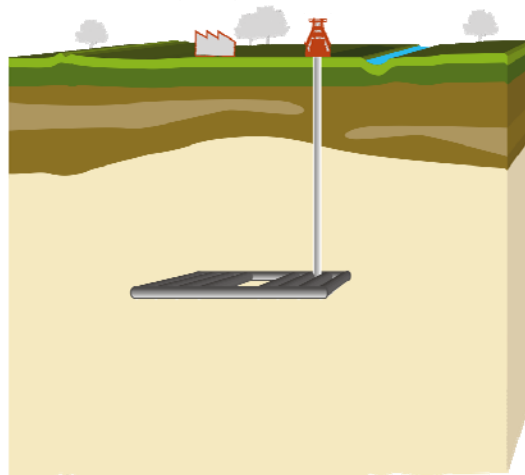


## Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

### Anhang Untertagelabore

#### Aufgabe und Zielsetzung von Untertagelaboren



**30.09.2008**

**Bearbeiter:**

Brasser, T.

Droste, J.

**Braunschweig / Darmstadt  
September 2008**

**Anhang zu GRS-247  
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Untertagelabore - Überblick über relevante UTL.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Übersicht über Untertagelabore und deren Zielsetzung .....</b>	<b>9</b>
2.1	Untertagelabore in Salzgestein .....	9
2.1.1	Schachtanlage Asse .....	9
2.1.2	Gorleben .....	13
2.1.3	Morsleben .....	15
2.2	Untertagelabore in Kristallingesteinen .....	16
2.2.1	Felslabor Grimsel (FLG).....	17
2.2.2	Äspo Hard Rock Laboratory (HRL) .....	21
2.3	Untertagelabore in Tongestein .....	23
2.3.1	Felslabor Mont Terri .....	23
2.3.2	Underground Research Facility Mol (URF) .....	27
2.3.3	Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory (Bure).....	29
2.3.4	Tournemire .....	33
2.3.5	Schachtanlage Konrad .....	35
2.4	Sonstige Untertagelabore .....	40
2.4.1	Lac du Bonnet Underground Research Laboratory (URL).....	40
2.4.2	Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).....	42
2.4.3	Yucca Mountain - Exploratory Studies Facility .....	46
2.5	Resümee .....	48
<b>3</b>	<b>Die Schachtanlage Asse als UTL.....</b>	<b>55</b>
3.1	Versuchseinlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen.....	55
3.2	Weiterentwicklung von Einlagerungstechniken .....	59
3.3	Versuche zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle .....	61
3.4	Arbeiten zur Direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen .....	71
3.5	Qualifizierung geotechnischer Barrieren .....	78
<b>4</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>94</b>
<b>5</b>	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>105</b>



## 1 Untertagelabore - Überblick über relevante UTL

Für die Entwicklung eines Endlagers für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen sind Untertagelabore (UTL; engl. Underground Research Laboratories, URL) sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus technischer Sicht von großer Bedeutung. Zur Bewertung der langfristigen Sicherheit eines Endlagers sind beispielsweise Kenntnisse über das geochemische Milieu und das Verhalten sämtlicher Endlagerkomponenten (Abfallgebinde, technische, geotechnische und geologische Barrieren) in diesem Milieu erforderlich. Viele nationale Entsorgungsprogramme sehen daher Untersuchungen in Untertagelaboren vor, die zumeist in internationaler Kooperation durchgeführt werden /NEA 88/, /NEA 01a/. Untertagelabore spielen auch im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit eine wichtige Rolle, da der Besuch solcher Einrichtungen einen guten Eindruck über die Forschungsaktivitäten vermitteln und das Verständnis für Endlagerprojekte fördern kann.

Generell dienen Untertagelabore folgenden Zwecken:

- Entwicklung und Erprobung untertägiger Untersuchungsmethoden,
- Wirtsgesteins- und Standortcharakterisierung,
- Verständnis der in einem Endlager ablaufenden Prozesse und ihrer Wechselwirkungen,
- Gewinnung von Eingangsdaten für die Langzeitsicherheitsanalyse,
- Test und Demonstration von Einlagerungstechniken,
- Test und Optimierung der technischen und geotechnischen Barrieren,
- Nachweis der Machbarkeit eines Endlagerkonzeptes in Bezug auf die Errichtung, den Betrieb, die Überwachung, den Verschluss und die Sicherheit eines Endlagers,
- Vertrauensbildung bei Wissenschaftlern und Öffentlichkeit.

Grundsätzlich lassen sich zwei verschiedene Typen von Untertagelaboren unterscheiden:

- Generische Labore,
- Standortspezifische Labore.

Generische Untertagelabore werden an einem Standort eingerichtet, der NICHT für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen vorgesehen ist. Sie nutzen entweder bereits existierende untertägige Einrichtungen, wie Bergwerke oder Tunnel (z. B. das ehemalige Forschungsbergwerk Asse, Stripa Mine, Felslabor Grimsel, Mont Terri URL), oder werden neu aufgeföhren und eingerichtet (z. B. HRL Äspö). Die Anlage eines generischen Untertagelabors erfolgt im potenziellen Endlager-Wirtsgestein selbst (z. B. Felslabor Mont Terri) oder in einer dafür repräsentativen geologischen Formation. Generische Untertagelabore, die in potenziellen Wirtsgesteinen angelegt werden, bieten bei geeigneten geologischen Bedingungen die Möglichkeit eines späteren Ausbaus zu einem Endlager (z. B. Olkiluoto).

Standortspezifische Untertagelabore werden definitionsgemäß an einem vorgesehenen Endlagerstandort errichtet (z. B. HADES-URF, Gorleben, Konrad, Bure URL, WIPP). Die tatsächliche Eignung des ausgewählten Endlagerstandortes wird erst im Rahmen der untertägigen Standorterkundung ermittelt. Dies ist konkret die Aufgabe eines standortspezifischen Untertagelabors.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Typen von Untertagelaboren sind in Tab. 1 gegenübergestellt.

### **Untertagelabore weltweit**

Weltweit wurden in verschiedenen Wirtsgesteinen Untertagelabore eingerichtet, um die für eine Endlagerung erforderlichen experimentellen Daten bereitzustellen, die Verifizierung und Validierung von numerischen Modellierungen zu ermöglichen sowie Einlagerungs- und Verschlusstechniken zu testen und zu demonstrieren. Viele der weltweit eingerichteten Untertagelabore bieten Projekte für eine internationale Zusammenarbeit an. Für diese internationalen Forschungsprogramme sind nicht nur generische Untertagelabore geeignet. Auch in standortspezifischen UTL können generische Forschungsarbeiten durchgeführt werden, die für die nationalen Endlagerprogramme von Nutzen sind.

Eine Übersicht der weltweit betriebenen Untertagelabore ist in /IAE 01/ zusammengestellt (Tab. 2). Eine Darstellung der Rolle von Untertagelaboren bei der Implementierung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle findet sich in /NEA 01b/. Die wichtigsten nationalen und internationalen Untertagelabore werden in den folgenden Kapiteln detaillierter vorgestellt.

**Tab. 1** Wesentliche Unterschiede von generischen und standortspezifischen Untertagelaboren (modifiziert nach /KIC 02a/)

<b>Generisches Untertagelabor</b>	<b>Standortspezifisches Untertagelabor</b>
Reine Forschungseinrichtung, kein Standortbezug	Geplanter Endlagerstandort
Standort muss relevante Experimente ermöglichen	Endlager am Standort muss genehmigungsfähig sein
Anwendung destruktiver Untersuchungsmethoden möglich	Störungen der Barrieren / des Wirtsgesteins müssen minimiert werden
Entwicklung von QS-Methoden möglich	Anwendung strenger QS-Maßnahmen erforderlich
Entwicklung und Test von Untersuchungsmethoden	Anwendung geprüfter Untersuchungsmethoden
Wirtsgesteinsbezogene Datenerhebung	Standortspezifische Datenerhebung
Test und Verifizierung von Modellen für den Langzeitsicherheitsnachweis	Sicherheitsanalysen im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens
Erforschung, Entwicklung und Demonstration von Endlagerkonzepten	Standortuntersuchung
Information der Öffentlichkeit	Information der Öffentlichkeit
Test von Konstruktionsmethoden	Konstruktion gemäß Sicherheits-, Qualitäts- und Budget-Anforderungen
Beispiele: Felslabor Grimsel (CH), Felslabor Mt. Terri (CH)	Beispiele: URL Bure (F)

### **Untertagelabore mit Beteiligung deutscher Forschungsstellen**

In Deutschland wird die Endlagerforschung in Untertagelaboren bereits seit Ende der 1960er Jahre betrieben. Zur Ermittlung der Eigenschaften von Steinsalz als Wirtsgestein diente insbesondere die Schachtanlage Asse, die seit dem Jahr 1967 für in situ-Experimente genutzt wurde.

Seit Mitte der 1970er Jahre sind deutsche Institutionen intensiv an verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten der Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG) in europäischen Untertagelaboren in anderen Wirtsgesteinen beteiligt, um die internationale Methodenentwicklung zu verfolgen und die Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit dieser Methoden auf die in Deutschland zur Endlagerung in Betracht kommenden Wirtsgesteine zu prüfen. Diese Beteiligungen erfolgen im Rahmen verschiedener FuE-Vorhaben, die vom Projektträger PTKA-WTE auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle betreut werden. Neben der in Deutschland zunächst favo-

risierten Salzoption wurden die Arbeiten in den 1980er Jahren um Untersuchungen im Kristallin und seit den späten 1990er Jahren sowie besonders seit dem Jahr 2000 zunehmend auch um die Tonoption erweitert.

**Tab. 2** Übersicht über weltweit betriebene Untertagelabore (nach /IAE 01/)

Land	Ort	Name	Typ <sup>1)</sup>	Wirtsgestein	Versuchsart <sup>2)</sup>	Zeitraum
Belgien	Mol	HADES-URF, PRACLAY	S	Ton	THMCR+D	seit 1980
Deutschland	Asse	Schachanlage Asse (ehem. Forschungsbergwerk Asse)	G	Steinsalz (Salzstock)	THMCR+D	1977-1995
	Gorleben	Gorleben	S	Steinsalz (Salzstock)	Char	seit 1997 (z. Zt. Unterbrechung)
	Konrad	Konrad	S	Tonstein	HMC	seit 1980
	Morsleben	ERAM	S	Steinsalz (Salzstock)	D	seit 1981
Finnland	Olkiluoto	Research Tunnel	G	Granit	HM+D	seit 1993
Frankreich	Fanay	Fanay	G	Granit	THMC	1980-1990
	Amélie	Amélie	G	Steinsalz (in flacher Lagerung)	TM+D	1986-1994
	Tournemire	Tournemire Research Tunnel	G	Tonstein	HMC	seit 1990
	Bure	Bure URL	S	Tonstein	Im Bau	seit 2000
Großbritannien	Sellafield	RCF	S	Tuff	Char	nie gebaut: 1997gestoppt
Japan	Tono	Tono	G	Sandstein	HMC	seit 1986
	Kamaishi	Kamaishi	G	Granit	Char	1988-1998
	Mizunami	MIU	G	Granit	In Vorbereitung	
	Honorobe	Honorobe	G	Sedimente	In Vorbereitung	
Kanada	Pinawa	Lac du Bonnet URL	G	Granit	THMC	seit 1984



## Anhang Untertagelabore

Land	Ort	Name	Typ <sup>1)</sup>	Wirtsgestein	Versuchsart <sup>2)</sup>	Zeitraum
Schweden	Stripa	Stripa	G	Granit	THMC	1976-1992
	Äspö	HRL	G	Granit	THMC+D	seit 1990
Schweiz	Grimsel	GTS	G	Granit	THMC	seit 1983
	Mont Terri	Mont Terri URL	G	Tonstein	THMC	seit 1995
Tschechische Republik	Príbam	Shaft 16	G	Granit	Char	Ende 1990er
Ungarn	Pécs	Pécs	G	Tonstein	D	1995-1999
USA	Nevada Test Site	Climax	G	Granit	D	1978-1983
	Nevada Test Site	G-Tunnel	G	Tuff	THM	1979-1990
	Lyons, Kansas	Project Salt Vault	G	Steinsalz (in flacher Lagerung)	TM	1965-1968
	Carlsbad, New Mexico	WIPP	S	Steinsalz (in flacher Lagerung)	THMCR+D	seit 1982
	Yucca Mountain, Nevada	ESF	S	Tuff	THMC+D	seit 1993
	Yucca Mountain, Nevada	Busted Butte	G	Tuff	HMC	seit 1997

1) S = Standortspezifisch, G = Generisch

2) T = Thermisch, H = Hydraulisch, M = Mechanisch, C = Chemisch, R = Strahlung, D = Demonstration, Char = Charakterisierung

Eine Übersicht über Untertagelabore mit Beteiligung deutscher Forschungsstellen gibt Tab. 3.

**Tab. 3** Untertagelabore mit Beteiligung deutscher Forschungsstellen (nach: /PTK 06/)

Untertagelabor	Geologische Formation t	Land	Deutsche Beteiligung seit	Beteiligte deutsche Institutionen <sup>1)</sup>	Partnerländer
Schachtanlage Asse	Salz	Deutschland	1966	BGR, DBETec, FZK, GRS, IfG	E, F, NL, USA
Felslabor Grimsel (FLG)	Granit	Schweiz	1983	BGR, DBETec, FZK, GRS	CH, E, JP, USA
Hard Rock Laboratory Äspö (HRL)	Granit	Schweden	1995	BGR, FZK, FZD, GRS, DBETec	S, E, F, FIN, JP, USA
Felslabor Mont Terri	Ton	Schweiz	1996	BGR, GRS, TUC	CH, B, E, F, JP
Underground Research Facility Mol (URF)	Ton	Belgien	1997	(BGR), GRS	B, F, E
Tournemire	Ton	Frankreich	beendet	BGR, GRS, Uni-HD	F
Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory (Bure)	Ton	Frankreich	2000	BGR, DBETec, GRS, FZK	E, F, JP

- 1) BGR = Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover  
 DBETec = DBE Technology GmbH, Peine  
 FZK = Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe  
 GRS = Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln  
 IfG = Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig  
 FZR = Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V., Dresden  
 TUC = Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld  
 Uni-HD = Universität Heidelberg, Heidelberg

## **2 Übersicht über Untertagelabore und deren Zielsetzung**

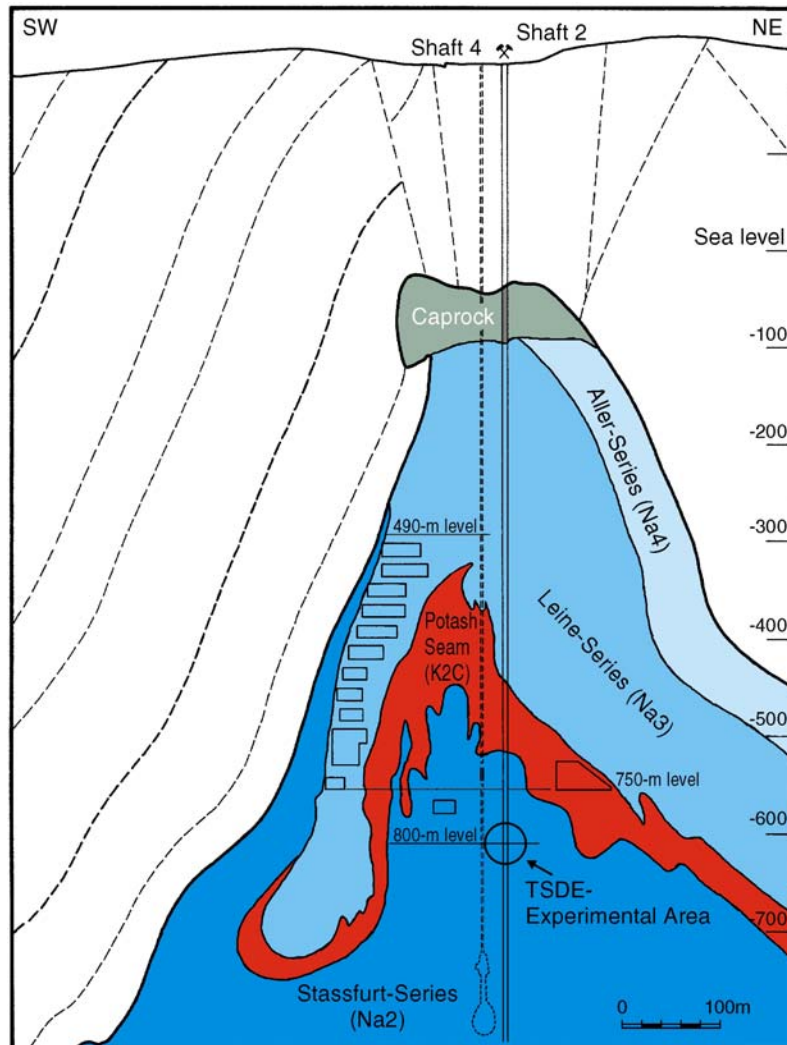
In diesem Kapitel werden die wichtigsten nationalen und internationalen Untertagelabore in den verschiedenen Wirtgesteinstypen Steinsalz, Tongestein und Kristallin vorgestellt. Es wird ein Überblick über die jeweiligen Zielsetzungen der Forschungsarbeiten und die wesentlichen in situ-Experimente und Demonstrationsversuche gegeben. Die wichtigsten Ergebnisse und Erfahrungen werden diskutiert. Eine umfassende Darstellung aller Arbeiten in diesen UTLs ist nicht das Ziel des Anhanges „Untertagelabore“.

### **2.1 Untertagelabore in Salzgestein**

#### **2.1.1 Schachtanlage Asse**

In der Bundesrepublik Deutschland erfolgte schon frühzeitig eine Festlegung auf Steinsalz als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Dies hatte zur Folge, dass am 12. März 1965 die damalige Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) (heute: Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, HMGU) im Auftrag des Bundes das Salzbergwerk Asse erwarb und am 1. Juni 1965 das Institut für Tieflagerung (IfT) zur Durchführung von Forschungen auf dem Gebiet der Tieflagerung radioaktiver Abfälle, insbesondere zur Eignung von Steinsalz als Wirtsgestein und zur Erprobung von Einlagerungstechniken, gründete.

Der geologische Aufbau des Asse-Sattels mit den verschiedenen Abbaufeldern des Salzbergwerkes ist in Abb. 1 dargestellt. Die Salzgewinnung begann 1909 mit dem Abbau von Carnallit an der Nordflanke des Salzsattels zwischen der 725-m-Sohle und der 750-m-Sohle (bis 1925). Die entstandenen Abbaue wurden bereits während dieser Zeit wieder mit Material aus der Kalisalzaufbereitung versetzt. Steinsalzabbau erfolgte von 1916 bis 1964. An der Südflanke des Salzsattels wurden zwischen der 490-m-Sohle und der 750-m-Sohle 131 Abbaue im Leine-Steinsalz (Na3) aufgefahren. Auch im Zentralteil des Asse-Sattels wurde im Staßfurt-Steinsalz (Na2) in 20 Abbauen zwischen der 725-m-Sohle und der 775-m-Sohle Steinsalz gewonnen.



**Abb. 1** Vereinfachter geologischer Schnitt durch den Asse-Sattel mit den Abaufeldern an der Südflanke, im Zentralteil und an der Nordflanke sowie der Lage des TSDE-Versuchsfeldes im Steinsalz der Staßfurt-Folge unterhalb der 800-m-Sohle. Die Deckgebirgsschichten (Buntsandstein, Muschelkalk) sind in dieser Darstellung nicht farblich differenziert

Nach dem Erwerb der Schachanlage Asse durch die GSF stand zunächst die Versuchseinlagerung schwachradioaktiver und ab August 1972 auch mittelradioaktiver Abfälle im Mittelpunkt der frühen Forschungsarbeiten. Dabei wurden insbesondere Handhabungstechniken und Einlagerungsmethoden entwickelt und in Großversuchen erprobt. Im Rahmen dieser FuE-Arbeiten wurden zwischen dem 4. April 1967 und 31. Dezember 1978 insgesamt 124.494 Abfallbehälter mit schwachradioaktiven Abfällen sowie 1.293 Fässer mit mittelradioaktiven Abfällen eingelagert. Die rechtlichen

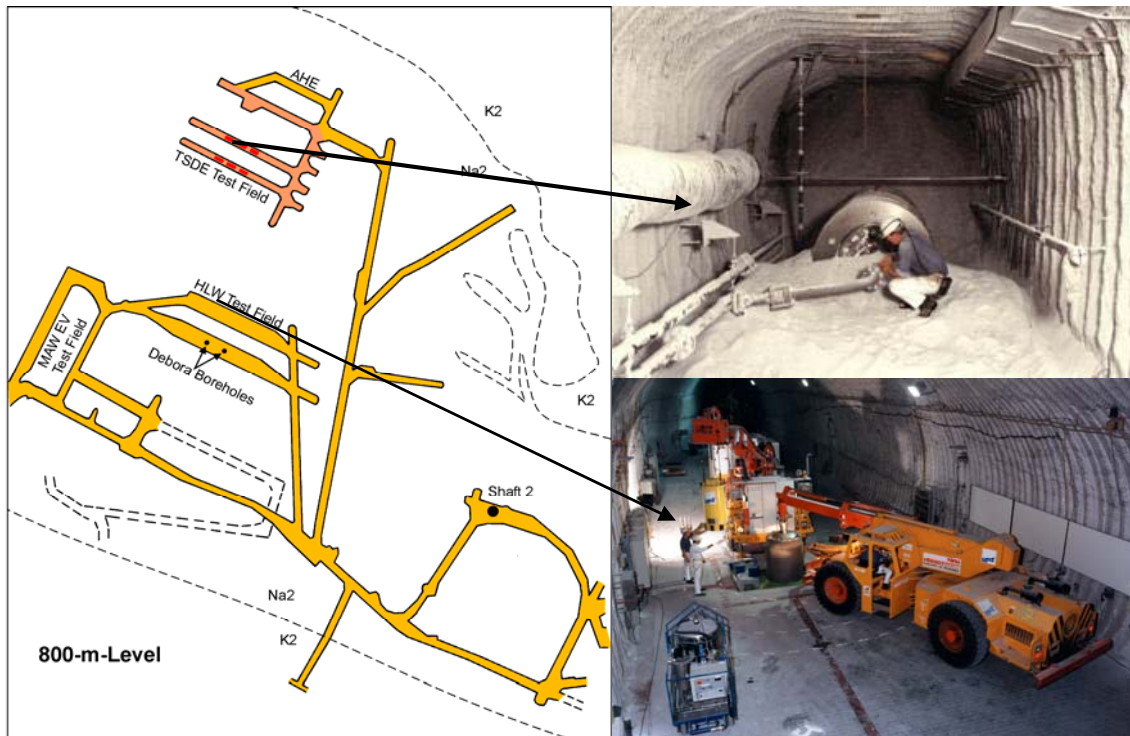
Grundlagen für die Einlagerung bildeten das Atomgesetz - AtG („Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“) /ATG 85/ und die Strahlenschutzverordnung - StrlSchV („Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“) /STV 01/. Die Genehmigungen für die Versuchseinlagerung radioaktiver Abfälle in der Schachanlage Asse waren befristet und liefen 1977/78 aus. Eine Rückholung der Abfälle war nicht vorgesehen. 1979 kamen der Bund und das Land Niedersachsen überein, nur noch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle durchzuführen.

Diese Forschungsarbeiten hatten bereits Mitte der 1960er Jahre begonnen und konzentrierten sich zunächst auf die Untersuchung von thermischen und gekoppelten thermo-mechanischen, aber auch hydraulischen und radiolytischen Effekten im Nahfeld eines HAW-Behälters („High Active Waste“ = hochradioaktive Abfälle). Erste Versuche in Bohrungen in bereits vorhandenen Grubenräumen wurden auf der 490-m- und 750-m-Sohle durchgeführt. Später wurden gezielt Versuchsorte mit spezifischen geologischen Eigenschaften aufgefahren, wie beispielsweise das sogenannte Temperatur-Versuchsfeld 5. Der hier durchgeführte Erhitzerversuch hatte zum Ziel, die wärmebedingte Freisetzung von Kristallwasser aus dem Mineral Polyhalit ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2 CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ) in ein HAW-Bohrloch zu untersuchen.

Diese Untersuchungen erfolgten in den alten Grubenbauen des Leine-Steinsalzes. Die Versuchsbedingungen in diesen Grubenbereichen waren jedoch nicht als repräsentativ für das ungestörte Salzgebirge anzusehen. Für die weiteren Forschungsaktivitäten wurden daher zwischen 1984 und 1992 verschiedene Versuchsfelder im Steinsalz der Staßfurt-Folge unterhalb der 800-m-Sohle aufgefahren (sog. Tiefenaufschluss, siehe Abb. 1). Diese Grubenbereiche befinden sich im von Salzabbau ungestörten Kernbereich des Asse-Sattels in einer endlagerrelevanten Teufe. Die anstehenden Gesteine des Staßfurt-Steinsalzes Na<sub>2</sub>β sind auch für andere mögliche Endlagerstandorte im Steinsalz repräsentativ und entsprechen insbesondere den geologischen Bedingungen am Standort Gorleben.

Seit Anfang der 1980er Jahre konzentrierten sich die FuE-Arbeiten auf Fragen der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Im Mittelpunkt dieser Arbeiten standen die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Abfällen und Wirtsgestein unter Einfluss von Wärme und Strahlung, die Entwicklung von Verfüll- und Verschlussstechniken sowie die Erprobung und Demonstration von Einlagerungstechniken. Da die Schacht-

anlage Asse nie als Endlager für hochradioaktive Abfälle vorgesehen war, hatten die Forschungsarbeiten überwiegend generischen Charakter unter endlagerrelevanten Randbedingungen. Die vielfältigen Untersuchungen dienten der Bereitstellung wissenschaftlich abgesicherter Daten, insbesondere auch zur Entwicklung bzw. Qualifizierung von Rechenmodellen zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers.



**Abb. 2** Links: Versuchsfelder auf der 800-m-Sohle der Schachtanlage Asse (HAW-Feld, MAW-Feld, TSDE-Feld); oben rechts: TSDE-Versuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung, unten rechts: HAW-Versuch.

Ab Mitte der 1980er Jahre wurden auf der 800-m-Sohle mehrere Großversuche durchgeführt (Abb. 2). Hervorzuheben sind insbesondere der deutsch-amerikanische Brine Migration Test /ROT 88/, Demonstrationsversuche zum Transport und zur Bohrlochlagerung von mittelradioaktiven Abfällen (MAW-Versuch) /NIE 93/, /WIE 93/ und hochradioaktiven Abfällen (HAW-Versuch) /ROT 95/, der TSS-Versuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung bei der Direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente /DRO 01/, /ROT 03/ und der DEBORA-Versuch („Development of Borehole Seals for High-level Radioactive Waste“) zur Entwicklung von Bohrlochverschlüssen für

hochradioaktive Abfälle /ROT 99/. Eine ausführlichere Beschreibung der wichtigsten in situ-Experimente in der Schachtanlage Asse findet sich in Kap. 3.

Im Frühjahr 1992 entschied der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT), die FuE-Arbeiten in der Schachtanlage Asse nicht weiter zu fördern. Daraufhin wurde das GSF-Institut für Tieflagerung 1995 aufgelöst. Nach der Beendigung der meisten Großversuche wird das Bergwerk seit Mitte der 1990er Jahre für seine Schließung nach Bundesberggesetz /BBG 80/ vorbereitet. Zwischen 1995 und 2003 wurden die ehemaligen Abbaukammern in der Asse-Südflanke mit arteigenem Material (Salzgrus) verfüllt. Die Verfüllmaßnahmen wurden durch geotechnische, geophysikalische und hydrogeologische Messprogramme überwacht. Derzeit werden die Hohlräume des Tiefenaufschlusses unterhalb der 800-m-Sohle verfüllt. Darüber hinaus erfolgen weitere vorbereitende Arbeiten zur vollständigen Schließung der Schachtanlage. Die endgültige Schließung soll nach derzeitigem Planungsstand (Sommer 2008) im Jahr 2017 abgeschlossen sein.

### **2.1.2 Gorleben**

In der 4. Novelle zum Atomgesetz vom 30. August 1976 wurden die Zuständigkeiten und Verfahrensweisen bei der Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle grundlegend geregelt. Daraus ergab sich die folgende Rollenverteilung: die Industrie baut und betreibt Anlagen zur Wiederaufarbeitung, Abfallbehandlung und Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen aus dem Bereich der Kernkraftwerke, die Länder bauen und betreiben Landessammelstellen für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen aus Forschung, Medizin und Industrie und der Bund baut und betreibt Endlager für radioaktive Abfälle. Die Aufgaben des Bundes wurden zunächst von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und ab 1989 vom neu errichteten Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wahrgenommen. Die Kosten für die Endlagerung werden nach dem Verursacherprinzip in erster Linie von den Energieversorgungsunternehmen getragen.

Bereits 1972 begann im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) eine deutschlandweite Suche nach einem Standort für ein Nukleares Entsorgungszentrum (NEZ) mit Wiederaufarbeitung und Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen an einem Standort. Eine von der Bundesregierung beauftragte Kommission ermittelte in einem ersten Durchgang 26 mögliche Standorte in dünn be-

siedelten Regionen, von denen 8 als besonders günstig eingestuft wurden. Drei Salzstöcke in Niedersachsen wurden schließlich zur näheren Untersuchung vorgeschlagen: Waten, Weesen-Lutterloh und Lichtenhorst. Im Jahre 1975 bewilligte das BMFT Mittel für Erkundungsmaßnahmen an diesen Standorten; diese Untersuchungen wurden jedoch nach Protesten gegen die Erkundung und aufgrund politischer Bedenken der neuen Landesregierung im August 1976 eingestellt.

Parallel zur Erkundung an den drei Standorten wurde 1976 von der niedersächsischen Landesregierung eine interministerielle Arbeitsgruppe unter Federführung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums einberufen, die in drei Auswahlphasen aus 140 untersuchten Salzstöcken vier Standorte auswählte: Wahn, Lichtenhorst, Gorleben und Mariagluck. In einer vierten Auswahlphase wurde Gorleben als optimaler Standort vorgeschlagen, da dieser Salzstock mit ca. 40 km<sup>2</sup> einer der größten niedersächsischen Salzstöcke ist und im Standortbereich unverletzt war. Am 22. Februar 1977 entschied sich die niedersächsische Landesregierung, Anträge zur Errichtung eines NEZ am Standort Gorleben zu prüfen. Am 5. Juli 1977 akzeptierte der Bund die Standortentscheidung. Am 28. Juli 1977 wurde von der damals zuständigen PTB der Antrag zur Einleitung eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens zur Errichtung einer Anlage nach § 9b AtG zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle in dem am Standort Gorleben geplanten Nuklearen Entsorgungszentrum gestellt. Die Realisierung eines NEZ wurde 1979 mit dem so genannten „Integrierten Entsorgungskonzept“ aufgegeben und eine Trennung der Standorte für die Wiederaufarbeitung und das Endlager vorgesehen. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle war jedoch auch weiterhin am Standort Gorleben geplant.

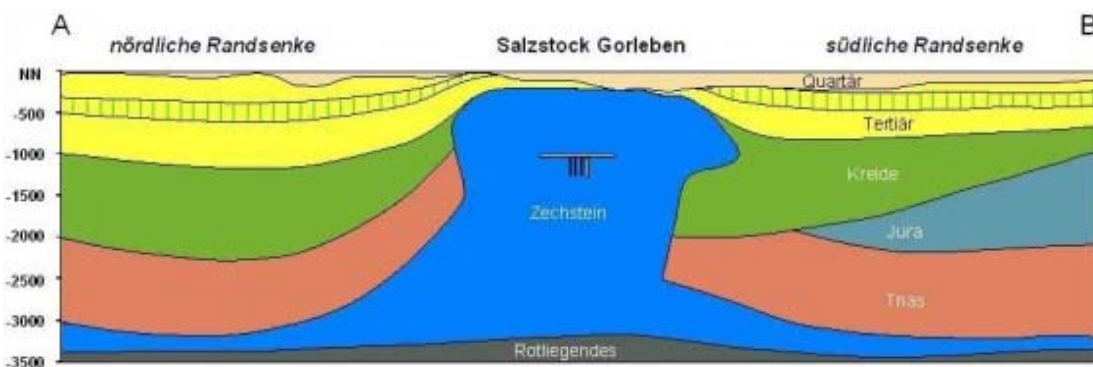
Seit 1979 wurde der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Endlager für alle Arten fester und verfestigter, insbesondere auch wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle untersucht. Die Forschungs- und Erkundungsarbeiten umfassten ein umfangreiches geologisches und hydrogeologisches Untersuchungsprogramm, die Erforschung des Aufbaus des Salzstockes und dessen Einbettung in die umgebenden geologischen Formationen sowie die Untersuchung der hydrogeologischen Verhältnisse des Deckgebirges. Ein vereinfachter geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Erkundung unter Tage begann 1986 mit dem Abteufen der beiden Schächte Gorleben 1 (bis in 933 m Teufe) und Gorleben 2 (bis in 840 m Teufe) im Zentrum des Salzstockes. Die beiden Schächte wurden über eine Sohle in 840 m Teufe miteinander



verbunden. Auf dieser Erkundungssohle wurden weitere Strecken zur geologischen Erkundung des Salzstockes sowie der Infrastrukturbereich aufgeföhren. Das geowissenschaftliche Bohr- und Untersuchungsprogramm beinhaltete u. a. die Kartierung der geologischen Schichten, die Erstellung geophysikalischer Profile sowie die Nutzung vielfältiger Messmethoden zur Ermittlung der Gebirgspemeabilität, der Gebirgsspannungen, des Temperaturverlaufs und möglicher Verformungen.

Im Jahr 2000 wurde in einem zwischen der Bundesregierung und den EVU vereinbarten Moratorium eine Unterbrechung der Erkundung des Salzstockes Gorleben für mindestens drei, höchstens jedoch 10 Jahre vereinbart, um die Klärung konzeptioneller und sicherheitstechnischer Fragestellungen zu ermöglichen. Die Erkundungsarbeiten wurden daraufhin zum 1. Oktober 2000 eingestellt.



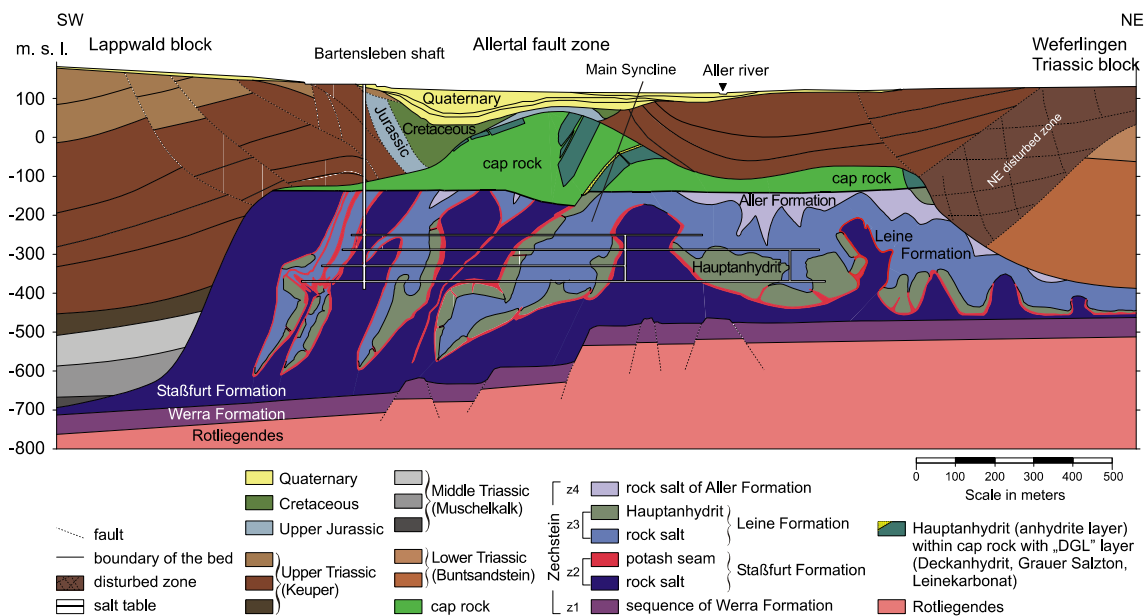
**Abb. 3** Vereinfachter geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben („Zechstein“). Die Endlagerung radioaktiver Abfälle ist im zentralen Teil des Salzstockes in etwa 840 m Teufe vorgesehen /BGR 08/

### 2.1.3 Morsleben

In der Deutschen Demokratischen Republik wurde 1971 das ehemalige Kali- und Steinsalzbergwerk Morsleben in Sachsen-Anhalt als „Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben“ (ERAM) in Betrieb genommen. Das Endlager wurde nach der deutschen Wiedervereinigung als Bundesendlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus den alten und neuen Bundesländern zunächst weiterbetrieben. Im gesamten Einlagerungszeitraum von 1971 bis 1998 wurden im ERAM insgesamt ca. 36.753 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktive Abfälle und 6.621 umschlossene Strahlenquellen eingelagert /BFS 01/. Die endgelagerte Abfallmenge besitzt eine Gesamtaktivität von 3,8·10<sup>14</sup> Bq (Beta- und Gammastrahler) sowie 2,3·10<sup>11</sup> Bq (Alpha-Strahler) /DBE 08/. Im Jahr 1998

wurde die weitere Einlagerung im Ostfeld des ERAM per Gerichtsbeschluss zunächst untersagt. Das BfS setzte daraufhin die Annahme und die Einlagerung radioaktiver Abfälle aus. Am 21.05.1999 gab das BfS bekannt, dass die Einlagerung radioaktiver Abfälle im ERAM nicht wieder aufgenommen wird /BFS 01/. Seitdem werden die Arbeiten zur Stilllegung des Endlagers vorangetrieben. Für das erforderliche Planfeststellungsverfahren wurde ein umfangreiches Stilllegungskonzept erarbeitet /BFS 05/.

Ein geologischer Schnitt durch die Salzstruktur Allertal im Bereich des ERAM ist in Abb. 4 dargestellt. Die DDR führte während der Betriebsphase des ERAM, analog zu den FuE-Arbeiten der Bundesrepublik Deutschland im Salzbergwerk Asse, Forschungsarbeiten für die Endlagerung durch. Eine ausführlichere Darstellung über das ERAM findet sich im Anhang „Endlagerstandorte“.



**Abb. 4** Schematischer geologischer Schnitt durch die Salzstruktur Allertal im Bereich des „Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben“ (ERAM) /BRW 08/

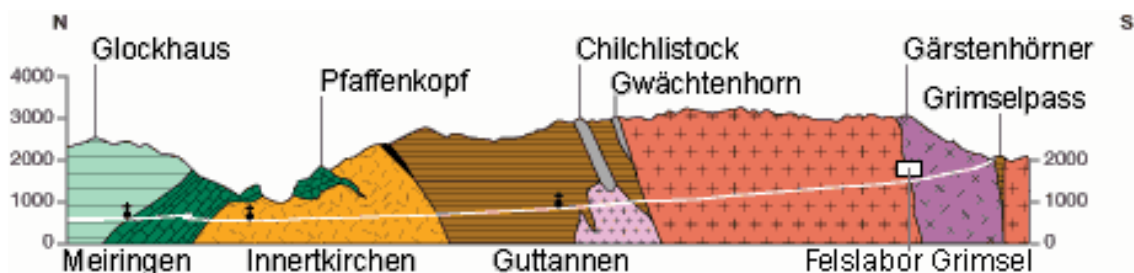
## 2.2 Untertagelabore in Kristallingesteinen

Untertagelabore in kristallinen Gesteinen dienen ebenso wie in anderen Wirtsgesteinen zum Test von Auslegung und Konstruktion eines Endlagers und von Einlagerungskonzepten. Die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Kristallin wird aber im Gegensatz zu den anderen Wirtsgesteinstypen ganz wesentlich durch technische und geotechnische

Barrieren bestimmt. Daher kommt der untertägigen Untersuchung dieses Barrierensystems („Engineered Barrier System“ - EBS) eine besondere Bedeutung zu. Untertagelabore in kristallinen Gesteinen wurden in der Schweiz, Schweden, Finnland und Kanada eingerichtet.

