



## Aktennotiz

---

Datum: 06.03.2015                      Seiten: 34                      Anhänge: 3                      Beilagen: -  
 Verteiler intern:                      GEOL, TISA, [redacted] Archiv  
 Verteiler extern:                      Mitglieder der Agneb Umsetzungsgruppe Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle: [redacted] BFE; [redacted] BFE; [redacted] BFE; [redacted] PSI; [redacted] swisstopo; [redacted] KNS; [redacted] KNS; [redacted] ENSI; [redacted] ENSI; [redacted] BAFU  
 Sachbearbeiter: [redacted]  
 Visum [redacted]  
 Visum Vorgesetzte [redacted]

---

Klassifizierung                      **INTERN**  
 Aktenzeichen                      33KRM.MON  
 Referenz                      ENSI 33/412  
 Schlagwörter                      Geologische Tiefenlager, Monitoring, Regulatorische Forschung



# Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2. Zielsetzung und Fragestellung</b>	<b>3</b>
<b>3. Stand der Projektarbeiten</b>	<b>4</b>
3.1 Wichtigste Ergebnisse des EU-Projektes MoDeRn	<b>5</b>
3.2 Überlegungen der ANDRA zum Monitoring	<b>20</b>
3.3 MO-Experiment im Felslabor Mont Terri	<b>22</b>
3.4 Erfahrungen mit Langzeitmessungen im Felslabor Mont Terri	<b>25</b>
<b>4. Folgerungen und Ausblick</b>	<b>32</b>





**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/PubliDocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 [REDACTED]

## 1 Einleitung

### Ausgangslage

Die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle hat gemäss Kernenergiegesetz (KEG) und Kernenergieverordnung (KEV) in einem geologischen Tiefenlager zu erfolgen. Die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers ist dabei durch ein System gestaffelter passiver technischer und natürlicher Sicherheitsbarrieren zu gewährleisten. Die Gesetzgebung verlangt vor dem ordnungsgemässen Verschluss des Lagers eine sogenannte Beobachtungsphase (Monitoring). Das Monitoring hat dabei so zu erfolgen, dass die Wirkung des Mehrfachbarrierensystems nicht beeinträchtigt wird.

Die Elemente eines geologischen Tiefenlagers umfassen gemäss KEG/KEV das Hauptlager zur Aufnahme der Abfälle, das Pilotlager sowie Testbereiche (Felslabor). Das Hauptlager wird dabei so ausgelegt, dass nach Einbringung der Abfälle die Lagerstollen sofort verfüllt und versiegelt werden, um sicherzustellen, dass die erforderliche passive Langzeitsicherheit durch das Mehrfachbarrierensystem gewährleistet ist. Pilotlager und Testbereiche dienen der Erfassung der sicherheitsrelevanten Zustände und der Wirksamkeit des Barrierensystems sowie der Überprüfung der Prognosemodelle, mit denen die Langzeitsicherheit aufgezeigt wurde. Abweichungen von den Modellen oder unerwartete Entwicklungen des Lagersystems können so rechtzeitig erkannt werden. Das Pilotlager und die Testbereiche haben damit die Funktion eines Nachweislagers, welches über das Verfüllen und Versiegeln des Hauptlagers hinaus eine Kontrolle über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Die Ergebnisse dieser Überwachung (Monitoring) dienen der Erhärtung des Sicherheitsnachweises und bilden die Grundlagen für den Entscheid über den endgültigen Verschluss des Tiefenlagers nach Abschluss der Beobachtungsphase.

Das vorliegende Projekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ erfolgt im Rahmen des Agneb-Forschungsprogramms „Radioaktive Abfälle“ (BFE 2009, ENSI 2010), welches komplementär zu den beiden anderen Agneb-Forschungsprojekten „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ und „Lagerauslegung“ zu betrachten ist. Diese drei vom ENSI betreuten Projekte haben zueinander verschiedene Verknüpfungen und Schnittstellen, was eine enge Koordination und Zusammenarbeit erfordert. So liefert u. a. das Projekt „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ mit der Analyse der im geologischen Tiefenlager ablaufenden physikalisch-chemischen Prozessen und der Ableitung der zu erfassenden Parameter wichtige Vorarbeiten bzw. Grundlagen für das Monitoring-Projekt. Die Arbeiten des Monitoring-Projektes erfolgen deshalb in manchen Teilaspekten erst nach Vorliegen der Ergebnisse des Pilotlager-Projektes.

Auf internationaler Ebene befasste sich das EU-Projekt MoDeRn (**M**onitoring **D**evelopments for Safe **R**epository Operation and staged Closure) von 2009 – 2014 intensiv mit dem Thema Monitoring, weshalb das EU-Projekt vom ENSI eng begleitet wurde, damit die Resultate in dieses Agneb-Projekt einfließen können. Für das Projekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ hat dies aber zur Folge, dass der Zeitplan nun wesentlich länger dauert und diesen Zwischenbericht nötig macht.

### Projektorganisation

Das Projekt wird vom ENSI geleitet, welches auch für die Berichterstattung zuständig ist. Die Organisation des Projektes „Monitoring“ setzt sich zusammen aus einem Projektleiter [REDACTED], den Projektleitern der beiden anderen Agneb-Projekte „Pilotlager“ und „Lagerauslegung“ [REDACTED] sowie aus weiteren Fachspezialisten des ENSI, auf die themenspezifisch zurückgegriffen werden kann [REDACTED] bzgl. Monitoringkonzepte, [REDACTED] bzgl. Prozesse/Modellierung, [REDACTED] bzgl. Messtechnik/ Hydrogeologie und [REDACTED] bzgl. Geophysik/Messmethoden).



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publidocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

Zu spezifischen weiteren Fragen wurden bei Bedarf auch zusätzliche externe Experten beigezogen (u. a. KNS [REDACTED] zu Experimentvorschlägen Monitoring, ETH Ingenieurgeologie [REDACTED] zu Messtechniken/Modellierungen, Swisstopo [REDACTED] zu Monitoring-Erfahrungen im Felslabor Mont Terri, Solexpert [REDACTED] zu Messsystemen/Instrumentierung, Basler&Hofmann [REDACTED] zu Monitoring/Instrumentierung von Untertagebauwerken und ANDRA [REDACTED] zu Fragen des Monitorings beim französischen Cigéo-Projekt (Centre industriel de stockage géologique) für HAA.

## 2 Zielsetzung und Fragestellung

Ziel des Agneb-Projektes „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ ist, durch Literaturstudium, Verfolgen von internationalen Forschungsprojekten und durch Expertenbefragungen den wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zum Thema „Monitoring“ zu ermitteln. Das Projekt soll dem ENSI im Sinne einer Bestandesaufnahme einen möglichst breiten und vollständigen Überblick über mögliche Monitoringkonzepte und Monitoringtechniken verschaffen und Entscheidungsgrundlagen liefern, die für die Planung von weiteren Forschungsarbeiten des ENSI auf diesem Gebiet und für die spätere Festlegung von Anforderungen an die Überwachung eines Pilotlagers erforderlich sind.

Die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle wird mit komplexen Modellrechnungen nachgewiesen. Dabei wird die Einschlusswirksamkeit des Barrierensystems über das physikalisch-chemische Verhalten der Abfälle und das Verhalten der technischen und geologischen Barrieren über lange Zeiträume berechnet. Für die Identifikation der sicherheitsrelevanten Prozessvorgänge in einem geologischen Tiefenlager und zur Verifikation von Rechenmodellen sollen Ergebnisse aus Laborversuchen und aus Experimenten in Felslabors (z. B. Felslabor Mont Terri, Felslabor HADES (B), Felslabor Bure (F), Felslabor Tournemire (F)) beigezogen werden.

Für die Überwachung eines Pilotlagers stellen sich folgende zentrale Fragen:

1. Wie sieht die generelle Strategie der Überwachung eines Pilotlagers räumlich und zeitlich aus (Monitoring wo - warum – was – wie)?
2. Welche sicherheitsrelevanten Prozesse können über welche Zeiträume im Pilotlager und seinem Umfeld erfasst werden?
3. Welche Parameter müssen gemessen werden, um die für die Sicherheit relevanten Prozessvorgänge und die Wirksamkeit des Mehrfachbarrierensystems überwachen zu können?
4. Welche Messmethoden und Messinstrumente stehen für diese Aufgaben zur Verfügung und wo sind ihre Grenzen (u. a. Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Langzeitbeständigkeit)?
5. Welche Erfahrungen liegen heute aus Untertagebauten oder Felslabors bereits vor?
6. Welche bekannten oder neu zu entwickelnden Messmethoden haben das Potenzial, die noch offenen Probleme in Zukunft zu lösen?
7. Wie könnte das konkrete Monitoringkonzept eines Pilotlagers aussehen, und welche Anforderungen sind an dieses zu stellen?

Für die Bearbeitung dieser Fragestellungen wurden zwei Themenschwerpunkte festgelegt:

### **Thema 1:** *Prozessverständnis und Ableitung der zu erfassenden Parameter*

In diesem Arbeitspaket sollen ausgehend von den „Safety Functions“ die für die Sicherheitsbeurteilung relevanten „Features, Events and Processes, FEP“ (NEA 2000 und 2003) systematisch je für ein Pilotlager eines schwach-mittelaktiven- (SMA) und eines hochaktiven (HAA) Lagers evaluiert und ihre räumliche und zeitliche Entwicklung zusammengestellt werden (u. a. zeitlich-räumliche Entwicklung



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/PubliDocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

der Auflockerungszone um den ausgebrochenen Stollen herum, Konvergenz- und Konsolidierungsprozesse im Gebirge, zeitlicher Verlauf der hydraulischen Drucksenke, Entsättigung-Wiederaufsättigungsvorgänge nach Verschluss der Lagerstollen, transiente Phase der Wärmeausbreitung mit hydraulisch-mechanisch-thermisch-chemisch gekoppelten Prozessen, langzeitliche Entwicklung der geochemischen Bedingungen, Korrosionsprozesse, Lösungs- und Ausfällungsprozesse, advektiver und diffusiver Stofftransport, Sorptionsvorgänge, etc.). Darauf gestützt werden die zu erfassenden Parameter evaluiert und es wird dargelegt, innerhalb welcher Zeiträume für welche Prozessvorgänge welche messbaren Ergebnisse erwartet werden. Diese Arbeiten sollen im Wesentlichen im Rahmen des Projektes „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ in den entsprechenden Arbeitspaketen erfolgen.

### **Thema 2:** *Monitoringstrategien, Monitoringkonzepte, technische Anforderungen und Möglichkeiten*

Dieser Themenschwerpunkt ist praktisch identisch mit dem Thema des internationalen EU-Projektes MoDeRn (**M**onitoring **D**evelopments for **S**afe **R**epository **O**peration and staged **C**losure), welches im Rahmen des 7. EU-Forschungsprogramms von 2009-2014 durchgeführt wurde. Das Projekt umfasste dabei die folgenden Arbeitspakete (work packages, WP):

*WP1:* Monitoring objectives and strategies

*WP2:* State-of-the-art and research and technical development (RTD) of relevant monitoring technologies, including development and testing of wireless monitoring systems, non-intrusive geophysical monitoring systems and testing of fibre optic sensors.

*WP3:* In-situ demonstration of innovative monitoring techniques

*WP4:* Virtual case study of monitoring at all stages of the disposal process

*WP5:* Dissimination (including engagement with experts such as regulators or safety authorities) and international conference under EC auspices.

*WP6:* Reference framework for repository monitoring

Das umfangreiche Forschungsprojekt MoDeRn lieferte einen auf internationaler Basis (18 Organisationen aus 13 Ländern, darunter aus der Schweiz die Nagra und die ETH Zürich) breit abgestützten State-of-the-art Bericht zum Thema Monitoringkonzepte und Monitoringtechnologien und wurde deshalb seitens ENSI eng begleitet (u. a. mit Teilnahme an Fachsitzungen, an Workshops und an der Schlusskonferenz des MoDeRn-Projektes in Luxembourg, März 2013).

## **3 Stand der Projektarbeiten**

Die Arbeiten zum AGNEB-Projekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ lassen sich für die Berichtsperiode von 2011 – 2014 in folgende Teile gliedern:

- Wissenschaftliche Begleitung des EU-Projektes „MoDeRn“ mit Studium der eingehenden technischen Berichte
- Teilnahme am „Expert Stakeholder MoDeRn-Workshop“ in Oxford, Mai 2011
- Vorbereitung und Durchführung des MO-Experimentes im Felslabor Mont Terri in Zusammenarbeit mit swisstopo und der ANDRA (Frankreich) mit dem Ziel, die Langzeitbeständigkeit der Glasfasertechnik unter in-situ-Bedingungen im Opalinuston zu testen (Anhang 1)



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publidocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

- Teilnahme an der internationalen „MoDeRn“-Schlusskonferenz in Luxembourg, 19. – 21. März 2013, mit Präsentation und Diskussion der schweizerischen Anforderungen an das Monitoring eines Pilotlagers (Anhang 2). Im weiteren wurde zusammen mit swisstopo und der ANDRA ein Poster über das MO-Experiment im Felslabor Mont Terri präsentiert (Anhang 3)
- Mitarbeit im AGNEB-Projekt „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ mit Expertenbefragung zum Thema Prozessverständnis, Ableitung der für das Monitoring zu erfassenden Parameter und Austausch von Erfahrungen zu Messtechniken. Swisstopo präsentierte dabei ihre bisherigen Monitoring-Erfahrungen mit Langzeitmessungen im Felslabor Mont Terri. Die ANDRA präsentierte ihre Überlegungen zum Monitoring beim geplanten französischen HAA-Endlager *Cigéo* (Centre industriel de stockage géologique).

### 3.1 Wichtigste Ergebnisse des EU-Projektes MoDeRn

Das EU-Projekt MoDeRn hat sich von 2009 bis 2014 umfassend mit den Fragen des Monitoring eines geologischen Tiefenlagers und den dazu erforderlichen Konzepten, Strategien und Messtechniken auseinandergesetzt. Der Fokus des Projektes lag auf dem Monitoring des Nahfeldes eines HAA-Endlagers und der Fragestellung, wie Monitoring zur Sicherheitsstrategie und Umsetzung eines geologischen HAA-Tiefenlagers und zum Verständnis und Vertrauen in das Lagerverhalten beitragen kann. Die Resultate sind in 18 technischen Berichten dokumentiert und öffentlich zugänglich ([www.modern-fp7.eu](http://www.modern-fp7.eu)). Das MoDeRn-Projekt gliederte sich in sechs Arbeitspakete, welche sich mit den Themen **a)** Monitoringziele und -strategien, **b)** Stand von Monitoring-Technologien, **c)** Entwicklung neuer Monitoring-Messsysteme, **d)** Monitoring am Beispiel von Fallstudien, **e)** Berichterstattung und **f)** Referenz-Synthese der Projektergebnisse befassten. Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse dieser Arbeitspakete im Überblick zusammengefasst.

#### **a) Monitoringziele und –strategien**

Ausgehend von internationalen Grundlegendokumenten der IAEA und ICRP zum Thema Monitoring geologischer Tiefenlager (siehe unten) und Analyse der nationalen Vorgaben in den verschiedenen

#### **Grundlegendokumente und Vorgaben zum Thema Monitoring**

**IAEA TECDOC-1208 (2001):** Monitoring of Geological Repositories for High Level Radioactive Waste

**EC Project Report EUR 21025 (2004):** Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste

**IAEA Safety Requirements WS-R-4 (2006):** Geological Disposal of Radioactive Waste – Requirements (3.73-3.75) on monitoring programs

**IAEA Safety Standards GSR Part 4 (2009):** Safety Assessments for Facilities and Activities – e.g. Requirement 24: Maintenance of the safety assessment

**IAEA Specific Safety Guide – SSG 31 (2014):** Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities

**NEA (2011):** Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel. – Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011). - Report No. NEA/RWM/R(2011)4.

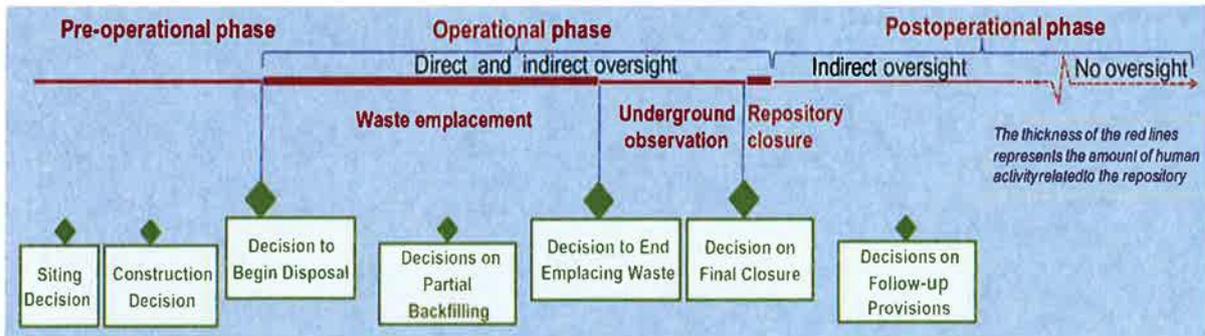
**IAEA Safety Standards SSG-23 (2012):** The Safety case and safety assessment for disposal of radioactive waste.

**ICRP (2013):** Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. - ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publicdocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

EU-Ländern war die Entwicklung einer gemeinsamen Vorgehensstrategie zum Monitoring das wichtigste Ziel dieser Arbeitsgruppe. Es herrscht international Konsens darüber, dass die Realisierung eines geologischen HAA-Tiefenlagers ein schrittweiser Prozess über eine sehr lange Zeit ist und dass für jede Phase der Lagerentwicklung und für jeden Entscheidungspunkt das Monitoring eine wichtige Funktion hat (siehe Figur 1).



