Das Mont-Terri-Projekt : Untersuchungen über den Opalinuston im internationalen Felslabor

Autor(en): **Heitzmann, Peter / Bossart, Paul**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **6 (2001)**

Heft 2

PDF erstellt am: **27.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-222976

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 6	Nr. 2	S. 183 – 197	Dezember 2001

Das Mont-Terri-Projekt Untersuchungen über den Opalinuston im internationalen Felslabor

mit 6 Figuren und 4 Tabellen

PETER HEITZMANN [1] & PAUL BOSSART [2]

Zusammenfassung 183
Résumé 183
Summary 184
1. Einleitung und Geschichte 184
2. Organisation 185
3. Das Felslabor - Geologie und Hydrologie 187
4. Der Opalinuston 190
5. Die EDZ 191
6. Hydrogeologische Prozesse 193
7. Neue Experimente 195
8. Schlussbetrachtung 196
Verdankungen 197
Bibliographie 197

Zusammenfassung

Im unterirdischen Felslabor des Mont-Terri-Projektes werden Untersuchungen zur Charakterisierung der hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften einer Tonformation (Opalinuston) durchgeführt. Wichtig sind dabei auch Experimente, die zur Entwicklung von Messgeräten und Untersuchungsmethoden beitragen sowie Demonstrationsexperimente. Zehn Partner aus sieben Ländern haben einen Zusammenarbeitsvertrag abgeschlossen. Die Leitung liegt beim Bundesamt für Wasser und Geologie, das auch um die erforderlichen Bewilligungen beim Kanton Jura nachsucht.

Résumé

Dans le laboratoire souterrain du Projet Mont Terri, des recherches pour l'évaluation des caractéristiques hydrogéologiques, géochimiques et géotechniques d'une formation argileuse (Argiles à Opalinus) sont réalisées. Des expériences qui aboutissent au développement d'instruments et de méthodes d'analyses ainsi que des expériences de démonstration jouent également un rôle important. Dix partenaires venants de sept pays ont signé une convention de collaboration. L'Office fédéral des eaux et de la géologie dirige le projet et demande les autorisations nécessaires aux autorités de la République et Canton du Jura.

---

[1] Bundesamt für Wasser und Geologie, 3003 Bern-Ittigen, Leiter des Mont-Terri-Projektes.
[2] Institut géotechnique SA, Fabrique de Chaux, 2882 St-Ursanne, Projekt-Manager des Mont-Terri-Projektes.

Summary

In the underground laboratory of the Mont Terri Project, experiments for the hydrogeological, geochemical and geotechnical characterisation of an argillaceous formation (Opalinus Clay) are carried out. Of great importance are also experiments for the development of instruments and research methods as well as demonstration experiments. Ten Partners coming from seven countries have signed a cooperation agreement. The Project Direction is at the Federal Office for Water and Geology who asks also for the authorisations at the République et Canton du Jura.

1. Einleitung und Geschichte

Mit den Konzepten für die Lagerung von radioaktiven Abfällen in Tonformationen kam in verschiedenen Ländern auch das Bedürfnis auf, Felslabors in derartigen geologischen Formationen einzurichten. Da im Mont-Terri-Tunnel bei St-Ursanne schon beim Bau des Pilotstollens in einer Zusammenarbeit zwischen Nagra sowie Landeshydrologie und -geologie (LHG) die Opalinuston-Formation geologisch detailliert aufgenommen und beprobt wurde, lag es nahe dort ein weitergehendes Untersuchungsprogramm durchzuführen (Tab. 1). In der Folge nahm die LHG mit der République et Canton du Jura als Eigner der Tunnelanlage Kontakt auf.

1989	Detaillierte Aufnahme der Opalinus-Ton-Strecke im Mont -Terri-Pilotstollen durch die LHG und die Nagra
Februar 1995	Bewilligung des Kantons Jura an die LHG für ein erstes Forschungsprojekt
Juni 1995	Vorführung des Projektes vor dem Clay Club der OCDE/AEN, grosses Interesse, Verhandlungen, Vereinbarung
Januar 1996	Ausbruch von acht Nischen, Beginn der Bohrkampagnen
April 1997	Gesuch an die Regierung des Kantons Jura für ein neues Forschungsprogramm verbunden mit dem Vortrieb eines neuen Stollens
Juni 1997	Bewilligung des Kantons für Phase 3
November 1997	Beginn der Arbeiten für den neuen Stollen
April 1998	Ende der Ausbruchsarbeiten
September 1998	Einweihung des neuen Labors
Mai 2000	Bewilligung des ersten Projektes mitfinanziert durch EU und BBW
Juli 2001	Vertrag zwischen BWG und Kanton Jura, Anpassung der Vereinbarung der Mont-Terri-Partner, Beginn der Phase 7

Tab. 1: Mont-Terri-Projekt - Zur Geschichte.

1995 kam es zwischen sechs Partnern unter dem Patronat der Landeshydrologie und -geologie (LHG) zu einem Agreement über das Mont-Terri-Projekt mit folgenden Zielsetzungen:

- Charakterisierung der hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons,
- Charakterisierung der Veränderungen im Gestein, die durch den Ausbruch von Stollen entstehen,
- Erprobung und Verbesserung von Untersuchungsmethoden.

Im Erkundungsstollen Mont Terri wurden in der Folge acht Nischen ausgebrochen und so die notwendige Infrastruktur geschaffen, um in Bohrungen relevante Experimente durchführen zu können. Da auf Ende 1997 die Eröffnung des Autobahntunnels vorgesehen war und der Erkundungsstollen dann als Sicherheitstunnel zur Verfügung stehen musste, wurde nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die Untersuchungen fortzusetzen und gleichzeitig auch zu erweitern. Die Lösung lag im Bau eines eigentlichen Versuchsstollens im Bereich der interessierenden Opalinuston-Formation. Nur drei Monate nach Einreichung des Gesuchs erteilte die Regierung des Kantons Jura im Juli 1997 die Bewilligung zum Bau des Stollens und zur Durchführung der damit verbundenen Experimente. Dabei bot sich die einzigartige Gelegenheit, das Gebirge vor, während und nach der Durchörterung zu untersuchen und Veränderungen der spezifischen Gebirgsparameter beziehungsweise der jeweiligen Zustandsbedingungen (Porendruck und Gebirgsspannung) zu beobachten.

Im Zusammenhang mit dem Bericht der Expertengruppe «Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle» (EKRA) verlangte der Kanton Jura im Herbst 2000, auch den Betrieb des Labors auf eine vertragliche Basis abzustützen, wobei der Bund gegenüber dem Kanton die Verantwortung übernehmen sollte. In der Folge konnten im Frühling 2001 einerseits eine Konvention zwischen Bund und Kanton Jura abgeschlossen und andererseits das Zusammenarbeitsabkommen zwischen den Mont-Terri-Partnern angepasst werden. Seit Juli 2001 läuft das Forschungsprogramm im Felslabor Mont Terri in seiner neuen Organisation.