### 2.2.1 Felslabor Grimsel (FLG)

Das Felslabor Grimsel in der Schweiz besteht aus einem Stollensystem, das im Granit des Aare-Massivs auf einer Höhe von 1.730 m NN unter ca. 400 m Überdeckung angelegt worden ist (Abb. 5). Das rund einen Kilometer lange FLG-Stollensystem zweigt von einem Kraftwerksstollen ab und wurde 1983 mit einer Vollschnittmaschine mit 3,50 m Durchmesser aufgeföhren.



**Abb. 5** Geologische Gesamtsituation in der Umgebung des Felslabors Grimsel anhand eines geologisch-tektonischen Profils entlang der Grimselstraße (rot = Aare-Granit, violett = Grimsel-Granodiorit) /NAG 08a/

In den ersten Jahren lagen die Forschungsschwerpunkte auf folgenden Gebieten:

- Ermittlung der Auflockerung des Gebirges um neu aufgefahrne Strecken, die im Bohr- und Sprengverfahren erstellt wurden,
- Bestimmung der Rückhaltewirkung der Sicherheitsbarrieren für radioaktive Elemente,
- Erkundung ausgedehnter Gebirgsbereiche mittels geophysikalischer Methoden,
- Verfahren zur Bohrlochversiegelung,
- Untersuchung von Temperatureffekten auf das Wirtsgestein mit einem Erhitzer-test,

- Ermittlung der sogenannten „Makropermeabilität“ des Wirtsgesteins (integraler Wert über Bereiche mit ungestörter Gesteinsmatrix und Klufzonen) mit einem Ventilationstest.

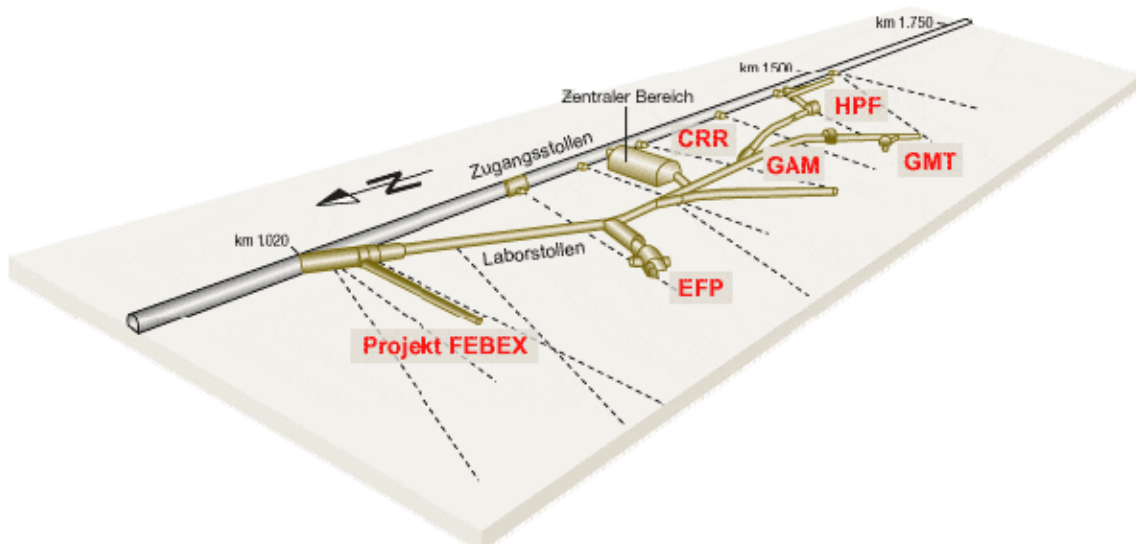
Der Ventilationstest im FLG (Abb. 6) war aufgrund seiner Auslegung eine wichtige Weiterentwicklung im Vergleich mit vorangegangenen Versuchen. Durch die gebirgsschonende Auffahrung des ca. 70 m langen Teststollens mit einer Tunnelfräse im Vollschnittverfahren wurde die bergbaubedingte Beeinträchtigung des umgebenden Gebirges minimiert. Die Einhaltung eines fast vollkommenen kreisförmigen Profilquerschnitts (Durchmesser 3,50 m) resultierte in einfachen geometrischen Verhältnissen, was die Interpretation der Messergebnisse erleichterte. Auch die Verwendung flexibler und versetzbarer Bergwerkskissen zur Abschottung des eigentlichen Testbereiches war eine technische Weiterentwicklung im Vergleich mit der Abschlussmauer, die in der Wetterteststrecke der Schachanlage Konrad eingebaut wurde (siehe Kap. 2.3.5). Dadurch war es möglich, unterschiedliche Gebirgsbereiche (beispielsweise mit unterschiedlicher Klufverteilung) separat zu testen.

Die Druckverteilung im Gebirge wurde bei diesem Test in zwei streckenparallelen Bohrungen gemessen. In Verbindung mit hydraulischen Modellrechnungen konnte der mehr oder weniger stationäre Wasseraustrag in den Versuchsstollen auf ein räumlich begrenztes Kluftsystem mit einer hydraulischen Leitfähigkeit zwischen  $2 \cdot 10^{-10}$  m/s und  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s zurückgeführt werden, das aus einer umgebenden Gesteinsmatrix (Grimsel-Granodiorit) gespeist wird. Mit Überschlagsrechnungen (als „Pumpversuch nach Thiem“) wurde bereits vorlaufend ein integraler Wert der hydraulischen Gebirgsdurchlässigkeit im Versuchsstollen von ca.  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s ermittelt. Die Matrixdurchlässigkeit des Granodiorits ist demgegenüber deutlich geringer (ca.  $5 \cdot 10^{-12}$  m/s bei Laboruntersuchungen an Bohrkernproben). Die Ergebnisse des Ventilationstests zeigten, dass die Wasserbewegung im Gebirgsmassiv im Wesentlichen an Klüfte gebunden ist /BRA 87/.

Mittlerweile konzentrieren sich die Forschungsarbeiten im FLG auf Versuche, welche die Umsetzung der Endlagerkonzepte widerspiegeln /KIC 02b/. Zweck dieser Versuche ist es, das Verhalten des gesamten Endlagerlagersystems zu studieren, die technischen Abläufe zu optimieren und deren Sicherheit zu dokumentieren. Die gegenwärtige Untersuchungsphase VI ist für den Zeitraum 2003 - 2013 konzipiert. Die aktuellen Versuchsorte im FLG sind in Abb. 7 dargestellt.



**Abb. 6** Aufbau des Ventilationstests im Felslabor Grimsel zur Ermittlung des Gebirgsfeuchteintrags in einen abgedichteten Streckenabschnitt. Der eigentliche Messabschnitt ist durch ein Bergwerksskissen vom übrigen Stollensystem abgedichtet. Vorn die Klimaanlage zur Auskondensierung der im abgedichteten Streckenabschnitt aufgenommenen Feuchte



**Abb. 7** Stollensystem des FLG mit den aktuellen Versuchsorten (Abkürzungen siehe Text) /NAG 08b/

An diesen Versuchsorten werden derzeit folgende Forschungsprojekte durchgeführt:

- Bestimmung großräumiger Gesteinseigenschaften (EFP),
- Einfluss von Kolloiden auf den Transport radioaktiver Substanzen (CFR),
- Gasmigration in Scherzonen (GAM),
- „Hoch-pH-Fahne“ in geklüftetem Gestein (HPF),
- Gastransport durch technische Barrieren und angrenzendes Gestein (GMT),
- 1:1 - Demonstrationsversuch des spanischen Einlagerungskonzeptes für hoch-radioaktive Abfälle (FEBEX).

Die Auffahrung des FEBEX-Stollens mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine ist in Abb. 8 dargestellt.



**Abb. 8** Tunnelbohrmaschine für den FEBEX-Stollen (Durchmesser: 2,3 m)  
/NAG 08c/

Das unter der Leitung der spanischen „Empresa Nacional de Residuos Radiactivos“ (ENRESA) durchgeführte FEBEX-Experiment hatte folgende Ziele:

- Demonstration der Durchführbarkeit von Bau und Handhabung einer geotechnischen Barriere („Puffer“) aus hochkompaktiertem Bentonit einschließlich industrieller Fertigung, Qualitätssicherung und Überwachung,
- Untersuchung der thermisch-hydraulisch-mechanischen Prozesse im Nahfeld, insbesondere im Puffer, und Entwicklung und Validierung von Rechenprogrammen und Stoffgesetzen zur Simulation,
- Identifikation und Modellierung von Veränderungen des Puffers, einschließlich Gasfreisetzung und -transport.

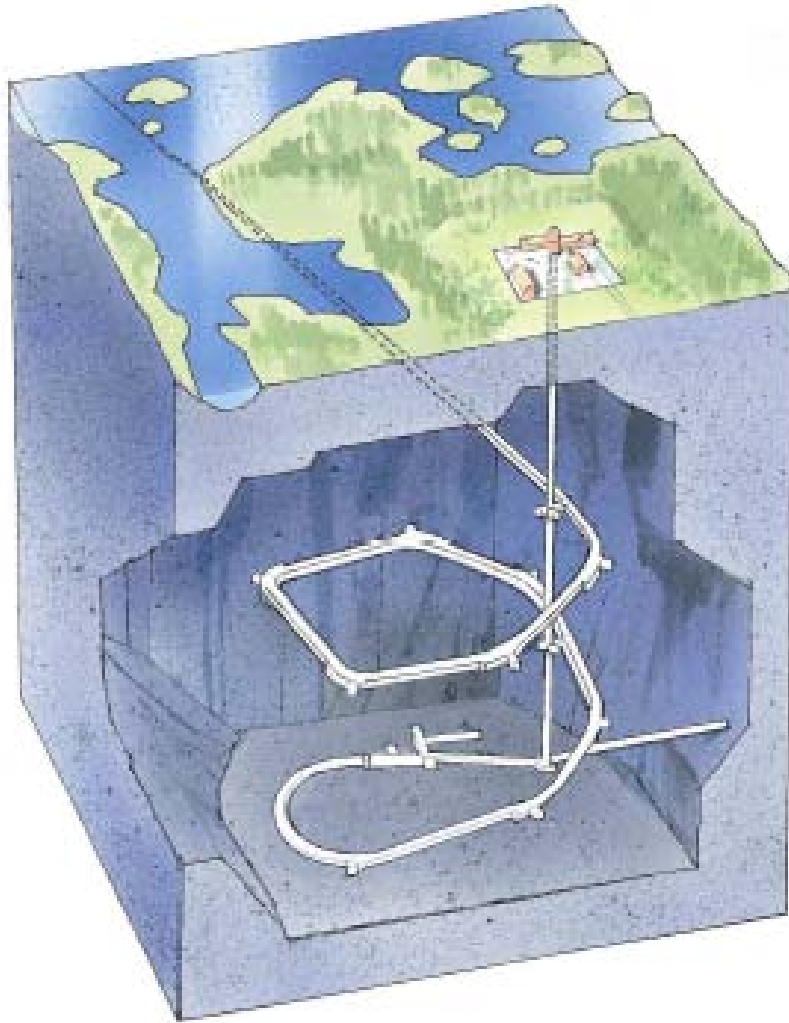
Ziel der deutschen Beteiligung am FLG ist es, die Kenntnisse über andere Wirtsgesteinsformationen (hier: Granit) sowie über tonhaltige Dichtmaterialien zu erweitern. Die beteiligten deutschen Institutionen sind BGR, FZK und GRS.

### **2.2.2 Äspo Hard Rock Laboratory (HRL)**

Im September 1986 stellte die schwedische Firma SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) ihr erstes Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprogramm (SKB RD&D) vor, das auf dem neuen schwedischen Gesetz zu nuklearen Aktivitäten basierte. Ein wesentlicher Programmpunkt waren die Planungen für ein Untertagelabor.

Hauptzwecke dieses UTL sind die Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in einer für ein zukünftiges Endlager realistischen und ungestörten Gesteinsumgebung sowie die Demonstration der Funktion von Systemkomponenten und Einlage- rungstechniken. Dies umfasst auch eine intensive gesteinsmechanische und hydrogeologische Charakterisierung des Wirtsgesteins.

Im Jahr 1988 erfolgte die Festlegung auf den Standort Äspö. Der offizielle Name des UTL lautet „Äspö Hard Rock Laboratory“ (HRL). Der Standort liegt in einem ca. 1,7 Milliarden Jahre alten granitischen Gestein. Die Auffahrung des Stollensystems begann im Oktober 1990. Das Äspö HRL besteht aus einem etwa 3.600 m langen geneigten Tunnel, der wendelförmig bis zu einer Tiefe von 460 m führt (Abb. 9).



**Abb. 9** Das schwedische Untertagelabor Äspö HRL /SKB 08/

Spezifische Ziele des Äspö HRL sind /SKB 96/:

- Test und Entwicklung von Methoden und Techniken vor deren Einsatz an einem realen Standort (inklusive Standortcharakterisierung, Konstruktions- und Handhabungsmethoden sowie einem Langzeit-Pilot-Test für Teilbereiche des Endlagers),
- Entwicklung der geowissenschaftlichen Forschung von generischer Forschung zu einem standortspezifischen Verständnis.

Zu Beginn des Untersuchungsprogramms wurde festgelegt, dass die Nutzung des Untertagelabors nur für Forschungszwecke erfolgt, d. h. keine zukünftige Umwandlung in ein Endlager vorgenommen wird.



Im Äspö HRL werden verschiedene Experimente zum Nachweis der Wirksamkeit der Barrieren eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen durchgeführt. Das UTL dient auch als Endlager-Prototyp für das KBS-3V-Konzept, das die Einlagerung von in hochkompaktiertem Bentonit eingebetteten HAW-Behältern in Strecken vorsieht sowie zur Erprobung und Überprüfung von Verfüll- und Verschlusskonzepten. Im Rahmen des Projektes „Prototype Repository“ erfolgt eine 1:1-Simulation der Lagerung von HAW-Behältern in vertikalen Bohrlöchern.

Die Planung für den Zeitraum von 1987 bis 2010 umfasst die folgenden Punkte:

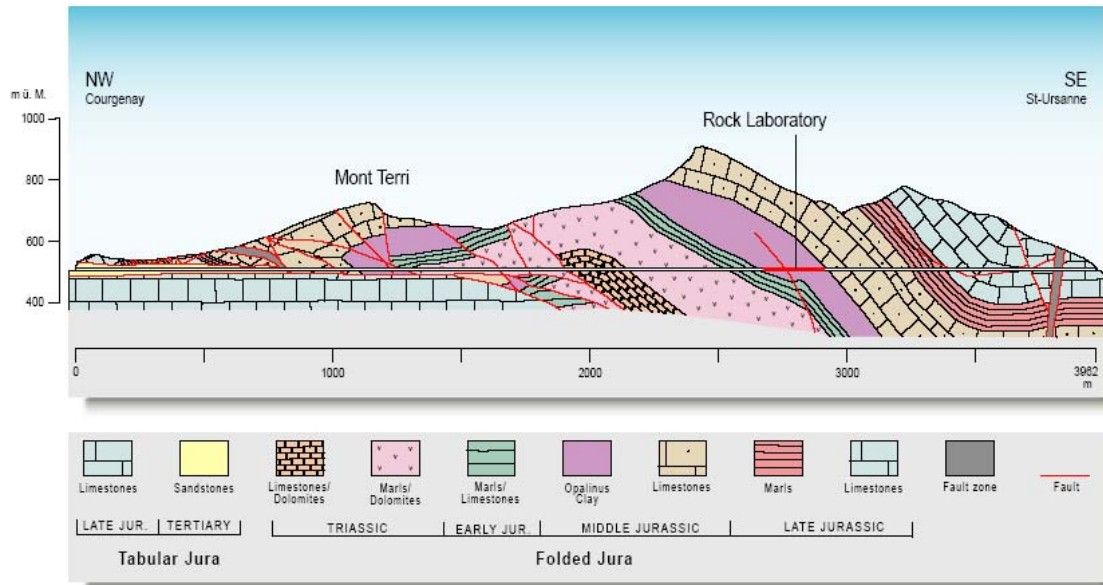
- Detaillierte Untersuchung der natürlichen Barriere in Hinblick auf ihre Wirksamkeit,
- In situ-Tests zu den Wechselwirkungen zwischen natürlichen Barrieren,
- Entwicklung von Methoden zur technischen Umsetzung mit begleitendem Qualitätsmanagementsystem,
- Demonstration der Systemkomponenten, Techniken und Qualitätssicherung.

Ziel der deutschen Beteiligung am Äspö HRL ist es, die Kenntnisse über andere Wirtsgesteinstypen zu erweitern. Die Mitarbeit dient insbesondere zur Vertiefung des Verständnisses der in einem Endlager in kristallinem Gestein (Granit) ablaufenden Prozesse, wobei die Wechselwirkung mit tonhaltigen Verschluss- und Versatzmaterialien von besonderem Interesse ist. Die beteiligten deutschen Forschungsinstitutionen sind BGR, FZK, FZR, GRS und TU Clausthal.

### **2.3 Untertagelabore in Tongestein**

#### **2.3.1 Felslabor Mont Terri**

Im schweizerischen Felslabor Mont Terri im Kanton Jura wird unter der Leitung des Schweizerischen Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) ein internationales Forschungsprojekt durchgeführt. Das Felslabor liegt im Faltenjura rund 300 m unter der Erdoberfläche (Abb. 10). Im Bereich eines Sondierstollens für den Mont-Terri-Autobahntunnel (Abb. 11) wird hier der Opalinuston des Mittleren Doggers auf seine Eignung als Wirtsgestein untersucht. Der Bau des Autobahntunnels erfolgte zwischen 1987 und 1993. Das Forschungsprojekt Mont Terri wurde 1996 gestartet.

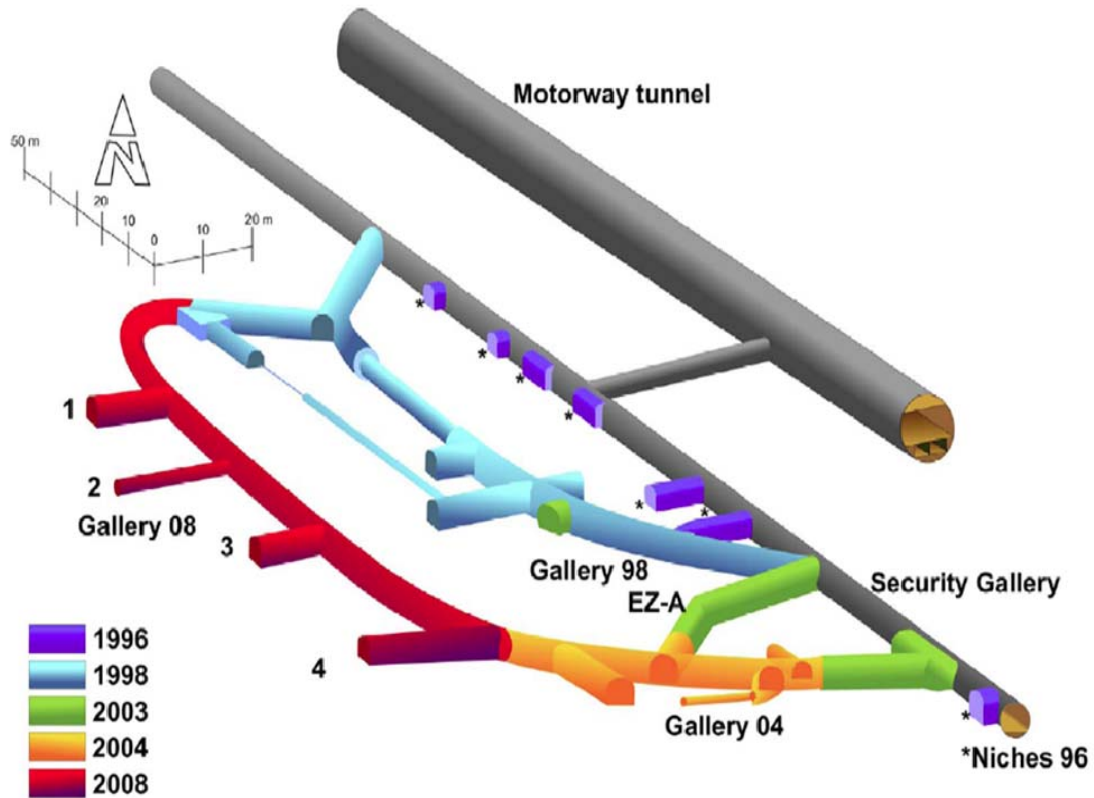


**Abb. 10** Geologisches Profil durch das Felslabor Mont Terri /MTP 08a/

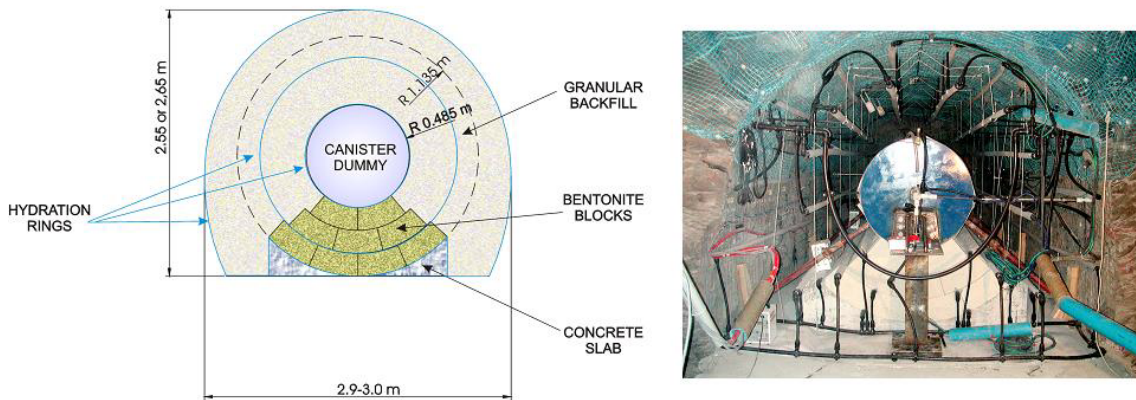
In verschiedenen Strecken und Nischen des Felslabors werden Experimente zur gesteinsmechanischen, gebirgsmechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Charakterisierung des Opalinustons durchgeführt /THU 02/. Darüber hinaus wird das Verhalten technischer Barrieren untersucht. Die Ergebnisse dienen zur Beurteilung der Machbarkeit und Sicherheit geologischer Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (insbesondere im Opalinuston).

Die verschiedenen Experimente haben folgende Zielrichtungen:

- Bewertung unterschiedlicher Techniken und Methoden zur Hohlraumerstellung und zur Messung von Gebirgseigenschaften und -verhalten,
- Charakterisierung der Tonformation „Opalinuston“,
- Untersuchung der Gebirgsstabilität und der Auflockerungszone um neu aufgefahrene Stollen,
- Demonstrationsexperimente zu Einlagerungskonzepten.



**Abb. 11** Lage und Ausbaustufen des Felslabors Mont Terri, das vom Sicherheitsstollen des Mont-Terri-Autobahntunnels abzweigt /MTP 08b/



**Abb. 12** Felslabor Mont Terri, Auslegung des EB-Experiments; Versuchsschema (links) und Behälter-Dummies auf einer Unterlage aus kompaktiertem Bentonit vor der Verfüllung der Strecke mit granularem Bentonit (rechts) /MTP 08c/

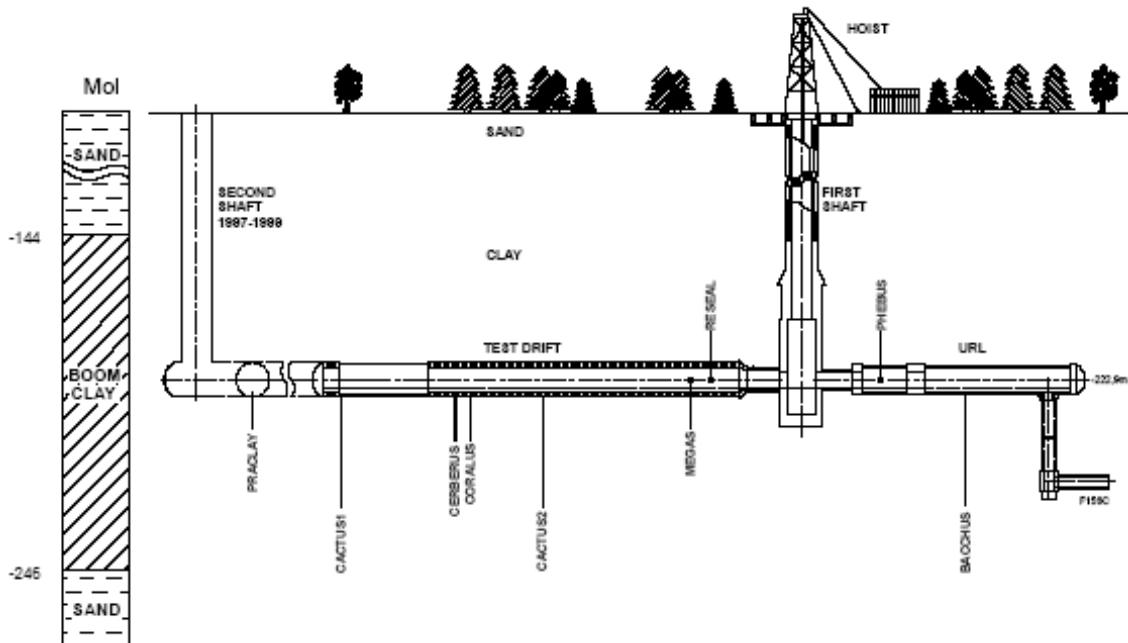
Die wichtigsten durchgeführten Experimente sind nachfolgend aufgelistet:

- Erhitzertest (Heater Experiment, HE-B):  
Aufheizversuch in einem senkrechten Bohrloch in Tongestein zur Ermittlung der Reaktion des Tonsteins auf thermische Beanspruchung und der Wechselwirkungen zwischen tonigem Verfüll-/Buffer-Material sowie zur Validierung gekoppelter Rechencodes.
- Erhitzertest (Heater Experiment, HE-D):  
Aufheizversuch in einem horizontalen Bohrloch in Tongestein zur Ermittlung der Reaktion des Tonsteins und des Porenwasserdrucks auf Wärmeeintrag, zur Untersuchung der Gasmigration sowie zur Validierung gekoppelter Rechencodes.
- Technische Barriere (Engineered Barrier Experiment, EB):  
1:1-Demonstrationsversuch zur Einlagerung eines Abfallbehälters und zum hydraulischen Verhalten eines Verfüllmaterials, das aus einer Mischung von kompaktierten Bentonitblöcken und granularem Bentonit besteht (Abb. 12). Dieser Versuch dient in erster Linie zum Nachweis der Machbarkeit und Wirksamkeit dieser Art von Tonbarriere.
- Ventilationstest (Ventilation Experiment, VE):  
Versuch zur Untersuchung des Einflusses von Austrocknungs- und Befeuchtungsphasen auf das Wirtsgestein in der Umgebung eines Einlagerungsstollens sowie zur Ermittlung der Makropermeabilität und des hydromechanischen Verhaltens von Tonstein (siehe Schachanlage Konrad und Felslabor Grimsel).
- Untersuchungen zur Gasausbreitung in der Auflockerungszone und im ungestörten Tonstein (HG-A, HG-B, HG-C/BET).
- Untersuchungen zur Eignung von Ton-Sand-Gemischen als Buffermaterial (SB).

Ziel der deutschen Beteiligung ist es, ergänzend zu den Forschungsarbeiten zum Wirtsgestein Steinsalz, die Kenntnisse über Ton als Wirtsgesteinsformation für Endlager zu erweitern. Die beteiligten deutschen Institutionen sind BGR und GRS. Die Arbeiten im Mont Terri URL sind auch deshalb von besonderem Interesse, weil der hier herrschende Gebirgsspannungszustand weitgehend vergleichbar ist mit dem in einer Referenzteufe, die für ein deutsches Endlager in Tongestein als günstig eingeschätzt wird.

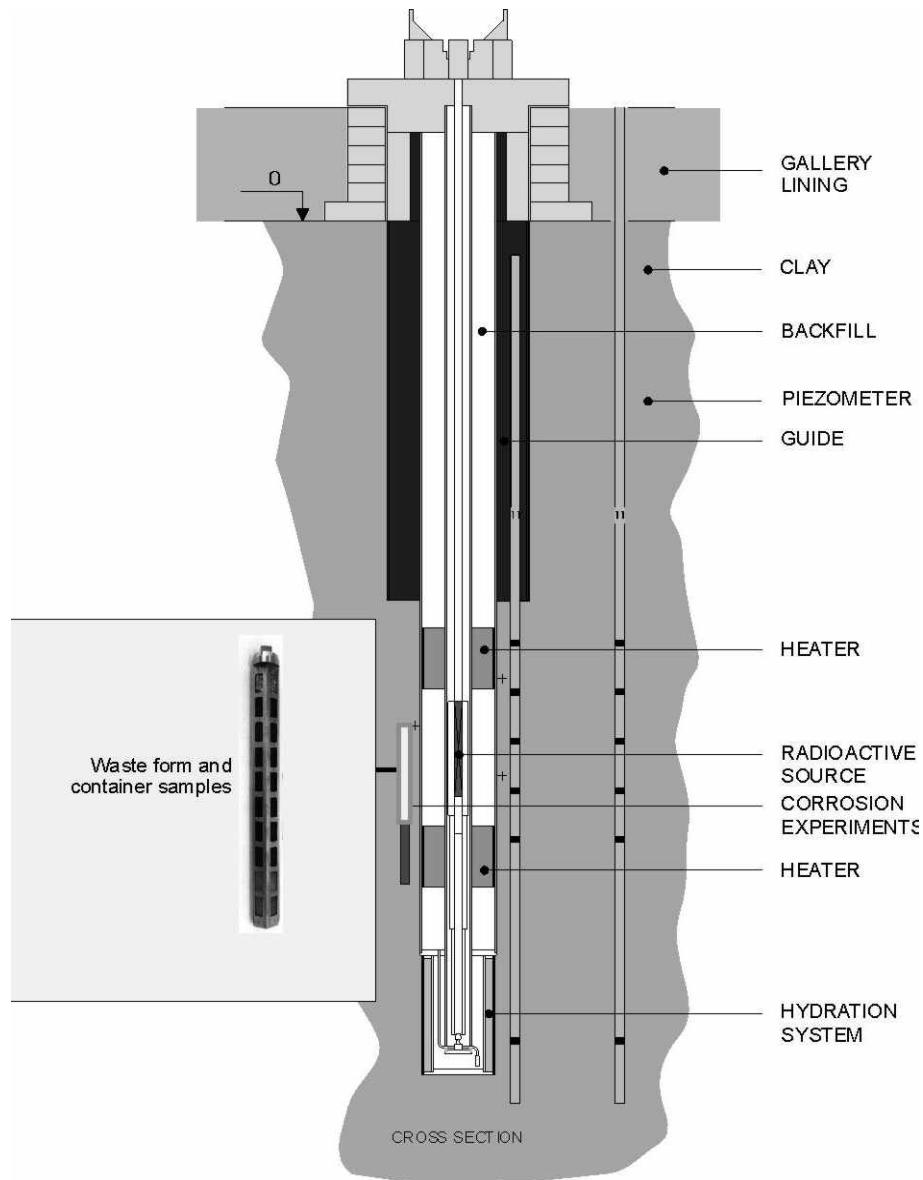
### 2.3.2 Underground Research Facility Mol (URF)

Das URF in Mol (HADES) liegt im Campine-Becken (Nordost-Belgien) unter dem Gelände des Kernforschungszentrums SCK•CEN Mol. Geologisch befindet sich das Untertagelabor im so genannten Boom-Ton, der stratigraphisch zum Unteroligozän (Tertiär) gehört (Abb. 13).



**Abb. 13** Schematische Darstellung des Untertagelabors HADES mit Lokation der wichtigsten Experimente und vereinfachtem geologischen Profil (links) /IAE 01/

Mit dem Bau des UTL wurde im Jahr 1980 begonnen. Die ersten Versuche wurden 1985 in einer Tiefe von 223 m durchgeführt und hatten zunächst die Untersuchung des Verhaltens unterschiedlicher Materialien im Wirtsgestein Ton zum Ziel (Korrosionsversuche mit Behälterkomponenten, Hydratation von Verfüllmaterialien). Weitere Experimente dienten der Charakterisierung des Wirtsgesteins und der Untersuchung von Prozessen wie der Migration von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen), dem thermo-hydro-mechanischen Verhalten von plastischem Ton und der Auswirkungen von Wärme und Gammastrahlung auf das Wirtsgestein und das Verfüllmaterial (CERBERUS, siehe Abb. 14).



**Abb. 14** Auslegung des CERBERUS-Versuchs im URF Mol; das Experiment dient zur Untersuchung gekoppelter THMC-Prozesse /OND 01/

Nach dem Abteufen eines zweiten Schachtes (1999) und der Herstellung einer Verbindungsstrecke zwischen den beiden Schächten ist in einem Seitenstollen des URF die Durchführung des 1:1-Demonstrationsexperimentes PRACLAY (Preliminary Demonstration Test for CLAY Disposal of Highly Radioactive Waste) geplant. Dieser Versuch wird von der 1995 - zunächst unter dem Namen EIG PRACLAY - gegründeten EIG EURIDICE (European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in Clay Environment) durchgeführt. Diese EIG (Economic Interest Grouping) ist ein Verbund von ONDRAF/NIRAS und SCK•CEN mit folgenden Aufgaben:

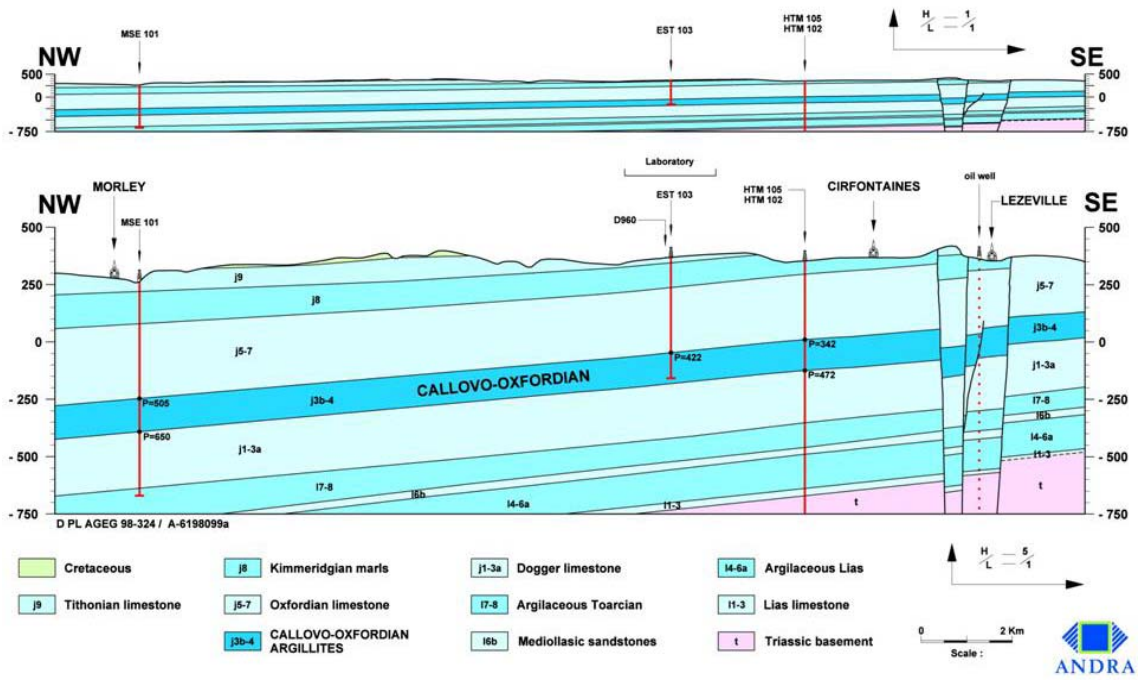
- Studien zur Durchführbarkeit der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Tonformationen,
- Betrieb und Ausbau des Untertagelabors HADES,
- Durchführung des PRACLAY-Experiments, ein integrierter 1:1-Demonstrationsversuch in situ zum belgischen Endlagerkonzept,
- Initiierung internationaler Zusammenarbeit im Untertagelabor HADES.

Ziel der deutschen Beteiligung am Untertagelabor HADES ist es, in Ergänzung zu den Kenntnissen zum Wirtsgestein Steinsalz, das Wissen über andere Wirtsgesteinsformationen, insbesondere plastischen Ton, zu erweitern. Die beteiligten deutschen Institutionen sind BGR und GRS.

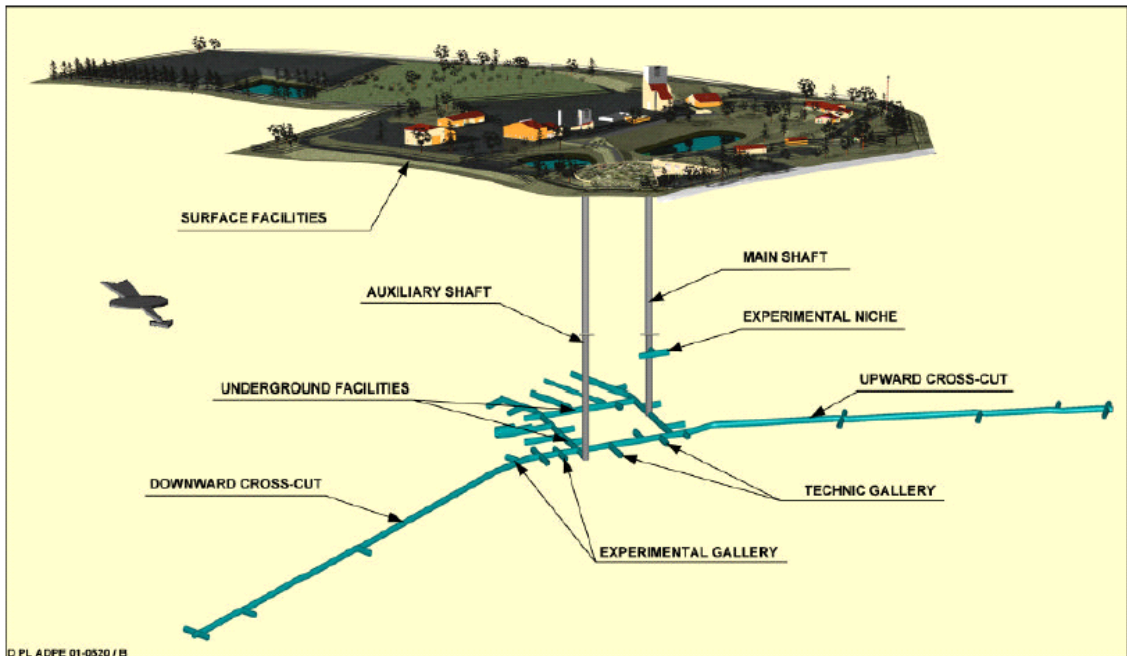
### **2.3.3 Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory (Bure)**

In Frankreich wurde mit dem am 30. Dezember 1991 verabschiedeten Gesetz „Loi No. 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL)“ der Rahmen für das FuE-Programm zur Endlagerung von hochradioaktiven und langlebigen mittelradioaktiven Abfällen in einem geologischen Endlager festgelegt und die „Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs“ (ANDRA) als unabhängige öffentliche Körperschaft für die Entsorgung dieser Abfälle gegründet. Die Einrichtung von Untertagelaboren ist ein wichtiger Bestandteil des französischen Forschungsprogramms und dient zur Evaluierung unterschiedlicher Optionen zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen mit und ohne Möglichkeit zur befristeten Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle.