**„Phases of repository development, major decision points and definition of monitoring:** Monitoring is carried out during each step of the development and operation of the geological disposal facility. The purposes of the monitoring programme include providing information on baseline conditions for subsequent assessments, assurance of operational safety and operability of the facility and confirmation that conditions are consistent with post-closure safety. Monitoring programmes are designed and implemented so as not to reduce the overall level of post-closure safety of the facility.“

**Figur 1:** Phasen der Lagerentwicklung und Meilensteine wichtiger Entscheidungen (Quelle: NEA 2011 und ICRP 2013).

Für die Entwicklung des Monitorings erarbeitete die Arbeitsgruppe einen strukturierten Vorgehensplan (Monitoring workflow, siehe Figur 2), mit welchem ausgehend von den Anforderungen und Zielsetzungen des Monitorings, den für die Sicherheit relevanten Sicherheitsfunktionen (Safety functions) und daraus abgeleiteten Prozessen und Parametern das Monitoring-Programm entworfen, umgesetzt, ausgewertet und beurteilt wird. Das Monitoring verfolgt dabei folgende Hauptzwecke:

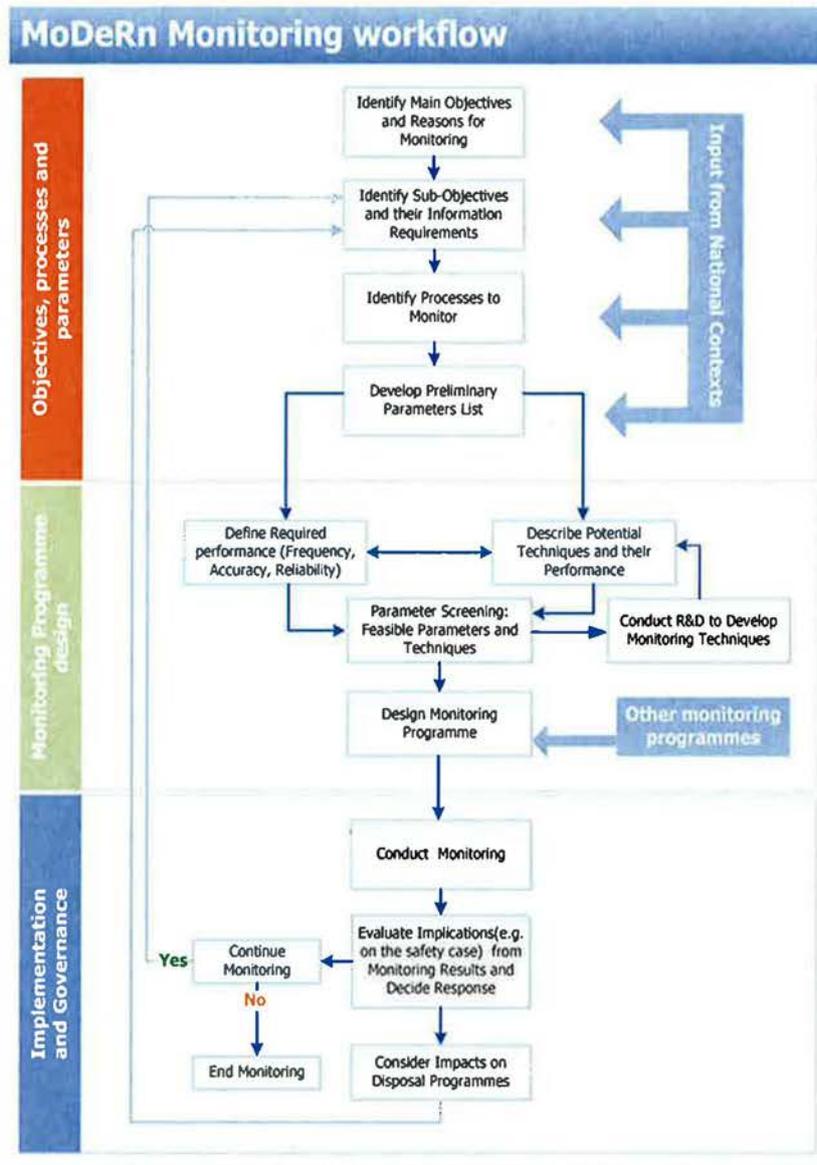
- Beobachtung der im Lagernahfeld und dessen geologischem Umfeld ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge und Überprüfung des Prozessverständnisses
- Überprüfung der Funktionstüchtigkeit und Wirksamkeit des geologisch-technischen Barrierensystems zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises („performance verification and confirmation“)
- Frühzeitige Erkennung von unerwarteten Entwicklungen
- Bereitstellung der Grundlagen, welche für die jeweiligen Entscheide bei der schrittweisen Realisierung des Lagers bis zum Verschluss erforderlich sind (siehe Figur 1)
- Breite Kommunikation der Monitoringergebnisse zur Erhöhung des Vertrauens und damit der Akzeptanz in der Öffentlichkeit

Eine wichtige Grundvoraussetzung für das Monitoring eines geologischen Tiefenlagers ist, dass vor Inangriffnahme von Untertagebauten (Schächte, Rampen, Felslabor, Infrastukturanlagen, Lagerstollen etc.) die ungestörten geologischen, felsmechanischen, hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse (baseline conditions) im Standortgebiet mit einer breit angelegten Umweltüberwachung über mehrere Jahre hinweg erfasst und beobachtet werden.



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/PubliDocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]



**Figur 2 :** Vorgehensplan zur Erstellung eines Monitoring-Messprogrammes für ein geologisches Tiefenlager (Quelle: MoDeRn „Project Synthesis Report“, 2014).

Da das Monitoring über grosse Zeiträume hinweg erfolgt (> 100 Jahre im Beispiel des französischen Cigéo-HAA-Tiefenlager-Projektes) müssen das Monitoring-Programm und die Mess-Instrumentierung so ausgelegt werden, dass künftigen neuen Technologieentwicklungen Rechnung getragen werden kann. Das bedeutet, dass gewisse Sensoren und Messgeräte wenn möglich auch ausbaubar, rekali-brierbar und ersetzbar sein sollten (z. B. Überwachung des Lagers mit einem Set von Beobachtungs-bohrungen, die zugänglich bleiben).

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden auch die Erwartungen der Öffentlichkeit an das Monitoring diskutiert. Die Befragungen ergaben, dass der Einbezug der Bevölkerung bereits bei der Planung des Monitoring-Programmes wichtig ist. Die Bevölkerung legt besonderen Wert auf die Umweltüberwa-



**Klassifizierung:** Intern  
**Aktenzeichen/PubliDocs:** 33KRM.MON / ENSI 33/412  
**Titel:** Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
**Datum / Sachbearbeiter:** 06.03.2015 / [REDACTED]

chung, die auch nach Verschluss des Lagers fortgesetzt werden sollte. Neben den sicherheitstechnischen Zielsetzungen sollte das Monitoring eine vertrauensbildende Funktion haben. Der Regulator als Kontrollinstanz muss unabhängig sein. Die Ergebnisse des Monitoring müssen transparent und weiteren Experten und der Öffentlichkeit zugänglich sein. Monitoring-Programme über grosse Zeiträume sollten so flexibel ausgelegt sein, dass sie regulatorischen und gesellschaftlichen Änderungen Rechnung tragen können. Daraus folgt, dass das Monitoring nicht eine rein technische Angelegenheit ist, sondern dass auch sozio-politische Aspekte zu beachten sind.

#### **b) Stand von Monitoring Messtechniken**

Ein Arbeitspaket des MoDeRn-Projektes galt der Diskussion und Erfassung des aktuellen Standes der Technik bezüglich Monitoring-Messungen. Um den Stand ermitteln zu können, wurden eine Vielzahl von fachübergreifenden internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekten wie

- *ESDRED* (Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs),
- *FIDES* (Optical Fibres for New Challenges Facing the Information of Society),
- *I-SSB* (The Integrated Safe and Smart Built Concept),
- *LIMES* (Land and Sea Monitoring for European Security),
- *OFSESA* (Novel and Reliable Optical Fibre Sensor Systems for Future Security and Safety Applications),
- *OMNIBUS* (Development of Tools and Interpretation Techniques for Ultrasonic Surveys to Monitor the Rock Barrier around Radioactive Waste Packages in Geological Repositories),
- *POLYTECT* (Polyfunctional Technical Textiles against Natural Hazards)
- *RAINOW* (Researching the Application of Open Innovative Wireless Technologies)
- *SUSTAINABLE BRIDGES* (Assessment for Future Traffic Demands and Longer Operation Lives)
- *TIMODAZ* (Thermal Impact on the Damaged Zone Around a Radioactive Waste Disposal in Clay Host Rocks)

diskutiert und deren Erfahrungen analysiert (Monitoring Technologies Workshop Report, MoDeRn Deliverable 2010). Der Fokus der Analyse galt neben der eigentlichen Messtechnik der Datenübermittlung, der Datenverarbeitung und der Energieversorgung der Sensoren.

Wichtige messbare Parameter im Bereich der Endlagerüberwachung sind

- Temperatur
- Gebirgsspannungen
- Wassersättigung
- Porenwasserdruck
- Gasdrücke
- Deformation / Verschiebungen
- Geochemische Bedingungen (pH, Eh, Mikroben, etc.)
- Korrosionsraten (indirekt über elektrochemische Impedanz-Spektroskopie)

Die Messinstrumentierung kann an verschiedenen Orten erfolgen:

- Innerhalb des verfüllten und versiegelten Lagerstollens (technische Barrieren, Nahfeld)
- Innerhalb von Beobachtungsbohrungen im umgebenden Gestein oder an der Erdoberfläche

Die wichtigsten Schlussfolgerungen zum State-of-the-Art der verschiedenen Messtechniken können wie folgt zusammengefasst werden:



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/PubliDocs:  
Titel:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]

Datum / Sachbearbeiter:

- Drahtlose Sensor-Netzwerke (WSN's), bestehend aus räumlich verteilten autonomen Sensoren, werden heute breit eingesetzt u. a. bei der Überwachung von Infrastrukturbauten, in der Umweltüberwachung oder bei industriellen Grossanlagen. Ein Schwachpunkt dieser Sensor-Netzwerke ist die begrenzte Lebensdauer der Energieversorgung (Batterien). Verbesserte „Data Processing Techniken“ zeigen nun, dass eine Verlängerung des Einsatzes der Sensoren bis zu 10 Jahren möglich ist.
- Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der „Wireless through-the-earth Transmission“ erlauben eine drahtlose Übermittlung von Daten von der Lagerebene untertags (200 - 300 Meter) bis direkt an die Erdoberfläche, wie die Anwendung der „low-frequency magneto-induction“ Technik im Felslabor HADES in Mol, Belgien, gezeigt hat.
- Glasfaser-Sensoren werden heute u. a. im Bauwesen für Messung von Temperatur, Druck und Belastung (Strain bis 1%) breit verwendet. Neue Entwicklungen der Glasfasertechnik auf Polymer-Basis erlauben Messungen von Belastungen von bis zu 40 %. Für geologische Tiefenlager erscheint die Glasfasertechnologie für das Monitoring von 3D-Parameter-Feldern vielversprechend zu sein.
- „Seismic-Interferometry-Techniken“ erlauben die Abbildung von Unterschieden in der Geschwindigkeitsstruktur des Untergrundes, die z. B. infolge einer Wärmequelle und der daraus resultierenden thermischen Ausdehnung des Gesteins entsteht. Forschungsentwicklungen der Erdöl- und Gasindustrie zielen darauf, diese Methode auch zur Erfassung von Gasfeldern und deren Veränderung bei der Gasförderung einzusetzen.
- „Time-lapse 3D-Seismik Survey“ wurde in der Nordsee (Sleipner Field) zur Abbildung von CO<sub>2</sub>-Plumes als Folge von CO<sub>2</sub>-Sequestrierung angewendet. Die Genauigkeit dieser Methode ist soweit, dass 85 % des injizierten CO<sub>2</sub> abgebildet werden kann. Diese Methode könnte bei der geologischen Tiefenlagerung weiterentwickelt werden, um z. B. die Gas-Bildung (infolge von Korrosionsprozessen) und die Gas-Migration im Gestein zu verfolgen.
- „Acoustic emissions“ und „microseismicity“ (AE/MS) Techniken erlauben Bruchvorgänge und gekoppelte H-M-T-Prozesse im Gebirge zu erfassen. In verschiedenen Felslabors (Bure, Tournemire, HADES, Mont Terri, Grimsel, Äspö) wurde diese Methode erfolgreich bei der Untersuchung der EDZ-Auflockerungszone und deren Entwicklung nach Verschluss der Stollen angewendet.
- Geotechnische Messmethoden (Strain-Monitoring mittels Extensometer und Stress-Monitoring mittels „multiple point measurement systems“) gehören heute zum Standard, um Deformation und Verschiebungen in Tunnelbauwerken zu erfassen.
- „Laser Scanning“ Techniken erlauben ein 3D-Abbild der ausgebrochenen Stollenwände mit einer Auflösung von bis zu 5 mm. Diese Technik wird sowohl bei konventionellen Strassen- und Bahntunnelbauwerken wie auch in den verschiedenen Felslabors (u. a. Mont Terri, Bure, HADES, ONKALO, Äspö) erfolgreich eingesetzt.
- Zur Beobachtung von Veränderungen an der Erdoberfläche (z. B. Hebungen, Senkungen, Verschiebungen) werden heute verschiedene Satelliten-basierte Systeme oder Radar-Methoden angewandt. Satelliten-Messungen haben eine maximale Auflösung von 50 cm, wogegen die Radar Interferometry Methode (CRInSAR = Corner Reflector Interferometric Synthetic-Aperture Radar) eine Auflösung im mm-Bereich ermöglicht.



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publidocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

Zu folgenden neun Themen wurde ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf erkannt:

1. Verbesserung der Reichweite der „Low-frequency wireless through-the-earth transmission“ Technik
2. Anpassung der WIFI-Sensor- und Übertragungsnetzwerke auf die Lagerbedingungen
3. Entwicklung von drahtlosen Energieübertragungen für die Energieversorgung der Sensoren und Untersuchung möglicher Einflüsse auf andere Messsysteme
4. Entwicklung von dauerhaften Energiequellen für die Sensoren
5. Verbesserung der Auflösung geophysikalischer Monitoring-Techniken, insbesondere durch Entwicklung und Verbesserung der Wellen-Geschwindigkeitsanalysen
6. Entwicklung von „Brillouin scattering fibre optic Sensoren“ für die Anwendung in Lagerstollen mit wärmeproduzierenden Abfällen
7. Entwicklung von Langzeit-Messgeräten für Feuchtigkeitsbestimmungen (TDR), für Deformationsmessungen (deformation gauges)
8. Weiterentwicklung der Ultrasonic-Charakterisierung des Wirtgesteins zur Detektion von Inhomogenitäten/Diskontinuitäten
9. Vermehrte Demonstrationsexperimente in URL, verbunden mit Mock-up- und Laborversuchen

### **c) Entwicklung neuer Monitoring-Messsysteme**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden folgende fünf Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsarbeiten durchgeführt: 1) Seismic tomography im Felslabor Grimsel (CH), 2) High frequency wireless sensor networks im Felslabor Grimsel (CH), 3) Fibre optic sensing and acoustic emission im Felslabor HADES (B), 4) Long distance wireless data transmission im Felslabor HADES (B) and 5) Test of disposal cell monitoring systems im Felslabor in Bure (F).

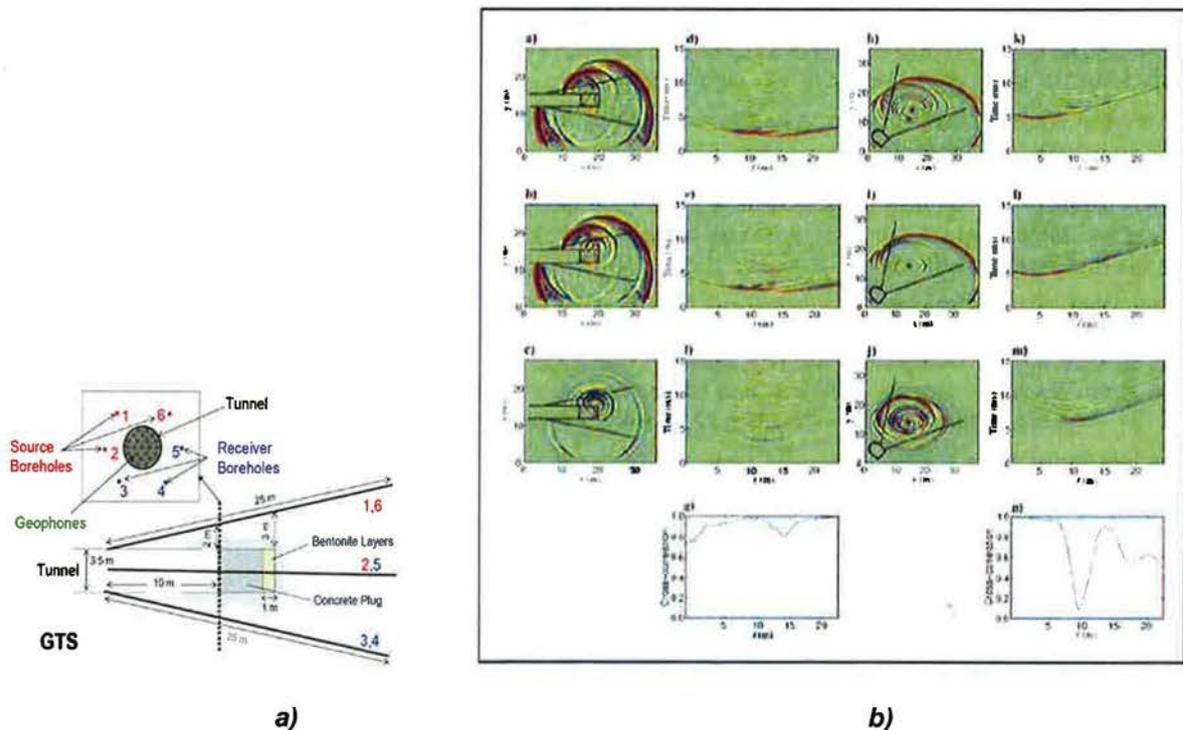
Die seismische Tomographie bietet die Möglichkeit der zerstörungsfreien Abbildung des Nahfeldes (Engineered Barrier System EBS) oder der Auflockerungszone (EDZ). Sie basiert darauf, dass Heterogenitäten in den elastischen Materialeigenschaften die Charakteristika der Wellenausbreitung beeinflussen (travel time, amplitude and phase) und somit Änderungen dieser Eigenschaften in Funktion der Zeit erfasst werden können. Für die Überwachung eines Pilotlagers ist dieses Verfahren deshalb vielversprechend, weshalb dieses Experiment hier kurz näher erläutert wird.

Figur 3 zeigt die Konfiguration des seismischen Tomographie-Experimentes im Felslabor Grimsel (GTS), mit einem Fächer von 6 Bohrungen um den Testtunnel herum zur Platzierung von Sendern und Empfängern. Ziel des Experimentes war, die Aufsättigung und Quellung der Bentonitstrecke zu verfolgen und abzubilden. Ein vergleichbares Experiment wurde auch im Felslabor Mont Terri im Rahmen des HG-A Experimentes (Gas path through host rock and seals experiment) durchgeführt, wobei hier die Aufsättigung der EDZ mit seismischer Tomographie verfolgt wurde.



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/PubliDocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]



**Figur 3:** a) Layout des Tomographie-Experimentes im Felslabor Grimsel (GTS), b) Resultate der seismischen Abbildung der Aufsättigung des Bentonites im GTS (a-g) und Abbildung der Aufsättigung der EDZ um den HG-A Stollen herum im Felslabor Mont Terri (h-n). (Quelle: MoDeRn, 2014)

Die Ergebnisse dieses Experimentes können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Experiment hat gezeigt, dass für die tomographische Abbildung der Bentonit-Aufsättigung seismische Signale sowohl von hoher wie niedriger Frequenz wichtig sind.
- Die Umwandlung der seismischen Wellen in ein Geschwindigkeitsmodell erfordert eine elastische Inversionstechnik, die noch weiter zu entwickeln ist.
- Der Algorithmus zur Umwandlung der seismischen Signale in ein tomographisches Bild muss der Anisotropie des Gesteins Rechnung tragen, was weitere Entwicklungsarbeiten erfordert.
- Eine gute Ankopplung der Geophone an den Fels ist ein kritischer Aspekt und kann nur durch Verwendung von Zement erreicht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die seismische Tomographie ein Potential zur Abbildung des Nahfeldes hat und qualitative Hinweise über Prozesse wie Aufsättigung, Gasbildung und thermische Ausdehnung des Gebirges geben kann. Quantitative Aussagen dürften mit dieser Methode aber kaum möglich sein.