2. Organisation

Im Laufe des Mont-Terri-Projektes wurden neue Partner aufgenommen, so dass mittlerweile die Anzahl der Projektpartner auf zehn angewachsen ist (Tabelle 2). Auf Grund der Verträge vom Sommer 2001 liegt die Leitung des Projektes bei der Landesgeologie im Bundesamt für Wasser und Geologie, BWG (Fig. 1). Zur Koordination der verschiedenen Experimente bilden die Delegierten der Partner-Organisationen ein Programm-Komitee; dieses stellt das Untersuchungsprogramm zusammen und begleitet die Forschungsarbeiten. Für die jährliche Bewilligung unterbreitet jeweils das Bundesamt dem Kanton Jura das neue Jahresprogramm; letzterer erteilt dann dem Bund die erforderliche Autorisierung. Mit der Durchführung des Untersuchungsprogramms im Felslabor ist das Institut Géotechnique SA, St-Ursanne, beauftragt, das auch für das Datenmanagement verantwortlich zeichnet. Alle Resultate – aus dem Felslabor oder an Proben, die dort gewonnen werden – stehen den Partnern zur Verfügung und werden zudem beim BWG archiviert.

Verantwortlich für den Autobahntunnel Mont Terri:

République et Canton du Jura, Département de l'Environnement et de l'Equipement

Projektpartner:

Schweiz	BWG Bundesamt für Wasser und Geologie, Landesgeologie (Leitung des Projektes) NAGRA Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
Belgien	SCK•CEN, Studiecentrum voor Kernenergie • Centre d'étude de l'énergie nucléaire
Deutschland	BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe GRS, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
Frankreich	ANDRA, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs IPSN, Institut de protection et de sûreté nucléaire
Japan	OBAYASHI, Obayashi Corporation JNC, Japan Nuclear Cycle Development Institute
Spanien	ENRESA, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A

Projektmanagement:

Institut Géotechnique SA, St-Ursanne

Tab. 2: Mont-Terri-Projekt - Beteiligte Organisationen.

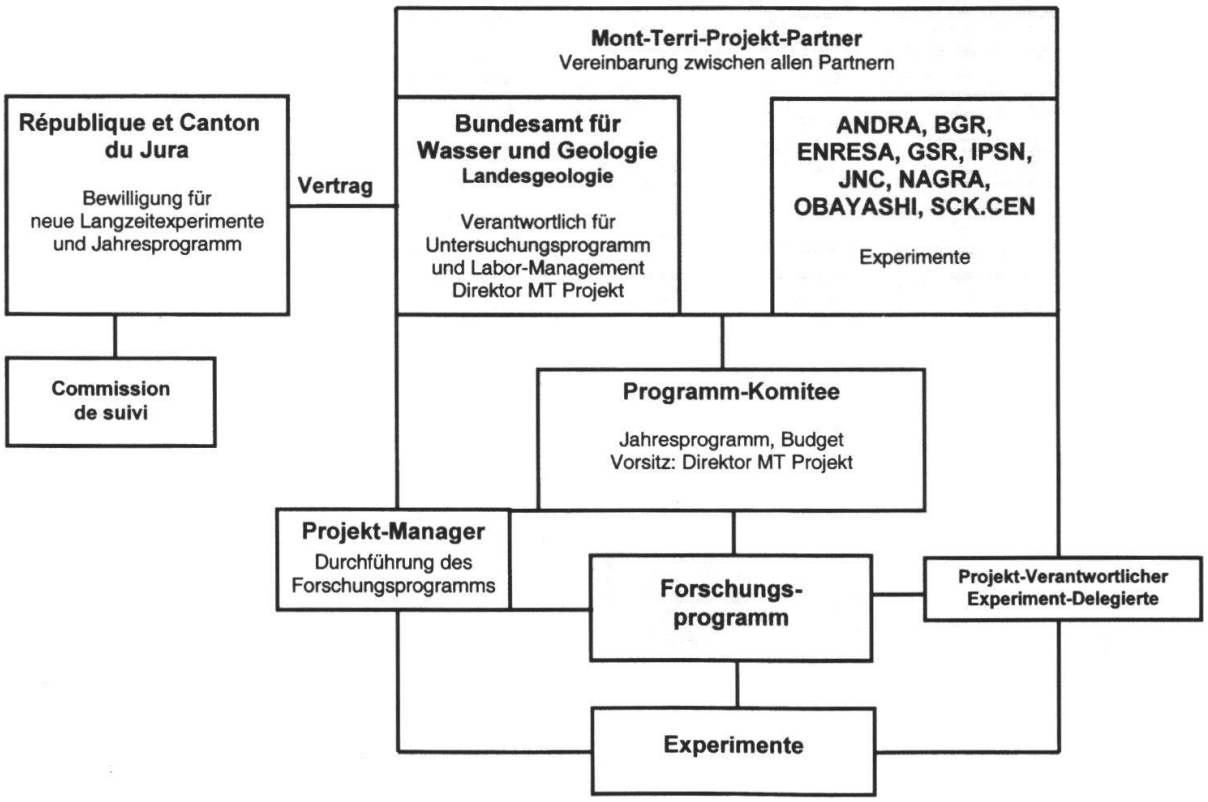


Fig. 1: Mont-Terri-Projekt - Organisation.

3. Das Felslabor - Geologie und Hydrologie

Das Felslabor Mont Terri liegt im Bereich des Sicherheitsstollens des Mont-Terri-Autobahntunnels der Nationalstrasse A 16. Dieser Tunnel im Faltenjura quert die äusserste Falte, die Mont-Terri-Antiklinale, welche auf die Vorlandplatte überschoben ist (Fig. 2). Der Südteil dieses Tunnels durchquert die gesamte südfallende Sedimentserie (von Süden nach Norden vom jüngeren Malm bis zur jüngeren Trias) im Südschenkel der Antiklinale, so dass hier ein lückenloses, wenig gestörtes Profil aufgenommen werden kann. Der Opalinuston ist ca. 150 m mächtig und steht im Stollen bedingt durch das Südfallen auf einer Länge von etwa 240 m an. Die Überlagerung beträgt heute im Laborbereich 230–320 m; die ursprüngliche Überlagerung wird auf mindestens 1000 m geschätzt.

Wichtig für die Modellierung der hydrogeologischen Prozesse (Kapitel 6) ist neben den geologischen Kenntnissen auch die Analyse der hydrologischen und paläohydrologischen Situation. Der Doubs, der heute bei St-Ursanne mit einem engen Knie seine Richtung um fast 180 Grad ändert und Richtung W in den Saône-Graben entwässert, ist der regionale Vorfluter. Die Paläohydrologie der Freiberge ist sehr komplex (Wermeille & Bossart 1999): Eine ursprüngliche Entwässerung in Richtung SE hat wahrscheinlich im frühen Miozän in eine solche in Richtung NW umgeschlagen, wobei in einer zweiten Phase das Doubs-Knie gebildet und die heutige Abfluss-Situation erreicht wurden. Der Zeitpunkt, zu dem das Erosionsniveau des Doubs unter das Niveau des heutigen Felslabors fiel und somit das Labor nicht mehr im unmittelbaren Grundwasserbereich lag, kann nur überschlagsweise mit etwa 1–3 Millionen Jahren angegeben werden.