Nach Voruntersuchungen an verschiedenen Standorten (Gard und Meuse/Haute-Marne für Ton, Vienne für Granit) erhielt die ANDRA im August 1999 die Genehmigung zum Bau des Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory an der Grenze zwischen den Departements Meuse und Haute-Marne in Ostfrankreich. Das nahe der Ortschaft Bure gelegene Untertagelabor befindet sich in Tonen bzw. Tonsteinen des Mittleren bis Oberen Jura (Callovium - Oxfordium), die sehr homogen aufgebaut sind (Abb. 15). Typisch ist das Fehlen von Störungen und Klüften im Bereich des UTL /AND 05/. Bei der Standorterkundung wurde für die Tone eine hydraulische Leitfähigkeit im Bereich von  $10^{-12}$  -  $10^{-14}$  m/s ermittelt /DIS 05/.

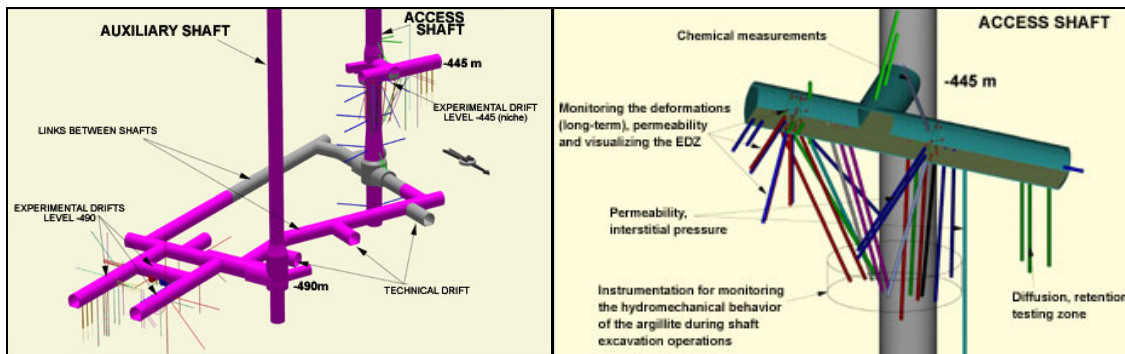


**Abb. 15** Geologischer Querschnitt durch die Schichtenabfolge am Standort Bure /AND 01/



**Abb. 16** Das Untertagelabor Meuse/Haute-Marne bei Bure /AND 03/





**Abb. 17** Bereiche mit den Versuchsstrecken auf der 445-m-Sohle und der 490-m-Sohle im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne (Bure) /AND 01/

Mit dem Bau des Untertagelabors wurde im November 1999 begonnen. Das UTL besteht aus zwei Tagesschächten, einer Versuchsstrecke in 445 m Tiefe sowie einem Streckensystem mit weiteren Versuchsstrecken in 490 m Tiefe (Abb. 16). Die Bereiche mit den Versuchsstrecken auf der 445-m-Sohle und der 490-m-Sohle sind in Abb. 17 im Detail dargestellt.

Die Forschungsarbeiten im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne konzentrieren sich auf folgende grundsätzliche Fragestellungen:

- Charakterisierung der Barriereigenschaften des Tonsteins mit Hilfe von in situ-Experimenten (Permeabilität, Diffusion, Sorption),
- Beeinträchtigung der Barriereigenschaften durch Errichtung und Betrieb eines Endlagers,
- Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen potenziellen Endlagerstandort.

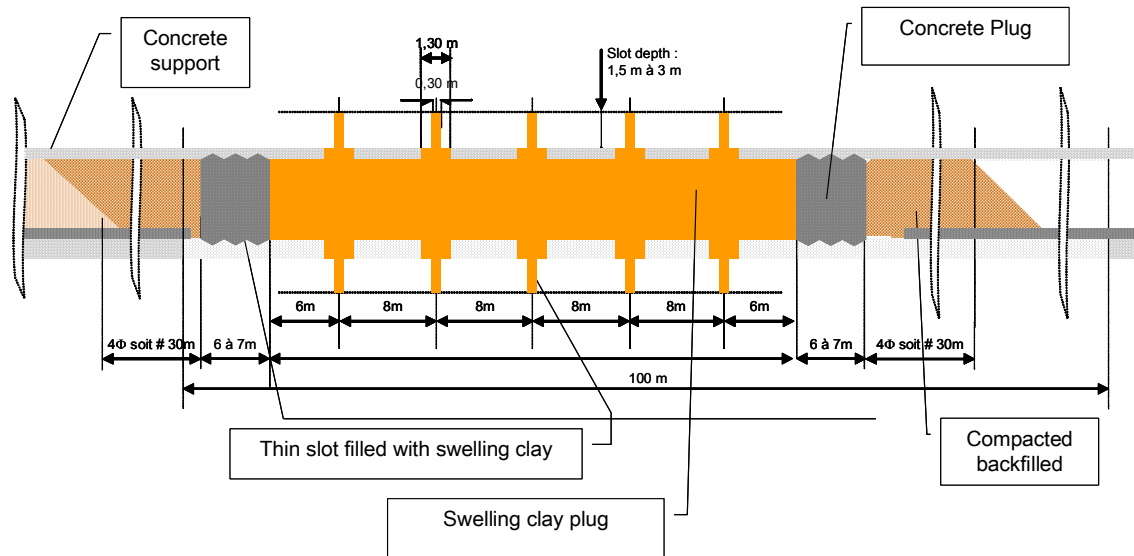
Die wichtigsten Experimente, die im Rahmen des wissenschaftlichen Untersuchungsprogrammes durchgeführt werden, sind im Folgenden aufgeführt:

- SUP-Experiment: Überwachung des Schachtabteufens (geologische Aufnahme, geomechanisches Verhalten, Probenahmen),
- SUG-Experiment: Überwachung aller Streckenauffahrungen (geologische Aufnahme, geomechanisches Verhalten, Probenahmen),
- REP-Experiment: Ermittlung des hydromechanischen Reaktionen des Tonsteins auf das Abteufen des Hauptschachtes,

- GIS-Experiment: geomechanische in situ-Untersuchungen (in situ-Spannungen, kurz- und mittelfristiges Verformungsverhalten des Tonsteins),
- KEY-Experiment: Machbarkeitsstudie zur Abdichtung der Auflockerungszone,
- TER-Experiment: Ermittlung der Reaktionen des Tonsteins auf thermische Belastung (hydraulische, mechanische, chemische Störungen),
- PEP-Experiment: In situ-Messungen von Permeabilität und Porenwasserdruck im Callovo-Oxford-Tonstein,
- PAC-Experiment: hydrochemische Untersuchungen und Isotopenanalysen an Porenwasserproben aus dem Callovo-Oxford-Tonstein,
- DIR-Experiment: Charakterisierung von Diffusion und Retention im Callovo-Oxford-Tonstein mit Hilfe von Tracer-Tests.

Nach dem bisherigen ANDRA-Konzept /AND 05/ werden HAW-Behälter in horizontale Mikrotunnel mit einem Durchmesser von 0,7 m und einer Länge von 40 m eingelagert. Der Resthohlraum um die Behälter wird mit kompaktierten Bentonit-Blöcken verfüllt und der Tunneleingang mit Beton abgedichtet. Zur Abdichtung von Strecken werden an geeigneten Stellen Dammbauwerke aus kompaktierten Bentonit-Blöcken konstruiert und die Resthohlräume der Strecken mit Auffahrungsrückstand verfüllt. Die Auflockerungszonen um Dammbauwerke werden in bestimmten Abständen bis in eine Tiefe von 1,5 - 3 m weggeschnitten („EDZ Cut-off“) und mit Bentonit abgedichtet. Durch diese zusätzlichen radialen Abdichtungen kann eine axiale Permeabilität in der Auflockerungszone von  $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$  erreicht werden. Abb. 18 zeigt das Konzept einer derartigen Abdichtung, deren Funktionsfähigkeit im Rahmen des KEY-Experimentes demonstriert wurde. Aufgrund der mittlerweile geforderten Rückholbarkeit werden im aktualisierten Konzept die HAW-Kokillen in verrohrte horizontale Bohrlöcher geschoben.

Mit Hilfe der bisherigen in situ-Untersuchungen konnte ein grundsätzliches Verständnis der geomechanischen Eigenschaften von Tonen und der ihr Isolationsvermögen bestimmenden Prozesse gewonnen werden. Die bisher gewonnenen Ergebnisse zeigen aber auch, dass im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager in Tonformationen eine Reihe von Punkten noch nicht abschließend geklärt ist bzw. einer Quantifizierung bedarf. Nach den Schlussfolgerungen des DOSSIER 2005 /AND 05/, wurde für das URL Bure ein neues Forschungsprogramm für die Jahre 2007 - 2011 zur Charakterisierung des THM-Verhaltens des Callovo-Oxford-Tonsteins und des Tonversatzes aufgestellt.



**Abb. 18** ANDRA-Konzept für die Abdichtung von Hauptstrecken in einem Endlager; im Bereich der Tonabdichtung zwischen den beiden Betondichtungen wird die Auflockerungszonen in bestimmten Abständen weggeschnitten und mit Bentonit abgedichtet /AND 05/

Die deutsche Beteiligung am Untertagelabor Meuse/Haute-Marne bietet die Gelegenheit, die Kenntnisse des THMC-Verhaltens von Tonstein sowie Tonversatz zu vertiefen und einen wichtigen Beitrag zur Beurteilung der Eignung von Tonformationen als Wirtsgestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu leisten. Die Ergebnisse können auch bei der Verbesserung von Prozessmodellen sowie bei der Weiterentwicklung des Instrumentariums für die Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager in Tongesteinen genutzt werden. Die beteiligten deutschen Institutionen sind BGR und GRS.

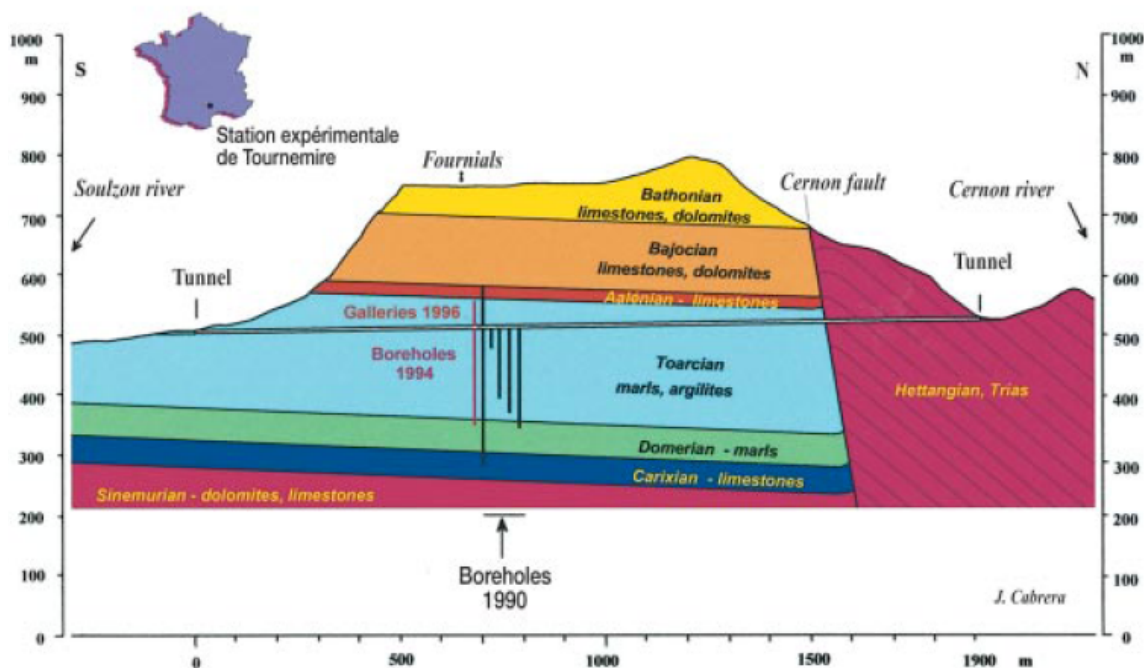
### 2.3.4 Tournemire

Seit 1990 wird vom französischen Institut de Radio-Protection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) in einem von ihm selbst betriebenen UTL ein eigenes Forschungsprogramm in einer Tonformation des Unteren Jura bei Tournemire in Südwest-Frankreich (Aveyron) durchgeführt, die von einem ehemaligen Eisenbahntunnel durchquert wird /BOI 01/.

Der Standort befindet sich in einem mesozoischen Becken am Südrand des französischen Zentralmassivs. Die einfache geologische Struktur und der Aufschluss der Tonformation durch den ca. 100 Jahre alten und 1,9 km langen stillgelegten Eisenbahn-

tunnel waren ausschlaggebend für die Standortwahl. Die geotechnischen und hydrogeologischen Bedingungen sind repräsentativ für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen, da die anstehende Tonformation ca. 240 m mächtig ist und von ca. 270 m mächtigen Kalken überlagert wird.

Die Schichten des Unteren und Mittleren Jura sind fast horizontal gelagert (Abb. 19). Die Tonformation besteht aus einer Folge von Tonen und Mergeln des Unteren Jura (Domerium - Toarcium), die einen niedrigen Wassergehalt (ca. 3 - 5 %) und eine niedrige Porosität aufweisen. Für die hydraulische Durchlässigkeit wurden im Labor Werte von  $10^{-14}$  -  $10^{-13}$  m/s und mit in situ-Messungen von  $10^{-13}$  -  $10^{-11}$  m/s ermittelt /BOI 01/. Die Strömung erfolgt im Wesentlichen diffusiv. Die Tonformation wird von zwei Aquiferen eingeschlossen. Der obere Aquifer besteht aus Kalken und Dolomiten des Mittleren Jura (Aalenium - Bathonium). Der untere Aquifer im Liegenden der Tonformation ist gespannt und wird aus Kalken des Unteren Jura (Hettangium - Carixium) aufgebaut.



**Abb. 19** Geologischer Schnitt durch den als UTL genutzten stillgelegten Eisenbahntunnel bei Tournemire /CAB 02/

Der Untersuchungsbereich wurde durch Bohrlöcher und zwei Forschungsstrecken erschlossen (Abb. 19). Diese dienten zur Erkundung des geologischen und hydrogeologischen Aufbaus der Tonformation, der Gewinnung von Proben für Laboruntersuchun-

gen sowie zur Durchführung geophysikalischer und hydrogeologischer in situ-Messungen.

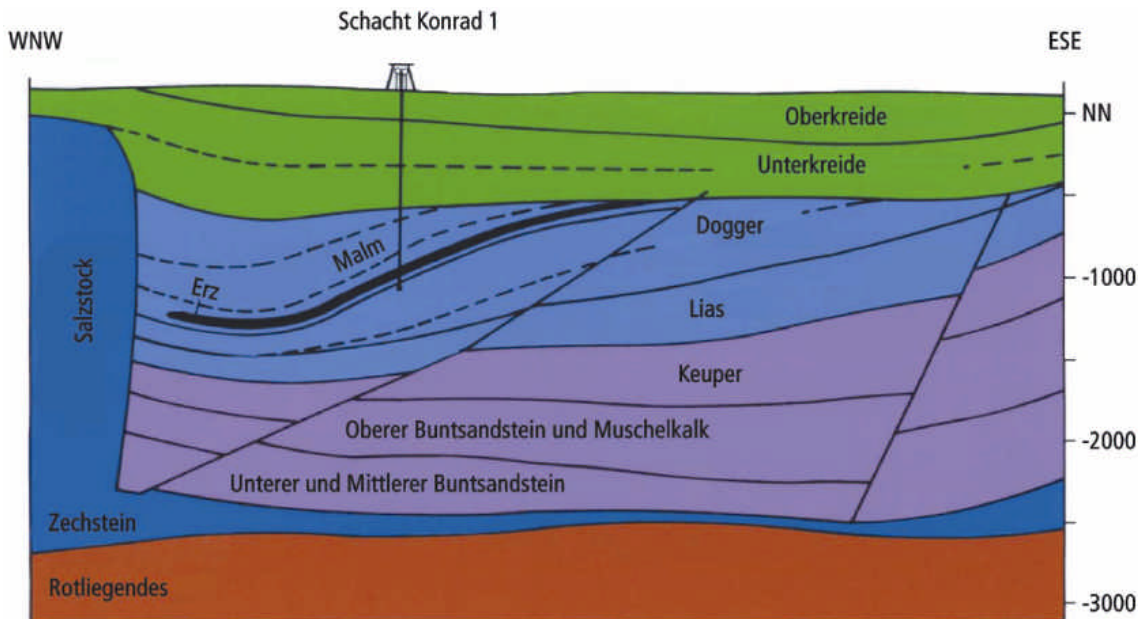
Das UTL ist speziell auf Untersuchungen zu folgenden Aufgabenstellungen ausgerichtet:

- Test und Eignungsnachweis von Messinstrumenten unter realen Standortbedingungen,
- Charakterisierung der Gesteinseigenschaften durch in situ-Messungen,
- Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Tonen mit geringem Wassergehalt,
- Ermittlung des thermomechanischen Verhaltens von Tonen und dessen Einflusses auf die hydraulischen Parameter.

### **2.3.5 Schachtanlage Konrad**

Die Schachtanlage Konrad besitzt insofern einen Sonderstatus, als es sich bei dem genutzten Wirtsgestein um einen Eisenerzhorizont handelt. Die oolithischen Eisenerze des Korallenooliths wurden im Oberen Jura (Malm) in küstennahen Bereichen abgelaagert. Die eigentliche geologische Barriere wird durch eine mehrere hundert Meter mächtige Folge von Kreidetonen gebildet, die den Eisenerzhorizont überlagern (Abb. 20). Bereits seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wurden im Raum Salzgitter Eisenerze abgebaut. In der Schachtanlage Konrad wurde elf Jahre lang, von 1965 bis 1976, Eisenerz gefördert. 1976 wurde der Abbau aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt.

Die Schachtanlage Konrad nimmt unter den Eisenerzbergwerken im Raum Salzgitter eine Sonderstellung ein, da sie erst relativ spät errichtet wurde und der Abbau im Korallenoolith in Teufen zwischen 900 und 1.300 m erfolgte. Aufgrund der wasserundurchlässigen Tone im Hangenden ist die Grube sehr trocken, so dass sie als Standort für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage kam.



**Abb. 20** Geologischer Schnitt durch die Schachtanlage Konrad /KÜH 07/

Nach der Einstellung des Eisenerzbergbaus wurde daher die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH (GSF) (heute: Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, HMGU) vom Bund mit der Durchführung eines wissenschaftlichen Erkundungs- und Untersuchungsprogrammes beauftragt. Von 1976 bis 1982 wurden geologische Bohrungen, seismische Messungen und geotechnische Untersuchungen durchgeführt sowie in ausgewählten Strecken und Abschnitten spezielle Untersuchungsverfahren entwickelt und getestet (z. B. ein Ventilationsstest). Insofern diente die Schachtanlage Konrad vorübergehend als Untertagelabor.

Folgende Fragestellungen standen im Vordergrund der Forschungsarbeiten und der über- und untertägigen Erkundung:

- Aufbau der Erzlagerstätte sowie ihrer Liegend- und Hangendschichten, großräumiger geologischer Bau,
- Hydrogeologische Verhältnisse von Jura, Kreide und Quartär sowie hydrochemische Verhältnisse in den Grundwasserleitern,
- Barriereigenschaften der geologischen Formationen hinsichtlich der Ausbreitung von Radionukliden (Durchlässigkeit, Sorptionsverhalten),
- Gebirgsmechanische Verhältnisse in der Umgebung von Kammern und Strecken sowie im gesamten Grubengebäude,

- Seismische Stabilität des Standortes,
- Ausbreitungsverhalten von Radionukliden in der Betriebs- und Nachbetriebsphase bei bestimmungsgemäßem Betrieb sowie bei Störfällen (Sicherheitsanalyse).

Das Erkundungsprogramm ergab, dass die Eisenerzlagerstätte aufgrund ihrer Tiefenlage und ihrer weitreichenden Abdichtung gegen oberflächennahe Grundwässer durch die mächtigen Ton- und Mergelsteine der Unter- und Oberkreide gute Voraussetzungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung aufweist. Auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse wurde am 31. August 1982 das atomrechtliche Planfeststellungsverfahren zum Bau eines Endlagers eingeleitet. In den folgenden Jahren von 1983 bis 1990 wurde der Standort systematisch weiter erkundet und der Sicherheitsbericht "Plan Konrad" erarbeitet. Dieser wurde 1991 öffentlich ausgelegt. Die vorgebrachten Einwendungen wurden von September 1992 bis März 1993 erörtert. Bis 1998 wurde von der Planfeststellungsbehörde, dem Niedersächsischen Umweltministerium (NMU), der Entwurf eines Planfeststellungsbeschlusses erstellt.

Am 22. Mai 2002 wurde der Planfeststellungsbeschluss für die Umrüstung und den Betrieb der Schachanlage Konrad als Endlager für radioaktive Abfälle erteilt. Mit den Umrüstungsarbeiten konnte jedoch erst begonnen werden, nachdem das Obergericht Lüneburg die anhängigen Klagen gegen den Planfeststellungsbeschluss am 08. März 2006 endgültig zurückgewiesen hatte.

### **Ventilationstest in der Schachanlage Konrad**

Bei einem Endlager nehmen natürliche Barrieren, wie sie geringdurchlässige geologische Formationen darstellen, eine wesentliche Schutzfunktion wahr. Zur Quantifizierung der hydraulischen Eigenschaften von gering durchlässigen Schichten war die Entwicklung eines speziellen in situ-Verfahrens erforderlich, da herkömmliche Verfahren (z. B. Pumptests) auf die Untersuchung durchlässiger Gesteinsschichten ausgelegt sind und Laboruntersuchungen lediglich punktuelle Aussagen erlauben. Aus diesem Grund wurde in der Schachanlage Konrad der so genannte Ventilationstest weiterentwickelt (Abb. 21).

Das Prinzip des Ventilationstests besteht darin, die in einen vom übrigen Grubengebäude abgeschlossenen Streckenabschnitt zutretende Gebirgsfeuchte zu bestimmen. Hierzu wird in einem geschlossenen Kreislauf trockene Luft in die Teststrecke eingeleitet. Diese Luft wird nach Aufsättigung durch zutretende Gebirgsfeuchtigkeit wieder aus der Strecke geleitet und die aufgenommene Feuchtigkeit in einer Kühlfalle auskondensiert (Abb. 22). Die Teststrecke wirkt dabei als Drucksenke. Der Ventilationstest ist also vom Prinzip her mit einem „herkömmlichen“ Pumpversuch vergleichbar. Bei Kenntnis der hydraulischen Druckverteilung im umgebenden Gebirge lassen sich mit einer Quantifizierung der auskondensierten Feuchtemenge bereits einfache Berechnungen der Gebirgsdurchlässigkeit durchführen.



**Abb. 21** Der Ventilationstest in der Schachtanlage Konrad zur Ermittlung des Gebirgsfeuchteeintrags in einen abgedichteten Streckenabschnitt



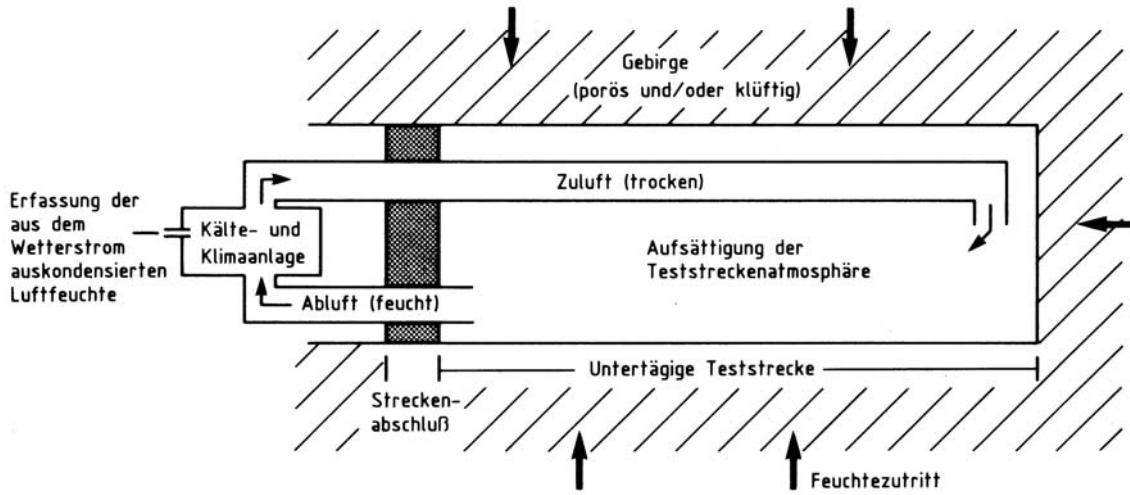


Abb. 22 Prinzipskizze des Ventilationstests in der Schachtanlage Konrad

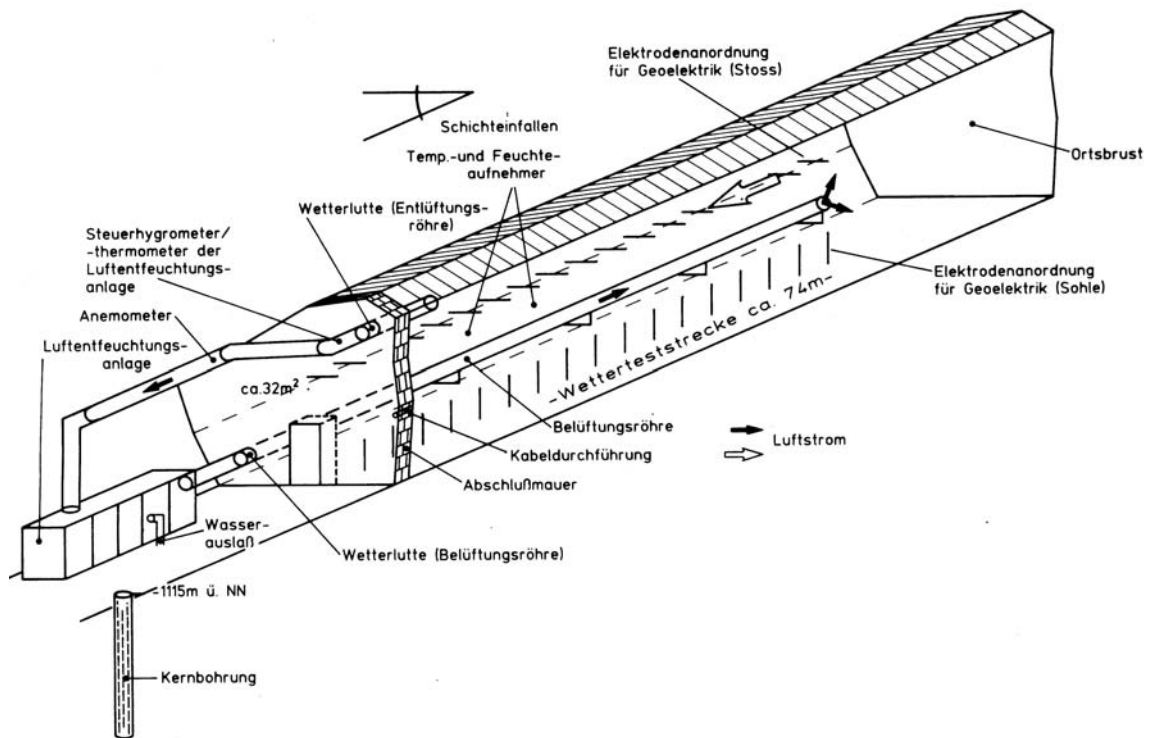


Abb. 23 Ventilationstest in der Schachtanlage Konrad - Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau des Ventilationstests in der Schachanlage Konrad ist in Abb. 23 dargestellt. Der Versuchsort befindet sich im Unteren Korallenoolith, der aus oolithischen Erzlagern mit zwischengelagerten Ton-Mergelsteinen aufgebaut wird. Aufgrund der über- und unterlagernden Tonsteine war letztlich nur ein etwa 12 m mächtiges Erzlager für die Betrachtung der Fluidtransportvorgänge von Bedeutung. Die Interpretation der Messergebnisse wurde durch den Umstand erschwert, dass für das umgebende Gebirge keine Porenwasserdrücke ermittelt werden konnten. Mit Hilfe begleitender Modellrechnungen konnten aber hydraulische Leitfähigkeiten im Bereich zwischen  $10^{-9}$  und  $10^{-10}$  m/s ermittelt werden, die ca. 1 - 2 Größenordnungen unter den Laborergebnissen für die Gesteinsmatrix (etwa  $10^{-11}$  m/s) liegen.

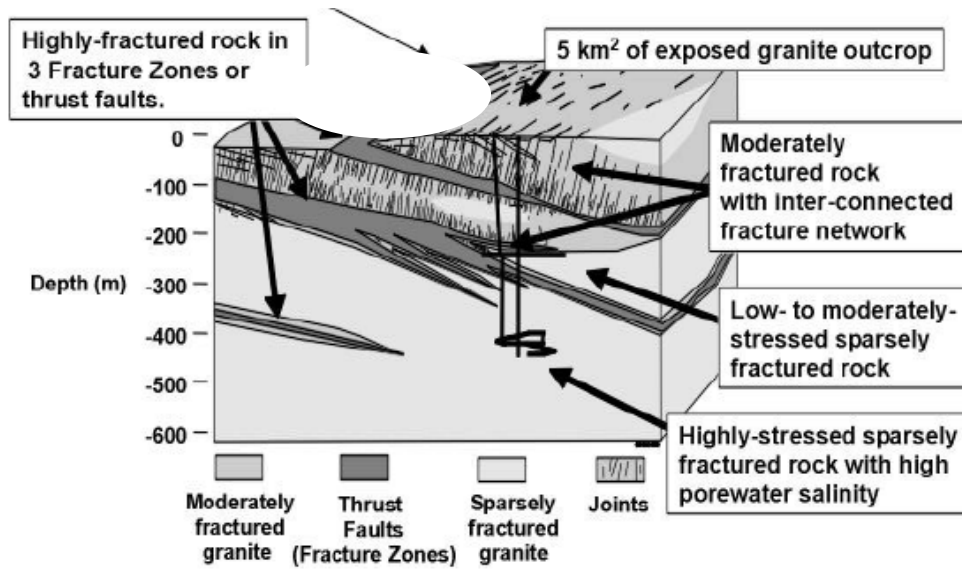
### **2.4 Sonstige Untertagelabore**

Weitere bekannte Untertagelabore sind das Lac du Bonnet Underground Research Laboratory in Kanada, das Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico / USA sowie die Yucca Mountain Exploratory Studies Facility in Nevada / USA.

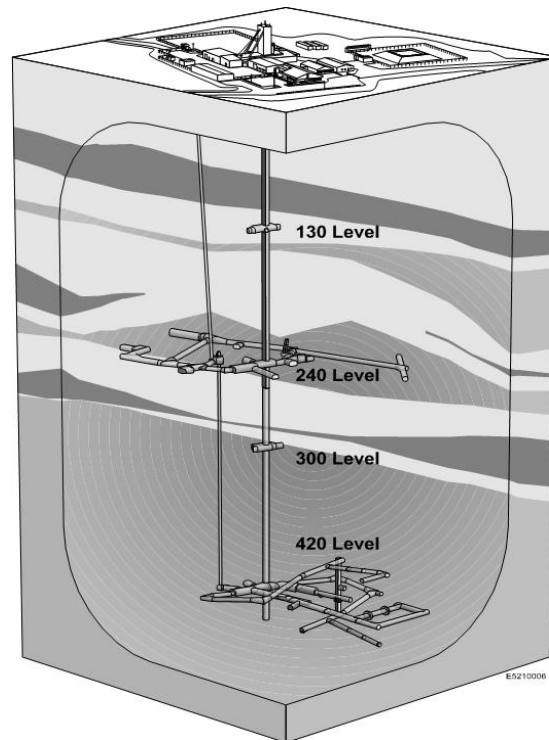
#### **2.4.1 Lac du Bonnet Underground Research Laboratory (URL)**

Das Lac du Bonnet Underground Research Laboratory liegt im südöstlichen Manitoba, Kanada, etwa 125 km von Winnipeg entfernt. Das Untertagelabor wurde von der Atomic Energy of Canada Limited (AECL) in einem ca. 2,65 Milliarden Jahre alten Granitbatholith am Westrand des Kanadischen Schildes errichtet. Der Batholith besitzt eine Oberflächenausdehnung von 1.400 km<sup>2</sup> und reicht bis in 6 - 25 km Tiefe /CHA 03/. Die wechselnden geologischen Verhältnisse mit mehreren Störungszonen im Bereich des UTL ermöglichen die Untersuchung sehr unterschiedlicher geologischer Bedingungen, so dass der Standort als ideal für ein generisches Untertagelabor im Kristallin angesehen wird (Abb. 24).

Mit dem Bau des UTL wurde 1982 begonnen. Der Schacht wurde 1984 zunächst bis in eine Teufe von 255 m abgeteuft und 1988 auf 443 m Teufe vertieft. Bis zum Jahr 1990 wurden zwei Forschungssohlen in 240 m und 420 m Teufe und ein Wetterschacht aufgeföhren (Abb. 25).



**Abb. 24** Geologische Verhältnisse am Standort des Lac du Bonnet Underground Research Laboratory (URL), Kanada, mit Darstellung der 5 Untersuchungsbereiche mit unterschiedlichen geologischen Bedingungen /CHA 03/



**Abb. 25** Das Lac du Bonnet Underground Research Laboratory (URL), Kanada, mit den beiden Forschungssohlen in 240 m und 420 m Teufe (nach /CHA 03/)

Das Untertagelabor dient sowohl zur Standortuntersuchung als auch zur Durchführung von großmaßstäblichen in situ-Experimenten und zur Demonstration von Einlagerungstechniken, um die Sicherheit und Machbarkeit des kanadischen Endlagerkonzeptes der AECL nachzuweisen. Das Lac du Bonnet-UTL ist ein generisches Untertagelabor, in dem keine radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

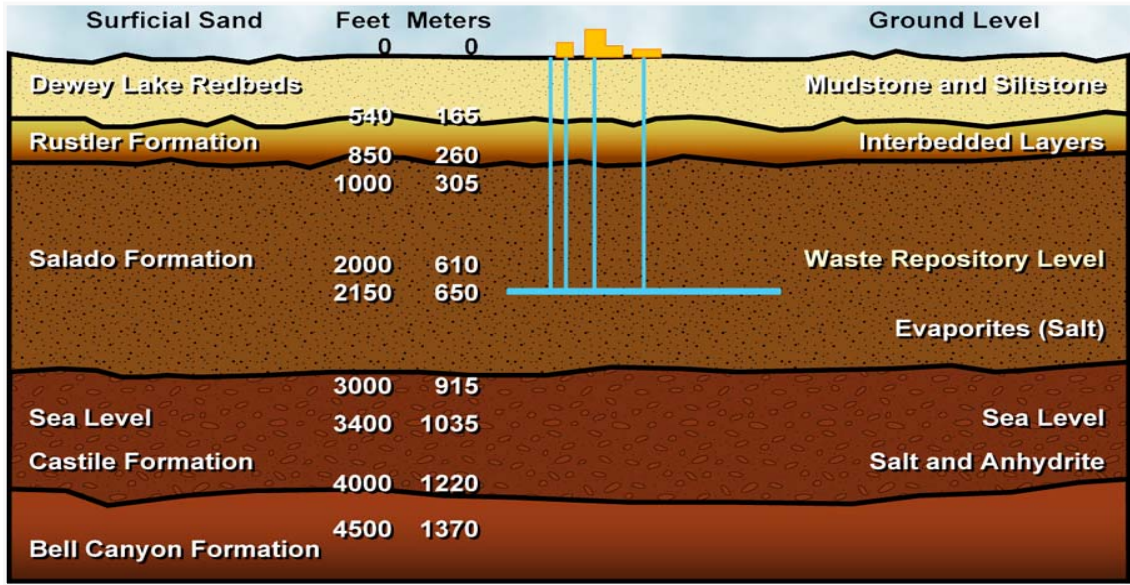
Die untertägigen Experimente begannen im Jahr 1990. Im Mittelpunkt standen zunächst Untersuchungen zu den Auswirkungen von Hohlraumauffahrungen, die u. a. mit einem so genannten „Mine-By-Experiment“, einem Erhitzertest und einem Streckenverschluss im Detail untersucht wurden /REA 04/. Schließlich folgte eine umfangreiche Studie der thermomechanischen Stabilität („Thermal-Mechanical Stability Study“, TMSS) zur Charakterisierung und Auslegung untertägiger Hohlräume, die auf in situ-Messungen und numerischen Modellierungen aufbaute.

Gegenwärtig werden 15 weitere Experimente zum Verhalten der geologischen Barriere und von technischen Barrieren durchgeführt /CHA 03/. Die Betriebsphase des Untertagelabors ist zurzeit bis zum Jahr 2014 konzipiert.

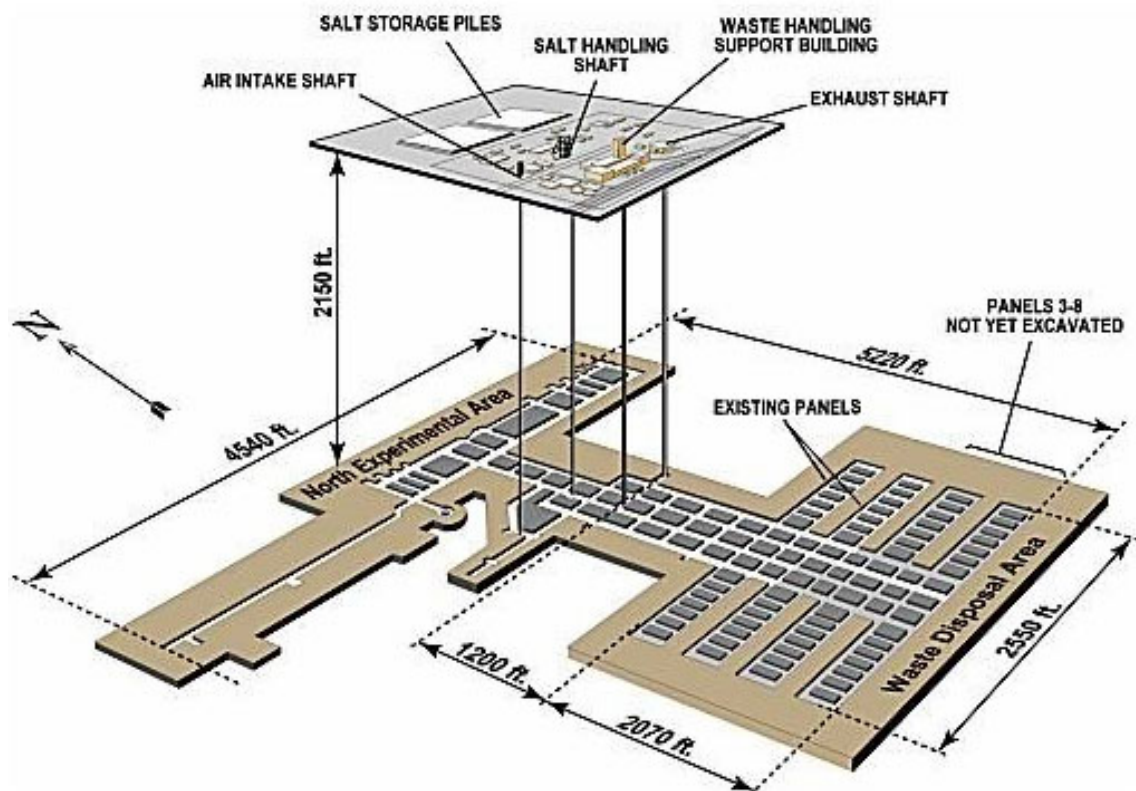
Das umfangreiche interdisziplinäre FuE-Programm im Lac du Bonnet-UTL hat einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung eines robusten Endlagerkonzeptes geleistet. Die Forschungsergebnisse im UTL bildeten auch die Grundlage für das von der AECL erstellte Gutachten zur Umweltverträglichkeitsprüfung (Environmental Impact Statement, EIS) für ein konzeptionelles Endlager für radioaktive Abfälle im Kristallin des kanadischen Schildes /AEC 01/.

