der Norddeutschen Senke, die

Evaporitgesteine in der Norddeutschen Senke, Mineralogie, Temperaturumfeld der Gesteine und ihre Explorierbarkeit. (Anlagenband 5) /1-8/.

Auswirkungen auf den Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers haben die wesentlichen Unterschiede des chemisch/mineralischen Stoffbestandes und damit die Materialeigenschaften der Wirtsgesteine Salz und Ton. So sind bei der Endlagerung im Ton zusätzlich chemische Rückhaltemechanismen wie die Sorption von Radionukliden zu betrachten. Im Ton sind des Weiteren Prozesse nicht auszuschließen, die das Rückhaltevermögen chemischer Barrieren und die Abdichtfunktion hydraulischer Barrieren beeinflussen können. Darüber hinaus werden die chemisch/mineralogischen Charakteristika von Evaporit- und Tonsedimenten sowie von Verfüll- und Abdichtmaterialien beschrieben (Anlagenband 6) /1-9/.

Im vorliegenden Anlagenband 1 „Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton“ werden die veröffentlichten internationalen Überlegungen und konzeptionellen Ansätze für ein Endlager im Tongestein für die Länder Belgien, Schweiz, Frankreich und Spanien zusammengestellt. Berücksichtigung finden dabei die zugrundeliegenden Endlagerszenarien, Behälterkonzepte und Materialien, radiologische und thermische Basisdaten, Einlagerungskonzepte, Endlagerauslegung und -technik, Sicherheitsnachweiskonzepte sowie Terminpläne und Kostenansätze für die Realisierbarkeit der Endlager.

2 Belgien

2.1 Endlagerszenarien

Der belgische Nuklearsektor besteht aus folgenden Unternehmen bzw. Institutionen /2-1/:

- sieben KKW-Blöcke in Doel and Tihange mit einer Gesamtleistung von 5,7 GW_e ,
- zwei Betriebe für die Produktion von UO₂- bzw. MOX- Brennelementen (Franco-Belge de Fabrication de Combustible International und Belgonucleaire),
- Zentrale Verarbeitungsanlage für radioaktive Abfälle – Belgoprocess
- Wiederaufarbeitungsanlage Eurochemic. Diese Anlage wurde 1974 stillgelegt und wird gegenwärtig demontiert.
- Kernforschungsinstitut (Studie Centrum voor Kernenergie-Centre d'Etudes Nucleaires) mit einem graphitmoderierten Reaktor (BR1), einem Material-Test-Reaktor (BR2) und einem Druckwasserreaktor (BR3), der 1986 stillgelegt wurde und gegenwärtig demontiert wird.
- Unternehmen für die Produktion von Radioisotopen – (Institut des RadioElements)
- Instituut voor Referentiematerialen en Metingen, das von der EU betrieben wird,
- eine Reihe von Universitäten und andere Forschungseinrichtungen,
- Unternehmen und Institutionen der Medizin und Pharmazie
- Andere Unternehmen und Institutionen, die hauptsächlich Strahlenquellen nutzen.

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

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

Ende 1993 hat die belgische Regierung entschieden, dass sowohl die Wiederaufarbeitung, als auch die direkte Endlagerung von ausgedientem Kernbrennstoff als gleichwertige Optionen für die Endlagerung zu betrachten sind /2-2/. 1998 wurde von der belgischen Regierung ein Moratorium für die Fortführung der Wiederaufarbeitung von ausgedientem Kernbrennstoff verhängt /2-3/.

Seit Mitte der 70iger Jahre werden in Belgien Untersuchungen zur Eignung von tiefen Tonformationen für die Endlagerung von hoch- und mittelaktiven radioaktiven Abfällen durchgeführt. Als Referenzformation für die Endlagerung hoch- und mittelaktiver und langlebiger radioaktiver Abfälle wurde die Tertiär - Boom - Tonformation am Standort Mol-Dessel ausgewählt, wo seit 1984 das Untertagelabor HADES (High-Activity Disposal Experimental Site) in Betrieb ist.

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

Die Ergebnisse der zweiten Etappe der Endlagerforschung 1990 – 2000 wurden in dem Bericht SAFIR 2 zusammengefasst /2-4/, /2-5/.

Das belgische Endlagerkonzept berücksichtigt zwei Optionen der Kernbrennstoffstrategie:

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

Beide Optionen beruhen auf den gleichen Basisannahmen:

- Die sieben KKW-Blöcke werden nach einer Betriebszeit von je 40 Jahren stillgelegt
- Die Anreicherung des Kernbrennstoffes beträgt für Uran-Brennelemente 4% ²³⁵U und für MOX-Brennelemente 4,93% ²³⁹Pu+²⁴¹Pu.
- Der Referenzabbrand beträgt 45 GWd/tSM bzw. $45 \cdot 10^9$ Wd je Tonne Schwermetall (Uran oder MOX-Elemente)

Unter diesen Annahmen wurde die Gesamtmenge des Kernbrennstoffes auf 4.860 tSM eingeschätzt, zu der ca. 70 tSM der MOX-Elemente hinzuzuzählen sind.

Die Hauptkenndaten der Brennelemente sind in Tabelle 2-1 aufgeführt /2-4/

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

Tabelle 2-1: Belgien - Brennelementedaten

2.1.1 Endlagerszenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“

In der Option „Komplette Wiederaufarbeitung“ werden die in Tabelle 2-2 aufgeführten Gebindeanzahlen und -volumen berücksichtigt.

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

Tabelle 2-2: Belgien - Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“

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

2.1.2 Endlagerszenarium „Direkte Endlagerung“

In der Option „Direkte Endlagerung“ werden die in Tabelle 2-3 aufgeführten Gebindeanzahlen und -volumen berücksichtigt.

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

Tabelle 2-3: Belgien – Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Direkte Endlagerung“

2.2 Behälterkonzepte und -materialien

2.2.1 Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Für die Option der direkten Endlagerung des ausgedienten Kernbrennstoffes wurden Konzepte für die Zwischenlagerung und Konditionierung der Brennelemente einschließlich MOX-Brennelemente entwickelt /2-1/. Die Konzeption des Endlagerbehälters ist auf der Abbildung 2-1 gezeigt. Es ist vorgesehen, jeweils ein Brennelement in einem dünnwandigen Behälter endzulagern.

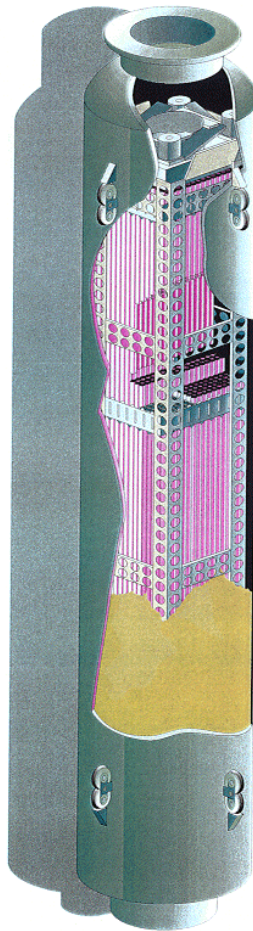


Abbildung 2-1: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

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

Auf Grund der unterschiedlichen Abmessungen der Brennelemente der belgischen Kernkraftwerke (s. Tabelle 2-1) wird die Länge der Endlagerbehälter unterschiedlich sein. Nach den vorliegenden Angaben /2-4/ kann die maximale Länge eines Behälters bei 5,1 m liegen (Abbildung 2-2).

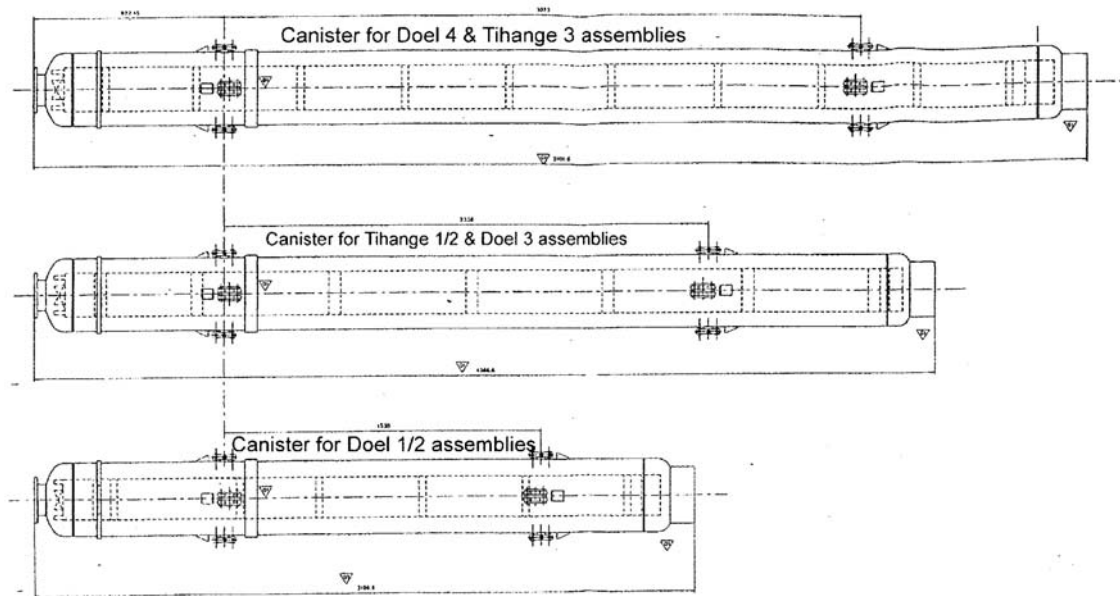


Abbildung 2-2: BE-Endlagerbehälter

In /2-5/ sind folgende Daten des geplanten Endlagerbehälters für die Brennelemente der KKW Tihange 1/2 und Doel 3 aufgeführt:

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

2.2.2 Endlagerbehälter für HAW aus der Wiederaufarbeitung

Alle Behälter mit HAW sollen in einen wasserdichten HAW-Endlagerbehälter verpackt werden /2-3/, /2-5/. Dieser Endlagerbehälter wird neben der Bentonitverfüllung der Einlagerungsstrecken als die entscheidende technische Barriere betrachtet /2-6/. So soll die Integrität des Behälters mindestens für die sogenannte Heizperiode - Zeit, in der die Aufwärmung des Nahfeldes mehr als 10 K gegenüber der Temperatur der ungestörten Formation beträgt - erhalten bleiben. Die Zeitdauer dieser Periode wird für verglaste Abfälle mit ca. 300 Jahren und für ausgediente Brennelemente mit ca. 2000 Jahren angegeben /2-4/, /2-7/.

Die Kenndaten des HAW-Endlagerbehälters sind folgende /2-4/, /2-6, /2-7/:

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

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

Der Behälter ist an den Enden mit jeweils vier Rollen im Abstand von 90° ausgerüstet, zur Führung dienen und das Einbringen in das Einlagerungsrohr im Endlager erleichtern (s. Abbildung 2-3). An einem Ende des Behälters ist ein Haltekopf montiert.

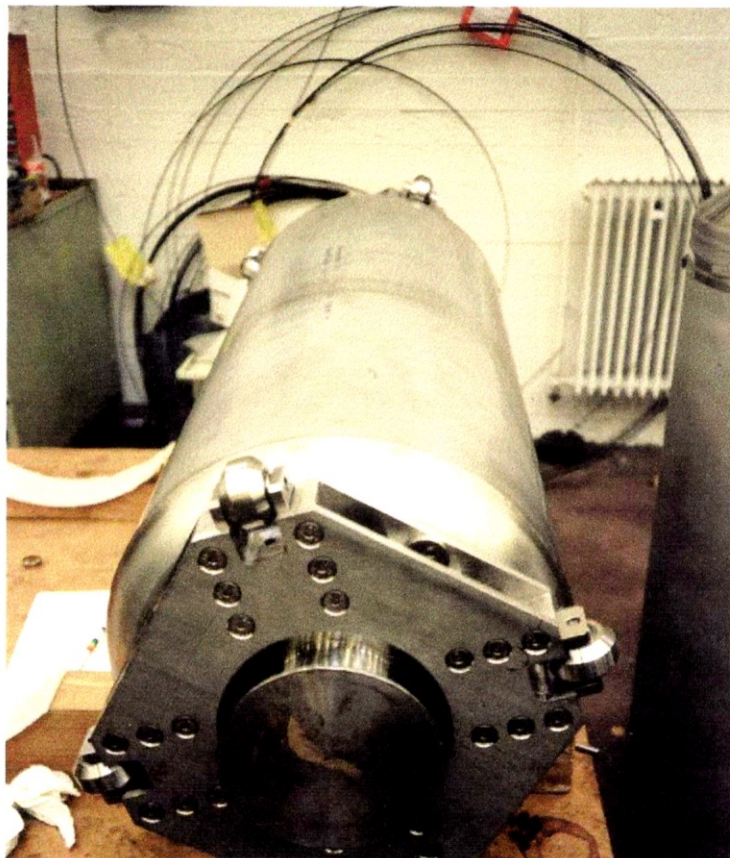


Abbildung 2-3: Modell eines HAW-Endlagerbehälters

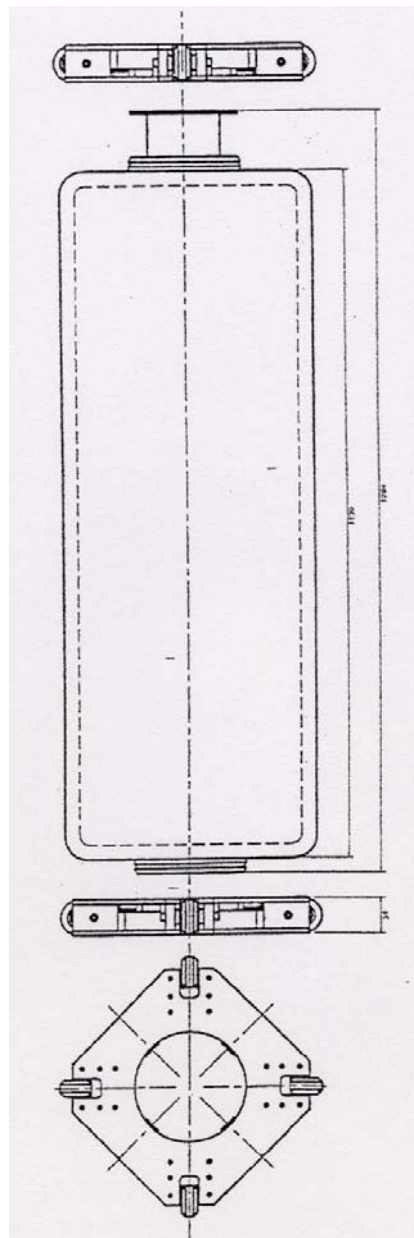


Abbildung 2-4.: Endlagerbehälter für Primärbehälter mit verglasten HAW

Zum Einsatz in diesen Behältern sind folgende Gebinde vorgesehen

- HAW- und CSD-C-Kokillen

Da die Wiederaufarbeitung auch bei der COGEMA stattfindet, ist die HAW-Kokille identisch mit der im Anlagenband 2 Kapitel 2.2.2.3 beschriebenen /2-4/, /2-6/.

Verglaster flüssiger HAW aus der Wiederaufarbeitung Eurochemic /2-3/, /2-5/ wird in folgende Endlagerbehälter verpackt.

- Austenitstahlfässer 60 l
 - Material: Austenitstahl AISI 316Lti
 - Außendurchmesser: 298,5 mm
 - Wandstärke: 8 mm
 - Gesamthöhe: 1200 mm
 - Innenvolumen: 0,06 m³
 - Transportvolumen: 0,07 m³
- Austenitstahlfässer 150 l
 - Material: Austenitstahl AISI 316Lti
 - Außendurchmesser: 430 mm
 - Wandstärke: 5 mm
 - Gesamthöhe: 1346 mm
 - Innenvolumen: 0,15 m³
 - Transportvolumen: 0,195 m³
- Zementierter fester HAW aus der Wiederaufarbeitung Eurochemic in Austenitstahlfässer 150 l
 - Material: Austenitstahl AISI 316Lti
 - Außendurchmesser: 430 mm
 - Wandstärke: 5 mm
 - Gesamthöhe: 1346 mm
 - Innenvolumen: 0,15 m³
 - Transportvolumen: 0,195 m³

2.3 Radiologische und thermische Basisdaten für hochaktiven Abfall

In Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 sind die Gebinde für beide Szenarien mit Wärmeleistungen ≥ 20 W zum Zeitpunkt der Konditionierung aufgeführt.

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

Tabelle 2-4: Belgien - Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“

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

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

Tabelle 2-5: Belgien – Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Direkte Endlagerung“

2.4 Einlagerungskonzepte

Seit den 70iger Jahren wurden in Belgien verschiedene Endlagerkonzepte in geologischen Formationen betrachtet. Dabei vollzog sich eine Entwicklung von der in anfänglichen Studien betrachteten Bohrlochlagerung (PAGIS) zur Streckenlagerung /2-3/. Die gegenwärtige Referenzkonzeption geht von einer Endlagerung in Strecken in einem geologischen Endlager in einer Boom-Ton-Formation am Standort Mol-Dessel aus. Dieses Konzept liegt der nachfolgenden Beschreibung zu Grunde.

Entsprechend den zwei Optionen des Kernbrennstoffkreislaufes (siehe Kapitel 2.1.1) sieht auch das Endlagerkonzept zwei Optionen vor:

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

Als Randbedingung für die Endlagerung gilt für beide Optionen „Die maximale Temperatur im Verfüllmaterial auf Tonbasis, dass als technische Barriere eingesetzt wird, darf

bei wärmeentwickelnden Abfällen 100 °C nicht überschreiten“ /2-7/ (siehe Kapitel 2.7.1). Die Einhaltung dieser Randbedingung kann durch folgende Faktoren gewährleistet werden:

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

Aus thermischen Berechnungen wurde bestimmt, dass die o. g. Randbedingung für das Referenzendlager für verglaste HAW bei einer maximalen Wärmeleistung pro Behälter von 400 W eingehalten werden kann, was einer Abkühlzeit vor Endlagerung von 60 Jahren entspricht /2-7/.

2.5 Beschreibung des Forschungsstandortes Hades

Die HADES Underground Research Facility (URF) ist Teil des SCK/CEN Nuclear Research Center in Mol. Sie liegt im Norden Belgiens, etwa 50 km östlich von Antwerpen. HADES ist ein interdisziplinäres Programm, das die Machbarkeit und die Langsicherheit von Endlagerung in geologischen Formationen demonstrieren soll. Das Programm ist nach den nationalen Belangen Belgiens, die von der NIRAS/ONDRAF definiert wurden, ausgerichtet. Das HADES-Programm wird seit 1975 von der EU unterstützt. Daher stehen die technischen Einrichtungen allen EU-Mitgliedern für experimentelle und wissenschaftliche Untersuchungen offen. Die URF besteht aus 4 Teilen:

- ein übertägiges Betriebsgelände auf einer Fläche von 0,5 ha,
- ein 229 m tiefer Schacht mit 2,65 m Durchmesser,
- ein 32 m langes Untertage-Labor mit 22 m tiefem Experimentierschacht und
- eine 7 m lange Strecke sowie
- einer 62 m langen Test-Strecke.

Es wird eine Verbindungsstrecke zu einem zweiten abgeteuften Schacht aufgeföhren (s. Abbildung 2-5).

Das Schachtteufen des ersten Schachtes erfolgte im Gefrierverfahren im Jahre 1980. Der Schacht ist mit Betonformsteinen („cast in-situ-concrete) ausgebaut. Das Untertage-Labor wurde 1982 ebenfalls im Gefrierverfahren aufgeföhren und mit Gußeisen-Segmenten (cast iron segments) ausgebaut. Der Experimentierschacht und die 7 m lange Experimentierstrecke (Innendurchmesser jeweils 1,4 m) wurden in den Jahren 1982 bis 1984 im nichtgeföhrenen Gebirge erstellt und mit 300 mm dicken Betonblöcken, die durch 8 mm dicke Holzplatten voneinander getrennt sind ausgebaut. 1987 wurde die sog. Test-Strecke (Innendurchmesser 3,5 m) ebenfalls im nichtgeföhrenen Gebirge aufgeföhren. Die letzten 12 m dieser Strecke (sog. ANDRA-Strecke) wurden

mit Gleitbogenausbau erstellt. Die übrige Strecke wurde mit 600 mm starken Betonblöcken ausgebaut. In den Jahren 1997 bis 1999 wurde ca. 150 m entfernt vom ersten Schacht ein zweiter Schacht geteuft. Die Erstellung der Verbindungsstrecke und der geplanten „Praclay Strecke“ sind Bestandteil des PRACLAY-Projektes (s. Kap. 2.5.4)

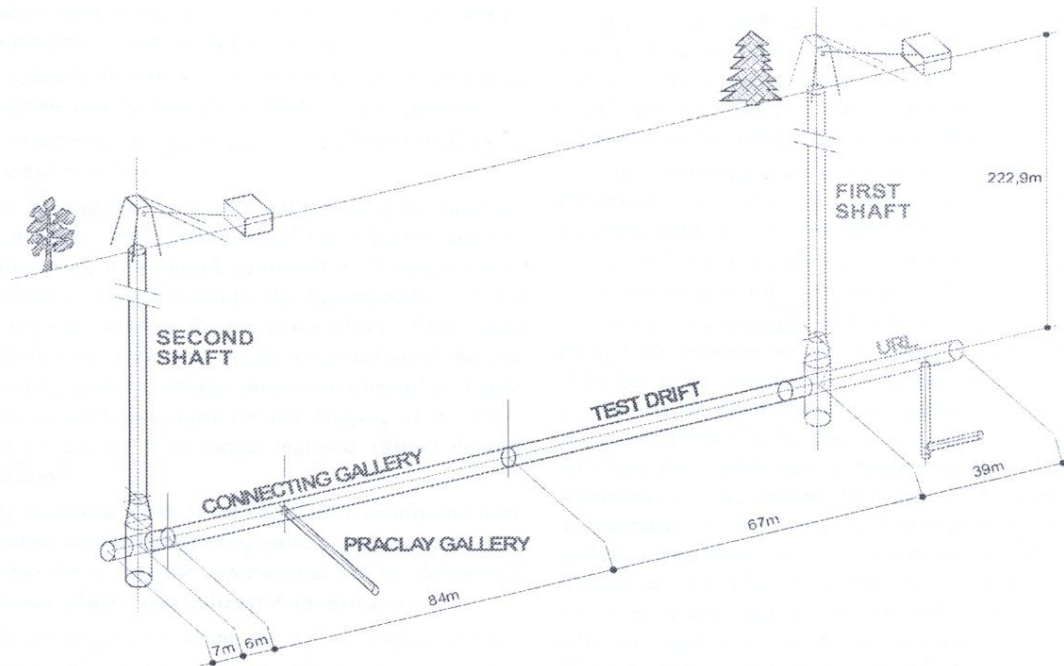


Abbildung 2-5: Übersicht über die HADES - URF in Mol, Belgien

2.5.1 Geologische Situation

Der Boom clay /2-8/ gehört stratigraphisch dem mittel-oligozänen Rupelium an. Er ist mit dem Septarien-Ton (auch als Rupel-Ton bezeichnet) Norddeutschlands zu korrelieren. Die Ablagerungen des Rupeliums erstrecken sich fast über den gesamten Bereich der heutigen Nordsee, des südlichen Dänemarks, Norddeutschlands bis nach Polen hinein. Nach Süden hin wird das Verbreitungsgebiet des Rupeliums durch die variszisch gefalteten Gebirge begrenzt.

In nördlichen Belgien reicht das Sedimentationsbecken des Boom clay von der Schelde-Mündung im Westen bis zur Meuse im Osten. Südlich der Linie Antwerpen – Maastrecht streicht der Boom clay zu Tage aus. Dieser Ausstrich wird im Gebiet Diest-Aarchot durch einen Erosionskanal unterbrochen. Dieser Erosionskanal ist im Miozän entstanden und lässt sich auf einen starken küstenparallelen Gezeitenstrom zurückführen (s. Abbildung 2-6). Der Boom clay fällt mit etwa 1 Gon nach Nordosten ein. Die Mächtigkeit nimmt ebenfalls nach Nordosten zu und erreicht im Gebiet um Mol ca. 100 m (s. Abbildung 2-7).

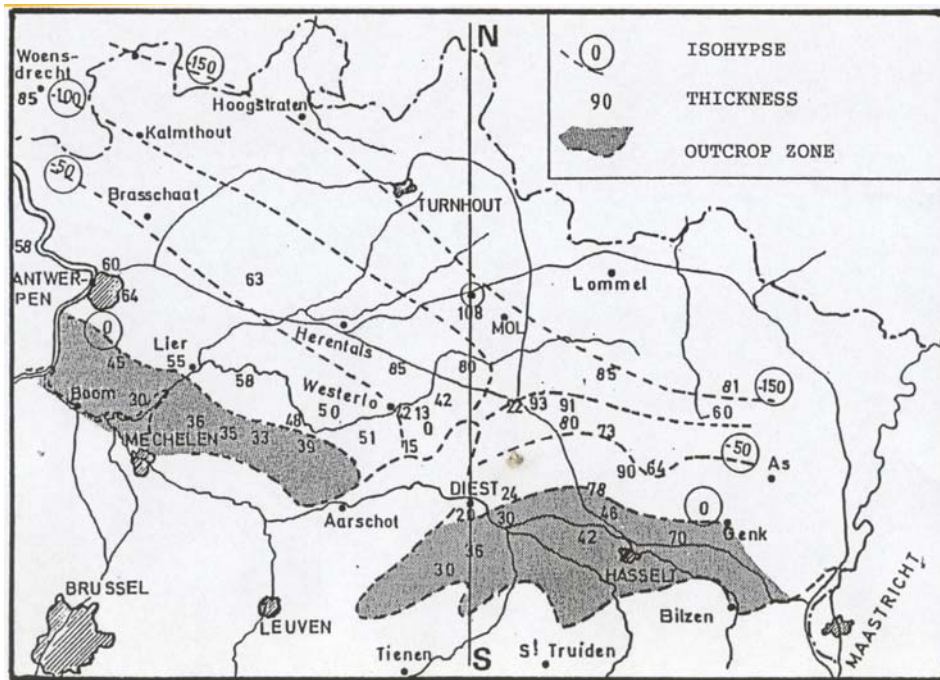


Abbildung 2-6: Ausstrich, Tiefenlage und Mächtigkeit des Boom clay in Nördlichen Belgien. Im Gebiet von Diest/Aarschot ist der Boom clay während des Miozäns erodiert worden.

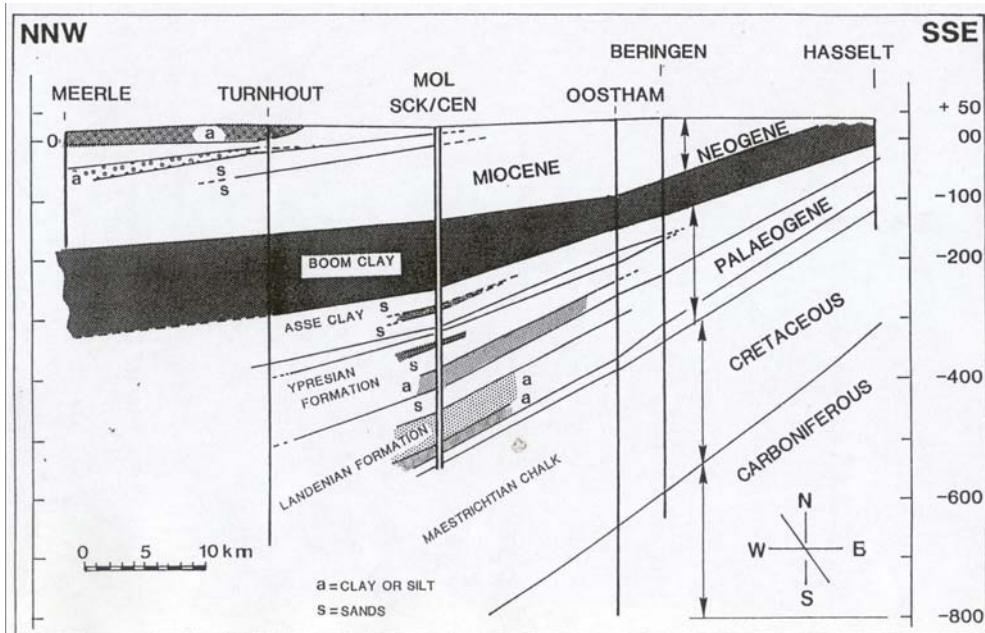


Abbildung 2-7: NNW – SSE Profil durch Nord-Belgien

In Mol liegt das Top des Boom clays in einer Tiefe von 168 m unter Gelände. Unterlagert wird der Boom clay von den Berg-Sanden, die am Standort als Feinsand bis Schluff ausgebildet sind und ebenfalls ins Rupelium gestellt werden. Über dem Boom clay stehen die ca. 20 m mächtigen Feinsande der Eigenbilzen Formation des Ober-Oligozäns an. Darüber folgt die ebenfalls als Feinsand ausgebildete Berchem Formation des Neogens.

Der Boom clay ist ein marines Sediment, das sich lithostratigraphisch in drei Untereinheiten (member) gliedern lässt. Die Basis bildet der ca. 10 m mächtige Belsele Waas Member, der einen höheren Schluffanteil hat und durch zwei dicke Schluffbänder charakterisiert werden kann. Horizonte mit organischen Bestandteilen fehlen in diesem Schichtglied. Der mittlere Teil des Boom clay wird durch den ca. 19 m mächtigen Terhagen Member repräsentiert. Diese Untereinheit ist weniger schluffig und weist zwei schwarze Bänder auf, die sehr reich an organischem Material sind. Darüber folgt der Putte Member, der durch eine rhythmische Schichtung mit schluffigen Horizonten und schwarzen Bändern, die ebenfalls sehr reich an organischem Material sind. Zum Boom clay zählt auch noch eine ca. 10 - 20 m mächtige Übergangszone (transition zone) zu den überlagernden Sanden. In dieser Übergangszone findet ein allmählicher Übergang von tonigen zu sandigen Sedimenten statt (s. Abbildung 2-8).

Neben den bereits erwähnten schwarzen bituminösen Lagen treten im Boom clay auch einige karbonatreiche Horizonte mit Septarienbildung (Kalkkontretionen) auf.

Östlich der Linie Genk – Tilburg in den Niederlanden sind eine Reihe von Verwerfungen im paläozoischen Untergrund und in den jüngeren Deckschichten festzustellen. Die Haupttrichtung dieser Störungen verläuft SSE-NNW und ist an den Roermond Graben und den Peel Horst gebunden, die eine Verlängerung des Rheingrabens darstellen. Die wichtigsten Störungen in diesem Gebiet sind die Feldbiss-, Rotem-Heerleheide-, Reusel-, Hoge Mierde- und Poppel-Störung, von denen sich die Hoge Mierde-Störung durch die Störung von Rauw nach Belgien hinein verlängert und ca. 8,5 km östlich des Standortes Mol liegt (s. Abbildung 2-9). An dieser Störung lässt sich in den pliozänen bis pleistozänen Mol-Sanden ein Versatzbetrag von 25 m nachweisen. Auch die Störungen von Poppel und Reusel scheinen sich nach Belgien hinein zu verlängern. Das Gebiet von Mol weist eine sehr geringe Seismizität auf. Etwa 80 km östlich des Standortes liegt die Erdbeben Zone von Roermond, die auch in jüngster Zeit aktiv ist. Verantwortlich dafür ist die Peelrand Störung zwischen dem Roermond Graben und dem Peel Horst. Das letzte Erdbeben fand hier am 13.04.1992 statt und erreichte eine Magnitude von 5,6 auf der Richter-Scala. Das Epizentrum lag etwa 10 km nördlich von Roermond.

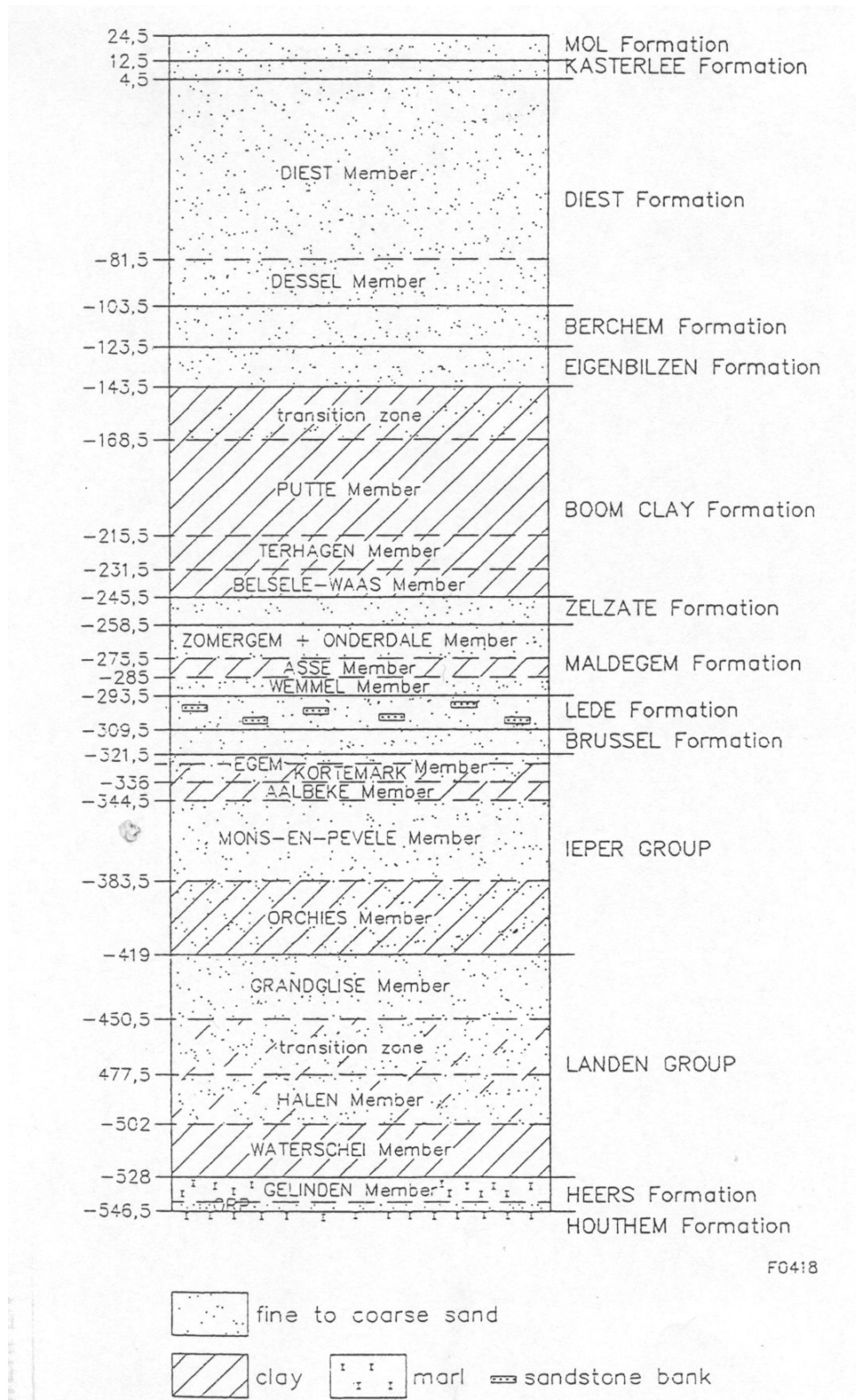


Abbildung 2-8: Lithologische Abfolge der Sedimente am Standort Mol

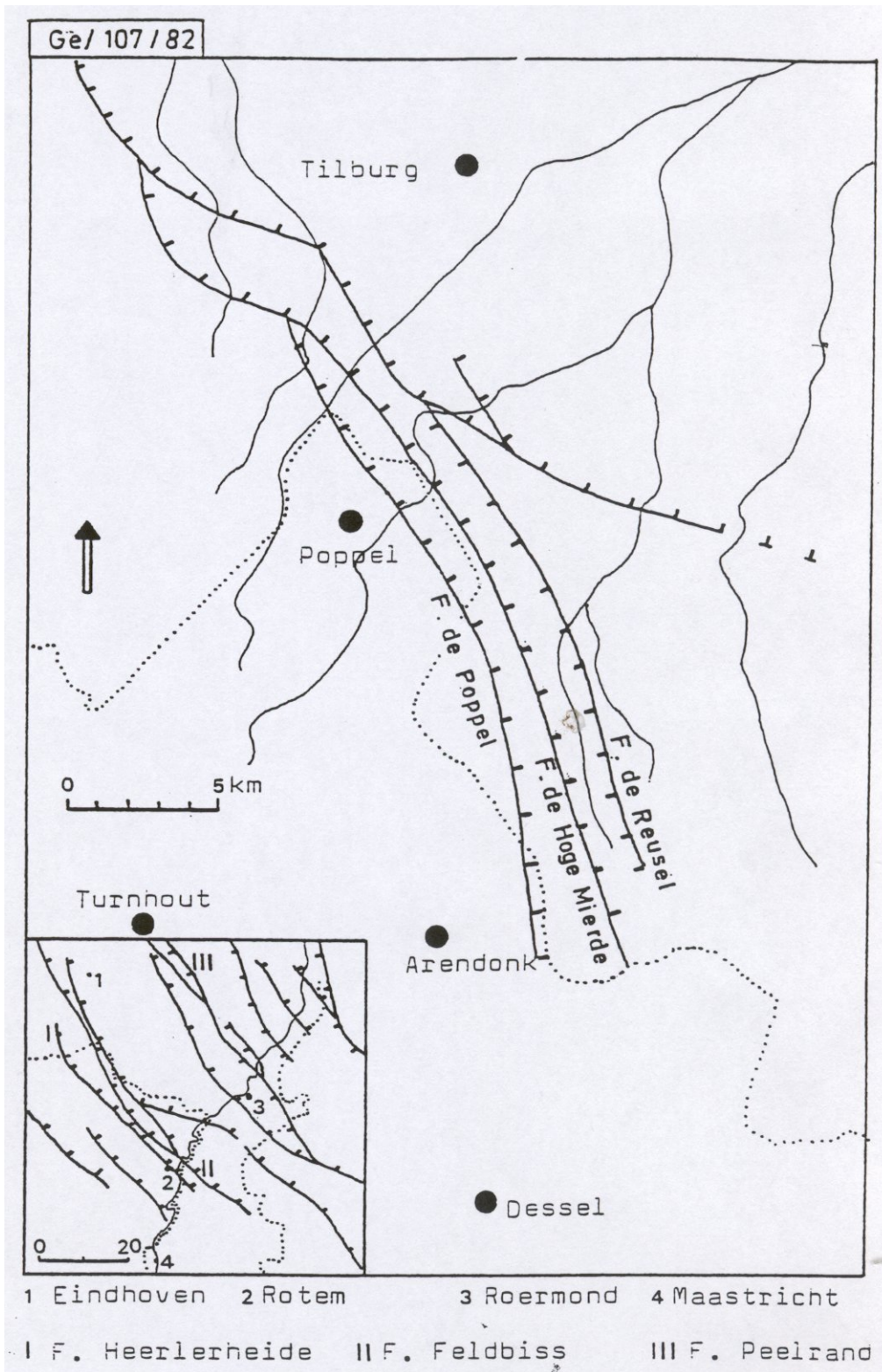


Abbildung 2-9: Störungen in den südlichen Niederlanden, die wahrscheinlich nach Belgien hineinreichen.