#### **d) Monitoring am Beispiel der Fallstudie „Tongestein“**

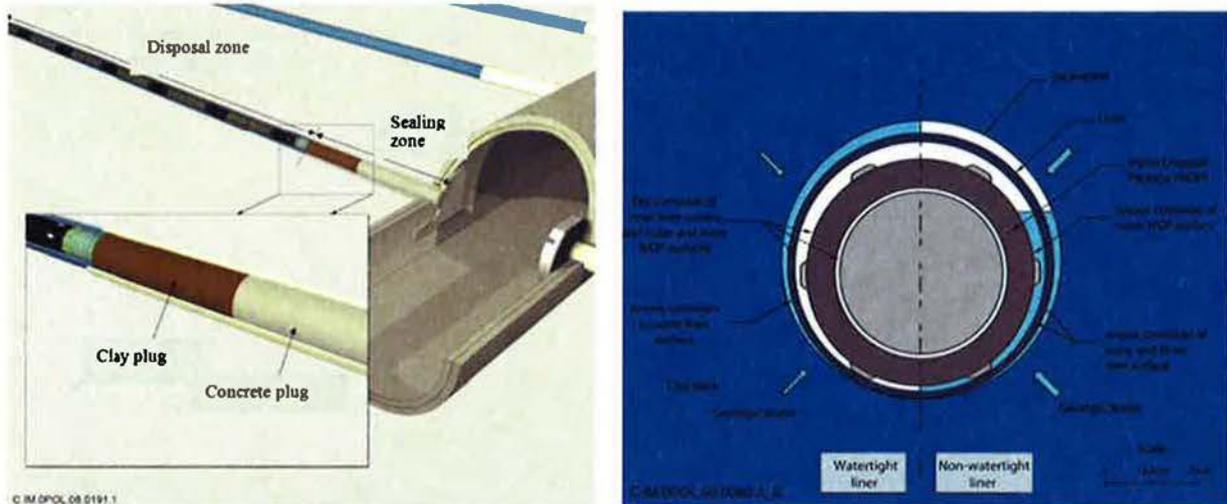
Im Rahmen des MoDeRn-Projektes wurden für die Wirtgesteine Salz, Granit und Tongestein je ein Fallbeispiel für die Planung, Spezifizierung und Durchführung eines HAA-Monitoring-Programmes durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse für das Beispiel Tongestein zusammengefasst, welches von der ANDRA ausgearbeitet wurde.



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publidocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]

Für das Fallbeispiel in Tongestein wählte die ANDRA eine HAA-Einlagerungszelle im Callovo-Oxford-Tongestein, wie sie gegenwärtig im Felslabor in Bure anhand von Demonstrationsexperimenten untersucht und für das spätere Cigéo-Endlager vorgesehen wird (Figur 4).



**Figur 4:** Skizze einer HAA-Einlagerungszelle (Bild links), bestehend aus Zugangstunnel mit horizontal abzweigenden, 40 m langen Bohrlochern (Durchmesser ca. 70 cm) zur Einlagerung der HAA-Behälter. Die Bohrlocher zur Aufnahme der HAA-Endlagerbehälter sind mit einem Stahlrohr gesichert (Bild rechts) und werden mit einer Versiegelungsstrecke aus Bentonit und Zement gegenüber dem Zugangstunnel getrennt (clay and concrete plugs). (Quelle: MoDeRn, 2013)

Zur Identifikation der für das Monitoring relevanten Prozesse und Parameter wurden die für die Langzeitsicherheit massgebenden Sicherheitsfunktionen des Barrierensystems analysiert. Die wichtigsten Sicherheitsfunktionen nach Verschluss der Lagerzone umfassen

- Vermeidung / Begrenzung des Wasserzutrittes und der Wasserbewegung
- Immobilisierung und Einschluss der Radionuklide (Glasmatrix, Stahlflasche, -behälter)
- Begrenzung der Freisetzung, der Mobilität und Migration der Radionuklide (Löslichkeit, Ausfällung, Sorption, Retardation, Diffusion, Dispersion, etc.)
- Begrenzung der EDZ (als potentieller Freisetzungspfad)

Mit der Auslegung des Barrierenkonzepts muss ferner auch die Subkritikalität der Abfälle, der Schutz gegen Erdbeben und die Begrenzung der thermisch/mechanischen Auswirkungen (im Falle Frankreichs Begrenzung der Temperatur im HAA-Nahfeld auf  $< 90$  °C) sichergestellt werden.

Aufgrund dieser Überlegungen und des Prozessverständnisses des Lagersystems wurden für die Überwachung des HAA-Nahfeldes folgende Prozesse und Parameter abgeleitet (Tabelle 1).



Klassifizierung:  
 Aktenzeichen/Publidocs:  
 Titel:

Datum / Sachbearbeiter:

Intern  
 33KRM.MON / ENSI 33/412  
 Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
 „Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
 06.03.2015 / [REDACTED]

Component	Process	Parameter	Potential Technique
Overpack material	Intrinsic material mechanical resistance	Stress (pressure, traction)	Verification on lab samples
		Strain	
	Intrinsic material corrosion properties	Corrosion under <i>in-situ</i> conditions	Indirect measurement (water and oxygen contents) with sampling lines, possibly verified by retrieving <i>in-situ</i> samples; many on-going developments for direct measurement
Overpack	Corrosion	Surface corrosion	Indirect measurement (water and oxygen contents) with sampling lines, possibly verified by retrieving sample canisters from sacrificial cells
		Weld seam corrosion	
		Runner contact corrosion	
In-cell environment	Heat dissipation Water exchange from near field	Temperature	Pt100 and optical fibre sensors inside sacrificial cell, and remote sensing from clay temperature monitoring
		Relative humidity	
		Liquid water content	Instrumented plug
	Gas exchange with access tunnel	Oxygen concentration	Instrumented plug, or application of the many on-going developments for direct measurement (at least in sacrificial cells)
		Anoxic corrosion	
	Radiolysis		
	Radiation	Irradiation rate	Sensing in sacrificial cell with optical fibres on the metallic liner (under development)
Cell liner	Thermo-mechanical loading	Temperature	Pt100 and optical fibre sensors on the liner
		Strain	Vibrating wire sensors and fibre optic sensors on the liner
	Radial mechanical loading	Total pressure at contact surfaces	
		Load source position	
	Deformation	Radial deformation	
Transient to hydraulic equilibrium	Relative humidity	Instrumented plug	
	Hydraulic pressure	Developments for sensors in the sacrificial cell (flexible instrumented blades)	
Near field	Heat dissipation	Temperature	Pt100 and fibre optic sensors in boreholes
	Transient to mechanical equilibrium	Radial deformation	Extensometers in boreholes
		Resaturation	Water content
Interstitial pressure			

**Tabelle 1:** Liste von Prozessen, Parametern und potentiellen Messtechniken für das französische Fallbeispiel „HAA-Einlagerungszelle“. (Quelle: MoDeRn, 2014)

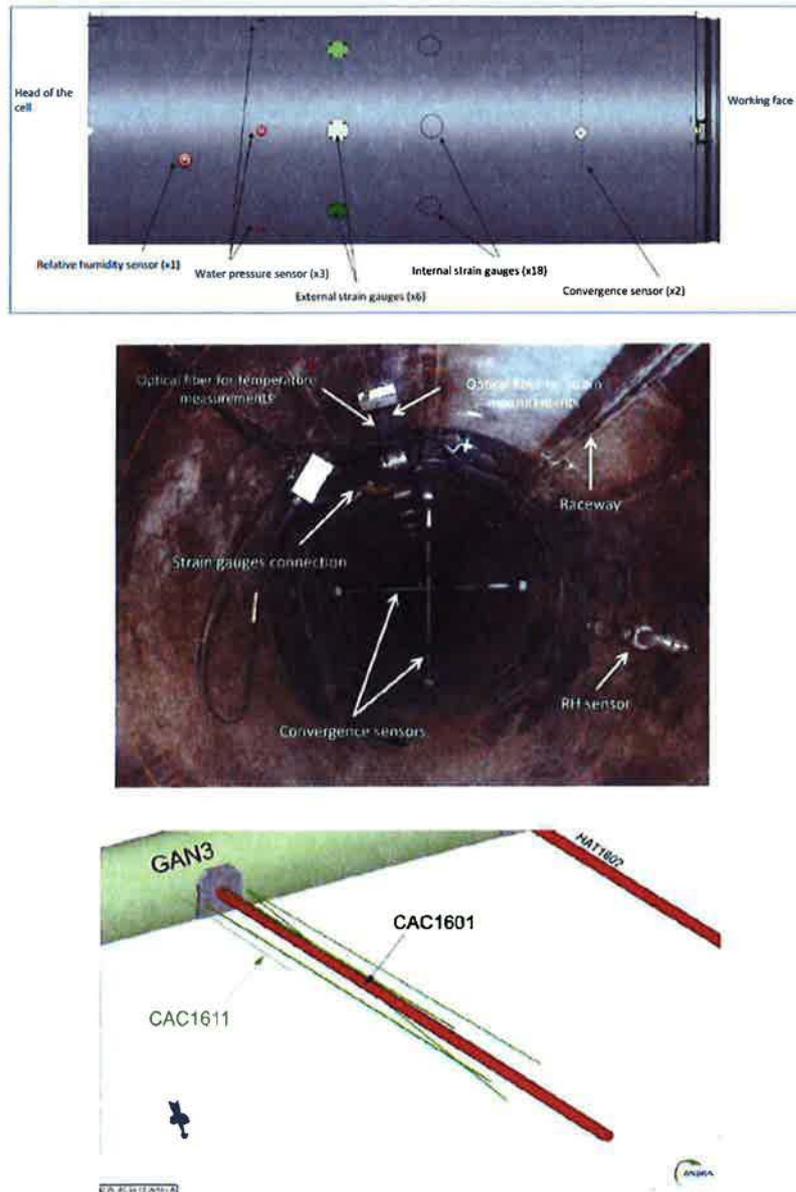
In der Tabelle werden schliesslich auch die für das Monitoring in Frage kommenden potentiellen Messtechniken vorgeschlagen, mit Anforderungen an das Auflösungsvermögen, die Genauigkeit, Häufigkeit, Zuverlässigkeit und Langzeitbeständigkeit der Messsysteme.

Die Platzierung und Anordnung der Mess-Sensoren erfolgt einerseits *innerhalb* des Casings (Relative humidity sensors, water pressure sensors, internal and external strain gauges, convergence sensors, optical fiber for temperature measurements, optical fiber for strain measurements) und andererseits *ausserhalb* in Beobachtungsbohrungen um die Einlagerungszelle herum (Messung der Porenwasserdrücke und der Deformationen, siehe Figur 5).



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publidos:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]



**Figur 5:** Auslegung der Messinstrumente im Casing (oben und mitte) und in Beobachtungsbohrungen (unten).  
(Quelle: MoDeRn, 2013)

In diesem Arbeitspaket wurde auch das Thema der Fehlererkennung bei Messsystemen breit diskutiert und mögliche Strategien zur Identifikation und Vermeidung erörtert. Fehlerursachen können technischer Art (z. B. Ausfall des Sensors, Fehler in der Übermittlung des Signals, Fehler in der Konversion des Signals) oder methodischer Art (fehlerhafte Platzierung oder Auslegung, Veränderung der Sensorumgebung, etc.) sein. Um das Monitoring-Messsystem möglichst robust zu machen, kamen die MoDeRn-Projektpartner zum Schluss, dass bei der Auslegung und Wahl von Messtechniken neben einer sorgfältigen Kalibrierung und Validierung der Messgeräte grundsätzlich auch folgende zwei Prinzipien berücksichtigt werden sollten:



**Klassifizierung:** Intern  
 Aktenzeichen/PubliDocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
 Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
 „Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
 Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

- **Redundante** Auslegung der Messsysteme (mehrfache Systeme für die Messung desselben Parameters)
- **Diversitäre** Auslegung der Messsysteme (als diversitär gilt die Anwendung physikalisch oder technisch verschiedenartiger Messprinzipien zur Messung desselben Parameters, vgl. Beispiel von Messprinzipien in Tabelle 2).

No	Measurement principle
1	Thermocouple
2	Electrical resistance variation RTDs and Thermistors Strain gauge (including piezoresistive effect in semiconductor) Resistance block (soil moisture) Potentiometer
3	Piezo-electric effect
4	Magnetic induction based
5	Vibrating wire <ul style="list-style-type: none"> <li>• Static measurements</li> <li>• Dynamic sustained vibration</li> </ul>
6	Capacitive systems <ul style="list-style-type: none"> <li>• Displacement</li> <li>• Hygrometer (electric permittivity)</li> </ul>
7	Electro-magnetic wave propagation <ul style="list-style-type: none"> <li>• TDR, TDT (Time Domain Reflectometry and Transmissometry)</li> <li>• FDR, FDC (Frequency Domain Reflectometry and Calibration)</li> <li>• Phase transmission</li> </ul>
8	Heat dissipation <ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermal conductivity</li> <li>• Thermal diffusivity</li> </ul>
9	Neutron moderation (neutron gamma probe)
10	Psychrometer (soil suction)
11	Tensiometer (water potential)
12	Nuclear radiation <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas-filled ionization chamber, gas-filled proportional chamber</li> <li>• Geiger-Müller counter</li> <li>• Scintillation detector</li> <li>• Semiconductor detector</li> </ul>
13	Electrochemical systems <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potentiometric electrode for pH measurement (also Eh)</li> <li>• ISFET (Ion-Sensitive Field-Effect-Transistors (pH))</li> <li>• Potentiostat (corrosion)</li> </ul>
<b>Optical principles</b>	
14	IR detection (can also be considered as a semiconductor detector)
15	Fiber optic (FO) chemical sensors <ul style="list-style-type: none"> <li>• Active core</li> <li>• Active coating</li> <li>• Dye on fibre end (optrodes)</li> <li>• Refractometer</li> <li>• Evanescence spectroscopy</li> </ul>
16	Fabry-perot interferometer
17	Bragg-gratings
18	OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) backscattering (Raman, Rayleigh, Brillouin)

**Tabelle 2:** Liste von Messverfahren nach elektrischen (No.1 - 13) und optischen Prinzipien (No. 14 - 18).  
 (Quelle MoDeRn, 2013)

**e) MoDeRn-Berichterstattung und f) Projekt-Synthese**

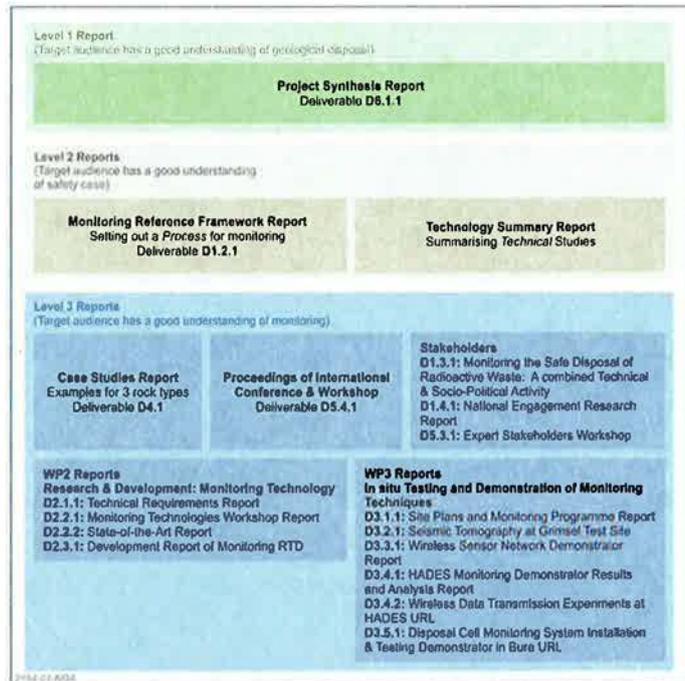
Das MoDeRn-Projekt hat die umfangreichen Ergebnisse seiner 4,5-jährigen Forschungstätigkeiten und seiner sechs Arbeitsgruppen in 18 Berichten (Reports) dokumentiert und über die Web-Seite [www.modern-fp7.eu](http://www.modern-fp7.eu) allgemein zugänglich gemacht. Die Berichte gliedern sich in drei Ebenen (Levels) mit unterschiedlichem Zielpublikum (Figur 6).



**Klassifizierung:** Intern  
**Aktenzeichen/PubliDocs:** 33KRM.MON / ENSI 33/412  
**Titel:** Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
**Datum / Sachbearbeiter:** 06.03.2015 / [REDACTED]

**Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis**  
MODERN DELIVERABLE (D-6.1)  
Editor: M.J. White (Galsou Sciences Limited)  
Date of issue of this report: 20/01/2014  
Start date of the project: 01 May 2009 Duration: 54 months

Project co-funded by the European Commission under the European Research and Training Programme on Nuclear Energy within the 6 <sup>th</sup> Framework Programme (2002-2013)		
Dissemination level		
PU	Public	X
RE	Restricted to a group identified by the partners of the MoDeRn Project	
CO	Confidential, only for MoDeRn partners	



**Figur 6:** Berichtstruktur der MoDeRn-Forschungsergebnisse ([www.modern-fp7.eu](http://www.modern-fp7.eu)).

Die Schlussergebnisse des MoDeRn-Projektes wurden zudem an einer internationalen Konferenz in Luxemburg im März 2013 präsentiert, verbunden mit einem Workshop, wo Fragen und Erwartungen zum Monitoring geologischer Tiefenlager mit allen Stakeholdern diskutiert wurden. Das ENSI war mit einer Delegation von vier Fachspezialisten an dieser Konferenz vertreten.