### **2.4.2 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)**

Das WIPP-Untertagelabor in Carlsbad, New Mexico (USA) ist in der permischen Salado-Formation, einer über 600 m mächtigen, geschichteten Steinsalzformation in flacher Lagerung („bedded salt“) angelegt. Mit dem Bau des Untertagelabors wurde im Jahr 1981 begonnen. Zwischen 1982 und 1986 wurden vier Schächte abgeteuft und der Untersuchungsbereich aufgefahren. Das UTL liegt in einer Tiefe von ca. 655 m und wird von über 300 m Steinsalz überlagert. Die gesamte Salzmächtigkeit am Standort der WIPP-Site (Salado- und unterlagernde Castile-Formation) beläuft sich auf mehr als 1.000 m. (Abb. 26).



**Abb. 26** Geologisches Profil am Standort der WIPP-Site; Schnitt von Nord (links) nach Süd (rechts) (Bild: DoE)



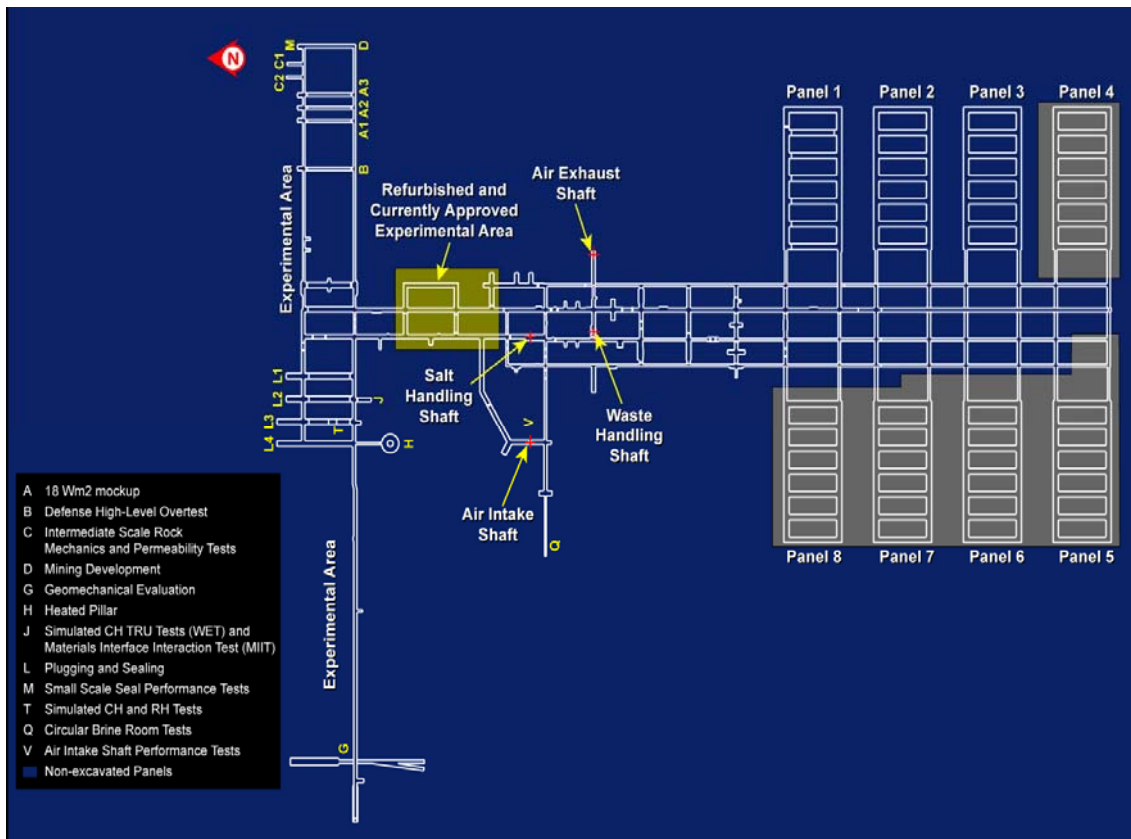
**Abb. 27** Layout der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in Carlsbad, New Mexico, USA mit dem Untertagelabor (im Nordteil der Anlage) und dem Einlagebereich (im Südteil) /CIT 08/

Ein wesentliches Standortauswahlkriterium für das Untertagelabor war die geforderte Nähe zum damals bereits geplanten Endlager am Standort der WIPP-Site, um die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse soweit wie möglich zu gewährleisten. Die Lage des Untertagelabors mit dem nahegelegenen Einlagerungsbereich des Endlagers zeigt Abb. 27.

Die ersten untertägigen Experimente begannen im Jahr 1984 und waren als in situ- und Demonstrationsversuche ausgelegt, mit denen die sichere Endlagerung von Transuranabfällen (TRU) und Mischabfällen aus der US-Kernwaffenproduktion demonstriert werden sollte. Bei den durchgeführten in situ-Experimenten und Demonstrationsversuchen kamen jedoch keine radioaktiven Stoffe zum Einsatz. Die umfassenden Versuchsserien hatten die folgenden Ziele:

- Bestätigung und Upscaling der Ergebnisse von Laborversuchen und oberirdigen Erkundungen,
- Weiterentwicklung der untertägigen Untersuchungsmethoden, der Techniken zur Hohlraumerstellung, des Endlagerkonzeptes sowie von Prozess- und Systemmodellen,
- Zuverlässige Prognose der Langzeitsicherheit eines Endlagers für Transuranabfälle am Standort WIPP.

Einen Überblick über den untertägigen Untersuchungsbereich mit den Versuchsorten der wichtigsten Großversuche und in situ-Experimente gibt Abb. 28. Südlich des Untersuchungsbereiches befinden sich die vier Schächte sowie der bereits zwischen 1986 und 1988 aufgefahrene Einlagerungsbereich.



**Abb. 28** Grundriss der WIPP-Site mit dem Untertagelabor im Nordteil (links) und dem Einlagerungsbereich im Südteil (rechts) und den dazwischen liegenden Schächten. Die Versuchsorte der wichtigsten Großversuche und in situ-Experimente sind mit Großbuchstaben bezeichnet (Bild: DoE)

Seit 1995 wurde das Untertagelabor in mehreren Phasen geschlossen. Die Gründe hierfür waren im Wesentlichen:

- Standsicherheitsprobleme von untertägigen Hohlräumen,
- Notwendigkeit der Gewinnung von Daten zum Verfüllen und Verschließen (zur Zertifizierung des Endlagers),
- Unterhaltungskosten.

Am 26. März 1999 wurden mit der Einlagerung radioaktiver Abfälle in das Endlager begonnen. Bis zum vorgesehenen Ende der Betriebsphase im Jahr 2033 sollen insgesamt bis zu 175.000 m<sup>3</sup> radioaktiver Abfall eingelagert werden /REM 07/.

### **2.4.3 Yucca Mountain - Exploratory Studies Facility**

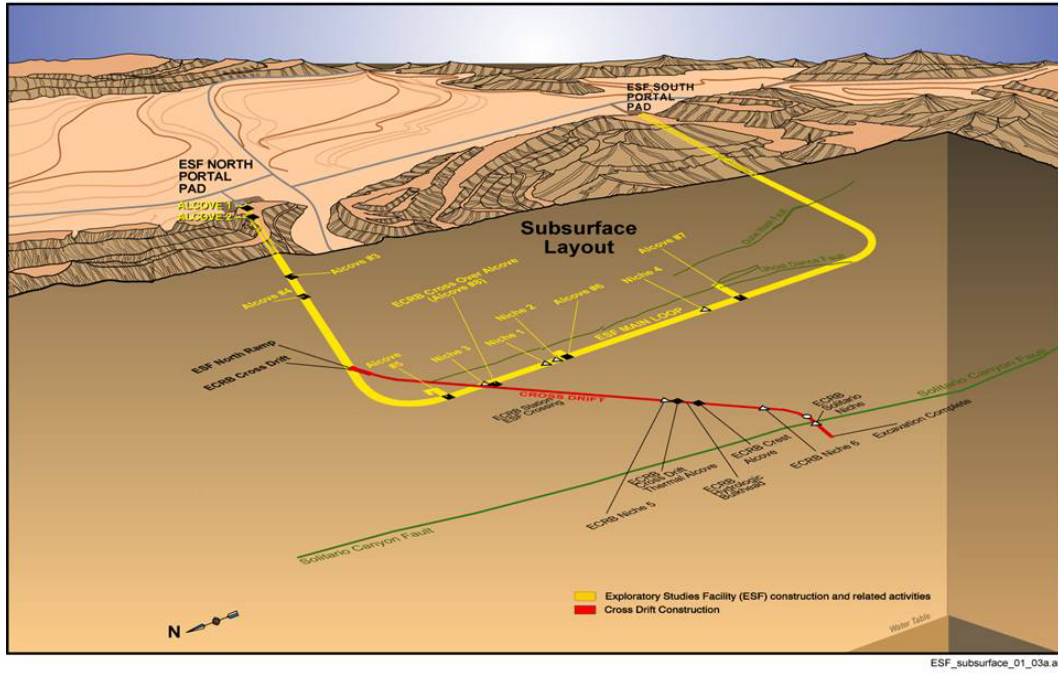
Das Yucca Mountain Untertagelabor Exploratory Studies Facility (ESF) in Nevada, USA, wurde in einer miozänen Tuff-Formation in bis zu 300 m Tiefe angelegt. Die vulkanischen Tuffe des Yucca Mountain wurden vor ca. 11 - 14 Millionen Jahren abgelagert. In diesem standortspezifischen Untertagelabor wird die Eignung des Wirtsgesteins Tuff für ein späteres Endlager untersucht.

Mit dem Bau des Yucca Mountain ESF (Abb. 29) wurde im Jahr 1993 begonnen. Die Strecken für das Untertagelabor waren 1997 fertig gestellt. Im Dezember 1997 begannen die ersten untertägigen in situ-Experimente mit einem Aufheizversuch zur Simulation der Streckenlagerung wärmeentwickelnder Abfälle. In der Folgezeit wurden auch Infiltrationstests, Laboruntersuchungen und Modellrechnungen sowie Vergleiche mit natürlichen Analoga durchgeführt. Eine Übersicht über die einzelnen Versuchsorte der Yucca Mountain ESF gibt Abb. 30. Die Arbeiten zur Standortcharakterisierung wurden 2002 abgeschlossen /NEA 02/.

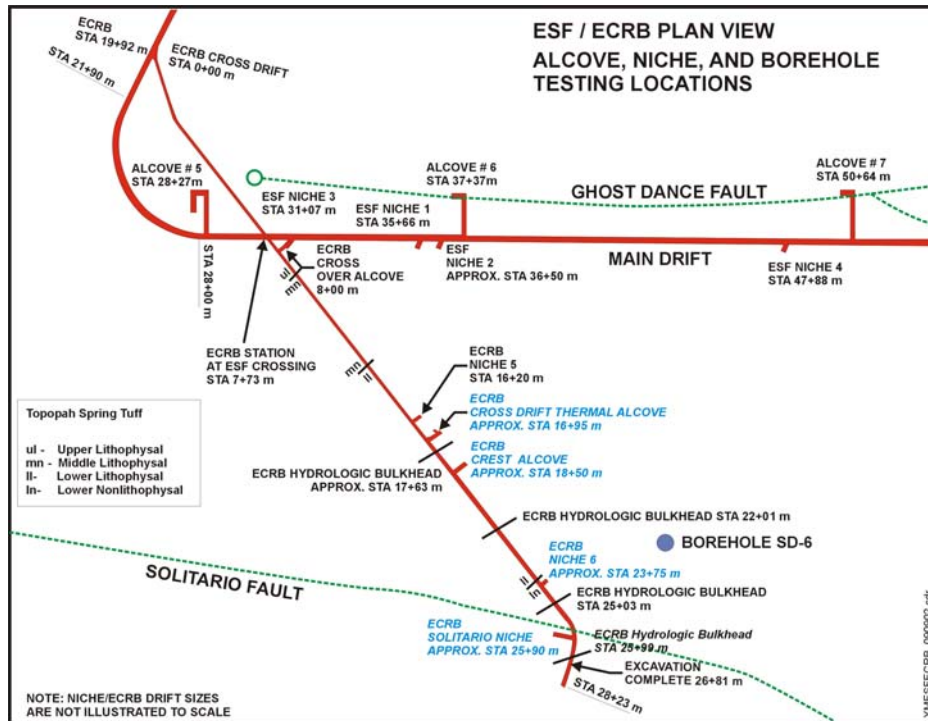
Der Standort ist für das zentrale geologische Endlager für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente vorgesehen. Der Genehmigungsantrag des Antragstellers, des Department of Energy (DOE), ist im Juni 2008 bei der Genehmigungsbehörde, der US-Nuclear Regulatory Commission (NRC), eingereicht worden. Mit der Einlagerung soll im Jahr 2017 begonnen werden.

Aufgrund der besonderen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse am Standort Yucca Mountain (Tuff als Wirtsgestein, extrem trockenes Klima, tiefliegender Grundwasserspiegel) sind die in der ESF durchgeführten Untersuchungen nur von geringer Relevanz für ein deutsches Endlager.





**Abb. 29** Ansicht der Yucca Mountain ESF mit den Strecken des Untertagelabors (gelb und rot). Das künftige Endlager für hochradioaktive Abfälle wird nach der Genehmigung des Endlagers im Norden und Westen des Untertagelabors aufgeföhren (Bild: DoE)



**Abb. 30** Übersicht über die einzelnen Versuchsorte der Yucca Mountain ESF (Bild: DoE)

## 2.5 Resümee

Weltweit existieren zahlreiche Untertagelabore, in denen insbesondere die gebirgsmechanischen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins, Wechselwirkungen des Wirtsgesteins mit den für die Einlagerung vorgesehenen Abfällen, eventuelle Auswirkungen auf die Barriereigenschaften natürlicher und technischer Barrieren sowie die auf diese Wirtsgesteine abgestimmten Endlagerkonzepte untersucht und getestet werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden derartige Untersuchungen für das Wirtsgestein Salz vor allem im ehemaligen Forschungsbergwerk Asse durchgeführt, das in den 1960er und 1970er Jahren auch als Versuchsendlager für die großmaßstäbliche Erprobung von Handhabungstechniken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur Verfügung stand. Die Standorteignungsuntersuchungen im Erkundungsbergwerk Gorleben hatten zeitweise ebenfalls den Charakter eines generischen Untertagelabors. Dies gilt gleichermaßen auch für andere Standorte, wie zum Beispiel das ERAM oder die Schachanlage Konrad.

Für andere Wirtsgesteine als Steinsalz existiert in der Bundesrepublik Deutschland kein eigenes Untertagelabor. Aus diesem Grund beteiligen sich deutsche Forschungseinrichtungen insbesondere am Betrieb von Untertagelaboren in den Wirtsgesteinstypen Kristallin und Tonstein in den Ländern Schweiz, Frankreich, Belgien und Schweden. Eine Auswahl relevanter in situ-Versuche in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Granit und Tonstein und deren Zielsetzung ist in Tab. 4 zusammengestellt (nach /PUS 04/).

**Tab. 4** Überblick über ausgewählte Experimente in Untertagelaboren in den Wirtsgesteinen Salz, Granit und Tonstein (nach /PUS 04/)

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
TSI (Thermal / structural interaction)	Zeitabhängiges Verhalten von Steinsalz unter dem Einfluss von Hohlräumstellung, Stress, thermischer Belastung und Abfalleinlagerung	Salz	WIPP
18 W/m <sup>2</sup> DHLW Mock-up	Kriechrate von Salz; Einfluss des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein; Gültigkeit von Prognosemethoden; Eignung einer Referenzeinlagerungskammer; Abbaueinflüsse	Salz	WIPP
DHLW Overtest	Konvergenzrate von Einlagerungskammern; Wärmetransfer bei erhöhten Temperaturen; Langzeiteffekte von Wärmeeintrag und Hohlraumkonvergenz	Salz	WIPP
Geomechanical Evaluation	Einfluss unterschiedlicher Abbauweiten; Einfluss des Deckgebirges; Pfeilerbelastbarkeit; Evaluierung von 2D- und 3D-Modellen	Salz	WIPP
Heated Axis-symmetric Pillar Experiment	Verhalten von Kammern und Pfeilern bei beschleunigtem Kriechen; mechanische Eigenschaften und Versagensmodi von Steinsalz; Gültigkeit von Modellen und Computercodes zur Prognose des Verhaltens von Steinsalz unter Wärmebelastung	Salz	WIPP
In situ Stress Determination	In situ-Spannungs-Bedingungen im WIPP-Einlagerungshorizont; Vergleich von in situ- und Labormessungen	Salz	WIPP
Clay Seam Shear Test	Effektiver Reibungskoeffizient von Tonschichten; Vergleich von in situ- und Labordaten; Beziehung zwischen gemessenen und berechneten Verschiebungsbeträgen entlang von Tonschichten	Salz	WIPP
Acoustic Emissions Monitoring	Nachgeben und Bruch eines Steinsalzpfeilers; Versagensmodi eines Steinsalzpfeilers; Korrelation zwischen Schallemissionen, Pfeilerdeformation und Bruchvorhersage	Salz	WIPP
Ambient Temperature Room Test	Gebirgsmechanische Daten für Umgebungstemperatur	Salz	WIPP
Scale Effect Test	Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Daten durch Skalierungseffekte	Salz	WIPP
Plugging and Sealing Test (P&S)	Entwicklung geeigneter Materialien und Einbringtechniken für den Langzeitverschluss von Bohrungen, Schächten und Strecken im Steinsalz; Bewertungstechniken zur Vorhersage des Langzeitverhaltens; Wirtsgesteinspermeabilität; Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und Verfüll- und Verschlussmaßnahmen	Salz	WIPP
Permeability Measurements	Porosität und Permeabilität von Steinsalz; Permeabilitätsänderungen in Abhängigkeit von der Entfernung zu Strecken und Kammern (einschl. EDZ); Einfluss von zwischengelagerten Ton- und Anhydritlagen auf die Permeabilität	Salz	WIPP

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
Plug Test Matrix	Wechselwirkungen und geochemische Langzeitstabilität unterschiedlicher Abdicht-/Verschlussmaterialien; Erprobung von Einbringtechniken	Salz	WIPP
Borehole Plug	Wirksamkeit von Bohrlochverschlüssen; Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und Verschlussmaterial; Verschlusseinbringtechniken; Materialstabilität	Salz	WIPP
Moisture Transport and Release	Bewegung natürlicher Feuchte im Gestein; Feuchtigkeitsfreisetzung in aufgefahrene Hohlräume in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit; Beziehung zwischen in situ-Messungen, Laboraten und Modellrechnungen	Salz	WIPP
Air Intake Shaft Performance (AIS)	Permeabilität im Schacht-Nahfeld; Schachtverschluss im Wirtsgestein; Einfluss der Schachtkonstruktion auf die EDZ; Berücksichtigung der EDZ bei der Schachtverschlusskonstruktion; hydraulische Verbindungen im ausgebauten Schachtbereich; Salzlösungs- und Grundwasserzuflüsse in den Schacht	Salz	WIPP
Small Scale Seal Performance	Einbringtechniken für Verschlüsse; Wirksamkeit von Abdichtmaterialien; Entwicklung numerischer Prognosemodelle	Salz	WIPP
Large Scale Seal Performance (auch: Bulkhead Test)	Einbringtechniken für Verschlüsse; Wirksamkeit des Abdichtungssystems; Entwicklung einer WIPP-Datenbasis für untertägige Verschlüsse	Salz	WIPP
Backfill Design and Emplacement	Festlegung von Verfüllmaterialien; Fluidtransport in verfüllten Grubenräumen; 1:1-Demonstrationsversuch der Verfülltechnik	Salz	WIPP
Waste Package Performance Tests	Alterungsbeständigkeit von Abfallverpackungen; Wechselwirkungen zwischen Abfallbehälter, Verfüllmaterial und Wirtsgestein; Wirksamkeit technischer Barrieren für den Einschluss von Abfällen; Methoden zur Abschätzung der Langzeitwirksamkeit der Barrieren	Salz	WIPP
Simulated DHLW Technology Experiments	Wirksamkeit und Unversehrtheit von DHLW-Gebinden; Wechselwirkungen zwischen Abfallbehälter, Verfüllmaterial und Wirtsgestein; Beziehung zwischen in situ gewonnenen Daten, Laboraten und analytischen Studien; Entwicklung einer technischen Basis zur Bewertung des Konzeptes einer sicheren Einlagerung von HAW in Steinsalz	Salz	WIPP
Temperature Test 5 (TV5)	Thermische Stabilität von akzessorischen Mineralen im Älteren Steinsalz; Migration von Fluideinschlüssen im Salz in aufgeheizte Bohrlöcher; Permeabilität von Steinsalz in der Umgebung von aufgeheizten Bohrlöchern	Salz	Asse

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
Brine Migration Test mit Co-60-Quellen	Migration von Fluideinschlüssen im Salz in aufgeheizte Bohrlöcher; Wasserstofferzeugung durch Bestrahlung von Steinsalz und Materialkorrosion; Strahlenschäden im Steinsalz; thermomechanisches Verhalten von Steinsalz unter Einfluss von Hohlräumstellung, Stress und thermischer Belastung	Salz	Asse
Development of Borehole Seals (DEBORA)	Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz unter Einfluss von Hohlräumstellung, Stress und thermischer Belastung; thermisches, hydraulisches und mechanisches Verhalten von Steinsalzgrus unter dem Einfluss von Stress, thermischer Belastung und dem Kriechen des Salzgesteins; Erprobung von Messinstrumentarien	Salz	Asse
Thermal Simulation of Drift Emplacement (TSDE)	Thermomechanisches Verhalten von Steinsalz in Wechselwirkung mit Salzgrus-Versatz; Materialkorrosion unter in situ-Bedingungen; Gasentwicklung in verfüllten Strecken aufgrund von Aufheizung und Korrosion; Erprobung von Messinstrumentarien	Salz	Asse
Dam Construction	Entwicklung einer Salzbetonrezeptur; Entwicklung von Einbautechniken für unterschiedliche Dammkomponenten (Salzbeton, Asphalt, Salzformsteine); Abdichtvermögen von Dammkomponenten; mechanisches Verhalten von Steinsalz und Dammkomponenten	Salz	Asse
BMT	Entwicklung von Puffer-Materialien	Granit	Stripa
Plug Tests	Konstruktion von Strecken-, Schacht- und Bohrlochverschlüssen	Granit	Stripa
Rock Sealing Tests, EDZ and Deposition Hole	Hydraulische Eigenschaften der EDZ; EDZ-Abdichtung; Abdichtung von Einlagerungsbohrlöchern	Granit	Stripa
Fo-Ca7	Langzeittest (5 Jahre) eines Buffers bei Temperaturen bis 150°C	Granit	Stripa
Site Characterization and Validation Tests	Standortcharakterisierung zur Vorhersage von Grundwasserfluss und Lösungstransport; Methodik zur Validierung von konzeptuellen und numerischen Modellen für den Transport in geklüftetem Gestein	Granit	Stripa
Zone of Excavated Disturbance Experiment (ZEDEX)	Mechanisches Verhalten und hydraulische Bedeutung der EDZ; Test von Instrumentarien und Methoden zur Quantifizierung der EDZ	Granit	Äspö
Two-phase Flow	Bedeutung der Entgasung von Grundwasser auf die Messung von hydraulischen Eigenschaften in Bohrungen und Strecken; Prozesse/Bedingungen, die zum 2-Phasenfluss führen; Zeitraum für die Wiederaufsättigung des Wirtsgesteins; Entwicklung von Messtechniken	Granit	Äspö

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
Redox Experiment	Reaktionen zwischen Gestein, Grundwasser und Lufteinschlüssen; Sauerstoffverbrauchskapazität der Gesteinsmatrix; Zeitraum für den Sauerstoffverbrauch in einem Endlager	Granit	Äspö
Prototype Repository Project	Demonstration der integrierenden Funktion der Komponenten eines Endlagers unter realistischen Bedingungen; Vergleich mit Modellrechnungen; Entwicklung, Test und Demonstration von ingenieurmäßigen Standards und Qualitätssicherungsmethoden	Granit	Äspö
Canister Retrieval Test	Demonstration von Rückholtechniken für in Quellbentonit eingebrachte Abfallbehälter; THM-Prozesse während der Aufsättigung des Bentonit-Buffers; TM-Prozesse im umgebenden Gebirge bei Aufheizung	Granit	Äspö
Long-Term Test of Buffer Material (LOT)	Funktionstests von Buffermaterialien in einem Zeitraum zwischen einem und 20 Jahren bei Temperaturen zwischen 90°C und 130°C	Granit	Äspö
Backfill and Plug Test	Entwicklung und Test von Materialien und Techniken zur Streckenverfüllung; Test der mechanischen und hydraulischen Wirkung einer Verfüllung und des Nahfeldes bei Anwendung der Sprengtechnik	Granit	Äspö
Tracer Retention Understanding Experiments ((TRUE)	Transport und Rückhaltung von Radionukliden in einem geklüfteten Gestein	Granit	Äspö
Radionuclide Retention Experiment	Einfluss von Radiolyseprodukten auf die Migration redoxsensitiver Elemente in Bentonit; Migration von Actiniden in Klüften; Auslaugung von Brennelementen unter Endlagerbedingungen	Granit	Äspö
Matrix Fluid Chemistry	Herkunft und Alter von Grundwasser bzw. Fluideinschlüssen im Porenraum der Gesteinsmatrix	Granit	Äspö
Heater Test (WT)	Einfluss der thermischen Belastung auf das Nahfeld eines Endlagers in einem kristallinen Wirtsgestein	Granit	FLG
Ventilation Test (VT)	Bestimmung der Makropermeabilität, der Verdunstung an der Streckenoberfläche und der ungesättigten Zone um eine Strecke	Granit	FLG
Tunnel Near-Field Programme (TN)	Bedeutung des Nahfeldes für die Langzeitsicherheitsanalyse	Granit	FLG
Borehole Sealing (BOS)	Entwicklung von Bohrlochverschlüssen mit dem umgebenden Gebirge vergleichbaren hydraulischen Leitfähigkeiten	Granit	FLG
Gas Migration in the Engineered Barrier System (GMT)	Bedeutung des EBS (Sand-Bentonit-Gemisch und angrenzendes Gebirge) für die Migration von in einem Endlager entstandenen Gasen	Granit	FLG

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
Full-Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock (FEBEX)	Demonstration der Machbarkeit eines EBS; Entwicklung von Methoden und Modellen zur Bewertung des thermo-hydro-mechanischen (THM) und thermo-hydro-geochemischen (THG) Verhaltens im Nahbereich eines Endlagers	Granit	FLG
Heater Experiment (HE)	Gekoppelte THM-Prozesse im Bentonit-Buffer und im konsolidierten Ton; Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und Bentonit	Ton	Mt.Terri
Engineered Barrier Emplacement Experiment (EB)	Demonstration eines neuen Konzeptes für einen tonbasierten Buffer in horizontalen Strecken in Tonformationen; Bedeutung der EDZ für die Wirksamkeit des Gesamtsystems; Entwicklung, Kalibrierung und Validierung eines hydromechanischen Modells zur Vorhersage des Systemverhaltens	Ton	Mt.Terri
Ventilation Experiment (VE)	Veränderung der hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Opalinustons durch Bewetterung	Ton	Mt.Terri
EDZ Evolution around Gallery (ED-B)	Entwicklung der EDZ um eine neu aufgefahrene Strecke (Deformation, Stress, Porenwasserdruck, hydraulische Leitfähigkeit)	Ton	Mt.Terri
EDZ Self Healing Experiment (EH)	Selbsteilungsvermögen einer EDZ durch Quelldruck und Homogenisierung des Stressfeldes	Ton	Mt.Terri
Gas-frac Self-healing Experiment (GS)	Labor- und in situ-Tests zum Selbsteilungsvermögen	Ton	Mt.Terri
Corrosion of Waste Matrix Materials (CORALUS)	In situ-Verifizierung der Zuverlässigkeit von Langzeitprognosen zum Auslaugverhalten einer Glasmatrix	Ton	HADES
In situ corrosion Experiments	Korrosionsverhalten unterschiedlicher Behältermaterialien bei Versuchsdauern bis zu 7,5 Jahren; Prognose des langfristigen Korrosionsverhaltens	Ton	HADES
Backfill/Buffer Materials (BACCHUS)	THM-Verhalten tonbasierter Verfüll- und Buffermaterialien	Ton	HADES
Large Scale Sealing Materials (RESEAL)	Demonstrationsversuch zum Verschluss eines Erkundungsschachtes	Ton	HADES
Small Scale Sealing Materials (RESEAL)	Demonstrationsversuch zur Machbarkeit eines Bohrlochverschlusses mit vorkompaktierten Bentonitblöcken	Ton	HADES
Monitoring of Underground Construction (MINE-BY)	Überwachung des Abteufens von Schächten und des Auffahrens von Strecken	Ton	HADES
Monitoring of Underground Construction (CLIPLEX)	Überwachung des Auffahrens von Strecken	Ton	HADES
Underground Construction and Hydrology of Host Rock (PHEBUS)	Hydraulische Effekte in tiefen Tonformationen beim Bau und Betrieb von Einlagerungsstrecken	Ton	HADES

Bezeichnung	Zielsetzung (Auswahl)	Wirtsgestein	UTL
Gas Migration in Host Rock (MEGAS)	Daten zur Validierung von Modellen zur Gasmigration	Ton	HADES
Thermal Effect on Host Rock (ATLAS)	Vergleich von Modellen zum rheologischen Verhalten des Boom-Tons bei thermischer Belastung	Ton	HADES
Integrated Test on Thermal and Radiological Influence on Host Rock (CERBERUS)	Kombinierte Effekte von Strahlung, Wärme und Bohrlocherstellung (Simulation der Bohrlochlagerung eines verglasten HAW-Behälters)	Ton	HADES



### **3 Die Schachtanlage Asse als UTL**

In der Schachtanlage Asse wurden seit dem Jahr 1967 FuE-Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen durchgeführt. Diese Forschungsarbeiten wurden im Zuge der Verfüllung des Salzbergwerkes eingestellt. Die während nahezu 40 Jahren durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich im Wesentlichen auf folgende Themenbereiche:

- Versuchseinlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen,
- Weiterentwicklung von Einlagerungstechniken,
- Versuche zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle,
- Arbeiten zur Direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen,
- Qualifizierung geotechnischer Barrieren.

Eine Zusammenfassung der bis zum Jahr 1995 durchgeführten FuE-Arbeiten findet sich in der vom GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit herausgegebenen Festschrift „30 Jahre Institut für Tief Lagerung 1965 - 1995“ /GSF 95/. Die Darstellungen in den nachfolgenden Kapiteln basieren teilweise auf dieser Publikation.

#### **3.1 Versuchseinlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen**

Im Jahr 1967 begann die Versuchseinlagerung von schwachradioaktiven Abfällen in das Salzbergwerk Asse. Hauptzielsetzung dieser Versuchseinlagerung waren die Entwicklung und Erprobung von Einlagerungstechniken /ALB 77/, /OPP 80/.

##### **Einlagerungstechniken für schwachradioaktive Abfälle**

Von April 1967 bis März 1974 wurden Fässer mit schwachradioaktiven Abfällen mit verschiedenen Stapeltechniken eingelagert. Zunächst wurden die Fässer senkrecht in Reihen gestapelt, zwischen denen Kontrollgänge gelassen wurden (Abb. 31). Später wurden Stapeltechniken erprobt, bei denen die Fässer liegend gestapelt wurden (Abb. 32). Im Jahr 1974 wurde die Abkipptechnik eingeführt. Bei dieser Einlagerungstechnik werden die Abfallfässer in der Einlagerungskammer über eine Böschung abgekippt und anschließend mit losem Salzhautwerk überdeckt (Abb. 33). Dieses speziell für große Hohlräume entwickelte Einlagerungsverfahren zeichnet sich durch eine sehr geringe

Verweildauer des Personals in der Einlagerungskammer und einen großen Abstand der mit Abfallfässern gefüllten Schaufel des Transportfahrzeuges zum Fahrer aus. Insgesamt wurden hierdurch eine erhebliche Reduzierung der Personendosis des Betriebspersonals, eine optimale Verfüllung der Resthohlräume und eine wesentliche Steigerung der Einlagerungsleistung erzielt.



**Abb. 31** Versuchseinlagerung von schwachradioaktiven Abfällen - senkrechte Stapeltechnik auf der 750-m-Sohle (Quelle: GSF)



**Abb. 32** Versuchseinlagerung von schwachradioaktiven Abfällen - liegende Stapeltechnik auf der 750-m-Sohle (Quelle: GSF)



**Abb. 33** Versuchseinlagerung von schwachradioaktiven Abfällen - Abkipptechnik in Kammer 7 auf der 725-m-Sohle /GSF 95/

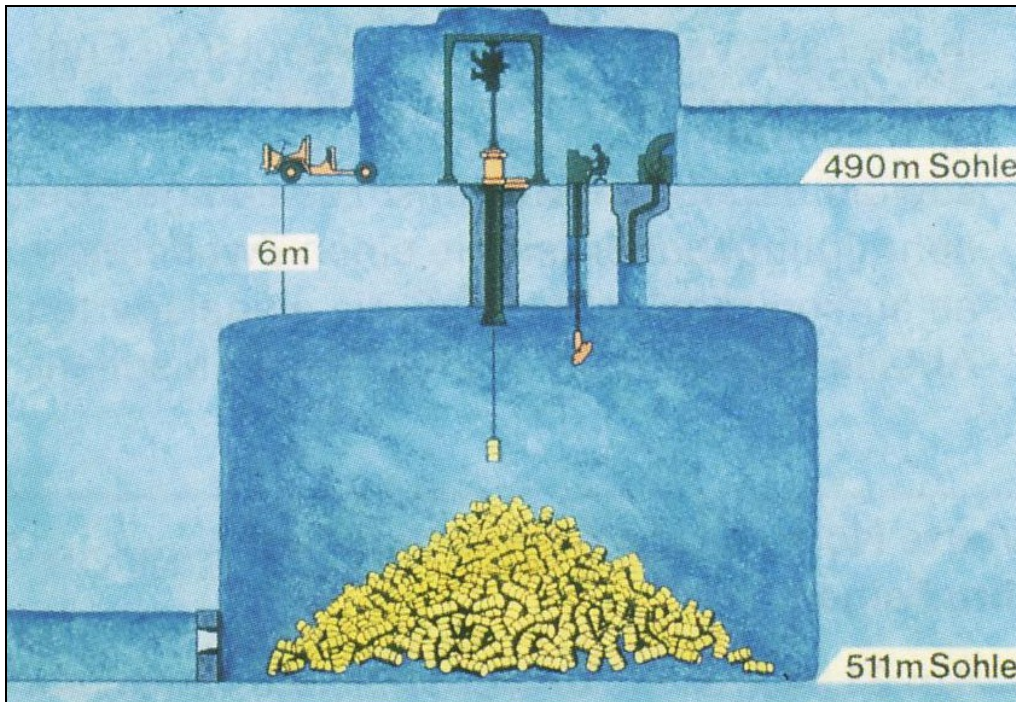
Zwischen 1967 und 1978 wurden mit den drei dargestellten Einlagerungstechniken 124.494 Behälter mit schwachradioaktiven Abfällen im Salzbergwerk Asse eingelagert, darunter auch solche in speziell entwickelten, so genannten „verlorenen Betonabschirmungen“ (VBA).

### **Einlagerungstechnik für mittelradioaktive Abfälle**

1972 begann die Versuchseinlagerung von mittelradioaktiven Abfällen. Aufgrund des hohen Aktivitätsinventars und der damit verbundenen hohen Dosisleistung an der Behälteroberfläche waren diese Gebinde nicht ohne Strahlenabschirmung handhabbar. Daher wurde für die Handhabung dieser Gebinde und deren Einlagerung unter Tage eine neue Technik entwickelt und erprobt.

Über der Einlagerungskammer 8a auf der 511-m-Sohle wurde auf der 490-m-Sohle eine Beschickungskammer eingerichtet, von der aus der Einlagerungsvorgang gesteuert und überwacht wurde (Abb. 34). Die MAW-Gebinde wurden einzeln in wiederverwendbaren Abschirmbehältern in die Beschickungskammer transportiert und dort über dem Einlagerungsbohrloch abgesetzt. Mit Hilfe einer Seilwinde und eines Greifers wurde

das MAW-Gebinde aus dem Abschirmbehälter in die Einlagerungskammer abgelassen. Das Einlagerungsbohrloch war am oberen Ende mit einem Schiebersystem ausgestattet, welches dazu diente, die Strahlung nach dem Entfernen des Abschirmbehälters abzuschirmen.



**Abb. 34** Schematische Darstellung der Einlagerungstechnik für mittelradioaktive Abfälle in Kammer 8a auf der 511-m-Sohle /GSF 95/

Im Zeitraum von 1972 bis 1977 wurden insgesamt 1.293 Fässer mit mittelradioaktiven Abfällen in die Einlagerungskammer 8a auf der 511-m-Sohle eingelagert. Das technische Konzept für die Einlagerung von mittelradioaktiven Abfällen hat sich bewährt und ist, ebenso wie die Stapelkonzepte für schwachradioaktive Abfälle, in die Planungen der von 1976 bis 1989 für die Endlagerung zuständigen Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für neue Endlager aufgenommen worden. Seit 1990 werden die Aufgaben des Bundes vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) wahrgenommen.

#### **Vierte Novelle zum Atomgesetz**

Mit der 4. Novelle zum Atomgesetz im Jahr 1976 /ATG 76/ wurden die Zuständigkeiten und Verfahrensweisen bei der Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle

grundlegend geregelt und ein Planfeststellungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Endlagern des Bundes vorgeschrieben.

Für das Salzbergwerk Asse wurde kein derartiges Planfeststellungsverfahren durchgeführt. Die letzten Einlagerungsgenehmigungen liefen 1977/78 aus und konnten nicht mehr verlängert werden. Daher wurde die Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen in das Salzbergwerk Asse im Dezember 1978 beendet.

Im Jahr 1979 kamen der Bund und das Land Niedersachsen überein, in der Schachtanlage Asse nur noch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle durchzuführen. Hauptaufgabengebiete waren dabei:

- Entwicklung und Erprobung von Einlagerungsmethoden für wärmeentwickelnde - vor allem hochradioaktive - Abfälle und Bearbeitung damit zusammenhängender sicherheitstechnischer Fragen,
- Entwicklung und Erprobung von Techniken zum Verfüllen und Verschließen von Bohrlöchern, Kammern, Strecken und Schächten in einem Endlager.

### **3.2 Weiterentwicklung von Einlagerungstechniken**

Zur Entwicklung und Umsetzung alternativer Einlagerungstechniken wurde zusammen mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe die Entwicklungs-Gemeinschaft-Tieflagerung (EGT) gegründet und unterhalb des Schachtes Asse 4 eine Kaverne für die versuchsweise Einlagerung mittelradioaktiver Stoffe aufgefahren. Diese Kaverne wurde von 1976 bis 1977 in bis zu 996 m Tiefe errichtet /RAA 82/. Im Rahmen des Konzeptes der behälterlosen Endlagerung mit "In situ-Verfestigung" sollte eine Einlagerungstechnik entwickelt und erprobt werden, bei der die mittelradioaktiven Abfälle direkt von über Tage aus eingelagert und in situ verfestigt werden. Ein weiteres Ziel war die Weiterentwicklung des Trockenbohrverfahrens zur Erstellung von Großbohrlöchern. Beide Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

#### **In situ-Verfestigung**

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum Thema "Lagerung und Verfestigung von granulierten Abfällen in einer Kaverne" hatten zum Ziel, für die Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am Standort einer Wiederaufarbeitungsanla-

ge ein Alternativkonzept zur Fassinlagerung unter gleichzeitiger Beseitigung tritiumhaltiger Abwässer zu entwickeln.

Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem granuliert schwach- und mittelradioaktive Abfälle zusammen mit tritiumhaltigen Abwässern zu einer Suspension vermischt und in eine Kaverne in rund 1.000 m Tiefe gefördert werden, wo die Suspension zu einem monolithischen Block aushärtet (Abb. 35). Die Vorteile dieses Konzeptes gegenüber der Fasslagerung sind:

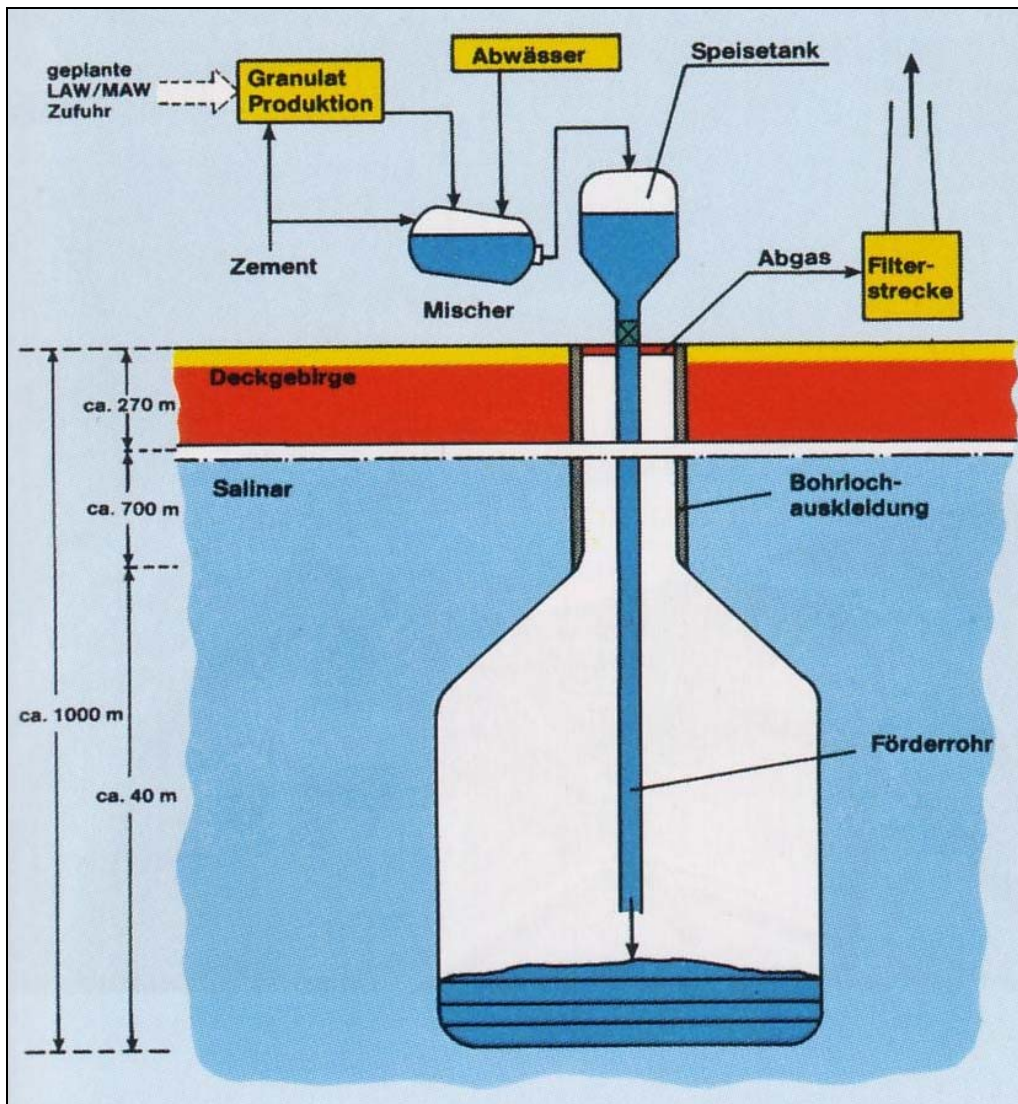
- weniger Transporte,
- minimaler Aufwand bei der Handhabung,
- geringe Kosten,
- geringere Strahlenbelastung bei der Handhabung,
- optimale Hohlraumnutzung.

Das Projekt wurde von der GSF gemeinsam mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe und unter Beteiligung zahlreicher weiterer Forschungseinrichtungen und der Industrie durchgeführt. Nach einigen technischen Schwierigkeiten - sowohl hinsichtlich der Ermittlung einer geeigneten Rezeptur für die Granulat-Zement-Wasser-Mischung als auch der Freifallförderung durch eine 1.000 m lange Rohrleitung - gelang es im Jahre 1989, die technische Machbarkeit der "In situ-Verfestigung" in einem Großversuch unter Verwendung nichtradioaktiver Stoffe zu demonstrieren /MEY 89/.

### **Großbohrlöcher im Trockenbohrverfahren**

Ein weiteres mögliches Verfahren für die untertägige Endlagerung radioaktiver Abfälle in Steinsalz ist deren Lagerung in tiefen Großbohrlöchern. Für diese Art der Endlagerung ist es erforderlich, Bohrlöcher mit großen Durchmessern trocken - also ohne Einsatz von Spülflüssigkeit - herzustellen. Die erforderliche Technik wurde über zwei Jahrzehnte hinweg in der Schachanlage Asse weiterentwickelt und erprobt /PRI 86/, /KOL 93/.

Das heute zur Verfügung stehende Instrumentarium umfasst Bohranlagen, mit denen bis zu 500 m tiefe Bohrlöcher mit Durchmessern von 0,6 m und 1 m hergestellt werden können sowie eine Anlage zur Herstellung von Großbohrlöchern mit 3,50 m Durchmesser.



**Abb. 35** Schematische Darstellung der „In situ-Verfestigung“ /GSF 95/

### 3.3 Versuche zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

In Deutschland wurde die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle auf einer Haupteinlagerungssohle in rund 800 m Tiefe in einer Salzformation konzipiert. Von dieser Einlagerungssohle aus sollen Abfallbehälter in bis zu 600 m tiefen Bohrlochern aufeinander gestapelt werden. Vorgegeben waren die maximale Dosis- und Wärmeleistung der Behälter - rund 2.500 Gray pro Stunde an der Behälteroberfläche und 17 Watt pro Liter Inhalt - bei einer maximal zulässigen Temperatur von 200°C im umgebenden Steinsalz. Dieses Konzept beruht wesentlich auf den Ergebnissen von FuE-Arbeiten aus dem Untertagelabor Asse.

## Temperaturversuche zur Simulation der Einlagerung echter Abfälle

Bei Temperaturversuchen wird das Gebirge mit Hilfe elektrischer Erhitzer aufgeheizt. Durch die Messung der Reaktionen des Gebirges auf die Aufheizung können verschiedene Parameter des Wirtsgesteins ermittelt werden.

Der erste Temperaturversuch (TV 1) in der Schachanlage Asse wurde bereits 1967 durchgeführt. Im Rahmen der Temperaturversuche 1 bis 6 wurden verschiedene Parameter unter in situ-Bedingungen untersucht:

- TV 1: Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz,
- TV 2, TV 3: Wärmeausbreitung im Steinsalz und dadurch verursachte Gebirgsbewegungen,
- TV 4, TV 5: thermisch induzierte Wasserfreisetzung aus dem Steinsalz,
- TV 6: thermisch induzierte Spannungsumlagerungen im Steinsalz.

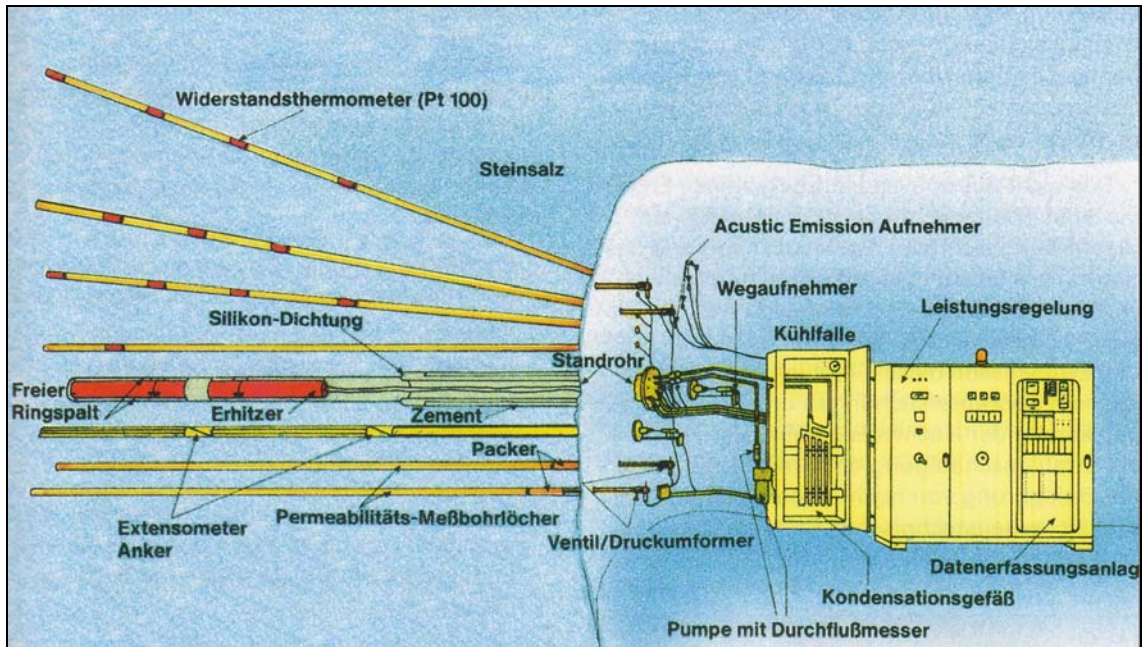
Als wissenschaftlich besonders interessant erwies sich der Temperaturversuch TV 5 /ROT 86/. Dieser Erhitzerversuch hatte zum Ziel, die wärmebedingte Freisetzung von Kristallwasser aus dem Mineral Polyhalit ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2 CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ) in ein HAW-Bohrloch zu untersuchen. Der Versuch lieferte einen wesentlichen Beitrag zur Festlegung der Grenze von 200°C als maximal zulässiger Salztemperatur bei der Endlagerung wärmeerzeugender hochradioaktiver Abfälle.

Der Versuchsaufbau von Temperaturversuch TV 5 ist in Abb. 36 dargestellt. Die Aufheizung erfolgte über eine Aufheizdauer von 301 Tagen in 5 Stufen von 100°C bis 270°C. Hierbei wurde ein Erhitzer von rund 3 m Länge und 20 cm Durchmesser eingesetzt, dessen elektrische Leistung je nach Heizperiode zwischen ca. 2 - 5,5 kW lag. Während des Versuches wurden folgende Parameter und deren Wechselwirkungen gemessen: Temperaturen, thermische Zersetzung von Salzmineralen, thermisch induzierte Freisetzung von flüchtigen Komponenten wie Gasen und Flüssigkeiten sowie thermisch induzierte Spannungen und Verformungen im Salzgestein.

Es zeigte sich, dass bei Gesteinstemperaturen unterhalb von 230°C nur das Haftwasser auf den Korngrenzen freigesetzt wird, während es oberhalb von 230°C aufgrund der thermischen Zersetzung von Polyhalit zu einer Freisetzung des Kristallwassers kommt. Die Freisetzung und Migration von Wasser im Steinsalz ist am besten als



Migration von Wasserdampf nach Knudsen /CUS 97/ zu beschreiben. Die thermisch induzierten Spannungen führen zu einer Verringerung der Permeabilität des Steinsalzes. Schallemissions- und Laufzeitmessungen lassen auf strukturelle Gesteinsänderungen infolge der Aufheizung schließen.



**Abb. 36** Schematische Darstellung des Temperaturversuches TV 5 /GSF 95/

### Brine Migration Test

Der deutsch-amerikanische Brine Migration Test, der zusammen mit dem US-Department of Energy (DOE) von 1983 bis 1985 durchgeführt wurde, diente zur Simulation der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Dieses war der erste Versuch in einem europäischen Untertagelabor, bei dem gleichzeitig die Wirkung von Wärme und Strahlung auf Steinsalz erforscht wurde. Ziel des Versuches war eine möglichst naturgetreue Simulation der Temperaturbedingungen im Nahbereich der Abfälle - 210°C maximale Salztemperatur und 3°C/cm Temperaturgradient an der Bohrlochwand -, um spezifische Informationen für die Auslegung eines Endlagers zu erhalten.

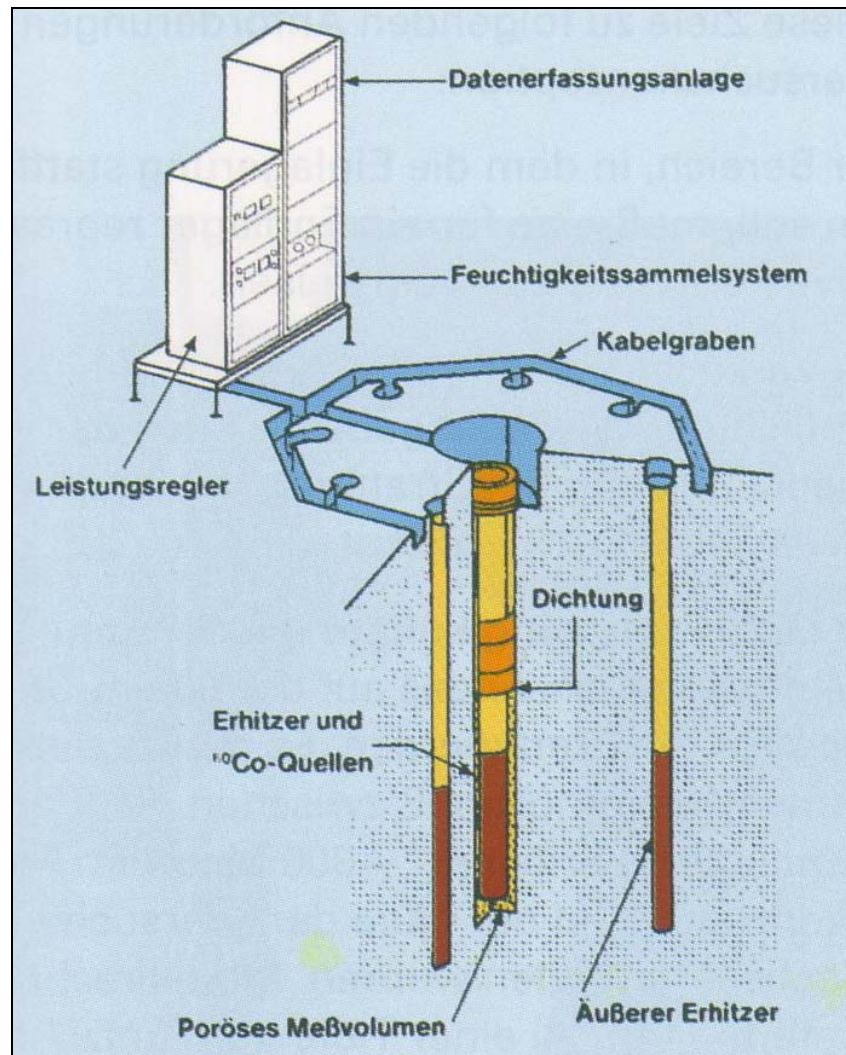
Im Rahmen dieses Brine Migration Tests erfolgten Untersuchungen zur Laugenmigration und zu den Wechselwirkungen zwischen hochradioaktiven Abfällen, die durch elektrische Erhitzer und eine Kobalt-60-Quelle simuliert wurden, und Steinsalz /ROT 88/. Das Experiment ergänzte die Zielsetzungen des Temperaturversuches TV 5 um folgende Untersuchungen:

- Migration von Flüssigkeitseinschlüssen im Steinsalz (Art und Menge),
- im Einlagerungsbohrloch auftretende Gasdrücke,
- im Gebirge induziertes Strahlungsfeld,
- Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Strahlenquellen,
- Art und Umfang der Schädigung des Steinsalzes durch Gammastrahlung,
- Korrosion von Werkstoffen.

Abb. 37 zeigt eine Darstellung des Versuchsaufbaus auf der 800-m-Sohle der Schachtanlage Asse. Elektrische Erhitzer und Kobalt-60-Quellen - harte Gammastrahler mit relativ geringer Wärmeleistung - wurden für einen Zeitraum von zwei Jahren in ein Bohrloch eingebracht. Zu Vergleichszwecken und zur Absicherung der mit den Temperaturversuchen TV 1 bis TV 6 gewonnenen Erkenntnisse wurden zwei weitere Bohrlöcher ausschließlich mit elektrischen Erhitzern ausgestattet.

Der Versuch bestätigte die Freisetzung flüssiger Komponenten aufgrund einer Knudsen-Diffusion und zeigte, dass die Migration von Flüssigkeitseinschlüssen im Salz vernachlässigbar ist. Die Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen, bei denen die bei der anschließenden Aufwältigung des Versuchsortes gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt wurden, ergaben eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die verwendeten Modelle zur Beschreibung der Laugenmigration (Verdampfungsfrontmodell /SLI 86/) und des thermischen und mechanischen Verhaltens des Salzgesteins konnten durch den Versuch verifiziert werden.

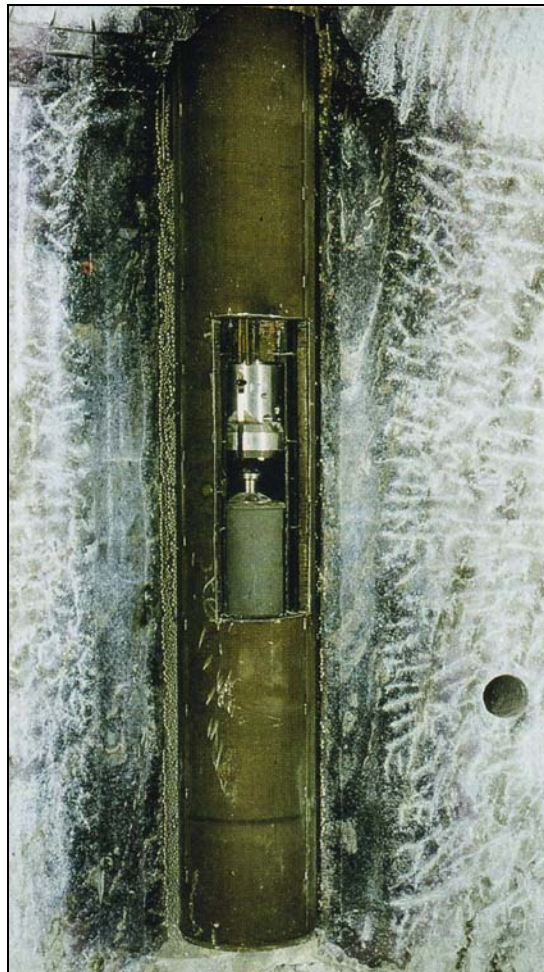
Im Rahmen des Brine Migration Tests wurde auch die Strahlenschädigung des Steinsalzes untersucht. Hohe Gamma-Dosen können Strahlenschäden im Steinsalz hervorrufen, bei denen Chlorgas und metallisches Natrium in kolloidaler Form gebildet werden. Hierbei wird Energie gespeichert. Um das Einlagerungsbohrloch mit den Kobalt-60-Quellen trat eine Blaufärbung auf, die jedoch nur maximal einen halben Meter in das Gebirge hineinreichte (Abb. 38). Diese sichtbare Strahlenschädigung des Steinsalzes ist auf eine radiolytische Wechselwirkung zurückzuführen.



**Abb. 37** Schematische Darstellung des Brine Migration Tests mit Kobalt-60-Quellen zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen hochradioaktiven Abfällen und Steinsalz /GSF 95/

Mit den Ergebnissen dieses Versuches sowie ergänzenden Laboruntersuchungen und Berechnungen konnte der Nachweis geführt werden, dass die Strahlenschädigung des Steinsalzes durch die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen kein sicherheitstechnisches Problem darstellt. Modellrechnungen zeigen, dass Strahlenschädigungen nur an den Rändern der Einlagerungsfelder zu erwarten sind. Im Hinblick auf die Langzeitauswirkungen sind die Strahlenschädigungen unbedenklich, da eine spontane Freisetzung der gespeicherten Energie nicht zu erwarten ist. Auch bei einer plötzlichen Freisetzung der gesamten um ein Einlagerungsbohrloch gespeicherten Energie sind nur geringe mechanische Auswirkungen zu erwarten, die auf einen Bereich von wenigen

Metern um das Einlagerungsbohrloch begrenzt sind. Potenzielle Strahlenschädigungen von Steinsalz werden in /GIE 93/ und /MÖN 97/ behandelt.



**Abb. 38** Brine Migration Test mit Kobalt-60-Quellen: nach Versuchsende freigelegtes Einlagerungsbohrloch; die als Blaufärbung sichtbare Strahlenschädigung im Steinsalz reicht weniger als einen halben Meter in das Gebirge hinein /GSF 95/

### Das HAW-Projekt

Das HAW-Projekt zur Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Abfälle in der Schachanlage Asse diente zur Erprobung der Einlagerungstechnik sowie zur Ermittlung wärmetechnischer Daten für Steinsalz /GIE 94/, /MÜL 95/, /ROT 95/. Die Ziele dieses europäischen Gemeinschaftsversuches (GSF, Kommission der Europäischen Gemeinschaften sowie Partner aus den Niederlanden, Frankreich und Spanien) waren:

- Entwicklung und Erprobung eines Transport- und Handhabungssystems für hochradioaktive Abfälle,
- Bestätigung und Verfeinerung der beim Kobalt-60-Versuch gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Überprüfung von Modellrechnungen,
- Entwicklung und Erprobung geeigneter Messmethoden zur Sicherheitsüberwachung eines Endlagers während der Bau- und Betriebsphase.

### **Anforderungen an die Versuchskonzeption**

Diese Ziele führten unter den für die Schachanlage Asse spezifischen Randbedingungen zu folgenden Anforderungen an die Versuchskonzeption:

1. Der Bereich, in dem die Einlagerung stattfinden soll, muss eine für ein Endlager repräsentative Form und Lage aufweisen.
2. Die Versuchsquellen müssen mit hochradioaktiven Abfällen sowohl hinsichtlich der Wärmeabgabe als auch der von ihnen ausgehenden Strahlung möglichst identisch sein.

Die erste Forderung konnte mit der Erstellung eines Versuchsfeldes auf der 800-m-Sohle der Schachanlage Asse einfach realisiert werden. Hierbei musste ein sinnvoller Kompromiss zwischen der Tiefe der „Endlagerbohrlöcher“ (300 m im Endlagerkonzept) und der Tiefe der „Versuchsbohrlöcher“ gefunden werden. Modellrechnungen ergaben hierfür eine geeignete Tiefe von 15 m.

Die Realisierung der zweiten Forderung eines Einsatzes radioaktiver Versuchsquellen musste sicherstellen, dass die Versuchsquellen nach der geplanten Versuchsdauer von fünf Jahren wieder aus dem Bergwerk entfernt werden konnten. Aufgrund der Bohrlochkonvergenz der Versuchsbohrlöcher war jedoch zu erwarten, dass die Versuchsquellen nach diesem Zeitraum nicht mehr aus den Bohrlöchern zu bergen gewesen wären. Die einzige Möglichkeit, eine Rückholbarkeit der Versuchsquellen zu gewährleisten, bestand darin, die Bohrlöcher mit massiven Verrohrungen zu versehen.

Die Versuchsquellen des HAW-Versuches wurden eigens in den USA hergestellt (Battelle Pacific Northwest Laboratories in Richland, Washington). Sie bestehen aus einem 60-l-Borosilikatglasblock, welcher mit den Radionukliden Cäsium-137 (als Hauptstrahlenquelle) und Strontium-90 (als Wärmeproduzent) dotiert ist. Das Glas wurde

flüssig in eine Edelstahlkokille - ein Zylinder mit etwas mehr als 1 m Höhe und rund 30 cm Durchmesser - abgefüllt. Nach Erstarren des Glases wurde die Kokille mit einer vollautomatischen Schweißmaschine gasdicht verschlossen, auf ihre Dichtheit überprüft, durch Elektropolieren dekontaminiert und für den Transport nach Deutschland bereitgestellt.

### **Transport der Versuchsquellen**

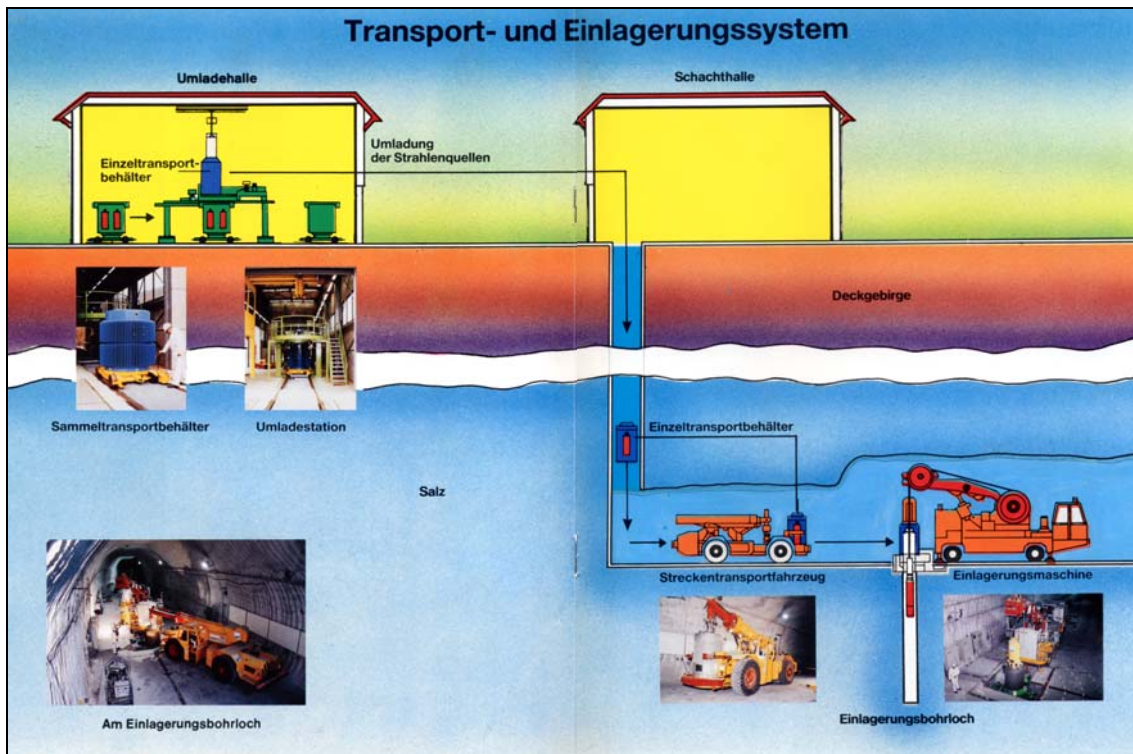
Die Versuchsquellen sollten auf der Schiene zur SchachanlageASSE geliefert werden. Für die Anlieferung waren Sammeltransportbehälter vorgesehen, mit denen jeweils fünf Versuchsquellen transportiert werden sollten. Die Sammeltransportbehälter hatten ein Gewicht von 22 t.

Da die maximale Nutzlast von Schacht 2 der SchachanlageASSE auf 10 t begrenzt ist, war für den weiteren Transport der Versuchsquellen nach unter Tage die Konstruktion und der Bau eines Einzeltransportbehälters sowie einer Umladestation erforderlich, an der die Versuchsquellen über Tage vom Sammeltransportbehälter in den Einzeltransportbehälter umgeladen werden konnten.

### **Transport- und Handhabungssystem für hochradioaktive Abfälle**

Ein wesentliches Ziel des HAW-Projektes war die Entwicklung eines Transport- und Handhabungssystems für hochradioaktive Abfälle. Einige Komponenten, wie Einzeltransportbehälter und Sammeltransportbehälter, wurden bereits frühzeitig im Zuge der Herstellung und des Transportes der Versuchsquellen gefertigt.

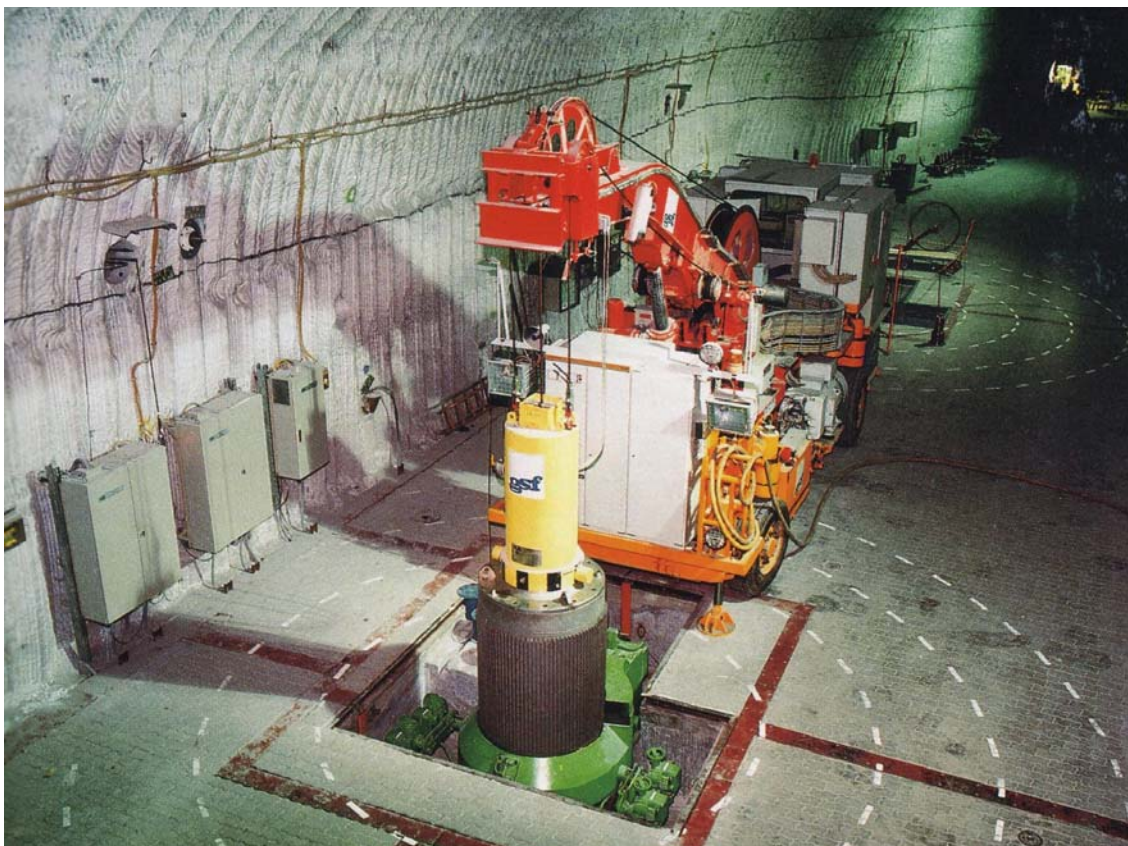
Für den Transport des Einzeltransportbehälters von der Umladestation über Tage zum Versuchsfeld unter Tage und die Einbringung der Versuchsquellen in die Einlagebohrlöcher war die Entwicklung weiterer Komponenten erforderlich, die in Abb. 39 dargestellt sind.



**Abb. 39** HAW-Versuch: Konzept des Transport- und Handhabungssystems für hochradioaktive Abfälle (Quelle: GSF)

Zum Transport des Einzeltransportbehälters von der Umladestation zum Schacht sollte ein Transportwagen zum Einsatz kommen, auf dem der Einzeltransportbehälter befestigt werden konnte. Der Schachttransport sollte über den Förderkorb erfolgen. Für den Transport unter Tage wurde ein Streckentransportfahrzeug konstruiert und gebaut, das mit einem Teleskopkranarm ausgerüstet war, um den Einzeltransportbehälter sowohl aus dem Förderkorb entnehmen als auch auf das Einlagerungsbohrloch absetzen zu können. Zur sicheren Fixierung des Transportbehälters während der Fahrt wurde eine Haltevorrichtung mit Klammern in das Streckentransportfahrzeug integriert.

Die Einlagerung der Versuchsquellen in die verrohrten Bohrlöcher sollte von einer speziell konstruierten Einlagerungsmaschine übernommen werden (Abb. 40). Sie wurde mit einer für 300 m tiefe Bohrlöcher ausgelegten Winde ausgerüstet und besaß eine programmierbare Steueranlage, eine eigene Abschirmglocke und Elektromotoren, die durch mitgeführte Batterien unabhängig von Stromausfällen waren.



**Abb. 40** HAW-Versuch zur Demonstrationseinlagerung hochradioaktiver Versuchsquellen: Einlagerungsmaschine am Einlagerungsbohrloch /GSF 95/

### **Vorzeitiger Abbruch des Projektes**

Nachdem die technischen Einrichtungen zur Durchführung des Versuches installiert und von den Genehmigungsbehörden abgenommen und zugelassen worden waren, wurde die Einlagerungstechnik mit Hilfe von Dummy-Kokillen erprobt. Die Umladung der Dummy-Kokille in einen speziellen Transportbehälter („Asse TB 1“), der Schachttransport, der Transport vom Schacht in die „Einlagerungsstrecke“ sowie die Entnahme der Dummy-Kokille aus dem Transportbehälter und ihr Einbringen in das „Einlagerungsbohrloch“ konnten erfolgreich demonstriert werden. Die Bedienungsmannschaft war nach zahlreichen Kalterprobungen des übertägigen Umladevorganges und der untertägigen Arbeitsabläufe mit dem Transportfahrzeug, der Einlagerungsmaschine und allen zugehörigen Komponenten sowie mit allen Abläufen vertraut.

Auch die Versuchsquellen und ihre Transportbehälter waren fertig gestellt und einsatzbereit. Der erforderliche Nachweis, dass alle 30 Strahlenquellen im Notfall innerhalb



von 72 Stunden aus der Schachanlage Asse entfernt werden können, konnte ebenfalls erbracht werden. Alle bergrechtlichen und atomrechtlichen Anträge waren gestellt und in Bearbeitung.

Die zu Vergleichszwecken in zwei Bohrlöchern eingebauten elektrischen Erhitzer liefen störungsfrei und hatten den Nachweis erbracht, dass die Verrohrungen die geforderte Stabilität besaßen. Die Versuche wurden durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm und Modellrechnungen begleitet und lieferten umfassende Daten zur Beschreibung des thermischen und mechanischen Verhaltens von Steinsalz /ROT 95/. Im Rahmen des Vorhabens wurden auch Messungen zur petrophysikalischen Beschreibung des Salzgesteins sowie zur Korrosion und Gasfreisetzung durchgeführt.

Im Laufe des Jahres 1992 wurde vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) in Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit entschieden, das HAW-Projekt - ebenso wie andere Großversuche - aus politischen Gründen einzustellen. Die GSF als Betreiber der Schachanlage Asse wurde aufgefordert, den beim Niedersächsischen Umweltministerium nach § 9 AtG gestellten Antrag zur zeitlich begrenzten Einlagerung der Versuchsquellen zurückzunehmen. Die GSF folgte dieser Aufforderung am 9. Dezember 1992. Damit war das HAW-Projekt vorzeitig beendet.

### **3.4 Arbeiten zur Direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen**

Die Ursprünge der Arbeiten zur Direkten Endlagerung von bestrahlten Brennelementen gehen auf den „Beschluss der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke“ vom 28. September 1979 zurück. Danach sollte das integrierte Entsorgungskonzept weiterverfolgt werden, aber auch andere Entsorgungstechniken, wie die Direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente, wurden als untersuchenswert aufgeführt.

Zur Klärung der technischen Realisierbarkeit und Finanzierbarkeit der Direkten Endlagerung und zur Feststellung, ob dieser Entsorgungsweg möglicherweise sicherheitstechnische Vorteile gegenüber der Wiederaufarbeitung bietet, erhielt das damalige Kernforschungszentrum Karlsruhe vom Bundesministerium für Forschung und Technologie den Auftrag, den aktuellen Kenntnisstand zur Direkten Endlagerung zusammenzustellen und die erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufzuzeigen.

Für die Weiterführung der Arbeiten wurden die Verantwortlichkeiten dergestalt festgelegt, dass der Bund die Zuständigkeit für die Endlagerung übernahm, während die Industrie die Aufgabe erhielt, die Konditionierungstechniken und die Endlagerbehälter weiterzuentwickeln. Diese Arbeiten wurden von der Brennelementlager Gorleben GmbH (BLG) und der Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS) übernommen.

Die vom Bund zu erbringenden Arbeiten wurden auf verschiedene Institutionen aufgeteilt. Unter der Federführung des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) - seit 1995 Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) - waren das KfK, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) und die GSF daran beteiligt, die Direkte Endlagerung bis zur Anwendungsreife zu entwickeln und zu demonstrieren.

### **Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur Direkten Endlagerung**

Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur Direkten Endlagerung wurde in drei Teilbereiche untergliedert:

- Planungsarbeiten für ein Endlagermischkonzept,
- Demonstrationsversuche zur Direkten Endlagerung,
- Experimentelle Untersuchungen.

Der Nachweis der technischen Machbarkeit der Direkten Endlagerung erfolgte mit Hilfe von vier Demonstrationsversuchen /ENG 96/:

- **Simulation des Schachttransportes (SST):**  
Konzeption und Erprobung einer Schachtförderung für 85 t Nutzlast.
- **Handhabungsversuche zur Streckenlagerung (HHV):**  
Konzeption und Erprobung des untertägigen Transport- und Einlagerungssystems.
- **Aktives Handhabungsexperiment mit einer Neutronenquelle (AHE):**  
Ermittlung der durch Rückstreuung von Neutronen an Salzgestein hervorgerufenen Strahlenexposition des Einlagerungspersonals.

- **Thermische Simulation der Streckenlagerung (TSS):**  
Untersuchung der Eigenschaften und des Verhaltens des Versatzmaterials Salzgrus und des die Einlagerungsstrecken umgebenden Gebirges bei Wärmeeintrag aus Großbehältern.

Im Rahmen sicherheitsanalytischer Arbeiten wurde auch ein Mischkonzept mit verschiedenen Endlagervarianten untersucht und bewertet, bei dem sowohl Abfälle aus der Wiederaufarbeitung als auch direkt eingelagerte abgebrannte Brennelemente gemeinsam in unterschiedlichen Anteilen und mit verschiedenen Techniken endgelagert werden.