2.5.2 Hydrogeologie

Hydrogeologisch lassen sich im nördlichen Belgien 3 Grundwasser-Stockwerke nachweisen (s. Abbildung 2-10).

- a) Die jungtertiären Sande von Mol und Kasterlee (phreatisches Grundwasser) sowie die miozänen Sande, die direkt auf dem Boom clay abgelagert worden sind (artesisches Grundwasser). Die phreatischen Grundwasserhorizonte entwässern nach Westen in Richtung auf den Vorfluter der Schelde. Die miozänen Sande sind in der Gegend von Antwerpen ein wichtiges Trinkwasserreservoir.
- b) Die Berg-Sande unterhalb des Boom clay.
- c) Die Lede-Brüssel-Sande, die von den Berg-Sanden durch den Asse-Ton als Grundwassergeringleiter getrennt sind. Die Berg und die Lede-Brüssel-Sande streichen etwa 50 km südlich von Mol zu Tage aus. Beide Horizonte werden zurzeit für die Trinkwassergewinnung wenig genutzt, zumal bei größerer Tiefe auch der Salzgehalt ansteigt.

Es sollte erwähnt werden, dass durch das Auskeilen des Asse-Tones nach Osten und die miozäne Erosion des Boom clay in der Region von Diest hier alle drei Grundwasser-Stockwerke miteinander verbunden sind.

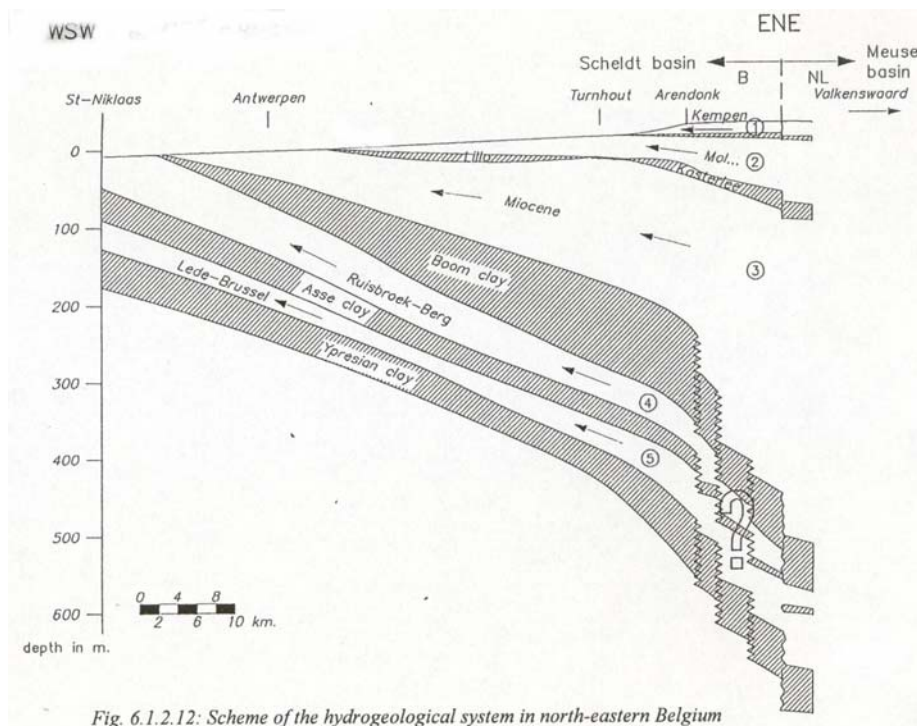


Fig. 6.1.2.12: Scheme of the hydrogeological system in north-eastern Belgium

Abbildung 2-10: Grundwasserstockwerke in Nordost-Belgien

2.5.3 Petrographie

Im Folgenden ist die Petrographie des Boom Clay aufgeführt.

Die Mineralogische Zusammensetzung des Boom Clay /2-9/ besteht aus:

- 20 – 30 % Illit
- 20 – 30 % Kaolinit
- 10 – 20 % Smectit
- 5 – 20 % Chlorit
- 5 – 10 % Mixed-Layer-Mineralen (Interstratified)

Assesзорisch kommen folgende Minerale vor: Quarz (bis 20 %), Feldspat (1 - 5 %), Carbonate (1 – 5 %), Pyrit (1 - 5 %), Organischer Kohlenstoff (1 - 5 %), sowie Septarien.

Die Korngrößenverteilung des Boom Clay besteht zu

- 50 – 60 % aus Ton,
- 40 – 45 % aus Feinschluff,
- 2 – 7 % aus Mittelschluff.

Der Anteil der Fraktion über 200 µm liegt bei 0,5 – 1 %.

Der Wassergehalt schwankt zwischen 22 und 27 % (bezogen auf die Trockendichte). Die Porosität beträgt 33 bis 40 % bei einem Sättigungsgrad von 95 bis 100 %. Die hydraulische Leitfähigkeit beträgt horizontal 4×10^{-12} m/s und vertikal 2×10^{-12} m/s. Der Boom Clay hat eine Dichte von 1,9 bis 2,1 g/cm³. Die thermische Leitfähigkeit beträgt 1,69 W/m/K.

Atterberg-Konstanten:

- Fließgrenze (Liquidity limit): 70 – 83 %
- Ausrollgrenze (Plasticity limit): 25 – 28 %
- Plastizitätszahl (Plasticity index): 42 – 58 %.

Auf Grund der lithologischen Charakteristika und geotechnischen Bedingungen des Boom clays lassen sich 3 Zonen unterscheiden (Basis: Proben einer geotechnischen Bohrung):

	I_p [%]	γ_d [kN/m ³]	γ_h [kN/m ³]	W [%]	W_L [%]
BK 1 (-209 bis – 229 m)	16,1	19,7	22,7	79,6	52,0
BK 2 (-229 bis – 242 m)	15,7	19,4	24,0	80,9	52,9
BK 3 (-242 bis – 277 m)	16,5	20,1	21,7	77,2	50,7

γ_d = Trockendichte

γ_h = Feuchtdichte

w = Wassergehalt

w_L = Fließgrenze

I_p = Plastizitätsindex

2.5.4 Erkundungsmethoden und Forschungsarbeiten

Übertägig wurde seit 1981 zur Datensammlung und Ergänzung des regionalen hydrogeologischen Modells ein Pegel-Netz im Gebiet von Antwerpen bis östlich von Mol mit monatlichem Messzyklus eingerichtet.

– Mine-by Test:

Das Ziel des Mine-by Tests /2-10/, /2-11/ war die Ermittlung der Auflockerungszone sowie Wechselwirkung zwischen Ausbau und Ton mit allen entsprechenden zeitabhängigen Prozessen.

Bereits während der Auffahrungsphase der URL wurden einige in-situ Versuche durchgeführt. Während der Erstellung des Experimentierschachtes und der Experimentierstrecke mit reduziertem Durchmesser wurde nachgewiesen, dass die Auffahrung im Boom clay im ungefrorenen Zustand möglich ist. Zur Überwachung der Gebirgsbewegungen wurden im Experimentierschacht Konvergenzmessungen, Inklinometermessungen und Extensometermessungen durchgeführt. Außerdem wurden im Gebirge hydraulische Zellen zur Ermittlung des Gesamtdruckes und im Ausbau Druckkissen eingebaut. Vor der Erstellung der Experimentierstrecke wurde vom URL eine Bohrung mit 5 Extensometern installiert, um die Gebirgsbewegungen über der aufzufahrenden Strecke zu messen.

Durch die Auffahrung der Test-Strecke wurde demonstriert, dass unter dieser Bedingung auch eine Auffahrung in vollem Querschnitt unter Kostengesichtspunkten möglich ist. Die Auffahrleistung bei der Test-Strecke betrug 1 m in 4 Tagen /2-12/. Vor der Auffahrung wurden zur Messung der Vertikalbewegungen oberhalb der geplanten Test-Strecke eine Vielzahl von Inklinometern und „hydraulic settlement gauges“ eingebaut. Unterhalb der Test-Strecke wurden Piezometer eingebaut.

Ergebnis: Mehr als 50 % der kurzzeitigen Vertikalbewegungen erfolgten, als die Ortsbrust sich in Höhe der jeweiligen Messpunkte befand. Die Bewegungen setzten ein, als sich die Ortsbrust in einer Entfernung von 3xTunnelradius vor dem Messpunkt befand und erreichte ihr Maximum bei der gleichen Entfernung (3xTunnelradius) hinter der Ortsbrust.

Einige der Ausbau-Ringe wurden mit folgender Messanordnung instrumentiert, um die Konvergenz im Innenausbau zu ermitteln:

	Load cells	Pressure cells	Flat jacks	Konvergenzbolzen
Ring 15	2 x 2	6	-	16
Ring 29	4x2	12	-	16
Ring 43	2x2	6	6	16
Ring 52	-	-	-	16
Ring 71	3x2	6	-	8
Ring 83	3x2	6	-	8
Ring 105	3x2	6	-	8

Eine Ergebnisdarstellung erfolgt in Abbildung 2-11.

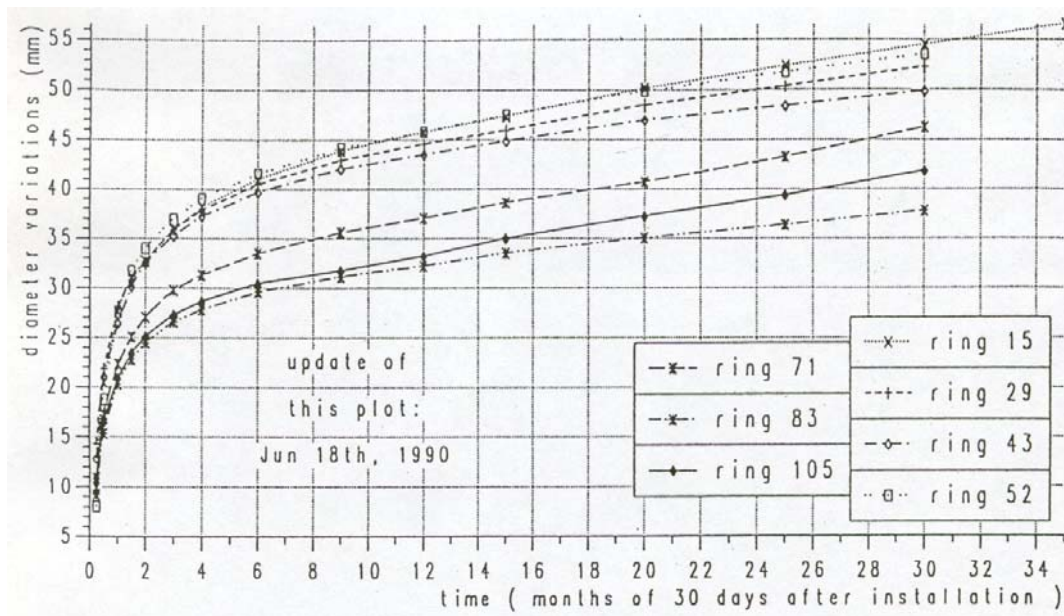


Abbildung 2-11: Durchschnittliche Konvergenz von 7 Ringen in der Test-Strecke

Der Porendruck, der durch die Piezometer aufgezeichnet worden ist, verminderte sich, als die Ortsbrust den Messpunkt erreichte. Der Porendruck stieg danach teilweise we-

gen der Auflast des Innenausbaus, teilweise wegen der Porendruck „dissipation“ im Ton wieder an. Eine Ergebnisdarstellung erfolgt in Abbildung 2-12.

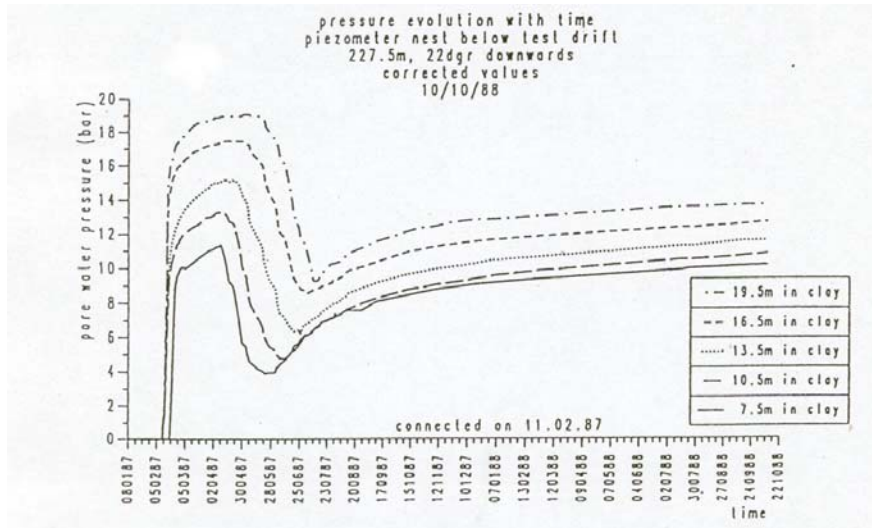


Abbildung 2-12: Veränderung des Porenwasserdruckes während der Auffahrung der Test-Strecke

An Probenkörpern, die während der Auffahrung gewonnen wurden, wurden triaxiale Druckversuche durchgeführt.

- In-situ Korrosionsexperimente
Um die Wechselwirkung zwischen Boom clay und den Komponenten der Abfallbehälter zu untersuchen, sind mehrere Proben verschiedener Materialien im Ton eingebaut worden.
- BACCHUS (BACKfill Control experiment with Hydration for the Underground Storage of radioactive waste)
Das BACCHUS-Experiment /2-13/ diente ebenso wie CACTUS und CERBEUS der Untersuchung des thermo-mechanischen Verhalten des Boom clay. Ziel dieser Testes war die Ermittlung des Verhaltens des Tones aufgrund thermischer Beeinflussung durch wärmeentwickelnde Abfälle und die Validierung und Kalibrierung numerischer Modelle. Die wesentlichen Parameter, die gemessen werden sind: Temperatur, Dichte, Wassergehalt, Permeabilität, Porenwasserdruck, Gesamtspannung und Gebirgsbewegungen. Eine Zusammenstellung der eingesetzten Messinstrumente ist in Tabelle 2-6 enthalten.

Table 1
Summary of instrumentation

	BACCHUS	CERBERUS	CACTUS 1
Total stress	1 SMS (5 Glötzl) cells	4 piezoelectrical transducers KISTLER 2 SMS (2 × 4 Glötzl) cells	2 SMS (2 × 5 Glötzl) cells
Pore water pressure	10 piezo screens	21 piezo screens	5 piezo screens
Water content	TDR probe neutron/gamma probe		Neutron/gamma probe
Density	Neutron/gamma probe		Neutron/gamma probe
Temperature	36 pt100 sensors	34 thermocouples 12 pt100 sensors	40 pt100 sensors
Displacements			Extensometer

Tabelle 2-6: Zusammenstellung der Messinstrumente der thermo-mechanischen in-situ Versuche BACCHUS, CERBERUS und CACTUS /2-14/.

Beim BACCHUS-Versuch wurde um das Heizelement kompaktiertes Versatzmaterial auf Ton-Basis eingebaut, um neben dem Verhalten des Boom clay auch den thermischen und hydraulischen Transfer durch ein hochkompaktiertes Material zu untersuchen (s. Abbildung 2-13).

- CERBERUS (Control Experiment with Radiation for the Belgian Repository for a Underground Storage):
Ziel des Cerberus-Testes /2-9/, /2-10/ war es, die Effekte im Nahfeld zu simulieren, die durch die Einlagerung eines HAW-Behälters nach 50 Jahren Abkühlung entstehen.

Dazu wurde eine Co60-Quelle und 3 Heizelemente in einem 4,5 m tiefen Bohrloch unter der Test-Strecke eingebaut (s. Abbildung 2-14). Untersucht werden sollte der Temperatur- und Porenwasserdruckanstieg der durch die Wärmeentwicklung hervorgerufen wurde. Außerdem sollte die Veränderung der pH/Eh-Werte untersucht werden, die durch die Oxidation des Tones bei den Bohrarbeiten, dem Einbringen der Testanordnung und der Entstehung von Radiolyse-Produkten entsteht. Darüber hinaus sollte die Entwicklung des Verhaltens der technischen Barrieren untersucht werden, die sich durch die Beeinflussung der in-situ-Bedingungen ergibt.

- CACTUS (ChAracterization of Clay under Thermal loading in Underground Storage) /2-15/:
Beim CACTUS-Experiment wurde der Spalt zwischen Heizelement und Bohrlochwand mit Schlamm (Boom clay Pulver und Wasser) gefüllt. Diese Mischung ist im Referenzkonzept zwar nicht als Verfüllmaterial vorgesehen, aber damit sollte versucht werden das Heizelement möglichst in direkten Kontakt mit dem umgebenden Wirtsgestein zu bringen.

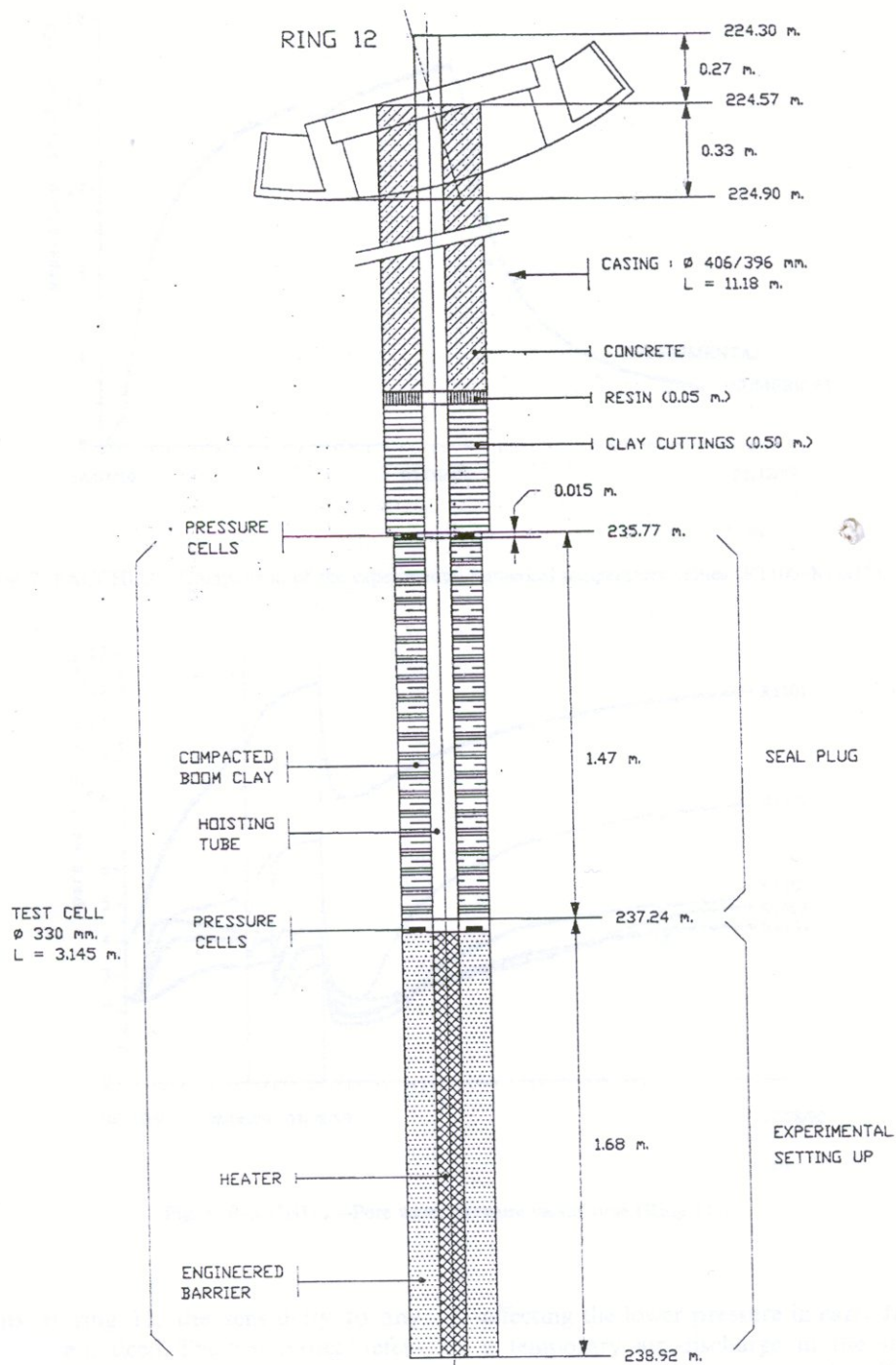


Fig. 1. BACCHUS—Lay-out of the test.

Abbildung 2-13: Versuchsanordnung des Bacchus-Experimentes

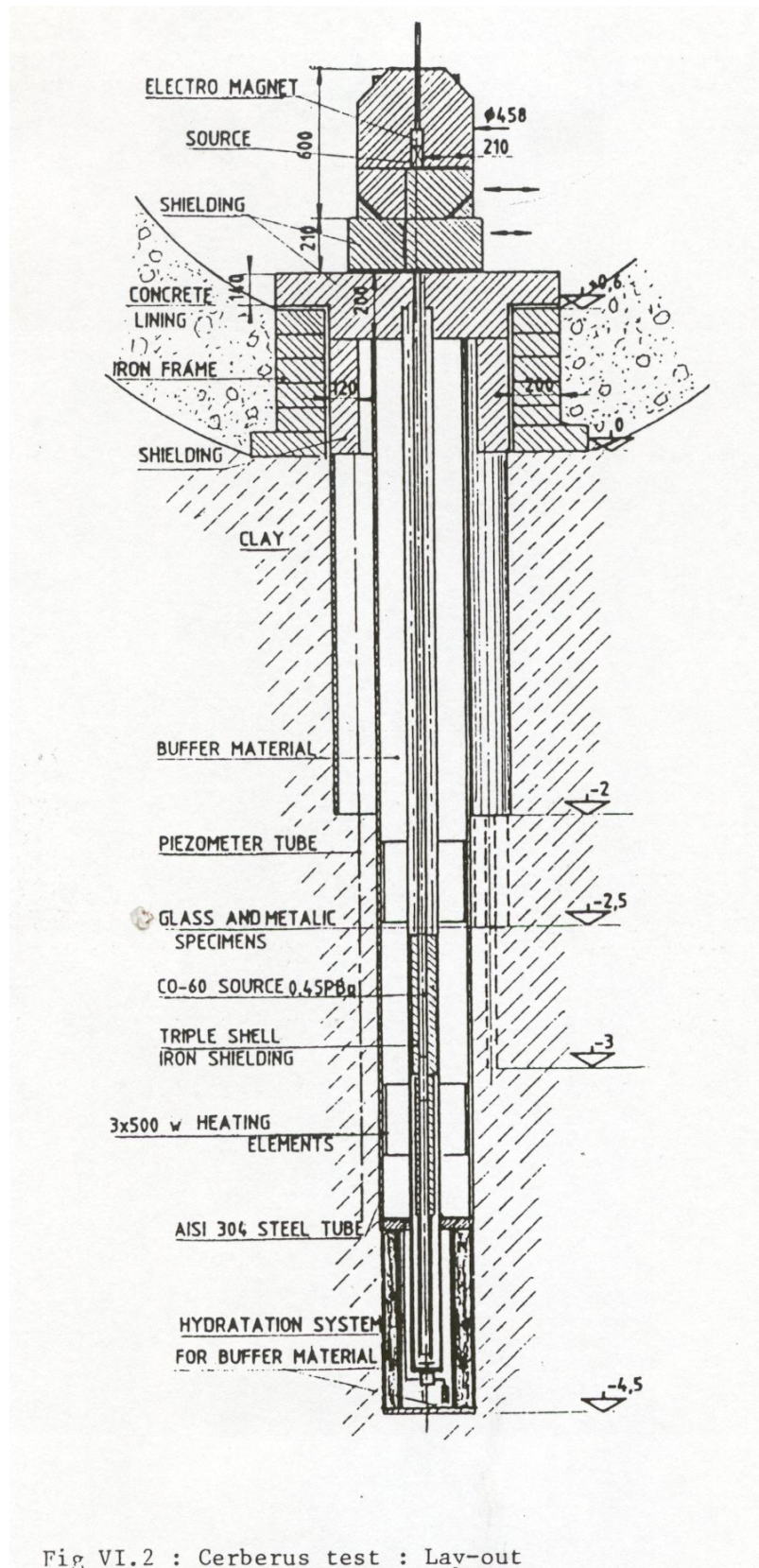


Fig. VI.2 : Cerberus test : Lay-out

Abbildung 2-14: Versuchsanordnung des Cerberus-Experimentes

Die drei oben genannten Experimente waren zwar unterschiedlich ausgelegt, doch die Entwicklung der aufgezeichneten Parameter ist einheitlich. Während der Aufheizphase war ein Anstieg des Porenwasserdruckes und der Gesamtspannung zu verzeichnen. Die Spannung blieb während der gesamten Heizphase konstant, während der Porenwasserdruck auf einen Gleichgewichtszustand absank. Das ist bedingt durch ein Sinken der Permeabilität und des Wassergehaltes sowie einen Anstieg der Dichte. Der beobachtete Temperaturanstieg steht in Übereinstimmung mit der thermischen Leitfähigkeit des Boom clay von 1,6 bis 1,7 W/mK. Nach dem Abschalten der Heizelemente wurde das gegenteilige Phänomen beobachtet.

- ATLAS (Admissible Thermal Loading for Argillaceous Storage) /2-16/:
Mit dem ATLAS-Projekt sollte ein Vergleich des rheologischen Verhaltens von Ton in einem Temperaturfeld erfolgen. Dazu wurde in einer zentralen Bohrung ein Heizelement eingebaut und in zwei benachbarten Bohrungen Messgeber zur Ermittlung der Parameter: Gesamtspannung, Temperatur, Porenwasserdruck und Energie.

In-situ Migrations-Experimente:

Zur Validierung der Migrationsmodelle /2-17/ wurden neben Laboruntersuchungen an Bohrkernen insgesamt drei in-situ Migrations-Experimente durchgeführt. Dabei sollten die Grundparameter für die Migration ermittelt werden: Die hydraulische Durchlässigkeit K , die Rückhaltekonstante R , die Diffusionskonstante D und die effektive Porosität η . Für den ersten Test mit Tritium belastetem Wasser wurde parallel zur Schichtung ein Rohr mit 9 Filtern im Abstand von jeweils 1 m eingebaut. Durch dem mittleren Filter (Filter Nr. 5) wurde das Wasser eingepresst und in den anderen Filtern wurde regelmäßig der Tritiumgehalt des Porenwassers gemessen. Für die beiden anderen Tests wurde ^{125}J verwendet. Die Rohre mit den Filtern wurden sowohl horizontal als auch vertikal eingebaut. Die aus den in-situ-Experimenten gewonnenen Daten zeigen gute Übereinstimmung mit den durch Modellrechnungen ermittelten Werten.

- MEGAS (Modelling and Experiment on GAS migration in repository host rocks)
Mit dem MEGAS-Projekt /2-18/ sollen die Auswirkungen der Gasbildung auf das Wirtsgestein Ton untersucht werden. Dazu wurden folgende Phänomene untersucht: Chemische Reaktionen, Diffusion, Zwei-Phasen-Fluss und die Bildung von bevorzugten Fließwegen. In einer Bohrung unterhalb des Schacht 1 wurden Gasinjektionstests durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass das Gas auf bevorzugten Fließwegen senkrecht zur kleinsten Hauptnormalspannung fließt. Diese Fließwege sind instabil und öffnen und schließen sich in Abhängigkeit zur lokalen Spannung und der Gasdruckentwicklung. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die Gaspermeabilität stark spannungsabhängig ist und nicht als feststehende Materialkenngröße angesehen werden kann. Weitere Ergebnisse sind in den Projekten RESEAL und PROGRESS zu erwarten, die noch laufen bzw. geplant sind.

- Mock-up Test
Seit 1997 läuft in Mol ein weiterer Aufheizversuch /2-19/, bei dem das Augenmerk auf die technische Barriere gelegt wurde. Dazu wurde in einem Stahlzylinder mit 2 m Innendurchmesser (Länge 5 m) Versatzmaterial eingebaut, das über Wasserleitungen an der Innenseite des Stahlzylinders hydriert wurde. Zentral wurde ein Abfallbehälter (Außendurchmesser 508 mm) mit Heizelementen eingebaut. Das Versatzmaterial bestand aus 60 % FoCa-Ton, 35 % Sand und 5 % Graphit. Das Wasser, das zum Hydrieren des Versatzmaterials benutzt wurde, war demineralisiert und mit NaHCO₃ versetzt (Dichte 1,17 g/cm³), damit es der Zusammensetzung des natürlichen Porenwassers entsprach. Als ein nicht erwartetes Ergebnis zeigt sich ein Temperaturgradient von nur 20 °C über dem Versatzmaterial, was einer thermischen Leitfähigkeit von größer als 4 W/mK entspricht. Im Dezember 1998 gab es in einem Kabelkanal einen Wasserzutritt. Dieses Wasser hatte einen sehr hohen Cl⁻-Gehalt (bis zu 1 kg/m³). Möglicherweise wurde durch einen Masse-Transport Salz am Abfallbehälter konzentriert. Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass der Fo-Ca-Ton die Quelle für die Chloride ist.

- ARCHIMEDE (Acquisition et Régulation de la CHIMiE Des Eaux)
Mit dem ARCHIMEDE-Projekt /2-20/ sollte eine detaillierte Charakterisierung des Porenwassers und des Bodens einschließlich organischer Substanzen erfolgen. Ungestörte Bodenproben wurden mit Stechzylindern gewonnen, die mit 200 bar in den Ton gedrückt wurden. Bei der Probenahme wurde unter anaeroben und sterilen Bedingungen gearbeitet, um Oxidation durch Luft und mikrobielle Kontamination zu verhindern. Ein kleiner Bereich des Boom clay wurde zur Probenahme (Bohrkerne) bis auf -15 °C gefroren, um stabile Wasserstoff- und Sauerstoffisotope im Porenwasser ohne Isotopenaustausch mit der Luftfeuchtigkeit zu untersuchen. Das Porenwasser wurde mit speziell entwickelten Piezometern (Pegeln), die in Bohrungen installiert waren gewonnen. Die Maschenweite der Filter betrug 5 µm. Das Porenwasser glich einer Natriumbicarbonat-Lösung mit pH 8,2, geringen SO₄ und hohem Br⁻ Gehalt. Alternative Methoden zur Beprobung des Porenwasser waren Auspressversuche, die gute Ergebnisse brachten, wenn das Auspressen direkt nach der Probenahme erfolgte. „Leaching tests“ und „micro freezing“ brachten weniger zufriedenstellende Daten. Die Beprobung von Mikroorganismen unter sterilen und anaeroben Bedingungen ergab, dass lebensfähige Bakterien in der ungestörten Zone selten oder inaktiv waren. Außerdem wurden pH- und Eh-Messungen unter in-situ Bedingungen durchgeführt.

- PHEBUS (PHEnomenology of hydrological transfer Between atmosphere and Underground Storage) /2-20/:
Mit diesem Test sollten die Wechselwirkungen des Tones beim Kontakt mit Luft (entweder direkt oder durch einen porösen Ausbau) untersucht werden. Durch den Luftkontakt kann es zu einer Austrocknung und damit zu Rissbildung im Ton kom-

men. Dazu wurden sowohl Laboruntersuchungen also auch in-situ-Tests im URL durchgeführt. Für die Laboruntersuchungen wurden 10 cm lange Prüfkörper benutzt, die unter 5 MPa eingespant wurden und von Luft durchströmt wurden. Der Entwässerungseffekt wurde von einem Prüfkörperzusammenbruch („collapse“) und einer Deformation um 20% begleitet. Der Zusammenbruch ist direkt auf die Belüftung zurückzuführen und ist irreversibel. Der in-situ-Test wurde in einem 15 m langen Bohrloch im ungestörten Bereich der URL durchgeführt. Die Instrumentierung mit Piezometern zur Messung des Porenwasserdrucks erfolgte in drei weiteren Bohrungen. Außerdem wurde eine Gamma-Neutron-Sonde zur Messung des Wassergehaltes eingesetzt. Es zeigte sich auch beim in-situ-Test das Austrocknungsphänomen und eine irreversible Setzung des Tones während der Entwässerung.

– RESEAL-Projekt

Mit dem RESEAL-Projekt /2-21/ soll der Verschluss von Bohrlöchern und der Schachtverschluss im plastischen Ton nachgewiesen werden. Dazu wurde im Dezember 1997 ein horizontales Bohrloch (270 mm Durchmesser) mit vorkompaktierten Bentonit-Blöcken versiegelt. Es hat sich gezeigt, dass die Permeabilität des Verschlusses um den Faktor 10 niedriger ist, als die des Wirtgesteins. Im September 1999 wurde der Experimentierschacht mit einer Mischung aus hochkompaktierten FoCa-Clay Pellets und FoCa-Clay Pulver versiegelt. Der Schachtverschluss ist 224 cm mächtig und hat einen Durchmesser von 220 cm (nach Entfernen des Schachtausbaus). An der Basis und am Top des Schachtverschlusses wurde eine gas- und wasserundurchlässige Harzschicht eingebaut. Der Schachtverschluss ist instrumentiert um den Porenwasserdruck, die Spannung, Gebirgsbewegung und den Wassergehalt zu messen. Um den Schacht sind mehrere Bohrungen instrumentiert, um ein dreidimensionales Bild der Spannungsverteilung um den Schachtverschluss zu erhalten. Die Technik zum Einbringen des Schachtverschlusses wurde erfolgreich getestet. Die Effektivität des Verschlusses soll durch weitere Messungen in den folgenden Jahren demonstriert werden (s. Abbildung 2-15).