Die Untersuchungen wurden während den beiden ersten Phasen (1996) in den Nischen im damaligen Erkundungsstollen, heute Sicherheitsstollen (Fig. 3) durchgeführt. Einige der Experimente dauern immer noch an; allerdings muss bei den Arbeiten streng auf den Betrieb der Autobahn Rücksicht genommen werden.

Während der Phase 3 (Mitte 1997 bis Mitte 1998) wurde der neue Versuchsstollen

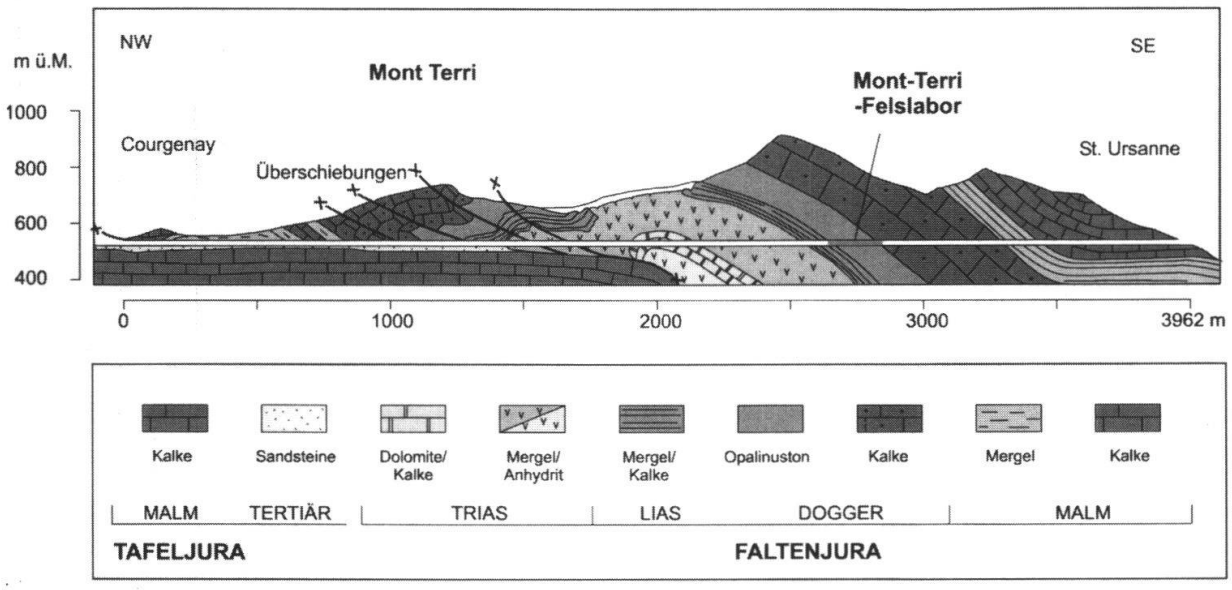


Fig. 2: Geologisches Profil längs des Mont-Terri-Autobahntunnels.

gebaut. Für die Analyse der Gebirgsverhältnisse konnte der Bereich des zukünftigen Stollens vor dessen Bau vom Sicherheitsstollen aus mit Bohrungen erkundet werden. Während des Vortriebes, der aus Versuchsgründen mit verschiedenen Methoden (Sprengung, pneumatischer Hammer, Teilschnittmaschine) durchgeführt wurde, konnte die Veränderung der Gebirgsparameter (z.B. hydraulische Durchlässigkeit) verfolgt werden; bis heute kann der weitere Verlauf dieser Werte beobachtet werden.

Die im Verlauf der 7 Phasen durchgeführten beziehungsweise geplanten Experimente figurieren in Tabelle 3. Ein Teil dieser Experimente ist abgeschlossen (Thury & Bossart, 1999), und ihre Ergebnisse bilden die Grundlagen-Daten und -Informationen für die Entwicklung neuer komplexerer Experiment-Konzepte, die vielfach auch über mehrere Jahre angesetzt werden. Generell können folgende Typen unterschieden werden:

- Entwicklung von Messgeräten und Untersuchungsmethoden,
- Experimente, die der Charakterisierung des Opalinustons dienen,
- Experimente, die dem Prozessverständnis dienen (insbesondere dem Verständnis gekoppelter Prozesse)
- Experimente, welche die geotechnischen und felsmechanischen Vorgänge in der Auflockerungszone untersuchen und
- Demonstrationsexperimente

Stellvertretend werden in den folgenden Kapiteln einige Experimente und Ergebnisse näher beschrieben.