### **Thermische Simulation der Streckenlagerung**

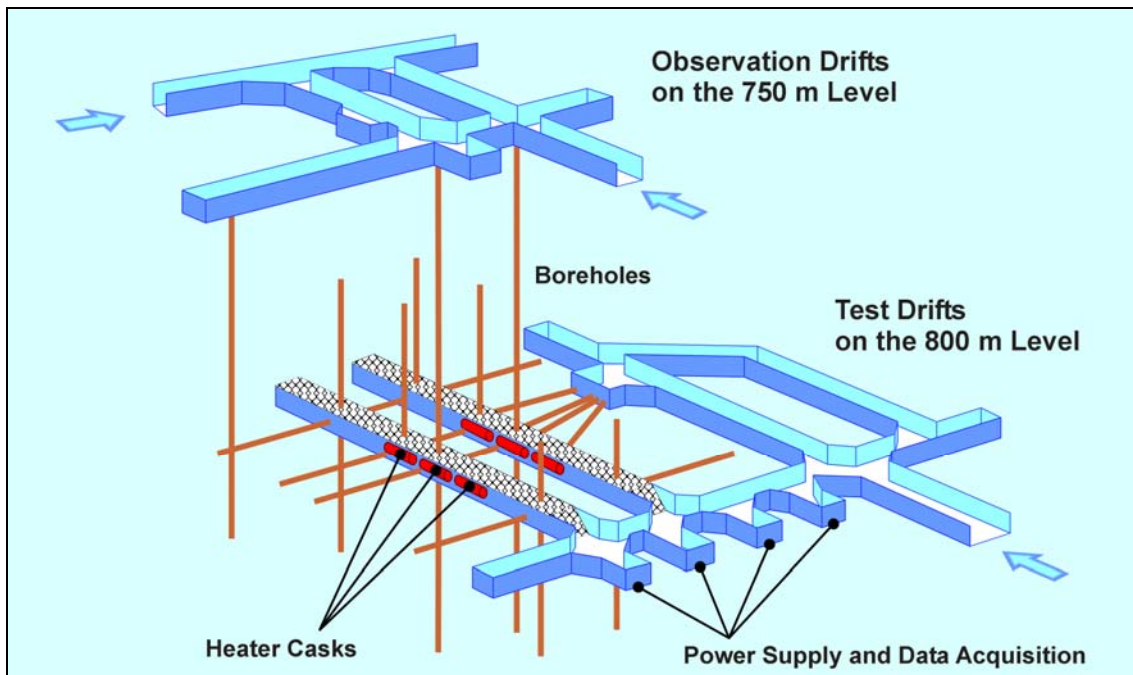
Nach dem Konzept der Direkten Endlagerung werden abgebrannte Brennelemente in selbstabschirmende Pollux-Behälter eingebracht und in den Strecken eines Endlagerbergwerkes eingelagert. Die Einlagerungsstrecken werden anschließend mit Salzgrusversatz verfüllt. Zum Nachweis ihrer technischen Machbarkeit wurde die Streckenlagerung mit Hilfe eines Demonstrationsversuches auf der 800-m-Sohle der SchachanlageASSE simuliert. Mit den ersten Vorarbeiten zu diesem Versuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung wurde bereits im Jahr 1985 begonnen. Das Projekt umfasste nicht nur in situ-Untersuchungen, sondern auch begleitende Laborexperimente und Modellrechnungen.

Hauptziele des Versuches waren die Untersuchung der thermomechanischen Prozesse in dem die Einlagerungsstrecken umgebenden Gebirge und das Verhalten von Salzgrusversatz unter endlagerrelevanten Bedingungen sowie die Validierung und Verbesserung von Rechenmodellen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus. Hierdurch sollte ein wesentlicher Beitrag zum Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle erbracht werden. Weitere Ziele des Projektes waren:

- die Auswahl eines geeigneten Verfahrens zum Verfüllen der Einlagerungsstrecken im späteren Endlager,
- die Erprobung von Messmethoden zur Überwachung und Beweissicherung im Endlager,

- die Analyse der durch Aufheizung aus dem Versatzmaterial und Korrosion der Behälter freigesetzten Gase,
- die Ermittlung der Korrosion unterschiedlicher Behältermaterialien.

Das Versuchsfeld bestand aus zwei parallelen Versuchsstrecken von jeweils 70 m Länge, 4,5 m Breite und 3,5 m Höhe auf der 800-m-Sohle sowie Zugangs- und Beobachtungsstrecken auf der 750-m- und 800-m-Sohle /DRO 01/ (Abb. 41). In die beiden Versuchsstrecken wurden jeweils drei Pollux-Behälterattrappen von 5,5 m Länge, 1,5 m Durchmesser und einem Gewicht von 65 t eingebracht, die mit elektrischen Heizern ausgerüstet wurden. Die Behälterabmessungen und die Erhitzerleistung von 6,4 kW pro Behälter waren entsprechend den Daten der für eine Endlagerung abgebrannter Brennelemente vorgesehenen Pollux-Behälter ausgelegt.



**Abb. 41** TSS-Versuchsfeld in der Schachtanlage Asse mit den beiden versetzten Versuchsstrecken auf der 800-m-Sohle sowie Zugangs- und Beobachtungsstrecken auf der 750-m- und 800-m-Sohle

Nach dem Einbringen der Behälterattrappen wurden die beiden Versuchsstrecken mit Salzgrusversatz verfüllt (Abb. 42). Die Versatzeinbringung erfolgte mit Hilfe der Schleudertechnik, die sich im Laufe von Vorversuchen als das am besten geeignete Verfahren erwiesen hatte. Zur Erfassung der durch die Aufheizung verursachten thermomechanischen Reaktionen wurden zahlreiche Messinstrumente in Bohrlöchern und

im Versatz sowie an der Oberfläche der Behälter installiert. Bei den Messgeräten kamen vielfach Spezialanfertigungen zum Einsatz, die für hohe Temperaturen, hohe Drücke und gegen Korrosion ausgelegt waren.



**Abb. 42** TSS-Versuchsfeld: teilversetzte Versuchsstrecke mit Behälteratrasse und installierter Messinstrumentierung (Quelle: DBE)

Mit der Einschaltung der elektrischen Erhitzer am 25. September 1990 wurde der in situ-Versuch gestartet. Das vorgesehene Temperaturmaximum von 210°C an der Behälteroberfläche wurde innerhalb weniger Monate erreicht /DRO 01/. Durch die Aufheizung kam es zu einem raschen Temperaturanstieg im umgebenden Versatz und Gebirge. Die thermisch induzierten Spannungsumlagerungen führten zu einer deutlichen Beschleunigung der Konvergenzraten in den Versuchsstrecken und damit wiederum zu einer zunehmenden Kompaktion und Stützwirkung des in den Strecken eingebrachten Versatzes. Aufgrund der infolge der Kompaktion zunehmenden Wärmeleitfähigkeit des Versatzes nahmen die Temperaturen an der Behälteroberfläche in der Folge wieder ab und erreichten nach wenigen Jahren stationäre Werte von ca. 160 - 170°C.

Die Heizphase wurde nach über 8 Jahren am 1. Februar 1999 beendet. Bis zu diesem Zeitpunkt lagen umfangreiche Messreihen zum Temperaturverlauf, zu den Gebirgs-

spannungen und -verformungen sowie zum Versatzverhalten (Versatzdichte, Versatzdrücke, Versatzsetzung) vor. Die Porosität des Versatzes hatte sich bis dahin von ursprünglich 35 % auf 20 - 25 % verringert.

Zur Modellierung der gekoppelten THM-Prozesse wurden mehrere Stoffmodelle und Rechenprogramme für Salzversatz und das Salzgebirge entwickelt, die anhand von Benchmark-Rechnungen und deren Vergleich mit Messdaten im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projektes „Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories (BAMBUS)“ überprüft wurden /BEC 99/, /BEC 04/. Dabei konnten die meisten Stoffmodelle validiert werden. Die in situ beobachteten THM-Prozesse konnten mit den Modellierungen gut interpretiert und prognostiziert werden, wobei 3D-Modellierungen zu deutlich besseren Ergebnissen führten.

Nach dem Abschalten der Erhitzer wurden die in situ-Messungen während der anschließenden Abkühlungsphase bis Ende März 2000 fortgesetzt. Zur Qualitätssicherung der in situ-Messergebnisse wurde von August 2000 bis Mai 2001 eine der beiden Versuchsstrecken wieder aufgefahren, um weitere Nachuntersuchungen zu ermöglichen (Abb. 43). Bei der Auffahrung wurden die eingebauten Messinstrumente wieder geborgen und systematisch Proben für weitere Laboruntersuchungen aus dem kompaktierten Versatz entnommen (Abb. 44). Mit diesen Laboruntersuchungen konnten die Ergebnisse der in situ-Messungen validiert werden /ROT 03/.

Die Nachuntersuchung und Rekalibrierung der geborgenen Messgeräte bestätigten die hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit der eingesetzten Messinstrumentierung, die über einen Zeitraum von über 10 Jahren unter den in einem Endlager zu erwartenden Randbedingungen betrieben wurde. Die robuste Bauweise der Messgeber, die ursprünglich nur auf eine Versuchsdauer von drei bis fünf Jahren ausgelegt war, erwies sich als geeignet für die Langzeitüberwachung eines Endlagers im Steinsalz /DRO 03/, /BOL 04/.



**Abb. 43** TSS-Versuchsfeld: Wiederauffahrung einer Versuchsstrecke



**Abb. 44** TSS-Versuchsfeld: Probenahmestellen im kompaktierten Versatz

### 3.5 Qualifizierung geotechnischer Barrieren

In den "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" vom 5. Januar 1983 /BMI 83/ wird gefordert, dass der Einschluss der Radionuklide durch ein Mehrbarrierensystem<sup>1</sup> gewährleistet werden muss: *"Beim Endlager wird zum sicheren Abschluss gegen die Biosphäre eine Kombination folgender möglicher Barrieren betrachtet: Abfallform - Verpackung - Versatz - Endlagerformation - Deckgebirge / Nebengestein. Durch einzelne oder die Summe dieser Barrieren muss sichergestellt werden, dass nach menschlichem Ermessen keine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Biosphäre erfolgt."*

Diese Anforderung in den vom Bundesinnenminister erlassenen Kriterien verdeutlicht das Zusammenwirken von Barrieren. Entwicklung und Erprobung der beiden erstgenannten Barrieren „Abfallform“ und „Verpackung“ ist Aufgabe der Industrie. In die Zuständigkeit des Bundes fallen das Endlager und damit die Bewertung der dort zu errichtenden geotechnischen Barrieren und die Untersuchung ihrer Wechselwirkungen mit dem umgebenden Wirtsgestein sowie möglicher Aus- und Rückwirkungen auf Nebengestein und Deckgebirge.

#### **Versatz**

Die nach der Einlagerung der radioaktiven Abfälle verbleibenden Hohlräume eines Endlagerbergwerks werden bereits während der Betriebsphase eines Endlagers so weit wie möglich mit geeignetem Versatzmaterial verfüllt. Der eingebrachte Versatz dient dazu, den als Störfall unterstellten Zutritt von Wasser oder Salzlösungen zu behindern und eventuell daraus resultierende Schadstofftransporte zu unterbinden oder zumindest zu verzögern. Langfristig übernimmt der Versatz durch seine im Laufe der Zeit zunehmende Verdichtung („Kompaktion“) eine wesentliche Stütz- und Abdichtfunktion.

Als bestgeeigneter Versatz wird das ursprünglich in den Hohlräumen vorhandene Gestein oder ein gleichwertiges Material angesehen („arteigener Versatz“). Bei der Auswahl eines geeigneten Versatzmaterials ist daher in erster Linie das Wirtsgestein von

---

<sup>1</sup> Nach heutiger Terminologie muss der einschlusswirksame Gebirgsbereich als Teil des geologischen Gesamtsystems des Standortes im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschluss, Streckenverschluss) die Isolation der Abfälle sicherstellen



Interesse. Für ein Endlager in Salzgestein wurden vor diesem Hintergrund die Materialeigenschaften von Salzhauwerk und Salzgrus, insbesondere das Kompaktionsverhalten und die Permeabilität, sowohl im Labor als auch in situ intensiv untersucht.

Durch zahlreiche nationale und internationale FuE-Arbeiten liegen heute umfangreiche Kenntnisse zum Verhalten von Salzgrusversatz in einem Endlager vor /MLY 99/, /ROT 99/, /DRO 01/, /HÖH 98/, /BEC 99/, /BEC 04/, /STÜ 98/, /STÜ 02/. Zur Modellierung der im Versatz auftretenden THM-Prozesse wurden Stoffgesetze und Rechenprogramme entwickelt, die durch Vergleich mit Messergebnissen von in situ-Experimenten überprüft wurden.

Die bei der Einlagerung von Abfallgebinden in tiefen vertikalen Bohrlöchern auftretenden Stapelkräfte können zu einem Verlust der Integrität der Gebinde führen, wenn keine lastabtragenden Maßnahmen erfolgen. Durch den Versatz im Hohlraum zwischen den eingelagerten Gebinden sowie im Ringspalt zwischen Gebinden und Bohrloch können die Stapelkräfte weitgehend in das Gebirge abgeleitet und damit die Druckbelastung auf die Gebindesäule auf ein sicherheitstechnisch beherrschbares Maß begrenzt werden.

Zur Lastabtragung hat sich insbesondere die Einbettung der Abfallgebinde in Salzgrus als vorteilhaft erwiesen. Dies zeigte sich bei Experimenten, die in den 1990er Jahren im Forschungszentrum Jülich und in der Schachanlage Asse durchgeführt wurden.

Die Laborversuche in Jülich /FEU 98/ erfolgten in zwei Prüfständen mit Rohren von 25 cm Durchmesser und 2,5 m Höhe bzw. 60 cm Durchmesser und 5,5 m Höhe, die mit Druckaufnehmern zur Messung des Radialdrucks längs der Versatzsäule und des Vertikaldrucks an deren Boden versehen waren. Unter Variation aller maßgebenden Parameter von Salzgrus und Bohrloch wurden die Druckverteilungen in den Prüfständen gemessen und mit theoretischen Verteilungen verglichen, die auf Grundlage eines semi-hydrostatischen Modells berechnet wurden. Die Versuche zeigten die Wirksamkeit der Lastabtragung und die daraus folgende Beschränkung der Druckbelastung auf die Gebinde sowie die Möglichkeit der Berechenbarkeit dieser Drücke im Rahmen der technischen Auslegung und der Sicherheitsbetrachtungen mittels validierter Berechnungsmodelle.

In der Schachanlage Asse wurde auf der 490-m-Sohle eine Versuchsanlage für Schüttgutuntersuchungen an Versatzmaterialien aufgebaut (Abb. 45). Der untertägige

Prüfstand hatte eine Grundfläche von ca. 5 m<sup>2</sup> und eine Höhe von 13 m. Er bestand im Inneren aus einer aus Brunnenringen aufgebauten Röhre, in die unterschiedliche Schüttgüter (Salzgrus, Kalkstein, Splitt, Mergel) und Messinstrumente eingebaut werden konnten, um sowohl bodenmechanische Fragestellungen als auch die Lastabtragung durch Siloeffekte zu untersuchen.



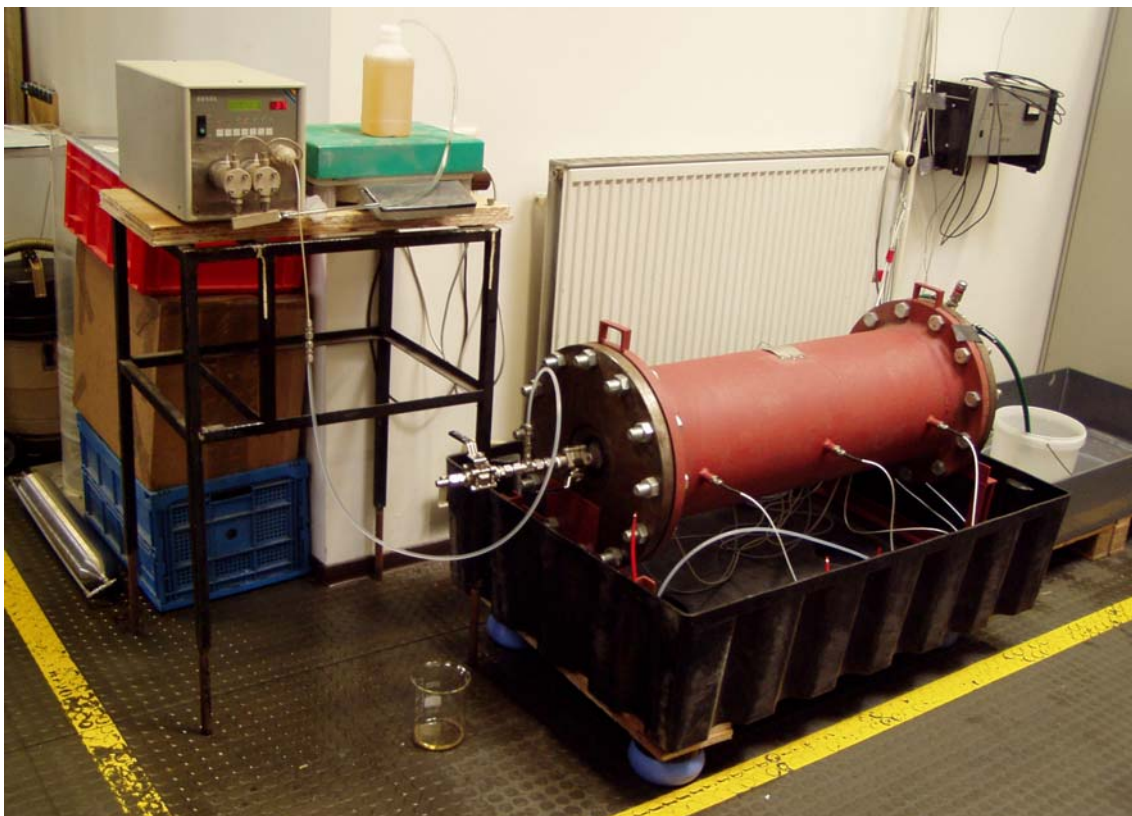
**Abb. 45** Versuchsanlage für Schüttgutuntersuchungen an Versatzmaterialien auf der 490-m-Sohle der Schachanlage Asse /GSF 95/

### **Selbst Verheilender Versatz**

In Ergänzung zum Konzept der Streckenverfüllung mit Salzgrusversatz wird gegenwärtig ein Konzept eines so genannten „Selbst Verheilenden Versatzes (SVV)“ entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein feinkörniges, trockenes Versatzmaterial auf Basis eines wasserfreien Magnesiumsulfats, das pneumatisch in die zu versetzenden Hohlräume eingebracht werden kann /HER 05/.

Das Versatzmaterial reagiert bei Lösungszutritt unter Volumenzunahme. Die Bildung hydratisierter Minerale führt in einem geschlossenen Volumen zum Aufbau eines Kristallisationsdruckes, der das Porenvolumen reduziert und zur Abdichtung führt. Ein weiteres Zutreten von Lösungen wird damit unterbunden. Die zutretende Lösung wird bei dieser Reaktion vollständig verbraucht, so dass der Versatz am Ende fast trocken ist.

Das System wurde im Rahmen von Labor- und in situ-Versuchen erprobt. Die Experimente erfolgten mit identischem Versuchsaufbau, aber in unterschiedlichem Maßstab, um Skalierungseffekte beim Bau von Abdichtungen in einem Endlager zu vermeiden. Die ersten Laborversuche erfolgten in kleinen Druckzellen. Für die anschließenden Technikumsversuche wurden Rohre von 1 m Länge und 40 cm Durchmesser verwendet (Abb. 46). Die in situ-Versuche wurden auf der 850-m-Sohle der Schachanlage Asse in Bohrlöchern von 15 m Länge und 50 cm Durchmesser durchgeführt (Abb. 47).



**Abb. 46** Technikumsversuch mit „Selbst Verheilendem Versatz (SVV)“: Messung des Kristallisationsdruckes in einem Rohr von 1 m Länge und 40 cm Durchmesser



**Abb. 47** In situ-Versuch mit „Selbst Verheilendem Versatz (SVV)“ in der Schachanlage Asse in Bohrlöchern von 15 m Länge und 50 cm Durchmesser

Die bisherigen Untersuchungen haben eine signifikante Reduzierung der Versatzporosität von ursprünglich 50 % auf ca. 2 % nachgewiesen /HER 05/. Es wurden Permeabilitätswerte von ca.  $10^{-18}$  -  $10^{-19}$  m<sup>2</sup> erreicht. Die gesteinsmechanischen Eigenschaften der entstandenen Abdichtung sind mit den Werten von ungestörtem Steinsalz vergleichbar. Die geochemischen Modellierungen ergeben eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Die Berechnungen zeigen, dass sich langfristig stabile Mineralphasen einstellen.

### **Verschlüsse und Verschlussbauwerke**

Zur Unterstützung der Abdichtfunktion des Versatzes dienen die zusätzlichen geotechnischen Barrieren Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschluss. Sie sollen vom Zeitpunkt ihrer Errichtung bis zum Erreichen der gewünschten Dichtheit des Versatzes - und wenn möglich auch noch darüber hinaus - die Schutzfunktion übernehmen.

## **Bohrlochverschlüsse**

Eine Einlagerung in Bohrlöcher ist für wärmeentwickelnde mittel- und hochradioaktive Abfälle vorgesehen. Der gewünschte Bohrlochverschluss muss dementsprechend für diese Abfälle ausgelegt werden. Ein Bohrlochverschluss hat vor allem die Aufgabe, freigesetzte Schadstoffe zurückzuhalten und das Bohrloch gegenüber Lösungszutritten abzudichten. Andererseits soll der Aufbau hoher Gasdrücke in den Einlagerungsbereichen vermieden werden, wofür eine gewisse Durchlässigkeit der Barriere erforderlich ist

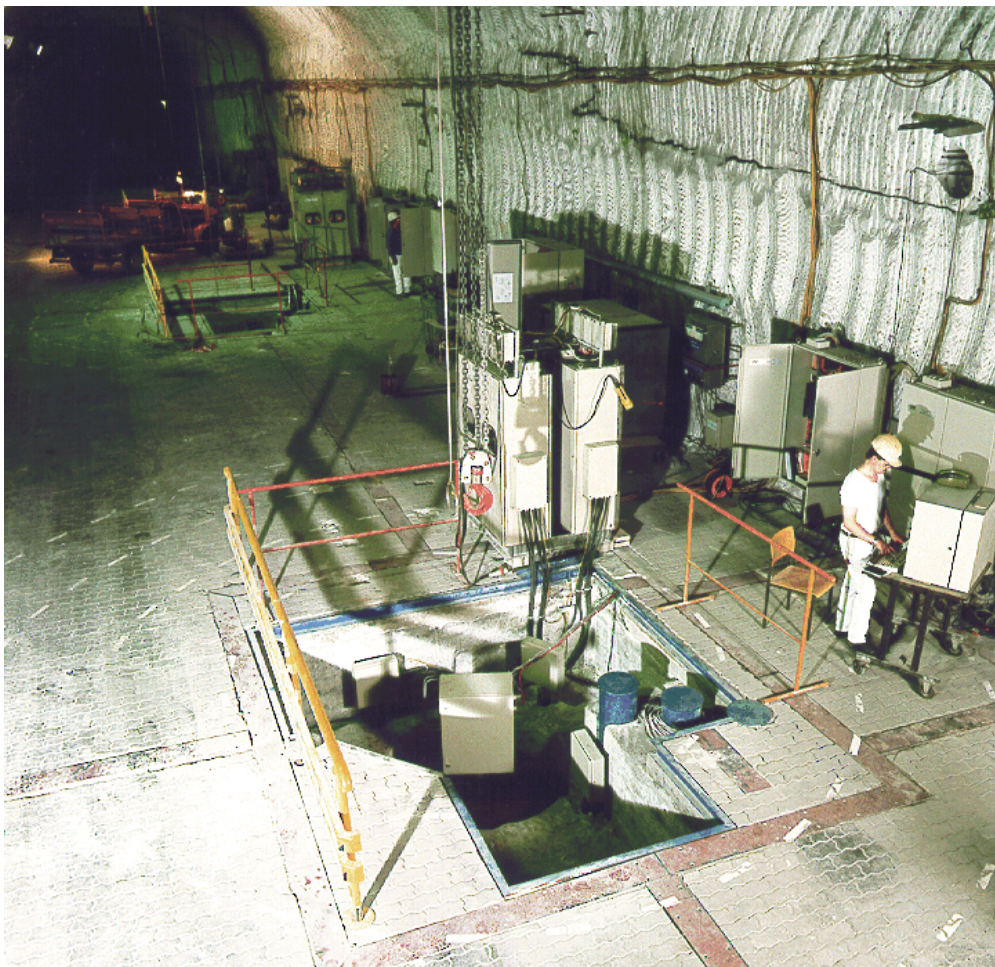
Salzgrusversatz kann als Verschlussmaterial beide Ziele erfüllen. Lockerer Salzgrus weist nach seiner Einbringung eine relativ hohe Anfangsporosität bzw. -permeabilität auf. Dadurch können die anfänglich vergleichsweise großen Mengen an gebildeten Korrosionsgasen aus dem Endlagerbereich abströmen, so dass der Aufbau höherer Gasdrücke vermieden wird. Infolge der Bohrlochkonvergenz nimmt die Versatzporosität bzw. -permeabilität in der Folge sukzessive ab. Es wird erwartet, dass in der Nachbetriebsphase langfristig die Werte des unverritzten Gebirges erreicht werden und damit eine hohe Dichtwirkung gegenüber einem Schadstoffaustrag bzw. einem Lösungszutritt eintritt.

Die notwendigen Untersuchungen zur Überprüfung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus in HAW-Endlagerbohrlöchern erfolgten von 1996 bis 1999 im Rahmen der beiden DEBORA-Versuche („Development of Borehole Seals for High-level Radioactive Waste“) auf der 800-m-Sohle der Schachanlage Asse (Abb. 48). Das Gesamtziel des DEBORA-Projektes bestand darin, die Gültigkeit der in thermomechanischen Rechenprogrammen verwendeten Modellansätze und die zugehörigen Daten zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Salzgrus durch gezielte Labor- und in situ-Versuche zu überprüfen und damit einen Beitrag zur Führung des Langzeitsicherheitsnachweises von HAW-Endlagern zu erbringen /ROT 99/. Das Vorhaben wurde im Rahmen des BAMBUS-Projektes /BEC 99/ von der Europäischen Kommission gefördert.

Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen - Temperaturen, Bohrlochkonvergenzen, Korngrößen des Salzgrusversatzes - in verschiedenen Bohrlochabschnitten wurden zwei unabhängige in situ-Versuche durchgeführt, bei denen die unterschiedlichen Verhältnisse im Ringspalt zwischen den wärmeproduzierenden Kokillen und dem

Gebirge (Debora 1) und im Verschlussbereich eines HAW-Endlagerbohrloches oberhalb der Kokillensäule (Debora 2) simuliert wurden.

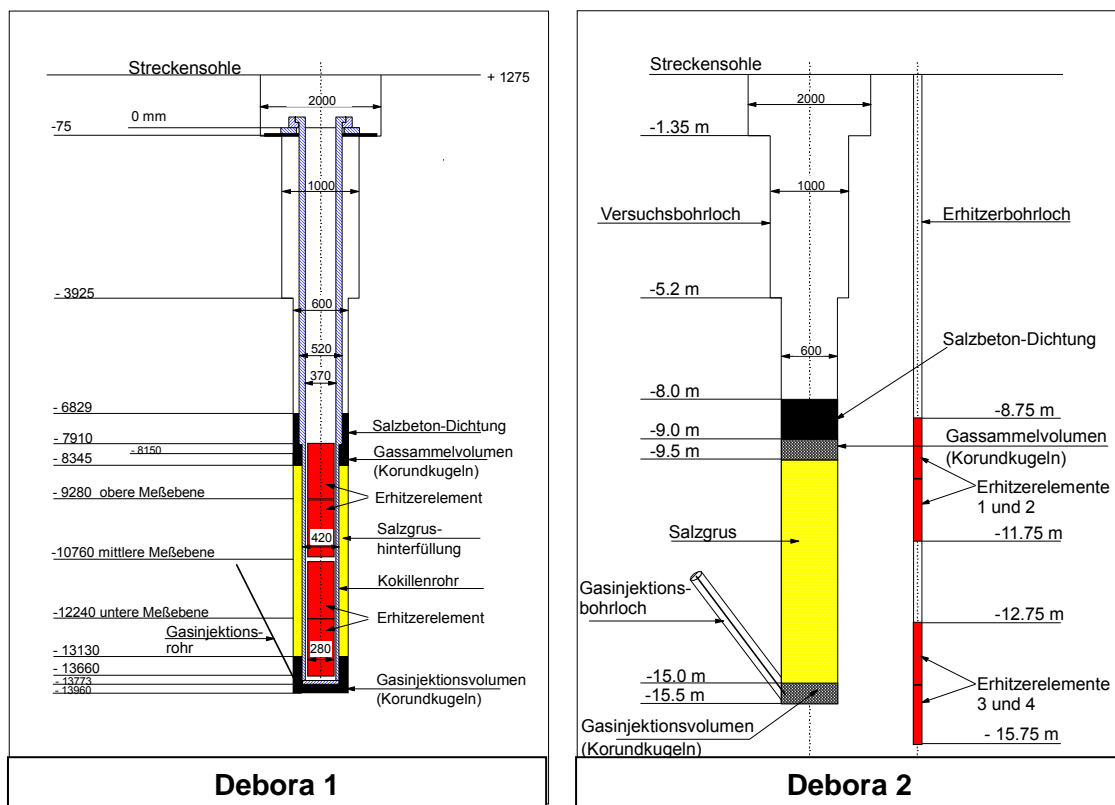
Der Aufbau der Debora-Versuche ist in Abb. 49 dargestellt. Beide Experimente wurden in Bohrlöchern von 0,6 m Durchmesser und ca. 15 m Tiefe durchgeführt. Im Debora 1-Versuch wurden die wärmeproduzierenden Kokillen durch eine beheizte Verrohrung innerhalb des Bohrloches simuliert. Bei Debora 2 erfolgte der Wärmeeintrag in den Verschlussbereich durch vier außerhalb des Bohrloches installierte Erhitzer.



**Abb. 48** DEBORA-Versuche im HAW-Versuchsfeld auf der 800-m-Sohle der Schachtanlage Asse

Die Erhitzer wurden Anfang 1997 in Betrieb genommen. Innerhalb der jeweiligen Versuchsdauer von 12 bzw. 15 Monaten wurden maximale Salzgrustemperaturen von 185°C bzw. 135°C erreicht. Die Bohrlochkonvergenz betrug im Versuchszeitraum maximal 25,5 mm bzw. 42,5 mm /ROT 99/.

Die in situ-Versuche wurden mit dem Abschalten der Erhitzer im Dezember 1998 beendet. Zur Bewertung der erzielten Ergebnisse wurden noch bis März 1999 Nachuntersuchungen am kompaktierten Versatz durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben eine relativ gute Übereinstimmung mit den Prognoserechnungen. Insbesondere die für das Langzeitverhalten des kompaktierenden Versatzes relevanten geringeren Kompaktionsraten zum Ende der Versuche wurden gut prognostiziert. Mit den verwendeten Materialmodellen ist demnach eine Vorhersage des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz möglich.



**Abb. 49** Schematische Darstellung der beiden DEBORA-Versuche zur Untersuchung des Verhaltens von Salzgrus (a) als Bohrlochversatz im Ringspalt zwischen den Erhitzern und dem Gebirge (Debora 1) und (b) als Bohrlochverschluss oberhalb der Kokillensäule (Debora 2)

Im Rahmen des Debora-Projektes wurde erstmals auch das Durchlässigkeitsverhalten von kompaktierendem Salzgrusversatz in situ untersucht und damit ein wesentlicher Beitrag zur Absicherung der in Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Modellansätze erbracht. Die Permeabilitätsmessungen erfolgten mittels Gasinjektionen (Stickstoff). Aus den in situ und im Labor gewonnenen Daten wurde eine für die Langzeitsicher-

heitsanalysen wichtige Relation zwischen der Permeabilität und der Porosität abgeleitet /ROT 99/.

### **Abschlussbauwerke**

Zur Errichtung von Kammer- und Streckenabschlussbauwerken liegen auf der Schachanlage Asse zahlreiche Erfahrungen vor. Bereits 1971 wurde auf der 750-m-Sohle der erste Verschluss für eine Kammer, in der schwachradioaktive Abfälle eingelagert worden waren, gebaut. In den Folgejahren wurden nahezu alle Einlagerungskammern mit einem Kammerverschluss versehen. Auf das hierbei erworbene Know-how konnte 1984 beim Bau eines Abschlussbauwerkes im Kalibergwerk Hope und 1986 beim Bau eines Streckenverschlusses in der Schachanlage Asse zurückgegriffen werden.

### **Streckenverschluss auf der 750-m-Sohle**

Auf der 750-m-Sohle der Schachanlage Asse wurde 1986 ein Streckenverschluss als Abschluss einer mit Salzhautwerk verfüllten Strecke errichtet. In und um dieses 6 m lange, über 5 m breite und in der Mitte 4,5 m hohe Bauwerk wurden über 100 Druckmesszellen sowie zahlreiche Temperatur- und Feuchtigkeitsmessgeber eingebaut. Mit diesen Messungen sollte die Eignung von Salzbeton als Baustoff für ein Streckenabschlussbauwerk untersucht werden. Die erzielten Ergebnisse gingen in die Planung des Großversuches „Dammbau im Salzgebirge“ ein.

### **Dammbau im Salzgebirge**

Bereits im Jahr 1984 lagen die Ergebnisse einer mehrjährigen Methodenentwicklung vor, deren Aufgabe die Abschätzung der radiologischen Konsequenzen war, die in einem Endlager im Salz bei einem Wasserzutritt zu Beginn der Nachbetriebsphase auftreten würden. Diese Rechnungen des Projektes „Sicherheitsstudien Entsorgung“ zeigten, dass Dammbauwerke zum Verschluss von Einlagerungstrecken sowohl beim Sofortschutz als auch hinsichtlich der Langzeitsicherheit eine wesentliche Rolle im Zusammenwirken des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit geotechnischen Verschlüssen übernehmen:

- schon während der Betriebsphase können mit radioaktiven Abfällen befüllte Bereiche eines Endlagers sofort und sicher verschlossen werden,



- bei einem Wasser- oder Lösungszutritt in der Nachbetriebsphase leisten standfeste, lösungsundurchlässige und gasdichte Dämme einen wesentlichen Beitrag, um einen Kontakt von Wasser oder Lösungen mit den Abfällen zu vermeiden und mögliche Radionuklidausbreitungen zu verhindern.

Um die Wirksamkeit und technische Machbarkeit eines Dammbauwerkes zu demonstrieren, sollten in der Schachtanlage Asse die wesentlichen Komponenten eines Endlagerdammes - Kurzzeit- und Langzeitdichtung sowie statisches Widerlager - in einem Versuchsdammbauwerk erprobt werden. Die genannten Komponenten haben verschiedene Funktionen bei der Gewährleistung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit eines Dammbauwerkes. Das aus Salzbeton bestehende Widerlager dient zur Aufnahme des Gebirgsdruckes sowie zur Ableitung der bei Aufbringung eines Gas- oder Lösungsdruckes auftretenden Kräfte in das Gebirge. Die Langzeitdichtung aus Salzbricketts soll die Dichtfunktion übernehmen und diese nach einem Ausfall der Kurzzeitdichtung langfristig gewährleisten. Bei der hydraulischen Kurzzeitdichtung handelt es sich um ein Multikomponentensystem, das bereits während der Betriebsphase eine wirkungsvolle Abdichtung garantieren soll. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für die langzeitige Dichtheit eines Dammbauwerkes wurde ein gesondertes Versuchsbauwerk zur Untersuchung der Komponente „Langzeitdichtung“ geplant.

Die Planungsarbeiten wurden von DBE, BGR und GSF unter der Projektleitung der DBE durchgeführt. Aus den Anforderungen an das Dammbauwerk wurden folgende Versuchsziele abgeleitet:

- Validierung der Modelle zum Nachweis der Standsicherheit als Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Dammbauwerkes,
- Überprüfung der Funktionsfähigkeit (Dichtheit) der Dammbaukomponenten und des Gesamtdammbauwerkes bei Flüssigkeits- und/oder Gasdruckbelastung,
- Analyse eventueller Schwachstellen in der Funktionsfähigkeit (Störfallanalyse),
- Bestimmung der Permeabilität des Dammbauwerkes (Einzelkomponenten und Gesamtbauwerk),
- Überprüfung des Materialverhaltens der eingesetzten Baustoffe.

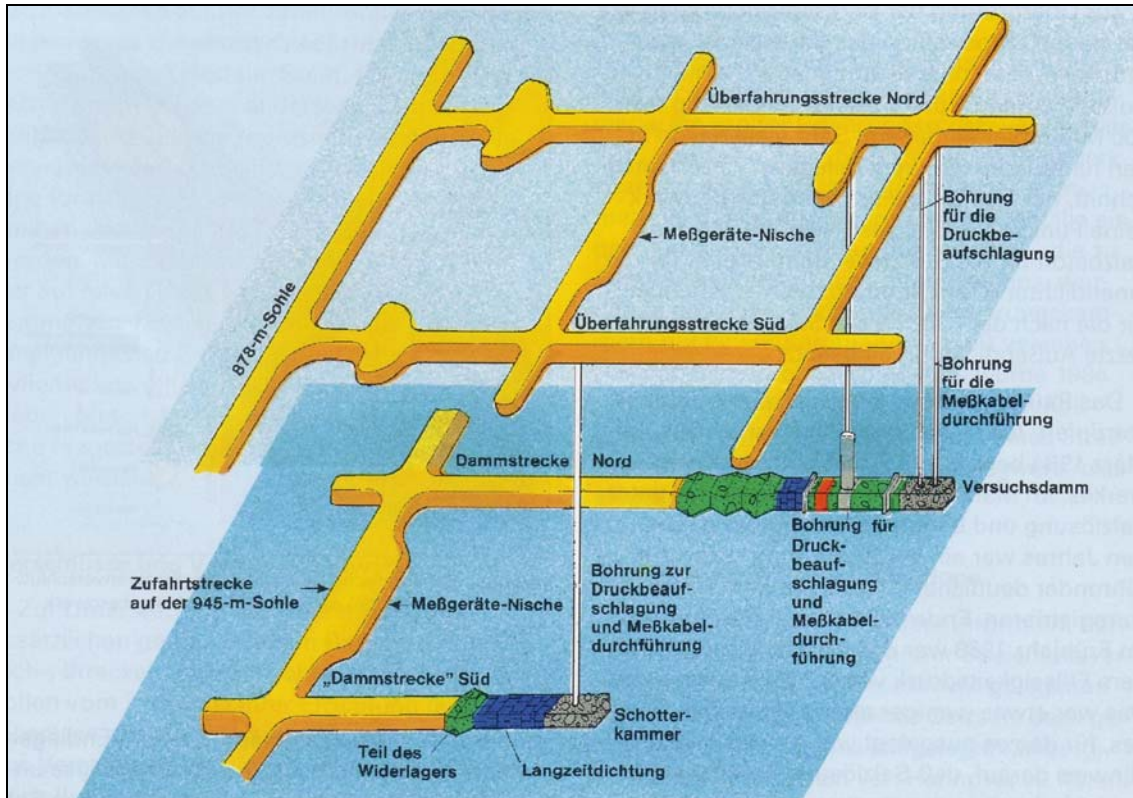
Das Versuchskonzept sah vor, die Wirksamkeit der einzelnen Bauelemente gegenüber Flüssigkeits- und Gasdruck bis zur Höhe des hydrostatischen Druckes in der Betriebsphase und bis in den Bereich des petrostatischen Druckes in der Nachbetriebsphase

zu testen. Der Versuch sollte mit dem Aufbringen eines Gasdruckes von maximal 11 MPa beginnen. Um die Ausbreitung des Druckmediums verfolgen zu können, sollte heliummarkierte Luft verwendet werden. Anschließend sollte ein Flüssigkeitsversuch mit gesättigter Steinsalzlösung als Druckmedium folgen, wobei ein maximaler Prüfdruck von 19 MPa festgelegt wurde /STO 94/.

Mit der Auffahrung des in Abb. 50 dargestellten Dammbauversuchsfeldes wurde 1987 begonnen. Zunächst wurden die Überfahrungsstrecken auf der 878-m-Sohle erstellt und mit einer umfangreichen Messinstrumentierung versehen. Anschließend wurden die Versuchsstrecken auf der 945-m-Sohle aufgefahren und die Bohrungen für die Druckbeaufschlagung erstellt, zum Teil verrohrt und von Bergamt und TÜV abgenommen. Die geotechnischen und geophysikalischen Messinstrumentierungen wurden eingebaut, erste Messreihen gestartet und ausgewertet. Parallel dazu erfolgten Modellierungsarbeiten für das numerische Modell „Langzeitdichtung“ sowie Laboruntersuchungen und Technikumsversuche mit dem Schwerpunkt „Durchlässigkeit“ der für den Bau der Langzeitdichtung vorgesehenen Baustoffe sowie des umgebenden Gebirges /STO 94/.

Im Jahr 1992 wurden alle bergtechnischen Arbeiten an Dammbauwerk und Langzeitdichtung vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) aus finanziellen Gründen gestundet und dann im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - ebenso wie andere Großversuche - aus politischen Gründen eingestellt.