Aus der Konferenz lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Strategie des Monitorings fokussiert auf alle Schritte der Endlagerrealisierung, angefangen mit der Umweltüberwachung vor Beginn von Untertagearbeiten (Erfassen der ungestörten Umweltbedingungen = Baseline Conditions), gefolgt von Messprogrammen zur Charakterisierung des Endlagerstandortes (u. a. mittels Bohrungen, Seismik, Felslabor), Messungen während des Baus des Endlagers (zur Bestätigung der Barriereigenschaften des Wirtgesteins und Erkennung möglicher Veränderungen induziert durch den Bau) bis hin zum Überwachungsprogramm während der Betriebs- und Beobachtungsphase (zur Konsolidierung des Sicherheitsnachweises) bis zum endgültigen Verschluss des Lagers. Zu dieser Vorgehensstrategie herrscht international Konsens, sie folgt den gängigen internationalen Empfehlungen von IAEA, NEA und ICRP.
- Der aktuelle Stand der verschiedenen Monitoring-Messtechniken wurde im Sinne einer Bestandaufnahme umfassend analysiert und mit weiteren Forschungsarbeiten zu Themen wie „Seismic Tomography“, „Waveform Inversion Technique“, „Wireless Transmission Techniques“, „Spatial Domain Reflectometry“, „Corrosion Sensors“ und „Aerial Monitoring Systems“ erweitert.
- Die wichtigsten zu überwachenden Kennwerte eines Tiefenlagersystems betreffen Temperatur, Wassersättigung, Porenwasserdrücke, Quelldrücke, Gebirgsspannungen, Gebirgsverformungen (Konvergenz), Strahlung, geochemische Parameter (z.B. pH, Eh, Alkalinität), Gasgehalte (z. B. O<sub>2</sub>,



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publidocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

- CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), Kolloidgehalte, mikrobielle Prozesse, Korrosionsraten (mittels Electrochemical Impedance Spectroscopy) sowie geophysikalische Parameter (u. a. Gesteinsdichte, Wellengeschwindigkeit, Wärmeleitung, Impedanzkontraste).
- An der Konferenz wurden internationale / nationale regulatorische Vorgaben (IAEA, NEA, ICRP) an das Monitoring erörtert, mit Beispielen aus Finnland, Schweden und der Schweiz, wobei auch die Erwartungen anderer Stakeholders an das Monitoring (u. a. Umweltorganisationen, Öffentlichkeit, Soziologen, Ethiker) diskutiert wurden.
  - Das ENSI präsentierte die gesetzlichen Vorgaben der Schweiz an das Monitoring eines geologischen Tiefenlagers (KEG/KEV, ENSI-G03) und stellte das Konzept des Pilotlagers und der Beobachtungsphase vor. Da für die Beobachtungsphase das Hauptlager und das Pilotlager ganz erfüllt und versiegelt sein müssen (das ganze gestaffelte Barrierensystem muss wirksam sein), handelt es sich im Prinzip um ein „post closure monitoring“, was andere Länder bisher nicht vorgesehen haben und was im MoDeRn-Projekt nicht im Fokus der Forschungsarbeiten stand. Die Diskussion zeigte aber, dass für die Öffentlichkeit dieses Vorgehen für die Vertrauensbildung sehr wichtig ist.
  - Im Rahmen des anschliessenden Workshops wurde in drei Gruppen diskutiert, wieso, wann, warum und wie lange Überwachungsmassnahmen bei geologischen Tiefenlagern nötig und auch sinnvoll sind. Aus Sicht der Sicherheitsbehörden dürfen grundsätzlich Monitoring-Massnahmen die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers nicht beeinträchtigen und sind deshalb nur unter dieser Voraussetzung zu konzipieren (so lang wie nötig, so kurz wie möglich).
  - Die nationalen Abfallinventare, Lagerkonzepte und gesetzlichen Grundlagen sind in den verschiedenen Ländern unterschiedlich und definieren Rolle und Ziele eines Monitoring-Programms, um schrittweise die Entscheidungen bis zum sicheren Verschluss des Lagers zu unterstützen.
  - Die Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung erfordert Vereinbarungen, die allen Interessengruppen den Zugang zu den Informationen und Ergebnissen aus dem Monitoring ermöglichen und diese in die Entscheidungsfindung einbezieht. Das Monitoring ist daher nicht ein rein sicherheitstechnischer Vorgang, sondern ist verbunden mit einem sozio-politischen Anliegen der Öffentlichkeit.
  - Das Monitoring erfolgt über grosse Zeiträume (Dekaden bis wenige Jahrhunderte) und sollte deshalb so flexibel sein, dass es regulatorischen, technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen Rechnung tragen kann.
  - In einigen Ländern laufen bereits umfangreiche Monitoring-Programme geologischer Tiefenlager (u. a. USA mit WIPP, Frankreich mit dem Centre de l'Aube (SMA) und dem Cigéo-Projekt (HAA), Finnland mit Olkiluoto (HAA)), deren Erfahrungen einen wichtigen Input für die Diskussionen im MoDeRn-Projekt lieferten.

Das Thema „Monitoring“ wird nach Abschluss des MoDeRn-Projektes mit internationalen Folgeprojekten weiterverfolgt, und zwar im Rahmen der IGD-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform) (siehe Tabellen 3 und 4) sowie im Rahmen des „EU Framework Programme for Research and Innovation HORIZON 2020“ (Tabelle 5). In den Tabellen sind die jeweiligen Zielsetzungen der Folgeprogramme zum Monitoring geologischer Tiefenlager skizziert.



**Klassifizierung:** Intern  
 Aktenzeichen/Publicdocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
 Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
 Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

**Tabelle 3:** Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform, Master Deployment Plan and Joint Activities 2014, Key Topic Nr. 6 Monitoring (IGD-TP 2014).

6	Key Topic 6: Monitoring			
6.1	Monitoring strategies and programmes for performance confirmation	2011	2015	H
6.2	Monitoring technologies and techniques	2011	2015	H
6.3	Monitoring of the environmental reference state	2011	2016	H
6.4	Monitoring of engineered barrier systems	2016	2020	M
6.5	Post-closure monitoring parameters and techniques	2023	2030	M

Für das Monitoring hat die IGD-TP fünf Kernthemen ermittelt und entsprechende Arbeitsgruppen gebildet, wobei drei Themen mit hoher Priorität (H) verfolgt werden. Darunter ist das Thema Umweltüberwachung (environmental reference state), welche einige Jahre vor Beginn des Baus des Endlagers zu erfolgen hat. In Tabelle 4 sind die Arbeitspakete zu diesem Thema aufgeführt.

**Tabelle 4:** Monitoring of the environment reference state: content and activities of the Technical and Scientific Working Group TSWG (IGD-TP 2014).

TSWG Content of the activities
<p><i>Explanation of the contents of the activity:</i>            The objectives of the IGD-TP Joint Activity 4 “Monitoring the Environmental Reference State” are defined as follows: “How to define, structure, organize and manage the studies associated with the assessment of a reference state of the environment before beginning the construction works”. This project will focus on developing methodologies to define and monitor the reference state. Because the environment is a highly dynamic system made of multiple components (biosphere, hydrosphere, atmosphere, lithosphere, geosphere) interacting at different scales (space and time), few years of monitoring are required to obtain good representative view of the reference state. Therefore, collecting and organizing the data in order to comply with the regulation and answer the public expectation is a real challenge. There is a need for a methodology to define and monitor the relevant parameters characterizing the environmental reference state. This project aims to answer these needs by formalizing a multi-disciplinary methodology for geological disposal sites. Special focus will be on Environmental Impact Assessment (EIA) and knowledge exchanges at pan-European level. In combination this proposal will also address the strong public interest expressed around geological disposal projects by providing communication tools as well as widely accepted monitoring methodologies.</p> <p>The following work packages and tasks have been identified:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. State of the art on environmental initial state and monitoring requirements and practises, State of the art common specifications, Review, Synthesis, Restitution</li> <li>2. Methodological and technical (innovative) approaches               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Hydrogeology and subsurface studies</li> <li>b. Biodiversity reference state</li> <li>c. Socio-economic reference state</li> <li>d. Radiochemical reference state : monitoring and banking</li> </ol> </li> <li>3. Information and communications technology (ICT) for information accessibility, societal &amp; local stakeholders dialog and involvement               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Information gathering: to answer public expectations (surveys, public consultations...)</li> <li>b. Information broadcasting to improve public awareness</li> </ol> </li> </ol> <p><b>Final output</b>            The project will aim to a common view for good practices on:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprehensive review of international requirements and practices : synthetic document</li> <li>2. Agreed upon methodology and associated toolbox for defining environmental reference/zero state</li> <li>3. Information gathering and broadcasting methodologies</li> </ol>
Last Update : April 24 2014



<b>Klassifizierung:</b>	<b>Intern</b>
Aktenzeichen/Publicdocs:	33KRM.MON / ENSI 33/412
Titel:	Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und -einrichtungen“
Datum / Sachbearbeiter:	06.03.2015 / [REDACTED]

**Tabelle 5:** Zielsetzungen des „EU-HORIZON 2020“- Programmes zum Thema Monitoring.

---

### **EU-HORIZON 2020: “Monitoring of Radioactive Waste Disposal Facilities”**

- Identify specific areas related to **repository monitoring** in which further research is required, and have strong influence on:
  - a) Repository design
  - b) Repository implementation plans
  - c) Communication strategies (present and future)
- Serve as starting point for the **definition of the objectives and scope** of a potential future **collaborative project on repository monitoring**.
- **Areas** to be considered:
  - a) Strategy aspects
  - b) Technology development
  - c) Practical implementation
  - d) Communication & Stakeholder involvement

---

Im Rahmen der EURATOM-Forschungsaktivitäten laufen ferner von 2014 – 2015 drei Projekte zum Thema „Contribute to the Development of Solutions for the Management of Radioactive Waste“ (siehe Tabelle 6), welche sich mit der Umsetzung der Endlagerprogramme in den verschiedenen EU-Staaten befassen. Ziel ist, mit diesen Projekten die Koordination der Endlagerprojekte zu fördern, Schwerpunkte und Prioritäten bei der Forschung zu identifizieren, Synergien zu nutzen und technische wie nicht-technische Unterstützung unter dem Lead der EU zu geben.

**Tabelle 6:** Auszug aus dem EURATOM Work Programme 2014 – 2015 mit drei Forschungsthemen (NFRP) zur Endlagerung radioaktiver Abfälle.

---

NFRP 4: „EU concerted development of member state research on radioactive waste management“

NFRP 5: „Supporting the licensing of geological repositories“

NFRP 6: „Supporting the implementation of the first-of-the-kind geological repositories“

---

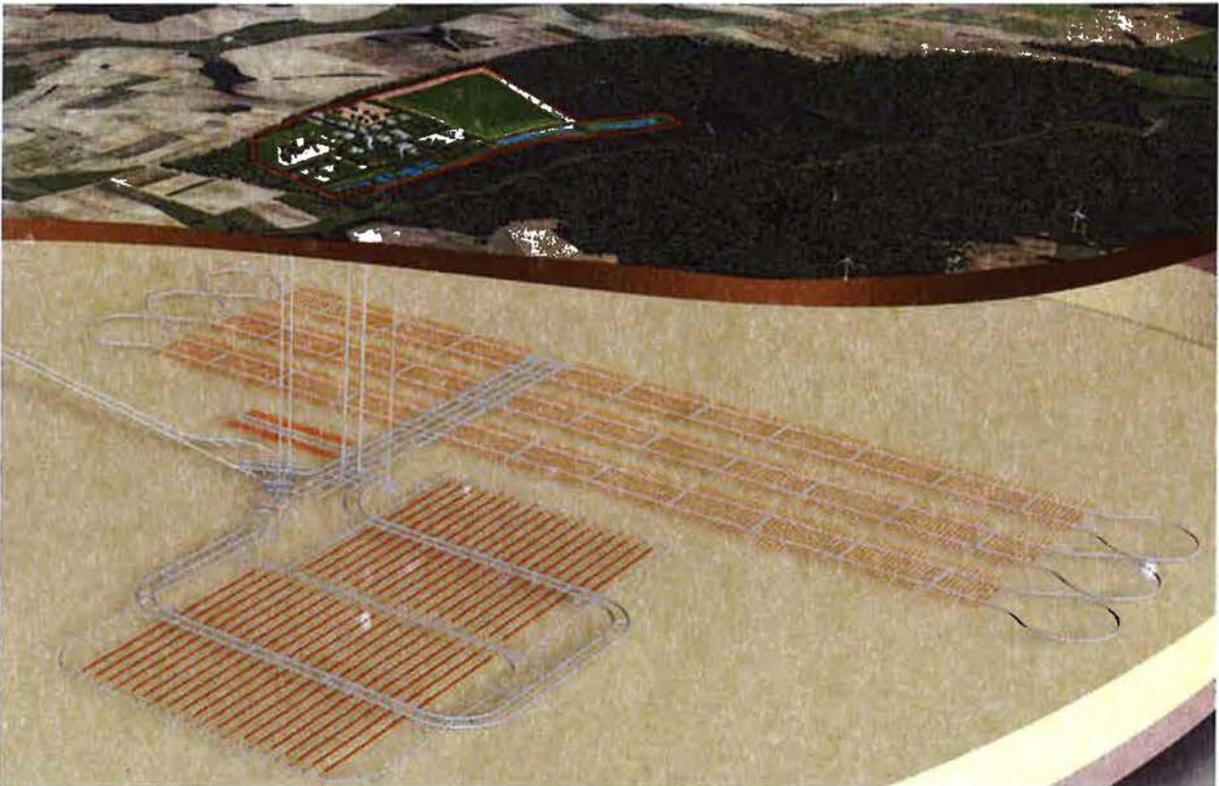


**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publidocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]

### 3.2 Überlegungen der ANDRA zum Monitoring

Im Rahmen der 1. Fachsitzung zum Projekt „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ präsentierte S. Mayer, Experte und Verantwortlicher bei der ANDRA für die internationale Zusammenarbeit bezüglich des Monitorings, die Überlegungen der ANDRA zum Monitoring. Nach seinen Ausführungen liegt die Hauptaufgabe des Monitorings beim geplanten französischen HAA-Tiefenlager **Cigéo** (Centre industriel de stockage géologique, Figur 7) bei der Überprüfung der Sicherheit und Sicherung des



**Figur 7:** Schematischer Überblick über das französische HAA-Tiefenlagerprojekt Cigéo (Quelle: ANDRA) mit 5 Schächten und 2 Rampen zur Erschließung der Lagerfelder in rund 500m Tiefe.

Lagers (Nachweis der operationellen Sicherheit und der Einhaltung der Grenzwerte, Einhaltung der Vorgaben der IAEA Nuclear Safeguards, Überprüfung der Grundlagen für den Nachweis der Langzeitsicherheit und Erfassung der zeitlichen Entwicklung des Tiefenlagers). Daneben bietet das Monitoring auch eine Möglichkeit, den auf Sicherheit ausgerichteten Prozess zu einem Tiefenlager für alle Interessengruppen transparenter zu machen und damit das Vertrauen und die Akzeptanz zu steigern. S. Mayer wies auf den Unterschied zwischen einem „Erklärungsproblem“ und einem „Sicherheitsproblem“ hin: Werden unerwartete Daten gemessen, ist dies zunächst ein „Erklärungsproblem“ und muss nicht notwendigerweise ein „Sicherheitsproblem“ darstellen.

Als mögliche Monitoringbereiche sieht die ANDRA neben der Umweltüberwachung vor allem das Nahfeld des Tiefenlagers mit den Abfallbehältern und den technischen Barrieren. Dabei darf das Monitoring die Langzeitsicherheit des Barrierensystems nicht beeinträchtigen. Daher könnte z. B. eine drahtlose Übertragung von Messdaten über kurze Distanz erforderlich sein. Nach derzeitigen Massstäben liegt die zeitliche Beschränkung für das Monitoring bei etwa 100 Jahren unter für die Messtechnik schwierigen Umweltbedingungen (hoher Druck, chemisch korrosives Grundwasser, erhöhte Temperaturen), wobei voraussichtlich nicht überall eine Wartung möglich sein wird. Prinzipiell könnte auch



<b>Klassifizierung:</b>	<b>Intern</b>
Aktenzeichen/Publidocs:	33KRM.MON / ENSI 33/412
Titel:	Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“
Datum / Sachbearbeiter:	06.03.2015 / [REDACTED]

ein Monitoring nach dem endgültigen Verschluss des Lagers erforderlich werden, wenn Interessengruppen dies fordern. Die Aufgaben und Ziele des Monitorings der ANDRA hängen von der betrachteten Projektphase ab. Vor dem Bau des Tiefenlagers dient das Monitoring der Datenerfassung für eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung und zur Festlegung der natürlichen Rand- und Anfangsbedingungen (Nullmessung, Messung der „Baseline Conditions“). Während der Bau- und Betriebsphase verlagert sich das Ziel hin zur operationellen Sicherheit, zur Überprüfung der Grundlagen zur Langzeitsicherheit, sowie zur Bestätigung des erwarteten Lagerverhaltens und zur Darlegung des Handlungsspielraumes für zukünftige weitere Bau- und Betriebsentscheidungen. Mit Blick auf die Langzeitsicherheit wird dann die Bestätigung des Prozessverständnisses und der Prozessentwicklung inklusive deren Beiträge zu den Sicherheitsfunktionen über die Zeit wichtiger.

Um eine möglichst lange Lebensdauer der Überwachungstechnik zu erreichen, erfolgt bereits während der Herstellung der Mess-Sensoren eine rigorose Qualitätskontrolle. Ausserdem werden Langzeitexperimente unter repräsentativen Bedingungen durchgeführt, die Messtechnik wird in Test- und Mock-up-Anlagen erprobt und man versucht durch Kombination von intrusiven und nicht-intrusiven Messtechniken eine erhöhte Datensicherheit zu erreichen.

Um das Monitoring-System zu optimieren, sollte ausserdem Nutzen aus der Homogenität des Wirtgesteins und aus dem Vorhandensein identischer Komponenten und technischer Strukturen im Tiefenlager gezogen werden. Dazu könnte man intensiv instrumentierte Referenzstrukturen bilden, die den grösstmöglichen Monitoringumfang abdecken (ähnlich dem schweizerischen Pilotlager). Daneben könnte es dann Strukturen mit einer „Standardausrüstung“ an Monitoring-Systemen geben, die robuster ausgelegt und dafür länger betrieben werden. Ein weiterer zu klärender Aspekt wird die Datenübertragung, Datensammlung und Datenarchivierung sein.

Um Erfahrungen mit dem Langzeitmonitoring zu sammeln, wurden zum Beispiel Experimente zur Überwachung von Beton- und Metallkomponenten am Technologiezentrum in Bure (F) und am SMA-Endlagerzentrum in Aube (F) zur Überwachung von Tonabdichtungen durchgeführt. Die Datenaufzeichnung dieser seit etwa 20 Jahren laufenden Experimente erfolgte zu Beginn auf Papier und wurde im Laufe der Jahre auf eine elektronische Datenerfassung und –speicherung umgestellt. Dabei hat sich die dauerhafte Speicherung der Rohdaten als wichtiges Mittel zur Sicherung der Datenintegrität erwiesen.

Bezüglich der Messgenauigkeit erklärte S. Mayer, dass die Ziele erst einmal allgemein formuliert wurden. Man muss in einem nächsten Schritt die Messwerte als Eingangsdaten in der Modellierung verwenden, um zu sehen, welche Genauigkeit benötigt würde. Danach muss geklärt werden, ob die Messungen und die verwendeten Messmethoden diese Genauigkeit auch liefern können. Die ANDRA geht davon aus, dass jede Messung redundant erfolgen muss, wobei der Grad der Redundanz von der sicherheitstechnischen Bedeutung des Parameters abhängt. Das Monitoringsystem sollte wenn möglich ohne Wartung und Nachkalibrierung auskommen und dennoch vertrauenswürdige Daten liefern. Das erfordert allerdings, dass über die Messmethoden genügend Erfahrungen vorliegen (Langzeitverhalten) und dass redundante und diversitäre Messsysteme verwendet werden. So könnten verschiedene Messverfahren für den gleichen Parameter verwendet werden. Für bestimmte Parameter könnte eine einfache On/Off-Information, also eine grobe Messung mit geringer Genauigkeit, genügen.



