



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Untersuchung zur
Gasfreisetzung und
Wasserumverteilung im
OPALINUS-Ton
des Mont Terri**



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Untersuchung zur
Gasfreisetzung und
Wasserumverteilung
im OPALINUS-Ton
des Mont Terri**

**Beitrag zum Projekt:
„Heater Experiment:
Rock and Bentonite“**

Abschlussbericht

Norbert Jockwer
Klaus Wiczorek

Juli 2002

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02 E 9188 5 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

**GRS - 181
ISBN 3-931995-49-6**

Deskriptoren:

Deponie, Endlagerung, Gasbildung, Langzeitsicherheit, Wasserbelastung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Untersuchungsprogramm der GRS.....	7
3	Installationen im Versuchsfeld	9
3.1	Installation der Bohrungen für die Untersuchung der Gas- und Wasserfreisetzung	9
3.2	Installation des Messsystems für die geoelektrischen Widerstands- messungen zur Ermittlung der Wasserverteilung	12
4	Untersuchungsmethoden.....	15
4.1	Gasprobenahme und Analyse.....	15
4.2	Laboruntersuchungen zur thermischen Gasentwicklung	18
4.3	Geoelektrische Messungen.....	18
4.4	Laboruntersuchungen zur Geoelektrik	20
5	Ergebnisse.....	23
5.1	Messungen zur Gasfreisetzung im Versuchsfeld	23
5.2	Messungen zur Gasfreisetzung im Labor	26
5.3	Geoelektrische Messungen im Versuchsfeld	28
5.4	Geoelektrische Messungen im Labor.....	32
6	Weiterführung des Versuches	35
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	39
8	Literatur.....	41
	Abbildungsverzeichnis.....	43
	Tabellenverzeichnis	45
	Anhang.....	47

1 Einleitung

Im deutschen Endlagerkonzept sind Tone und Tonmineralgemische als Versatz und Verschlussmaterialien für Strecken und Schächte vorgesehen. Für die Langzeitsicherheitsanalyse sind daher Daten zum chemisch-mineralogischen und mechanischen Verhalten dieser Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur von Bedeutung. Weiterhin sollen in Deutschland die Forschungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in anderen Wirtsgesteinformatoren intensiviert, der Stand internationaler Entwicklung verfolgt und die Übertragbarkeit dieser Entwicklungen auf deutsche Endlagerkonzepte überprüft werden.

In der Schweiz wird seit einigen Jahren die Eignung der Opalinus-Tonsteinformation als Endlagerwirtsgestein erkundet. Nahe St. Ursanne wurde hierzu parallel zum Mt. Terri-Autobahntunnel ein Untertagelabor im Tonstein errichtet. Ein Konsortium aus internationalen Endlagerorganisationen und –einrichtungen (siehe Abb. 1-1) führt hier Eignungsuntersuchungen im Rahmen des Mt. Terri-Projektes durch. Als wichtigste der z. Z. im Mt. Terri-Labor betriebenen Experimente wären das Engineered Barriers Experiment (EB) zur Eignungsuntersuchung von Bentonitbarrieren sowie das Heater Experiment (HE) zur Untersuchung der Auswirkung der Wärmefreisetzung auf das gekoppelte mechanische und hydraulische Verhalten von Versatzmaterial (Buffer) und Gebirge zu nennen /SNHGS/.

Bereits seit 1999 ist die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) als Unterauftragnehmer der spanischen Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A. (ENRESA) am HE-Experiment mit Untersuchungen zur Gasfreisetzung und Fluidverteilung im Gebirge beteiligt. Neben der ENRESA, die die Projektleitung während der Phase 1 des Experimentes (1999 – 2001) wahrgenommen hat, waren die Ingenieurfirma Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN, Spanien) mit der Installation der wesentlichen Komponenten, der Versuchskoordination, der Versuchsdurchführung und der Datenerfassung sowie die Universidad Politécnica de Cataluña (UPC-Barcelona, Spanien) mit der thermo-hydro-mechanischen (THM) Modellierung beteiligt.

Für die Durchführung des Experimentes wurde im Jahre 1998 im Untertagelabor (Abb. 1-2) eine Nische von 5 m Breite und 7 m Länge angelegt. In dieser Nische