Trotz des Abbruchs leistete das Dammbauprojekt einen wichtigen Beitrag zur Charakterisierung potenzieller Baustoffe für Dämme und Abdichtungen. Weiterhin konnte mit Hilfe der geoelektrischen Tomographie erstmals nachgewiesen werden, dass die den Zusammenhang zwischen dem spezifischen elektrischen Widerstand und dem Porenwassergehalt eines nichtsalinaren Gesteins beschreibende "Archie-Gleichung" auch für Steinsalz gültig ist.

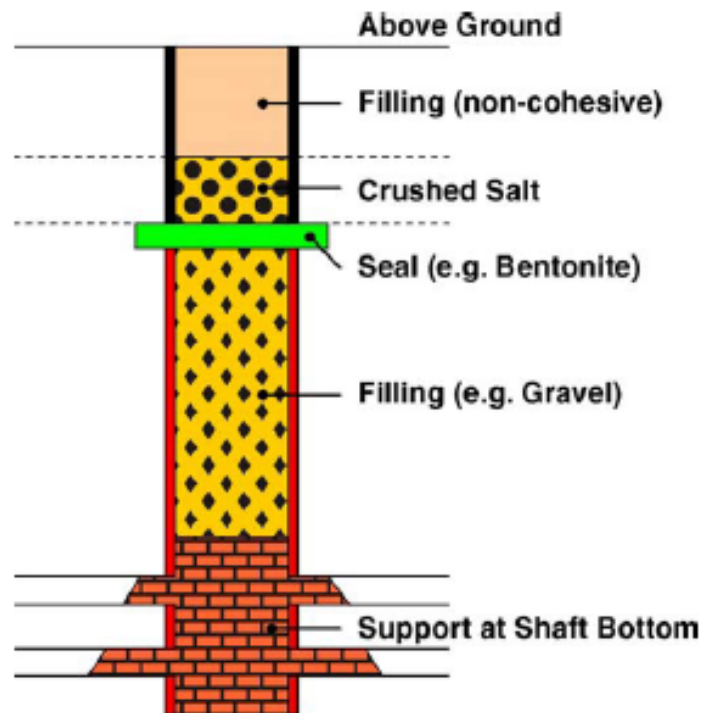


**Abb. 50** Schematische Darstellung des Dammbauversuchsfeldes in der Schachanlage Asse mit den Versuchsstrecken auf der 945-m-Sohle (Dammstrecke Nord mit Versuchsdamm, Dammstrecke Süd mit Test der Langzeitdichtung) sowie den Überfahrungsstrecken auf der 878-m-Sohle /GSF 95/

### Schachtverschlüsse

Am Ende der Betriebsphase eines Endlagers werden die Schächte mit Schachtverschlüssen verschlossen und die Schachtröhren verfüllt. Die Schachtverschlüsse sollen sowohl den Eintritt von Grundwasser über die Schachtröhren in das Endlagerbergwerk als auch einen Austritt von Gasen und Lösungen über die Schachtröhren aus dem Endlager verhindern.

Im Rahmen einer vom BMBF in Auftrag gegebenen Vorstudie wurde in den 1990er Jahren ein Konzept für ein Verschlussbauwerk im Salinar entwickelt, das in Abb. 51 dargestellt ist /SCH 95/. Dieser Schachtverschluss besteht aus einem gleitfähigen Dichtelement im oberen Salinarbereich, das auf einer setzungsarmen Verfüllsäule als statischem Widerlager aufbaut.



**Abb. 51** Schematische Darstellung eines Schachtverschlusses im Salinar /ROT 04/

Auf der Grundlage dieser Vorstudie wurde vom BMBF ein Forschungsprojekt unter der Leitung der K+S Aktiengesellschaft gefördert, an dem das Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, die DBE, das Institut für Gebirgsmechanik (IfG) und die GRS beteiligt waren. Das Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung eines Grundkonzeptes sowie der Bau und Test von Elementen für Schachtverschlussbauwerke im Salinar, die auch bei hohen Belastungen durch Gebirgsdrücke und saline Lösungen über längere Zeiträume hinweg stabil, dicht und wartungsfrei sind.

Im Rahmen eines in situ-Versuches im Salzbergwerk Salzdettfurth konnte der Sicherheitsnachweis für ein langzeitstabiles und flüssigkeitsdichtes Schachtverschlussbauwerk geführt werden /BRE 01/. Dieser Schachtverschluss enthält ein Dichtelement aus quellfähigem Ton auf Bentonitbasis, der bei einem Flüssigkeitszutritt aufquillt und den betroffenen Schachtabschnitt abdichtet. Die Verfüllsäule besteht aus einem setzungsstabilen Hartgesteinsschotter, der als Widerlager fungiert.

## **Auflockerungszonen im Salzgestein**

In der Umgebung von Hohlräumen (Strecken, Bohrlöchern) bildet sich im Steinsalz eine Auflockerungszone aus, die aufgrund ihrer höheren Permeabilität die Wirksamkeit von Bohrloch- und Streckenverschlüssen in einem Endlager entscheidend beeinflusst. Auflockerungszonen entstehen durch Mikrorissbildung bei Verformungen im Zuge der Spannungsumlagerungen während und nach der Hohlraumerstellung. Infolge der Spannungsaufnahme beim Auflaufen des Gebirges auf einen Verschluss wird die Auflockerungszone allmählich wieder abgebaut.

Zur Ermittlung des Durchlässigkeitsverhaltens der Auflockerungszone führte die GRS bis 1998 das Vorhaben „Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge“ (ALOHA) /WIE 98/ sowie von Juli 1998 bis April 2003 das Nachfolgeprojekt „Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand“ (ALOHA2) durch /WIE 04/. Bei dem mehrjährigen Untersuchungsprogramm standen neben der Charakterisierung von Ausdehnung und hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone auch die mögliche Verheilung sowie der Zusammenhang mit dem Spannungszustand, der für die Prognostizierbarkeit entscheidend ist, im Mittelpunkt.

Die Arbeiten umfassten in situ-Messungen an mehreren untertägigen Versuchsorten in der Schachtanlage Asse sowie Laboruntersuchungen und Modellrechnungen zur Interpretation der Ergebnisse. Ziel des Projektes war die Ermittlung der hydraulischen Materialparameter der Auflockerungszone in Abhängigkeit vom mechanischen Zustand und deren Entwicklung während der Phase der Rückbildung.

An vier verschiedenen Versuchsorten in der Schachtanlage Asse wurde eine große Zahl von Permeabilitätsmessungen durchgeführt, bei denen in allen offenstehenden Strecken eine Auflockerungszone nachgewiesen wurde, die bis etwa 1,5 m tief in die Streckensohle und nicht mehr als 0,5 m in die Streckenstöße reicht /WIE 04/. Die Permeabilität kann nahe der Hohlraumoberfläche Werte von  $10^{-16} \text{ m}^2$  bis  $10^{-15} \text{ m}^2$  erreichen und ist dort im Vergleich zur Permeabilität von ungestörtem Steinsalz ( $<10^{-21} \text{ m}^2$ ) signifikant erhöht. Eine Erhitzung und Abkühlung des Salzes um einen Hohlraum, in dem ein Erhitzerversuch stattgefunden hatte, führte infolge von Abkühlungsrissen zu erheblich höheren Permeabilitäten.

In der Umgebung einer 1914 mit Stahlübungen und Beton ausgebauten Strecke wurde eine geringere Permeabilität ( $10^{-20} \text{ m}^2$  bis  $10^{-18} \text{ m}^2$ ) als für Auflockerungszonen üblich gemessen (Abb. 52). Dies ist eine Folge der hohen Kompressionsspannung und geringen deviatorischen Spannung in diesem Bereich. Die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Steinsalzes hatte sich jedoch bis zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht wieder eingestellt. Laboruntersuchungen an Kernen aus den Messbohrlöchern zeigten, dass die Ursache der Permeabilitätsreduktion das Zudrücken von Mikrorissen auf Grund des Spannungszustandes ist, jedoch keine erkennbare Verheilung von Rissen stattgefunden hat /WIE 04/.

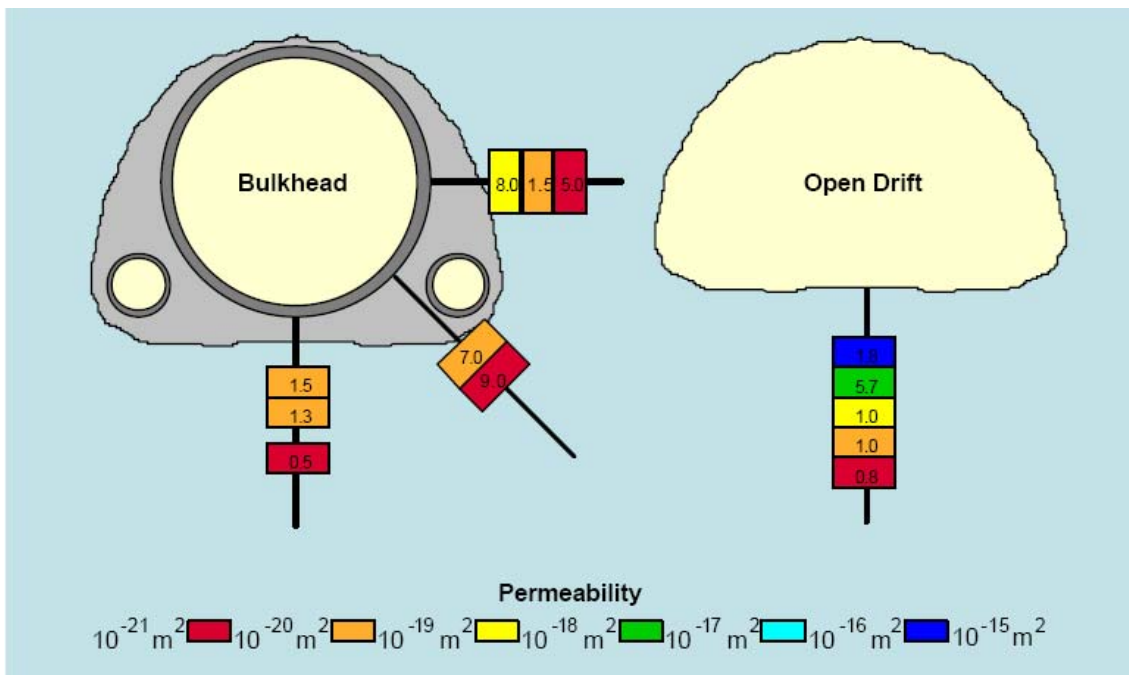


Abb. 52 Gemessene Permeabilitäten in der Auflockerungszone um eine offene Strecke (rechts) und einer Strecke mit Stahlausbau (links); die Farbe der Rechtecke entspricht der Größenordnung der Permeabilität, die Zahlenwerte in den Rechtecken dem Multiplikator /WIE 04/

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers ist die Auflockerungszone nur im Bereich von Verschlussystemen von Bedeutung. In der Nachbetriebsphase wird wegen des Kriechvermögens von Steinsalz irgendwann ein Zeitpunkt erreicht, ab dem im gesamten Endlager kompressive Spannungsverhältnisse herrschen, so dass es ab diesem Zeitpunkt überall zu einer Permeabilitätsreduktion kommt. Für den Bereich von Verschlussystemen ist noch nachzuweisen, ob diese Permeabilitätsreduktion ausrei-

chend ist oder unmittelbar vor Verschlusseinbringung ein Nachschneiden der Hohlräume erfordert.

In einem weiteren Projekt /JOC 08/ wurde die Effektivität eines solchen Nachschneidens zur Entfernung der Auflockerungszone untersucht. In einer Strecke auf der 800-m-Sohle wurde ein Paket von 1 m Mächtigkeit von der Sohle entfernt und die Entwicklung der Permeabilität sowie der Diffusionskoeffizienten ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass mehr als ein Jahr nach Nachschneiden der Sohle noch keine signifikante Permeabilitätserhöhung aufgetreten war; erst danach wurde eine allmähliche Neuentwicklung der Auflockerungszone festgestellt. Damit steht genügend Zeit zur Einbringung eines stützenden Verschlusses zur Verfügung, der anschließend die Neuentwicklung der Auflockerungszone wirksam verhindern kann.

## 4 Literatur

(Hinweis: dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur)

- /AEC 01/ AECL: Environmental impact statement on the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste. - Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10711 1994.
- /ALB 77/ Albrecht, E.; Breest, H. Ch.: The Development of Radioactive Waste Disposal Techniques and the Radiation Exposure of the Personnel at the Asse Pilot Plant. - In: Proc. of Symp. "Waste Management 76" (Ed.: Post, R.G.), 03.-06.10.1976, p. 283-302, Tucson, Arizona/USA, Springfield/Virginia: National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, CONF-761020S, 1977.
- /AND 01/ ANDRA: Referentiel Geologique du Site de l'Est. - Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, A.RP.ADS 99-005, 2001.
- /AND 03/ ANDRA: Compte rendu des revues et réunions techniques expérimentations SUG, GIS et REP. - Seminaire Géomecanique, April 17-18, 2003.
- /AND 05/ ANDRA: Dossier 2005 Argile Synthesis - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site. - Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, Décembre 2005.
- /ATG 85/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) i. d. F. der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 215).
- /BBG 80/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833).



- /BEC 99/ Bechthold, W.; Rothfuchs, T.; Poley, A.; Ghoreychi, M.; Heusermann, S.; Gens, A.; Olivella, S.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project). - Final Report, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 19124 EN, 248 p., Luxembourg, 1999.
- /BEC 04/ Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F. D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). - Final Report, European Commission, Nuclear Science and Technology, EUR 20621 EN, Luxembourg, 2004.
- /BFS 01/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlager Morsleben - Das Endlager für radioaktive Abfälle vor der Stilllegung, Stand: 2001. - <http://www.bfs.de/transport/bfs/druck/broschueren/morsleben.html> (04. Januar 2007).
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Einlegeblatt zur Broschüre „Endlager Morsleben“, Stand: September 2005. - <http://www.bfs.de/de/bfs/druck/broschueren/Einlegeblatt.pdf> (18.01.08).
- /BGR 08/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Geologischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben. - [http://www.bgr.bund.de/nn\\_322970/DE/Themen/GG\\_Palaeontol/Bilder/fb\\_gorleben\\_biostratigraphie\\_4\\_g.html](http://www.bgr.bund.de/nn_322970/DE/Themen/GG_Palaeontol/Bilder/fb_gorleben_biostratigraphie_4_g.html) (22.07.2008).
- /BMI 83/ Bundesministerium des Innern (BMI): Bekanntmachung der RSK-Empfehlung „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. - RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 - RS - AGK 3 - 515 790/2. [http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3\\_BMU/3\\_13.pdf](http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3_BMU/3_13.pdf)
- /BOI 01/ Boisson, J.Y.; Bertrand, L.; Heitz, J.F.; Moreau-Le Golvan Y.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. - Hydrogeology Journal, 9, pp. 108-123, 2001.

- /BOL 04/ Bollingerfehr, W.; Heusermann, S.; Droste, J.; Rothfuchs, T.: Reliability and Accuracy of Geotechnical Instruments During 10 Years of in situ Application. - Proc. EURADWASTE Conference, Luxembourg, 2004.
- /BRA 87/ Brasser, T.: Der Ventilationstest, ein untertägiger Versuch zur Ermittlung der Gebirgspermeabilität. - Bergbau, Vol. 38 (12), S. 523-526, 1987.
- /BRE 01/ Breidung, K.-P.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. - Fünftes Statusgespräch Untertägige Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe, Projektträger des BMWi und BMBF für Entsorgung, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 7, Karlsruhe, 2001.
- /BRW 08/ Brewitz, W.; Droste, J.; Stier-Friedland, G.: Geological features of the Morsleben repository and their relevance for long-term safety. - In: Rempe, N.T. (ed.): Deep Geologic Repositories, Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, Vol. XIX, p. 53-66, Boulder, Colorado, USA, 2008.
- /CAB 02/ Caractérisation des discontinuités en milieu argileux (station expérimentale de Tournemire): Questions clés relatives à l'évaluation de la sûreté du stockage des déchets radioactifs. - Le rapport scientifique et technique IRSN 2006, p. 227-232, 2002.
- /CHA 03/ Chandler, N.A.: Twenty Years of Underground Research at Canada's URL. - Proc. Waste Management Conference 2003, February 23-27, Tucson, Arizona (USA), 2003.
- /CIT 08/ Citect: WIPP Facility Layout. - <http://www3.citect.com/mycitectnews/?p=7259> (04.09.2008)
- /CUS 97/ Cussler, E.L.: Diffusion - Mass transfer in fluid systems. - Cambridge University Press, 1997.
- /DBE 08/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). - <http://www.dbe.de/de/betriebe/morsleben/1/index.php> (22.07.2008).

- /DIS 05/ Distinguin, M.; Lavanchy, J.-M.: Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the bure site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several in situ investigation techniques. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 379-392, Elsevier, 2007, doi:10.1016/j.pce.2006.02.056.
- /DRO 01/ Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). - Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-173, Köln, 2001.
- /DRO 03/ Droste, J.; Rothfuchs, T.: Long-term Instrument Performance - Experience from a Large-scale Test in Rock Salt. - Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics, Oslo, 15 - 18 September 2003.
- /ENG 96/ Engelmann, H.-J.; Biurrun, E.; Filbert, W.; Khamis, M.; Lempert, J.P.; Müller-Hoeppe, N.; Niehues, N.; Wahl, A.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Endlagerkonzepte und Einlagerungstechniken für ausgediente Brennelemente. - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE), DEAB T 70, 47 S., Peine, Januar 1996.
- /FEU 98/ Feuser, W.; Vijgen, H.; Barnert, E.: Validierung der Modelle zur Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus LEISA. - Forschungszentrum Jülich, JÜL-3493, Januar 1998.
- /GIE 93/ Gies, H.; Hild, W.; Kühle, Th.; Mönig, J.: Strahleneffekte im Steinsalz. Statusbericht. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 9/93, Neuherberg, 1993.
- /GIE 94/ Gies, H.; Gresner, H.; Herbert, H.-J.; Jockwer, N.; Mittelstädt, R.; Mönig, J.; Nadler, F.: Das HAW-Projekt. Versuchseinlagerung hochradioaktiver Strahlenquellen im Salzbergwerk Asse. Stoffbestand und Petrophysik des Steinsalzes im HAW-Feld (Asse, 800-m-Sohle). - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 16/94, 186 S., Neuherberg, 1994.

- /GSF 95/ GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH: 30 Jahre Institut für Tief Lagerung 1965 - 1995, Forschung zur Endlagerung toxischer Abfälle. - GSF-Jahresbericht 1995, S. 69-106, ISBN 0941-3847, Neuherberg, 1995.
- /HER 05/ Herbert, H.J.; Kull, H.; Müller-Lyda, I.: Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes (SVV) als Komponente im Barriersystem Salinar. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-220, 53 S., Köln, 2005.
- /HÖH 98/ Höhne, D.; Schünemann, U.; Husemann, K.: Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus. - Forschungszentrum Jülich, JÜL-3492, Januar 1998.
- /IAE 01/ International Atomic Energy Agency: The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste. - IAEA-TECDOC-1243, 67 p., Vienna, 2001.
- /JOC 08/ Jockwer, N.; Wiczorek, K.: Advective and Diffusive Gas Transport in Rock Salt Formations - ADDIGAS. - Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-234, Februar 2008 (im Druck).
- /KIC 02a/ Kickmaier, W.: Rolle der Felslabors in Entsorgungsprogrammen. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Nagra Bulletin, 34, S. 4-9, Wettingen, Schweiz, 2002.
- /KIC 02b/ Kickmaier, W.: Felslabor Grimsel Phase V. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Nagra Bulletin, 34, S. 10-23, Wettingen, Schweiz, 2002.
- /KOL 93/ Kolditz, H.: Herstellung tiefer Großbohrlöcher zur Endlagerung umweltgefährdender Abfallstoffe im Salz. - Glückauf, 129 (2), S. 98-104, 1993.
- /KÜH 07/ Kühn, K.: Strategie der Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel der Grube Konrad. - 2. VDI-KTG-Kolloquium „Perspektiven der Kernenergie“, Dresden, 9. Oktober 2007.

- /MEY 89/ Meyer, T.; Starke, C.; Schmidt, M.W.: Containerless Disposal and in Situ Solidification of Waste in Underground Cavities - Aspects of Mining Technology and Engineering. - In: Proc. of Symp. "Waste Management '89" (Eds.: Post, R.G.; Wacks, M.), 26.02.-02.03.1989, USA: Arizona Board of Regents, Vol. 2, p. 327-333, Tucson, Arizona/USA, 1989.
- /MÖN 97/ Mönig, J.: Realistische Abschätzung der Strahlenschädigung von Steinsalz bei Einlagerung von HAW in Bohrlöchern. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-142, ISBN 3-923875-99-1, Köln, Juni 1997.
- /MTP 08a/ Mont Terri Project: Geological profile. - [http://www.mont-terri.ch/pdf/geological\\_profile.pdf](http://www.mont-terri.ch/pdf/geological_profile.pdf) (05.08.2008).
- /MTP 08b/ Mont Terri Project: Geological profile. - [http://www.mont-terri.ch/3D%20views/Tunnel Mt-Terri\\_3D\\_incl\\_Ga08.pdf](http://www.mont-terri.ch/3D%20views/Tunnel_Mt-Terri_3D_incl_Ga08.pdf) (05.08.2008).
- /MTP 08c/ Mont Terri Project: Engineered barrier experiment (EB). - <http://www.mont-terri.ch/posters/EB.pdf> (05.08.2008).
- /MLY 99/ Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-143, Köln, 1999.
- /MÜL /95/ Müller, K.; Rothfuchs, T.: The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse salt mine. Documentation and appraisal of the disposal system. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 16554 EN, Luxembourg, 1995.
- /NAG 08a/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Felslabor Grimsel - Geologie. - <http://www.nagra.ch/index1.tpl?iid=l80a1b5c2d30e3f25g&iid2=5&lang=1&str=a5b80c&cart=12179362392392740> (05.08.2008).

- /NAG 08b/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra):  
Felslabor Grimsel - Versuche. -  
<http://www.nagra.ch/index1.tpl?iid=l81a1b5c2d30e3f26g&iid2=5&lang=1&str=a5b81c&cart=12179362392392740> (05.08.2008).
- /NAG 08c/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra):  
Felslabor Grimsel - 1:1-Demonstrationsversuch des Einlagerungskonzepts  
für hochaktive Abfälle (FEBEX). -  
[http://www.nagra.ch/downloads/d\\_forschung\\_febex.pdf](http://www.nagra.ch/downloads/d_forschung_febex.pdf) (05.08.2008).
- /NEA 88/ Nuclear Energy Agency (NEA): Geological Disposal of Radioactive Wastes  
- In Situ Research and Investigations in OECD Countries. - Status report,  
126 p., Paris, 1988.
- /NEA 01a/ Nuclear Energy Agency (NEA): Going Underground for Testing,  
Characterisation and Demonstration - A Technical Position Paper. -  
NEA/RWM(2001)6/REV, 69 p., Paris, 2001.
- /NEA 01b/ Nuclear Energy Agency (NEA): The Role of Underground Laboratories in  
Nuclear Waste Disposal Programmes. - OECD, Paris, 2001.
- /NEA 02/ Nuclear Energy Agency (NEA); International Atomic Energy Agency (IAEA):  
An International Peer Review of the Yucca Mountain Project TSPA-SR -  
Total System Performance Assessment for the Site Recommendation  
(TSPA-SR). - Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the  
International Atomic Energy Agency, 97 p., NEA-3682, Paris, 2002.
- /NIE 93/ Niephaus, D.: Forschungsvorhaben MAW- und HTR-BE-Versuchs-  
einlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV). Rückholbarer Einlagerversuch  
(Teilprojekt REV). - Abschlussbericht. Förderkennzeichen KWA 5302 B,  
Forschungsbericht JÜL 2859, Jülich, Dezember 1993.
- /OND 01/ ONDRAF/NIRAS: SAFIR 2: Safety Assessment and Feasibility Interim  
Report 2. - ONDRAF/NIRAS, NIRONDD 2001-06 E, Bruxelles, December  
2001.

- /OPP 80/ Opp, O.; Thielemann, K.; Kleimann, H.: Twelve Years Experience with the Transport of Radioactive Wastes in a Salt Mine. - In: Proc. of 6<sup>th</sup> Intern. Congress "Patram '80" (Ed.: Hübner), Berlin, 10.-14.11.1980, BAM, Vol. I, p. 613-624, Berlin, 1980.
- /PRI 86/ Prij, J.; Jansen, D.; Klerks, W. et al.: Measurements in the 300-meter Deep Dry-Drilled Borehole and Feasibility Study on the Dry-Drilling of a 600-meter Deep Borehole in the ASSE II Salt-Mine. - Final Report, 255 S., European Commission, EUR-10737 EN Luxembourg, 1986.
- /PTK 06/ Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich für Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Internationale Kooperation, Untertagelabors mit Beteiligung deutscher Forschungsstellen (Stand: 25.01.2006). - [http://www.fzk.de/fzk/groups/ptwte/documents/internetdokument/id\\_053152.pdf](http://www.fzk.de/fzk/groups/ptwte/documents/internetdokument/id_053152.pdf) (02.09.2008).
- /PUS 04/ Pusch, R.; Svemar, C.: Comparison of repository concepts & recommendations for design and construction of future safe repositories - CROP Cluster Repository Project Deliverable D6. - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Internal Progress Report IPR-04-55, 323 S., Stockholm, 2004.
- /RAA 82/ Raab, W.; Frohn, C.; Schmidt, M.W.: Stability and Construction of Caverns for the Disposal of Cemented Low and Medium-Level Wastes. - In: MRS-Symp. Proc. "Scientific Basis for Nuclear Waste Management V" (Ed.: Lutze, W.), Berlin, 07.-10.06.1982, Vol. 11, New York (Elsevier), p. 879-888, 1982.
- /REA 04/ Read, R. S.: 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory. - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41 (8), p. 1251-1275, Elsevier, 2004.
- /REM 07/ Rempe, N.T.: Eight Years WIPP Progress. - Proc. Reposafe 2007, International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, November 6-9, 2007, Braunschweig, 2007.

- /ROT 86/ Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen. Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. - Abschlussbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und -technologie. Brüssel: CEC, EUR 10392 DE, 1986.
- /ROT 88/ Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.; Feddersen, H.-K.; Staupendahl, G.; Coyle, A.J.; Kalia, H.; Eckert, J.: Brine Migration Test - A joint project of Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) and Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF). - Final Report, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 6/88, 318 S., Neuherberg, März 1988.
- /ROT 95/ Rothfuchs, T.; de las Cuevas, C.; Donker, H.; Feddersen, H.-K.; Garcia-Celma, A.; Gies, H.; Goreychi, M.; Graefe, V.; Heijdra, J.; Hente, B.; Jockwer, N.; LeMeur, R.; Mönig, J.; Müller, K.; Prij, J.; Regulla, D.; Smailos, E.; Staupendahl, G.; Till, E.; Zankl, M.: The HAW Project: Test Disposal of Highly Radioactive Radiation Sources in the Asse Salt Mine. - Final Report, Office for Official Publications in the European Communities, EUR 16688 EN, Luxembourg, 1995.
- /ROT 99/ Rothfuchs, T.; Feddersen, H.-K.; Kröhn, K.-P.; Miehe, R.; Wieczorek, K.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste - Phase II. - Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, GRS-161, 1999.
- /ROT 03/ Rothfuchs, T.; Dittrich, J.; Droste, J.; Müller, J.; Zhang, C.-L.: Final Evaluation of the Project „Thermal Simulation of Drift Emplacement“ (TSDE-Project). - Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-194, ISBN 3-931995-62-3, Köln, 2003.
- /ROT 04/ Rothfuchs, T.; Droste, J.; Herbert, H.-J.; Kröhn, K.-P.; Wieczorek, K.; Zhang, C.-L.: CROP - Cluster Repository Project: A Basis for Evaluation and Developing Concepts of Final Repositories for High-Level Radioactive Waste - German Country Annexes. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-201, Köln, 2004.



- /SCH 95/ Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; BIRTHLER, H.; Boese, B.; Storck, R.; Sitz, P.; Krauß, A.; Eulenberger, K.-H.; Schleinig, J.-P.; Duddeck, H.; Ahrens, H.; Menzel, W.; Salzer, K.; Minkley, W.; Busche, H.; Lindhoff, U.; Gierenz, S.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Vorprojekt. - GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GSF-Bericht 32/95, Neuherberg, 1995.
- /SKB 96/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB): Äspö Hard Rock Laboratory - 10 Years of Research. - 88 S., Stockholm, 1996.
- /SKB 08/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB): Äspö Hard Rock Laboratory. - [http://www.skb.se/templates/standard\\_16809.aspx](http://www.skb.se/templates/standard_16809.aspx) (05.08.2008).
- /SLI 86/ Schlich, M.: Simulation der Bewegung im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 2/86, Neuherberg, 1986.
- /STO 94/ Stockmann, N.; Beinlich, A.; Droste, J.; Flach, D.; Gläß, F.; Jockwer, N.; Krogmann, P.; Miehe, R.; Müller, J.; Schwägermann, F.; Wallmüller, R.; Walter, F.; Yaramanci, U.: Dammbau im Salzgebirge. Abschlußbericht Projektphase II. Berichtszeitraum vom 01.07.1989 - 31.12.1992. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 18/94, 315 S., GSF Neuherberg, 1994.
- /STÜ 98/ Stührenberg, D.; Zhang, C.-L.: Projekt Gorleben: Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. - BGR-Endbericht 1995 - 1997 zum BfS-Arbeitspaket 9G 2138 2100, Archiv-Nr. 116 922, Hannover, 1998.
- /STÜ 02/ Stührenberg, D.: Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. - BGR-Abschlussbericht zum BfS-Arbeitspaket 9G 21382100 (Berichtszeitraum 1998 - 2001), Tagebuch-Nr. 11 145/2000, Hannover, 2002.
- /STV 01/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 15 Nr. 1 und 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930).

- /THU 02/ Thury, M.: Felslabor Mont Terri. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Nagra Bulletin, 34, S. 24-35, Wettingen, Schweiz, 2002.
- /WIE 93/ Wieczorek, K.: MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern. Teilprojekt Rückholbarer Einlagerversuch (REV). - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-TL-36/93, Neuherberg, 1993
- /WIE 98/ Wieczorek, K.; Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge. - Final Report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2651, Köln, 1998.
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). - Abschlussbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-198, Köln, 2004.

## 5 Weiterführende Literatur

(Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im "Literaturverzeichnis")

Die weiterführende Literatur ist alphabetisch nach den einzelnen Untertagelaboren wie folgt geordnet:

1. Allgemein
2. Äspö
3. Asse
4. Gorleben
5. Grimsel
6. Konrad
7. Lac du Bonnet
8. Meuse / Haute-Marne
9. Mol
10. Mont Terri
11. Morsleben
12. Tournemire
13. Wipp-Site
14. Yucca Mountain

## 1. Allgemein

Côme, B.; Johnston, P.; Müller, A.: Design and Instrumentation of In Situ Experiments in Underground Laboratories for Radioactive Waste Disposal. - Proc. of a Workshop jointly organized by the Commission of the European Communities & OECD Nuclear Energy Agency, Brussels, 15-17 May 1984, 474 p., Rotterdam, Boston (Balkema), 1985.

Commission of the European Communities (CEC): Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories. - Proc. of a European Commission CLUSTER Conference, held in Luxembourg on 3-5 November 2003, EUR 21028 EN, Luxembourg, 2005.

Commission of the European Communities (CEC): Testing and modelling of thermal, mechanical and hydrogeological properties of host rocks for deep geological disposal of radioactive waste. - Proc. of a Workshop held in Brussels, 12-13 January 1995, EUR 16219 EN, Luxembourg, 1995.

Davies, C.: Cluster. Club of Underground Storage, Testing und Research facilities for radioactive waste disposal. - Proc. of the 2<sup>nd</sup> CLUSTER URL's seminar held in Mol, Belgium, 27-28 September 2001, Nuclear Science and Technology, European Commission, 2001.

Haijtkink, B.: Project on the effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project). - Proc. of a progress meeting held in Naantali, Finland, 25-26 May 1998, European Commission, DOC XII/276/98-EN, 1998.

Haijtkink, B.; Davies, C.: In situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal. - Proc. of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium, 10-11 December 1997, EUR 18323 EN, Luxembourg, 1998.

Haijtkink, B.; McMenamin, T.: Project on effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project). - Proc. of a progress meeting held in Brussels, 11-12 June 1992, EUR 14816 EN, Luxembourg, 1993.

Haijtkink, B.; McMenamin, T.: Project on effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project). - Proc. of a progress meeting held in Cologne, 3-4 June 1993, EUR 15734 EN, Luxembourg, 1994.

Haijtkink, B.; McMenamin, T.: Project on the effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project). - Proc. of a progress meeting held in Exeter, United Kingdom, 26-27 May 1994, EUR 16001 EN, Luxembourg, 1995.

Haijtkink, B.; Rodwell, W.: Projects on the effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (Pegasus project). - Proc. of a progress meeting held in Mol, Belgium, 28-29 May 1997, EUR 18167 EN, Luxembourg, 1998.

Pusch, R.; Svemar C.: Äspö Hard Rock Laboratory. CROP - Cluster Repository Project. - Final Technical Report. - Svensk Kärnbränslehantering AB, IPR-04-56, Stockholm, 2004.

Pusch, R.; Svemar, C.: Äspö Hard Rock Laboratory. Project description Cluster Repository Project. A basis for evaluating and development concepts of final repositories for high level radioactive waste. - Svensk Kärnbränslehantering AB, IPR-01-23, Stockholm, 2001.

## **2. Äspö**

Akesson M.: Äspö Hard Rock Laboratory. Temperature Buffer Test. Evaluation modeling - Field test. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Report IPR-06-10, Stockholm, 2006.

Akesson, M.: Äspö Hard Rock Laboratory. Temperature Buffer Test. Evaluation modeling - Mock up test. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Report IPR-06-11, Stockholm, 2006.

Almén, K.-E.; Stenberg, L.: Äspö Hard Rock Laboratory. Characterisation methods and instruments. Experiences from the construction phase. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-05-11, Stockholm, 2005.

- Johannesson, L.-E.; Börgesson, L.; Goudarzi, R.; Sandén, T.; Gunnarsson, D.; Svemar, C.: Prototype repository: A full scale experiment at Äspö HRL. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 58-76, Elsevier, 2007.
- Pusch, R.; Börgesson, L.; Svemar, C.: Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Report IPR-04-27, Stockholm, 2004.
- Rothfuchs, T.; Mieke, R.; Moog, H.; Wieczorek, K.: Geoelectric Investigation of Bentonite Barrier Saturation Conducted in the Prototype Repository at the Äspö Hard Rock Laboratory. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-208, Köln, 2004.
- Sandén, T.; Goudarzi, R.; de Combarieu, M.; Akesson, M.; Hökmark, H.: Temperature buffer test - design, instrumentation and measurements. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 77-92, Elsevier, 2007.
- Ström, A.: Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. - Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report TR-00-20, Stockholm, 2000.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Experiments at the Äspö Hard Rock Laboratory. - SKB-Brochure, Stockholm, 2004.
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Äspö Hard Rock Laboratory. - SKB-Brochure, Stockholm, 2003.

### 3. Asse

- Anke, G.; Eisenburger, D.; Heusermann, S.; Jacob, N.; Kopietz, J.; Koss, G.; Meister, D.: Thermomechanische In-situ-Heizversuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 104770, BGR, Hannover, 1989.
- Bachmann, K.: Mineralogische und chemische Untersuchungen an Bohrkernen des Stassfurt-Steinsalzes (Salzstock Asse). - Dissertation, TU-Köln, 117 S., Köln, 1985.
- Batsche, H.; Klarr, K.; Stempel, C.v.: Hydrogeologisches Forschungsprogramm Asse. Abschlußbericht. Textband. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 4/94, 461 S., Neuherberg, 1994.
- Batsche, H.; Klarr, K.; Stempel, C.v.: Hydrogeologisches Forschungsprogramm Asse. Abschlußbericht. Anlagenband. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 4/94, 662 S., Neuherberg, 1994.
- Bode, W.: Untersuchungen zur Bestimmung der Rückhalteeigenschaften von Gesteinen über der Schachanlage Asse II gegenüber gelösten Radionukliden. - Dissertation, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 16/89, 219 S., Neuherberg, 1989.
- Bollingerfehr, W.: Dam constructions in radioactive waste repositories in salt formations - long-term sealing system. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 16856 EN, Luxembourg, 1996.
- Bollingerfehr, W.; Engelmann, H.-J.; Stockmann, N.; Mieke, R.; Yaramanci, U.: In Situ Investigation of the Longterm Sealing System as a Component of a Dam Construction. - In: Proc. of CEC/GSF-Workshop on "Pilot Tests on Radioactive Waste Disposal in Underground Facilities", Braunschweig, 19.-20.06.1991 (Ed.: Haijink, B.), Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 13985, p. 153-165, Luxembourg, 1991.

Brügge, B.: Das Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerk aus dem Salzbergwerk Asse - Eine gefügeanalytische Studie. - Diplomarbeit, TU-Braunschweig, 65 S., Braunschweig, 1993.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Wissenschaftliche Grundlagen der Erkundung und Berechenbarkeit des Endlagerbergwerks Asse. Teilprojekt 1: Entwicklung dynamischer Überwachungs- und Erkundungsmethoden. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR 3/90, Hannover, 1990.

Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Rothfuchs, T.; Zimmer, U.: The TSS-Project: Thermal Simulation of Drift Emplacement. Final Report Phase 2. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-127, Köln, 1996.

Droste, J.; Rothfuchs, T.; Wiczorek, K.; Heusermann, S.; Bechthold, W.: In-situ Investigations on Sealing of Emplacement Drifts and Boreholes for Heat Generating High-Level Waste. - Proc. Waste Management Conference 1998, 1-5 March 1998, Tucson, Arizona (USA), 1998.

Eisenblätter, J.: Überwachung eines Erhitzerversuchs in der Schachanlage Asse mit mikroakustischen (Schallemissions-) Messungen. - BATTELLE BleV-R-66.800-1, 18 S., 1988.

Engelmann, H.-J.; Broochs, P.W.; Hänsel, W.; Peters, L.: Dams as Sealing Systems in Rock Salt Formations, Test Dam Constructions and Determination of Permeability. - In: Proc. of CEC/NEA Workshop on "Sealing of Radioactive Waste Repositories", 22-25 May 1989, Braunschweig (Ed.: OECD), Paris: OECD, p. 151-162, 1989.

Engelmann, H.-J.; Fischer, H.; Hänsel, W.; Wallner, M.: Dams as Sealing Systems in Rock Salt Formations, Test Dam Construction. - In: Proc. of Symp. "Waste Management '88" (Ed.: Post, R.G.), 28.02.-03.03.1988, USA: Arizona Board of Regents, Vol. 1, p. 283-287, Tucson, Arizona/USA, 1988.



- Feddersen, H.; Flach, D.; Flentge, I. u. a.: Results of Temperature Test 6 in the ASSE Salt Mine. Volume 1. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR-10827 EN, Vol. 1, 273 S., Luxembourg, 1986.
- Frank, H.: Hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen an der Asse bei Wolfenbüttel. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht R 87, 208 S., Neuherberg, 1974.
- Gerwin, H.; Scherer, W.: Kritikalitätsberechnungen zum Problem der Endlagerung von AVR-Brennelementen im Salzbergwerk ASSE. - Kernforschungsanlage Jülich, JÜL-1071-RG, 21 S., Jülich, 1974.
- Gies, H.; Gresner, H.; Herbert, H.J. u. a.: Das HAW-Projekt. Versuchseinlagerung hochradioaktiver Strahlenquellen im Salzbergwerk Asse. Stoffbestand und Petrophysik des Steinsalzes im HAW-Feld (Asse, 800-m-Sohle). - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 16/94, 186 S., Neuherberg, 1994.
- Gommlich, G.; Yaramanci, U.: Untersuchungen zur Dichte und Schallgeschwindigkeit des Steinsalzes der Asse in situ und im Labor. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 22/93, 59 S., Neuherberg, 1993.
- Hensel, G.: Planung, Durchführung und Analyse markscheiderischer Messungen zur Erfassung von Gebirgsbewegungen in dem Versuchsbergwerk Asse. - Dissertation, TU-Clausthal, 98 S., Clausthal, 1991.
- Hente, B.: Automatische Bearbeitung von Seismogrammen zur mikroseismischen Überwachung des Salzbergwerks Asse. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 16/92, 41 S., Neuherberg, 1992.
- Herbert, H.-J.: Self sealing backfill (SVV) - A salt based material for constructing seals in salt mines. - The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt (Eds.: Wallner, M.; Lux, K.H.; Minkley, W.; Hardy, Jr., H.R.), 12 S., Taylor & Francis, London, 2007.