– PRACLAY (PReliminARy demonstration test for CLAY disposal of high radioactive waste):

Mit dem PRACLAY Projekt /2-14/, /2-22/ soll die Auffahrung, Einlagerung und Verschließen eines sicheren Endlagersystems zu akzeptablen Kosten demonstriert werden. Außerdem soll die Langzeitsicherheit und das Verhalten des Endlagersystems untersucht werden. Weiterhin soll das PRACLAY-Projekt zur Validierung der numerischen Modelle beitragen. Das Versuchsende ist für das Jahr 2015 geplant.

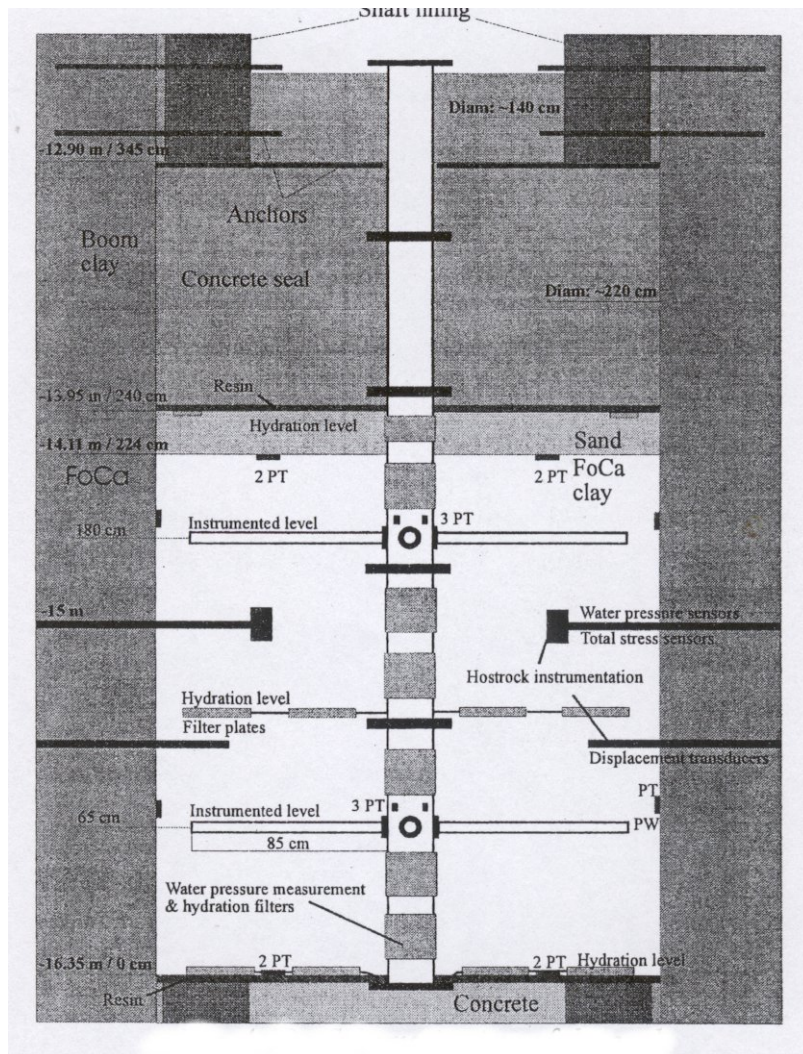


Abbildung 2-15: Anordnung der Messgeber im Bereich der Schachtversiegelung im Experimentierschacht.

2.6 Endlagerauslegung/-technik

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

Seite. Die Anordnung des Endlagers folgt der Neigung der Tonformation, die ca. 1 bis 2° beträgt.

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

2.6.1 Endlagerung verglaster HAW

Die Planung für das Referenzendlager für verglaste HAW geht von 3915 (s. Tabelle 2-2) einzulagernden Behältern aus. Diese Anzahl schließt die vorhandenen 420 Behälter ein, die aus den bestehenden Verträgen zur Wiederaufarbeitung resultieren sowie 3495 Behälter, die bei einer Aufhebung des Moratoriums produziert werden würden. Falls Belgien die Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes nicht wieder aufnehmen sollte, werden die bereits vorhandenen Behälter mit verglasten HAW zusammen mit den Brennelementbehältern endgelagert.

Die Endlagerung der Behälter mit verglasten HAW erfolgt in acht Strecken mit einem Durchmesser von 2,70 m und einer Länge von ca. 800 m (Abbildung 2-16). Die Einlagerungsstrecken liegen rechtwinklig zu den Hauptstrecken und werden von diesen in drei Felder geteilt. Die Felder außerhalb der Hauptstrecken sind jeweils 200 m lang und zwischen den Hauptstrecken 400 m. Der Abstand der ersten Strecke von der Verbindungsstrecke beträgt 100 m und der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken 40 m. Dieser Abstand wurde gewählt, um die mittlere Temperaturerhöhung der Wirtsfornation auf 6 °K zu begrenzen. Diese Temperaturerhöhung wurde von ONDRAF/NIRAS festgelegt, da keine entsprechenden Vorschriften existieren. Die Gesamtfläche der Einlagerungsfelder umfasst 0,224 km² und das Hohlraumvolumen ca. 39.000 m³.

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

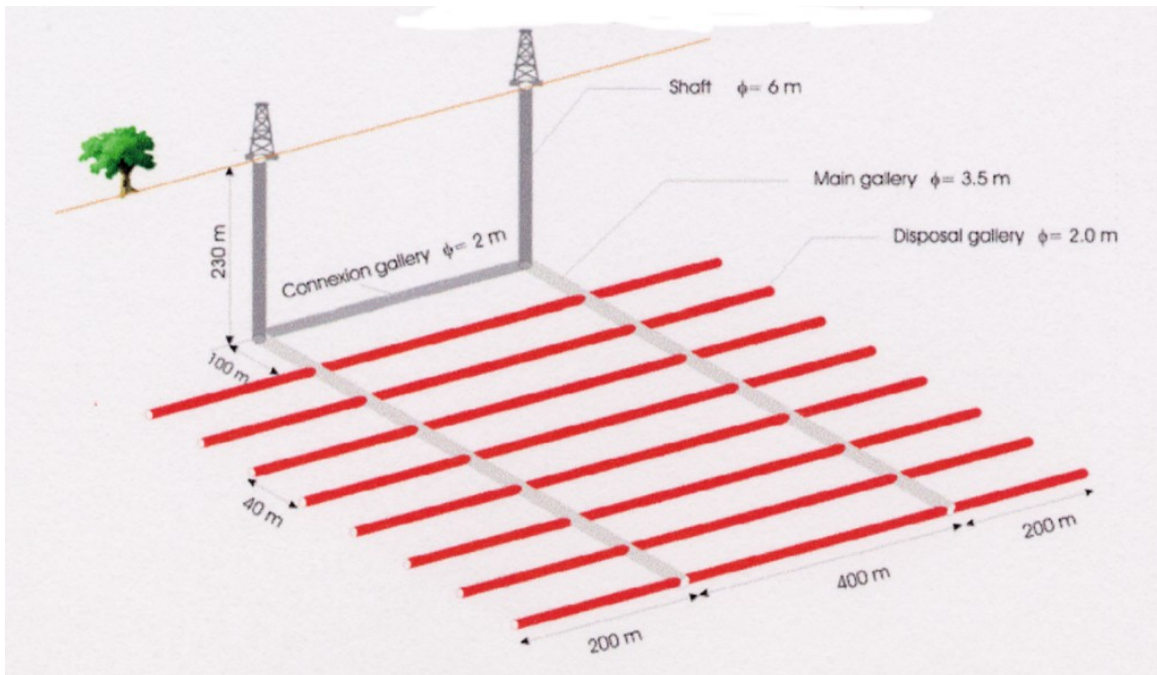


Abbildung 2-16: Endlager für verglaste HAW /2-5/

Vor dem Einbringen der Endlagerbehälter wird der Bentonit ausbau zwischen Beton ausbau und Endlagerrohr bis zur Sättigung gewässert. Um den Quelldruck des Bentonits am Austritt in die Hauptstrecken aufzunehmen, wird der Ringspalt an den Hauptstrecken verschlossen. Die Einlagerungsrohre werden am Austritt in die Hauptstrecken mit Gleittüren versehen, die den Strahlenschutz des Personals während des Betriebes gewährleisten /2-3/, /2-4/. Nach Füllung eines Einlagerungsrohres wird dieses verschlossen.

2.6.2 Endlagerung ausgedienter Brennelemente

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

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

Abbildung 2-17 zeigt einen Schnitt einer Einlagerungsstrecke für verglaste HAW.

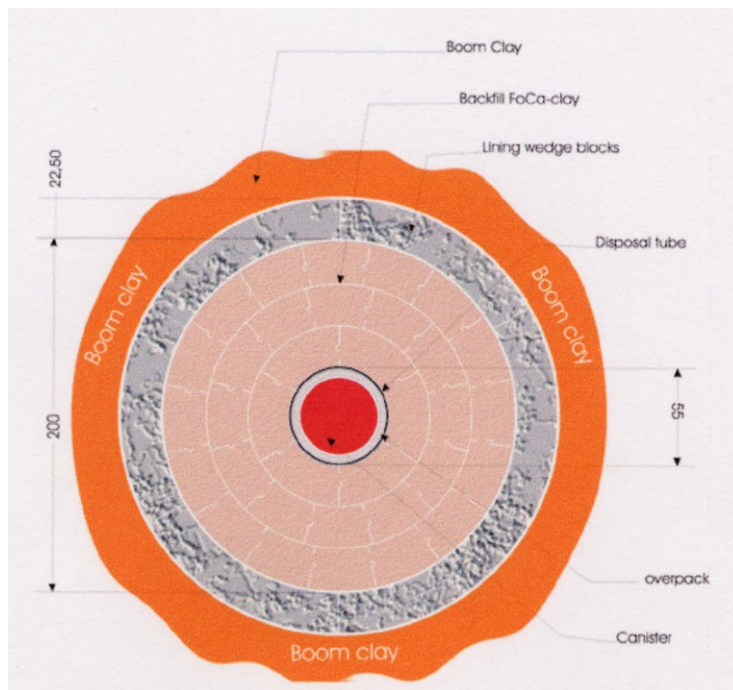


Abbildung 2-17: Schnitt einer Endlagerungsstrecke für verglaste HAW /2-5/

Das Endlagerkonzept für ausgediente Brennelemente ist auf der Abbildung 2-18 gezeigt /2-4/.

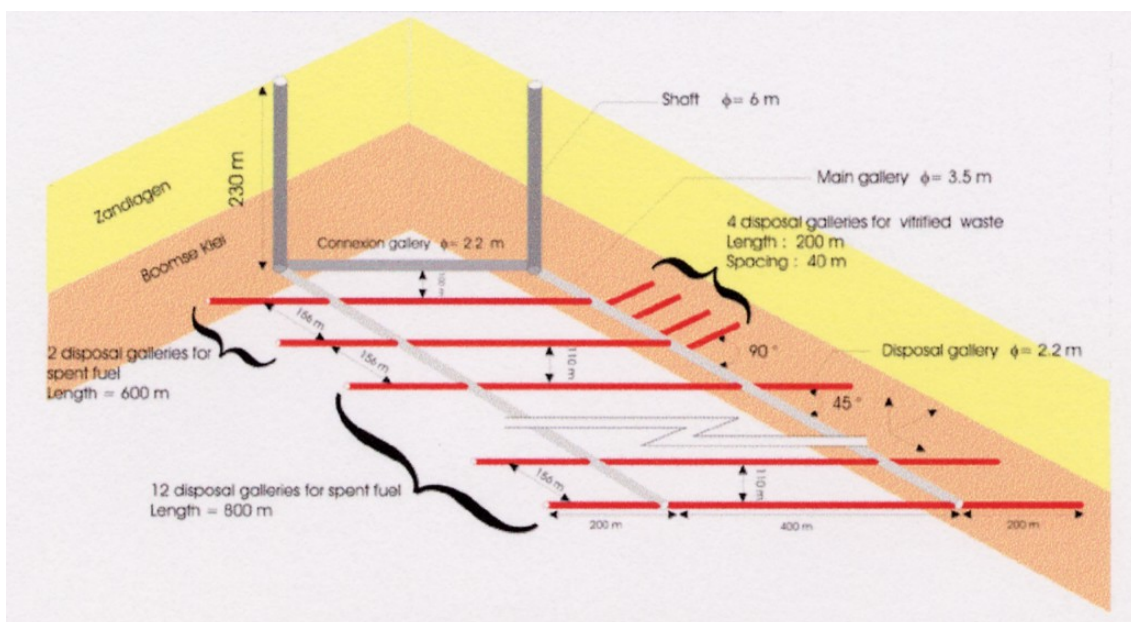


Abbildung 2-18: Endlager für ausgediente Brennelemente

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

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

Die Einlagerungsstrecken für ausgediente Brennelemente haben einen Durchmesser von 2,7 m /2-23/. Nach Betonausbau mit vorgefertigten Elementen werden in die Einlagerungsstrecken jeweils vier Endlagerrohre in quadratischer Anordnung eingebaut. Der Hohlraum zum Betonausbau und zwischen den vier Einlagerungsrohren wird mit Bentonitformsteinen verfüllt (Abbildung 2-19).

Bei Einlagerung von ausgedienten MOX-Brennelementen wird jeweils ein Einlagerungsrohr in der Mitte der Strecke angeordnet (Abbildung 2-20).

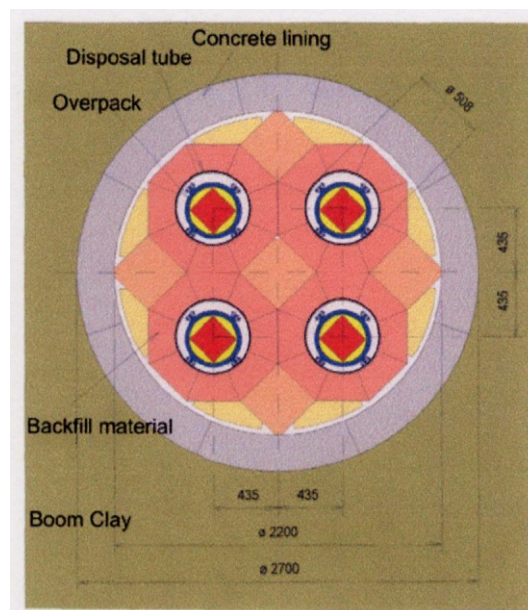


Abbildung 2-19: Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /2-5/

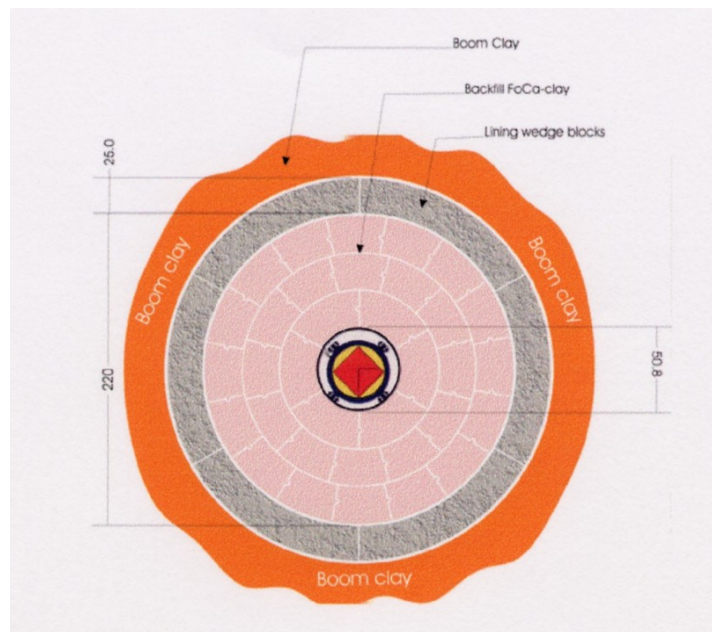


Abbildung 2-20: Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente MOX-Brennelemente /2-5/

Endlagerung HAW mit geringer Wärmentwicklung sowie LILW

Die Endlagerung der HAW mit geringer Wärmeentwicklung und der LILW soll in Einlagerungsfeldern erfolgen, die auf der von den HAW Endlagerfeldern entgegengesetzten Seite der Schächte angeordnet werden /2-4/, /2-23/. Die Einlagerungsstrecken werden mit vorgefertigten Betonteilen ausgebaut. Der Durchmesser der Einlagerungsstrecken soll in Abhängigkeit von der Abfallklasse zwischen 3 und 6 m betragen. Die Abfallgebinde werden in den Strecken gestapelt und der verbleibende Hohlraum mit Beton oder ähnlichem Material verfüllt. Die Anzahl der Behälter pro Streckenquerschnitt hängt u. a. von folgenden Faktoren ab:

- Einhaltung der mittleren Temperaturerhöhung der Wirtsfornation von 6°;
- Verbliebener Hohlraum in den Gebinden. Dieser Hohlraum soll 20 % nicht überschreiten, um die Stabilität der Gebinde und des Verfüllmaterials unter dem Gebirgsdruck zu gewährleisten.

Die Abbildung 2-21 zeigt mögliche Einlagerungsvarianten für verschiedene dieser Abfälle.

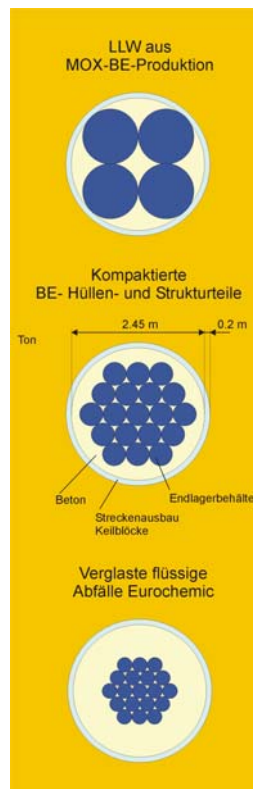


Abbildung 2-21: Endlagerung von HAW mit geringer Wärmeentwicklung sowie LILW /2-23/

2.6.3 Einlagerungstechnologie

Der Ablauf der Einlagerung der Behälter mit verglasten HAW ist wie folgt vorgesehen /2-3/:

Die im Endlagerbehälter verpackten verglasten Abfälle werden an die Tagesanlage des Endlagers angeliefert und hier aus dem Transportbehälter auf einen Transportwagen umgeladen (Abbildung 2-22). Der Transportwagen verfügt über einen abgeschirmten Behälter mit vier getrennten Sektionen, so dass vier Endlagerbehälter transportiert werden können. Der Behälter ist quer zur Fahrtrichtung des Transportwagens angeordnet. Der Transportwagen mit den Endlagerbehältern wird in den Förderkorb geschoben und auf die Endlagerungsteufe gefördert. Von hieraus wird der Wagen zu der vorgesehenen Endlagerungsstrecke transportiert. Hier wird der Transportwagen angehoben, bis die Position der Schleuse des Abschirmbehälters auf dem Transportwagen mit der Schleusenposition des Endlagerungsrohrs übereinstimmt. Dann werden die Schleusen geöffnet und der Abschirmbehälter wird gedreht, bis die Position des Endlagerbehälters mit dem Einlagerungsrohr übereinstimmt. Mittels eines Schieberoboters, der auf dem Transportwagen installiert ist, wird dann der erste Endlagerbehälter in das Einlagerungsrohr geschoben. Der Roboter kehrt in seine Position auf dem Transport-

wagen zurück, der Abschirmbehälter wird gedreht und der nächste Behälter in das Einlagerungsrohr geschoben. Nach Abschluss der Beschickung werden die Schleusen geschlossen, der Transportwagen wird herabgelassen, zum Schacht transportiert und nach Übertage gefördert, wo er wieder mit vier Endlagerbehältern beladen werden kann.

Die Behälter werden in einem geringen Abstand von einander endgelagert, um thermische Ausdehnungen zu berücksichtigen.

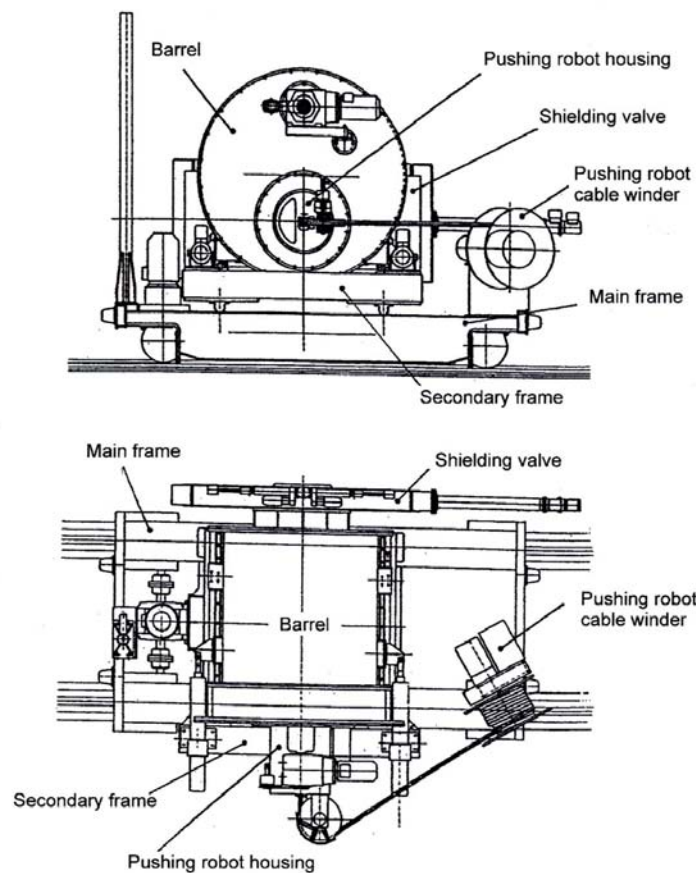


Abbildung 2-22: Transportwagen für HAW- und Brennelemente-Endlagerbehälter /2-5/

Der Schieberoboter (Abbildung 2-23) soll eine einwandfreie Funktion bei einer Neigung des Einlagerungsrohrs bis zu ca. 2° gewährleisten. Er muss Gebinde mit einem Gewicht bis zu 1000 kg über eine Entfernung von 200 m schieben können und dabei eine Positionierung der Behälter mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm erlauben. Der Greifer des Roboters gestattet eine Rückholung der Behälter, falls dies erforderlich sein sollte.

Die Einlagerung von Endlagerbehältern mit ausgedienten Brennelementen verläuft analog zur Einlagerung der Behälter mit verglasten HAW. Da die Länge der BE-Endlagerbehälter den Schachttransport in liegender Position nicht zulässt, werden diese in einem abgeschirmten Transportbehälter senkrecht auf die Endlagerteufe gefördert. Hier werden die Behälter in die Horizontale gekippt und auf den Transportwagen verladen. Die Einlagerung erfolgt wie oben beschrieben. Da der Transport von vier BE-Endlagerbehältern gleichzeitig Streckenhöhen von bis zu 6 m erfordern würde, ist ein Einzeltransport der Behälter wahrscheinlich.

Nach Füllen eines Endlagerrohrs wird dieses verschlossen und versiegelt.

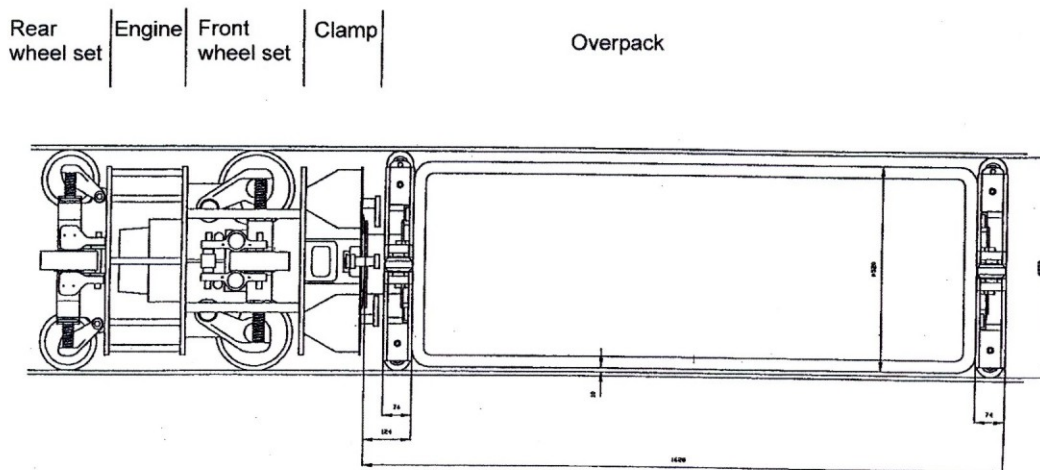


Abbildung 2-23: Schieberoboter /2-5/

2.6.4 Verfüll- und Verschlusskonzept

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

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

Als Verfüllmaterial kommen vorgefertigte Elemente aus einem Gemisch von 60% Fo-Ca-Ton, 35% Sand und 5% Graphit zum Einsatz /2-4/, /2-7/. Durch den Graphitzusatz wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials wesentlich erhöht.

In /2-7/ wird die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials mit $2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ angegeben gegenüber einer Wärmeleitfähigkeit des Boom-Tons von $1,69 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. Korrosionsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Anwesenheit von Graphit keinen Einfluss auf die Korrosion von Austenitstahl hat /2-6/.

Für den Abschluss des Bentonittringes an der zur Hauptstrecke führenden Seite des Einlagerungsrohrs wird eine Variante untersucht, die aus einer Metallschürze besteht, die auf das Einlagerungsrohr aufgesetzt wird und mit einer Betonkonstruktion im Boom-Ton und an der Hauptstrecke abgestützt wird /2-24/.

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

Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken für HAW mit geringer Wärmeentwicklung und LILW sowie der übrigen Strecken und der Schächte soll mit Beton oder ähnlichem Material erfolgen bzw. mit einem Gemisch aus FoCa Ton und Sand /2-4/.

An den Schachtverschluss werden folgende Hauptanforderungen gestellt /2-25/:

- Die Permeabilität sollte der der Wirtsformation entsprechen. Etwas höhere Werte können zulässig sein, wenn die Sicherheitsanalysen zeigen, dass auch unter diesen Bedingungen die Dosis-Kriterien bzw. Risikokriterien eingehalten werden.
- Der Verschluss der Auflockerungszone um den Schacht ist eine wesentliche Aufgabe des Schachtverschlusses.
- Der Verschluss des Schachtes soll den maximal zu erwartenden Gas- und Wasserdrücken in der Endlagerteufe widerstehen.
- Der Schachtverschluss muss den durch die Konvergenz der Wirtsformation hervorgerufenen Spannungen widerstehen können.
- Die minimale Standzeit des Verschlusses soll zwischen einigen Tausend Jahren bis zu 100000 Jahren liegen.

In den laufenden Experimenten wird u. a. ein Bentonit untersucht, der gepresst eine Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ aufweist und nach Sättigung einen Quelldruck von $4,4 \text{ MPa}$, was der lithostatischen Spannung der Wirtsformation entspricht. Die Permeabilität nach Sättigung des Bentonits wird mit ca. 10^{-13} m/s angegeben /2-25/.

2.6.5 Auffahrtechnik

Bezüglich der Errichtungstechnologie des belgischen Endlagers liegen noch keine Informationen vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei der Errichtung und insbesondere bei der Erweiterung des Untertagelabors in Mol Erfahrungen gesammelt wurden, die bei der Errichtung des Endlagers zum Einsatz kommen könnten. Deshalb wird im weiteren eine kurze Beschreibung dieser Auffahrtechniken gegeben /2-4/, /2-24/, /2-26/.

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

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

Der fertige Schacht hat einen Innendurchmesser von 3 m. Ein Schnitt des Schachtes ist in Abbildung 2-24 gezeigt. Grundprinzip beim Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 zur bestehenden Versuchsstrecke war, die Störung der umgebenden Wirtsfornation so gering wie möglich zu halten. Diese Störung hängt wesentlich vom Durchmesser der aufzufahrenden Strecke ab. Bei gleichem Durchmesser ist die Störung desto geringer,

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

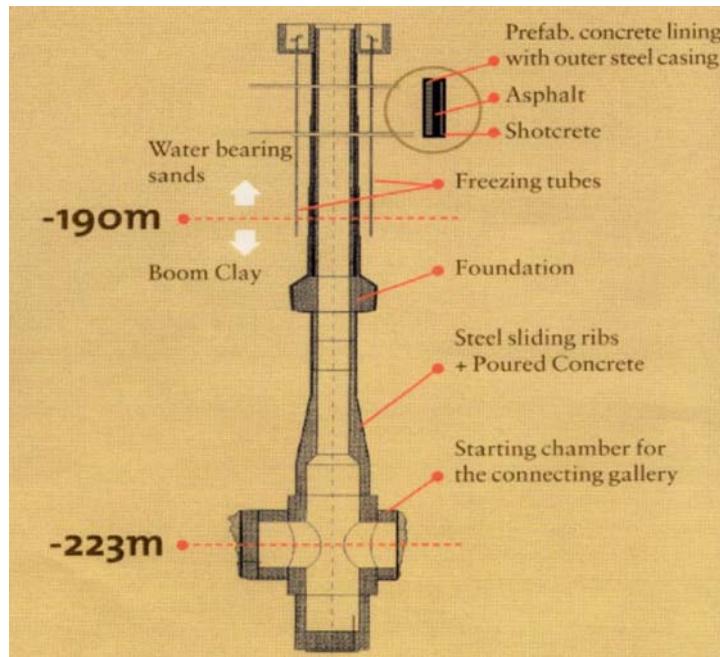


Abbildung 2-24: Untertagelabor HADES - Schnitt Schacht 2 /2-26/

Für das Auffahren der Verbindungsstrecke wurde deshalb eine Vollschnittmaschine gewählt (Abbildung 2-25). Die maximale zulässige Schnittleistung wurde mit 2 m pro Tag bestimmt. Das Überschneiden des Profils wurde auf max. 3 cm begrenzt. Der Ausbau der Strecke erfolgte sofort nach dem Auffahren mit Betonelementen im sogenannten Keilblocksystem (Abbildung 2-26). In /2-4/ ist vermerkt, dass in einem Endlager ein weiterer Ausbau der Strecken mit Stahl erforderlich ist, da die Keilblocktechnologie keine Verbindungen mit Querschlägen zulässt, bzw. eine andere Ausbautechnologie für die Hauptstrecken gewählt wird.

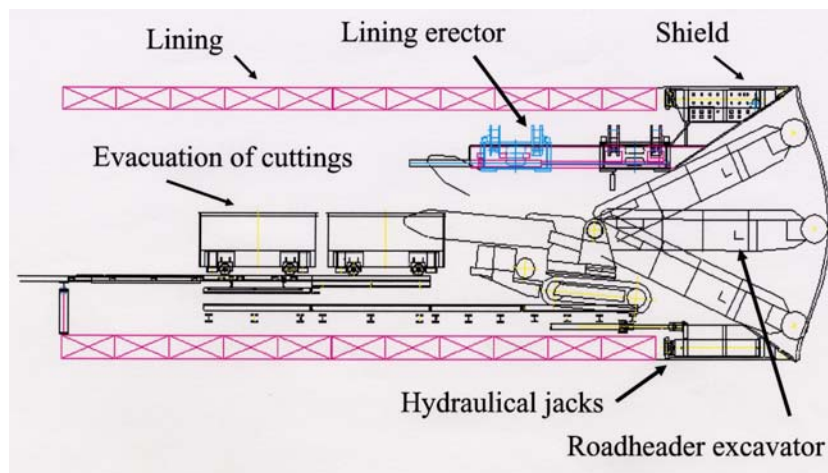


Abbildung 2-25: Untertagelabor HADES–Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /2-26/

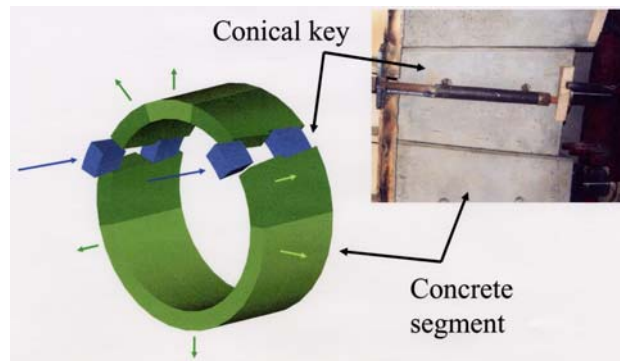


Abbildung 2-26: Keilblocksystem für den Streckenausbau /2-26/

2.6.6 Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik

Ausgehend von der im Abschnitt 2.6.3 dargelegten Einlagerungstechnologie für verglasten HAW und ausgedienten Kernbrennstoff besteht die diesbezügliche Einlagerungstechnik aus folgenden Hauptkomponenten:

- Abschirmbehälter für Schachttransport der BE-Endlagerbehälter
- Untertage-Transportwagen mit
 - Hubanlage
 - Abschirmbehälter für vier Endlagerbehälter HAW bzw. einen BE-Endlagerbehälter
 - Schleuse des Abschirmbehälters
 - Schieberoboter
- Kippanlage für BE-Endlagerbehälter
- Schleusensystem der Endlagerrohre

Da den Endlagerbehältern für verglasten HAW bzw. ausgediente Brennelemente eine entscheidende Barrierenfunktion zugemessen wird, wird an dieser Stelle, soweit wie möglich, auch eine Einschätzung des Entwicklungsstandes dieser Endlagerbehälter gegeben.

Zum Entwicklungsstand der o. g. Einlagerungstechnik für verglasten HAW und ausgediente Brennelemente liegen begrenzte Informationen nur zum Transportwagen und Schieberoboter vor. In /2-4/ wird dargelegt, dass sich der Transportwagen und der Roboter bereits im fortgeschrittenem Entwicklungsstadium befinden. Die Funktionsfähigkeit dieser Anlagen wurde mit Prototypen im Maßstab 1:1 in der HADES-PRACLAY-Ausstellungshalle in Mol demonstriert. Mit dem Roboter wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein Modell eines Endlagerbehälters mit dem Gewicht eines derartigen Behälters über eine Distanz von wenigsten 10 Meter geschoben wurde. Die Ergebnisse die-

ser Versuche sollen mit Schiebeversuchen über 200 m bestätigt werden. Des Weiteren soll die Wirkung von Temperaturen und Strahlung auf die mechanischen und elektronischen Teile des Roboters detailliert untersucht werden.

Von den vorgesehenen Endlagerbehältern für verglasten HAW und ausgediente Brennelement wurden Versuchsmuster gefertigt. Dabei hat das Modell des BE-Endlagerbehälters den Durchmesser eines realen Behälters, während die Länge des Modellbehälters auf 2 m begrenzt wurde, um Laborversuche durchzuführen. Die Einbauten des Modellbehälters entsprechen dem Originalbehälter. In die Wand des Modellbehälters wurden Fenster eingebaut, um die Verfüllung mit Sand zu beobachten. In den Modellbehälter wurde ein Modellbrennelement eingesetzt. Die wesentlichsten Versuche zu diesem Endlagerbehälter waren /2-2/:

- Versuche zur Auswahl geeigneter Sande
- Versuche zur Verfüllung des beladenen Behältermodells mit Sand einschließlich Sandtransport, Lagerung des Sandes in Silo, Dosierungsvorrichtung, Füllkontrolle u. a.
- Schweißversuche zum Verschweißen des Behälterdeckels sowie des Verschlusses der Füllöffnung bei denen das Plasmaschweißen als am besten geeignetes Verfahren ausgewählt wurde.
- Computermodellanalyse der mechanischen Stabilität des beladenen und mit Sand verfüllten Endlagerbehälters unter Endlagerbedingungen

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

In Zusammenarbeit zwischen EIG EURIDICE, Belgien und CEA/SESD, Frankreich, wurden zum Beispiel zwei Haupttypen von Verfüllmaterial untersucht – vorkompaktierten Bentonitblöcke sowie hochdichte Pellets gemischt mit Bentonitpulver /2-27/. Die vorkompaktierten Blöcke sollen zur Verfüllung des Hohlraumes zwischen Einlagerungsrohr und Betonausbau der Einlagerungsstrecken eingesetzt werden und das Pellet-Pulver-Gemisch für die Schachtverfüllung.