Mont Terri Project Organisation

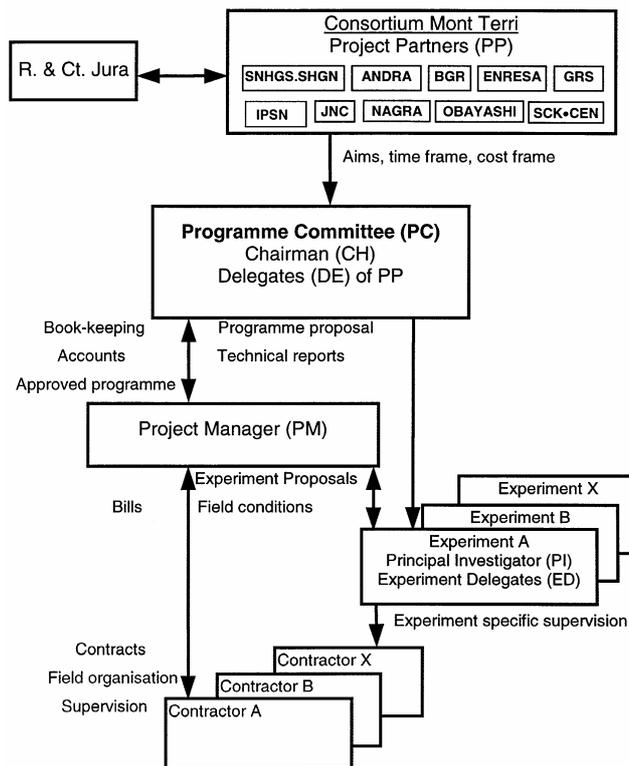


Abb. 1-1: Organigramm des Mt. Terri-Projektes

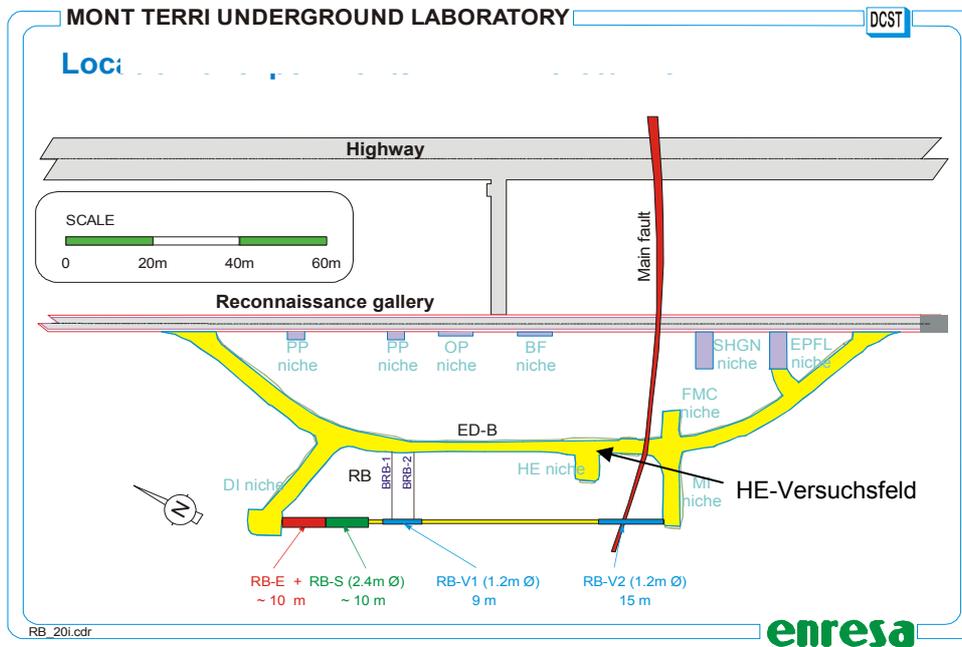


Abb. 1-2: Grundriss des Mt. Terri Untertagelabors

(HE-Versuchsfeld) wurden in einem zentralen Bohrloch von 7 m Tiefe und 30 cm Durchmesser in 4 bis 6 m Tiefe elektrische Erhitzer mit einem Durchmesser von 10 cm eingebaut, die das umliegende Gebirge bis auf 100 °C und eventuell in einer späteren Versuchsphase bis auf 150 °C aufheizen. Der 10 cm breite verbleibende Ringraum zwischen Erhitzer und Gebirge von 10 cm ist mit hochkompaktierten Bentonitformsteinen verfüllt worden. Im Erhitzerbohrloch und in weiteren 20 Untersuchungsbohrungen sollen

- die Temperaturverteilung (Wärmeleitfähigkeit)
- der Gebirgsdruck
- der Fluiddruck im Porenraum (Gas und Wasser)
- die Gas- und Wasserfreisetzung
- der Wassergehalt im Porenraum
- die Korrosion von Behälterwerkstoffen und
- die Gebirgsbewegung

während der Versuchsdauer in der Bohrlochverfüllung und im umgebenden Gebirge ermittelt werden.

Die Bohrarbeiten im Versuchsfeld sowie die Installation der Messkomponenten und der Datenerfassungsanlage wurden im ersten Halbjahr 1999 durchgeführt. Die Flutung der Bentonitverfüllung im Ringspalt zwischen den Erhitzern und dem Gebirge wurde im Mai 1999 begonnen und dauert z. Z. noch an. Die Messungen der thermischen, hydraulischen und mechanischen Parameter und der elektrischen Leitfähigkeiten im Gebirge und in der Bentonitverfüllung sowie die Messungen zur Gasfreisetzung aus dem Gebirge werden seit Juni 1999 durchgeführt.

Der ursprünglich für das 4. Quartal 1999 vorgesehene Beginn der Aufheizung wurde aus verschiedenen Gründen mehrfach verschoben und hat bis Ende 2001 noch nicht stattgefunden.