Heusermann, S.: Langzeit Spannungsmessungen im Salzgebirge - Untersuchungsergebnisse und Erfahrungen aus einem Großversuch im Forschungsbergwerk Asse. - Messen in der Geotechnik 2006, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 82, S. 133-150, Braunschweig, 2006.

Heusermann, S.; Heemann, U.: In-situ measurements and 3-D model calculations of backfill compaction and EDZ development in waste disposal drifts in salt rock. - The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt (Eds.: Wallner, M.; Lux, K.H.; Minkley, W.; Hardy, Jr., H.R.), S. 215-222, Taylor & Francis, London, 2007.

Heusermann, S.; Liedtke, L.; Sönneke, J.; Sprado, K.-H.; Glöggler, W.: Geotechnische und großnumerische Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Brennelementen, Teilprojekt I: Thermische Simulation der Streckenlagerung. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tgb.-Nr. 11 682/95, Archiv-Nr. 113 591, Hannover, 1995.

Hinsch, H., Keßler, F.: Auslaugversuche an Großproben in der Schachanlage Asse. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 1/85, 22 S., Neuherberg, 1985.

Hou, Z.; Lux, K.-H.: Mechanical degradation and self-healing of the excavation damaged zone around a drift dam in rock salt. - In: Proc. of European commission CLUSTER Conference and workshop "Impact of the excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories", 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.

Hunsche, U.; Plischke, I.: Zweiter Kriechversuch an einem großen Steinsalzpfiler im Steinsalzbergwerk Asse - Teilprojekt I: Langzeitdeformationsverhalten von Salzgesteinen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR 6/88, 35 S., Hannover, 1988.

Jockwer, N.; Mönig, J.; Rothfuchs, T.: Gas Liberation from Rock Salt Observed at Ambient and Elevated Temperatures in the HAW Test Field at the Asse Salt Mine. - In: ENC '90, ENS/ANS-Foratom Conf. Transactions, Lyon/Frankreich, 23.-28.09.1990, TÜV Rheinland, Vol. IV, S. 2338-2342, Köln, 1990.

Kappelmeyer, O.; Giesel, W.: Geothermische Untersuchungen im Hinblick auf die Endlagerung hochaktiver Abfälle in der Salzstruktur Asse. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR 1/68, Hannover, 1969.

Kessels, W.; Muth, M.; Groß, S. u. a.: Thermische und radiologische Auslegung des Transport- und Einlagerungsbehälters Asse TB1. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 10/85, 163 S., Neuherberg, 1985.

Kessels, W.; Feddersen, H.-K.; Flach, D.; Flentge, I.; Frohn, C.; Gies, H.; Gommlich, G.; Hahn, J.; Hente, B.; Jockwer, N.; Klarr, C.; Pfeifer, S.; Rothfuchs, T.; Schmidt, M.W.; Wiczorek, K. (1986): Results of Temperature Test 6 in the Asse Salt Mine. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 10827 EN/I + II, Luxembourg, 1986.

Kienzler, B.; Schlieker, M.; Schüßler, W. u. a.: Langzeit Auslaug- und Korrosionsexperimente an zementierten 1:1 Gebinden in der Schachanlage Asse. Probenahme und Auswertung 2001. - Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-6716, 43 S., Karlsruhe, 2002.

Kopietz, J.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Asse-Salzgestein. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR 1/78, 18 S., Hannover, 1978.

Kull, H.; Herbert, H.J.: A new self sealing backfill material for repositories in salt formations. - Proc. Waste Management Conference 2005, February 27 - March 3, 2005, Tucson, Arizona (USA), 2005.

- Mauke, R.; Schmidt, H.: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm - Darstellung und Bewertung der Ergebnisse. - Proc. 32. Geomechanik-Kolloquium, Institut für Gebirgsmechanik GmbH und TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Leipzig, 2003.
- Müller, K.; Rothfuchs, T.: Das HAW-Projekt. Versuchseinlagerung hochradioaktiver Strahlenquellen im Salzbergwerk Asse. Dokumentation und Bewertung des Einlagerungssystems. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 12/94, 124 S., Neuherberg, 1994.
- Niephaus, D.: Retrievable Emplacement Experiment with ILW and Spent HTR Fuel Elements in the Asse Salt Mine - Final Report. - EUR 15736 EN, Luxembourg, 1994.
- Niephaus, D.: Retrievable emplacement experiment with ILW and spent HTR fuel elements in the Asse salt mine. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 15736 EN, Luxembourg, 1994.
- Nolten, A.J.: Irradiation of salt samples in a gamma field. - GIRAF/GSF exp. no. 284, Design and Safety Report, Netherlands Energy Research Foundation (ECN), ECN-C-94-033, Petten, 1994.
- Palut, J.M.: Effects de l'irradiation sur le sel gemme, Project HAW-Asse. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 13264 FR, Luxembourg, 1991.
- Prij, J.; Jansen, D.; Klerks, W. u. a.: Measurements in the 300-metre Deep Dry-Drilled Borehole and Feasibility Study on the Dry-Drilling of a 600-metre Deep Borehole in the Asse II Salt Mine. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 10737 EN, 255 S., Luxembourg, 1986.

- Rothfuchs, T.; de las Cuevas, C.; Donker, H.; Feddersen, H.-K. ; Garcia-Celma, A.; Gies, H.; Goreychi, M.; Graefe, V.; Heijdra, J.; Hente, B.; Jockwer, N.; Le-Meur, R.; Mönig, J.; Müller, K.; Prij, J.; Regulla, D.; Smailos, E.; Staupendahl, G.; Till, E.; Zankl, M.: The HAW-Project, Test Disposal of Highly Radioactive Radiation Sources in the Asse Salt Mine. - Final Report, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 6/95, 238 S., Neuherberg, 1995.
- Rothfuchs, T.; Droste, J.; Feddersen, H.-K.; Heusermann, S.; Schneefuß, J.; Pudewills, A.: Special Safety Aspects of Drift Disposal - The Thermal Simulation of the Drift Storage Experiment. - Nuclear Technology, Vol. 121, No. 2, p. 189-198, La Grange Park, Illinois (USA), 1998.
- Rothfuchs, T.; Droste, J.; Wiczorek, K.: Post-Test Investigation of In-Situ Backfilling Experiments at the Asse Mine/Germany. - Proc. 6<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories "Backfilling in Radioactive Waste Disposal", 11 - 13 March 2002, Brussels, 2002.
- Rothfuchs, T.; Duijves, K.; Raynal, M.; Huertas, F.: The HAW-Project: An Underground Demonstration Facility for the Disposal of High-Level Waste in Salt. - In: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Community Conf. "Radioactive Waste Management and Disposal", Luxembourg, 17.-21.09.1990 (Ed.: Cecille, L.), S. 403-417, Elsevier, London, 1991.
- Rothfuchs, T.; Jockwer, N.; Mönig, J.; Müller, K.: Designing and testing of a high-level waste disposal system at the Asse salt mine/Germany. - In: Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Conference on "Radioactive waste management and environmental remediation", Berlin, 3.-7.9.1995, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 1, p. 761-765, New York, 1995.
- Rothfuchs, T.; Schwarzianeck, P.; Feddersen, H.K.: Simulationsversuch im älteren Steinsalz Na<sub>2</sub>ß im Salzbergwerk Asse. Temperaturversuchsfeld 4 (TVF4). - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 09137 DE, 102 S., Luxembourg, 1984.

Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.; McNulty, G.; Gupta, S.; Clark, D.: The Brine Migration Test - A Nuclear Repository Simulation Experiment at the Asse Salt Mine - Federal Republic of Germany. - Materials Research Society Symposium Proc. (Eds.: Lutze, W.; Ewing R.C.), Vol. 127, p. 613-620, Materials Research Society, Pittsburgh, 1989.

Rothfuchs, T.; Wieczorek, K.; Olivella, S.; Gens, A.: Lessons Learned in Salt. - European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.

Sander, W.; Herbert, H.J.: Wirksamkeit der Abdichtungen von Versatzmaterialien: Geochemische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Salzversatz mit Zuschlagstoffen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-180, 266 S., Köln, 2002.

Smailos, E.; Fiehn, B.: In-Situ Corrosion Testing of Selected HLW Container Materials under the Conditions of the HLW Test Disposal in the Asse Salt Mine. - Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-5508, Karlsruhe, 1995.

Spies, T.; Prij, J.; Rothfuchs, T.: Sealing of HLW-boreholes in Salt Formations: Objectives and First Results of the DEBORA-Project. - In: Proc. of the CEC-Workshop "Project on effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (PEGASUS)", Brussels, 11-12 June 1993 (Eds.: Haijink, B.; McMenamin, T.), EUR 14816 EN, S. 113-127, Luxembourg, 1993.

Spies, T.; van den Horn, B.A.; Prij, J.; Rothfuchs, T.; Müller, K.: Sealing of HAW-Boreholes in Salt Formations (DEBORA-Projekt). - In: Proc. of the CEC-Workshop "Project on effects of gas in underground storage facilities for radioactive waste (PEGASUS)", Brussels, 3-4 June 1994 (Eds.: Haijink, B.; McMenamin, T.), EUR 15734 EN, S. 105-119, Luxembourg, 1994.

Walter, F.; Wallmüller, R.: Beiträge zur Mechanik des Deckgebirges der Asse-Südflanke. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 2/94, 32 S., Neuherberg, 1994.

- Wieczorek, K.: EDZ in Rock Salt: Testing Methods and Interpretation. - European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, 3-5 November 2003, Luxembourg, 2003.
- Wieczorek, K.: MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern, Teilprojekt Rückholbarer Einlagerversuch (REV). Bericht über den Zeitraum 01.01.1990 - 31.12.1992. - GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 34/93, Neuherberg, 1993.
- Wolf, J.: Endlagerung verbrauchter Brennelemente aus dem AVR-Versuchskernkraftwerk im Salzbergwerk ASSE. - Kernforschungsanlage Jülich (KFA), Jülich JÜL-1163, 142 S., Jülich, 1975.
- Wolfrum, C.; Klotz, D.; Bode, W.: Bestimmung des Sorptions-/Desorptionsverhaltens ausgewählter Radionuklide an Sedimentgesteinsproben des Asse-Deckgebirges. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 25/88, 238 S., Neuherberg, 1988.
- Yaramanci, U.: Hochfrequenz Mikroseismizität im Steinsalz der Asse um den 945-m-Bereich. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 32/91, 115 S., Neuherberg, 1991.
- Yaramanci, U.; Flach, D.: Erste geoelektrische Untersuchungen im Bereich des Dammbaufeldes auf der Asse. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 18/89, 66 S., Neuherberg, 1989.
- Yaramanci, U.; Flach, D.: Testmessungen mit Radartomographie und -reflexion im Steinsalz auf der Asse. - GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 24/90, 75 S., Neuherberg, 1990.
- Zhang, C.-L.; Rothfuchs, T.; Droste, J.: Post-Tests on Thermo-Mechanically Compacted Salt Backfill. - Proc. 6<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Hannover, 22 - 25 May 2007.

#### 4. Gorleben

Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. - BfS-Schriften, Vol. 4/91, 67 S., 13 Abb., 24 Anl., Salzgitter, 1991.

Bornemann, O.; Behlau, J.; Fischbeck, R.; Hammer, J.; Jaritz W.; Keller, S.; Mingerzahn, G.; Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen geologischen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73, Hannover, 2007.

Heusermann, S.; Eickemeier, R.; Sprado, K.H.; Hoppe, F.J.: Initial Rock Stress in the Gorleben Salt Dome Measured During Shaft Sinking. - Geotechnical Measurements and Modelling (Eds.: Natau, O.; Fecker, E. & Pimentel, E.), S. 139-144, Balkema, Rotterdam, 2003.

Hund, W.; Stier-Friedland, G.; Greve, D.; Jaritz, W.: Geowissenschaftliches Untersuchungsprogramm bei der untertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben von unter Tage. - ET-IB-48, Salzgitter, 1991.

Hunsche, U.; Schulze, O.; Walter, F.; Plischke, I.: Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Tgb-Nr. 11766/03, Hannover, 2003.

Jaritz, W.: Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Barriersystems. - Z. dt. geol. Ges., Vol. 145, S. 192-206, Hannover, 1994.

Zirngast, M.: Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung. - Geol. Jb., A 132, S. 3-31, Hannover, 1991.

Zwirner, R.; Zirngast, M.; Köthe, A.: Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben. - Z. geol. Wiss., Vol. 32 (5/6), S. 327-351, Berlin, 2004.



## 5. Grimsel

Brasser, T.: Entwicklung hydrogeologischer Methoden zur Erkundung von Tiefen-  
grundwasser in geringpermeablen Gesteinen. - Brunnenbau, Bau von  
Wasserwerken, Rohrleitungsbau (bbr), Vol. 37 (8), S. 283-286, 1986.

Brasser, T.; Kull, H.: The ventilation test in an underground laboratory; results from  
Konrad mine (FRG) and Grimsel test site (CH). - In: Hydrogéologie et  
Sûreté des Dépôts de Déchets radioactifs et industriels toxiques, Vol. 1,  
Communications, p. 199-210. - Documents du B.R.G.M, No. 160, Orléans,  
1988.

ENRESA: FEBEX Project: Final report. Final THG modelling report. - ENRESA,  
Publicación técnica, 05-3/2006, 2006.

Fuentes-Cantillana, J.L. u. a.: Full-scale Engineered Barriers EXperiment for a Deep  
Geological Repository for High Level Radioactive Waste in Crystalline Host  
Rock (FEBEX project). - Commission of the European Communities, Nuc-  
lear Science and Technology, EUR 19147 EN, Luxembourg, 2000.

Himmelsbach, Th.; Shao, H.; Wiczorek, K.; Flach, D.; Schuster, K.; Alheid, H.-J.;  
Liou, T.-S.; Bartlakowki, J.; Krekeler, T.: Grimsel Test Site, Investigation  
Phase V, Effective Field Parameter EFP. - Nationale Genossenschaft für  
die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Technical Report 03-13,  
Wettingen, 2003.

Huertas, F.; Fariña, P.; Farias, J.; García-Siñériz, J.L.; Villar, M.V.; Fernández, A.M.;  
Martín, P.L.; Elorza, F.J.; Gens, A.; Sánchez, M.; Lloret, A.; Samper, J.;  
Martínez, M.A.: FEBEX Full-scale Engineered Barriers Experiment.  
Updated Final Report 1994 - 2004. - ENRESA, publicación técnica  
05-0/2006, 2006.

Huertas, F.; Fuentes-Cantillana, J.L.; Jullien, F.; Rivas, P.; Linares, J.; Farina, P.; Ghoreychi, M.; Jockwer, N.; Kickmaier, W.; Martinez, M.A.; Samper, J.; Alonso, E.; Elorza, F.J.: Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX project). - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 19147 EN, Luxembourg, 2000.

Jockwer, N.; Kull, H.; Wieczorek, K.: Investigations on Gas Migration, Contribution to the Gas Migration Test (GMT) at the Grimsel Test Site. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-221, Köln, 2006.

Kull, H.; Miehe, R.: Felslabor Grimsel. Der Einfluss der Stollen-Ventilation auf die hydraulischen Fließverhältnisse im ausbruchsnahen Gebirgsbereich (Kristallin). - Nagra, Technischer Bericht 94-04, Wettingen, 1995.

Marschall, P.; Fein, E.; Kull, H.; Lanyon, W.; Liedtke, L.; Müller-Lyda, I.; Shao, H.: Grimsel Test Site, Investigation Phase V (1997 - 2002), Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Technical Report 99-07, Wettingen, 1999.

Sánchez, M.; Gens, A.: FEBEX Project. Final report on thermo-hydro-mechanical modelling. - ENRESA, Publicación técnica 05-2/2006, 2006.

Schneefuß, J.; Gläß, F.; Gommlich, G.; Schmidt, M.: Felslabor Grimsel. Wärmetest - Abschlussbericht. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Technischer Bericht 88-40, Wettingen, 1989.

## **6. Konrad**

Brasser, T.; Kull, H.: The ventilation test in an underground laboratory; results from Konrad mine (FRG) and Grimsel test site (CH). - In: Hydrogéologie et Sureté des Dépôts de Déchets radioactifs et industriels toxiques, Vol. 1, Communications, p. 199-210, Documents du B.R.G.M., No. 160, Orléans, 1988.

Brewitz, W. (Ed.): Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. - GSF-T 136, Neuherberg, 1982.

Brewitz, W.: Eisenerzbergwerk Konrad - ein zukünftiges Endlager. Ablauf und Ergebnisse der Eignungsprüfung in der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Zusammenfassung. - GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-T 137, Neuherberg, 1982.

## **7. Lac du Bonnet**

Brown, A.; Soonawala, N.M.; Everitt, R.A.; Kamineni, D.C.: Geology and geophysics of the Underground Research Laboratory site, Lac du Bonnet Batholith, Manitoba. - Canadian J. Earth Sci., Vol. 26, S. 404-425, 1989.

Chandler, N.: Numerical modelling of repository sealing systems as applied to the analyses of Underground Research Laboratory experiments. - Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report, 06819-REP-01200-10099-R00, 2003.

Chandler, N.A.; Cournut, A.; Dixon, D.; Fairhurst, C.; Hansen, F.; Gray, M.; Hara, K.; Ishijima, Y.; Kozak, E.; Martino, J.; Masumoto, K.; Mccrank, G.; Sugita, Y.; Thompson, P.; Tillerson, J.; Vignal, B.: The five year report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. - Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-12727, 2002.

Everitt, R.A.; Brown, A.; Davison, C.C.; Gascoyne, M.; Martin, C.D.: Regional and Local Setting of the Underground Research Laboratory. - In: Proc. of the International Symposium on Unique Underground Structures, Denver, Colorado, S. 64-1 to 64-23, 1990.

Fairhurst, C.: Nuclear waste disposal and rock mechanics: contributions of the Underground Research Laboratory (URL), Pinawa, Manitoba, Canada. - Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41 (8), S. 1221-1227, Elsevier, 2004.

- Goodwin, B.W. u. a.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Post-closure assessment of a reference system. - Atomic Energy of Canada Limited (AECL), AECL-10717, COG-93-7, 684 S., Pinawa, Manitoba, Kanada, 1994.
- Graham, J.; Chandler, N.A.; Dixon, D.A.; Roach, P.J.; To, T.; Wan, A.W.L.: The Buffer/Container Experiment: Results, Synthesis, Issues. - Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-11746, COG-97-46-I, 1996.
- Martino, J.B.; Chandler, N.A.: Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory. - Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41 (8), S. 1413-1426, Elsevier, 2004.
- Martino, J.B.; Dixon, D.A.; Kozak, E.T.; Gascoyne, M.; Vignal, B.; Sugita, J.; Fujita, T.; Masumoto, K.: The tunnel sealing experiment: An international study of full-scale seals. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 93-107, Elsevier, 2007.
- Martino, J.B.; Dixon, D.A.; Vignal, B.; Fujita, T.: A full-scale tunnel sealing demonstration using concrete and clay bulkheads exposed to elevated temperatures and pressures. - Proc. Waste Management Conference 2006, 26 February - 2 March 2006, Tucson, Arizona (USA), 2006.
- Ohta, M.M.; Chandler, N.A.: AECL's Underground Research Laboratory - Technical achievements and lessons learned. - Atomic Energy of Canada Ltd. Report, AECL-11760, 1997.
- Ohta, M.M.; Chandler, N.A.; Kuzyk, G.W.; Thompson, P.M.: AECL'S Underground Research Laboratory - Demonstration of key aspects of a used-fuel disposal project. - In: Proc. 1998 Annual Conference on Nuclear Waste Disposal, Tucson, 1998.

Read, R.S.; Chandler, N.A.: An approach to excavation design for a nuclear fuel waste repository - the Thermal-Mechanical Stability Study final report. - Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report, 06819-REP-01200-10086-R00, 2002.

Read, R.S.; Martin, C.D.: Technical Summary of AECL's Mine-by Experiment, Phase 1: Excavation Response. - Atomic Energy of Canada Limited, Report AECL-11311, 1996.

Read, R.S.; Martino, J.B.; Dzik, E.J.; Oliver, S.; Falls, S.; Young, R.P.: Analysis and interpretation of AECL's Heated Failure Tests. - Ontario Power Generation Nuclear Waste Management Division Report, 06819-REP-01200-0070-R00, 1997.

## **8. Meuse / Haute Marne**

Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Experimental programme at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. A short view. - ANDRA, C.RP.ASRP 2000 - 2006, Chatenay-Malabry, 2000.

Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005. Référentiel du site Meuse/Haute Marne. - ANDRA, Report No. C.RP.ADS.04.0022, Chatenay-Malabry, 2005.

Agence Nationale Pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): HLW Clay Repository Project. - ANDRA, Scientific Programme 2002 - 2005, Chatenay-Malabry, 2003.

Delay, J.; Vinsot, A.; Krieguer, J.-M.; Rebours, H.; Armand, G.: Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, North Eastern France. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 2-18, Elsevier, 2007.

Lebon, P.; Ghoreychi, M.: French Underground Research Laboratory of Meuse/Haute-Marne: THM aspects of argillite formation. - Eurock 2000 Symposium, March 27-31, 2000, Aachen, 2000.

Piguet, J.P.: French Underground Research Laboratory - Construction and experimental programme. - ICEM 2001, Brugge, Belgium, 2001.

Rebours, H.; Delay, J.; Vinsot, A.: Scientific investigation in deep borehole at the Meuse/Haute Marne Underground Research Laboratory, Northeastern France. - Proc. of the TopSeal Conference, 17.-22. September 2006, Olkiluoto, 2006.

Zhang, C.L.; Rothfuchs, T.: Experimental Study of the Hydro-Mechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillite. - In: International Meeting of Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, 2002.

Zhang, C.L.; Rothfuchs, T.; Moog, H.; Dittrich, J.; Müller, J.: Thermo-Hydro-Mechanical and Geochemical Behaviour of the Callovo-Oxford Argillite and the Opalinus Clay. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-202, Köln, 2004.

Zhang, C.L.; Rothfuchs, T.; Su, K.; Hoteit, N.: Experimental Study of the Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Indurated Clays. - In: 2<sup>nd</sup> International Meeting of Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, March 14-18, 2005, Tours, 2005.

## **9. Mol**

Bernier, F.; Li, X.L.; Verstricht, J.; Barnichon, J.D.; Labiouse, V.; Bastiaens, W.; Palut, J.M.; Ben Slimane, K.; Ghoreychi, M.; Gaombalet, J.; Huertas, F.; Galera, J.M.; Merrien, K.; Elorza, F.J.; Davies, C.: CLIPLEX: Clay Instrumentation Programme for the Extension of an Underground Research Laboratory. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 20619 EN, Luxembourg, 2002.

Noynaert, L. (Ed.): Heat and Radiation Effects on the Near Field of a HLW or Spent Fuel Repository in a Clay Formation (CERBERUS Project). - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 19125, Luxembourg, 2000.

Organisme National des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies (ONDRAF/NIRAS): The PRACLAY Demonstration Test. - NIROND 97-06, Bruxelles, 1997.

Organisme National des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies ONDRAF/NIRAS: The Praclay project. Demonstration test on the Belgian disposal facility concept for high activity vitrified waste. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 18047 EN, Luxembourg, 1998.

Valcke, E.; Smets, S.; Labat, S.; Lemmens, K.; van Iseghem, P.; Gysemans, M.; Thomas, P.; van Bree, P.; Vos, B.; van den Berghe, S.: CORALUS II, An integrated in-situ corrosion test on alpha-active HLW glass - Phase II. - Detailed final report of SCK•CEN for the EC project CORALUS II, 135 p. (External Report of the Belgian Nuclear Research Centre; ER-27; FIKW-CT-2000-00011), ISSN 1782-2335, Mol, 2007.

Valcke, E.; van Iseghem, P.; Smets, S.; Labat, S.; Godon, N.; Jockwer, N.; Wiczorek, K.: An integrated in situ corrosion test on alpha-active HLW glass. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 19795, Luxembourg, 2001.

Volckaert, G.; Dereeper, B.; Put, M.; Ortiz, L.; Gens, A.; Vaunat, J.; Villar, M.; Martin, P.L.; Imbert, C.; Lassabatere, T.; Mouche, E.; Cany, F.: A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock, RESEAL project - Phase I. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 19612 EN, Luxembourg, 2000.

Volckaert, G.; Ortiz, L.; De Cannière, P.; Put, M.; Horseman, S.T.; Harrington, J.F.; Fioravante, V.; Impey, M.: MEGAS - Modelling and experiments on gas migration in repository host rocks. - Commission of the European Communities, Nuclear Science and Technology, EUR 16235, Luxembourg, 1995.

## 10. Mont Terri

Alheid, H.J.: Lessons learned in indurated clays, Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. - Proc. of a European Commission CLUSTER Conference, held in Luxembourg on 3-5 November 2003, p. 39-49, Luxembourg, 2003.

Alheid, H.J.; Knecht, M.; Boisson, J.Y.; Hommand-Etienne, F.; Pepa, S.: Comparison of in-situ hydraulic and seismic measurements in the excavation damaged zone of underground drifts. - In: Proc. 9<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics, (Eds.: Vouille, G; Berest, P.), p. 1263-1266, Paris (Balkema), 1999.

Blümling, P.; Bauer-Plaindoux, C.; Mayor, J.C.; Alheid, H.-J.; Fukaya, M.: Geomechanical investigations at the underground rock laboratory Mont Terri. - Proc. of the International Workshop on Geomechanics "Hydromechanical and thermohydromechanical behaviour of deep argillaceous rock: theory and experiments", Paris, 11-12 October 2000, p. 275-283, Paris, 2002.

Bock, H.: RA Experiment: Rock Mechanics Analyses and Synthesis: Conceptual Model of the Opalinus Clay. - Q+S Consult, Technical Report 2001-03, 2002.

Bossart, P.; Trick, T.; Meier, P.M.; Mayor, J.C.: Structural and hydrogeological characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland). - Applied Clay Science, Vol. 26, p. 429-448, 2004.

Burkhard, M.: Geology of Northwestern Switzerland - with special emphasis on Opalinus Clay. - Mont Terri Project - Proc. of the 10 Year Anniversary Workshop, p. 19-23, Rep. Swiss Geol. Surv., No. 2, 2007.



- Gautschi, A.; Marschall, P.; Schwyn, B.; Baeyens, B.; Bradbury, M.H.; Gimmi, Th.; Mazurek, M.; Van Loon, L.R.; Waber, N.; Wersin, P.: Geoscientific Basis for Making the Safety Case for a SF/HLW/ILW Repository in Opalinus Clay in NE Switzerland (Project Entsorgungsnachweis) - II: The Geosphere as a Transport Barrier: Hydraulic, Diffusion and Sorption Properties. - NEA/RWM/IGSC, Vol. 8, p. 63-70, 2004.
- Göbel, I.; Alheid, H.J. u. a.: Heater Experiment: Rock and bentonite thermo-hydro-mechanical (THM) processes in the near field of a thermal source for development of deep underground high level radioactive waste repositories. - (Eds.: Bossart, P.; Nussbaum, Ch.), Rep. Swiss Geol. Surv., No. 1, 2007.
- Haarpaintner, R.T.; Schaeren, G.: Conditions géologiques et hydrogéologiques générales. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Technical Report 99-03, Wettingen, 2002.
- Hugi, M.; Bossart, P.; Hayoz, P.: Mont Terri Project. - Proc. of the 10 Year Anniversary Workshop, Rep. Swiss Geol. Surv., No. 2, 2007.
- Jockwer, N.; Wiczorek, K.; Fernández, A.M.: Measurements of gas generation, water content and change in the water distribution in a heater experiment in the underground laboratory Mont Terri. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 530-537, Elsevier, 2007.
- Kruschwitz S.; Yaramanci, U.: Engineered Barrier (EB) Experiment: EDZ Geophysical Characterisation. Detection and Characterisation of the Disturbed Rock Zone in Claystone with Complex Valued Geoelectrics, Mont Terri Rock Laboratory. - Technical Report 2002-01 (transferred from TN 2002-06), Technical University of Berlin, 2002.
- Mayor, J.C.: Large-scale demonstration experiments at Mont Terri rock laboratory. - Mont Terri Project - Proc. of the 10 Year Anniversary Workshop, p. 73-77, Rep. Swiss Geol. Surv., No. 2, 2007.

Mayor, J.C.; Garcia-Siñeriz, J.L.; Velasco, M.; Gómez-Hernández, J.; Lloret, A.; Matray, J.-M.; Coste, F.; Giraud, A.; Rothfuchs, T.; Marshall, P.; Roesli, U.; Mayer, G.: Ventilation Experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. - (Eds.: Bossart, P.; Nussbaum, Ch.), Rep. Swiss Geol. Surv., No. 1, 2007.

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Safety Report, Project Opalinus Clay: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 02-05, Wettingen, 2002.

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Projekt Opalinuston: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 02-03, Wettingen, 2002.

Pearson, F.J.; Arcos, D.; Barth, A.; Boisson, J.-Y.; Fernandez, A.; Gaebler, H.-E.; Gaucher, E.; Gautschi, A.; Griffault, L.; Hernan, P.; Waber, H.N.: Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory - Synthesis Report. - Swiss National Hydrological and Geological Survey, Geological Report No. 5, Ittigen-Bern, Switzerland, 2003.

Rothfuchs, T.; Hartwig, L.; Hellwald, K.; Komischke, M.; Miehe, R.; Wieczorek, K.: Ventilation Test at Mont Terri: Geoelectric Monitoring of Opalinus Clay Desaturation. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-207, Köln, 2004.

Rothfuchs, T.; Jockwer, N.; Zhang, C.-L.: Self-sealing barriers of clay/mineral mixtures - The SB project at the Mont Terri Rock Laboratory. - In: Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Special Issue, selected papers from the ANDRA meeting in Tours, 2005 (Ed.: Aranyossy, J.-F.), Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, p. 108-115, Elsevier, 2007.

- Savoie, S.; Wersin, P.: Diffusion experiments at Mont Terri: Overview and results. - Mont Terri Project - Proc. of the 10 Year Anniversary Workshop, p. 55-61, Rep. Swiss Geol. Surv., No. 2, 2007.
- Schuster, K.; Alheid, H.-J.: Engineered Barrier (EB) Experiment and Geophysical Characterisation of the Excavation Disturbed Zone (ED-C) Experiment: Seismic Investigation of the EDZ in the EB niche. - Technical Report 2002-03 (transferred from TN 2002-44), BGR, Hannover, 2002.
- Spies, T.; Heidrich, D.; Kruschwitz, S.: Geophysical Characterisation of the Excavation Disturbed Zone (ED-C) Experiment: Acoustic emission measurements during the excavation of the EB niche - a mine-by experiment, Mont Terri Rock Laboratory. - Technical Report 2002-02 (transferred from TN 2002-08), BGR, Hannover, 2002.
- Thury, M.; Bossart, P.: Mont Terri Rock Laboratory. Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997. - Swiss National Hydrological and Geological Survey, Geological Report, Vol. 23, Bern, 1999.
- Yaramanci, U.; Kruschwitz, S.; Maultzsch, S.: Geophysical Characterisation of the Excavation Disturbed Zone (ED-C) Experiment: Geoelectrical Characterization of the Opalinus Clay Formation in the Underground Rock Laboratory of Mont Terri. - Technical Report 2000-04 (transferred from TN 2000-33), Technical University Berlin, 2002.
- Zhang, C.-L.; Rothfuchs, R.; Jockwer, N.; Wiczorek, K.; Dittrich, J.; Müller, J.; Hartwig, L.; Komischke, M.: Thermal Effects on the Opalinus Clay - A Joint Heating Experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL (HE-D Project). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-224, Köln, 2006.
- Zhang, C.-L.; Rothfuchs, T.; Moog, H.; Dittrich, J.; Müller, J.: Thermo-Hydro-Mechanical and Geochemical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillite and the Opalinus Clay - Final Report. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-202, Köln, 2004.

Zhang, C.-L.; Rothfuchs, T.: Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Indurated Clays. - Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Vol. 32, Issues 8-14, p. 957-965, 2007.

## 11. Morsleben

Behlau, J.; Mingerzahn, G.: Geological and tectonic investigations in the former Morsleben salt mine (Germany) as a basis for the safety assessment of a radioactive waste repository. - Engineering Geology, Vol. 61, p. 83-97, 2001.

Büttner, K.; Heusermann, S.: Geomechanical stability and integrity of the salt barrier in the central part of the Morsleben repository. - In: Proc. of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 329-336, Berlin, 2004.

Fahland, S.; Heusermann, S.: Messung und Berechnung von Gebirgsspannungen im ERA Morsleben zur Beurteilung des Tragverhaltens alter Abbaufelder. - Messen in der Geotechnik 2006, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 82, S. 113-132, Braunschweig, 2006.

Heusermann, S.; Nipp, H.-K. (2000): ERA Morsleben. Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben. - Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 0120259, Hannover, 2000.

Kreienmeyer, M.; Schmidt, H.; Gläß, F.; Mauke, F.: Central part of the Morsleben repository - geomechanical situation before stabilisation. - In: Proc. Of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 312-317, Berlin, 2004.

Müller-Hoeppe, N.; Kreienmeyer, M.; Eilers, G.; Köster, R.: Stabilization of the Central Part of the Morsleben Repository (bGZ) - Safety of Transient Situations During the Stabilization Process. - In: Proc. of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 379-382, Berlin, 2004.

Müller-Hoeppe, N.; Polster, M.; Schmidt, H.; Mauke, R.; Preuss, J.: Closure of the Morsleben repository - design of drift seals and proof of safety. - In: Proc. of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 318-321, Berlin, 2004.

Spies, T.; Hesser, J.; Eisenblätter, J.; Eilers, G.: Monitoring of the rock mass in the final repository Morsleben: experiences with acoustic emission measurements and conclusions. - In: Proc. of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 303-311, Berlin, 2004.

Weidenbach, J.; Fischle, W.; Mauke, R.; Rathke, C.: Central Part of the Morsleben Repository - Geotechnical Monitoring Programme. - In: Proc. of DisTec (Disposal Technologies and Concepts), International Conference on Radioactive Waste Disposal, 26-28 April 2004, Kontec Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, p. 339-342, Berlin, 2004.

## **12. Tournemire**

Ben Slimane, K.; Cabrera, J.; Matray, J.M.; Rejeb, A.; Savoye, S.: Excavation damaged zones in the argillaceous Tournemire site: characterization and failure mechanisms. - Congrès "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement", Lille, 17.09.2007.

Ben Slimane, K.; Cabrera, J.; Matray, J.M.; Rejeb, A.; Savoye, S.: Hydro-mechanical response of the Tournemire argillite to the underground openings excavation: unsaturated zones and mine-by-test experiment. - GEOPROC 2008, Lille, 2.6.2008.

- Boisson, J.-Y.; Bertrand, L.; Heitz, J.-F.; Moreau-Le Golvan Y.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. - Hydrogeology Journal, Vol. 9, p. 108-123, 2001.
- Bonin, B.: Deep geological disposal in argillaceous formations: studies at the Tournemire test site. - Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 35 (1), S. 315-330, Elsevier, December 1998.
- Cabrera, J. ; Beaucaire, C. ; Bruno, G. ; De Windt, L. ; Genty, A. ; Ramambasoa, N. ; Rejeb, A. ; Savoye, S. ; Volant, P.: "Projet Tournemire - Synthèse des programmes de recherche 1995-1999". - Rapport IPSN: DPRE/SERGD 01-19, 202 p., 2001.
- Cabrera, J.; Rejeb, A.: Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argillaceous Tournemire site. - EUROSAFE 2006 Radioactive Waste Management, Paris, 13.11.2006.
- Chijimatsu, M.; Fujita, T.; Kobayashi, A.; Ohnishi, Y.; Rejeb, A.; Uehara, S.: Hydraulic modelling of unsaturated zones around three openings at the argillaceous Tournemire site (France). - GEOPROC 2008, Lille, 2.6.2008.
- Kohlmeier, M.; Massmann, J.; Rejeb, A.; Shao, H.; Ziefle, G.; Zielke, W.: Numerical Analysis of the Desaturation Process at the Argillaceous Tournemire Site (France) - GEOPROC 2008, Lille, 2.6.2008.
- Millard, A.; Rejeb, A.: Identification of the hydro-mechanical in-situ properties of Tournemire argillite from mine-by-test experiment. - GEOPROC 2008, Lille, 2.6.2008.
- Peyaud, J.B.; Pagel, M.; Cabrera, J.; Pitsch, H.: Mineralogical, chemical and isotopic perturbations induced in shale by fluid circulation in a fault at the Tournemire experimental site (Aveyron, France). - Journal of Geochemical Exploration, Vol. 90 (1-2), S. 9-23, Elsevier, 2006.

Rejeb, A.; Rutqvist, J.: Evolution spatio-temporelle des zones endommagées (EDZ): Retour d'expérience du site argileux de Tournemire (France). - ISRM 2007, 11th International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, 9.7.2007.

Rejeb, A.: Time-dependent behaviour of Tournemire argillites (France). - ISRM 2003, Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.

### **13. WIPP**

DOE - U.S. Department of Energy: Waste Isolation Pilot Plant Compliance Certification Application. - Carlsbad, New Mexico, 1996.

Hansen, F.D.: The Disturbed Rock Zone at the Waste Isolation Pilot Plant. - Sandia National Laboratories, SAND2003-3407, Albuquerque, New Mexico, USA, 2003.

Hansen, F.D.; Callahan, G. D.; van Sambeek, L.L.: Reconsolidation of salt as applied to permanent seals for the Waste Isolation Pilot Plant. - 6<sup>th</sup> Int. Conference on Mechanical Behavior of Salt, September 1993, Palaiseau, France, 1993.

Matalucci, R.V.; Munson, D.E.: Planning, Developing, and Organizing In Situ Tests for the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). - Sandia National Laboratories, SAND-84-1390, Albuquerque, New Mexico, USA, 1986.

McTigue, D.F.: Permeability and Hydraulic Diffusivity of Waste Isolation Pilot Plant Repository Salt, Inferred from Small-Scale Brine Inflow Experiments. - Sandia National Laboratories, SAND-92-911, UC-721, Albuquerque, New Mexico, USA, 1993.

Munson, D.E.; DeVries, K.L.; Callahan, G.D.: Comparison of Calculations and In Situ Results for a Large Heated Test Room at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). - Proc. 31st U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, June 18-20, 1990, Sandia National Laboratories, SAND-89-2268, UC-721, Albuquerque, New Mexico, USA, 1990.

Stormont, J.C.: Discontinuous Behavior Near Excavations in a Bedded Salt Formation.  
- Sandia National Laboratories, SAND-89-2403, UC-721, Albuquerque,  
New Mexico, USA, 1990.

Winter, C. u. a.: Waste Isolation Pilot Plant. - Sandia National Laboratories, SAND-84-  
2326, Albuquerque, New Mexico, USA, 1985.

#### **14. Yucca Mountain**

Environmental Protection Agency (EPA): EPA's Proposed Public Health and Environ-  
mental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain. - Yucca  
Mountain Fact Sheet #2, EPA 402-F-05-026, October 2005.

U.S. Department of Energy (DOE): Yucca Mountain Science and Engineering Report.  
Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration,  
Revision 1. - DOE, Office of Civilian Radioactive Waste Management,  
DOE/RW-0539-1, Las Vegas, Nevada, USA, 2002.