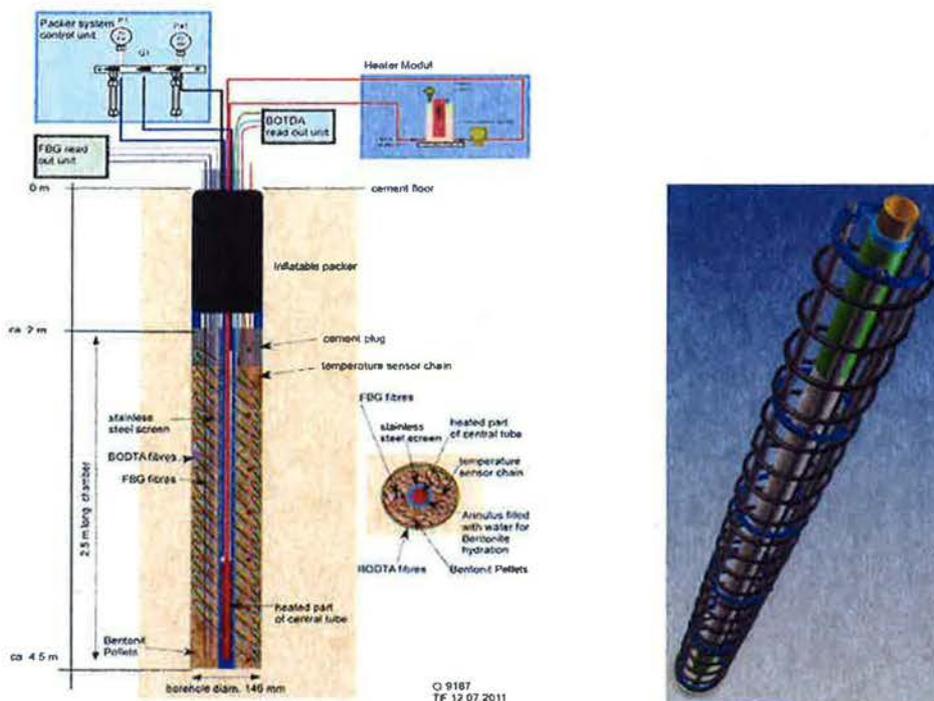
**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publicdocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
06.03.2015

### 3.3 MO-Experiment im Felslabor Mont Terri

Im Rahmen des Agneb-Forschungsprojektes „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ hat das ENSI 2012 zusammen mit swisstopo und ANDRA im Felslabor Mont Terri das MO-Experiment (Preparation of technology for long-term Monitoring) gestartet. Das MO-Experiment, welches auf eine Anregung von Herrn Covelli, Präsident der KNS, zurückgeht, hat zum Ziel, im Sinne eines Demonstrationsexperimentes heute verfügbare Messtechniken und Materialien, wie sie bei der Überwachung eines künftigen Pilotlagers gebraucht werden könnten, im Hinblick auf ihre Langzeitbeständigkeit und Zuverlässigkeit zu testen. In einem ersten Schritt konzentrierte man sich auf die Untersuchung des Langzeitverhaltens (5-10 Jahre) der Glasfasertechnologie, die unter realistischen Bedingungen, wie sie in einem HAA-Pilotlager erwartet werden, getestet werden soll. Mit dem Experiment will sich das ENSI eigene Expertise und Grundlagen für die spätere Festlegung der Anforderungen an das Monitoring eines Pilotlagers erarbeiten.

Das Konzept des MO-Experimentes (siehe Figur 8) besteht aus einem 5 m tiefen vertikalen Bohrloch, in welchem im untersten Bohrlochabschnitt ein Heizelement und verschiedene Typen von Glasfaser-



**Figur 8:** Auslegung des MO-Experimentes (Bild links) und spezielles Design (Bild rechts) des zentralen Testgestänges mit aufgewickelten verschiedenen Typen von Glasfaser-Kabeln. Die punktuellen FBG-Sensoren befinden sich im Innern des Strangs. (Quelle: swisstopo)

Sensoren (4 Typen von FBG, Fiber Bragg Gratings) und 3 Typen von Glasfaser-Kabeln (BOTDA Optic Fiber Cabels von je 30 m Länge) sowie konventionelle Temperatur- und Drucksensoren platziert wurden. Das Testintervall, gefüllt mit einem Bentonit-Sand Gemisch, wurde mit einem niedrig pH-Zement-Plug und einem Packerelement gegen oben abgeschlossen. Die Aufsättigung des Bentonites erfolgte



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publidocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015

über eine zentrale Leitung mittels Pearson-Porenwasser, welches dem Porenwasser des Opalinus entspricht. Die Aufheizung des Testintervalls erfolgte über mehrere Temperaturschritte bis zu einer Höchsttemperatur von 80 °C.

Parallel zum MO-Experiment wurden und werden an denselben Glasfaser-Materialien (BOTDA und FBG) am Eidgenössischen Institut für Materialprüfung (EMPA) die chemischen, mechanischen und optischen Eigenschaften zum Vergleich untersucht (1. Probenset vor Beginn des Experiments, 2. Probenset während der Experimentphase und 3. Probenset nach Abschluss und Ausbau des MO-Experiments).



**Figur 9:** Zusammenstellung des Teststranges für das MO-Experiment mit den aufgewickelten verschiedenen Typen von Glasfaser-Kabeln (Quelle: swisstopo).

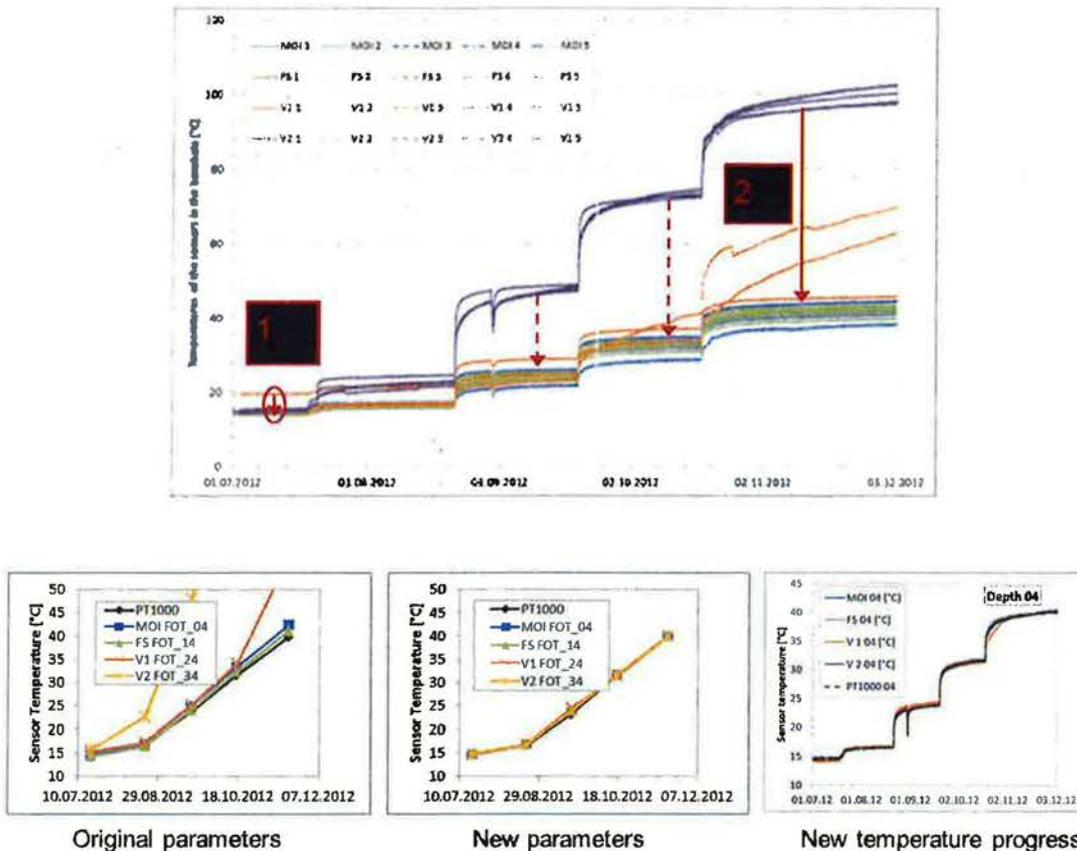
Die ersten Ergebnisse zeigten, dass die punktuellen Temperaturmessungen mit den FBG-Sensoren mit den konventionellen PT1000-Temperaturmessungen und der im Wärmetauscher eingebrachten Wärme nicht übereinstimmten und eine Rekalibrierung erforderlich machten. Für die Rekalibrierung wurden vom ENSI Modellrechnungen mit COMSOL für die Temperaturverteilung im Bohrlochabschnitt durchgeführt, um die Plausibilität der verschiedenen Datensätze zu überprüfen. Dabei zeigte sich, dass die effektiven Temperaturen im Testintervall anfänglich nur bei 50 -60 °C lagen und die 80 °C noch nicht erreicht wurden. Für jedes FBG-Tiefenintervall wurde deshalb eine Rekalibrierung durchgeführt (Figur 10).



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publicdocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015

## Rekalibrierung der FBG-Sensoren



**Figur 10:** Rekalibrierung der FBG-Temperatursensoren beim MO-Experiment. In einem ersten Schritt wurden die Temperaturwerte am Start des Experimentes für alle Sensorpunkte auf 16 °C eingestellt. In einem 2. Schritt wurden anhand der PT1000-Temperaturwerte und der Heizmodul-Daten (Inflow/Outflow Werte), die als korrekt beurteilt wurden, für jeden FBG-Messpunkt der Kalibrations-Faktor bestimmt, um die neue Temperaturkurven zu ermitteln (Quelle: swisstopo).

Zusammenfassend kann auf Grund der bisherigen Resultate des MO-Experimentes festgehalten werden, dass zwar zwei FBG-Sensoren nach der Phase der Aufsättigung, d. h. nach 10 Stunden ausgestiegen sind, dass aber die übrigen 30 FBG-Sensoren über die ganze Zeit gut funktionierten. Bei den BOTDA-Kabeln funktionierten zwei Typen von Glasfaser-Kabeln (darunter das Produkt der Kabelwerke Brugg AG) sehr gut. Hingegen funktionierte der dritte Kabel-Typ mit dünner Beschichtung nicht zufriedenstellend, was auf die Empfindlichkeit der Beschichtung auf Druck- und Zug-Beanspruchung zurückzuführen ist.

Das MO-Experiment soll mindestens bis Ende 2017 weiterlaufen. Dann wird entschieden, ob ein Stop und Rückbau eingeleitet werden soll. Ausserdem ist ein Folgeexperiment geplant, um eine autonome Energiequelle für Sensoren (z. B. Peltier-Element) zu testen, die eine elektrische Spannung aus vorhandenen Temperaturgradienten erzeugt.

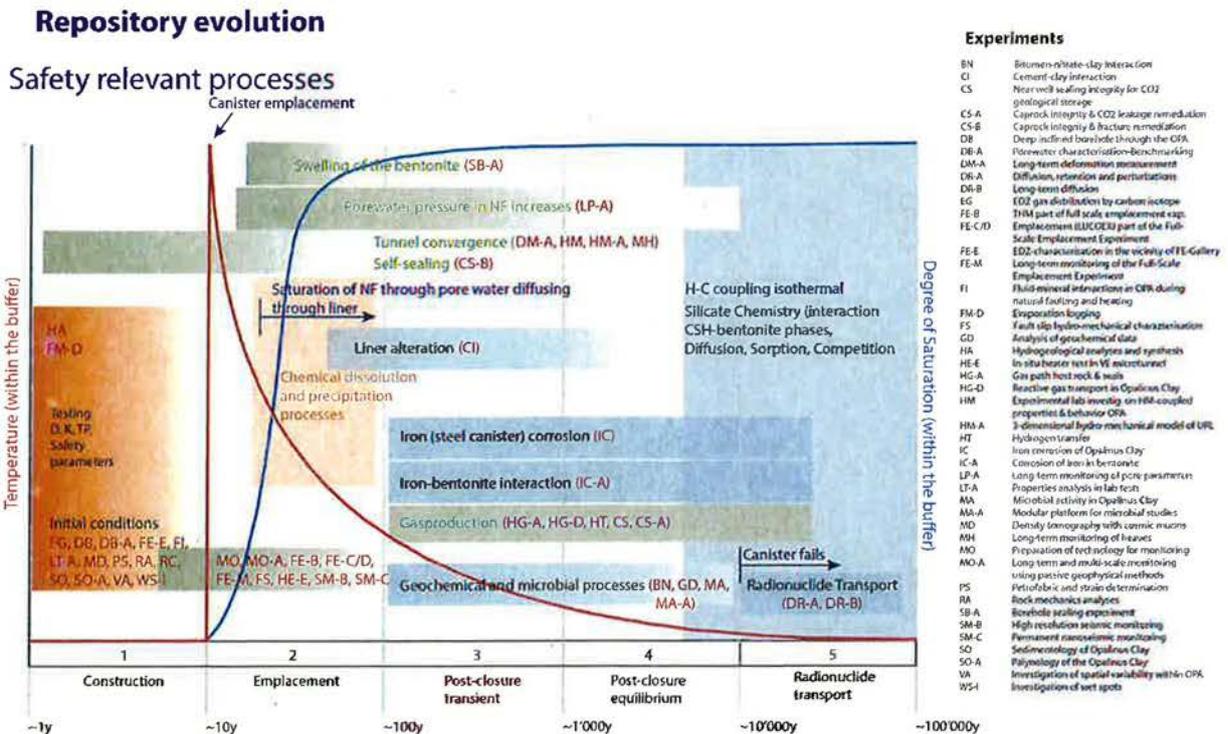


**Klassifizierung:** Intern  
**Aktenzeichen/Publidocs:** 33KRM.MON / ENSI 33/412  
**Titel:** Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
**Datum / Sachbearbeiter:** 06.03.2015 / [REDACTED]

### 3.4 Erfahrungen mit Langzeitmessungen im Felslabor Mont Terri

Das internationale Felslabor Mont Terri hat als wissenschaftliche Plattform für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Tongesteinen eine grosse Bedeutung erlangt, da es mit seinen vielen Experimenten umfassende Grundlagedaten für die Beurteilung der Sicherheit geologischer Tiefenlager in Tongesteinen erarbeitet hat. Die seit 1996 im Felslabor Mont Terri durchgeführten Experimente liefern einerseits wichtige Erkenntnisse zur Gesteinsbeschaffenheit, zur Felsmechanik, zur Hydrogeologie und Geochemie sowie zur Barrierenwirkung des Opalinustons und den dafür massgebenden physikalischen und chemischen Prozessen. Andererseits wurde mit den Experimenten ein grosser Erfahrungsschatz bezüglich Messtechniken und Einsatz von Sensoren gewonnen, welcher in diesem Kapitel nun beleuchtet werden soll.

Die bisher durchgeführten Experimente im Felslabor Mont Terri bilden verschiedene Teile und Phasen der zeitlichen Entwicklung eines Tiefenlagersystems ab, beginnend z. B. beim HAA-Lager mit dem Bau der Lagerstollen und der dadurch verursachten Auflockerungszone um den Hohlraum herum, der Einlagerungsphase der wärmeproduzierenden HAA, der Abkühlungsphase der HAA und der Phase der Aufsättigung des Bentonits, der Nachverschlussphase des Lagers mit Übergang von Transienten- zu Gleichgewichtsbedingungen. Nach Versagen des Behälters (>1000 Jahren) folgt schliesslich die Phase der Nuklidfreisetzung, Nuklidmigration und -retention im Bentonit und Opalinuston (Figur 11.)



**Figur 11:** Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Nahfeldes (Behälter-Bentonitverfüllung) eines HAA-Tiefenlagers bezüglich Temperatur (rote Kurve) und Grad der Aufsättigung des Bentonites (blaue Kurve). In der Grafik aufgeführt sind die 2013 im Felslabor Mont Terri laufenden 43 Experimente mit Bezug zu den in der jeweiligen Phase der Lagerentwicklung ablaufenden Prozessen. (Quelle: swisstopo).



**Klassifizierung:** Intern  
 Aktenzeichen/Publicdocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
 Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
 „Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
 Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 [REDACTED]

Derzeit gibt es kein Experiment, welches das gesamte System eines Pilotlagers und alle Phasen der Langzeitentwicklung abbilden würde. Die durchgeführten Experimente stellen aber eine gute Basis für die Diskussion der sicherheitsrelevanten physikalisch-chemischen Prozesse und der zu erfassenden Parameter für das Monitoring dar.

Von 1996 – 2013 wurden im Felslabor Mont Terri insgesamt 11 Langzeitexperimente (d. h. über viele Jahre, siehe Figur 12) durchgeführt, die uns wichtige Informationen zur Langzeitbeständigkeit der in den Experimenten eingesetzten Sensoren und Messtechniken liefern.

Abbr.	Title of experiment	Phase 1&2 96/97	Phase 3 97/98	Phase 4 98/99	Phase 5 99/00	Phase 6 00/01	Phase 7 01/02	Phase 8 02/03	Phase 9 03/04	Phase 10 04/05	Phase 11 05/06	Phase 12 06/07	Phase 13 07/08	Phase 14 08/09	Phase 15 09/10	Phase 16 10/11	Phase 17 11/12	Phase 18 12/13
EB	Engineered barriers					BEN	BEN	BEN	BEN	BEN	ABEN							
EZ-A	EDZ cut-off								ABN	ABN	ABN	T	T	T	T	T	T	T
FE-B	THM part of FE																ANV	ABDQNW
GM-A	Geophysical monitoring											N	N	N	N	N	N	N
HE-B	Heater experiment					BEGN	BEGN	BEGN	BEGN									
HE-D	THM behaviour of host rock (heater test)								AG	AG	AG	A						
HE-E	In-situ heater test in VE microtunnel															BEGN	BEGN	BEGN
LP	Long-term monitoring pore pressures	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	ANT	ANT	AINTW	AINTW	AITW	AINTW	AINTW
MO	Monitoring															AHT	AHT	AHT
MO-A	Monitoring with passive geophysics																ANTV	NT
SM-B	High resolution seismic monitoring																	NT

**Figur 12:** Übersicht über 11 Langzeitexperimente (weisse Felder) von 1996 bis 2013 im Felslabor Mont Terri mit Angabe der jeweils beteiligten Partner (A:ANDRA, B:BGR, C:CRIEPI, E:ENRESA, F: FOWG (31.12.2005 aufgelöst), H:HSK (heute ENSI), G:GRS, I:IRSN, N:NAGRA, S:SCKCEN, T:swisstopo, W:NWMO). Quelle: swisstopo (2013)

Im Folgenden werden die Erfahrungen, die mit den verschiedenen Messverfahren gemacht wurden, anhand einiger Beispiele erläutert und zusammengefasst.

**Engineered Barrier Experiment (EB):** Im EB-Experiment wurde die Entwicklung der relativen Feuchte und des totalen Drucks während der Aufsättigung eines mit Bentonit (Bentonitblöcke und Bentonit-Granulat) gefüllten und durch einen Zementverschluss verschlossenen Stollens von 2002 bis 2011 beobachtet. Ziel war, die Einbringtechnik und das hydraulisch-mechanische Verhalten des Bentonit-Granulates zu untersuchen. Gemäss prognostischer Berechnungen wurde für die Dauer der Aufsättigung ein Jahr angesetzt. Stattdessen hat die Aufsättigungsphase aber von 2002 bis 2007 gedauert, was mit der verzögerten Benetzung der Bentonit-Granulatkörner zusammenhängen dürfte. Der totale Druck stieg dabei auf bis zu 2.5 MPa, was tiefer als erwartet war. Dies ist auf die heterogene und zu geringe Trockendichte des Bentonit-Granulats zu Beginn des Experimentes zurückzuführen. Die Entwicklung der Quelldrücke in der Bentonitverfüllung wurde mit 8 Druckzellen beobachtet. Von insgesamt 82 installierten Sensoren (28 Temperatursensoren PT100, 8 Gesamtdrucksensoren Gekon 4810, 20 Porenwasserdrucksensoren Keller PA23, 10 Verschiebungssensoren und Extensometern Gekon A-5-4450, 16 relative Feuchtigkeitssensoren Vaisala HMP-235 oder Rotronic) sind über diesen Beobachtungszeitraum 5 Sensoren (Feuchtigkeitssensoren) ausgefallen. Alle Druck- und Temperatursensoren sind funktionstüchtig geblieben, es wurde über die 9 Jahre Beobachtungsdauer keine Drift in den Messungen festgestellt. Mit den Verschiebungssensoren wurde in Folge der Quellprozesse im Bentonit eine Hebung des Dummy-Kanisters um 10 mm beobachtet.