Zur Auswahl des Verfüllmaterials wurden Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit, Permeabilität und Quelldruck durchgeführt. Diese Untersuchungen führten zur Auswahl des Gemischs aus FoCa-Ton, Sand und Graphit für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken. Die Fertigung der Blöcke im industriellen Maßstab wurde erprobt. Die dabei erreichte mechanische Stabilität und Formbeständigkeit ermöglicht den Transport der Blöcke, die Lagerung und den Einbau ohne nennenswerte Probleme.

Die Sättigung des Materials, Quelldruck, Permeabilität und Verhalten bei Wärmebelastung des gesättigten Materials wurden und werden in-situ untersucht.

Das Schachtverschlusskonzept wird im Untertagelabor in Mol im Modellversuch (RE-SEAL Projekt) untersucht. In einem Bohrlochversuch werden zwei unterschiedliche Materialien getestet – FoCa-Ton (Frankreich) und Serrata Ton (Spanien). Die Verschlussstopfen werden dabei aus vorkompaktierten Bentonitblöcken errichtet /2-4/, /2-27/.

2.7 Sicherheitsnachweiskonzept

Studien zur Sicherheitsbewertung der geologischen Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen in einer Tonformation werden in Belgien seit ca. 30 Jahren durchgeführt /2-4/. Die wesentlichsten Schritte dabei waren:

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

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

2.7.1 Temperaturkriterium

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

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

Die Konsequenz dieser Temperaturfestlegung ist, dass an der Grenze Einlagerungsrohr – Verfüllung höhere Temperaturen, bis zu 150 °C, auftreten können /2-7/. In der Folgezeit wurde dieses Kriterium kritisch bewertet und im Ergebnis der Analysen ein neues Temperaturkriterium festgelegt:

Die maximale Temperatur im Verfüllmaterial auf Tonbasis, das als technische Barriere für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle eingesetzt wird, darf 100 °C nicht überschreiten /2-7/.

Die Hauptargumente für diese Festlegung sind:

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

Zur Bestimmung der Bedingungen, unter denen dieses neue Kriterium bei der Referenzauslegung des Endlagers im Boom-Ton in Mol-Dessel eingehalten werden kann, wurden entsprechende thermische Berechnungen für verglaste HAW durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung im Boom-Ton, im Betonausbau und im Einlagerungsrohr sowie durch Konvektion im Zwischenraum zwischen Endlagerbehälter und Einlagerungsrohr erfolgt. Folgende Wärmeleitfähigkeiten, (s. Tabelle 2-7) wurden den Berechnungen zugrunde gelegt:

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

Tabelle 2-7: Wärmeleitfähigkeit der Barrieren /2-7/

Die Berechnungen ergaben, dass eine Mindestabklingzeit von ca. 60 Jahren eingehalten werden muss, um dem o. g. Temperaturkriterium genügen zu können. Die Wärmeleistung eines einzelnen Behälters beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 400 W /2-7/. Bezogen auf das konzipierte Endlagerfeld bzw. die Einlagerungsstrecken ergibt sich eine maximale zulässige Wärmebelastung von ca. 100 kW/ha /2-27/ bzw. 250 W/m.

2.7.2 Bewertung der Langzeitsicherheit

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

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

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

Es werden zwei Gruppen von Szenarien betrachtet:

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

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

Die Entwicklung der Szenarien orientiert sich am entsprechenden NEA FEP-Katalog, der 134 generische FEPs erfasst. Von diesen wurden in Belgien 60 FEPs ausgewählt durch Eliminierung von FEPs, die für das belgische Endlagerkonzept nicht zutreffen und solchen, die ausschließlich die Biosphäre betreffen. Die so bestimmten FEPs wurden in die in Tabelle 2-8 aufgeführten Kategorien und Unterkategorien eingeteilt /2-4/.

Das Szenarium der normalen Endlagerentwicklung beschreibt qualitative die vorausgeschauten Funktion des Endlagersystems, basierend auf den bei den Sicherheitsanalysen berücksichtigten Komponenten. Nach /2-4/ wurde bei den Langzeit-Sicherheitsanalysen kein Kredit genommen von den sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Primärverpackungen, der Einlagerungsrohre, der Verfüllung der Endlagerstrecken und dem Betonausbau der Endlagerstrecken. Bei der Bewertung der effektiven Mächtigkeit der Tonbarriere wurde die Störungszone berücksichtigt. Des Weiteren geht das Szenarium davon aus, dass die Migration der Radionuklide durch den Ton erfolgt hauptsächlich durch molekulare Diffusion und nur zu einem sehr geringen Anteil durch Advektion erfolgt. Die Sorption von Radionukliden im Ton wird berücksichtigt und auch die Verdünnung und Dispersion in den wasserführenden Schichten sowie eine Sorption durch Minerale im Grundwasser. Drei Mechanismen für das Austreten von Radionukliden in die Biosphäre werden betrachtet:

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

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

Kategorie/Unterkategorie	Beispiele
– Naturphänomene	
• außerirdischer Herkunft	Meteoriteneinschlag
• geologische	Steigen oder Fallen des Bodenniveaus, Erdbeben, Tektonik
• klimatische	Extreme Niederschläge, Schneeschmelze und Überflutungen, Veränderung des Meeresspiegels, Eiszeit
• geomorphologische	Erosion, Veränderung von Flussläufen, Transport und Ablagerung von marinen Sedimenten
• hydrologische	Infiltration von Grundwasser, Veränderungen der Kenndaten von Grundwasserströmen
• Migration und geochemische	Advektion, Dispersion, Bildung, Auflösung und Migration von Kolloiden
• Auswirkung von Radionukliden auf die Ökologie	Aufnahme durch Pflanzen, Pedogenese
– Anthropologe Aktivitäten	
• Projektierung und Errichtung	Materialdefekte, chemische Effekte, Effekte durch Auffahren
• Betrieb und Verschluss	Schlechte Verfüllung, Heterogenität der Abfälle, schlechter Verschluss
• Eindringen	Versuchsbohrungen, archäologische Grabungen, Grundwassernutzung
• Aktivitäten nach Stilllegung und Verschluss	Verlust der Informationen über das Endlager
– Effekte, direkt verknüpft mit der Existenz der Abfälle und des Endlagers	
• Thermische	Hydrologische und physikalisch-chemische Veränderungen
• Chemische und biologische	Metallkorrosion, Addition von Faktoren
• Mechanische	Deformation von Abfallgebinden, Veränderungen der in-situ Spannungen
• Radiologische	Radiolyse, Veränderungen der Materialkenndaten

Tabelle 2-8: FEP-Klassifikation /2-4/

Folgende acht Szenarien einer gestörten Entwicklung des Endlagers werden angenommen:

- Bohrung für eine Grundwassergewinnung in unmittelbarer Nähe des Endlagers
- Treibhauseffekt
- Kluftbildung durch das Endlager durch Reaktivierung einer alten Kluft auf Grund erhöhter tektonischer Aktivität
- Eiszeit, stärker als die letzten drei Eiszeiten des Quartärs (Eiszeit, vergleichbar mit den letzten drei Eiszeiten des Quartärs ist Bestandteil des Szenariums der normalen Endlagerentwicklung)
- Defekter Verschluss des Endlagers
- Vorzeitiges Versagen einer technischen Barriere
- Gastransport
- Erkundungsbohrung

Die Sicherheitsbewertung für das Szenarium der normalen Entwicklung des Endlagers beruht auf der Berechnung der Individualdosis einer kritischen Gruppe und auf die Bewertung von Sicherheitsindikatoren.

Die Dosisberechnung wird in drei Schritten vorgenommen:

- Berechnung der Radionuklidmigration im Nahfeld und im Boom-Ton bis zum Grundwasser
- Berechnung der Radionuklidmigration im Grundwasser
- Berechnung des Austritts von Radionukliden in die Biosphäre und der Strahlenbelastung

Zur Vervollständigung der Dosisberechnungen werden drei Sicherheitsindikatoren berechnet:

- Zerfallsrate der Radionuklide und Rückhaltefaktor
- Der Gesamtaktivitätsfluss und die Verbindung zwischen Boom-Ton und Grundwasser
- Das Gesamt-Uraninventar

Von den o. g. acht Szenarien einer gestörten Entwicklung des Endlagers wurden die Szenarien Treibhauseffekt und vorzeitiger Ausfall einer technischen Barriere bisher nicht untersucht. Weiterhin wurde das Szenarium Erkundungsbohrung nicht bei der Sicherheitsbewertung berücksichtigt.

2.8 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

Die gegenwärtig bekannte Terminvorstellungen für die Errichtung eines Endlagers in einer tiefen Tonformation in Belgien geht von folgenden Eckpunkten aus /2-23/, /2-28/:

- 50 - 60 Jahre Abkühlung des wärmeentwickelnden HAW bzw. der ausgedienten Brennelemente in einem Zwischenlager
- Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf Basis des SAFIR 2 Berichtes bis ca. 2010, anschließend
- Entscheidung der belgischen Regierung zum Endlagerkonzept und Endlagerstandort
- Erarbeitung eines vorläufigen Sicherheitsberichtes bis ca. 2015, anschließend
- Genehmigungsverfahren
- Baubeginn frühestens 2025
- Betriebsbeginn ca. 2035.

2.9 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

Zu den Kosten der Errichtung, des Betriebes und der Schließung des belgischen Referenzendlagers in Boom-Ton liegen zusammengefasst folgende Informationen vor /2-4/:

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

Bisher hat ONDRAF/NIRAS detaillierte Kostenabschätzungen nur für ein Endlager für verglasten HAW und ausgediente Brennelemente vorgenommen, da für den Endlager teil für LILW noch kein Konzept vorliegt. Es wurde allerdings berücksichtigt, dass höchstwahrscheinlich ein gemeinsames Endlager für die genannten Abfallkategorien errichtet wird. Tabelle 2-9 zeigt die Ergebnisse der Kostenabschätzungen für die zwei Endlageroptionen - Komplette Wiederaufarbeitung des ausgedienten Kernbrennstoffes und Direkte Endlagerung der ausgedienten Brennelemente.

Die in der Tabelle 2-9 aufgeführten Kostenabschätzungen berücksichtigen nicht die Kosten für bisher geleistete FuE-Arbeiten, die für die Zeit von 1974 bis 2000 mit 150 Mill. € zu Preisen aus dem Jahr 2000 bewertet werden.

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

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

Tabelle 2-9: Kostenabschätzung für ein Endlager in Boom-Ton (Stand 1997, Preise, Stand 2000) /2-4/

3 Schweiz

In der Schweiz fällt der überwiegende Teil der radioaktiven Abfälle aus dem Betrieb der fünf Kernkraftwerke an:

Kernkraftwerk	Typ	Leistung
Beznau I	Druckwasser-Reaktor	365 Mw _e
Beznau II	Druckwasser-Reaktor	365 Mw _e
Gösgen	Druckwasser-Reaktor	1020 Mw _e
Leibstadt	Siedewasserreaktor	1145 Mw _e
Mühleberg	Siedewasserreaktor	355 Mw _e

Tabelle 3-1: Kernkraftwerke der Schweiz

Des weiteren fallen radioaktive Abfälle aus der Nutzung der Kernenergie in Forschung und Medizin sowie der Industrie an.

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

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

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

Die Ergebnisse der Endlagerforschung wurden 1985 in dem Bericht zum „Projekt Gewähr 1985“ zusammengefasst. Dieser Bericht sollte als Entsorgungsnachweis für die radioaktiven Abfälle der Schweiz dienen. Der Schweizer Bundesrat beurteilte 1988 die Ergebnisse des Projektes Gewähr wie folgt /3-1/:

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

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

Für Eignungsuntersuchungen des 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.

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

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

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

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

3.1 Endlagerkonzept

Dem Endlagerkonzept der Schweiz für hochaktive radioaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle liegen folgende Abfallmengen (siehe Tabelle 3-2) bei Annahme einer 40-jährigen Betriebsdauer der bestehenden Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitung von 1.000 t ausgedienten Kernbrennstoffs gemäss den bestehenden Verträgen zugrunde :

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

Tabelle 3-2: Abfallmengengerüst HAW und LL-ILW

Nach /3-2/ sind folgende Mengen an HAW/LL-ILW endzulagern:

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

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

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

Zum Behälterkonzept liegen nur vereinzelte Informationen vor. In einer älteren Veröffentlichung /3-3/ sind folgende Daten zu den Behältern für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung angegeben:

- HAW-Kokille
 - Länge: 1850 mm
 - Außendurchmesser: 350 mm
 - Wandstärke: 6 mm
 - Gewicht des verglasten Abfalls: 380 kg

 - Gesamtgewicht: 500 kg
 - Behältermaterial: Austenitstahl (24% Cr, 12% Ni)

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

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

Die HAW-Kokillen sollen in einem verlorenen Abschirmbehälter endgelagert werden (Abbildung 3-1).

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

Nach /3-2/ sollen die Primärcontainer mit verglasten HAW bzw. ausgedienten Brennelementen in massive Endlagerbehälter aus Stahl bzw. Kupfer mit verschweißtem Deckel gepackt werden. Die Standfestigkeit der Stahlcontainer wird mit 1000 Jahre bewertet /3-4/, die der Kupferbehälter mit 10^5 Jahren /3-5/. Der Außendurchmesser eines Stahl-Endlagerbehälters ist in /3-6/ mit 940 mm angegeben.

In /3-7/ ist beschrieben, dass für langlebige verfestigte flüssige radioaktive Abfälle des Paul Scherrer Instituts, die Aktinide enthalten, als Endlagerbehälter ein mit Eisenfasern verstärkter Betoncontainer vom Typ CBF-C2K (Firma SOGOFIBRE Frankreich) eingesetzt werden soll. Dieser Container soll von der Schweizer Atomaufsichtsbehörde und der NAGRA für die Endlagerung der o. g. Abfälle bestätigt worden sein.

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

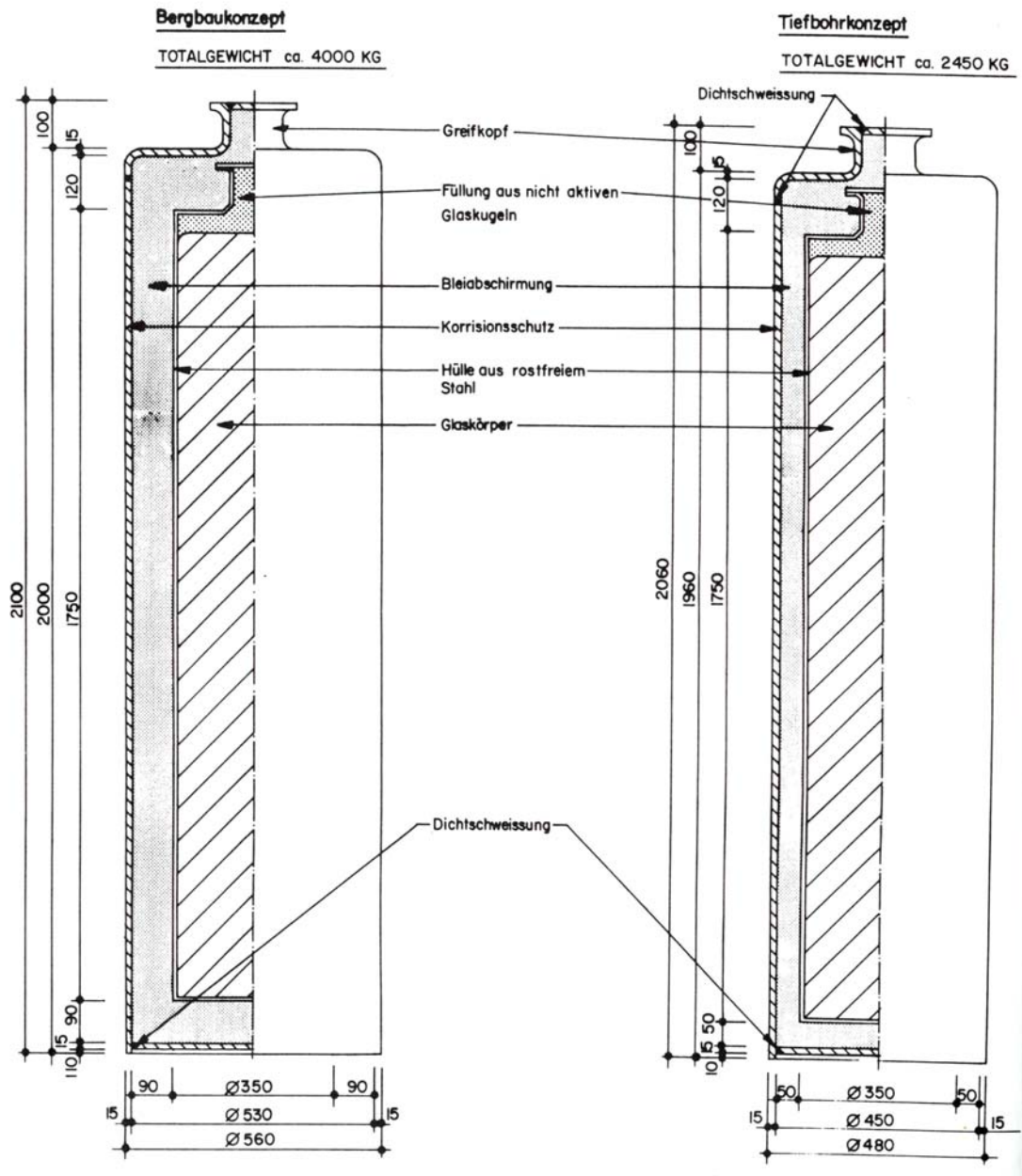


Abbildung 3-1: HAW-Kokille in Endlagerabschirmbehälter

3.3 Einlagerungskonzepte

Für die Endlagerung in Ton wurde der Opalinuston im Zürcher Weinland ausgewählt. In dieser Region verlaufen die sedimentären Ablagerungen meist horizontal und die Mächtigkeit des Opalinustons beträgt zwischen 100 und 120 m. Mit einer Bohrung wurde die Opalinustonformation in Teufen von 540 m bis 652 m festgestellt. Die Permeabilität des Opalinustons sowie der sedimentären Schichten 100 m unter- und oberhalb des Tons wurde mit 10^{-13} m/s bestimmt. Die bisherigen Spannungsmessungen haben gezeigt, dass bei der Errichtung eines Endlagers keine größeren Schwierigkeiten zu erwarten sind /3-8/.

In /3-9/ sind folgende weitere Kenndaten für den Opalinuston angegeben:

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

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

Das Endlagerkonzept der Schweiz in Ton geht von einer Streckenlagerung der Abfallgebinde aus. Dabei wurde zunächst eine Variante betrachtet, die die Errichtung zweier Schächte und die Einlagerung in Blindstrecken vorsah (Abbildung 3-2) /3-9/.

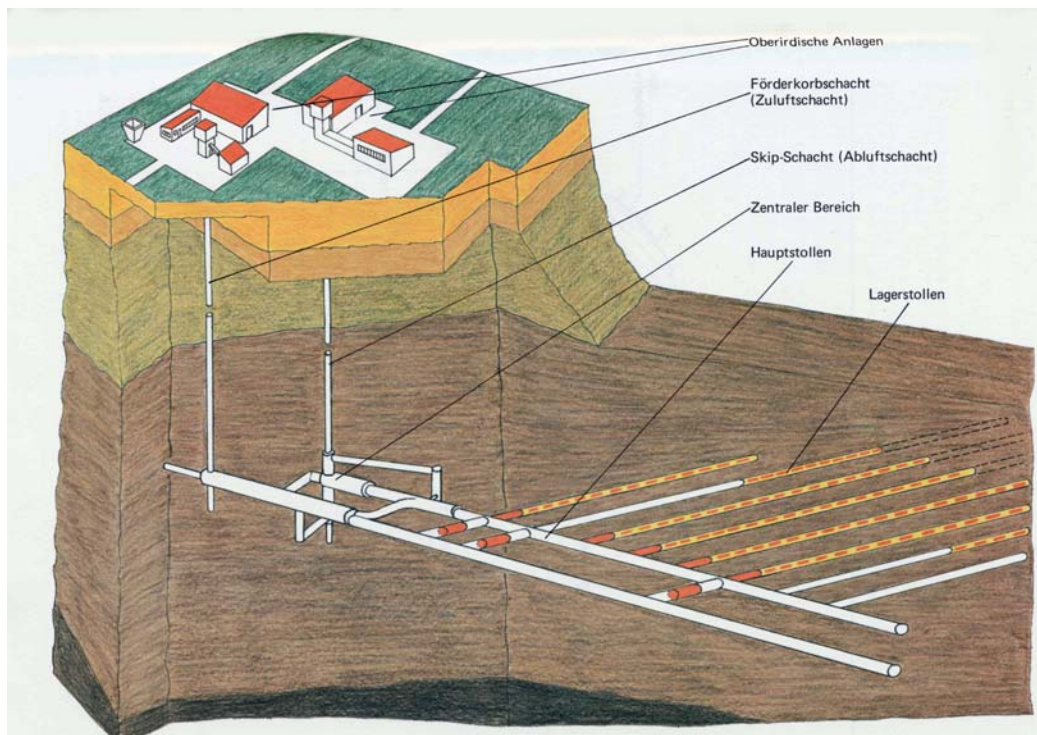


Abbildung 3-2: Endlager im Tongestein

Der Abstand zwischen den Hauptstrecken beträgt 30 – 40 m. Der Innendurchmesser dieser Strecken ist ca. 5 m (Abbildung 3-3) /3-9/.

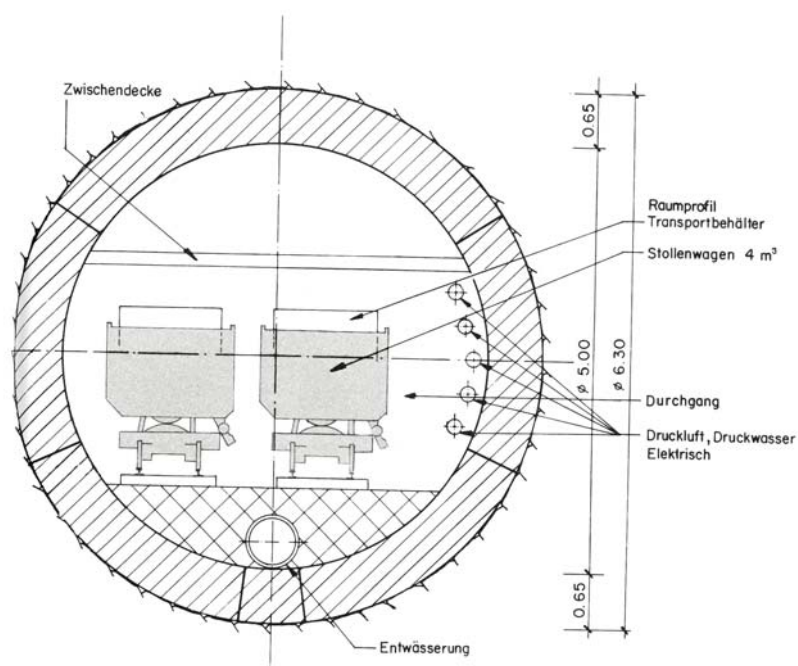


Abbildung 3-3: Querschnitt einer Hauptstrecke

Die Haupt- und Nebenstrecken sind leicht steigend vorgetrieben um einen Wasserabfluss zum Grubensumpf zu organisieren. Für den Transport untertage ist ein Gleisbetrieb mit einer batteriegespeisten Grubenbahn vorgesehen.

Die Endlagerstrecken zweigen schiefwinklig von den Hauptstrecken ab, um die Einfahrt in die Einlagerungsstrecken zu erleichtern. Die Länge der Einlagerungsstrecken soll maximal 1500 m betragen, bei einem Innendurchmesser von 3,30 m (Abbildung 3-4) /3-9/.

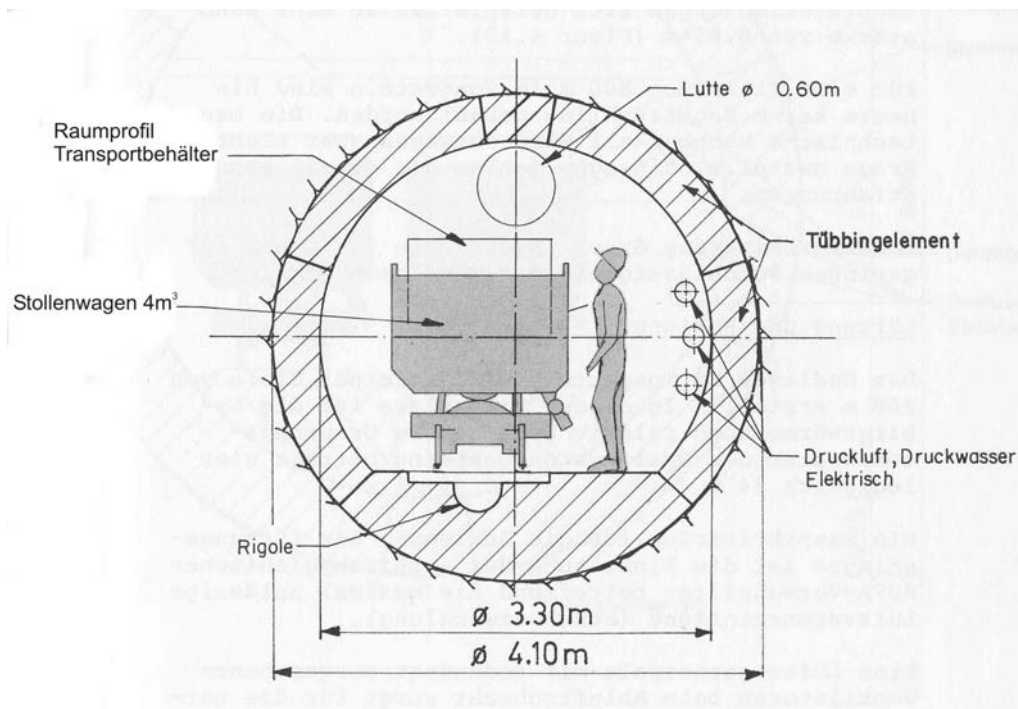


Abbildung 3-4: Querschnitt einer Einlagerungsstrecke

Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken wurde aus der Bedingung der Einhaltung einer maximalen Temperatur des Wirtsgesteins von 100 °C mit ca. 5 m bestimmt.

HAW und LL-ILW sollen in getrennten Strecken endgelagert werden.

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

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

Eine Prinzipdarstellung dieser Konzeption ist auf Abbildung 3-5 /3-10/ gezeigt.

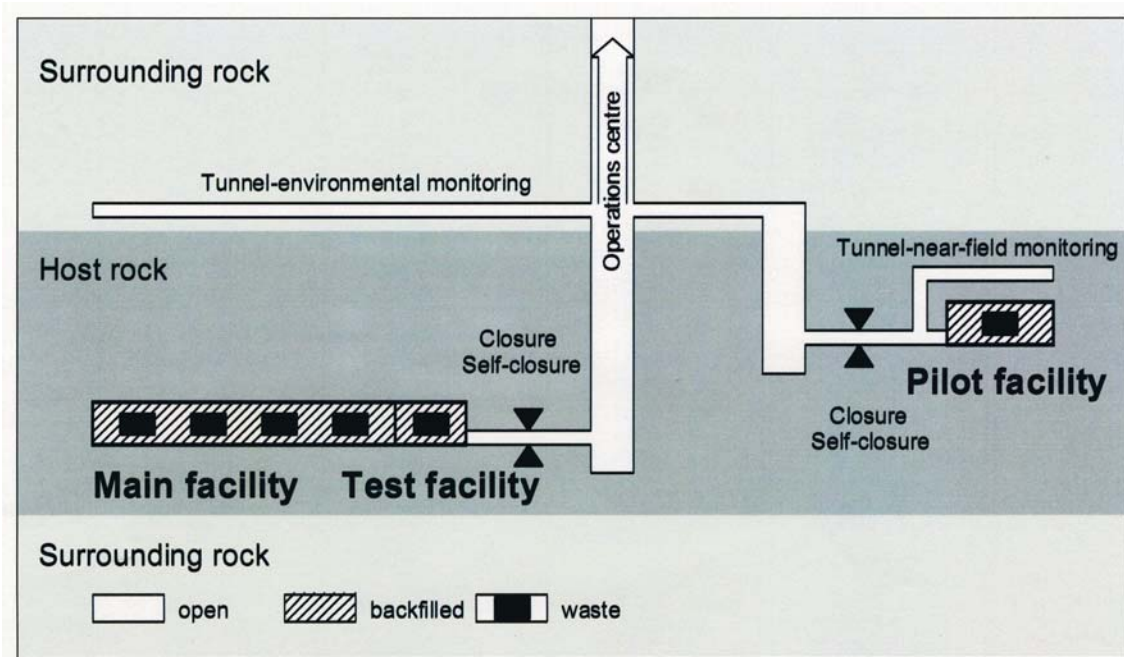


Abbildung 3-5: Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung

Basierend auf diesem Prinzipkonzept wurde in der Schweiz ein Endlagerkonzept im Opalinuston entwickelt, das in Abbildung 3-6 dargestellt ist /3-5/. Das prinzipielle layout des Endlagers ist in Abbildung 3-7 /3-11/ gezeigt.

Die Endlagerung von HAW und ausgedienten Brennelementen ist im Hauptfeld vorgesehen. Das Hauptfeld besteht aus den Einlagerungsstrecken mit einem Durchmesser von ca. 2,5 m und einer Länge von 800 m, die zwischen der Transportstrecke und der sogenannten Errichtungstrecke angeordnet sind. Der Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken beträgt 40 m. Die Einlagerungsstrecken gehen in einem Winkel von 60° von der Transportstrecke ab und sind längs der horizontalen Hauptspannungen des Wirtsgesteins orientiert. Die Neigung der Einlagerungsstrecken beträgt ca. 7°. Das Endlager ist in der Mitte der Opalinustonschicht in einer Teufe von ca. 650 m angeordnet. Das unterirdische Endlager ist über eine Rampe und einen Schacht mit der Oberfläche verbunden. Die Rampe mit einer Neigung von 12,5° verläuft diagonal über das

Hauptfeld und mündet in der unterirdischen Umladestation sowie dem Erprobungsendlager. Der Verlauf der Rampe erlaubt die Installation von Messeinrichtungen an ausgewählten Punkten oberhalb des Endlagerfeldes. Die Rampe wird in der ersten Phase für die Errichtung des Endlagerbergwerkes genutzt.

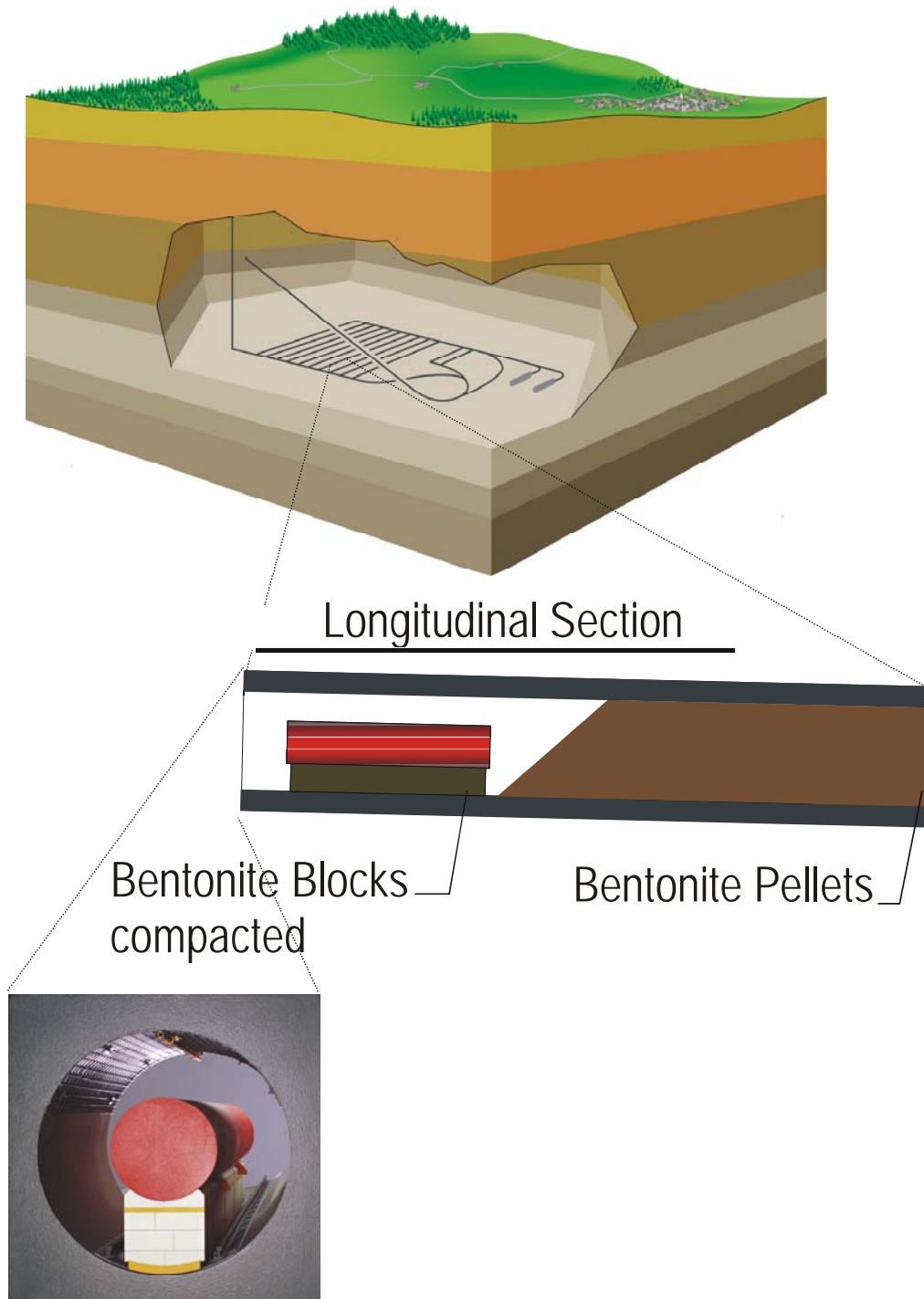


Abbildung 3-6: Endlager für HAW/ILW im Opalinuston

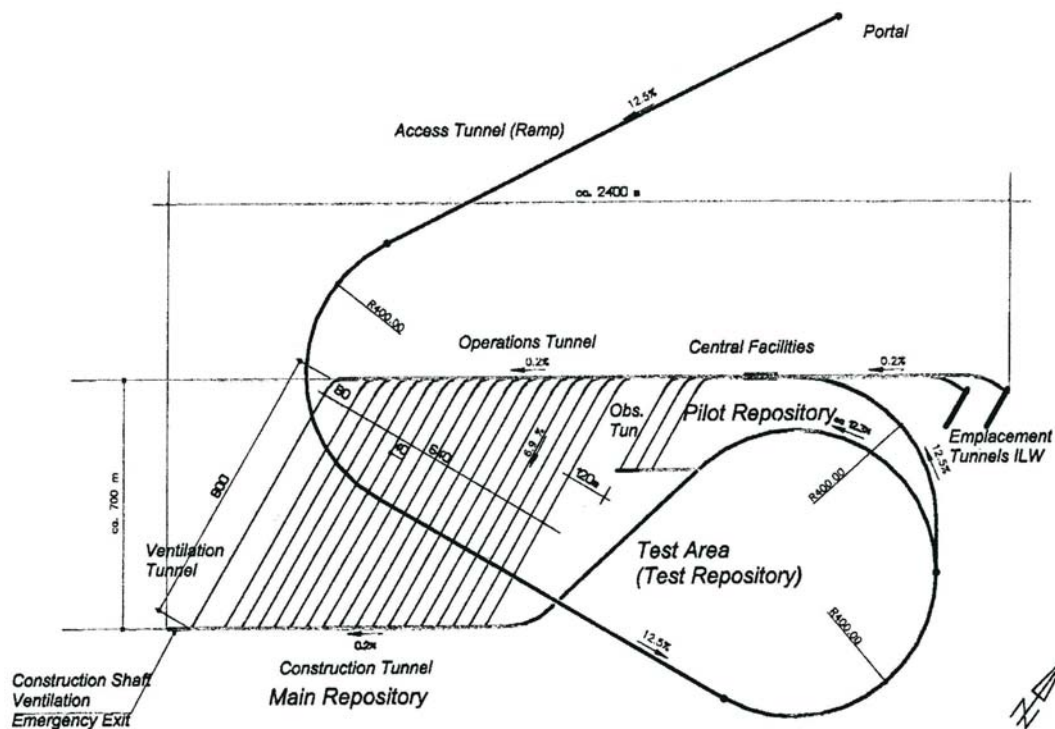


Abbildung 3-7: Layout des Endlagers im Opalinuston

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

Die ILW sollen in zwei vom Hauptfeld getrennten Einlagerungsstrecken endgelagert werden. Diese Einlagerungsstrecken sind genauso wie die Strecken im Hauptfeld orientiert, allerdings ohne Neigung.