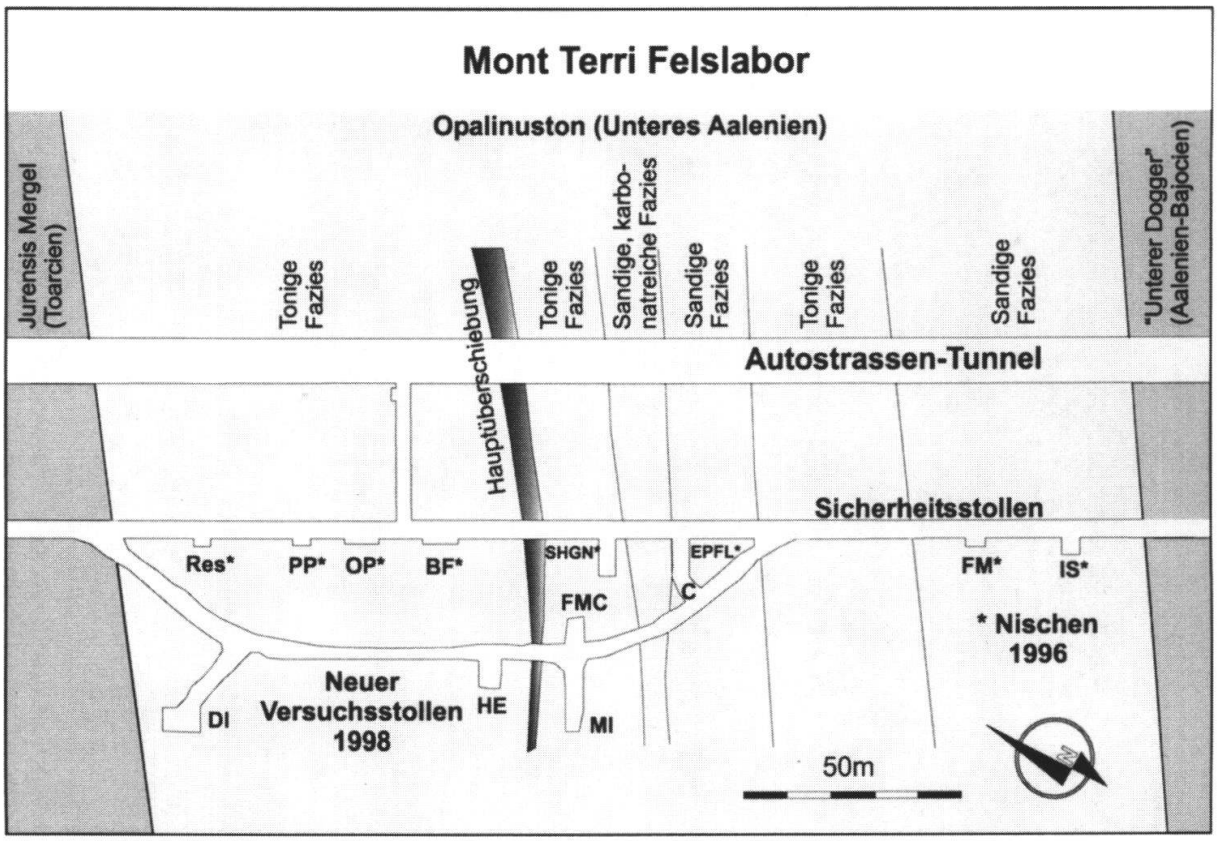


Fig. 3: Grundriss des Mont-Terri-Felslabors.

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
	Phasen						
Mont Terri Experimente	1	2	3	4	5	6	7
FM-A: Flow mechanism: fluid logging	■	■					
FM-B: Flow mechanism: resin injection	■	■					
FM-C: Flow mechanism: tracer	■	■	■	■	■	■	■
FM-D: Evaporation logging		■	■	■	■	■	■
WS-A: Groundwater sampling (in situ)	■	■	■	■	■	■	
WS-B: Porewater sampling (laboratory)	■	■	■	■	■		
WS-E: Cl and He profiles			■	■			
PC: Porewater chemistry							■
GP: Hydraulic and gas permeability	■	■	■	■	■	■	
GP-A: Long-term gas injection test					■	■	
GP-B: Gas and water coupled processes							■
BF: Borehole fluid effects	■	■	■	■			
DT: Drilling techniques	■	■					
ED-A: EDZ* hydraulic and pneumat. test	■	■	■				
ED-B: EDZ* evolution around new gallery		■	■	■	■	■	
ED-C: EDZ* seismic characterisation		■	■	■	■	■	■
EH: EDZ* self-healing			■	■	■	■	■
OP: Osmotic pressure	■	■	■	■	■		■
CW: High-pH cement porewater	■	■	■	■	■	■	■
UZ: Unsaturated zone	■			■	■		
PP: Porewater pressure		■	■				
IS-A: In situ stress (over/undercoring)		■					
IS-B: In situ stress (borehole slotter)		■					
IS-C: In situ stress (hydraulic fracturing)			■	■			
IS-D: In situ stress (overcoring)					■	■	■
DM: Deformation mechanism			■	■	■		
GS: Gasfrac self-healing			■	■	■	■	
DI: Diffusion in rock			■	■	■	■	
DI-A/B: Long-term diffusion					■	■	■
HE-A/C:Heater experiment			■	■	■	■	
RB Horizontal raise boring				■	■		
GR: Ground penetration radar				■			
DB: Deep borehole simulation				■	■		
FP: Fracture propagation				■	■		
GM: Geochemical modelling task				■	■	■	
RA: Rock mechanics analyses					■	■	■
HA: Hydrogeologic analyses					■	■	■
EU/BBW mitfinanzierte Experimente							
EB: Enineered Barrier							■
VE: Ventilation Experiment							■
HE-B: Heater Experiment							■
SE: Selfrac MT (Mont Terri)							■

Tab. 3: Übersicht der seit 1996 laufenden oder bereits abgeschlossenen Experimente im Mont-Terri-Felslabor. *EDZ: Excavation Disturbed Zone.

4. Der Opalinuston

Die wahre Mächtigkeit des Opalinustons im Felslabor Mont Terri beträgt zirka 150 m. Das Felslabor befindet sich je nach Ort zwischen 230 und 320 m unter der Terrainoberfläche. Es können drei Gesteinstypen unterschieden werden:

- in der unteren (nördlichen) Hälfte der Abfolge eine tonige Fazies,
- in der Mitte der Abfolge eine etwa 15 m mächtige sandige, karbonatreiche Fazies und
- im oberen (südlichen) Teil eine sandige Fazies in Wechsellagerung mit der erwähnten tonigen Fazies.

Die tonige Fazies enthält zirka 65% Tonminerale (davon 11% Illit-Smectit Mixed Layers), 19% Quarz (Sand und Silt), 13% Calcit sowie Siderit, Pyrit, Feldspat und organischen Kohlenstoff im Prozentbereich. Die sandige Fazies hat im Vergleich zur tonigen Fazies einen geringeren Ton- (40%) und einen höheren Quarzanteil (30%).

Die wichtigsten Kennwerte des Opalinustons sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Erwähnenswert ist dabei die sehr geringe Wasserdurchlässigkeit bei einer relativ hohen Porosität und hohem Wassergehalt. Beim Bau des Versuchsstollens wurden weder im Gestein noch entlang der Störungen Feuchtstellen oder Wasserzutritte beobachtet. Hydrotests ergaben für das Gestein eine hydraulische Durchlässigkeit von durchschnittlich $2x10^{-13}$ m/s. Die Hauptstörung scheint keine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit aufzuweisen; diese liegt in der gleichen Grössenordnung wie diejenige des ungestörten Gesteins.

Die sehr feinen Poren des Opalinustons sind wassergesättigt, und das Porenwasser selbst ist stellenweise – vor allem im unteren Teil der Formation – stark minerali-

Parameter	Bereich	Mittelwert
Gesteinsdichte, gesättigt (g cm^{-3})	2.40–2.53	2.47
Wassergehalt (Gew.%)	3.0–8.1	5.6
Porosität (%)	7–18	12
Durchlässigkeitsbeiwert (ms^{-1})	1E-13–5E-13	2E-13
Thermische Leitfähigkeit ($Wm^{-1}K^{-1}$)	1.0–3.1	2.1
Wärmekapazität (J Kg^{-1} K^{-1})	970–1340	1155
Konzentration gelöster Ionen im Porenwasser (g/l)	5–20	12
Uniaxiale Druckfestigkeit (MPa)	10–16	13
Elastizitäsmodulus (MPa)	4000–10000	7000
Poissonzahl	0.24–0.33	0.29
Schermodulus	-	1200

Tab. 4: Die wichtigsten Kennwerte des Opalinustons.

siert. Natriumchlorid-Sulfat-Wässer mit einer Konzentration von gelösten Feststoffen bis zu 20 Gramm pro Liter wurden extrahiert. Ein etwa gleich stark mineralisiertes Wasser konnte im Bereich der Hauptstörung entnommen werden. Diese Wässer dürften einen bedeutenden Anteil von viele Millionen Jahre altem Meerwasser enthalten.