Zunächst ergaben sich technische Schwierigkeiten mit dem Erhitzersystem, dann folgten Probleme bei der Aufsättigung des Buffer-Bentonits im Bohrlochringspalt. Ferner ergaben sich im HE-Versuchsfeld gegenüber anderen Versuchsorten überraschend niedrige Werte für die Porendrücke im Gebirge. Diese Diskrepanz sollte nach gemeinsamer Ansicht aller Projektpartner vor Einschalten der Erhitzer geklärt werden. An der

Universidad Politécnica de Cataluña (UPC-Barcelona) wurden daher Modellrechnungen durchgeführt, um den Einfluss der Versuchsfelderstellung, der Bohrlöcher und der Instrumentierung auf den Gebirgs- und Fluiddruck abzuschätzen. In die Analyse wurden die aktuellen Ergebnisse der von der GRS durchgeführten Untersuchungen einbezogen. Die Arbeiten wurden Ende 2001 abgeschlossen und haben ergeben, dass unter den angenommenen geologischen und physikalischen Randbedingungen die Versuchsfelderstellung und Instrumentierung keinen signifikanten Einfluss auf den Fluiddruck im Porenraum des Gebirges haben /VEL01/. Nach diesen Ergebnissen wurde die Firma Solexperts beauftragt, an zwei speziell für diesen Zweck erstellten Untersuchungsbohrungen (BHE 19 und BHE 20 in Abb. 3-1) Messungen zur Permeabilität und Porosität des Tongesteins im Versuchsfeld durchzuführen. Diese Messungen wurden im Februar 2002 abgeschlossen; die Erhitzer werden daraufhin am 22. Februar 2002 eingeschaltet.

In der 2. Phase des HE- Experiments (HE-B), die vom 1. Januar 2002 bis 31. Dezember 2004 dauern wird, sollen dann die Untersuchungen zur Gasfreisetzung und zur geoelektrischen Erfassung der zeitlichen und örtlichen Veränderung der Wasserverteilung im Versuchsfeld unter den physiko-chemischen und thermo-hydro-mechanischen Randbedingungen eines potentiellen Endlagers durchgeführt werden.

In diesem Bericht werden die Arbeiten zur Versuchsfelderstellung, der Instrumentierung der Messkomponenten, die Messungen mit den Ergebnissen zur Gasfreisetzung und zur elektrischen Widerstandsverteilung im nicht aufgeheizten Gebirge sowie die Laboruntersuchungen zur thermischen Gasfreisetzung dargestellt.

Das HE-B-Experiment ist im 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union zur Förderung (Kennzeichen FIS5-2001 00024) eingereicht und von der EU mit einem Anteil von 50 % zum 01. November bewilligt worden. Die für diesen Antrag notwendigen Unterlagen wurden im Rahmen der 1. Phase des HE-Versuches zusammengestellt.

Neben der GRS und den zuvor erwähnten Partnern ENRESA, AITEMIN und UPC beteiligen sich in der 2. Phase des Versuches zusätzlich:

- die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) mit der Projektkoordination sowie mit gebirgsmechanischen Untersuchungen an Tonproben (Bohrkernen) aus dem Versuchsfeld unter den potentiellen Randbedingungen eines Endlagers im Ton (Temperatur, Wassergehalt, Formations- und Fluiddruck),

- die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, Schweiz) nach Versuchsende mit der Freilegung des Versuchsfeldes, der Rückgewinnung der Messkomponenten sowie der Gewinnung von repräsentativen Proben für weitere Untersuchungen,
- die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ, Schweiz) mit Untersuchungen zur mineralogischen und gebirgsmechanischen Veränderung des aus dem Versuchsfeld gewonnenen Tongesteins.

2 **Untersuchungsprogramm der GRS**

Der HE-Versuch zur Untersuchung des thermo-hydro-mechanischen Verhaltens des Opalinus-Tons wurde von ENRESA unter der Mitwirkung von Universidad Politécnica de Cataluña (UPC-Barcelona) und der Ingenieurfirma AITEMIN geplant und installiert. GRS untersucht in diesem Versuch im Nahfeld des Erhitzers

- die Gasentwicklung und –freisetzung und
- die Wasserumverteilung,

die jeweils durch Labormessungen ergänzt werden.

Das für diese Messungen notwendige Konzept, die Versuchskomponenten und deren Installation wurden in Abstimmung mit den übrigen Versuchspartnern und dem Betreiber des Untertagelabors von GRS entwickelt und umgesetzt. Die In-situ- und Labormessungen werden ebenfalls von GRS vorgenommen.

3 Installationen im Versuchsfeld

Die Versuchsfeldnische, wie sie in Abb. 3-1 dargestellt ist, wurde 1998 angelegt. Die zentrale Erhitzerbohrung BHE 0 sowie die Untersuchungsbohrungen BHE 1 bis BHE 18 wurden 1999 niedergebracht und instrumentiert. Die Bohrungen BHE 19 und BHE 20 für zusätzliche Porendruck- und Permeabilitätsmessungen durch die Firma Solexperts wurden 2001 erstellt /FUE 98/.