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

3.4 Basisdaten des Forschungsstandortes Mont Terri

Das Felslabor Mont Terri liegt im Nordosten der Schweiz im Kanton Jura. Im untertage Aufschluss soll dort die Hydrogeologie, Hydrochemie und die Gebirgsmechanik des Opalinustones geklärt werden. Die lokale geologische Situation schließt ein Endlager für radioaktive Abfälle aus, dies wurde auch in der Genehmigung der Arbeiten im Felslabor durch den Kanton Jura festgeschrieben. Das geologische Zielgebiet für eine Erkundung für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Opalinuston ist das Züricher Weinland.

Das Felslabor Mont Terri steht im engen Zusammenhang mit der Errichtung eines Autotunnels im Zuge der A 16 von Delemont (Schweiz) nach Belfort (Frankreich). Der zu diesem Zweck ab 1989 aufgefahrenen Erkundungstollen wurde detailliert kartiert /3-12/, /3-13/, und 1996 im Bereich des Opalinustones zu Forschungszwecken mit 8 Nischen versehen, die die Versuchsanordnungen enthielten /3-14/. Mit Eröffnung des Autotunnels 1998 wurde der Erkundungstollen Fluchtstrecke und konnte nicht mehr weiter für Forschungszwecke genutzt werden. Vorlaufend wurde deshalb 1997/1998 ein ca. 250 m langer Parallelstollen im Opalinuston aufgefahren und im September 1998 als Mont Terri Felslabor in Betrieb genommen.

Projektführer ist die Landeshydrologie und Geologie der Schweiz, die Projektleitung liegt beim Geotechnischen Institut AG, Bern. Projektpartner waren 1996/1997 ANDRA und ISPN (Frankreich), BGR (Deutschland), ENRESA (Spanien), NAGRA (Schweiz), JNC und OBAYASHI (Japan) sowie SCK-CEN (Belgien). Im Jahr 2000 ist die GRS (Deutschland) als weiterer Partner dazugekommen.

3.4.1 Geologische Situation

Das Mont Terri Felslabor liegt in der Grenzregion zwischen dem Plateaujura im Nordwesten, der sich überwiegend nach Frankreich erstreckt und dem Falten- und Tafeljura im Südosten der Schweiz.

Die Ablagerungen gehören zum Mesozoikum (Abbildung 3-8) und haben ein Alter von 180 bis 200 Mio. Jahren. Der Mont Terri selber ist eine abgescherte Sattelstruktur des Faltenjura, die an der vom Miozän bis Pliozän (vor ca. 10 bis Mio. Jahren) gefaltet und mindestens einen Kilometer nach Nordwesten auf das Tafeljura überschoben wurde.

Der Sattel des Faltenjura enthält Tonsteine, Kalke und Mergel der Trias bis zum Malm des Jura; der liegende Tafeljura Kalksteine des Malm mit einer tertiären Sandsteindecke. Der Opalinuston im Aufschluss des Felslabors streicht NE-SW, fällt mit ca. 45 ° nach SE ein und bildet so die SE-Flanke des Sattels.

Die Erosion führte zu einer teilweisen Reliefumkehr, so dass der Sattelkern heute zu Tage ausstreicht. Der Tagesausbiss des Opalinustones in Schichtrichtung liegt in ca. 500 m Entfernung und ca. 200 m höher als der Tunnelaufschluss. Kalksteine des Dogger bilden das ca. 300 m mächtige Deckgebirge über dem Felslabor, das Liegende sind Kalkmergel des Lias und Mergelsteine und Kalke der Trias.

Neben der Hauptüberschiebungsbahn gibt es zahlreiche parallele Aufschiebungen in der NW-Flanke des Mont Terri-Sattels. Im Opalinustonaufschluss des Felslabors in der SE-Flanke wurden neben einer Hauptstörung, die ebenfalls NW-SE streicht und mit 40° etwas flacher nach SE einfällt als die Schichtung, nur Kleinstrukturen nachgewiesen. Die Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10 zeigen eine vereinfachte geologische Karte und einen Profilschnitt aus /3-14/ des Mont Terri.

3.4.2 Petrographie

Die ca. 160 m mächtige Einheit des Opalinustones im Mont Terri Felslabor gliedert sich in fünf lithostratigraphische Untereinheiten (vom Liegenden zum Hangenden) und eine Störungszone /3-14/:

- Untereinheit 1: 80 m toniger und mergeliger Schieferton mit Glimmer und knolligen, bioturbaten Mergellagen
- Untereinheit 2: 5 - 10 m kalkiger Sandstein mit eingelagerten bioturbaten Kalksteinbänken, letztere mit hohem Anteil von Quarzdetritus
- Untereinheit 3: 10-15 m mergelige Schiefertone mit Sandsteinbänken sowie bioturbaten Kalksteinen
- Untereinheit 4: 20 m toniger und mergeliger Schieferton mit mm-mächtigen Sandsteinlagen, weiß mit Pyrit
- Untereinheit 5: 40 m mergelige Schiefertone mit grauen, sandigen Kalksteinlinsen, mm-dicke weiße Sandsteinlagen mit Pyrit. Hangender Teil mit dm-mächtigen Sandsteinen und biogenen Kalksteinen.
- Hauptstörungszone 5 m, diese tektonische Struktur liegt in der Untereinheit 1

Lithostratigraphic unit	Main lithology	Stage		Series	
"Portlandien"	limestones	Tithonian		Upper Jurassic	
Reuchenette Formation	limestones with thin intercalations of marls	Kimmeridgian			
Courgenay Formation	limestones	Upper	Oxfordian		
Vellerat Formation	marls and limestones				
St-Ursanne Formation	limestones	Middle			
Bärschwil Formation	shaly marls	Lower			
"Anceps-Athleta-Schichten"	marls	Callovian		Middle Jurassic	
Dalle nacrée	limestones				
"Callovien-Ton"	marly clay				
Calcaire roux sableux	limestones	Bathonian			
Hauptrogenstein	(sandy) limestones	Bajocian			
"Lower Dogger"	(sandy) limestones				
Opalinus Clay	shales (silty and sandy)	Aalenian			
Jurensis Marls	marls and marly shales	Toarcian			Lower Jurassic
Posidonia Shales	bituminous shales				
Not defined in this study ¹	Not defined in this study ¹	Pliensbachian			
Gryphaea Limestones	limestones	Sinemurian			
Not defined in this study ¹	Not defined in this study ¹	Hettangian			
Keuper Marls	marls and anhydrite	Not defined in this study		Upper to Middle Triassic	
Trigonodus Dolomite	dolomites and limestones				
Hauptmuschelkalk	limestones				
Anhydritgroup	marls and anhydrite				

Abbildung 3-8: Stratigraphische Tabelle Trias bis Jura der Nordwestschweiz

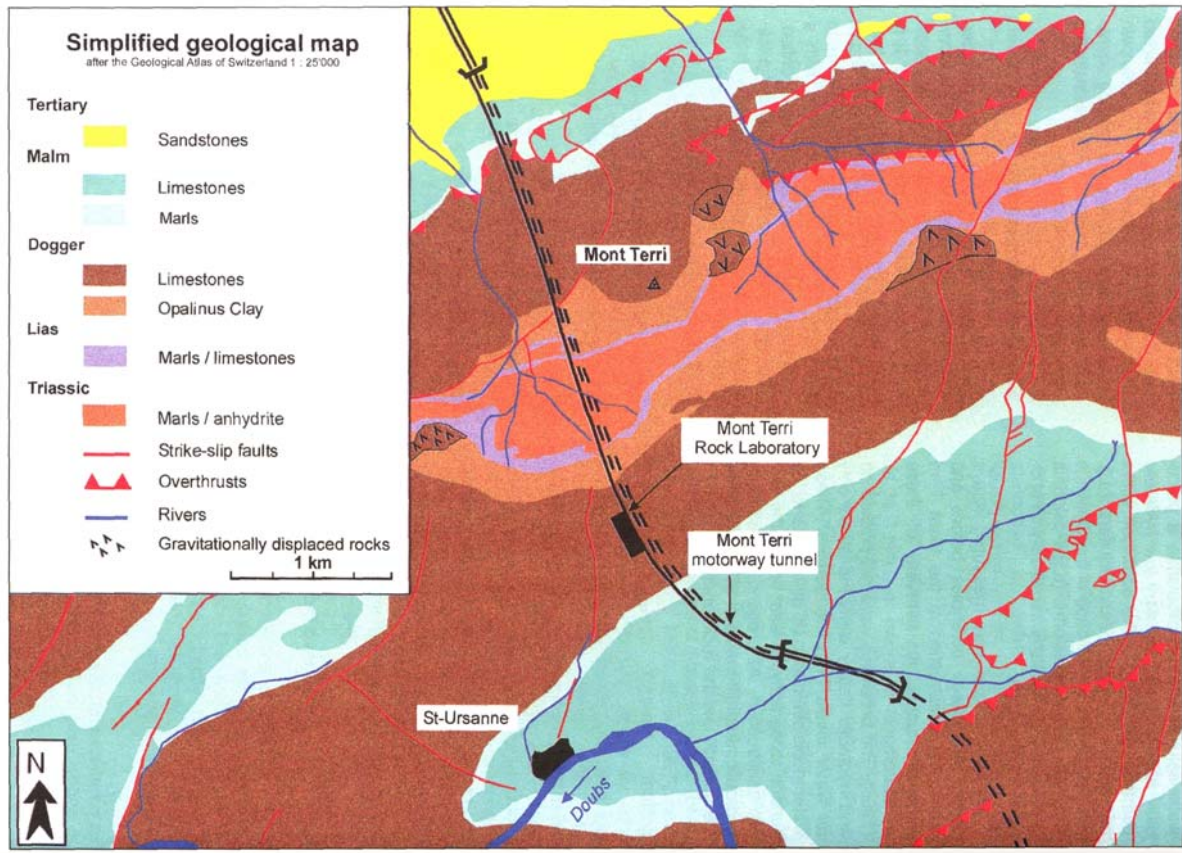


Abbildung 3-9: Vereinfachte Geologische Karte der Umgebung des Mont Terri

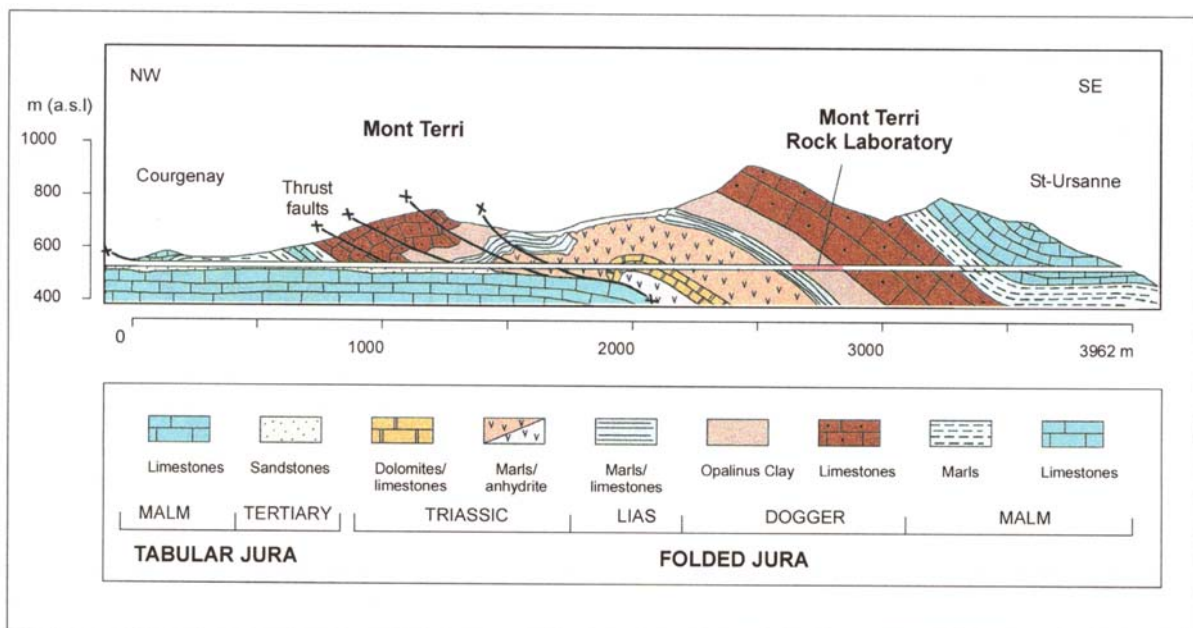


Abbildung 3-10: Geologisches Profil durch den Mont Terri

3.4.3 Mineralogie

Es wurden aus 4 Nischen Proben im Opalinuston entnommen und von vier verschiedenen Instituten mineralogisch semiquantitativ analysiert. Die Ergebnisse fasst die Tabelle 3-3 zusammen.

Minerale Gesteine	Schieferton	sandiger Schieferton	sandiger Mergelton
Tonminerale	65%	45%	20%
Quartz	20%	30%	30%
Calcit	7%	15%	40%
Dolomit	1%	1%	3%
Siderit	2%	2%	2%
Feldspat	3%	5%	5%
Pyrit	1%	1%	+
Organische Bestandteile	0,4%	+	+

Tabelle 3-3: Durchschnittliche Mineralzusammensetzung im Opalinuston (Abschätzung aus /3-14/)

Die Tonminerale des Schiefertones untergliedern sich in 17% Illit, 10% Illit-Smectit, 8% Chlorit und 20% Kaolin. Der Wassergehalt der Proben liegt zwischen 12 und 18%, die geochemische Porosität bei 5 - 11%.

Die Quellfähigkeit des Tones beträgt bis 9 Volumenprozent senkrecht zur Schichtung und der Quelldruck max. 2 Mpa.

3.4.4 Erkundungsmethoden und Forschungsarbeiten

Die in den Nischen 1996/1997 ausgeführten Experimente und die ab 1998 im Felslabor laufenden Versuche umfassen folgende Komplexe:

- Erprobung und Verbesserung von Bohrmethoden und Messtechniken, Entwicklung von neuen Messapparaturen und Messtechniken in allen Versuchsbereichen
- Machbarkeitsstudien von Meßmethoden
- Hydrogeologische Versuche
- Hydrochemische Untersuchungen
- Gebirgsmechanische Versuche

Die Versuche und Versuchsanordnungen beziehen sich auf Versuche vor Ort sowie auch auf Versuche in Laboren an Universitäten und Forschungseinrichtungen.

Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung erfolgt entlang der Veröffentlichung /3-14/ ohne Bohrtechnik und Auffahrung.

Die Bohrlochlängen für die Experimente lagen zwischen 3 und 20 m. Die Kennungen der Experimente sind in der /3-11/ den einzelnen Nischen zugeordnet.

- Experiment FM-A: Flow mechanism (fluid logging)
Zuflussmessung in 5 lösungsgefüllten Bohrlöchern mittels Temperatur- und Leitfähigkeitsmessung zur Erkennung von Zuflüssen auf tektonischen Trennflächen.

Ergebnis: Messverfahren und eingesetzte Bohrlochsonde sind verwendbar, es konnten keine Zuflüsse innerhalb der Nachweisgrenze der Methode nachgewiesen werden.

- Experiment FM-B: Flow mechanism (resin injektion)
Die Sichtbarmachung von Fließwegen erfolgt durch eine wasserlösliches Acryl (Sika, NHC5) oder ein Epoxidharz (Sika Injektion 26) und Einpressung mit 4,8 bar in ein Pilotbohrloch. Das Überbohren des Pilotbohrloches und erstellen von 4 Kernbohrungen in einer Schnittebene unterhalb und oberhalb dienen der Probengewinnung, die Sichtbarmachung der Fließwege erfolgt unter UV- Licht.

Ergebnis: Nachweis von Rissen und Scherklüften parallel zur Tunnelrichtung bis zu einer Entfernung von 1,5 m zur Tunnelwand als überwiegend offenes und durchlässiges Netzwerk. Die Hauptmasse der Öffnungen liegt in den ersten 50 cm hinter der Tunnelverkleidung (Spritzbeton). Diese Zone ist eines der Hauptuntersuchungsziele in Mont Terri und wird als EDZ (Excavation Disturbed Zone) bezeichnet, als die Zone die durch Bergbaueinflüsse verändert wird und nicht mehr die Eigenschaften des unbeeinflussten Gesteins hat. Ungestörte Opalinustonbereiche wiesen keine offenen Trennflächen auf.

- Experiment FM-C: Flow mechanism (tracer)
Die Literatur und Laborstudie zu dem Einsatz von Tracern zur Messung von Porositäten erbrachte folgende Werte senkrecht zur Schichtung $D_e(m^2/s)$ $1,1-3,0 \times 10^{-11}$ und $K(m/s)$ $1,5 \times 10^{-14}$, sowie parallel zur Schichtung D_e $2,8 \times 10^{-11}$ bis $8,3 \times 10^{-12}$ und K $3,7-4,0 \times 10^{-14}$. Die Ergebnisse beziehen sich auf Laborergebnisse im cm-Bereich und zwei Tracer, Jod-Ionen und Tritium angereichertes Wasser (HTO). Die Ergeb-

nisse sind vor Ort zu verifizieren und für den HTO - Tracer ist der Feldeinsatz zu diskutieren und zu lizenzieren.

- Experiment FM-D: Evaporation logging
Messen der Verdunstungsrate an der Oberfläche eines abgeschlossenen Bohrlochintervalls, sowie Kapillardruck mit einer Sonde (Psychrometer und Tensiometer). Die Machbarkeitsstudie zur Verdunstungsrate war positiv, der Kapillardruck konnte nicht aufgenommen werden und die Zuordnung zu permeablen Zonen gelang noch nicht.
- Experiment WS-A: Groundwater sampling (in situ) und WS-B: Porewater sampling (laboratory) /3-15/
In den durchörterten Bereichen des Opalinuston ist kein freies Grundwasser angetroffen worden, es wurden daher drei aufsteigende Bohrungen gestoßen, gespült (N₂) und abgeschlossen.

Die Zuläufe in den Intervallen nach ca. 14 bzw. 6 Monaten betragen 3,5 Liter, 4,5 Liter und 65 ml.

Aus Bohrkernen wurde Porenwasser ausgepresst. Die Analysen erbrachten folgende Ergebnisse: pH-Werte von 7,7 bis 8,8, Partialdruck CO₂ $1 \times 10^{-4,7}$ bis $1 \times 10^{-2,7}$. Die Wässer sind vom Natrium-Chlorid-Typus, die Spurenelementverhältnisse und die Isotopenuntersuchungen ergaben vereinfacht ein Mischwasser aus Meerwasserresten und diagenetischen Wässern. Eine Altersabschätzung aus Edelgasgehalten und Verhältnissen erbrachte ein Alter von 14,5 Mio. Jahre für die Porenwässer.

- Experiment GP: Hydraulic and gas permeability
Der Versuch diente der Ermittlung hydraulischer Parameter und Formationsdrücken in der Matrix des Opalinuston und in Störungen im Opalinuston.

Ergebnisse: Die Tonschieferfazies des Opalinuston ist extrem dicht, $K \sim 2 \times 10^{-13}$ m/s, druckabhängige Permeabilität zwischen den Testdrücken von 7 bis 25 bar wurden nicht beobachtet.

Die hydraulische Leitfähigkeit liegt für die Matrix des Opalinuston bei $K \sim 5 \times 10^{-13}$ m/s und in der Hauptstörungszone bei $K \sim 2 \times 10^{-13}$ m/s. Der Schwellenwert des Gasdruckes lag bei 400 kPA und ist außergewöhnlich hoch und beruht auf der geringen Permeabilität.

- Experiment ED-A: EDZ hydraulic and pneumatic tests
Der Versuch verglich zwei Bohrlochpackersysteme und Sensorsysteme (SEPPI und MMPS) und erbrachte gleichzeitig die ersten Werte verschieden gestalteter

Druckaufbaumessungen über einen Zeitraum von 6 Monaten. Die hydraulischen Durchflussraten liegen je nach Entfernung vom Stollenstoß bei ca. 1×10^{-13} m/s (5m), $3,3 \times 10^{-11}$ m/s (0,5-3,2 m) und bis 0,5 m bei $> 1 \times 10^{-8}$ m/s.

Eine Weiterentwicklung des flexibler einsetzbaren SEPPI – Systems soll in Zukunft benutzt werden.

- Experiment ED-B: evolution around new gallery
Mit einem geophysikalischen Rechenprogramm wurde der optimale Abstand des Felslabors vom Fluchttunnel und das wahrscheinliche Gebirgsverhalten des Opalinustones mit den vorhandenen Daten ermittelt.

- Experiment ED-C: EDZ geophysical characterisation
Die Versuchsannahme, dass seismische Wellen in gestörten Gebirgsbereichen ihre Geschwindigkeit ändern, sollte bestätigt, die gesteinspezifischen Parameter für die Rechenmodelle ermittelt und auf Plausibilität getestet werden. Die Tiefe der ermittelten gestörten Gebirgsbereiche auf Grund Laufzeitunterschieden der seismischen Wellen erbrachte 2 m gestörte Gebirgsformation im Tonschiefer ausgehend von der Tunnelwand und 0,8 m im sandigen Tonschiefer. Die stärkste Dämpfung der Wellen zeigen die ersten 0,5 m.

Die Ergebnisse werden in /3-16/ mit zwei anderen Lokalitäten verglichen, das Ziel, eine quantitative Beziehung zwischen seismischen Geschwindigkeiten und hydraulischer Permeabilität, kann aber noch nicht angegeben werden.

Es wurde eine geoelektrische Charakterisierung (Spektrale IP) des Tones vorgenommen, erste Ergebnisse zeigen die EDZ (aufgelockerten Bereiche) als Anomalie /3-17/.

- Experiment UZ: Unsaturated zone
Die Wasseraufnahmefähigkeit (Labor) und Verdunstung (vor Ort) des Porenwassers der Gesteine wurde mit 2 Systemen vor Ort und im Labor bestimmt. Vor Ort ist dazu die Luftfeuchtigkeit und Temperatur im Jahreslauf zu berücksichtigen.

Die Labormessungen mit dem TDR-System (time-domain reflectometry) und TP (thermocoupled psychrometer) zur Wassersättigung ergaben bei einem Startdruck von -16 MPa eine Plateaubildung bei -6 MPa nach ca. 80 Tagen, eine einheitliche Wasserfront in den Proben konnte nicht beobachtet werden.

Die ermittelten Verdunstungsraten mittels temperaturgesteuerten Psychrometern schwankten zwischen $-0,5$ und $2,5$ g/m²/h, eine Kalkulation für den gesamten Tunnel im Opalinuston ergibt eine Verdunstungsrate von $4,4$ l/h entsprechend

~0,35 mg/m²/s. Das negative hydraulische Potential daraus betrug ~ 2 MPa in 1 Meter Bohrlochtiefe. Labor und Feldversuch gaben keine einheitliche Zeitabschätzungen für Verdunstungsraten bzw. Wasseraufnahme des Tones.

– Experiment OP: Osmotic pressure

Die Laborexperimente zum Osmotischen Druck ergaben eine unvollständige Membran im Ton durch vorhandene Mikrorisse und damit ergab sich die Frage, ob überhaupt hydraulische oder osmotische Prozesse ohne Mikrorisse ablaufen. Die ermittelten Werte unter 4,23 und 4,41 MPa senkrecht zur Schichtung sind: hydraulische Permeabilität $k = 7,6 \times 10^{-21} \text{ m}^2$, Spezifisches Speichervermögen $S_s = 4,8 \times 10^{-4} / \text{m}$ mit Durchflussraten von 1 bis 3 myl/hr; chemisch-osmotischer Durchfluss senkrecht zur Schichtung 0,1 bis 0,6 myl/hr und $k_{Pi} = 1,2$ bis $6,9 \times 10^{-22}$. Die Osmotische Effizienz liegt bei 6 bis 10%. Die Proben hatten durchweg große Luftanteile, wahrscheinlich auf Mikrorissen, die durch Probenahme und Entspannung zurückzuführen sind und vor Versuchsaufnahme durch Lösung ersetzt wurden.

– Experiment CW: High-pH cement porewater

Der Rahmenversuch der Beeinflussung von Tonschiefer durch hyperalkalische Wässer mit hohem pH-Wert im Labor sollte erste geochemische Abschätzungen zur Problematik des Betoneinsatzes im Ton liefern.

Die Proben wurden einer Na-K-Ca-Hydroxidlösung in einem geschlossenen Diffusionsexperiment mit dem pH-Wert von 13,2 bei 35°C ausgesetzt und nach 4, 6 und 12 Monaten untersucht. Folgende Beobachtungen wurden gemacht: Pyrit und Siderit oxidierten, Kaolin, Quarz und Kalzit an der Oberfläche wurden teilweise gelöst, sekundäre Minerale entstanden hauptsächlich erst nach 12 Monaten: Ca-Zeolithe mit Ca-Si-O-H Phasen und Phillipsite (K-Ca-Zeolith) sowie ein Calcitzone in 1cm Abstand zur Probenfläche. Auch wenn keine Änderungen der Porosität oder Permeabilität nachgewiesen wurden reicht dieser Versuch weder in der Zeit noch im Umfang für weitergehende Aussagen.

Die Ergebnisse wurden in /3-18/ auf 18 Monate erweitert mit der Beobachtung der Abnahme des Kaolingehaltes und neu gebildetem Illit. Ein Versuch mit advektiver (offener) Anordnung erbrachte eine Porosität von 14 % und nach 12 Monaten als Neubildungen Eisenhydroxid, Illit, Fe-Chlorit, Calcit, Gips und K-Ca-Sulfat in einer Lösungsfront, die ca. 50 mm in die Probe vordrang.

– Experiment IS-A/B: In situ stress (over/undercoring)/(borhole slotter)

Zwei Methoden zur Ermittlung von ursprünglichen Spannungsfelder wurden getestet und eingesetzt. Die Versuche ergaben widersprüchliche Resultate und konnten auch die Labordaten nicht bestätigen.

Der Schlitzversuch (borhole slotter) erbrachte generell zu tiefe Spannungsdrücke, besonders die vertikalen Messwerte, 2 – 5,7 GPa lagen um Größenordnungen außerhalb der zu erwartenden Spannungen durch das Deckgebirge. Die Spannungsverhältnisse der drei Hauptrichtungen wiederum liegen mit einer Verhältniszahl von 10 viel zu hoch. Die Werte der Überbohrversuche lagen bei 5,5 – 8 GPa für die fast vertikale Komponente und die Verhältniszahl mit fast 10 immer noch zu hoch. Die Laborwerte lagen zwischen 3 und 16 GPa und würden den zu erwartenden Werten am ehesten entsprechen.

Da alle bisher angewandten Methoden die Spannung über eine Deformationsmessung ermitteln, ist für den Ton mit plastischen Verhalten eine direkte Spannungsmessung mit einem neuen Verfahren vor Ort anzustreben.

- Experiment PP: Porewater pressure
Der Versuch zur Ermittlung des Porenwasserdruckes diente in den Phasen 1 und 2 dem Test einer Piezometer-Sonde (PP). Der Test war erfolgreich der Porenwasserdruck in einer Entfernung von 20 m vom Tunnel wurde mit 2,2 MPa ermittelt, der hydraulische Gradient zum Tunnel hin ist mit 0,01 MPa/m niedrig. Das System kann auch zur Ermittlung von Diffusionsraten und Osmotischem Druck eingesetzt werden.

- Experiment DI: Diffusion in rock
Die Ergebnisse sind in /3-19/, /3-20/ veröffentlicht und wurden nicht ausgewertet.

3.4.5 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Der Opalinuston im Felslabor enthält kein freies Wasser und die Porenwässer haben ein Alter von über 10 Mio.-Jahren Die Durchlässigkeitswerte sind extrem niedrig und die aufgeschlossene Störungszone unterscheidet sich hydrogeologisch kaum vom Tonschiefer.

Die vom Tunnelbau beeinflusste Gebirgszone (EDZ) reicht bis zu 2 Meter in das Gebirge, die ersten 50 cm sind besonders betroffen. Die Zone enthält ein offenes und durchgängiges Netzwerk von Rissen. In eine Tiefe bis zu 1 m ist die sekundäre Entstehung von Gips zu beobachten

3.5 Projekt Züricher Weinland, Bohrung Benken

Neben der Untersuchungen im Kristallin wurde die NAGRA 1988 vom Bundesrat der Schweiz verpflichtet, auch Sedimentgesteine auf die Eignung als Wirtsgestein für eine Endlagerung von hochradioaktiven Stoffen in tiefen geologischen Schichten zu untersuchen. Dies führte 1994 zu dem Vorschlag der NAGRA /3-21/ vorrangig den Opalinuston zu explorieren.

Die erste Sondierbohrung /3-22/ im Kanton Zürich bei der Gemeinde Benken wurde am 03.09.1998 begonnen und hatte am 12.05.1999 die Endteufe von 1007 m erreicht. Die Bohrung erschloss das gesamte mesozoische Schichtpaket und wurde bis in das Kristallin vorgetrieben.

Die Untersuchungsprogramme in der Bohrung laufen noch, die ersten Ergebnisse wurden in einem Technischen Bericht der NAGRA im September 2001 veröffentlicht /3-23/.

In den Jahren 1991/92 wurden im Weinland reflexionsseismische Profilmessungen vorgenommen /3-24/ und es konnte ein ca. 50 km² großes Gebiet mit ruhiger Lagerung abgegrenzt werden. 1997 wurde dieses Gebiet mit 3D-Seismik vermessen und der 105 bis 125 m mächtige Opalinuston in einer Teufenlage von 400 bis 800 m unter der Oberfläche lückenlos erfasst. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in einem Technischen Bericht der NAGRA im September 2001 vorgestellt /3-25/.

3.6 Endlagerauslegung/-technik

3.6.1 Einlagerungstechnologie

Der Ablauf der Einlagerung der HAW-Abfallgebinde ist wie folgt vorgesehen /3-11/:

Die Anlieferung der Gebinde erfolgt hauptsächlich über den Schienenweg und in Ausnahmefällen über die Strasse zu den Tagesanlagen. Nach Eingangskontrolle werden die Gebinde in endlagerspezifische Transport- bzw. Abschirmcontainer umgeladen und mit einer Zahnradbahn über die Rampe nach Untertage zur Umladestation transportiert. Hier werden die Gebinde aus den Transport- bzw. Abschirmbehälter auf einen speziellen Einlagerungswagen umgeladen. Der mit einer Seilwinde abgesicherte ferngesteuerte Einlagerungswagen transportiert das Abfallgebinde zusammen mit dem Untergestell aus kompaktierten Bentonitblöcken zum Einlagerungsort und platziert diese in der Einlagerungstrecke. Danach wird der Einlagerungswagen mittels der Winde

aus der Strecke herausgezogen. Anschließend erfolgt die Verfüllung mit Bentonitgranulat. Danach kann das nächste Gebinde eingelagert werden.

3.6.2 Verfüll- und Verschlusskonzept

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

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

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

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

3.6.3 Auffahrtechnik

Zur vorgesehenen Auffahrtechnik liegen keine Informationen vor. In /3-11/ wird dargestellt, dass die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, dass für die Strecken mit einem Durchmesser von 2,5 m kein Streckenausbau erforderlich ist. Es sollen lediglich Anker und Netze für den Arbeitsschutz eingesetzt werden. Alle anderen Strecken, einschließlich der Einlagerungsstrecken für ILW sollen mit konventionellen Mitteln – Anker und Spritzbeton gesichert werden.

3.6.4 Entwicklungsstand der Einlagerungs- und Verfülltechnik

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

3.7 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

Detaillierte Daten zur Planung und Realisierung des Endlagers liegen nicht vor. In /3-6/ ist angegeben, dass das Endlager um 2050 erforderlich sein wird.

3.8 Sicherheitsnachweiskonzept

Entsprechend der Gesetzgebung der Schweiz und den entsprechenden Richtlinien sind dem Sicherheitsnachweiskonzept folgende Grundsätze zu Grunde zu legen /3-26/

Prinzipien der Endlagerung

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

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

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

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

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

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

Schutzziele

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

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

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

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

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

In /3-27/ ist ein Weg zum Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einer kristallinen Formation dargelegt. Dieses Nachweiskonzept geht von einem Vergleich eines radiotoxischen Index (RTI) für natürliche Gesteinsformationen und des RTI eines Endlagers unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls sowie der Rückhaltewirkung der technischen und natürlichen Barrieren aus.

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

3.9 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

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

4 Frankreich

In Frankreich sind z. Z. 59 Kernkraftwerksblöcke an 19 Standorten in Betrieb mit einer installierten Gesamtbruttoleistung von 65 952 MWe. Der Anteil der Kernenergie an der Gesamtstromerzeugung beträgt ca. 75 % /4-1/. Mit Ausnahme des schnellen Brutreaktors Phenix sind alle in Betrieb befindlichen KKW mit Druckwasserreaktoren ausgerüstet /4-2/. Davon sind

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

Das erste KKW mit einem Gas-Graphit-Reaktor ist 1956 in Betrieb gegangen. Mit der Aufnahme des kommerziellen Betriebes in den KKW Civaux-1 und 2 im Jahre 2002 wurde das französische Ausbauprogramm der Kernenergie vorläufig abgeschlossen.

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

In Frankreich sind alle Einrichtungen des Kernbrennstoffkreislaufes vorhanden, darunter die Wiederaufarbeitungsanlage La Hague mit zwei Produktionslinien, Anlagen zur Urananreicherung sowie Anlagen zur Fertigung von Uran- und MOX-Brennelementen. Mit dem Gesetz N° 91-1381 vom 30. Dezember 1991 wurden drei Hauptforschungsrichtungen für das Management hochaktiver und langlebiger radioaktiver Abfälle festgelegt /4-3/, /4-4/:

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

4.1 Endlagerszenarien

In Frankreich werden die radioaktiven Abfälle wie folgt klassifiziert /4-5/:

- Sehr schwachaktive Abfälle (VLLW) – Abfälle mit einer spezifischen Aktivität von einigen zehn Bq pro Gramm oder weniger, und die in heterogener Form vorliegen. Die Abfälle resultieren hauptsächlich von der Demontage nuklearer Anlagen. Zu dieser Kategorie werden auch langlebige Abfälle gezählt, die Radium erhalten und hauptsächlich bei industriellen Prozessen anfallen;
- Schwach- und mittelaktive Abfälle (LILW) (Abfallkategorie A) - Abfälle, die hauptsächlich kurzlebige oder mittellebige β - und γ -Emitter enthalten (Halbwertszeit unter 30 Jahre) sowie geringe Mengen an langlebigen α -Emittlern (bis 0,37 GBq/t). Die mittlere Aktivität der Abfallkategorie A ist unter 370 GBq/t;
- Mittelaktive Abfälle (ILW) (Abfallkategorie B) - Abfälle, die langlebige Emitter enthalten, einschließlich α -Emitter mit einer Aktivität über 0,37 GBq/t;
- Hochaktive oder langlebige Abfälle (HAW) (Abfallkategorie C) – ausgedienter Kernbrennstoff, oder bereits konditionierte Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Die Abfälle enthalten hochaktive Spaltprodukte und Aktinide mit einer signifikanten Wärmeentwicklung.

Die vorhandenen radioaktiven Abfälle werden im Nationalen Inventar der Radioaktiven Abfälle erfasst, das von ANDRA geführt wird.

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

ANDRA veröffentlicht folgende Daten zum radioaktiven Abfall Frankreichs, die sowohl die gegenwärtigen vorhandenen Abfallmengen als auch eine Vorschau, einschließlich Stilllegungsabfälle, umfassen /4-2/:

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

- 40 Jahre Betrieb der KKW;
- Gesamtmenge des ausgedienten Kernbrennstoffes ca. 40.000 tSM (Uranoxid-, MOX- und wiederaufbereiteter Uranbrennstoff);
- Der gesamte Uranoxidbrennstoff wird wiederaufbereitet, einschließlich bis zur Stilllegung der bestehenden KKW. Die Verwendung des im Kernbrennstoff enthaltenen Plutoniums ist offen.

- Ausgedienter MOX-Brennstoff (ca. 100 t/a ab 1995) und der ausgediente Uranbrennstoff werden nicht wiederaufbereitet.