Die felsmechanischen Kennwerte lassen auf ein Gestein mit mittlerer Festigkeit schliessen. Die relativ hohen Schwankungen dieser Kennwerte sind auf die Anisotropie der Gesteinsparameter und verschiedene Wassergehalte zurückzuführen. Generell zeigen getrocknete Proben sowie Proben mit niedrigen in-situ-Wassergehalten eine höhere Festigkeit als Proben mit hohen Wassergehalten. Aufgrund der an Kerndaten bestimmten Festigkeitseigenschaften des Opalinustons wurde im Versuchsstollen eine Sicherung aus 15 cm mächtigem, teilweise stahlfaserverstärktem Spritzbeton eingebracht. Messungen der Deformationen und Spannungen an der Stollenkontur zeigten jedoch nur sehr geringe Konvergenzen und Radialspannungen (< 0.5 MPa) zwischen Gebirge und Spritzbeton. Einige wenige Risse im Spritzbeton werden im Sohlbeton und im Bereich von Kreuzungspunkten von Stollen und Nischen (Pfeiler) beobachtet.

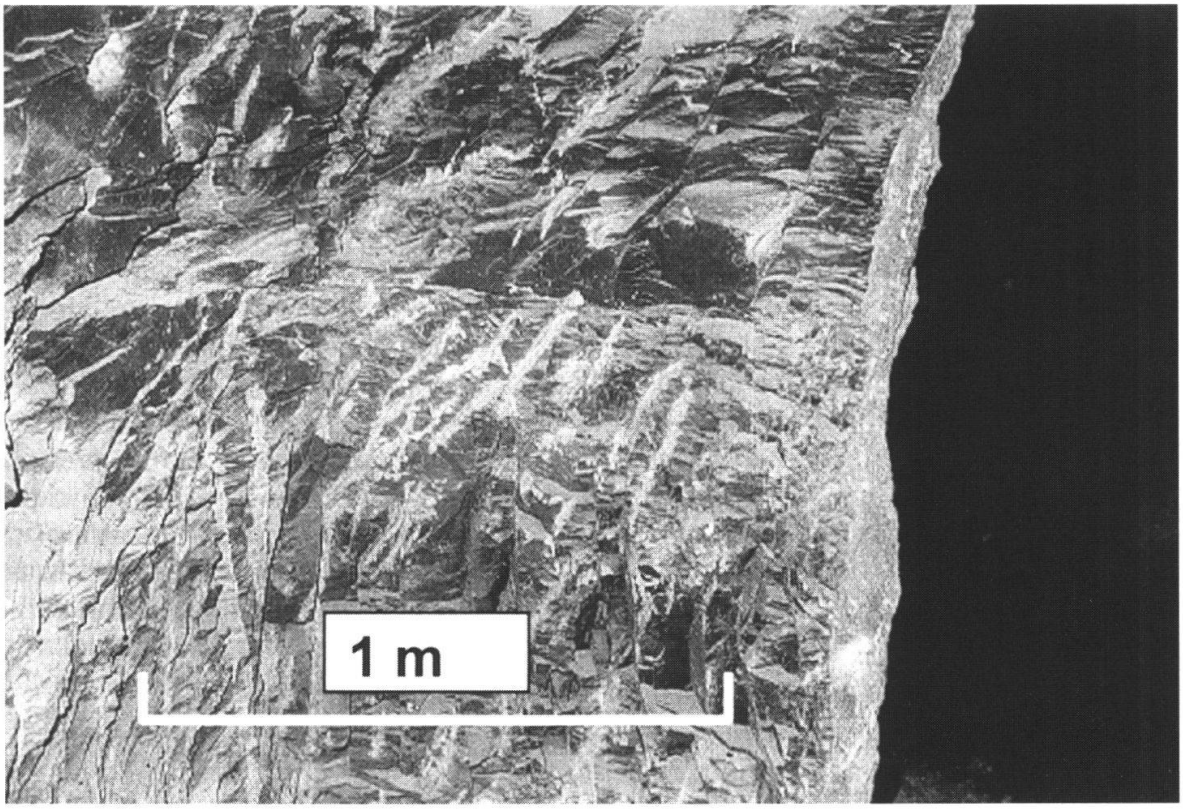
5. Die Auflockerungszone

Während und nach dem Ausbruch des Mont Terri Felslabors entstand im Opalinuston eine ausgeprägte Auflockerungszone, die vor allem durch die Konvergenz des Tunnels und die damit verbundenen Deformationen bei der Entlastung (Extension) in den ausgebrochenen Hohlraum bedingt ist.

Während dem Ausbruch der acht seitlichen Nischen im Jahre 1996 konnte die Auflockerungszone im Erkundungsstollen, der im Jahre 1989 ausgebrochen wurde, detailliert kartiert und charakterisiert werden. Es handelt sich dabei teilweise um ein Kluftnetzwerk von offenen Klüften und Scherbrüchen hinter der Stollenwand des Erkundungsstollens, wobei die Klufthäufigkeit im ersten Meter stark erhöht ist, in zwei Meter radialer Distanz aber praktisch auf Null zurückgeht. Diese Klüfte fallen in den seitlichen Tunnelwänden steil ein und sind tangential zur Stollenwand orientiert (Fig. 4a). In der Sohle und im Dach sind diese Klüfte vor allem durch die Reaktivierung der Schichtflächen geprägt. Die beobachtete Kluftausdehnung ist generell kleiner als 1 m. Mikroskopisch kleine, weisse Gipskristalle, die sich im Erkundungsstollen auf den Kluftflächen vor allem im äusseren Teil der Auflockerungszone befinden, liefern einen für die Interpretation der Wegsamkeit wichtigen Anhaltspunkt. Sie sind ein Hinweis darauf, dass diese Auflockerungsklüfte untereinander und mit dem Stollen verbunden sind, so dass Stollenluft in den Klüften zu zirkulieren vermag. Ihre Entstehung ist entweder auf Pyritoxidation oder Verdunstung von Porenwasser und der damit verbundenen Ausfällung von Gipskristallen zurück zu führen.

Während dem Ausbruch des Versuchsstollens im Jahre 1997/1998 wurde die Auflockerungszone detaillierter untersucht. Dabei wurde unter anderem die Auswirkung von verschiedenen Ausbruchtechniken auf die Auflockerung abgeklärt, indem fluoreszierende Epoxidharze bei geringen Drucken in die Auflockerungsklüfte injiziert wurden. Nach dem Aushärten des Harzes konnten die imprägnierten Bereiche überbohrt und das ausgefüllte Kluftnetzwerk unter UV-Licht syste-

a)



b)