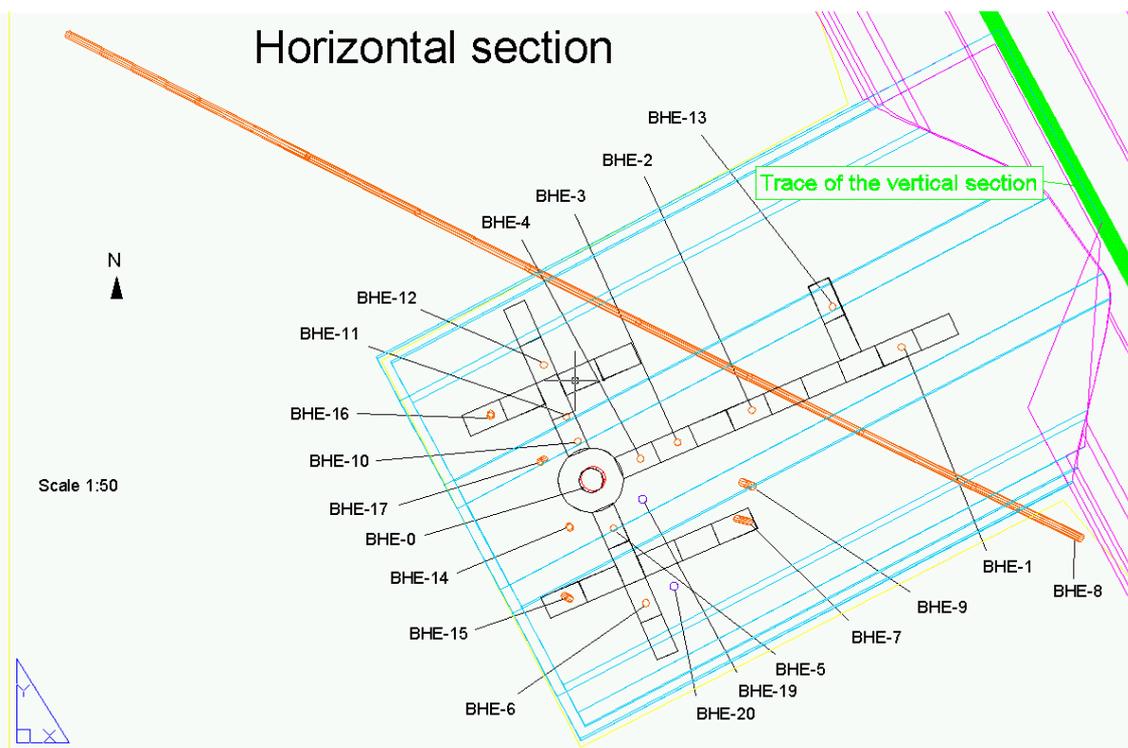


Abb. 3-1: Grundriss der HE-Versuchsfeldnische mit der zentralen Erhitzerbohrung und den Untersuchungsbohrungen BHE 1 bis BHE 20

3.1 Installation der Bohrungen für die Untersuchung der Gas- und Wasserfreisetzung

Für die Ermittlung der Gas- und Wasserfreisetzung wurden im Mai 1999 die Bohrungen BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13 mit einem Abstand zum zentralen Erhitzerbohrloch von 0,50 bis 3,64 m, einem Durchmesser von 86 mm und einer Tiefe von 7,00 m von der Firma Coreis angelegt. Der Abstand zum Zentrum wurde variiert, um einerseits im nicht aufgeheizten Zustand die Gasfreisetzung in einem größeren Bereich und an-

derseits im aufgeheizten Zustand den Einfluss der sich einstellenden unterschiedlichen Temperatur zu ermitteln.

Unmittelbar nach der Erstellung wurden die Bohrlöcher bis auf einen Bereich von 1,00 m im Tiefsten mit speziell bei der GRS entwickelten hydraulischen Packern gegenüber dem Versuchsfeld dicht verschlossen. Zur Gasprobenahme führen drei Edelstahlkapillaren von einer Ventilstation im Versuchsfeld durch das Bohrloch und den Packer in drei unterschiedliche Niveaus des abgeschlossenen Volumens. Ein zusätzlich an den Edelstahlkörper des Packers gasdicht angeschweißtes Caissonrohr verhindert einerseits, dass das Messvolumen im zu beprobenden Bereich kollabiert. Andererseits kann bei geflutetem Bohrloch ein Gaspolster über der Wasserphase aufgebaut werden und somit können für die Ermittlung der Gleichgewichtspartialdrücke in der Gasphase und der gelösten Gase in der Wasserphase Gas- und Wasserproben genommen werden.