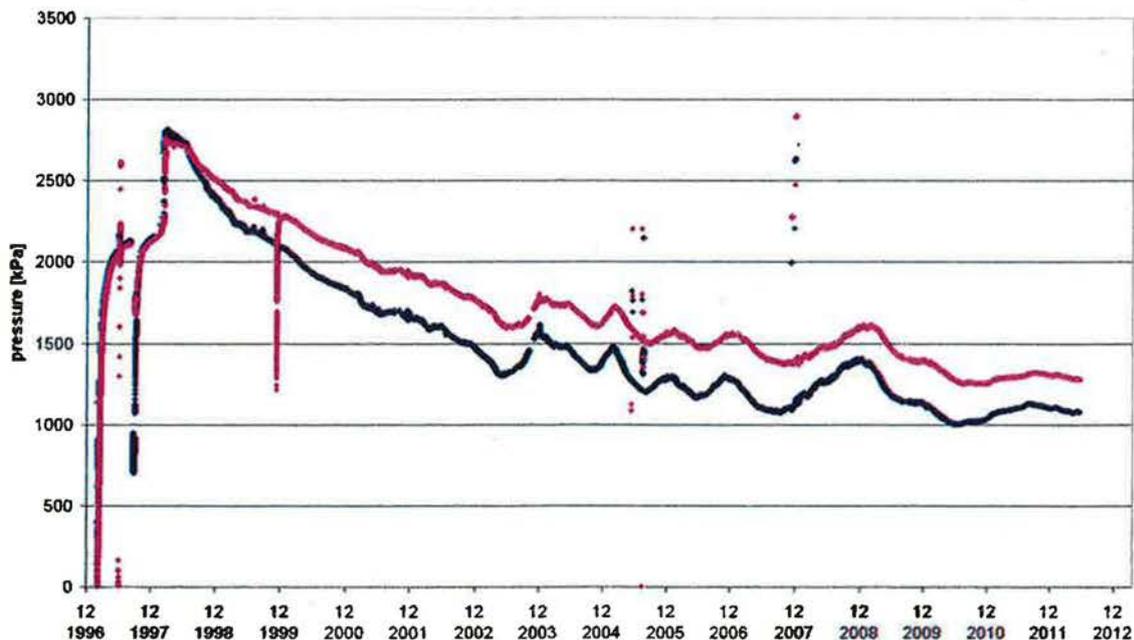


**Klassifizierung:** Intern  
**Aktenzeichen/Publidocs:** 33KRM.MON / ENSI 33/412  
**Titel:** Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
**Datum / Sachbearbeiter:** 06.03.2015 [REDACTED]

**Long-term Monitoring Experiment (LP):** Dieses Experiment wird für die Beobachtung der Langzeitentwicklung des Porenwasserdruckes genutzt und läuft seit 1996. Mit Hilfe der Datenreihen sollen die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges erfasst und der Einfluss der Auflockerungszone, d. h. mechanischer Prozesse, auf die Porenwasserdrücke analysiert werden. Die Sensoren sind an der Stollenwand installiert und stehen über Schläuche mit dem Porenwasser in den Testabschnitten des Bohrlochs in Verbindung. Damit sind die Sensoren keinen ungünstigen geochemischen und mechanischen Bedingungen ausgesetzt und können einfach ersetzt werden.

Insgesamt wurden im Felslabor Mont Terri über 100 Drucksensoren installiert, wovon bisher 3 Sensoren durch unerklärte technische Defekte ausfielen. Figur 13 zeigt die Ergebnisse der Langzeitmessung der Porenwasserdrücke im Bohrloch BPP von 1996 bis 2012.

**BPP (Int1 blue and Int2 red) February 1997 - May 2012**



**Figur 13:** Langzeitmessung der Porenwasserdrücke in der Bohrung BPP von 1996 bis 2012. Die Graphik zeigt den Einfluss des Baus der Gallerie-98 auf die Porenwasserdrücke mit einem abrupten Anstieg der Porenwasserdrücke infolge der Spannungumlagerungen beim Vortrieb der Gallerie-98 und der damit verbundenen hydraulisch-mechanischen Prozesse. In den Folgejahren fällt der Porenwasserdruck weiterhin kontinuierlich ab, was zeigt, dass man immer noch im hydraulisch gestörten Bereich der Auflockerungszone ist. Jährliche periodische Schwankungen zeigen atmosphärische bzw. jahreszeitliche Klimaeinflüsse. (Quelle: swisstopo)

Aus den Ergebnissen des LP-Experiments kann gefolgert werden, dass man bei Drucksensoren mit einer Funktionsfähigkeit von deutlich mehr als einer Dekade ausgehen kann. Die Sensoren wurden dabei alle 3-5 Jahre kalibriert. Die Kalibrationen zeigen, dass die Drift der Sensoren sehr klein ist und die Kalibration theoretisch nur alle 10 bis 15 Jahre durchgeführt werden müsste.

Die Messzeitreihen wurden ferner mittels spezieller Fourier-Methoden auf mögliche Gezeiten-Einflüsse analysiert, um daraus Rückschlüsse über hydraulische Gebirgseigenschaften wie z. B. den Speicherkoeffizienten ziehen zu können.



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/PubliDocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

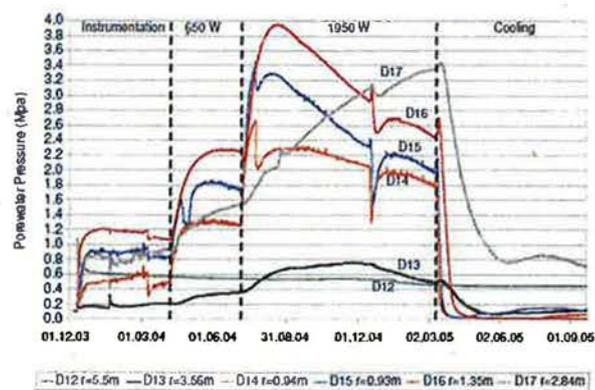
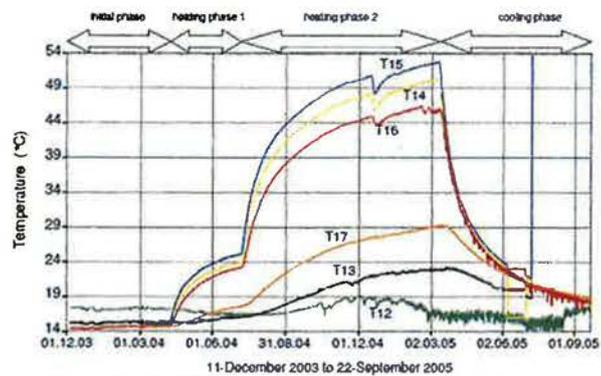
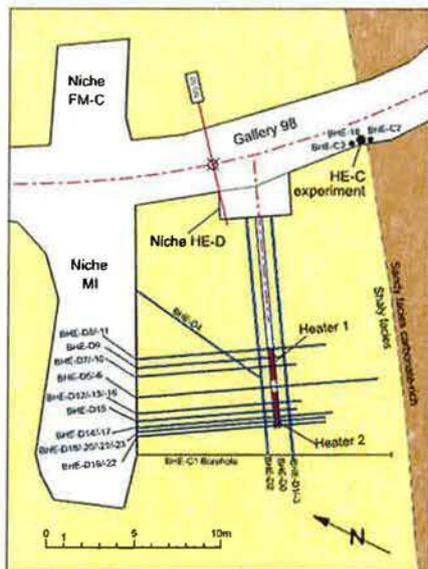
**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015

**Heater Experiment (HE-B, HE-C, HE-D):** Ziel dieser Heizexperimente war die Untersuchung T-H-M-gekoppelter Prozesse im Opalinuston. Zur Erfassung der Temperatur wurden in den Beobachtungsbohrungen drei verschiedene Typen von Sensoren verwendet:

- Thermoelemente Watlow-Gordon Typ AF4 (-200 to +350 °C), bimettallisch,
- Temperatur-Sensor PT100 und PT1000 (-100 to +400 °C), Platin Widerstandsgeber
- FBG (Fiber Bragg Gratings, optical fibers).

Beim Heizexperiment HE-B sind von den 33 eingesetzten Sensoren 15 ausgefallen. Bei den Ausfällen handelt es sich hauptsächlich um die bimettallischen und korrosionsempfindlichen Watlow-Gordon-Thermoelemente.

Bei den Experimenten HE-C und HE-D (Figur 14) wurden PT100- und PT1000-Sensoren sowie zwei Fiber Bragg Grating-Ketten zu je 7 Sensoren verwendet, die sich als deutlich robuster und als weniger korrosionsanfällig im Vergleich zu den Thermoelementen erwiesen haben. Nach der Entnahme der Thermoelemente waren an nicht-rostfreien metallischen Teilen der Sensoren deutliche Korrosionsschäden zu erkennen. Die in Drucksensoren integrierten Temperatursensoren erwiesen sich hingegen als gut geschützt und daher bezüglich Korrosion als wenig anfällig.



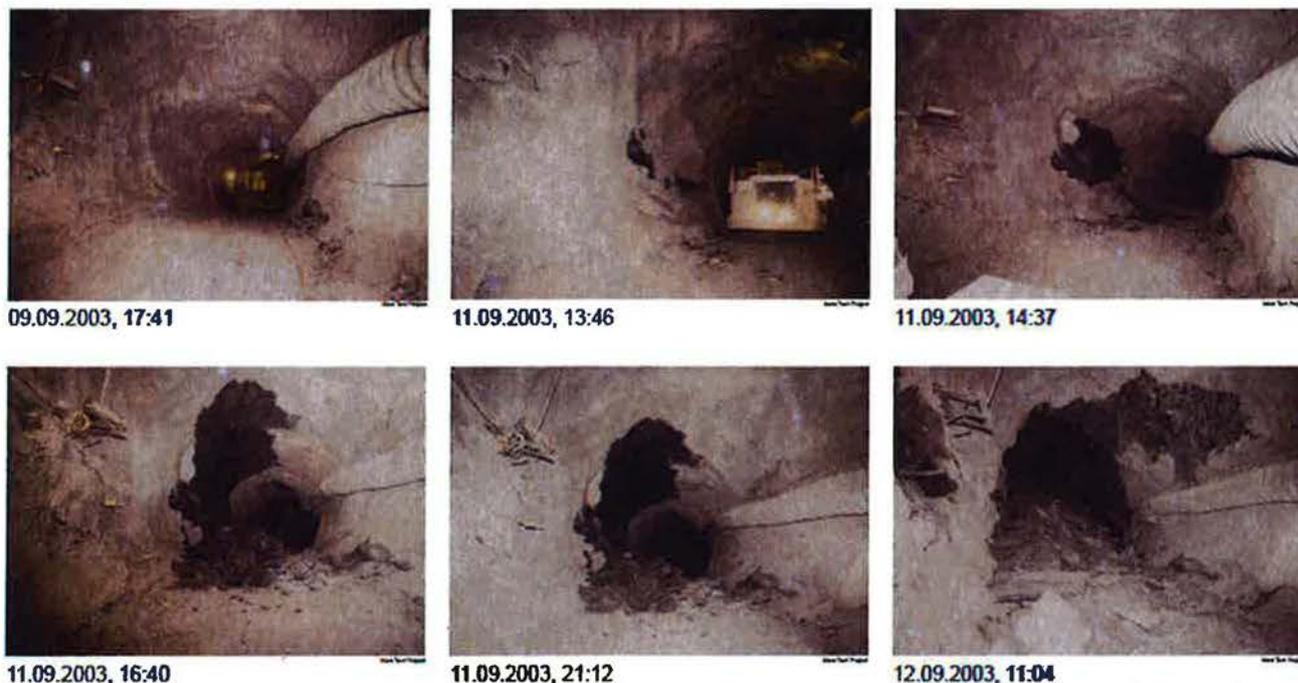
**Figur 14:** Das Bild links zeigt das Layout des HE-D Heizexperiments (horizontale Zentralbohrung mit zwei Heizelementen und darum angeordnet ein Set von Beobachtungsbohrungen). Im Bild rechts ist die Temperaturentwicklung und der Verlauf der Porenwasserdrücke in den Beobachtungsbohrungen dargestellt (Quelle: swisstopo).



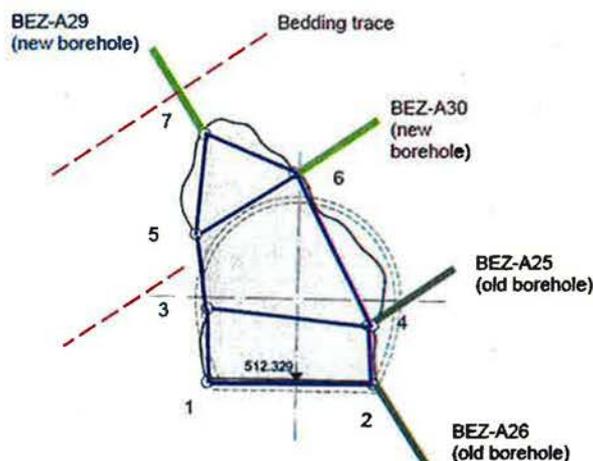
**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/PubliDocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]

**EDZ cut off Experiment (EZ-A):** In der im Jahre 2003 von einem Niederbruch betroffenen EZ-A Nische (siehe Figur 15) wurden 9 Oberflächen-Stangen-Extensometer und 4 Bohrloch-Extensometer installiert (Figur 16). Damit wurde über 10 Jahre die Deformation der Stollenwand beobachtet. Die Stollenwand wurde mit langen Ankern, Netzen und faserverstärktem Spritzbeton gesichert und mehrmals renoviert. Auch nach 10 Jahren sind die Deformationen noch nicht ganz abgeklungen (mm-Bereich). In dieser Zeit ist keiner der Sensoren ausgefallen.



**Figur 15:** Bildsequenz der Niederbrüche in der EZ-A Nische vom 9.9. bis 12.9.2003 (Quelle: swisstopo).



**Figur 16:** Beobachtung der Verformungen in der EZ-A Nische mittels 13 Extensometern (in blau 9 Stangen-Extensometer, in hell und dunkelgrün 4 Bohrloch-Extensometer (Quelle: swisstopo).



<b>Klassifizierung:</b>	<b>Intern</b>
Aktenzeichen/Publidocs:	33KRM.MON / ENSI 33/412
Titel:	Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“
Datum / Sachbearbeiter:	06.03.2015 [REDACTED]

**Geophysical monitoring experiment (GM-A):** Das Ziel dieses Experiments war die Entwicklung und Erprobung von nicht-destruktiven Monitoring-Methoden, um z. B. gesteinsphysikalische und hydraulische Änderungen (z. B. Aufsättigung) zu messen. Dazu wurde die Methode der seismischen Tomographie genutzt. Das Experiment hat gezeigt, dass eine nicht-destruktive Beobachtung der Aufsättigung grundsätzlich möglich ist. Dafür werden Geschwindigkeitsunterschiede seismischer Wellen in Abhängigkeit von der Wassersättigung genutzt. Allerdings müssen die Sensoren sehr nah am Beobachtungsziel platziert werden. Damit besteht die Gefahr, dass die Sensoren im Einflussbereich der Auflockerungszone liegen. Bisher wurde nur eine mässige räumliche Auflösung von maximal 0,6 bis 0,9 m erreicht. Hier besteht Verbesserungsbedarf. Methodische Weiterentwicklungen wie z. B. die „elastic full waveform inversion“ könnten in Zukunft eine höhere Auflösung ermöglichen (Manukyan et al. 2012).

### Schlussfolgerungen der Erfahrungen aus dem Felslabor Mont Terri

Zusammenfassend können aus den Langzeitexperimenten im Felslabor Mont Terri zu den eingesetzten Messtechniken und Sensoren folgende Schlüsse gezogen werden:

- *Verlorene versus externe Sensoren:* Die Installation der Sensoren kann „vor Ort“ (d. h. innerhalb des Experimentes selbst) oder „extern“ (d. h. ausserhalb in Beobachtungsbohrungen) erfolgen. Für vor Ort eingebaute (sogenannte „verlorene“) Sensoren ist kein Unterhalt oder Ersatz möglich. Sie sind der Korrosion ausgesetzt und sollten daher möglichst vollständig versiegelt eingebaut werden. Verwendet werden bei Langzeitexperimenten vor allem externe Sensoren, die unterhalten und ersetzt werden können.
- *Sensorausfälle:* Im Mont Terri sind die meisten Sensoren extern installiert. Diese funktionieren zu 99 % über mindestens 10 Jahre und können relativ einfach ausgetauscht und ersetzt werden. Für Sensorausfälle ist häufig der Übergang vom Sensor zum Kabel kritisch. So waren Kupfer-Nickel-legierte Kabelüberzüge bereits nach 5 Jahren beinahe vollständig korrodiert. Hier ist daher ein an die in-situ-Bedingungen angepasster Schutz notwendig.

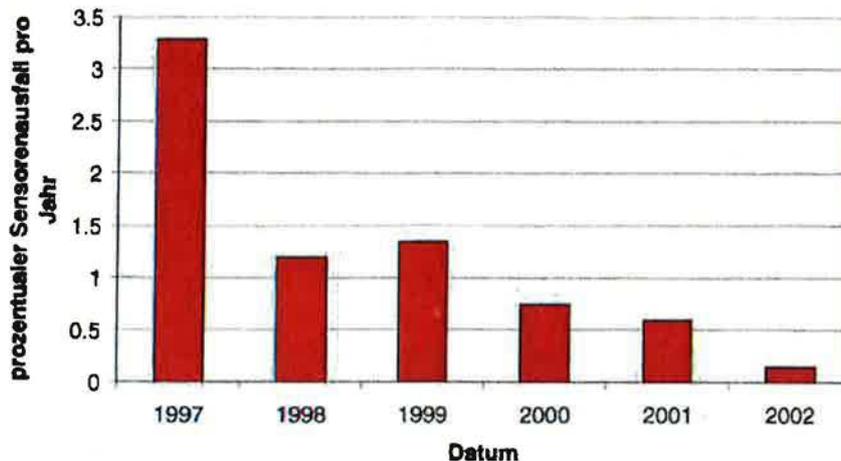
Bei den bisherigen Experimenten hat sich generell gezeigt, dass eine schlechte Ankopplung, undichte Intervalle und defekte Strom- und Datenkabel häufiger die Ursache für den Sensorausfall sind als Sensordefekte selbst. Lücken in den Datenreihen entstehen vornehmlich aufgrund von Fehlern im Datenerfassungssystem. Die Qualitätskontrolle und der Unterhalt sind hier deshalb besonders wichtig.

Weitere Erfahrungen zur Beständigkeit von Sensoren liefert uns das internationale EU-Demonstrationsexperiment FEBEX (Full Scale Engineered Barrier Experiment, Projektleitung ENRESA Spanien) im Felslabor Grimsel, welches 1996 gestartet wurde (Nagra Technischer Bericht NTB 04-28). Es handelt sich um ein Heizexperiment, wo das Verhalten von HAA (simuliert mit Heizkörpern) und von Bentonit in einem 1:1-Lagerstollen untersucht wurden. Im Experiment wurden insgesamt 670 Sensoren eingebaut, mit welchen die Aufsättigung im Bentonit, der Porenwasserdruck, die totale Spannung, die Temperatur und die Deformation sowohl in den technischen Barrieren wie auch im umgebenden Gestein gemessen wurden. Figur 17 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Sensorausfälle über den Zeitraum von 1997 bis 2002.



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publicdocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]



**Figur 17:** Häufigkeitsverteilung der Sensorausfälle im FEBEX-Experiment im Zeitraum von 1997 – 2002 (aus NIB 04-28).

Der prozentuale Anteil der Sensorausfälle lag zu Beginn des FEBEX-Experimentes bei 3,3 % und nahm deutlich bis auf 0,2 % im sechsten Jahr ab. Nach dem teilweisen Rückbau des Experimentes in den darauf folgenden Jahren lag die Gesamtbilanz aller Sensorausfälle bei 7,3 %, wobei nahezu die Hälfte der Ausfälle die Feuchtigkeitssensoren (Psychrometer und kapazitive Sensoren) betraf.