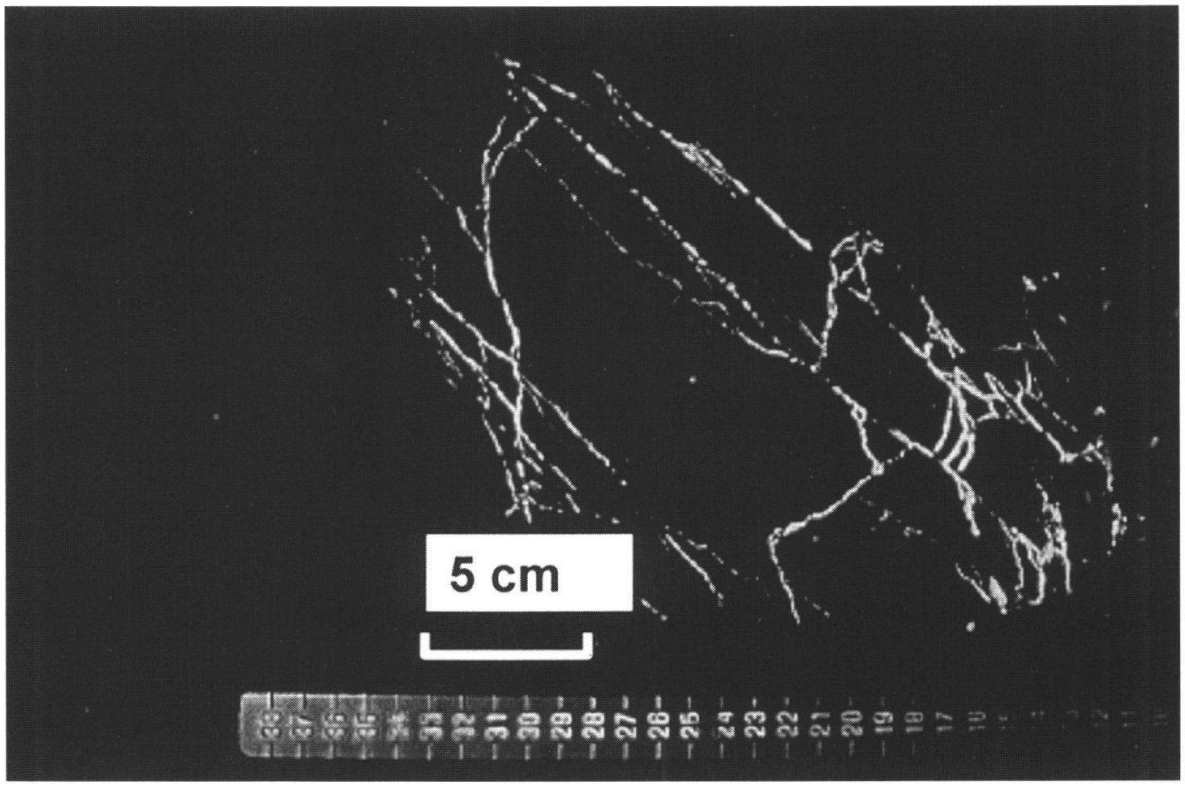


Fig. 4: Kluftnetzwerk in der Auflockerungszone: a) Auflockerungsklüfte in der seitlichen Wand des Erkundungsstollens; b) Harzimprägnierte Auflockerungsklüfte in einem aufgeschnittenen Bohrkern.

matisch analysiert werden. Ein Beispiel einer harzimprägnierten Auflockerungskluft aus einem aufgeschnittenen Bohrkern ist in Figur 4b dargestellt. Es zeigte sich dabei, dass die Ausbruchtechnik die Geometrie der Auflockerungsklüfte wesentlich beeinflussen kann. So sind sowohl die Ausdehnung der Auflockerungszone als auch deren Klufthäufigkeit bei schonendem Ausbruch, zum Beispiel mit einer Teilschnittmaschine, kleiner als beim Sprengen oder bei der Exkavation mittels pneumatischem Hammer. Zusätzlich sind bei schonendem Ausbruch die Variation der Kluftöffnungsweiten kleiner und die Kluftorientierung regelmässiger angeordnet.

Es liegt natürlich auf der Hand, dass die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone, verglichen mit derjenigen des ungestörten Opalinustons, stark erhöht ist. Hydrotests in der Auflockerungszone zeigen lokale Durchlässigkeiten von bis zu 10^{-6} m/s. Diese Erhöhung der lokalen Durchlässigkeit kann aufgrund verschiedener Prozesse teilweise wieder rückgängig gemacht werden. Dieser Vorgang wird auch als «Selbstheilung» der Auflockerungszone bezeichnet und kann durch Konsolidierung, Schwellen oder Ausfällungen bestimmter Klufminerale erklärt werden. Die Änderungen der Durchlässigkeiten bedingt durch Schwell- und chemisch-osmotische Prozesse wurden inzwischen am Mont Terri untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine Reduktion der Durchlässigkeiten um 2 bis 3 Grössenordnungen. Der Einfluss von anderen Prozessen wird in den folgenden Projektphasen untersucht werden.

6. Hydrogeologische Prozesse

Eine wichtige Frage, die bei der Ausbreitung von Radionukliden in der geologischen Barriere geklärt werden muss, ist die Identifizierung des relevanten Transportprozesses. Dabei muss prinzipiell zwischen Advektion und Diffusion unterschieden werden. Advektion, bedingt durch den vorherrschenden hydraulischen Gradienten und die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins, ist in vielen Situationen der dominierende Prozess, bei denen Radionuklide in durchlässigen Gesteinen, sofern nicht an den Mineraloberflächen sorbiert, in relativ kurzer Zeit über grössere Distanzen transportiert werden können. Diffusionsprozesse sind generell langsamere Prozesse, wobei der Radionuklid-Transport durch den Konzentrationsgradienten der jeweiligen Stoffe und den entsprechenden Diffusionskoeffizienten bestimmt wird.

Für den Transport im Gestein ist es wichtig, potentielle Fliesswege zu untersuchen und zu charakterisieren. Im Opalinuston des Felslabors Mont Terri können drei Arten von Fliesswegen unterschieden werden:

1. ein fein vernetzter Porenraum in der Tonmatrix der tonigen und sandigen Fazies,
2. präferenzielle Bruchflächen und Kanäle in tektonischen Scherzonen und Brüchen und
3. ein Netzwerk von offenen Entlastungsklüften in der Auflockerungszone.

Ein wichtiger Kennwert bei der Identifizierung der relevanten Transportprozesse in diesen verschiedenen Fliesswegen ist die hydraulische Durchlässigkeit. Generell weisen einerseits sehr kleine Durchlässigkeiten auf Diffusion als dominanten Transportprozess hin (die Advektion ist dann viel kleiner als die Diffusion), ande-

rerseits kann bei grossen Durchlässigkeiten die Diffusion gegenüber der Advektion vernachlässigt werden. Die Auswertung der zahlreichen hydraulischen Tests zeigt deutlich, dass die Durchlässigkeiten des ungestörten Gesteins und der tektonischen Störzonen sehr gering sind und sich zwischen 10^{-13} und $5x10^{-13}$ m/s bewegen. Deshalb liegt es auf der Hand, dass in diesen beiden Gesteinstypen (ungestörtes und gestörtes Gestein) die Diffusion dominiert. Die Durchlässigkeiten in der Auflockerungszone sind hingegen um Grössenordnungen höher, nämlich mit lokalen Werten bis zu 10^{-6} m/s. Hier könnte während einer transienten Phase die Advektion der dominierende Transportprozess sein.