Um das Gebirge im Versuchsfeld durch die Bohrungen nicht unnötig zu stören, wurden diese oberhalb der Packer in vier Schritten verfüllt:

1. 0,15 m spezielles Gießharz (Sikadur 52), das sich mit dem umliegenden Gebirge verbindet und als zusätzliches Dichtelement dient.
2. 0,50 m Tonpulver aus der Bohrlöcherstellung. In diese Tonverfüllung wurde von ANDRA ein elektrischer Feuchtesensor eingebaut, um während der Versuchsdauer die Feuchtigkeit im freien Porenraum zu ermitteln.
3. 0,20 m spezielles Gießharz als Feuchtesperre zwischen dem Tonpulver und der darüber eingebrachten Betonverfüllung.
4. verbleibende ca. 4,35 m mit einem speziell von AITEMIN entwickelten plastischen Beton.

Der Aufbau des Packers mit den Probenahmekapillaren und der Bohrlochverfüllung ist in Abb. 3-2 dargestellt.

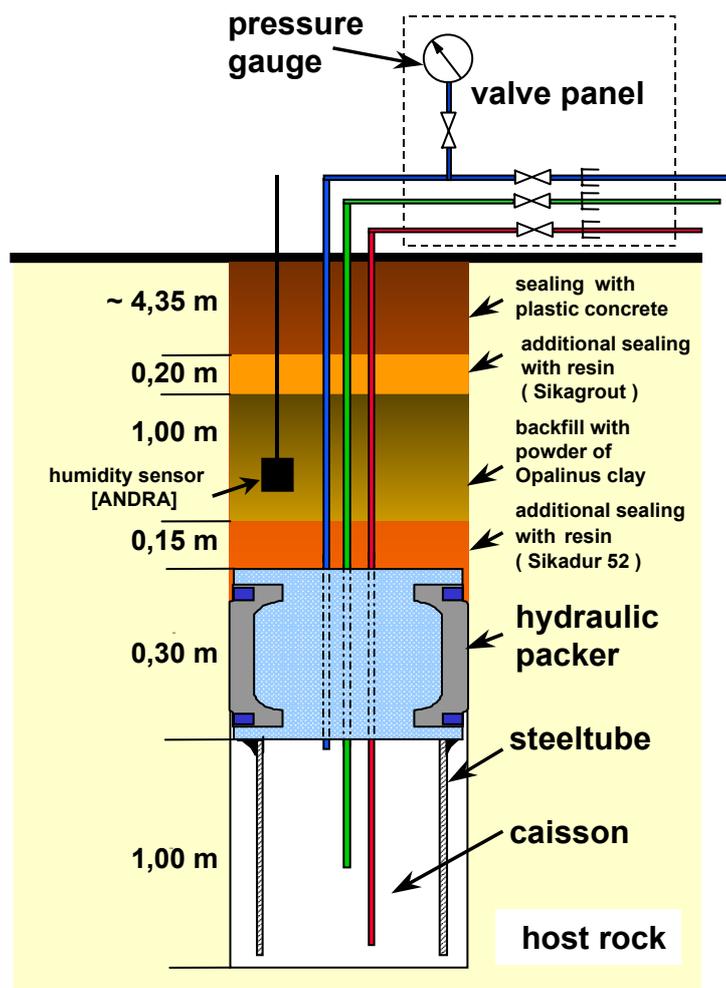


Abb. 3-2: Auslegung der Gasprobenahmebohrlöcher BHE 10 bis BHE 13 mit dem hydraulischen Packer, den Kapillaren zu Gas- und Wasserprobenahme und der Bohrlochverfüllung

Die drei Edelstahlkapillaren eines jeden Packers führen durch das verfüllte Bohrloch und abgedeckte Kabelkanäle zu einer Ventilstation am Stoß der Versuchsnische. An dieser Ventilstation können über Schnellkupplungen Gasproben genommen, die Messvolumina mit Inertgas beaufschlagt und über analog-anzeigende Manometer die Drücke in den Messvolumina erfasst werden. Die Ventilstation ist in Abb. 3-3 dargestellt.

Nach der Installation der Bohrlochpacker und der Ventilstation wurden auf die Messvolumina der vier Bohrlöcher mit Luft ein Überdruck von 0,1 bar aufgegeben und die Ventile geschlossen, um die Dichtheit der Systeme zu testen. Bis zur ersten Gasprobe-

nahme nach 30 Tagen ergab sich in den vier Messvolumina kein Druckabfall, so dass die Systeme als dicht angesehen werden können. Die Messvolumina wurden nicht zusätzlich mit Inertgas gespült, d. h. die Messungen zur Gasfreisetzung aus dem nicht aufgeheizten Gebirge begannen in Luft als Matrixgas.

Im Detail ist die Installation der Bohrungen BHE 10 bis BHE 13 und die Installation der Ventilstation in /JOC 01/ beschrieben.