Abfallkategorie	TOTAL	Bemerkungen
VLLW - Mineralische Rückstände	52 Mill. t	
VLLW (ohne mineralische Rückstände)	1.000.000 bis 2.000.000 m ³	Hauptsächlich Stilllegungsabfälle mit einer Aktivität zwischen 1 und 100 Bq/g. Die Abschätzung ist auf Basis erster Stilllegungen und Rückbau zu präzisieren
LILW - SL	1.300.000 m ³ (endgelagert)	Einschließlich Zentrum Manche und dumping
LILW - SL (Tritium kontaminierte Abfälle)	3.500 m ³	
LLW - LL (Graphit)	14.000 m ³	Rohvolumen
LLW - LL (Radiumhaltige)	> 100.000 m ³	Abfälle von früherer Industrie und kontaminierten Standorten
ILW - LL	60.000 m ³	
HAW Verglaste Spaltprodukte	5.000 m ³	Davon Marcule – 500 m ³ und La Hague – 4.500 m ³
Ausgedienter Kernbrennstoff	3.500 t (Schwermetall)	Anteile: 2.650 t MOX und 850 t Uranbrennelemente

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

Bei einem Szenario 2, wo jedes Jahr nur soviel Uranoxidbrennstoff wiederaufbereitet wird, wie Plutonium für die MOX-Brennstoffproduktion erforderlich ist, und dann erfolgreicher Wiederaufarbeitung zur Stilllegungszeit der KKW ergibt sich folgendes Mengengerüst (ohne VLLW, LILW-SL, LLW-LL), siehe Tabelle 4-2, /4-2/, /4-6/:

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

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

In /4-5/ werden folgende Angaben (s. Tabelle 4-3) zum radioaktiven Abfall Frankreichs bis 2020 gemacht:

Abfallkategorie	Volumen in 2020 gesamt m ³	Gesamtaktivität TBq	
		α	βγ
VLLW	250.000	3	
LILW-SL (Abfallkategorie A)	500.000	250	30.000
ILW-LL (Abfallkategorie B)	90.000	500.000	1.700.000
HAW-LL (Abfallkategorie C)	6.000	5.000.000	1.000.000.000

Tabelle 4-3: Volumen und Gesamtaktivität radioaktiver Abfälle in Frankreich

Von der CEA wurden folgende Angaben zu den radioaktiven Abfällen Frankreichs veröffentlicht /4-4/:

- VLLW - hauptsächlich KKW-Stillegungsabfälle - ca. 1.000.000 – 2.000.000 m³ bis 2020;
- LLW - hauptsächlich KKW Betriebsabfälle, sowie Abfälle aus Forschung, Medizin und Industrie - bis 2020 ca. 500.000 m³;
- ILW - hauptsächlich aus Brennelementefabrikation und -wiederaufarbeitung sowie CEA Forschungszentren – bis 2020 ca. 60.000 m³;
- HAW - ca. 5.000 m³ bis 2020.

Nach /4-7/ werden für die Beschreibung des radioaktiven Inventars an hochaktiven und sowie langlebigen radioaktiven Abfälle ca. 60 Abfallströme berücksichtigt, die aus den COGEMA Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague und Marcoule, den CEA-Forschungszentren, und den EDF Kernkraftwerken resultieren. Sowohl die vorhandenen Abfallbinde als auch der künftige Abfallanfall von dem Betrieb der französischen KKW sowie der Wiederaufarbeitungsanlagen werden berücksichtigt. Die Gesamtmenge des ausgedienten Kernbrennstoffes bei einer angenommenen Betriebszeit der KKW von 40 Jahren wird auf ca. 45.000 t eingeschätzt. Das Inventar wird wie folgt angegeben (s. Tabelle 4-4), /4-2/:

Abfallart	Inventar	Abfallgebinde	
		Anzahl der Gebinde	Volumen m ³
1. Transuran-Abfälle (Kategorie B)	Aktivierete Abfälle von EDF KKW-Reaktoren (B1) Bituminierte Abfälle von COGEMA Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague und Marcule (B2) Zementierte technologische Abfälle sowie andere Abfälle von COGEMA Wiederaufarbeitungsanlagen und CEA Forschungszentren (B3) Zementierte Hüll- und Endteile, technologische Abfälle von der COGEMA Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague (B4) Kompaktierte Abfälle (Hüll- und Endteile, technologische Abfälle von der COGEMA Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague) (B5)	ca. 14.000	ca. 47.000
2. Verglaster HAW (Kategorie C)	Verglaste Abfälle von CEA Marcoule (PIVER) und COGEMA Marcoule (AVM) (C0) Gegenwärtige verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C1) Künftige verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C2) UOX/MOX verglaste Abfälle von COGEMA La Hague (C3) Verglaste Plutoniumabfälle von COGEMA La Hague (C4)	Von ca. 41.000 bis ca. 131.000	Von ca. 2.500 bis ca. 7.000
3. Ausgedienter Kernbrennstoff	UOX und URE (Wiederaufarbeitungs-uran) (CU1) MOX (CU2)		Von ca. 11.000 bis ca. 75.000

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

In /4-8/ werden u. a. folgende Angaben zu den radioaktiven Abfällen Frankreichs bis 2020 und bis 2070 gegeben (s. Tabelle 4-5):

Kategorie B (LLW-LL, ILW-LL) m ³	Kategorie C (HAW) m ³	Ausgedienter Kernbrennstoff tSM	Literaturquelle
Total bis 2020			
80 000	5 000	10 000 m ³	/4-9/
50 000	5 000		/4-10/
57 000	5 000	7 700	/4-11/*
Total bis 2070			
>108 605	8 000	0	/4-12/**
>93 650	5 020	24 000	/4-12/***
59 689 – 61 374	8 168	0	/4-13/**
50 544 – 52 229	5 000	24 000	/4-13/***
* Berechnet aus 350 t/a und der Annahme von 22 Jahren (von 1 200 tSM/a Gesamtbrennstoffverbrauch werden 350 tSM/a nicht wiederaufgearbeitet			
** Szenarium 1 - Vollständige Wiederaufarbeitung der Brennelemente ab 2000. Der Brennstoffverbrauch pro Jahr teilt sich in 1.080 tSM für Uran- und 120 tSM für Mox-Brennelemente auf.			
*** Szenarium 2 – Vollständige Wiederaufarbeitung bis 2020. Anschließend anfallende Brennelemente werden zunächst zwischen- und später direkt endgelagert. Brennstoffstruktur wie vorstehend.			

Tabelle 4-5: Aufkommen radioaktiver Abfälle in Frankreich bis 2020 und bis 2070

Tabelle 4-5 zeigt eine Übersicht über aus der Literatur verfügbaren Daten zum Aufkommen der mittelaktiven langlebigen radioaktiven Abfälle (ILW-LL, französische Abfallkategorie B), der hochaktiven Abfälle (HAW, französische Abfallkategorie C) und des ausgedienten Kernbrennstoffes bis 2020.

Die Tabelle 4-6 zeigt die relativ große Unsicherheit zum Inventar, das in ein geologisches Endlager zu verbringen wäre. Ungeachtet dessen, zeigen die verfügbaren Daten zur vorgesehenen Kapazität eines geologischen Endlagers in Frankreich, dass die anfallenden Abfallmengen in einem Endlager verbracht werden können (s. Kapitel 4.3).

ILW-LL (Abfallkategorie B) m ³	HAW (Abfallkategorie C) m ³	Ausgedienter Kern- brennstoff	Literaturquelle
60.000	5.000	3.500 t	/4-2/
90.000	6.000	-	/4-5/
60.000	5.000	-	/4-4/
47.000	2.500 – 7.000	11.000 – 75.000 m ³	/4-7/
80.000	5.000	10.000 m ³	/4-9/
57.000	5.000	7.700 t	/4-11/

Tabelle 4-6: Literaturangaben zum Aufkommen an ILW-LL, HAW und ausgedientem Kernbrennstoff in Frankreich

In /4-3/ wird ein Mengengerüst für die einzulagernden Abfallströme für zwei Szenarien angegeben, wobei eine Betriebszeit der KKW von 40 Jahren und eine durchschnittliche Elektroenergieerzeugung von 400 TWh/a der KKW zu Grunde gelegt ist.

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

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

Bei diesen Szenarien sind folgende Mengen an Kernbrennstoff wiederaufzuarbeiten:

- Szenarium 1
 - Uranoxid-Brennelemente 41.500 tSM
 - Natururanoxid-Brennelemente 800 tSM
 - MOX-Brennelemente 2.700 tSM
- Szenarium 2
 - Uranoxid-Brennelemente 16.000 tSM

Entsprechend dieser Szenarien ergeben sich die in Tabelle 4-7 aufgeführten Mengen an endzulagernden Abfällen. Diese Daten liegen den weiteren Betrachtungen zu Grunde.

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

* Beschreibung der Gebinde s. Kap. 4.2

Tabelle 4-7: Endlagerinventar

4.2 Behälterkonzepte und -materialien

Das Behälterkonzept der ANDRA sieht eine Vielzahl von Behältertypen vor, die nach ausgewählten Kriterien für die verschiedenen Abfallarten bestimmt wurden /4-3/, /4-7/. Die Hauptkriterien sind folgende:

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

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

4.2.1 Behälter für Abfallkategorie CU - Brennelemente

Tabelle 4-8 zeigt die Primärbehälter für die verschiedenen Brennelemente.

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

Tabelle 4-8: Primärbehälter für Abfallkategorie Brennelemente (Abfallkategorie C)

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

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

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

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

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

Zu den übrigen in Tabelle 4-8 aufgeführten Primärbehältern liegen keine Informationen vor.

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

Die BE-Endlagerbehälter bestehen aus zwei Teilen – dem zylindrischen Gehäuse und einem Deckel mit Konstruktionselementen für die Handhabung der Behälter (s. Abbildung 4-1). Es wird noch untersucht, ob der Behältermantel und Boden in einem Stück gefertigt werden oder der Boden wie der Deckel eingeschweißt wird. Die Höhe der Endlagerbehälter ist der Höhe der zwei Primärbehältertypen angepasst und beträgt zwischen 4880 mm und 5630 mm. Der Durchmesser der Endlagerbehälter beträgt 1200 mm. Die Wandstärke der Endlagerbehälter soll 110 mm betragen. Der beladene Endlagerbehälter hat eine Masse von ca. 100 t bei einem Eigengewicht von ca. 60 t.

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

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

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

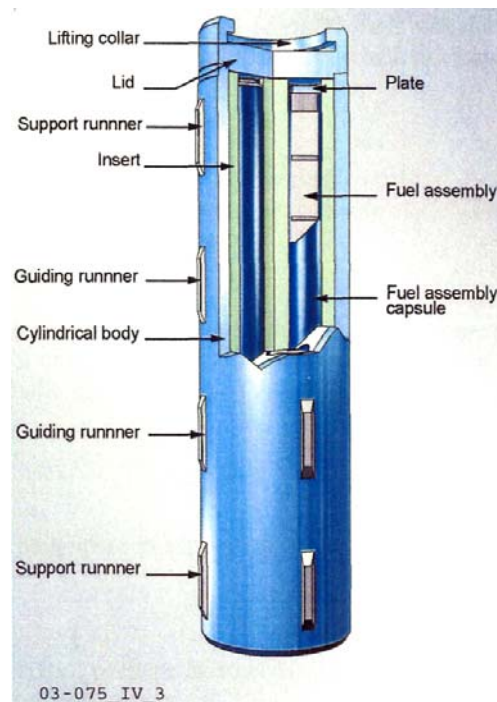


Abbildung 4-1: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

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

4.2.2 Behälter für Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle

In der Tabelle 4-9 sind die Primärbehältertypen für verglaste Abfälle aufgeführt. Tabelle 4-10 zeigt die Hauptkenndaten dieser Behälter. Alle Behälter sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und werden mit Ausnahme der C0.1 Behälter mit einem verschweißten Deckel verschlossen und sind wasserdicht. Der Verschluss der C0.1 Behälter ist nicht wasserdicht. Das durchschnittliche Gewicht der gefüllten Behälter mit Ausnahme der C0.1 Behälter beträgt ca. 500 kg, der gefüllte C0.1 Behälter wiegt 90 kg.

Abfallart	Bezeichnung des Primärbehälters	Erläuterung
Verglaste Abfälle	C0.1	Verglaste Abfälle von PIVER
	C0.2	Verglaste Abfälle von Umo R7
	C0.3	Verglaste Abfälle von AVM
	C1	Gegenwärtige Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid- BE-Wiederaufarbeitung
	C2	Künftig vorgesehene Verpackung für verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und Natururanoxid-BE-Wiederaufarbeitung
	C3	Verglaste Abfälle aus der Uranoxid- und MOX-BE-Wiederaufarbeitung
	C4	Verglaste Abfälle mit Pu-Gehalt aus der BE-Wiederaufarbeitung

Tabelle 4-9: Primärbehälter für verglaste Abfälle (Abfallkategorie C)

Behältertyp	Max. Außenhöhe mm	Max. Außendurchmesser mm	Max. Innenvolumen l
C0.1	575 bis 875	386	39 - 45
C0.2, C1 bis C4	1.338	430	175
C0.3	1.015	498	175

Tabelle 4-10: Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle

Tabelle 4-11 zeigt die Restwärmewicklung und die festgelegte Zwischenlagerzeit der Gebinde nach ihrer Herstellung.

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

Tabelle 4-11: Restwärmewicklung und Zwischenlagerzeit der Primärbehälter mit verglasten Abfällen

Die Primärbehälter mit verglasten Abfällen sollen in Endlagerbehälter verpackt werden (Abbildung 4-2). Die Hauptfunktion der Endlagerbehälter ist der Schutz der verglasten Abfälle vor einem Kontakt mit Wasser. Darüber hinaus haben diese Endlagerbehälter einen sicheren Einschluss der Abfälle für eine Zeitspanne zu sichern, in der die Aktivität der kurz- und mittellebigen Radionuklide dominierend ist. Der Schutz der Glasmatrix vor Faktoren, die eine signifikante Veränderung der Matrix hervorrufen könnten, wenigstens in der Zeit, in der die Abfälle noch eine signifikante Restwärmeentwicklung aufweisen ist eine weitere Funktion der Endlagerbehälter. Durch die im Verhältnis zu den Primärbehältern größere Oberfläche der Endlagerbehälter wird die Wärmeabgabe an die Umgebung erhöht.



Abbildung 4-2: Endlagercontainer für verglasten HAW

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

Alle Endlagerbehälter sind mit keramischen Gleitern versehen.

Entsprechend der Geometrie der Primärbehälter sind drei Typen der Endlagerbehälter vorgesehen (s. Tabelle 4-12).

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

Tabelle 4-12: Abmessungen und Masse der gefüllten Endlagerbehälter für verglaste Abfälle

4.3 Endlagerkonzept

Die Endlagerung in Frankreich sieht sowohl Oberflächenendlager als auch geologische Endlager vor. Die Tabelle 4-13 zeigt die für die unterschiedlichen Abfallkategorien vorgesehene Art der Endlagerung /4-3/.

Abfallkategorie	Kurzlebige Hauptnuklide < 30 Jahre	Langlebige Hauptnuklide > 30 Jahre
Natürliche Aktivität	Vorgesehen ist Oberflächenendlagerung	
Sehr schwachaktive Abfälle (VLLW)		
Schwachaktive Abfälle (LLW)	(Abfallkategorie A) Oberflächenendlagerung in den Endlagern La Manche Center (CM) sowie Aube (ANDRA)	Untersuchung der Endlagerung radioaktiver Abfälle mit Ra- bzw. Grafitgehalt
Mittelaktive Abfälle (ILW)		
Hochaktive Abfälle (HAW)	Untersuchung der geologischen Endlagerung gem. Gesetz vom 30.12.1991	

Tabelle 4-13: Konzeption der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frankreich

Für die Endlagerung hochaktiver Abfälle werden sowohl Granit- als auch Tonformationen betrachtet. Seit 1992 werden Arbeiten zur Endlagerkonzeption durchgeführt. Geologische Erkundungsarbeiten laufen seit 1994 /4-3/. 1997 wurden generische Endlagerkonzepte für drei Standorte (Tonformation in Meuse/Haute-Marne sowie Gard und Granitformation in Vienne) vorgelegt. Die weiteren Arbeiten mündeten in die Entwicklung von vorläufigen Endlagerkonzepten, die die Ergebnisse von ersten Sicherheitsbewertungen, insbesondere bezüglich der Gebinde und der technischen Barrieren berücksichtigten. Im Dezember 1998 wurde von der französischen Regierung die Errichtung eines Untertagelabors in der Tonformation Meuse/Haute-Marne beschlossen. Die für eine Tonformation am o. g. Standort entwickelte Endlagerkonzeption wird im weiteren beschrieben.

Die Tagesanlagen des Endlagers sollen eine Fläche von ca. 50 bis 100 ha und die Untertageanlage von ca. 1.500 bis 3.000 ha einnehmen. Abbildung 4-3 zeigt einen Ausschnitt des schematischen Layouts des Endlagers /4-7/. Die Endlagerung soll in einer Teufe von ca. 485 m erfolgen. Die Verbindung zwischen Unter- und Übertage erfolgt durch vier Schächte und eine Rampe, die in einer so genannten Schachtzone angeordnet sind, die sich am Rand der Einlagerungsfelder befindet.

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

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

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

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

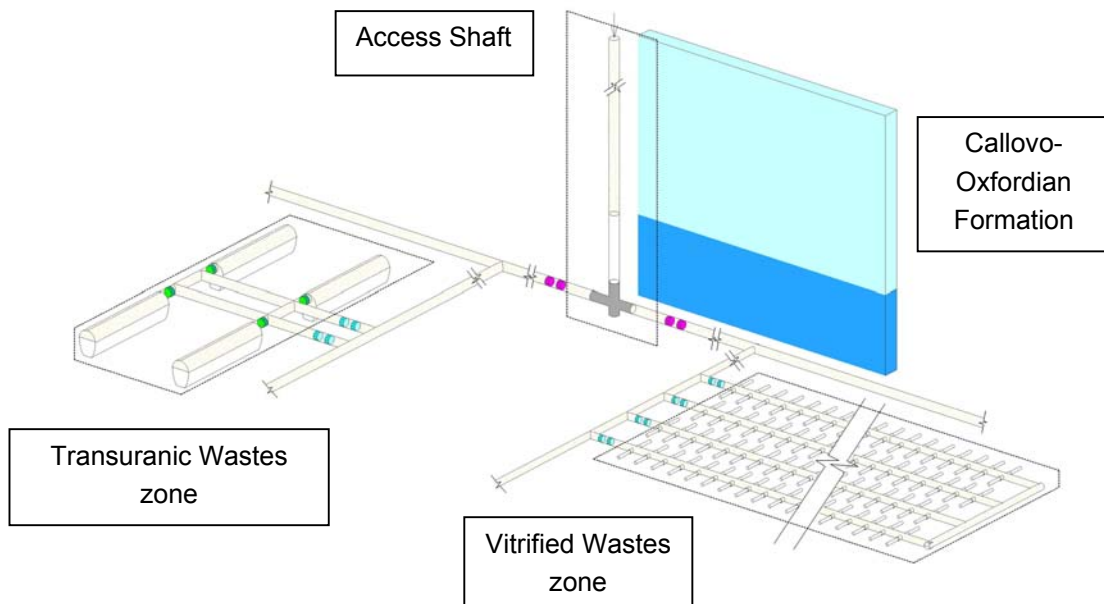


Abbildung 4-3: Schematisches Layout des Endlagers (Ausschnitt)

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

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

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

4.3.1 Endlagerung Abfallkategorie C (verglaster HAW)

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

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

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

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

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

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

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

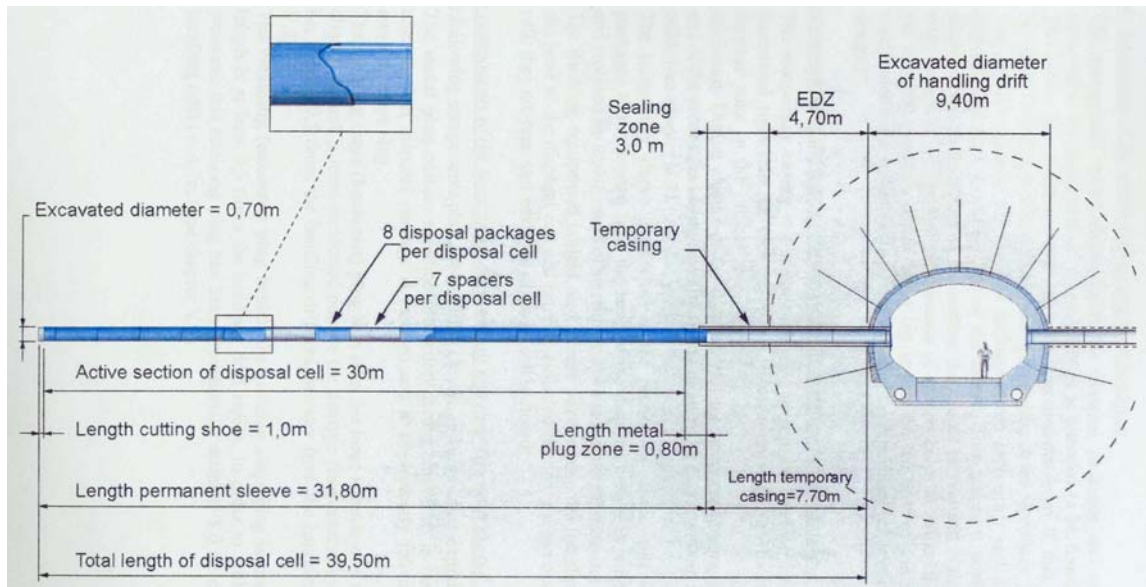


Abbildung 4-4: Einlagerungszelle für verglasten HAW

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

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

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

4.3.2 Endlagerung Abfallkategorien CU1 und CU2 (ausgedienter Kernbrennstoff)

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

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

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

Das Bohrloch ist mit einem Metallrohr verkleidet, das aus 2 m langen Metallringen zusammengesetzt ist. Die Wandstärke des Metallrohres beträgt 30 mm (CU1) bzw. 25 mm (CU2). Das Metallrohr ist perforiert, um einen Zutritt von Feuchtigkeit und damit die Sättigung des Bentonitpuffers zu ermöglichen. Die Perforierung ist so minimal wie möglich gehalten, um die mechanische Standfestigkeit möglichst gering zu beeinflussen.

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

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

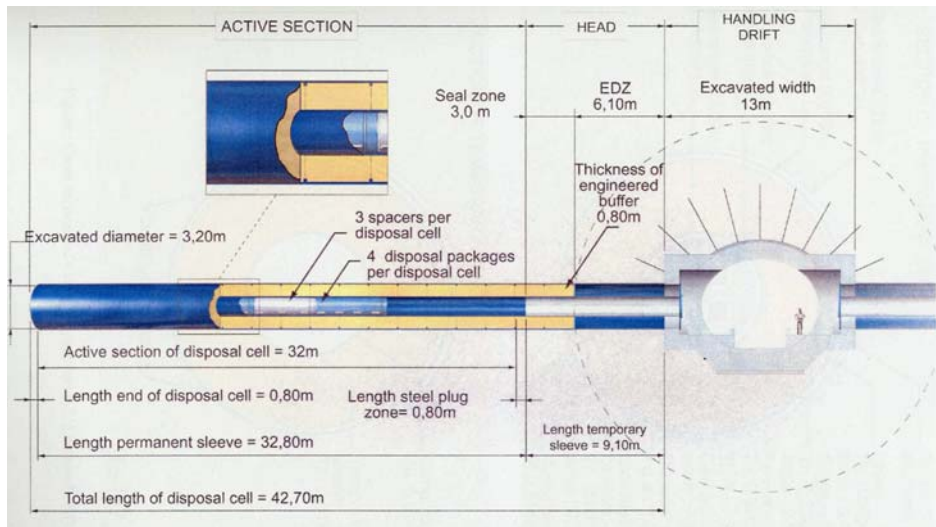


Abbildung 4-5: Einlagerungszelle für ausgedienten Kernbrennstoff

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

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

Im Innern der Bentonitauskleidung befindet sich das Einlagerungsrohr aus dem gleichen Kohlenstoffstahl, aus dem die Endlagerbehälter gefertigt werden, mit einem Innendurchmesser von 1320 mm bzw. 716 mm und einer Wandstärke von 25 mm. Die Standfestigkeit des Rohres bezüglich Korrosion und Druck soll 1000 Jahre erhalten bleiben. Das Metallrohr wird aus ca. 6 m langen Rohrstücken zusammengeschweißt.

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

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

4.4 Beschreibung des Forschungsstandortes in Bure/Haute Marne

Mit dem Gesetz vom 30.12.91 „Research in Radioactive Waste Management“ wurde die Grundlage für ein Underground Research Laboratory (URL) gelegt. Nach einer 2-jährigen, oberflächlichen Erkundung wurde mit Beschluss des französischen Parlaments vom 3. August 1999 entschieden ein Forschungslabor im 150 Millionen Jahre altem Ton, in 490 m Tiefe in Bure im Departement Haute-Marne zu errichten. Mit der Durchführung des Projektes wurde die ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) beauftragt. Partner sind auf französischer Seite Conseil national de la recherche scientifique (CNRS), Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) und das Institut français du pétrole (IFP). Auf internationaler Ebene erfolgte die Zusammenarbeit u.a. mit den Forschungsprojekten in Mol (Belgien) und in Mont Terri (Schweiz) /4-14/, /4-15/.

Von Oktober 2000 bis zum Jahre 2002 wurden verschiedene Experimente /4-16/ beim Abteufen des Schachtes durchgeführt. Zwischen 2003 bis 2006 erfolgen die Untersuchungen im eigentlichen Untertagelabor und in den dazugehörigen Erkundungsstrecken. Bis 2006 müssen von der ANDRA folgende Fragen beantwortet werden:

- gibt es geeignete stabile, geologische Formationen in Frankreich für die Endlagerung
- Entwicklung eines wirtschaftlichen und technisch durchführbaren Endlagerkonzepts
- Nachweis der Langzeitsicherheit und Schutz der Umwelt.

Ein Forschungsschwerpunkt wird die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle sein. Im Anschluss daran werden ab 2006 die Ergebnisse der französischen Regierung und dem Parlament für eine abschließende Bewertung vorgelegt.

Für die Sicherheit der Deponie sind drei Barrieren vorgesehen:

- natürliche Gesteinsformation
- zwei künstliche Barrieren zwischen Abfall und Tongestein
 - Verpackung des radioaktiven Abfalls
 - Barriere zwischen Verpackung und Gebirge

Das URL wird aus drei unabhängigen Räumlichkeiten bestehen:

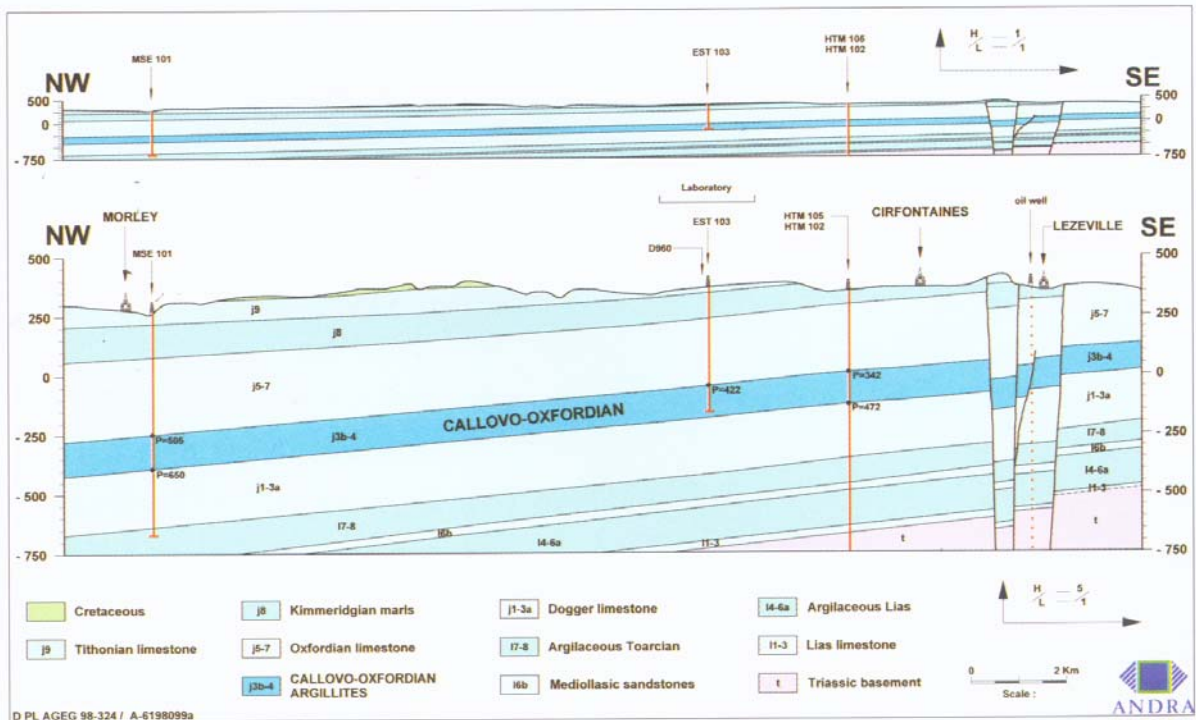
In 445 m Teufe wird vom Schacht aus, vor dem Weiter-teufen eine Nische angelegt. Aus dieser Nische heraus wird ein System von „instrumentierten“ Bohrlöchern, mit denen der Ton vor (im ungestörten Verbund) und nach dem Weiter-teufen des Schachtes auf sein geomechanisches und hydraulisches Verhalten hin erkundet wird (Experiment

E-REP). In der Nische ist der Ton mit einem höheren Karbonatanteil für die Untersuchungen zugänglich.

Die Hauptebene des URL befindet sich auf der 490 m Sohle mitten in der Callov-Oxford Formation mit einem maximalen Tonanteil und gleicher Distanz zum Hangenden bei 552 m, bzw. zum Liegenden bei 422 m. Von dieser Hauptsohle wird eine Strecke, nach NW leicht ansteigend und eine Strecke nach NE schwach einfallend aufgeföhren. Durch diese Erkundungsstrecken ist es möglich den Ton, der 30 m über/unter der Hauptsohle liegt, zu erforschen und so evt. Diskontinuitäten und lokale Faziesänderungen zu erkennen und gleichzeitig wird es damit möglich sein, dass 3-D Modell der Lagerstätte zu modifizieren. Die geotechnische Instrumentierung in den Schächten erfolgt im Abstand von 20 m, in den Strecken im Abstand von 40 m.

4.4.1 Geologische Situation

Die geologische Abfolge (s. Tabelle 4-14) im Umfeld von Bure, /4-14/, /4-17/ gehört zum Ostrand des Pariser Beckens. Das geplante Labor wird in einem 130 m mächtigen Tonschiefer der Callov-Oxford Stufe angelegt. Im Liegenden stehen Dogger Kalke und im Hangenden Oxford Kalke, die von bis zu 100 m mächtigen kimmerischen Mergeln überlagert werden. Das Einfallen der Schichten beträgt ca. 1 – 1,5° nach Westen (s. Abbildung 4-6). In der Abfolge lassen sich einzelne Sedimentationszyklen sehr gut abgrenzen, es zeigen sich drei „Varianten“. Die erste besteht aus drei aufeinanderfolgenden Transgressions-/Regressionszyklen. Die zweite steht in Verbindung mit nachfolgenden Schichten im Dezimeterbereich (in der Mitte der Formation eine sehr homogenen, 14 m mächtigen Abfolge). Die dritte besteht aus einer Wechsellagerung von bis zu 1 m mächtigen Schichten. Diese Variationsbreite zeigt sich auch in den petrophysikalischen Eigenschaften wie Porosität (12-20%) und im Karbonatgehalt. Auf der anderen Seite kann die mineralogische Zusammensetzung des Tonschiefers damit nicht verbunden werden. Tone mit Wechsellagerung und hohem Illitgehalt herrschen in der unteren Hälfte der Formation vor (R1), während in der höheren Hälfte hohe Smektitgehalte in den Tonen vorherrschen (R0) (s. Abbildung 4-7). Das gleiche gilt für das durchschnittliche Porenvolumen, es beträgt in der unterer Hälfte $20 \cdot 10^{-9}$ m und in der oberen Hälfte $40 \cdot 10^{-9}$ m, bedingt durch die dichte Lagerung und Rekristallisationvorgänge.



East of France - North-west / south-east geological section.

Abbildung 4-6: Geologisches Profil

Diese Porenstruktur bedeutet ausgeprägte Beziehungen zwischen den Wassermolekülen und den Mineralien (Sorptionsvorgänge an Tonmineralien, Kapillarkräfte). Nach den durch Vorbohrungen gewonnenen Erkenntnissen sind die Tone und Mergel wasserundurchlässig bis sehr schwach durchlässig und auch die Kalke im Hangenden der Tonschiefer der Callov-Oxford Stufe zeigen nur sehr geringe Karsterscheinungen. Lithologisch läßt sich der Tonschiefer in 5 Untereinheiten unterteilen (C2a/C2b1/C2b2/C2c/C2d vom Liegenden zum Hangenden). C2a – C2b besteht aus einem sehr homogenen Tonschiefer (Teufe 552 bis 459 m); in C2c – C2d (Teufe 459 bis 422 m) besitzt der Tonschiefer einen höheren Karbonatanteil. Das geplante URL bei 490 m und die Nische bei 445 stehen in den Lithofazieszonen C2b und C2c.

Formation	Alter	Mächtigkeit	Eigenschaften
Barrois Kalk	Tithon 140 Mio. a	< 25 m	Oberflächenaquifer
Mergel	Kimeridge 145 Mio. A	100 m	Undurchlässig
Oxford Kalk	Obere-Mittlere Oxford 150 Mio. a	300 m	sehr schwach durchlässig
Callov-Oxford Tonschiefer	Untere Oxford- Callov 155 Mio. a	130 m	geplantes Labor
Dogger Kalk	Dogger 165 Mio. a	250 m	sehr schwach durchlässig

Tabelle 4-14: Geologische Abfolge in Bure

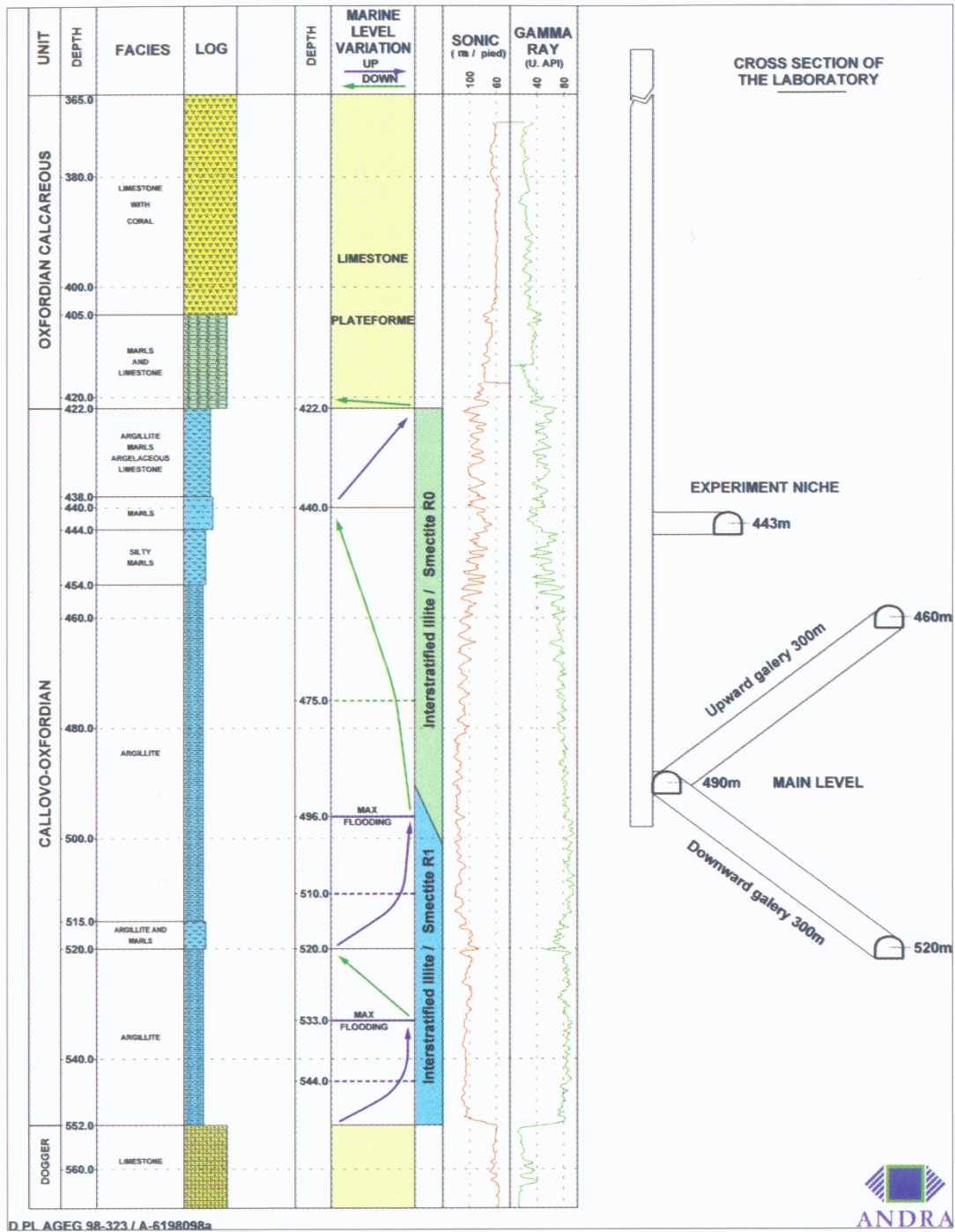
Regionalgeologisch wird die Abfolge im SE durch die Gondrecourt-Fault, im SW durch die Marne-Fault, die ihre Fortsetzung in der Poisson-Fault findet und im N durch die Aulnois-Saint-Amand Struktur begrenzt (s. Abbildung 4-8). Die nächsten seismisch aktiven Zonen liegen 50 km (Epinal-Rémiremont-Vesoul), bzw. 150 km (Rhein-Tal-Graben) entfernt. Erdbeben mit schwacher Intensität wurden 1682 und 1984 beobachtet.