Einen weiteren Hinweis auf Diffusion als relevanten Transportprozess im ungestörten Opalinuston sowie in tektonischen Scherzonen geben die Chloridgehalte der Porenwässer, die entlang eines Profils durch die ganze Tonformation gewonnen wurden. Figur 5 zeigt die Verteilung von Chloridgehalten im Lias und unteren Dogger des Mont Terri Tunnels (Pearson et al. 2002). Der Opalinuston weist vor allem im Zentralbereich höhere Chloridgehalte auf als die benachbarten Aquifere, gegen den Rand hin nehmen die Konzentrationen ab. In der tektonischen Scherzone («main fault») sind keine Konzentrationsanomalien festzustellen. Ein einfaches konzeptuelles Modell kann diesen Konzentrationsverlauf nachvollziehen: die Stoffe diffundieren, bedingt durch den Konzentrationsgradienten zwischen Porenwasser im Opalinuston und Karstwasser in den Aquiferen, nämlich aus dem Opalinuston in die Aquifere und werden dort weggeführt. Die Advektion ist dabei vernachlässigbar klein. Dieser Diffusionsprozess begann vor ca. 10 Millionen Jahren,

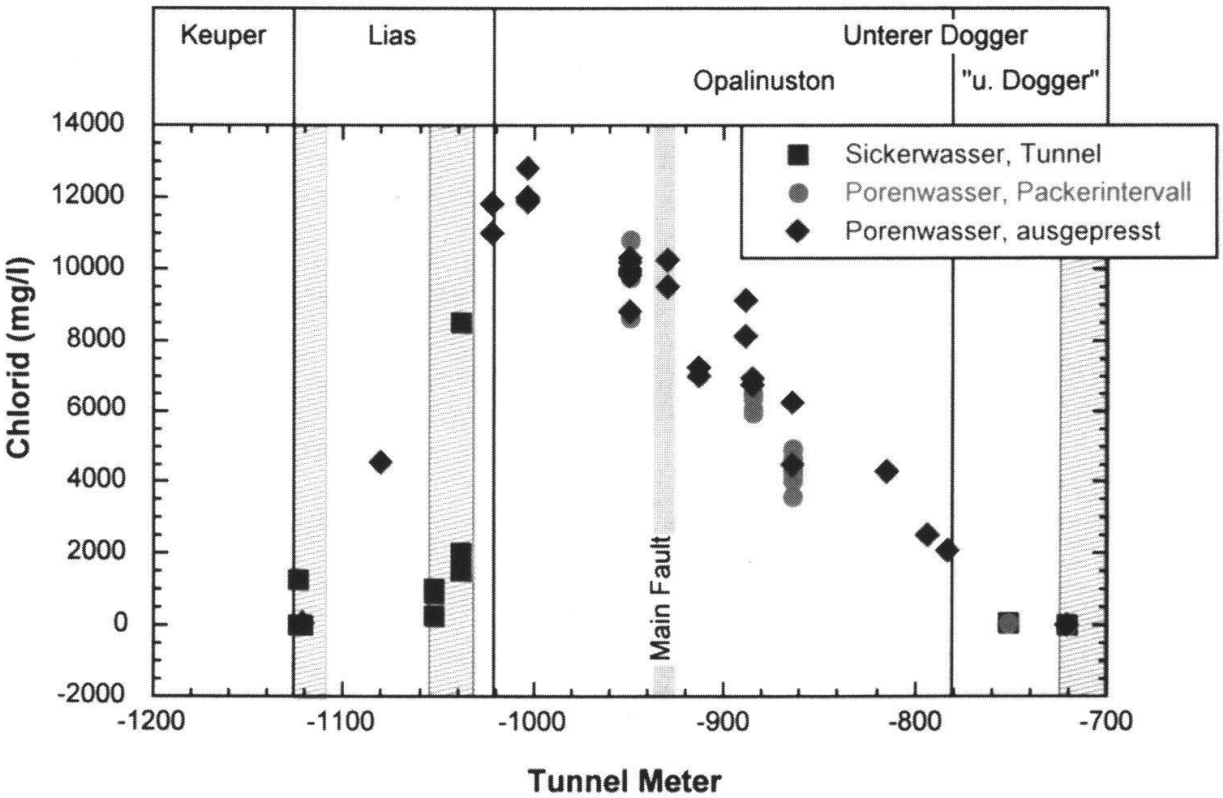


Fig. 5: Mont-Terri-Erkundungsstollen: Verteilung von Chloridgehalten in Grundwasser, Porenwasser aus Packerintervallen in Bohrungen und aus Bohrkernen ausgepresstem Porenwasser entlang des Tunnels (Zonen mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit sind blau schraffiert), nach Pearson et al. 2002.

während der Bildung und Heraushebung der Mont-Terri-Antiklinale als die benachbarten Karstaquifere erstmals Kontakt mit «modernem» Grundwasser bekamen. Berechnungen mittels einer analytischen Lösung zeigen, dass die mit diesem konzeptuellen Modell berechneten Konzentrationen recht gut mit den gemessenen übereinstimmen; der daraus resultierende scheinbare Diffusionskoeffizient liegt in der Grössenordnung von 10^{-12} m^2/s.

7. Demonstrationsexperimente

Das «Engineered-Barrier»-Experiment (EB), ein sogenanntes Demonstrationsexperiment, hat zum Ziel, ein neues Konzept für die Verfüllung eines geologischen Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle im Opalinuston zu überprüfen. Beim Konzept der Stolleneinlagerung sind die radioaktiven Abfälle, die sich in einem Stahlbehälter im Zentrum des Lagerstollens befinden, generell von Bentonit umgeben. Dieser Bentonit dient einerseits als Rückhaltebarriere (Engineered Barrier) bei einem möglichen Austritt der Radionuklide aus dem Stahlbehälter (Bentonit weist sehr gute Sorptionseigenschaften auf; ein Grossteil der Radionuklide bleibt daher an den Tonoberflächen hängen), und andererseits als Stützmaterial für den Stollen, das die weitere Konvergenz des verfüllten Stollens stark begrenzt. Das Quellen des Bentonits bei der Aufsättigung führt dabei zu einer Volumenzunahme und einer Quelldruckentwicklung, was eine Re-Konsolidierung der