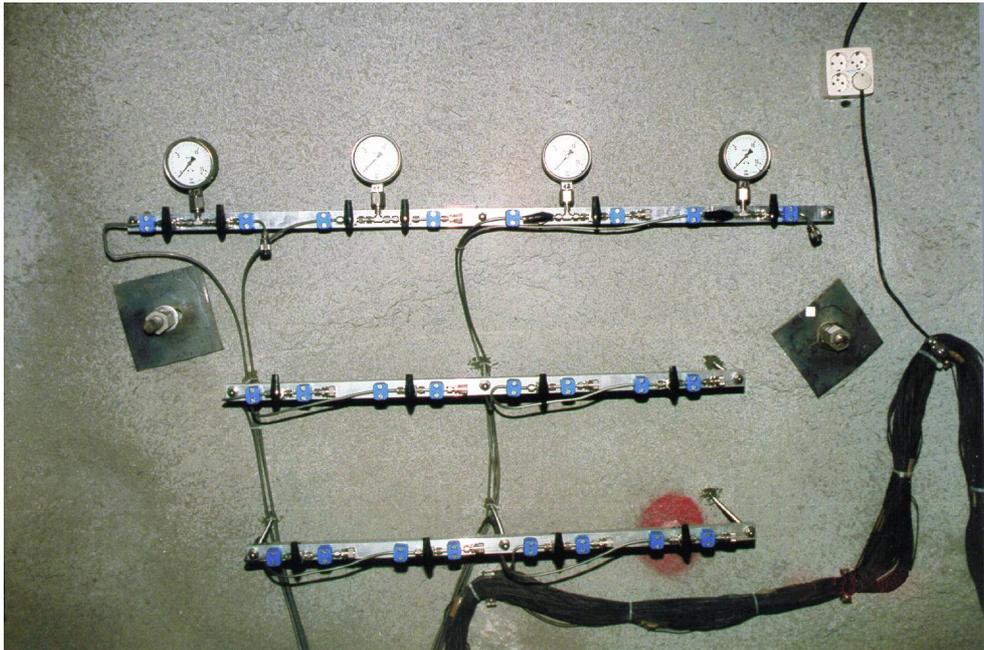


Abb. 3-3: Ventilstation zur die Gasprobenahme aus den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE 13

3.2 Installation des Messsystems für die geoelektrischen Widerstandsmessungen zur Ermittlung der Wasserverteilung

Zur Ermittlung des Wassergehaltes im Gebirge und der sich bei der Aufheizung ergebenden Wasserumverteilung wurden im Mai 1999 die vier Bohrlöcher BHE 14 bis BHE 17 mit einem Durchmesser von 86 mm und einer Tiefe von 8,00 m parallel zum zentralen Erhitzerbohrloch angelegt (siehe hierzu Abb. 3-1). Unmittelbar nach der Erstellung wurden in die Bohrlöcher je 33 Elektroden im Abstand von 25 cm eingebaut und der Restraum der Bohrlöcher anschließend mit einem Spezialbeton, der von

AITEMIN entwickelt wurde, verfüllt. Durch diese Verfüllung wird sichergestellt, dass die Elektroden guten elektrischen Kontakt zum umliegenden Gebirge haben.

Das geoelektrische Messsystem, an das die Elektroden angeschlossen sind, wurde im Versuchsfeld in unmittelbarer Nähe der Bohrlöcher aufgestellt. Es besteht aus einem rechnergesteuerten Mess- und Datenerfassungssystem mit einem Multiplexer und einer externen Spannungsversorgung. Über ein Modem und eine Telefonleitung werden die Daten zur Auswertung zur GRS nach Braunschweig übermittelt.

Im Detail sind die Installation der Elektroden in den Bohrungen BHE 14 bis BHE 17 und das geoelektrische Messsystem in /JOC 01/ beschrieben.

Das Messsystem wurde im Dezember 2001 durch ein anderes System ersetzt, das im Gegensatz zu dem vorher eingesetzten System mit 120 Messkanälen den Anschluss von 240 Elektroden erlaubt. Hintergrund dieses Austausches ist der geplante Ventilationsversuch in Mont Terri, bei dem ebenfalls geoelektrische Messungen durchgeführt werden sollen. Die neu installierte Anlage kann für beide Versuche gleichzeitig eingesetzt werden.

4 Untersuchungsverfahren

4.1 Gasprobenahme und Analyse

Da in den zu beprobenden Bohrungen auch während der Heizphase keine signifikanten Gasüberdrücke zu erwarten sind, erfolgt die Gasprobenahme mit einer für diesen Zweck von der GRS entwickelten Handpumpe (siehe Abb. 4-1). Gleichzeitig werden in dem Gasstrom, der aus dem Bohrloch abgezogen wird, die relative Feuchtigkeit und die Temperatur bestimmt. Der Sensor des Feuchtigkeitsmessgerätes Typ TESTO 650 ist in eine Glasküvette eingebaut, die von dem Probegas durchströmt wird. Die Geräte sind entsprechend Abb. 4-2 zusammengeschaltet und werden am Ventilbrett über die Schnellkupplung auf der Stahlkapillare an das zu beprobende Messvolumen angeschlossen. Vor der Probenahme wird über das Manometer an der Handpumpe der Gasdruck im Messvolumen bestimmt. Nach der Probenahme (ca. 1,0 l) wird dieser Gasdruck mit Stickstoff aus einer Stahlflasche wieder hergestellt. Es wird somit sichergestellt, dass infolge der Probenahme im Porenraum des Versuchsfeldes kein Druckgefälle erzeugt wird. Die Vorgehensweise der Probenahme ist im Detail beschrieben in "GRS Qualitätsmanagement, Prüfanweisung Gasprobenahme und Feuchtigkeitsmessung in den Bohrlöchern BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13 im HE-Versuchsfeld" vom 25. September 1999.