4.4.2 Petrographie und Petrophysikalische Eigenschaften des Tonschiefers der Callov-Oxford Stufe

Der 130 m mächtige Tonschiefer steht in einer Tiefe zwischen 442 bis 552 m an. Der Tonanteil liegt zwischen 40 bis 45%, mit geringen mineralogischen Differenzierungen innerhalb der Formation. Der Quarzanteil liegt bei 25% und der Calcitanteil bei 30%. Andere Mineralien (Feldspäte, etc.) sind mit < 5% und organische Bestandteile mit 0,4-1% am Aufbau des Tonschiefers beteiligt. Die Tonminerale bestehen meist aus Illiten und Smektiten. In Tabelle 4-15 sind die Petrophysikalischen Eigenschaften des Tonschiefers wiedergegeben /4-14/.

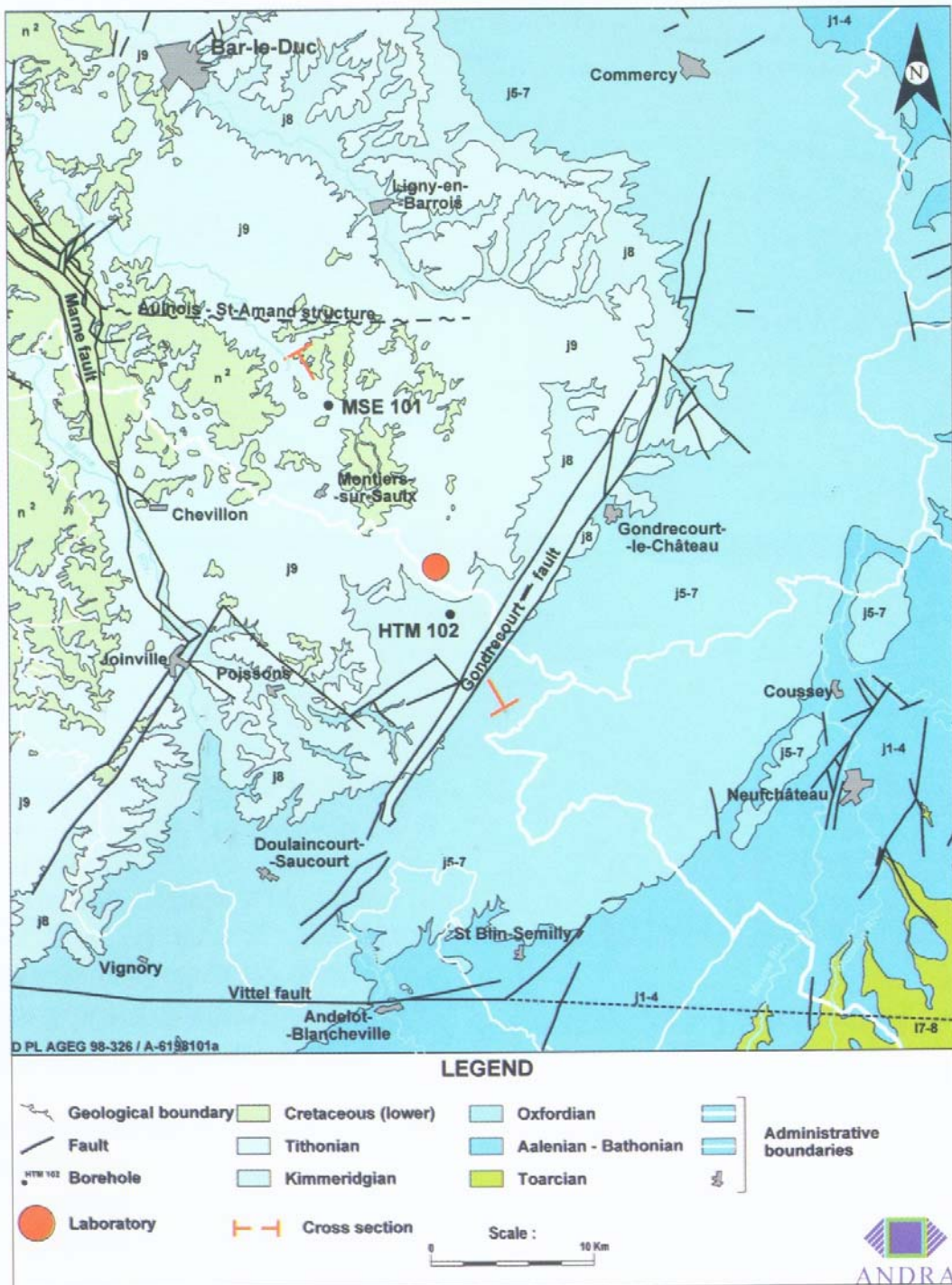
Permeabilität	$10^{-11} - 10^{-13} \text{ m/s}$
Porosität	10 - 15%
Porengröße	$2 - 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$
Druckfestigkeit	20 - 25 Mpa
Dichte	$22,5 \text{ kN/m}^3$
Wassergehalt	4 - 8%
Wärmeleitfähigkeit	$1,2 - 2,2 \text{ W/m}^0 \text{ C}$

Tabelle 4-15: Petrophysikalische Eigenschaften des Tonschiefers



Position of the underground laboratory in the Callovo-Oxfordian formation.

Abbildung 4-7: Lage des URL in der Callov-Oxford Formation



East. Situation of ANDRA boreholes.

Abbildung 4-8: Strukturkarte im Umfeld des URL

4.4.3 Erkundungsmethoden und geplante Forschungsarbeit

Im Rahmen der Erkundungsmethoden und der geplanten Forschungsarbeit werden die Veränderungen der Formation als Folge der mechanischen, hydraulischen, thermischen und chemischen Beeinflussung durch die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle untersucht /4-16/, /4-18/, /4-19/.

- E-SUG Scientific survey during drift opening (Untersuchungen beim Auffahren der Strecken):
Die Strecken werden 400 m lang und fallen mit $+10^0$ nach NW, bzw. -10^0 nach NE ein. Durch die Beobachtungsstrecken werden ca. 60 m der Formation vertikal erkundet. Es wird möglich sein vorhandene Störungen im Umfeld des URL zu erfassen und das mit 3-D Seismik gewonnene Modell zu verfeinern. Mit feldgeologischen Methoden werden die tektonischen und sedimentären Strukturen erfasst. Ein Beprobung erlaubt die Charakterisierung der Hauptparameter (Mineralogie, Wassergehalt, etc.). Die Kartierung der Strecken erfolgt vortriebsbegleitend. Sämtliche Stöße und die Firste werden fotografiert.

- E-GIS In situ geomechanical characterisation of argillite (geomechanische Verhalten des Tons in situ):
In den Experimenten soll das Verformungsverhalten des Tonschiefers und der ursprüngliche, vorherrschende Gebirgsdruck untersucht werden. Der GIS-Versuch besteht aus vier Programmeinheiten (GIS/A-D), in denen das Verhalten der unterschiedlichen Faziestypen, sowie die kurzzeitige und langfristige Verformbarkeit des Tons untersucht werden. Die Messungen erfolgen im ungestörten Gebirge mit mindestens 20 m tiefen Bohrungen. Verschiedene Meßmethoden stehen zur Verfügung. Wenn es die Stabilität der Bohrlochwandung erlaubt wird durch einen Druckanstieg in einem sogenannten „loading/unloading“-Zyklus die sofortige Verformbarkeit gemessen. Die kurzzeitige Verformbarkeit wird über mehrere Tage durch einen stufenweisen Druckanstieg gemessen. Das mittelfristige Verformungsverhalten wird in mehren Bohrlöchern über einen Zeitraum von mehren Monate bestimmt. Zur Messung des mechanische Druck dienen zwei Prozesse. Zum einen die Druckverringerung die mit Über- und Unterbohrversuchen, mit der „doorstopper“-Methode, etc. gemessen wird. Da natürliche Brüche in der Formation völlig fehlen wird das Bruchverhalten mit hydraulisch erzeugten Brüchen bestimmt. Die Versuche werden abgerundet durch mechanische Tests an Probekörpern aus den Bohrungen. Das URL wird so angelegt; dass die Verformbarkeit aller lithologischen Untereinheiten der Callov-Oxford Formation bestimmt werden können.

Die Messungen zur Bestimmung der Deformation hängen i.W. von der Anwesenheit eines plastischen Ringkörpers in der Bohrlochwandung, der Bohrlochorientie-

rung und dem Initialdruck ab. Bei einer ausreichenden Stabilität des Bohrloches sollten die Ergebnisse nicht sehr weit auseinanderliegen. Bei den Druckmessungen werden die unter Tage gewonnen Ergebnisse mit Messungen aus übertägigen Bohrlöchern und regionaltektonischen Erkenntnissen verglichen.

- E-REP Hydromechanical response of argillite to shaft sinking (hydromechanische Verhalten des Tons beim Schachtteufen):

Die hydromechanischen Verhalten der Tonschieferformation während des Schachtabteufens ist das erste Experiment, dass seine Fortsetzung im eigentlichen URL findet. In der aufzufahrenden Nische bei 445 m erfolgt in Bohrlöchern, die bis zu den Schachtstößen abgeteuft und instrumentiert werden Messungen, um die mechanische Charakteristik des Tons zu bestimmen. Bei einem Bohrlochdurchmesser zwischen 70 bis 120 mm erreichen die Bohrungen eine geplante maximale Länge von 35 m. Die Anzahl der Bohrungen wird auf 15 begrenzt sein, um eine gegenseitige Beeinflussung der Bohrungen zu verhindern. In den Bohrlöchern werden je nach Bedarf weitere Untersuchungen durchgeführt (Ablenkung des Bohrlochs, Kaliberlog, Kamerabefahrung, „gamma ray“).

Folgende Parameter werden gemessen:

- physikalische und mechanische Eigenschaften gemessen an Proben aus den Bohrlöchern.
- kontinuierliche Messungen im Bohrloch während des Schachtteufens
 - Änderung des Drucktensors nahe des Schachtstoßes
 - Entwicklung des Porenwasserdrucks am Schacht im Vergleich zu einer weiter entfernt liegenden Referenzprobe
- lokale Messungen vor und nach dem Schachtteufen
 - Verformungen des Schiefertons
 - Permeabilität
- Messungen im Schacht
 - Druck im Betonausbau
 - Konvergenzen am Stoß und im Gebirge
 - Auflockerung an den Stößen und deren Reichweite

In einer Tiefe zwischen 460 bis 473 m soll der Ton des Faziestyps C2b2 untersucht werden. Dieser Tonschiefer ist erheblich widerstandfähiger wie auf der Hauptsohle des URL , der im sogenannten E-REG Experiment untersucht werden soll. Die Versuche laufen vor, während und nach dem Abteufen des Schachtes aus der Nische heraus und werden ergänzt durch Messungen in der Schachtröhre. Die Instrumentierung muß außerhalb evt. Strukturen bzw. Auflockerungszonen erfolgen Die vorbereitende Phase beginnt mindestens ein Jahr vor dem Auffahren der Nische in 445 m Tiefe.

- E-REG Hydromechanical response of argillite to drift opening (hydromechanische Verhalten des Tons beim Streckenvortrieb)

Das Experiment wird die Ergebnisse der E-REP Versuch ergänzen. Es findet auf der Hauptebene des URL statt und besteht aus dem vortriebsbegleitenden Messungen während Streckenauffahrungen in den tonschieferhaltigsten Einheiten der Callov-Oxford Formation. Zwei Strecken werden im Abstand von 50 m vorgetrieben. Die Strecken werden detailliert geologisch kartiert und unmittelbar hinter der Ortsbrust werden Konvergenzmeßpunkte eingebaut. Dazwischen wird ein runder „experimental drift“ aufgefahren aus dem heraus zahlreiche instrumentierte Bohrlöcher radial um den „experimental drift“ angelegt werden. Damit wird der Faziestyp C2b1, der sich von seinen petropysikalischen Eigenschaften in drei abgrenzbaren Horizonten („zonage geotechnique“ C1,C2,D) untergliedern läßt, untersucht. Aus instrumentierten Bohrlöchern in den zwei Strecken werden im einzelnen die Verformung des Tonschiefers, Entwicklung des Gebirgsdrucks, kontinuierliche Entwicklung des Porenwasserdrucks, Permeabilität vor, während und nach dem Auffahren, gemessen.

Aus dem „experimental drift werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Permeabilität und Seismikmessungen in den radial angelegten Bohrlöchern
- Konvergenzen zwischen den Stößen
- Gebirgsdruck
- evt. Refraktions- und/oder Radarmessungen an den Stößen

Mit Hilfe von Labortests an Proben aus den Bohrungen werden die in situ gewonnenen Ergebnisse verglichen.

- E-TER Argillite response to thermal constraints (thermisches Reaktion des Tonschiefers):

Die thermischen Eigenschaften des Tonschiefer (Thermohydraulik, Thermomechanik) sollen untersucht werden. Die thermischen Auswirkungen auf die mineralogische Zusammensetzung des Tonschiefers und auf den Chemismus der Porenwasser, seine Dimensionen und Beeinflussung des geologischen Umfelds. In Bohrlöchern werden eine Reihe von Heizelementen installiert. Die Bohrlöcher für die Heizelemente haben eine Länge bis zu 20 m. Die hydraulischen und mechanischen Effekte hervorgerufen durch die Temperaturschwankungen an der Bohrlochwandung und deren Umfeld werden gemessen. In dem Experiment E-TER/A wird das thermomechanische Verhalten des ungestörten Tonschiefers unter anisotropen Verhältnissen studiert. Im Experiment E-TER/B wird die gegenseitige Beeinflussung des anstehenden Tonschiefer mit einem aufgeblähten, dichten Tonschiefer, der vor der Heizphase künstlich getrocknet wurde. Das Experiment wird in einer, eigens dafür angelegten Strecke auf der Hauptsohle stattfinden, 12 m von anderen Strecken entfernt, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden. Mit einer

Reihe von aufeinanderfolgenden Zyklen wird die Temperatur allmählich erhöht. Nach dem Ende der Testphase werden Proben genommen, um die mineralogische und chemische Veränderungen zu analysieren. Neben den thermischen Parametern werden ebenfalls mechanische (Verformung) und hydraulische (Porenwasserdruck, Permeabilität vor und nach der Testphase) in instrumentierten Bohrlöchern (Durchmesser von 70 bis 120 mm) gemessen.

- E-PEP Permeability and porewater pressure (Permeabilität und Porenwasserdruck):

Zweck des Experiments ist in situ die Parameter zu bestimmen, die den „convective flow“ bestimmen, durch Bestimmung des „hydraulic charge gradient“, den man durch Messung des Porenwasserdrucks an verschiedenen Punkten und der Permeabilität des Tonschiefers erhält. Das Versuchsprogramm besteht aus einer Reihe von hydraulischen Messungen in fünf verschiedenen, lithologischen Fazies, Alle Tests werden im gesättigten Tonschiefer und weit entfernt von Strecken, um Störungen auszuschließen, durchgeführt. Eine im Vorfeld durchgeführte Kalkulation zeigte, daß der Druck nach 2 Jahren 5 m von den Stößen weg um 30% und 1% in 20 m Entfernung abnimmt. Um langfristige Druckmessungen durchführen zu können, wird eine hydraulische und mechanisch ungestörte Zone um jedes Testbohrloch aufrechterhalten.

- E-PAC Water sampling for chemical and isotopic analyses (Entnahme von Wasserproben für chemische - und Isotopenanalyse):

Wegen des geringen Wassergehaltes und Permeabilität in der Callov-Oxford Formation ist eine Probenahme der Porenwässer sehr schwierig. Die nichtrepräsentativen Wasserproben aus tiefen Bohrlöchern führen entweder zu einer teilweisen Trennung der chemischen - und Isotopenfraktion zwischen den verschiedenen Wassertypen oder es kommt zu chemischen und/oder physikalischen Veränderungen (Pyritaufoxidation durch Luftsauerstoff, Karbonatlösung, Ionenaustausch in den Tonen, etc.). Daher müssen Methoden entwickelt werden, um Veränderungen der natürlichen chemischen Zusammensetzung der Wässer und des Gesteins zu minimieren und ein geomechanisches Modell zu entwickeln, um die Parameter abzuschätzen, die nicht direkt gemessen werden können. Das Experiment E-PAC wird direkte Auswirkungen auf die Ausführung und Interpretation anderer Experimente haben (E-DIR).

Die Experimente bestehen aus drei Untereinheiten (E-PAC/A/B/C).

- E-PAC/A: an der Grenze R0/R1 in der ersten Strecke des URL unmittelbar nach der Auffahrung.
- E-PAC/B: in den höheren karbonatischen Horizonten aus der Nische bei 445 m heraus.

- E-PAC/C: in Bereichen mit hohem Tonanteil in den beiden an-/absteigenden Strecken im NW, bzw. im NE des URL.

Es werden der pH- und der Eh-Wert gemessen, sowie eine chemische und Isotopenanalyse durchgeführt. Für die mineralogische Analyse und die Porenwasserbestimmung werden Bohrkerns untersuchen. Die Bohrlöcher werden später instrumentiert, um den Porenwasserdruck und den Gehalt an gelösten Gasen (CO₂, Edelgase, etc.) zu bestimmen.

Die Messung des pH-Wertes ist in situ, der für die Entwicklung eines geochemischen Modells von Bedeutung ist, ist sehr schwierig. 2 Methoden sollen angewandt werden. Die Direktmessung des pH-Wertes im Porenwasser des Gesteins wurde bereits in Mol angewendet. Eine zweite Methode wurde in Mont Terri eingesetzt. Eine künstliche Flüssigkeit, die annähernd die gleiche Zusammensetzung wie das in situ anstehende Porenwasser besitzt zirkuliert in einem Bohrloch bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Entwicklung des pH-Wertes wird solange gemessen, bis er sich stabilisiert hat.

Ähnliche Schwierigkeiten bestehen bei der Messung des Eh-Wertes. Entweder bleibt die Lösung in situ im Bohrloch, oder sie wird in einer Thermosflasche gesammelt, gegen Verunreinigungen geschützt und ein Entweichen von Gasen verhindert. Bei der Probenahme aus Bohrungen muss der Durchmesser der Kerne so groß gewählt werden, um das Zentrum des Bohrkerns so ungestört wie möglich gewinnen zu können. Die Bohrungen werden 10 m lang, um ungestörte Proben entnehmen zu können. Die Probenzone wird durch Packer isoliert. Die Bohrungen sind aufsteigend, um eine Ansammlung von Wasser als Folge der Gravitation zu erleichtern. Da der Tonschiefer sehr undurchlässig ist, wird die Probenahme zur Gewinnung der Porenwässer sehr lange Zeit in Anspruch nehmen. Andere Proben werden direkt beim Auffahren der Strecken gewonnen, wobei die Größe der Probenkörper so groß zu wählen sind, dass das Zentrum der Probe weitestgehend ungestört verbleibt und direkt nach Probenahme eine Analyse erfolgen kann.

- E-DIR Characterisation of diffusion and retention in argillites (Diffusion und Retention im Tonschiefer):

Das Programm besteht aus annähernd zehn in situ Tracertests in kurzen Bohrlöchern, die überbohrt werden, um die Diffusionsparameter verschiedener Tracer im Ton zu messen. Die im Vorfeld gewonnenen Werte für die Diffusionsparameter an Gesteinsproben führten zu folgenden Überlegungen, die durch die E-DIR Experimente noch bestätigt werden sollen:

- Molekulare Diffusion ist der vorherrschende Transportmechanismus für alle Elemente.
- Chemische Retention für alle stabilen Elemente in neutraler oder ionarer Form.
- Physikalische Retention von Anionen als Folge der Oberflächenladung der Tone.

Abhängig von den Ergebnissen der ersten Experimenten werden weitere Projekte durchgeführt:

- „Neubildung“ von Wasser im Gebirge bis zum Gleichgewicht.
- langfristige Injektionsversuche um die Ausdehnung der „Störzonen“ um ein Bohrloch zu reduzieren.
- Überbohrtechniken um eine Testzone zu bekommen.
- Techniken zum Aufspüren und mengenmäßigen Bestimmung von Tracern in einer stabilen Phase.

Es werden zwei Untersuchungsmethoden eingesetzt:

- End-test single-overcored-borehole Methode:
Jeder Test findet in einem nach unten geneigten Bohrloch in 10 m Teufe statt. Am Boden ist eine Testkammer durch zwei Packer abgegrenzt. In der Kammer zirkuliert ein Tracergemisch über mehrere Monate unter einem Druck, der mit dem Porenwasserdruck im Gleichgewicht steht. Am Ende des Tests wird die Bohrung überbohrt und die gewonnene Probe im Detail analysiert um ein Konzentrationsprofil von jedem Tracer an der Bohrlochwandung zu bekommen.
- Cross-hole Methode:
Tracer werden in einem Bohrloch injiziert und unmittelbar danach wird mit Beobachtungsbohrlöchern die Verbreitung der Tracer im Gebirge verfolgt.

Vor den Tests wird für Überbohrversuche die Bohrlochabweichung bestimmt und die Bohrkerne im Bereich der Testzonen mineralogische untersucht. Während der Tests werden Transportparameter an Proben getestet, der hydraulische Druck in den Injektionskammern bestimmt, die chemische Zusammensetzung der Wässer und die zeitliche Entwicklung der Tracerkonzentration und –ausbreitung bestimmt.

Im Anschluss erfolgen an den Überbohrkernen physikalische Untersuchungen (Wassergehalt, Porosität, etc.); die Konzentration der Tracer um das Injektionsbohrloch herum und seine zeitliche Ausbreitung werden bestimmt.

4.5 Einlagerungstechnologie

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

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

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

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

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

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

Die weiteren Abläufe für die verschiedenen Abfallkategorien sind nachfolgend beschrieben.

4.5.1 Einlagerung von Gebinden Abfallkategorie C – Verglaste Abfälle

Das Transportfahrzeug mit dem auf der Hubplattform befindlichen Transfercontainer fährt rückwärts in die entsprechende Handhabungsstrecke und wird dort quer zur Einlagerungszelle positioniert. Die Plattform mit dem Transfercontainer wird mittels eines Hubmechanismus in der Handhabungsstrecke angehoben und das Transportfahrzeug verfahren. Unter die Plattform wird dann ein s. g. Andockwagen gefahren. Dieser Andockwagen verfügt über eine Plattform mit einer Drehbühne und einem Mechanismus für das horizontale Verschieben der Transfercontainer. Der Transfercontainer wird auf die Plattform des Andockwagens gesetzt, die bei dieser und den nachfolgenden Operationen von dem Hubmechanismus in der Handhabungsstrecke abgestützt wird. Der Transfercontainer wird dann um 90° gedreht, so dass seine Achse auf der Achse der Einlagerungszelle liegt. Mit einem Schiebemechanismus wird der Transferbehälter an den Eingang in die Einlagerungszelle andockt. Die Tore des Transferbehälters und des Einganges in die Zelle werden geöffnet. Mit einem Schieberoboter wird dann das Abfallgebilde in die Einlagerungszelle geschoben.

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

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

Das Verschieben des Gebindes erfolgt in Schritten von 1 m. Der Ablauf ist wie folgt:

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

4.5.2 Einlagerung von Gebinden Abfallkategorie C – Ausgediente Brennelemente

Der Ablauf der Einlagerung bis einschließlich des Andockens an die Einlagerungszelle ist der gleiche wie für die Gebinde mit verglasten Abfällen. Für das Verschieben der Gebinde aus dem Transferbehälter in die Einlagerungszelle wurde nach einer gesonderten Untersuchung dem Luftkissentransport gegenüber einem Schieberoboter der Vorzug gegeben.

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

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

4.6 Verfüll- und Verschlusskonzept

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht im wesentlichen drei Elemente vor /4-3/:

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

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

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

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

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

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

4.7 Auffahrtechnik und Errichtung der Einlagerungsstrecken bzw. –zellen

Zur Auffahrtechnik liegen nur begrenzte Informationen vor.

Abfallkategorie B

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

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

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

Abfallkategorie C (verglaste Abfälle) und CU (Brennelemente)

Das Auffahren und der Ausbau der Strecken erfolgen wie oben beschrieben. Für die Erstellung der Einlagerungszellen sollen Mikro-Tunnelbohrmaschinen eingesetzt wer-

den, die die Zellen von der Handhabungsstrecke aus auffahren. Der Ausbau der Bohrunge erfolgt mit perforierten Stahlrohren in Abschnitten von jeweils 2 m, die mittels Leitblechen zueinander zentriert werden. Die einzelnen Rohrabschnitte werden verschweißt. Alternative Varianten für das Zusammenfügen der Rohrabschnitte (z. B. Kupplung) werden untersucht.

Anschließend erfolgt der Ausbau mit vorgefertigten Bentonitringen. Dazu werden Bentonitringe gepresst, die eine Dichte von ca. 2 g/cm³ haben. Ein Ring hat ein Gewicht von ca. 5 t. Jeweils vier Ringe werden mittels sechs Stahlbolzen oder -seile zu einem Paket zusammengefügt. Dadurch wird zum einen der verbleibende Abstand zwischen den Ringen gegenüber der Einzelmontage vorort wesentlich verringert und zum anderen die Montagezeit unter Tage verkürzt. Die Ringanzahl per Paket wird durch das mögliche Transport- und Handhabungsgewicht bestimmt. Die Bentonitringe werden mittels Luftkissentransport platziert. Anschließend wird das Einlagerungsrohr aus Kohlenstoffstahl aus 6 m langen Schüssen eingebaut.

4.8 Terminplan für die Realisierung des Endlagers

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

4.9 Sicherheitsnachweiskonzept

Eine ausführliche Beschreibung des Sicherheitsnachweiskonzeptes der ANDRA ist in /4-3/ gegeben.

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

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

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

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

Es werden zwei Kategorien von Szenarien betrachtet:

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

Die quantitative Analyse hat das Ziel, die Funktion des Endlagers an Hand von quantitativen Kennwerten, insbesondere der Strahlenexposition, zu bewerten. 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:

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

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

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

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

4.10 Kosten und wesentliche Kostenfaktoren

In /4-8/ wurde eine Kosteneinschätzung des französischen Endlagersystems vorgenommen, dessen Gesamtkosten mit 17,6 Mrd. € bewertet wurden. Davon entfallen auf Endlager für LL-ILW, HAW und ausgedienten Kernbrennstoff ca. 14,5 Mrd. €. In diesen Kosten sind die Kosten der Untertagelabors, die ausschließlich der Forschung für die geologische Endlagerung der o. g. radioaktiven Abfälle bestimmt sind, enthalten. Werden diese Kosten herausgerechnet, ergeben sich ca. 13,1 Mrd. € als Kosten des geologischen Endlagers. Tabelle 4-16 zeigt eine Übersicht über die Kosten des Endlagersystems Frankreichs für radioaktive Abfälle.

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

Tabelle 4-16: Kosten des französischen Endlagersystems

5 Spanien

In Spanien fällt der überwiegende Teil der radioaktiven Abfälle beim Betrieb der neun KKW-Blöcke des Landes an (s. Tabelle 5-1), die sich an sieben Standorten befinden.

KERNKRAFTWERK	TYP	LEISTUNG
Almaraz I	Druckwasserreaktor	930 MWe
Almaraz II	Druckwasserreaktor	930 MWe
Ascó I	Druckwasserreaktor	930 MWe
Ascó II	Druckwasserreaktor	930 MWe
Cofrentes	Druckwasserreaktor	970 MWe
José Cabrera	Druckwasserreaktor	160 MWe
Santa Maria de Garoña	Siedewasserreaktor	460 Mwe
Trillo	Druckwasserreaktor	1050 Mwe
Vandellós II	Druckwasserreaktor	1050 Mwe
Gesamt		7410 Mwe

Tabelle 5-1: Kernkraftwerke in Spanien

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

Die Grundstrategie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist das Verbringen der schwach- und mittelaktiven Abfälle in das Oberflächenendlager El Cabril und der hochaktiven Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes in ein geologisches Endlager. Bezüglich der Endlagerung hochaktiver Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes ist gemäß /5-1/ folgendes festgelegt:

- Bis zum Jahre 2010 wird keine Entscheidung bezüglich des endgültigen Managements der hochaktiven Abfälle und des ausgedienten Kernbrennstoffes getroffen. Zu diesem Zeitpunkt wird das Parlament den technischen Fortschritt auf diesem Gebiet sowie die Ergebnisse der bis dahin durchgeführten Forschungsarbeiten einschätzen und eine entsprechende Entscheidung treffen. Zu Planungszwecken kann von einem Inbetriebnahmeterrin für ein Endlager um 2035 ausgegangen werden.
- Es werden keine weiteren Aktivitäten zur Standortbestimmung für ein Endlager unternommen.

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

5.1 Endlagerinventar

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

Entsprechend /5-1/ sind folgende Mengen an hochaktiven radioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen endzulagern /5-2/, /5-3/:

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

Tabelle 5-2: Spanien - Inventar eines geologischen Endlagers

Für die Planung eines geologischen Endlagers wird anstelle der verschiedenen Typen ausgedienter Brennelemente ein Referenzbrennelement definiert, dessen Daten als einhüllende die technischen Merkmale aller Brennelemente repräsentativ abdecken.

Der Referenzbrennelement ist ein DWR 17 x 17 BE der Firma Westinghouse. Die technischen Daten des BE sind in der Tabelle 5-3 enthalten

TECHNISCHE DATEN	REFERENZBRENNELEMENT
Mechanische Daten <ul style="list-style-type: none"> • Geometrie • Dimensionen [m] • Brennstablänge [mm] • Brennstabdurchmesser [mm] • Gesamtgewicht [kg] • Gewicht der Brennstäbe [kg] • Gewicht Strukturelemente [kg] 	17 x 17 0,21 x 0,21 x 4,06 3851 9,5 668,6 638,85 29,75
Kerntechnische Daten <ul style="list-style-type: none"> • Anreicherung [%] • Schwermetall im BE [kg] • Abbrand [MWd/tU] • Betriebszeit im Reaktor [a] 	4,1 461,41 40.000 3,27

Tabelle 5-3: Referenzbrennelement Westinghouse DWR 17 x 17

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

Damit geht Spanien für die Planung eines geologischen Endlagers von folgendem Inventar an hoch- und mittelaktiven radioaktiven Abfällen sowie ausgedienten Brennelementen aus (s. Tabelle 5-4)

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

Tabelle 5-4: Planungsgrundlage für ein geologisches Endlager in Spanien

5.2 Behälterkonzepte und -materialien

Das spanische Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Ton sieht nach den vorliegenden Angaben /5-2/, /5-3/, /5-4/ die Nutzung der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Behälter für ausgediente Brennelemente, verglaste Abfälle sowie langlebige Abfälle vor. Insbesondere die Endlagerbehälter für wärmeerzeugende Abfälle müssen im spanischen Endlagerkonzept für Ton eine Reihe von Anforderungen, welche die Basis der Auslegung darstellen, sicher erfüllen. Insbesondere müssen sie:

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

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

- Gewährleistung eines vollständigen, sicheren Einschlusses des endgelagerten Abfalls für eine Zeitspanne von mindestens 1000 Jahren. Dafür sind unbedingte Voraussetzungen:
 - Eine stringente Qualitätssicherung bei der Herstellung und beim Verschließen durch Schweißen
 - Ausreichende mechanische Festigkeit, um unter den Bedingungen des Endlagers der kombinierten Belastung durch Gebirgsdruck, Quelldruck des Bentonits sowie thermisch induzierte Spannungen zu widerstehen
 - Ausreichende Korrosionsfestigkeit unter Endlagerbedingungen
 - Ausschluss von ungünstigen Wechselwirkungen mit anderen Barrieren

5.2.1 Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente

Der Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente wurde auf der Basis von Optimierungen bezüglich der thermischen Last im Behälter, des Layouts der Einlagerungsfelder sowie der thermischen Belastung der Nahfeldbarrieren, der Wirtsgesteinbildung und

der Nebengesteine ausgelegt. Diese Optimierungen führten zu einem Behälter mit einer maximalen thermischen Last von 1200 Watt, was einer Beladung mit 4 Referenzbrennelementen (DWR) entspricht. Alternativ kann der Behälter auch mit 12 SWR-Brennelementen beladen werden.

Der Behälter, im spanischen Programm als „Kapsel“ bezeichnet, hat eine zylindrische Form mit 70 cm Innendurchmesser und 4,30 m Innenlänge. Die Wandstärke des Zylinders beträgt 10 cm, die des Behälterbodens und -deckels 12 cm. Der Behälter gewährleistet die Unterkritikalität des Brennstoffinventars sowie für mindestens 1000 Jahren den vollständigen Einschluss der Radionuklide. Als Behältermaterial wurde Karbonstahl ausgewählt, der Resthohlraum innerhalb des Behälters wird mit Glaskügelchen vollständig verfüllt (s. Abbildung 5-1). Beladen mit 4 Referenzbrennelementen wiegt der Behälter ca. 15 Tonnen. Dieses Gewicht setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

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

Es werden insgesamt 3,600 Behälter benötigt, um die 14,400 Referenzbrennelemente endzulagern, die im Rahmen des Fünften Nationalen Entsorgungsplans /5-1/ genannt werden.

Die Nachzerfallswärme des Referenzbrennelementes, ein Westinghouse 17x17 DWR Brennelement mit 4,1% Anfangsanreicherung und 40.000 MWd/tU Abbrand /5-2/ als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme ist in der Tabelle 5-5 dargestellt.