- *Drift, Alterung und Stabilität:* Aus den bisherigen Erfahrungen mit verschiedenen Sensoren ergibt sich, dass eine Messwertdrift bei bi-metallischen und piezoresistiven Temperatursensoren nicht signifikant ist. Drucksensoren können bei hohem Druck (>25 bar) hingegen eine Messwertdrift aufweisen.
- Zu *Glasfasertechnologie* und *-sensoren* (BOTDA & FBG) gibt es aus dem Felslabor Mont Terri noch keine grossen Erfahrungen. Im MO- und vor allem im neuen FE-Experiment (Full scale Emplacement Experiment) wurde eine grosse Anzahl solcher Sensoren installiert. Wie Beispiele aus anderen Anwendungsgebieten zeigen (z. B. Überwachung von Staudämmen, Strassen- und Eisenbahnbauwerken oder anderen Infrastrukturanlagen) können Glasfasersensoren über mehrere Dekaden funktionieren.

Zur Frage, welche sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter zeitlich und räumlich in und um ein künftiges Pilotlager herum zu erfassen sind, können aus den Experimenten und Erfahrungen des Felslabors Mont Terri erste Schlüsse gezogen werden:

- Während des Baus eines geologischen Tiefenlagers sind es hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse, induziert durch den Bau und dadurch hervorgerufene Spannungsumlagerungen im Gebirge. Die Folge davon sind Deformationen und Änderungen des Porenwasserdruckes im Opalinuston. Es entsteht die sogenannte Auflockerungszone oder EDZ (Excavation Disturbed Zone) um den Stollen herum. Zu erfassende Parameter sind Porenwasserdrücke, Deformation und Verformungen, totale Spannungen und geochemische Parameter der Porenwässer (Salinität, Eh, pH, etc.).
- Mit der Einlagerung der HAA-Abfälle und dem Verschluss bzw. der Versiegelung des Lagerstollens beginnt der Wärmeeintrag der Abfälle ins Nah- und Fernfeld des Lagers. Damit werden



**Klassifizierung:**  
Aktenzeichen/Publidocs:  
Titel:  
Datum / Sachbearbeiter:

**Intern**  
33KRM.MON / ENSI 33/412  
Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und –einrichtungen“  
06.03.2015 / [REDACTED]

thermo-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelte Prozesse wichtig. Zu erfassende Parameter sind Temperatur, Porenwasserdruck, Wassersättigung des Bentonites und Entwicklung der Quelldrücke, totale Spannungsmagnituden, Deformation und Konsolidierung des Gebirges, Korrosionsraten (evtl. mit Beobachtung der Wasserstoffentwicklung) sowie Parameter für die Bestimmung der geochemischen Bedingungen (inkl. mikrobielle Aktivität). Die bisherigen Erfahrungen im Felslabor Mont Terri zeigen, dass geochemische Messmethoden sehr aufwändig und daher noch nicht überall für kontinuierliche Langzeitmessungen einsetzbar sind.

- Zu prüfen wären auch Gradienten-Messungen mit glasfaseroptischen Methoden, da in der transienten Phase der Lagerentwicklung im Nahfeld relativ hohe Temperatur- und Druckgradienten existieren, welche schon bei geringen Distanzen zwischen zwei Messpunkten zu deutlichen Messsignalen führen dürften. So könnte man z. B. mit einer Messauslegung von Glasfasersensoren entlang eines Lagerstollens die Temperaturverteilung erfassen und den Temperaturgradient relativ gut abbilden.

## 4 Folgerungen und Ausblick

Mit dem MoDeRn-Projekt wurden systematisch und umfassend konzeptuelle Grundlagen und Strategien zum Monitoring eines geologischen Tiefenlagers erarbeitet und die heute vorliegenden technischen Möglichkeiten aufgezeigt (state-of-the-art). Neue technische Entwicklungen wurden anhand von Demonstrationsexperimenten getestet, ihre Anwendung für das Monitoring an Fallbeispielen erprobt und der Bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dargelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein zuverlässiges Monitoring eines geologischen Tiefenlagers über lange Zeiträume mit einer Vielzahl verschiedener redundant und diversitär ausgelegter Messsysteme grundsätzlich möglich ist.

In einer nächsten Stufe, d. h. in einer Fortsetzung des Agneb-Monitoring-Projektes von 2016 bis 2017, sollen die Ergebnisse des EU-MoDeRn-Projektes hinsichtlich des schweizerischen Pilotlager-Konzeptes diskutiert und das Monitoring eines Pilotlagers an einem Fallbeispiel (HAA-Lager) konkretisiert werden. Da das Forschungsprojekt „Monitoringkonzept und –einrichtungen“ eng mit den beiden anderen Forschungsprojekten „Lagerauslegung“ und „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ verknüpft ist, sollen die Schlussergebnissen dieser beiden Projekte, die in der ersten Hälfte 2015 erwartet werden, ausgewertet und in die Überlegungen zum Monitoring mit einbezogen werden.

Für die Auslegung und Umsetzung des Monitorings eines HAA-Pilotlagers sollen im Rahmen von Expertenbefragungen folgende Aspekte diskutiert werden:

- a) Umweltüberwachung vor Beginn von Untertagearbeiten (Bau Felslabor), d.h. Erfassen der ungestörten Umweltbedingungen (Base Line Conditions = Nullmessung): Evaluation des Umfanges, der Parameterwahl und des Zeitbedarfs für dieses Monitoring.
- b) Monitoring des HAA-Pilotlagers
  - Lage, Anordnung und Auslegung des HAA-Pilotlagers bezüglich Hauptlager. Dazu gehört die Sichtung der Modelliererergebnisse zu den Prozessen im HAA-Haupt- und Pilotlager (z. B. aus dem DECOVALEX-Projekt und ENSI-eigenen Rechnungen) und Klären der Frage, bis zu welcher Distanz das Hauptlager Einfluss auf das Pilotlager haben kann (thermisch, mechanisch, hydraulisch). Diese Frage ist wichtig bei der Platzierung des Pilotlagers, das räumlich und hydraulisch getrennt vom Hauptlager platziert werden muss (u. a. ausserhalb von Einflüssen der EDZ des Hauptlagers).
  - Inventar des HAA-Pilotlagers (Quellterm für Prozessverständnis und Modellierarbeiten)



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publidocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

- Prozesse im HAA-Pilotlager und dessen Umfeld (zeitlich/räumlich) und Ableitung der zu erfassenden Parameter
- Evaluation eines Monitoring-Konzeptes für das HAA-Pilotlager und für die Testbereiche im Felslabor
- Festlegung der Aufgaben und Zielsetzungen an das Monitoring bei der schrittweisen Realisierung eines HAA-Tiefenlagers (was – wann – wo – wie – warum messen) für das Pilotlager und die Testbereiche (Felslabor)
- Diskussion der technischen Anforderungen an das Monitoring (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Langzeitbeständigkeit, ....)
- Evaluation geeigneter robuster Monitoring-Messsysteme (redundant, diversitär, ...)

Das Fallbeispiel zum HAA-Pilotlager soll aufzeigen, ob Handlungsbedarf für weitere Forschungsarbeiten besteht und ob die Richtlinie ENSI-G03 bezüglich der regulatorischen Vorgaben und Anforderungen an das Monitoring eines Pilotlagers erweitert und ergänzt werden muss.

Parallel dazu sollen die internationalen Projektarbeiten zum Thema „Monitoring“ weiterverfolgt und begleitet werden (im Rahmen des IGD-TP Exchange Forums und des „EU-Framework Programmes for Research and Innovation HORIZON 2020“). Nützlich wäre auch ein Einblick in nationale Monitoring-Programme (z. B. Finnland mit dem HAA-Tiefenlagerprojekt in Olkiluoto oder Frankreich mit dem Cigéo-HAA-Tiefenlagerprojekt), da diese beiden Länder bei der Lagerrealisierung weit fortgeschritten sind und das Monitoring für die ersten Schritte der Lagerentwicklung bereits umgesetzt wurde.

Das MO-Experiment von ENSI, swisstopo und ANDRA soll im Felslabor Mont Terri weitergeführt und der Forschungsbedarf für weitere Experimente zu Monitoring-Techniken abgeklärt werden. Zu klären sind unter anderem Fragen zur Energieversorgung der Sensoren, zur Robustheit und Stabilität der Sensoren und zur Datenübertragung.

Wegen der umfangreichen ENSI-Prüfarbeiten zu Etappe 2 des Sachplanverfahrens geologischer Tiefenlager werden die Arbeiten zum Monitoring-Forschungsprojekt erst 2016 wieder aufgenommen werden.

## Referenzen

- BFE (2009): Agneb-Forschungsprogramm radioaktive Abfälle, Bundesamt für Energie, Bern
- EU (2004): Thematic Network on the role of monitoring in a phased approach to geological disposal of radioactive waste - Final Report, EUR 21025
- EU (2013): The EU Framework Programme for Research and Innovation HORIZON 2020
- EURATOM (2013): Work Programme 2014 - 2015
- ENSI (2009): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. ENSI, Richtlinie ENSI-G03, Brugg
- ENSI (2010): Projektplan zum Agneb-Forschungsprojekt "Monitoringkonzept und -einrichtungen", Aktennotiz ENSI 33/84, Brugg
- ENSI (2015): ENSI-Forschungsplan 2015 - 2018; ENSI-AN-9103



**Klassifizierung:** Intern  
Aktenzeichen/Publicdocs: 33KRM.MON / ENSI 33/412  
Titel: Zwischenbericht zum Agneb-Forschungsprojekt  
„Monitoringkonzept und -einrichtungen“  
Datum / Sachbearbeiter: 06.03.2015 / [REDACTED]

- IAEA (2001): Monitoring of Geological Repositories for High-Level Radioactive Waste. IAEA TECDOC 1208
- ICRP (2013): Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 122 Ann. ICRP 42(3)
- IGD-TP (2011): Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform "Strategic Research Agenda 2011"
- IGD-TP (2014): Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform "Master Deployment Plan and Joint Activities Outlines 2014"
- KEG: Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, Schweiz, SR 732.1
- KEV: Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004, Schweiz, SR 732.11
- Manukyan, E., Latzel S., Maurer H., Marelli S. and Greenhalgh S. (2012): Exploitation of data-information content in elastic-waveform inversions. Geophysics, 77, R105-R115
- NEA (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International FEP Database, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France
- NEA (2003): Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media, Report NEA No. 4437, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France
- NEA (2011): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel. Report No. NEA/RVM/R (2011)4
- NIB 04-28 (2005): Projekt Opalinuston - Konzept der Untersuchungen im Test- und Pilotlager sowie der untertägigen Anlagenüberwachung. Nagra Interner Bericht, März 2005
- MoDeRn (2013) „MoDeRn Monitoring Reference Framework Report“, November 2013
- MoDeRn (2014) "Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis", January 2014
- MoDeRn (2011-2014): Deliverables of the results of the working packages WP 1-6, WEB-Site [www.modern-fp7.eu](http://www.modern-fp7.eu)
- Swisstopo (2012, 2013, 2014): Technical Meetings TM-30, TM-31 and TM-32, ppt-Presentations of preliminary Results of Mont Terri Experiments (interne Daten der Mont Terri Projektpartner).
- Swisstopo (2012, 2015): ppt-Präsentationen von P. Bossart und D. Jäggi zu den Monitoring-Erfahrungen im Felslabor Mont Terri im Rahmen des Projektes „Auslegung und Inventar des Pilotlagers“ und im Rahmen der Umsetzungsgruppe Agneb-Forschungsprojekt „Radioaktive Abfälle“.

# **MO Experiment**

## **Preparation of technology for long-term Monitoring**

## Experiment description

### *Title and abbreviation of experiment*

**Preparation of technology for long-term monitoring**

**MO**

### *Aim of experiment*

- 1) **Elaboration of a monitoring concept**
- 2) **Demonstration experiments** in the Mont Terri rock laboratory on
  - Different optic fiber materials and their effects on ageing
  - Application of energy management and conversion techniques.
  - Data transmission in the context of wireless sensor techniques

### *Concept of experiment*

The first aim (elaboration of a monitoring concept) is lead by ENSI, who started a project in 2010, in the framework of the "Regulatorische Sicherheitsforschung". This project is mainly carried out with the experts of the Swiss Confederation. Especially the questions, which parameters have to be measured, how often (frequency) and over what time period, are addressed in this project.

Demonstration experiments with different materials, data transmission and energy management & conversion have to start now in order to provide a mature technology, when the pilot repository will be constructed. Ageing effects on the long-term can be studied on different materials (such as fibre optic cables, pressure and temperature sensors, thermo-electric generators, etc.), which are installed in a backfilled borehole and are subjected to natural conditions in the Mont Terri underground rock laboratory.

The present concept consists of an 5 m deep borehole (178 mm) which is equipped with a heater at its bottom. 4 different types of fiber Bragg granting (FBG) sensors and 3 conventional optical fibers from telecom industry are inserted into the borehole and conventional temperature and pore pressure probes installed at several locations along the borehole. For the saturation of the system a stainless steel filter screen is inserted. Then the whole system is backfilled with a bentonite/sand mixture and at the well head a packer is placed in order to seal the whole system towards the gallery. The system will be saturated with artificial pore water (APW) and monitored. Monitoring consists of permanently monitoring the FBG's (discrete method) and periodically monitoring the standard optical fibers with a leased OTDR-device (continuous method).

Furthermore lab tests are carried out at Swiss Federal Institute for Material Science (EMPA) on chemical, mechanical and optical properties on three identical sets of cables (BOTDA and FBG). The first reference set will be tested at the beginning of the experiment. The second set is stored in a thermally stabilized box during the whole length of the experiment and analyzed after the monitoring period of 5 years. The third set, the downhole set, will be dismantled after the 5 years monitoring period and tested as well. This concept allows for evaluating the real ageing effects on the cable coatings under realistic conditions of optic fibers burried in a borehole of the potential host rock formation. The findings are then the basis for the construction of more ageing-resistant materials.

### *Programme*

#### **Phase 17 (till - June 2012): instrumentation, start of monitoring**

**Step 01:** Drilling of a new borehole at the intersection of niche-TT and Ga08 in March 2012

**Step 02:** Installation of optical fibers with heater, monitoring sensors, sand/bentonite backfill

**Step 03:** Installation of data acquisition system

**Step 04:** Start of long-term monitoring. Permanent sensing of travel times in FBG's and periodical OTDR-

sensing on standard optical fibers. (evaluation of physical effect of Raman and the scattering of Brillouin) due to changing temperatures, rising porewater pressures in the backfill and ageing of the different types of cables

**Phase 18-22 (July 2012- June 2016): long-term monitoring**

**Step 05:** Long-term monitoring, regular measurements of travel times and signals in transmission and reflection in optic fibre cables and recording of probable signal-changes. FBG-cables will be monitored permanently with a sampling interval of lets say 3 hours, BOTDA cables are measured 4 times a year with a leased OTDR-device form ETH/marmota.

**Phase 23 (from July 2016 on)**

**Step 06:** Test evaluation, recommendations for modification & improvement of monitoring equipment. Continued in the following test phases.

**Step 07:** Based on the results of the test evaluation after 5 years, the dismantling will be carried out in Phase 23 or later. Dismantling includes lab analyses of the retrieved sensors and elements at EMPA.

**List of boreholes for Phase 18**

- No additional borehole is foreseen for this Phase, borehole BMO-1 will be drilled in March 2012 already.

**List of test and measuring equipment**

- At least four autonomous measurements per year with the BOTDA interrogator from ETH/marmota.
- DAS of FBG, packer control unit and heating system is connected to SAGD of ANDRA.
- Temporary Geomonitoring system for saturation phases (pressure vessel and balance)

**Test locations**

- Test equipment is located at intersection of niche TT and Ga08.

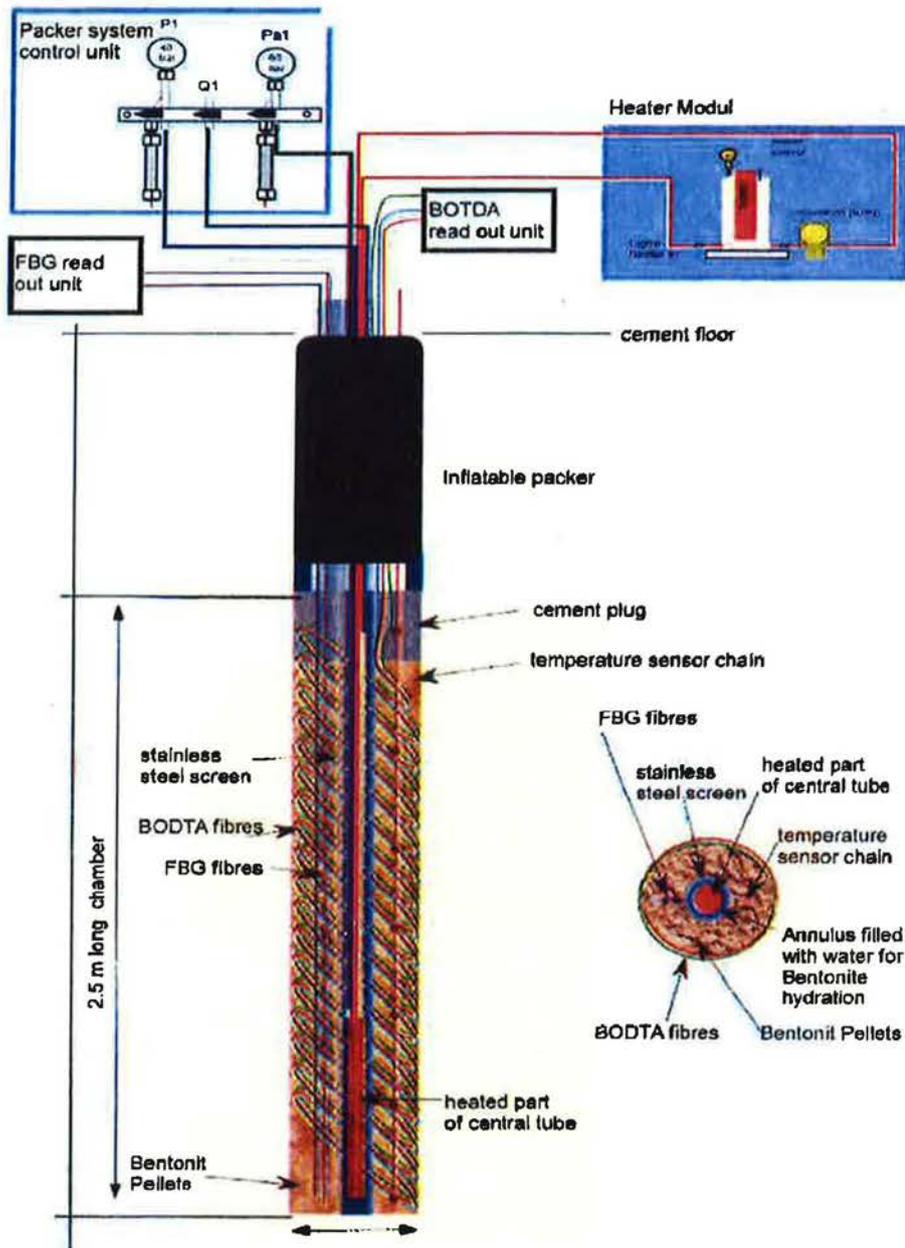
**References, available reports:**

Jaeggi, D. , 2011: MO Experiment (Preparation of technology for long-term Monitoring) Preliminary design and test plan, Mont Terri Technical Note, TN2011-52:

Iten, M. and Fischli, F., 2012: Temperature calibration test of fiber optic sensors for MO-project, internal report 2012-S4-R1, marmota

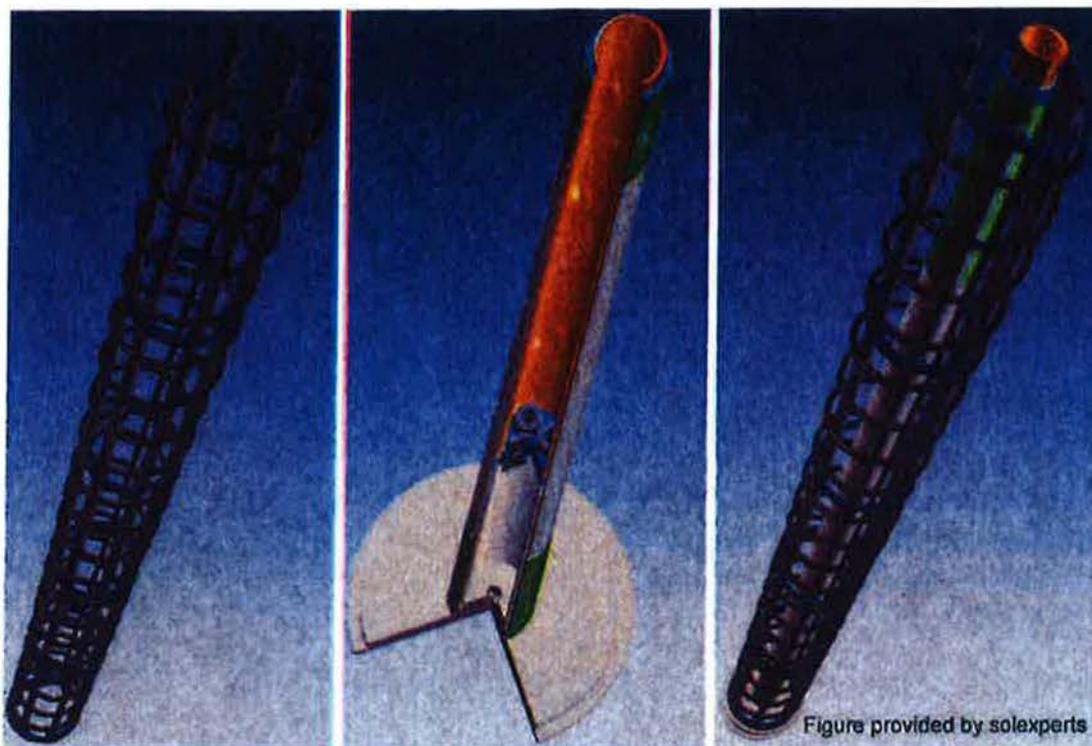
Iten, M., Fischli, F. and Jaeggi, D., 2013: MO Experiment: Long-term evaluation of borehole-embedded fiber-optic temperature sensors and concept for recalibration, Mont Terri Technical Note TN2013-78

## Design of MO experiment (1/2)



**Figure 1:** Optical fibers are installed in a borehole (178 mm), at bottom a heater is placed. The borehole is instrumented with observation sensors (pressure, temperature), then backfilled with granular bentonite/sand mixture, including a low ph cement plug at its top and closed with a packer at the borehole mouth. Then the backfill is saturated artificially with artificial pore water (APW). After installation the travel times in the diverse optic fiber cables are measured at the surface in order to derive the effect of Raman and the scattering of Brillouin on each cable. (figure provided by solexperts)

## Design of MO experiment (2/2)



**Figure 2:** Specific design with a PVC-basket with the wired BOTDA cables on it and the FBG-sensors at the inner side (left image), the central tube with the saturation filter screens in green and the heating chamber at the bottom (middle image), the whole system assembled (right image).

### Time schedule of experiment programme

Phase 18 starts on 1 July 2012 and ends on 30 June 2013

Experiment	20 12				20 13				20 14	
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
<b>Monitoring (MO)</b>	Phase 17		Phase 18				Phase 19			
Drilling Campaigns:	■									
<b>Steps (Phase 17):</b>										
Step 01: Drilling of a new borehole BMO-1	■									
Step 02: Installation of downhole equipment		■								
Step 03: Installation of data acquisition system (DAS)			■							
Step 04: Saturation and heating up in four steps				■						
Step 05: Long-term monitoring (5 years)					■	■	■	■	■	■
Step 06: Test evaluation (from Phase 23 on)										
Step 07: Dismantling and testing material properties (from Phase 23 on)										

Monitoring Geological Disposal of Radioactive Waste – MoDeRn-Conference Luxembourg, 19-21. March 2013

### **Monitoring requirements in the Swiss regulatory framework**

Ann-Kathrin Leuz, Bastian Graupner, Erik Frank, Markus Hugi, Meinert Rahn

Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI, Switzerland

#### **1. Introduction**

The Swiss expert advisory group (EKRA) concluded in its study in 2000<sup>[1]</sup> that, based on the current knowledge, passively safe geological disposal is the only method for isolating radioactive waste which meets the requirement for long-term safety over geological time scales (i.e. for high-level waste up to more than 100'000 years). The disposal concept shall be based on a combination of engineered and natural safety barriers which ensure long-term isolation of the waste. In order to take into account societal demands from the public for controllability and retrievability of the waste, EKRA has developed the concept of monitored long-term geological disposal, which combines passive safety with a period of monitoring and the possibility of retrievability without undue effort during the emplacement phase and monitoring phase until final closure of the repository.

#### **1. Repository concept and regulatory framework**

According to the concept of monitored long-term geological disposal, the deep geological repository system comprises the following three elements (see figure 1): a) *main facility* for the emplacement of the radioactive waste, b) *pilot facility* for monitoring repository system behaviour and for demonstrating compliance with safety requirements, c) *test areas* (underground rock laboratory with several test areas) for investigating safety-relevant properties of the host rock or the engineered barriers to support the safety case or for demonstrating the correct functioning of required technologies (e.g. for emplacing the backfill material, for retrieving waste packages and for sealing of caverns and tunnels).

The proposed EKRA concept of monitored long-term geological disposal was included in the Nuclear Energy Act of 2003<sup>[2]</sup>. The Nuclear Energy Act, the Nuclear Energy Ordinance<sup>[3]</sup> and the guideline (ENSI-G03)<sup>[4]</sup> specify in more detail the requirements for monitored geological disposal.

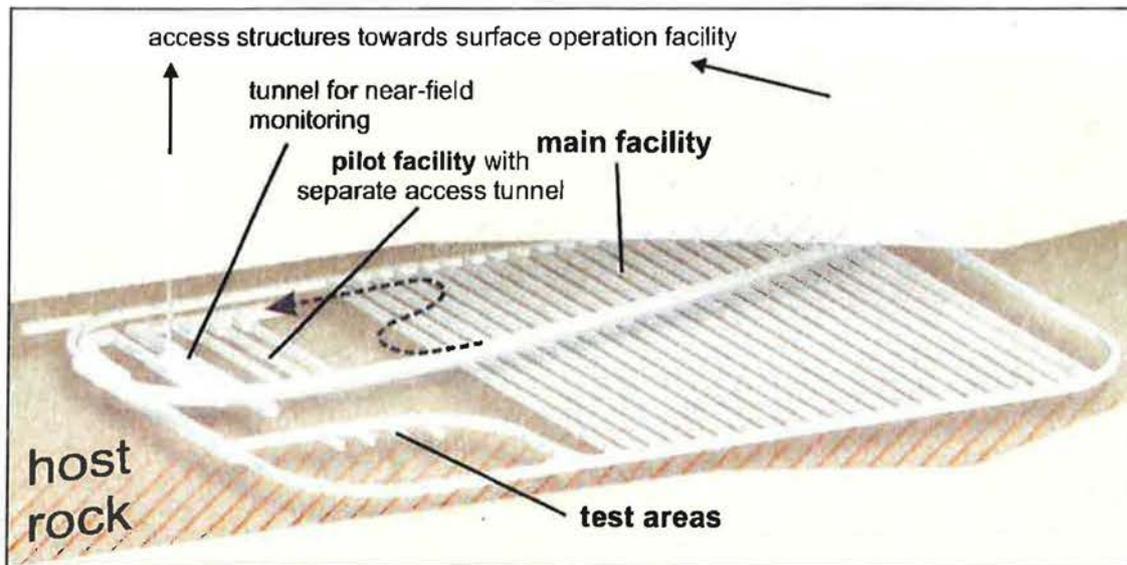


Figure 1: System elements of a monitored geological repository: main facility, test areas and pilot facility.

According to the regulatory framework the *test areas* are self-contained parts of the geological repository, where the safety-relevant properties of the host rock or the engineered barriers as well as the degradation behaviour of materials can be investigated in detail in order to support the safety case, or where required technologies (e.g. for emplacing the backfill material, for retrieving waste packages and for sealing of caverns, tunnels and shafts) can be developed, tested and their correct functioning be demonstrated.

The *pilot facility* is a self-contained part of a deep geological repository that is separated from the main facility and is used to monitor the behaviour of the entire barrier system up to the end of the monitoring phase. The main purpose of the monitoring programme of the pilot facility is to provide information on the conditions, processes and effectiveness of the installed barrier system, to confirm compliance with the safety requirements and to allow for early identification of any unexpected developments.

## 2. Phases of repository implementation

According to the Swiss Nuclear Energy Act and the Nuclear Energy Ordinance, implementation of a geological disposal facility is a stepwise process over several decades which include the following phases (estimated time needed for each phase of the implementation of a deep geological repository for high-level waste (HLW) is indicated in parentheses)<sup>[5]</sup>:

1. Site selection process based on the sectoral plan for deep geological repositories<sup>[6]</sup> and general licence application for the selected site (~15 years)
2. Pre-construction environmental monitoring phase (baseline conditions) (4 years)

3. Underground exploration phase (rock laboratory for site characterisation) including test areas (15-20 years)
4. Repository construction including pilot facility (~ 6 years)
5. Operation of the disposal facility (first pilot facility / second main facility) (15-20 years)
6. Monitoring phase (post-emplacment/pre-closure observation phase) (50 years)
7. Final closure of the repository (5 years)
8. Post-closure environmental monitoring phase (optional, can be ordered by the government)

The duration of the post-emplacment/pre-closure monitoring phase (7) is not legally fixed yet and will be specified in due time by the competent Swiss Federal Department. To estimate the costs for the Swiss waste management programme, 50 years have been assumed.

The phased implementation process for the geological HLW repository is illustrated in figure 2.

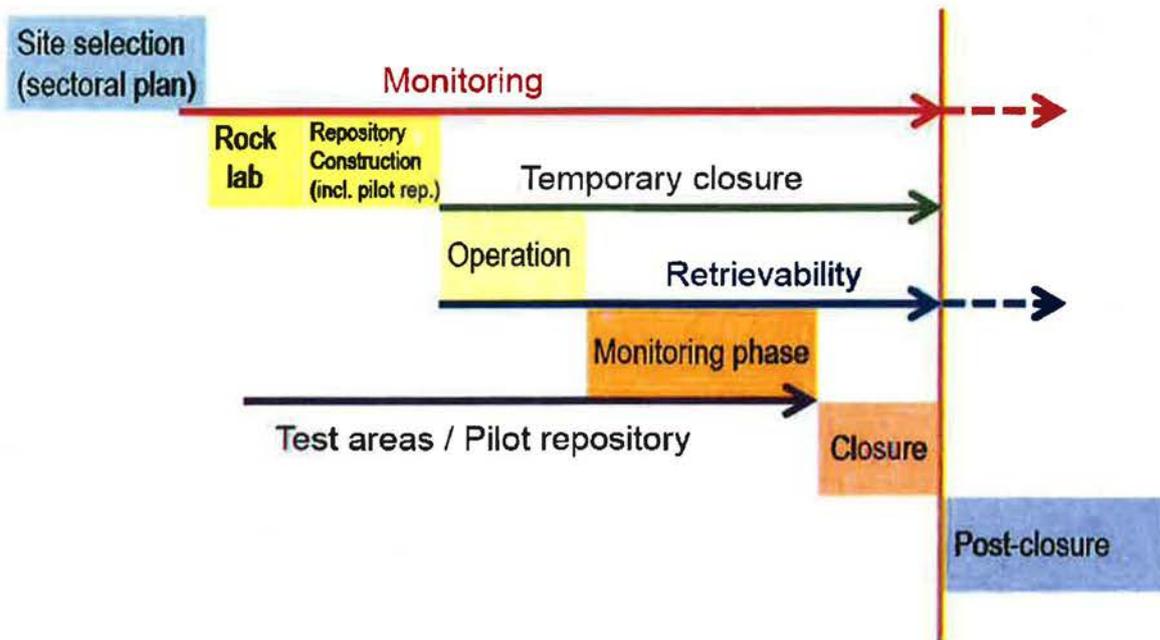


Figure 2: Schematic overview of the phased implementation of a geological HLW repository in Switzerland. For all phases a total duration of >100 years is anticipated up to closure.

### **3. Requirements for the pilot facility**

In the pilot facility, the behaviour of waste, backfill material and host rock must be monitored up to the end of the monitoring phase. During monitoring, data are to be collected to support the safety case with view to repository closure. They form the basis for the decision on final closure of the repository. The following principles must be considered for the design of the pilot facility:

- The geological and hydro-geological conditions must be comparable to those of the main facility.
- The pilot facility must be spatially and hydraulically separated from the main facility.
- The construction of the pilot facility and the emplacement procedure of waste and backfill material must correspond to those of the main facility.
- The pilot facility must contain a small but representative quantity of waste.
- The pilot facility has to be operated and sealed before the start of waste emplacement in the main facility.

The pilot facility has to be operated in such a way that

- the barrier system of the main facility is adequately reproduced and
- the selection of waste packages is representative of the inventory of the main facility.

### **4. Requirements for monitoring**

The monitoring programme for the pilot facility is destined to investigate the time-development of the pilot facility and its geological environment in such a way as to provide information

- on safety-relevant conditions and processes in the pilot facility and its geological environment
- for early recognition of unexpected developments
- on the effectiveness of the barrier system
- to support the confirmation of the safety assessment.

The information must be transferable to the situation in the main facility and its geological environment.

Complementary to the monitoring in connection with the pilot facility and test areas, the Swiss regulatory framework requires further monitoring elements for a deep geological repository:

- The environmental monitoring of a geological repository must be initiated sufficiently early before the start of underground construction to allow reliable data to be collected for the purpose of establishing the baseline of the environmental conditions. Monitoring must continue until the facility is released from the provisions of the nuclear energy legislation. It includes monitoring the radioactivity of springs and groundwater, soils, water bodies and the atmosphere in the area potentially influenced by the repository. The delivery and chemical composition of spring waters also have to be investigated for the purpose of preservation of evidence.
- As a continuation of underground site characterisation, monitoring of the geological environment surrounding the underground structures has to be carried out up to closure. Monitoring has to include, in particular, the hydrogeological conditions, water composition, rock parameters that are relevant for safety and the geometry of excavations. This supplements the geological and hydrogeological databases used for evaluating the long-term evolution of the repository.
- For the operation of a geological repository and its surface facilities, suitable radiological monitoring measures have to demonstrate compliance with the safety requirements. Radiological monitoring has to continue until the facilities are released from the provisions of the nuclear energy legislation.

As a basic requirement, monitoring shall not compromise the passive safety barriers. The suitability of the monitoring programmes has to be checked periodically. The monitoring programmes and their results are to be submitted periodically to the regulatory body for review.

### **5. Regulatory research project**

In autumn 2011, the Swiss regulator has started a project to discuss and investigate issues concerning the pilot facility in more detail. These include

- processes and parameters which can be monitored over decades in a pilot facility
- possible concepts for the design of a pilot facility
- expectations of the public on the monitoring programme of a pilot facility.

The first phase of the project consists of expert hearings on specific questions with respect to a pilot facility. A second step will be scoping calculations of safety relevant processes. In order to evaluate specific requirements for the monitoring of a pilot facility, ENSI will also rely on the results generated by the EU project MoDeRn.

## 6. References

- [1] EKRA (2000), Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle: Schlussbericht, UVEK, Bern, Schweiz, Januar 2000.
- [2] Nuclear Energy Act (2003), Switzerland, March 2003
- [3] Nuclear Energy Ordinance (2004), Switzerland, December 2004
- [4] ENSI-G03 (2009), Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case, Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI, Würenlingen, Switzerland, April 2009
- [5] Nagra (2008), Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht NTB 08-01, Wettingen, 2008.
- [6] SFOE (2008), Sectoral Plan for Deep Geological Repositories Conceptual Part, Swiss Federal Office of Energy SFOE, Bern, Switzerland, April 2008.

**Testing a fiber optic system for long-term monitoring applications under in-situ conditions in the Opalinus Clay of the Mont Terri rock laboratory, Switzerland**

David Jaeggi<sup>(1\*)</sup>, Philippe Tabani<sup>(2)</sup>, Eric Frank<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> swisstopo, Switzerland

<sup>(2)</sup> ANDRA, France

<sup>(3)</sup> ENSI, Switzerland

Host rocks for future nuclear waste repositories need to be monitored before and during construction and over the first decades of operation. Conventional sensors often lack sufficient reliability for long-term monitoring. Furthermore, conventional monitoring systems with densely packed sensors require space and extensive down-hole power supplies. Long-term monitoring in geological disposal sites, requires maintenance-free systems that provide reliable and continued deployment over several decades without intervention. Furthermore, these systems need to withstand different and time-varying environmental conditions within the repository, such as mechanical strain, hydraulic pressure, chemical corrosion, interactions with pore water/host rock, buffer materials, steel containers, elevated temperatures, and radiation levels near the waste material. Fiber optic (FO) monitoring systems, among other techniques, appears to be very promising for fulfilling the high requirements in underground repositories.

In future nuclear waste repositories, FO sensors may play a key role in data transmission of signals from conventional sensors as well as detecting parameters such as temperature, strain, or radiation levels. These FO systems will be installed predominantly in boreholes backfilled with bentonite as buffer material. To provide a tested technology for monitoring any future repository, we initiated a preparatory experiment dealing with the effect of ageing on an FO system at the Mont Terri rock laboratory in 2012. This preparatory experiment (called "MO") tests suitable optic fibers under natural conditions and will be used to evaluate long term (>5 years) ageing effects. Our test design is based on a commercially available fiber optic system wrapped onto a grid and subjected to a heating source. We developed and installed the test device at Mont Terri rock laboratory in a borehole backfilled with bentonite. Three commercially available types of Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) cables and four types of Fiber Bragg Gratings (FBG) sensors together with standard PT1000 sensors are measuring the temperature distribution along a 2.5 m packed-off and heated interval.

Besides monitoring the behavior of frequency shifts and spectra over time, we will dismantle the device at the end of the monitoring period and check ageing effects by directly analyzing material properties in the laboratory. Lab tests on a preliminary cable set have already been carried out at Swiss Federal Laboratories for Materials Science & Technology (EMPA) to evaluate the initial chemical, mechanical, and microscopic properties of the individual cable coatings. An identical second set of devices is stored on site and will be analyzed together with the third down-hole set to compare the long-term ageing effects.