Die in den Linde-Gasbeutel überführten Proben werden zur Analyse in das GRS-Labor nach Braunschweig gesandt. Hier werden mit einer Gasspritze etwa 100 ml aus dem Beutel entnommen und in einen Gaschromatographen injiziert. Der Gaschromatograph besteht aus vier unabhängigen Messkanälen, von dem jeder mit zwei Säulen ausgestattet ist. In einer Vorsäule werden die störenden Komponenten abgetrennt und in einer analytischen Trennsäule werden die interessierenden Komponenten aufgetrennt, die dann in einem nachgeschalteten Detektor erfasst werden. Die Details des Gaschromatographiesystems sind in Tab. 4-1 zusammengefasst. Die Kalibrierungen werden durchgeführt mit kommerziell erhältlichen Prüfgasgemischen einer zertifizierten Genauigkeit von 2 %.

Tab. 4-1: Übersicht über die zur chromatographischen Gasanalyse eingesetzten Systeme

Chromatographischer Kanal	A	B	C	D
Vorsäule	Porapak PS, acetone-washed 1,0 m 80-100 mesh	Porapak T + Molsieb 5 A 1,0 m + 1,0 m 80-100 mesh	Porapak T 1,0 m 80-100 mesh	Porapak 0,5 m 80-100 mesh
Trennsäule	Porapak PS, acetone-washed 2,0 m 80-100 mesh	Molsieb 5 A 1,0 m 80-100 mesh	Molsieb 5A 2,5 m 80-100 mesh	Porapak N 2,5 m 8-100 mesh
Trägergas	N ₂	N ₂	He	N ₂
Detektor	*FPD	*WLD	*WLD	*FID
analysierte Komponenten	H ₂ S, SO ₂	He, H ₂	O ₂ , N ₂	**KW: C ₁ -C ₄ , CO, CO ₂

* FPD: flammenphotometrischer Detektor

* WLD: Wärmeleitfähigkeitsdetektor

* FID: Flammenionisationsdetektor

** KW: Kohlenwasserstoffe (C₁ - C₄ mit ein bis vier Kohlenstoffatomen)

Bei jeder Probenahme, wie sie zuvor beschrieben wurde, werden aus dem abgeschlossenen Messvolumen des Bohrloches (Durchmesser 86 mm, Länge 1,00 m, Volumen 5,8 l) etwa 20 % der Gasmenge entnommen und durch Inertgas (Stickstoff) wieder ersetzt. Die bisherigen Messungen (siehe Kapitel 5.1) haben gezeigt, dass bei der Gebirgstemperatur von ca. 14 °C die Freisetzungsraten der Gase relativ gering sind. Bei häufiger Probenahme (alle 1 bis 3 Monate) wird jeweils das Gleichgewicht gestört und die Gleichgewichtskonzentration kann sich somit nicht aufbauen. Für die weiteren Untersuchungen in Phase 2 (2002 bis 2004) ist daher ein neues Messkonzept ausgearbeitet worden, mit dem die Gasanalyse mit einem im Versuchsfeld installierten Gerät direkt während der Probenahme durchgeführt wird. Mit diesem Gerät werden für die Analyse aus den Messvolumen nur 10 bis 100 ml abgezogen, wodurch der Verdünnungseffekt wesentlich reduziert und eine Verfälschung der Probe durch Überführung in Gasbeutel, Transport und Lagerung ausgeschlossen wird. Bei Fehlmessungen können diese Messungen sofort wiederholt werden.