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

Tabelle 5-5: Wärmeleistung eines Referenzbrennelementes als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme

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

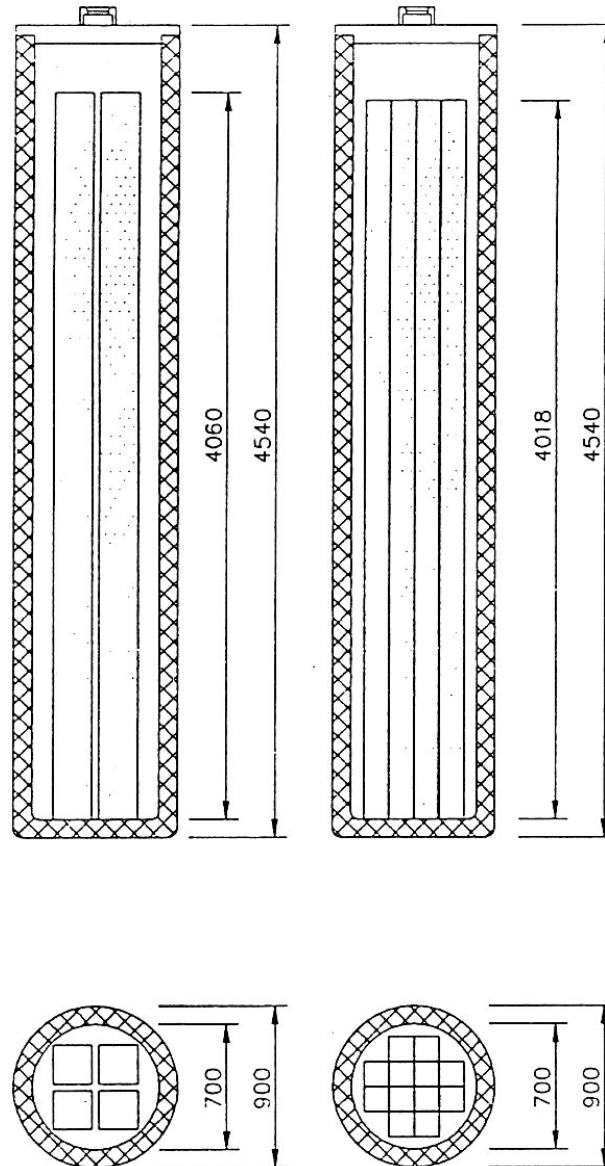


Abbildung 5-1: Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente für die Endlagerung in Ton in Spanien

5.2.2 Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle

Der Behälter für die Endlagerung der Kokillen mit verglastem Abfall aus der Wiederaufarbeitung der Vandellós I Brennelemente entspricht im wesentlichen dem Behälter für ausgediente DWR und SWR Brennelemente. Er kann drei Cogema-Kokillen aufnehmen. Der verbleibende Hohlraum wird mit Glaskügelchen verfüllt. Abbildung 5-2 stellt diesen Behälter dar.

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

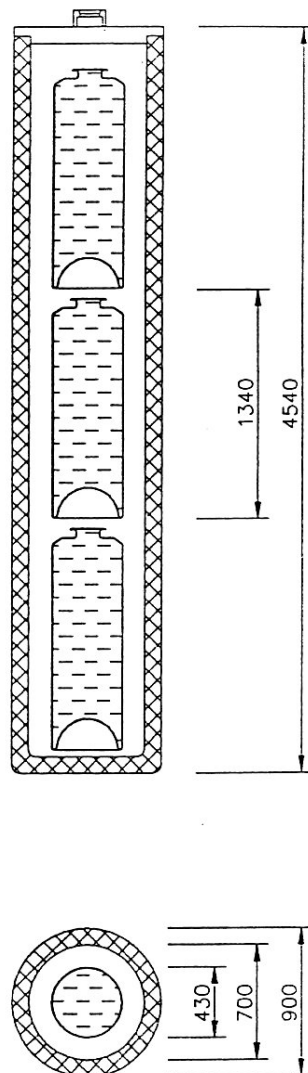
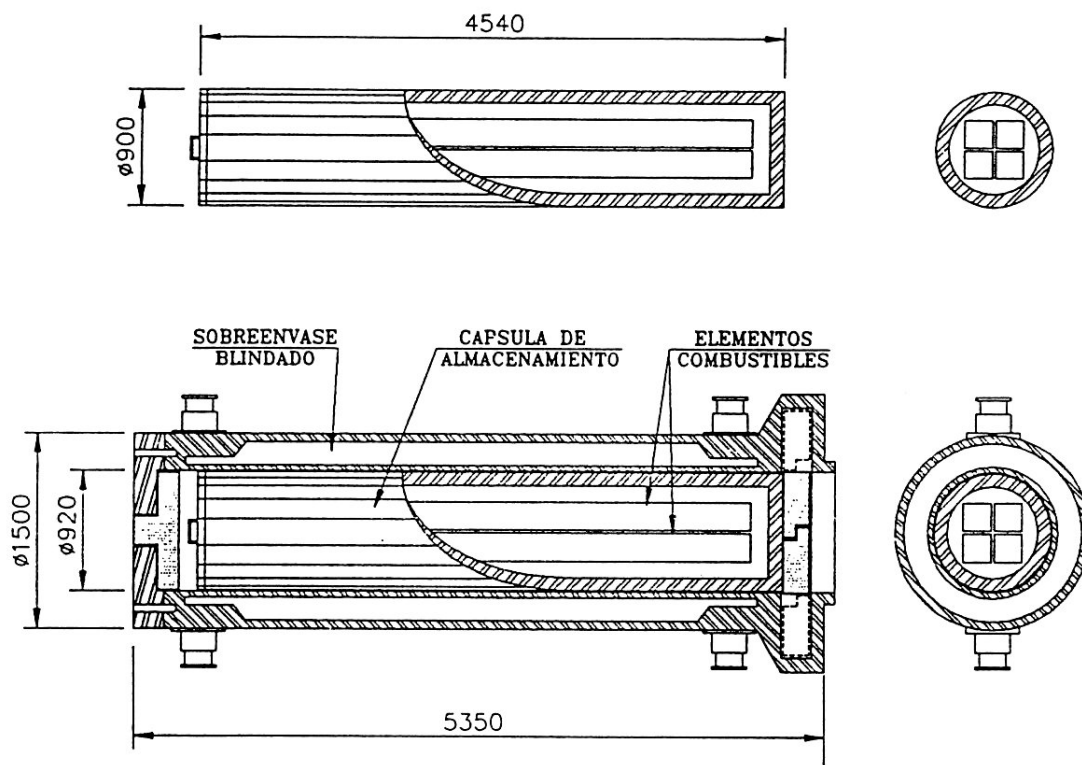


Abbildung 5-2: Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle für die Endlagerung in Ton in Spanien

5.2.3 Abschirmbehälter

Auf Grund der hohen Ortsdosisleistung der radioaktiven Strahlung um die Brennelementbehälter können diese im Endlager nur innerhalb eines Abschirmbehälters gehandhabt werden. Die spanische ENRESA hat in ihrem Endlagerkonzept hierfür die Nutzung eines wiederverwendbaren Abschirmbehälters vorgesehen. Dieser wird in allen Handhabungsvorgängen benutzt, wird aber bei der unmittelbaren Einlagerung des Endlagerbehälters unter Tage entladen und zur Wiederverwendung zur Tagesoberfläche zurücktransportiert.

Der Abschirmbehälter hat eine Wanddicke von insgesamt 29 cm, zusammengesetzt aus 14 cm Stahl zur Abschirmung der β - und γ -strahlung und 15 cm Neutronenabschirmung. Damit wird sichergestellt, dass die Ortsdosisleistung an der Behälteroberfläche den Auslegungswert von 0,2 mSv/h nicht überschreitet. Dieser Wert entspricht 1/10 des von der IAEA für Transportbehälter empfohlenen Wertes von 2 mSv/h. Ein Schnitt durch den Abschirmbehälter und den Endlagerbehälter wird in Abbildung 5-3 gezeigt.



Übersetzung:

Sobreenvase Blindado = Abschirmbehälter

Cápsula de Almacenamiento = Endlagerkapsel

Elementos Combustibles = Ausgediente Brennelemente

Abbildung 5-3: Endlagerbehälter und Abschirmbehälter für den Transport von Endlagerbehältern nach Untertage bei der Endlagerung in Ton in Spanien

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

5.3 Endlagerkonzept

Das spanische generische Endlagerkonzept für Tongestein sieht die Endlagerung in einer Teufe von ca. 250 m vor. Abbildung 5-4 zeigt das Layout des Endlagers /5-2/, /5-3/.

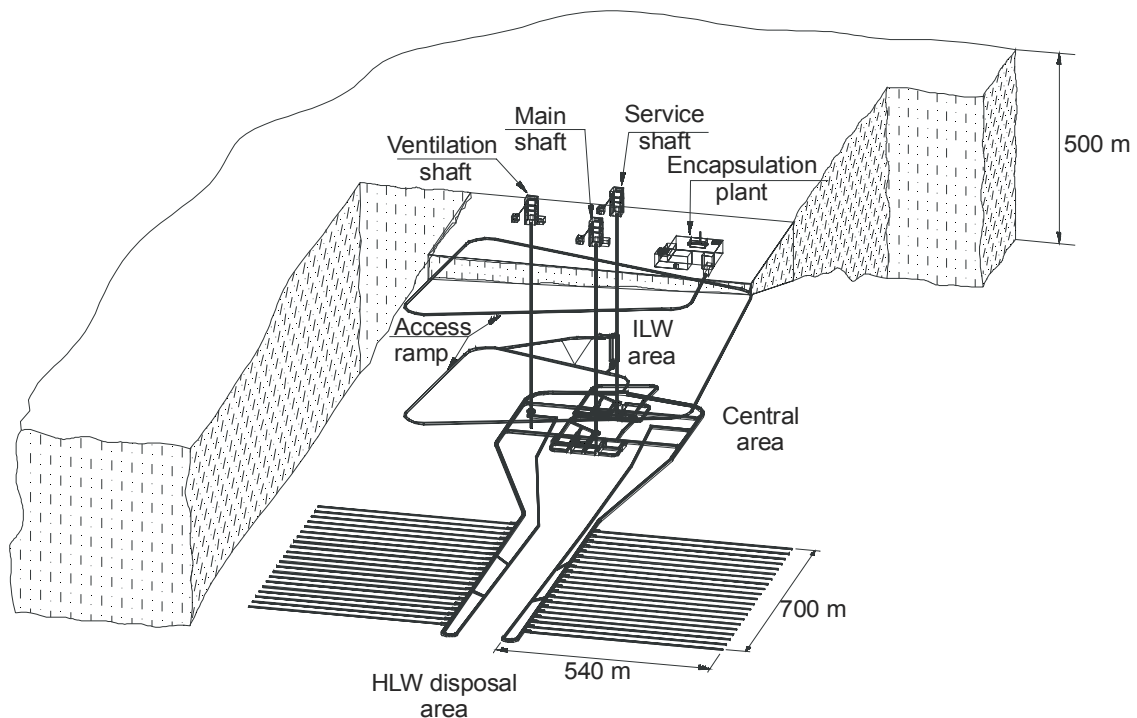


Abbildung 5-4: Spanien - Endlager-Layout

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

Hochaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente werden in Endlagerstrecken von ca. 500 m und einem Durchmesser von 2,40 m eingelagert. Der Abstand zwischen den

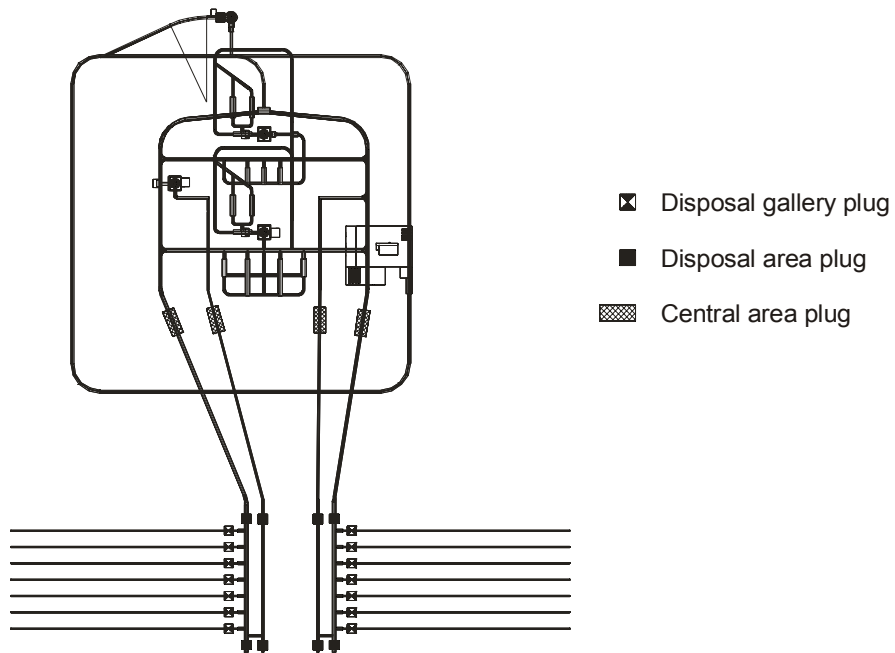
Einlagerungsstrecken beträgt 35 m und zwischen den Endlagerkapseln 2 m, um die festgelegte Grenztemperatur des Verfüllmaterials von 100 °C nicht zu überschreiten.

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

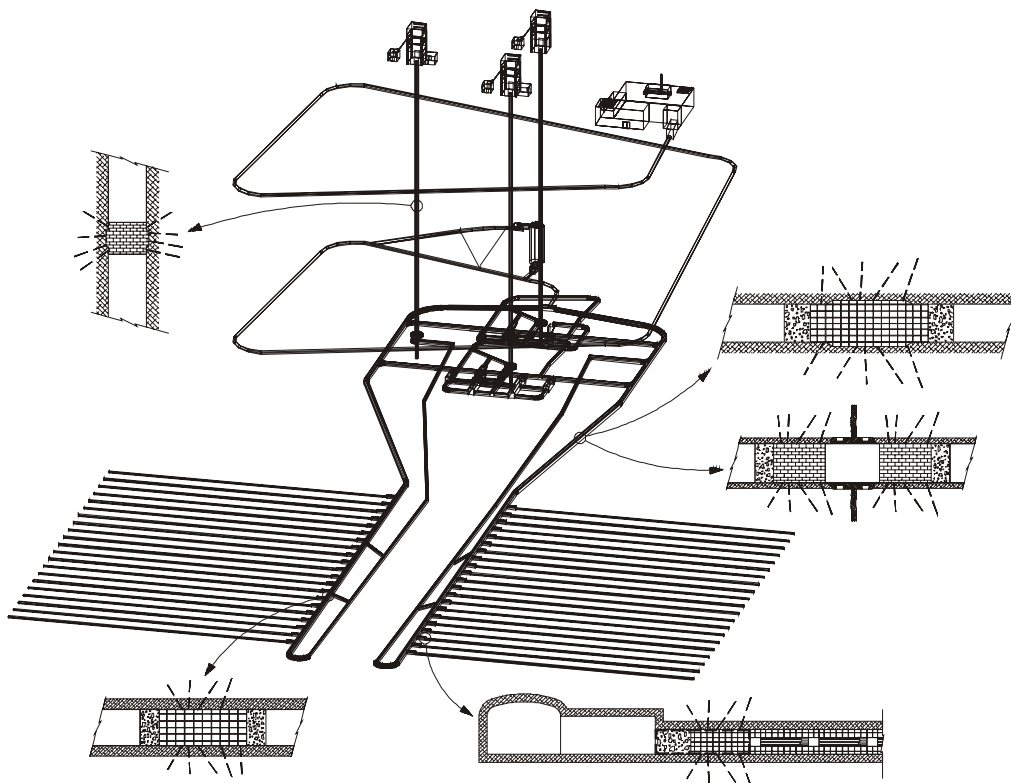
5.4 Verfüll- und Verschlusskonzepte

Das Verfüll- und Verschlusskonzept sieht folgendes vor /5-2/, /5-3/, /5-4/ (s. Abbildung 5-5):

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



Anordnung von Verschlüssen



Konfiguration der Verschlüsse

Abbildung 5-5: Spanien - AGP Granit - Verschlusskonzept

6 Literaturverzeichnis

- /1-1/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Systemanalyse Mischkonzept, Abschlussbericht, DEAB T30, Peine, Januar 1990
- /1-2/ Engelmann, H.-J. et al: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, DEAB (02 E 8201), Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB, T59, DBE, Peine, 1995
- /1-3/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzeptes Endlager Gorbleben; Abschlussbericht, Rev. 01, Peine, 1998
- /1-4/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Hauptband, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-5/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 2, Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-6/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 3, Sicherheit in der Betriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-7/ Filbert, W.; et al, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 4, Sicherheit in der Nachbetriebsphase, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-8/ Amelung, P., Kutowski, J.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 5, Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004
- /1-9/ Engelhardt, J., Amelung, P.; Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (FKZ 02E9511), Anlagenband 6, Geochemie, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Dezember 2004

- /2-1/ Ch. Cosemans, A. DeGoeyse "The Belgian Nuclear Waste Inventory", NIRAS/ONDRAF, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998
- /2-2/ C. Dierick, M. Detilleux, G. Nuyt, L. Janssen, G. Demazy „Synthesis of the technical feasibility evaluation of spent fuel conditioning in Belgium”, Proceedings WM'98, Tucson, März 1998
- /2-3/ J. B. Grupa and others "Concerted action on retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories – Final Report", EC nuclear science and technology, EUR 19145; 2000
- /2-4/ ONDRAF/NIRAS "Technical overview of the SAFIR 2 report", NIROND 2001-05 E, December 2001
- /2-5/ ONDRAF/NIRAS "SAFIR 2 Report", NIROND 2001-06 E; December 2001
- /2-6/ B. Kursten, F. Druyts, P. Van Iseghem, „Methodology in corrosion testing of container materials for radioactive waste disposal in a geological clay repository“, Proceedings ASME 2001
- /2-7/ 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
- /2-8/ Marivoet, J. et. al. (1997): **E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Torage of radioactive waste: Everest project - Volume 2a: Clay formation, site in Belgium.-final report, EUR 17449/2a EN, Brussels
- /2-9/ Commission of the European Communities: The HADES demonstration and pilot project on radioactive waste disposal in a clay formation. EUR 13851 EN
- /2-10/ The CERBERUS and Mine-By-Test projects: Progress report for the period January 1 – June 30, 1996, Nirond 96/08, November 1996
- /2-11/ Neerdael, B. & Manfroy, P. (1985): Geotechnical characterization of clay at great depth and its connection to tunnel construction.- Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle. Vol. 6 (3-4). Dez. 1985, pp. 293 – 312. Harwood Academic Publishers, 1985, USA

- /2-12/ Commission of the European Communities: Repository tunnel construction in deep clay formations. EUR 13964 EN
- /2-13/ Neerdael, B., Meynendonckk, P. & Voet, M. (????): The Bacchus backfill experiment at the Hades Underground Research Facility at Mol, Belgium.- Final report R-2872
- /2-14/ Demarche, M. & Bernier, F. (2001): The Praclay Project: Demonstration of the Feasibility of the Belgian Reference Concept for HAW.- Radioactive Waste Management and Environmental Remediation – ASME 2001, Tucson
- /2-15/ Bernier, F. & Neerdael, B. (1996): Overview of in-situ thermomechanical experiments in clay: Concept, results and interpretation.- Engineering Geology 41 (1996), p. 51 – 64
- /2-16/ SCK/CEN (1996): Hades – Tour Guide Notebook.-4th Edition, February 1996.
- /2-17/ Put, M.J. & De Peter, P.: Laboratory and in situ Migration Experiments in Boom Clay
- /2-18/ European Commission: Megas – Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks.- Final report, EUR 17453 EN, Brussels
- /2-19/ 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.
- /2-20/ Littleboy, A.K., et. al.: Site Characterisation – Methods and Approaches.-
- /2-21/ Volckaert, G. et. al. (2000): A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in a argillaceous host rock. Reseal project – Phase I.-Final report, EUR 19612 EN, Brussels
- /2-22/ The Praclay Demonstration Experiment, Instrumentation Programme: Progress report for the period January 1 – June 30, 1992, Nirond 92/12, November 1992
- /2-23/ G. Volckaert, EC concerted action Retrievability – SCK contribution, Brussels 23-24 June 1998 (unveröffentlicht)

- /2-24/ J. Verstricht, M. Demarche, D. De Bruyn, „Extension of the underground research facility for real-scale demonstration“, Proceedings Tucson 2001
- /2-25/ G. Volckaert, F. X. Holvoet, F. Bernier, M. Put „Sealing of the shafts of a repository in clay“
- /2-26/ F. Bernier “The extension of the HADES URF and associated R&D work”, Topical Day, Mol, Belgium, May 21, 2002
- /2-27/ J. Verstricht, M. Demarche, C. Gatabin „Development of a backfill material within the Belgian concept for geological disposal of high-level radioactive waste: an example of successful international co-operation”, Proceedings, Tucson 2001
- /2-28/ A. Sneyers, G. Volckaert, B. Neerdael “The Belgian research, development and demonstration program on the geological disposal of long-lived and high-level radioactive waste and spent fuel in a clay formation: Status and trends”, Proceedings, Tucson, 2001
- /3-1/ Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA); Schlussbericht; Bern, Januar 2000
- /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/ Projektstudie für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in tiefliegenden geologischen Formationen sowie für die Zwischenlagerung; NAGRA, Technischer Bericht 80-02, Bern, Dezember 1980
- /3-4/ 1999 McKinley I.G., Russell Alexander W., Integration of TRU disposal studies in Switzerland, Proceedings WM’02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson
- /3-5/ CROP “Swiss Country Annex for WP1 Design and construction of engineered barriers”
- /3-6/ www.nagra.ch/english/lager/lagerhaa.htm
- /3-7/ H.-F. Beer, P. Wagner, G Ledergerber; Optimization of the conditioning of actinoid-containing liquid waste; Proceedings, ASME 1999

- /3-8/ Fritschi M., Zuidema P., Status of the Swiss radioactive waste disposal programme; Proceedings, ASME 1999
- /3-9/ NAGRA, Projektstudie für die Endlagerung von hochaktiven Abfällen in tiefliegenden geologischen Formationen sowie für die Zwischenlagerung; Technischer Bericht 80-02; Dezember 1980
- /3-10/ M. Hugli, Alternative Options for the management of radioactive waste in Switzerland; Nirex Waste Management Options Workshop, 12/13th June 2002
- /3-11/ A. Nold "The Swiss HAW/ILW repository in Opalinus clay, programme, layout and emplacement of spent fuel canisters", Proceedings DisTec 2000, Berlin
- /3-12/ Bureaux Geologiques Associes Noebert et Schindler: Etude geologique et hydrogeologique des Marnes Aaleniennes du Mt.Terri – Rapport complementaire ; Unpublizierter interner Bericht der NAGRA, 1990
- /3-13/ Bläsli, H.-R ., Peters, T., Mazurek, M. : Der Opalinus-Ton des Mont Terri (Kanton Jura): Lithologie, Mineralogie und physiko-chemische Gesteinsparameter, Unpublizierter interner Bericht der NAGRA, 1991
- /3-14/ 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
- /3-15/ Bradury, M. H., Baeyens, B.: Derivation of in situ Opalinus clay porewater compositions from experimental and geochemical studies, NAGRA Technischer Bericht Nr. 97-07, Würenlingen und Villigen, Schweiz, 1997
- /3-16/ Alheid, H.-J. et al: Comparison of in-situ hydraulic and seismic measurements in the excavation damaged zone of underground drifts; Proceedings 9th International Congress on Rock Mechanics, eds. G. Vouille and P. Berest, 1263-1266, Balkema, Paris, 1999
- /3-17/ Kiewer, M., Yaramanci, U.: Geoelektrische Charakterisierung des Opalinuston im Mont-Terri-Felslabor; Zusammenfassung 60. Jahrestagung der Geophysikalische Gesellschaft, München, 2000

- /3-18/ Adler, M., Mäder, U. K., Waber, H. N.: High-pH alteration of argillaceous rocks: an experimental study; Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. Nr.79, 445-454, 1999
- /3-19/ Soler, J. M.: Coupled transport phenomena in the Opalinus clay: Implications for radionuclide transport, Technischer Bericht der NAGRA Nr. 99-09, Würenlingen und Villigen, Schweiz, 1999
- /3-20/ Lauber, M., Baeyens, B., Bradbury, M. H.: Physico-chemical characterisation and sorption measurements of Cs, Sr, Ni, Eu, Th, Sn, and Se on Opalinus clay from Mont Terri, Technischer Bericht der NAGRA Nr. 00-11, Wetzlingen, Schweiz, 2000
- /3-21/ NAGRA: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weiter Untersuchungen, Technischer Bericht Nr. 94-10, 1994
- /3-22/ NAGRA: Sondierbohrung Benken: Arbeitsprogramm, Technischer Bericht Nr. 96-07, 1996
- /3-23/ NAGRA: Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht, Technischer Bericht Nr. 00-01, 2001
- /3-24/ Naef, H., Birkhäuser, Ph., Roth, Ph.: Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren – Zürcher Weinland, Technischer Bericht der NAGRA Nr. 94-14, 1995
- /3-25/ Birkhäuser, Ph., Roth, Ph., Meier, B., Naef, H.: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Schichten im Zürcher Weinland, Technischer Bericht der NAGRA Nr. 00-03, 2001
- /3-26/ HSK-Richtlinie R-21 Nov. 1993, Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- /3-27/ P.A. Smith, J. W. Schneider, P. Zuidema „Use of graphical presentational techniques and insight models to illustrate the roles of the different barriers in repository safety and place model-chain results in perspective”, Proceedings, ASME 1999
- /4-1/ atw, Heft 10, Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Oktober 2002, S. 637-638

- /4-2/ ANDRA; Rapport de la Mission sur la Méthodologie de l'Inventaire des Déchets Radioactifs; Tome II, Annexe 7 « Des Ordres de Grandeur »; 11 mai 2000
- /4-3/ ANDRA, Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, December 2001
- /4-4/ <http://www.cea.fr>
- /4-5/ <http://www.sfen.fr>
- /4-6/ <http://www.andra.fr>
- /4-7/ CROP Project; Andra WP1 und WP2; Annexe, 13. August 2001
- /4-8/ P. Drasdo „Kosten der Endlagerung radioaktiver Abfälle“, Schriften des energiewirtschaftlichen Instituts Bd 58, München 2001
- /4-9/ M. Allegre, Nuclear Waste Management, 1999, S. 51-73
- /4-10/ I. Kaluzny, The French Radioactive Waste Management Programme, European Nuclear Society (Hrsh.); TOPSEAL'99, Antwerpen, 1999
- /4-11/ Ch. Bateille, R. Galley, L'aval du cycle nucléaire- Tome I : Etude Générale, - Rapport de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques N° 492, Paris, 1998
- /4-12/ Annual Report 1996 – Radioactive Waste Activity without or with the Activity of ANDRA 1996, Chatenay -Malabry, 1997
- /4-13/ Activity Report 1997, ANDRA, Chatenay -Malabry, 1998
- /4-14/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) : State of knowledge and experimental program. Januar 1997
- /4-15/ Kaluzny, Y.: Present status of the Radioactive Waste Management Policy in France.-DisTec'98, Int. Conf. On Radioactive Waste Disposal, September 9-11, 1998, Hamburg, Section 4 Near-surface Repositories, p. 311
- /4-16/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) : Workshop International collaboration at Andra underground research laboratory 13th & 14th December 2000 Bure (Meuse - France)

- /4-17/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) :
Referentiel geologique du site de l'est

- /4-18/ Lebon, P., Ghoreychi, M. : French underground research laboratory of
Meuse/Haute-Marne: THM aspects of argillite formation in EURCK 2000
Symposium, Aachen, Germany, 27 – 31 March 2000, DGGT, Verlag
Glückauf Essen

- /4-19/ Krieguer, J.M.: Experimental programme for the compliance demonstration
of the Meuse-Haute-Marne site with the site selection criteria (shaft sinking
phase).- DisTec2000, Int. Conf. On Radioactive Waste Disposal, Septem-
ber 4-6, 2000, Berlin, Section 2, Oral Presentation, p. 82-87

- /5-1/ Fifth General Radioactive Waste Plan. Text Approved by the Cabinet Meet-
ing Held on 31th July 1999. Ministerio de Industria y Energía, Spain, 1999

- /5-2/ Proyecto AGP Almacenamiento Geológico Profundo Fase 2. AGP Arcilla –
Concepto de Referencia. Doc. 48-1P-M-OOA-01, April 1997

- /5-3/ CROP (European Commission's Cluster Repository Project), Country An-
nex for WP 1, Spain

- /5-4/ AGP Granito. Concepto de Referencia, 48-1P-M-00E-01, Informe Final,
1997

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	17
Abbildung 2-2:	BE-Endlagerbehälter	18
Abbildung 2-3:	Modell eines HAW-Endlagerbehälters	19
Abbildung 2-4.:	Endlagerbehälter für Primärbehälter mit verglasten HAW	20
Abbildung 2-5:	Übersicht über die HADES - URF in Mol, Belgien	24
Abbildung 2-6:	Ausstrich, Tiefenlage und Mächtigkeit des Boom clay in Nördlichen Belgien. Im Gebiet von Diest/Aarschot ist der Boom clay während des Miozäns erodiert worden.	25
Abbildung 2-7:	NNW – SSE Profil durch Nord-Belgien	25
Abbildung 2-8:	Lithologische Abfolge der Sedimente am Standort Mol	27
Abbildung 2-9:	Störungen in den südlichen Niederlanden, die wahrscheinlich nach Belgien hineinreichen.	28
Abbildung 2-10:	Grundwasserstockwerke in Nordost-Belgien	29
Abbildung 2-11:	Durchschnittliche Konvergenz von 7 Ringen in der Test-Strecke	32
Abbildung 2-12:	Veränderung des Porenwasserdruckes während der Auffahrung der Test-Strecke	33
Abbildung 2-13:	Versuchsanordnung des Bacchus-Experimentes	35
Abbildung 2-14:	Versuchsanordnung des Cerberus-Experimentes	36
Abbildung 2-15:	Anordnung der Messgeber im Bereich der Schachtversiegelung im Experimentierschacht.	40
Abbildung 2-16:	Endlager für verglaste HAW /2-5/	42
Abbildung 2-17:	Schnitt einer Endlagerungsstrecke für verglaste HAW /2-5/	43
Abbildung 2-18:	Endlager für ausgediente Brennelemente	43
Abbildung 2-19:	Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente Brennelemente /2-5/	44
Abbildung 2-20:	Schnitt einer Einlagerungsstrecke für ausgediente MOX-Brennelemente /2-5/	45
Abbildung 2-21:	Endlagerung von HAW mit geringer Wärmeentwicklung sowie LILW /2-23/	46
Abbildung 2-22:	Transportwagen für HAW- und Brennelemente-Endlagerbehälter /2-5/	47
Abbildung 2-23:	Schieberoboter /2-5/	48

Abbildung 2-24:	Untertagelabor HADES - Schnitt Schacht 2 /2-26/	51
Abbildung 2-25:	Untertagelabor HADES–Auffahren der Verbindungsstrecke von Schacht 2 /2-26/	51
Abbildung 2-26:	Keilblocksystem für den Streckenausbau /2-26/	52
Abbildung 3-1:	HAW-Kokille in Endlagerabschirmbehälter	66
Abbildung 3-2:	Endlager im Tongestein	68
Abbildung 3-3:	Querschnitt einer Hauptstrecke	68
Abbildung 3-4:	Querschnitt einer Einlagerungsstrecke	69
Abbildung 3-5:	Prinzip der kontrollierten geologischen Langzeitlagerung	70
Abbildung 3-6:	Endlager für HAW/ILW im Opalinuston	71
Abbildung 3-7:	Layout des Endlagers im Opalinuston	72
Abbildung 3-8:	Stratigraphische Tabelle Trias bis Jura der Nordwestschweiz	75
Abbildung 3-9:	Vereinfachte Geologische Karte der Umgebung des Mont Terri	76
Abbildung 3-10:	Geologisches Profil durch den Mont Terri	76
Abbildung 4-1:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente	97
Abbildung 4-2:	Endlagercontainer für verglasten HAW	99
Abbildung 4-3:	Schematisches Layout des Endlagers (Ausschnitt)	102
Abbildung 4-4:	Einlagerungszelle für verglasten HAW	104
Abbildung 4-5:	Einlagerungszelle für ausgedienten Kernbrennstoff	106
Abbildung 4-6:	Geologisches Profil	109
Abbildung 4-7:	Lage des URL in der Callov-Oxford Formation	111
Abbildung 4-8:	Strukturkarte im Umfeld des URL	112
Abbildung 5-1:	Endlagerbehälter für ausgediente Brennelemente für die Endlagerung in Ton in Spanien	131
Abbildung 5-2:	Endlagerbehälter für verglaste hochaktive Abfälle für die Endlagerung in Ton in Spanien	132
Abbildung 5-3:	Endlagerbehälter und Abschirmbehälter für den Transport von Endlagerbehältern nach Untertage bei der Endlagerung in Ton in Spanien	133
Abbildung 5-4:	Spanien - Endlager-Layout	134
Abbildung 5-5:	Spanien – AGP Granit - Verschlusskonzept	136

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Belgien - Brennelementedaten	15
Tabelle 2-2:	Belgien - Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“	15
Tabelle 2-3:	Belgien – Gebindeanzahl und -volumen beim Szenarium „Direkte Endlagerung“	16
Tabelle 2-4:	Belgien - Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Komplette Wiederaufarbeitung“	21
Tabelle 2-5:	Belgien – Gebindeanzahl und Wärmeleistung per Gebinde beim Szenarium „Direkte Endlagerung“	22
Tabelle 2-6:	Zusammenstellung der Messinstrumente der thermo-mechanischen in-situ Versuche BACCHUS, CERBERUS und CACTUS /2-14/.	34
Tabelle 2-7:	Wärmeleitfähigkeit der Barrieren /2-7/	56
Tabelle 2-8:	FEP-Klassifikation /2-4/	58
Tabelle 2-9:	Kostenabschätzung für ein Endlager in Boom-Ton (Stand 1997, Preise 2000) /2-4/	61
Tabelle 3-1:	Kernkraftwerke der Schweiz	62
Tabelle 3-2:	Abfallmengengerüst HAW und LL-ILW	64
Tabelle 3-3:	Durchschnittliche Mineralzusammensetzung im Opalinuston (Abschätzung aus /3-14/)	77
Tabelle 4-1:	Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 1)	89
Tabelle 4-2:	Radioaktive Abfälle in Frankreich bis 2020 (Szenario 2)	89
Tabelle 4-3:	Volumen und Gesamtaktivität radioaktiver Abfälle in Frankreich	90
Tabelle 4-4:	ANDRA - Vorläufiges Inventar an HAW/langlebigen radioaktiven Abfällen	91
Tabelle 4-5:	Aufkommen radioaktiver Abfälle in Frankreich bis 2020 und bis 2070	92
Tabelle 4-6:	Literaturangaben zum Aufkommen an ILW-LL, HAW und ausgedientem Kernbrennstoff in Frankreich	93
Tabelle 4-7:	Endlagerinventar	94
Tabelle 4-8:	Primärbehälter für Abfallkategorie Brennelemente (Abfallkategorie C)	95

Tabelle 4-9:	Primärbehälter für verglaste Abfälle (Abfallkategorie C)	98
Tabelle 4-10:	Abmessungen der Primärbehälter für verglaste Abfälle	98
Tabelle 4-11:	Restwärmewicklung und Zwischenlagerzeit der Primärbehälter mit verglasten Abfällen	99
Tabelle 4-12:	Abmessungen und Masse der gefüllten Endlagerbehälter für verglaste Abfälle	100
Tabelle 4-13:	Konzeption der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frankreich	100
Tabelle 4-14:	Geologische Abfolge in Bure	110
Tabelle 4-15:	Petrophysikalische Eigenschaften des Tonschiefers	110
Tabelle 4-16:	Kosten des französischen Endlagersystems	125
Tabelle 5-1:	Spanien - Kernkraftwerke	126
Tabelle 5-2:	Spanien - Inventar eines geologischen Endlagers	127
Tabelle 5-3:	Referenzbrennelement Westinghouse DWR 17 x 17	128
Tabelle 5-4:	Planungsgrundlage für ein geologisches Endlager	128
Tabelle 5-5:	Wärmeleistung eines Referenzbrennelementes als Funktion der Zeit nach Reaktorentnahme	130

9 Abkürzungsverzeichnis

AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BNFL	British Nuclear Fuels plc.
BSK	Brennstabkockille
COGEMA	Compagnie Générale de Matières Nucléaires
CSD-C	Colis Standard de Déchets Compactés
DWR	Druckwasserreaktor
ELB	Endlagerbüchse (heute BSK)
FRMII	Forschungsreaktor München
HAP	Hydroxylapatit
HAW	High Active Waste
HTR	Hochtemperaturreaktor
ILW	Intermediate Level Waste
KKW	Kernkraftwerk
LLW	Low Level Waste
LWR	Leichtwasserreaktor
MOX	Mischoxid
SF	Spent Fuel
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor
VKTA	Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.

10 Verzeichnis der Anlagenbände

- A1 Internationale Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Ton
- A2 Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton
- A3 Sicherheit in der Betriebsphase
- A4 Sicherheit in der Nachbetriebsphase
- A5 Vergleich der Wirtsgesteine Ton-/Tonstein und Steinsalz in den Ablagerungsräumen der Norddeutschen Senke und des Süddeutschen Molassebeckens
- A6 Sicherheit in der Nachbetriebsphase - Geochemie -