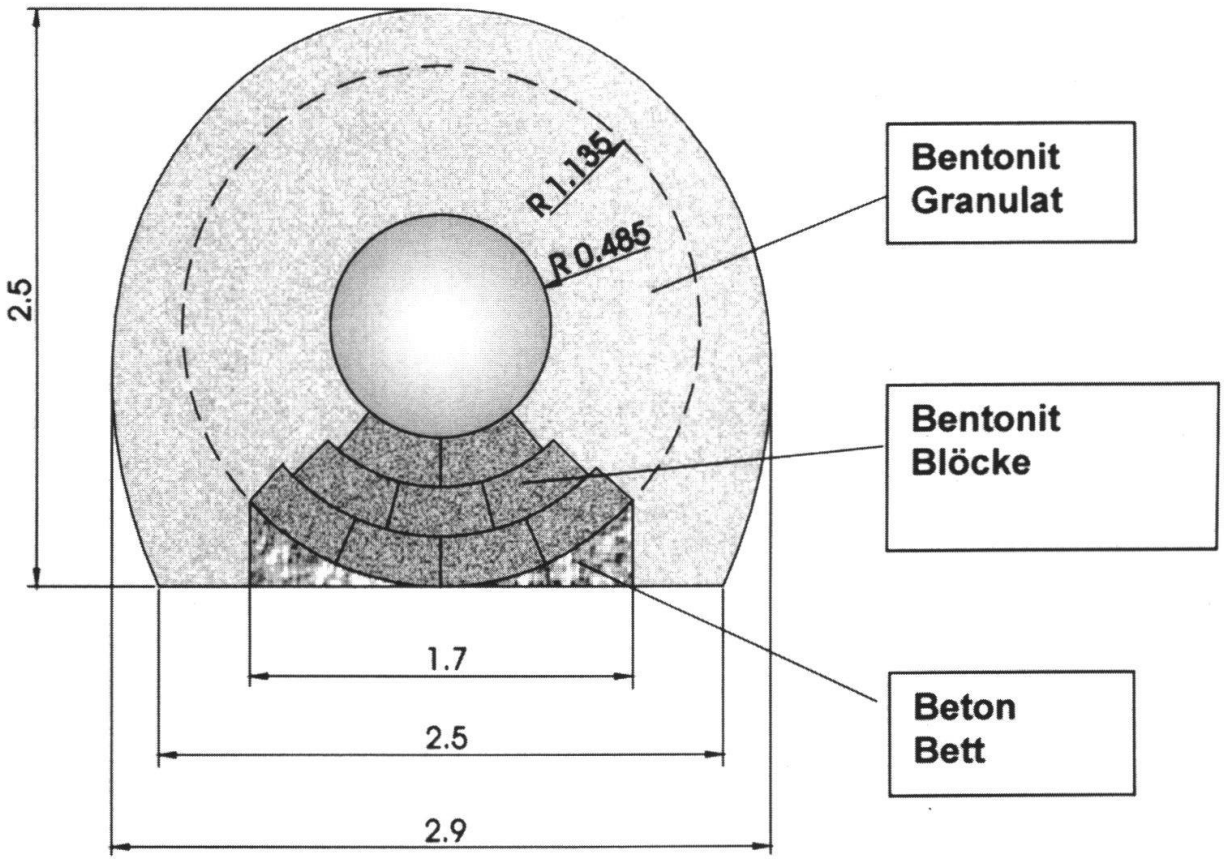


Fig. 6: «Engineered Barrier»-Experiment: Schnitt durch die Bentonit-Hinterfüllung in der EB Nische (Design: AITEMIN).

Auflockerungszone wiederum erniedrigt und einen potentiellen späteren Radionuklidtransport in der Auflockerungszone sehr stark reduziert.

Zum ersten Mal wird bei diesem Experiment eine neue Konstruktionsmethode angewandt, welche auf dem kombinierten Einbau von Bentonitblöcken und Bentonitgranulat im Lagerstollen basiert. Der Stahlbehälter, der anstelle der radioaktiven Abfälle eine inerte, schwere Flüssigkeit enthält, um das finale Gewicht von 12 Tonnen simulieren zu können, wird auf ein Bett von kompaktierten Bentonitblöcken gelegt und der ganze Restraum mit Bentonitgranulat aufgefüllt (Fig. 6). Dabei wird das Granulat entweder pneumatisch eingeblasen oder mit einer verstellbaren Spiralschnecke mechanisch eingebracht. Die ganze Verfüllung wird dann von einem Betonpfropf abgeschlossen und anschliessend künstlich aufgesättigt (eine natürliche Aufsättigung würde wahrscheinlich mehrere Tausend Jahre benötigen). Gemessen werden dabei vor allem die Porenwasserdrücke und die Deformationen in der Bentonitverfüllung sowie in der Auflockerungszone des Opalinustons. Mit dem resultierenden Datensatz können die schon bestehenden hydromechanischen Modelle kalibriert werden, um daraus das Langzeitverhalten der künstlichen (Bentonit) und natürlichen Barrieren (Opalinuston) simulieren zu können.

Das «Engineered-Barrier»-Experiment ist das erste im Mont-Terri-Felslabor, das von der Europäischen Union und dem Schweizerischen Bundesamt für Bildung und Wissenschaft ko-finanziert wird. Projektpartnerinnen sind die spanische ENRESA (Koordination des Experimentes), die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover/Deutschland und die NAGRA in der Schweiz. Das Experiment wird ca. 2.5 Jahre dauern.

8. Schlussbetrachtung

Mit dem Mont-Terri-Felslabor steht unter der Leitung des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) eine Plattform zur Verfügung, wo interessierte Organisationen in einer internationalen Zusammenarbeit Grundlagen für die Charakterisierung von Tongesteinen sowie Entwicklungen im Hinblick auf Arbeiten und Abläufe in zukünftigen Endlagern in solchen Tongesteins-Formationen gewinnen können. Dank der leichten Erreichbarkeit und einer guten Zusammenarbeit kann kostengünstig gearbeitet werden.

Das Mont-Terri-Felslabor ist ein reines Versuchslabor. Experimente mit radioaktiven Abfällen oder die Einlagerung derselben sind strikte ausgeschlossen.

Im Felslabor können Langzeitexperimente über mehrere Jahre unter realistischen Bedingungen im Grossmassstab des Gebirgsverbandes (und nicht nur an Laborproben) durchgeführt werden.

Die Partner des Mont-Terri-Projektes streben einen langfristigen Betrieb im Untergrund-Labor an.

Verdankungen

Die Autoren möchten in erster Linie der République et Canton du Jura danken, welche die Bewilligungen zum Betrieb des Labors und zur Durchführung der Experimente erteilt und das Projekt voll und ganz unterstützt. Im weiteren soll auch unseren Mont-Terri-Partnern unser bester Dank ausgesprochen werden; nur durch ihre Experimente kann das Labor erst geführt werden. Für eine kritische Durchsicht des Manuskripts danken wir Dr. Peter Blümling von der Nagra, Marcus Buser von der Commision de suivi und Barbara Friedli vom BWG.

Bibliographie

PEARSON, F.J., ARCOS, D., BATH, A., BOISSON, J.-Y., FERNANDEZ, A.M., GAEBLER, H.E., GAUCHER, E., GAUTSCHI, A., GRIFFAULT, L., HERNAN, P., WABER, H.N. in Vorb.: Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory - Synthesis Report. Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie - Serie Geologie.

THURY, M. & BOSSART, P. 1999: Mont Terri Rock Laboratory. Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments performed in 1996 and 1997. Landeshydrologie und -geologie, Geologischer Bericht Nr. 23.

WERMEILLE, S. & BOSSART, P. 1999: Paleohydrological study of the surroundings of the Mont Terri Rock Laboratory. Unveröffentlichter Bericht Geotechnisches Institut AG an die Landeshydrologie und -geologie.