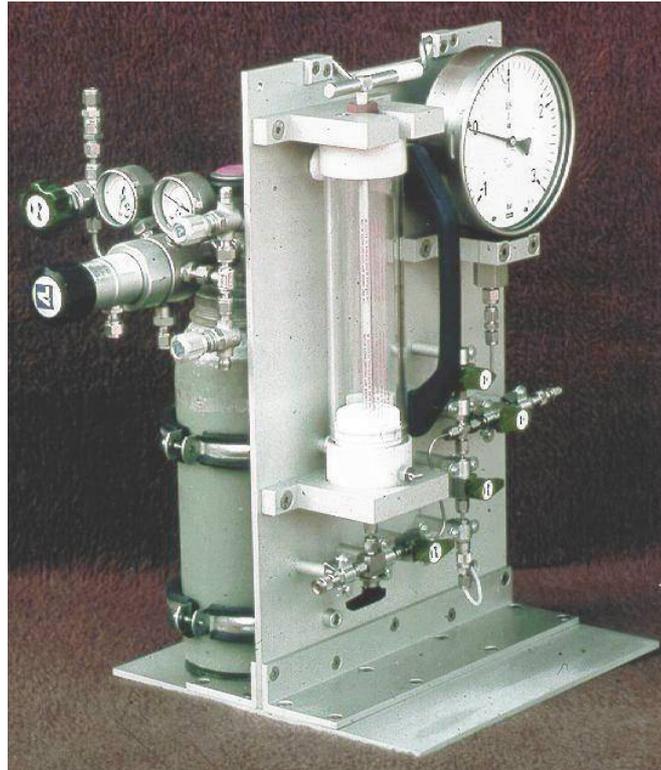


Abb. 4-1: Handpumpe mit Manometer zur Gasprobenahme aus den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE 13

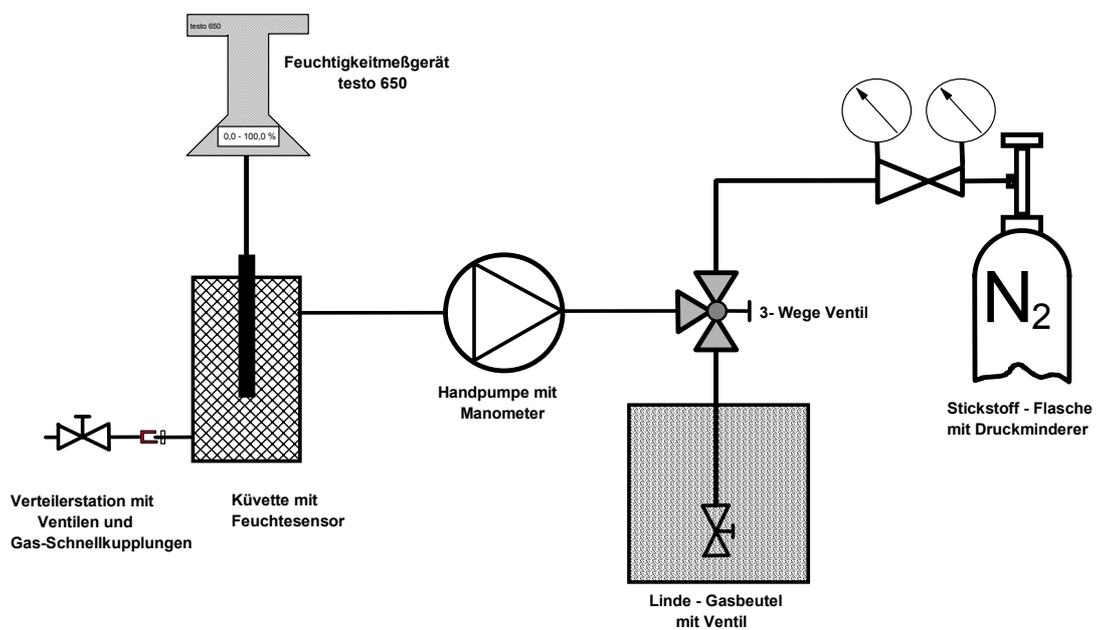


Abb. 4-2: Geräteanordnung zur Probenahme und Feuchtigkeitsbestimmung

4.2 Laboruntersuchungen zur thermischen Gasentwicklung

Im Labor wurden ergänzende Untersuchungen am Opalinus-Ton des Mont Terri durchgeführt, um für die Interpretation der Ergebnisse aus dem Versuchsfeld weitere Angaben zur Gasfreisetzung bereitzustellen.

In gasdicht verschließbare Edelstahlbehälter mit einem Volumen von ca. 2,2 l wurde bei 100 °C die Gaserzeugung und –freisetzung aus dem Tongestein unter zwei verschiedenen Randbedingungen untersucht:

1. In fünf Stahlbehälter wurden ca. 3,2 kg aus Bohrkernen gewonnenes Probenmaterial (Volumen ca. 1,35 l) eingebracht und dicht verschlossen. Das Restvolumen des Behälters enthielt Laborluft. Je ein Behälter wurde dann über 1, 10, 30 bzw. 100 Tage aufgeheizt und anschließend die Gaszusammensetzung im Restraum bestimmt. Ziel dieser Versuchsreihe war die Ermittlung der Gleichgewichtskonzentration der verschiedenen Gase in einem abgeschlossenen Volumen. Zur Annäherung der In-situ-Bedingungen im Entgasungsbehälter wurden eine möglichst große Probenmenge und ein möglichst kleines Restvolumen angestrebt, um Verfälschungen des sich einstellenden Gleichgewichts durch nicht-repräsentative Randbedingungen zu vermeiden.
2. In zwei Stahlbehälter von 3,2 l wurden 11,75 bzw. 10,43 g gewonnen aus Bohrkernen eingebracht und dicht verschlossen. Das Restvolumen enthielt zunächst Laborluft. Die Behälter wurden 24 Stunden auf 100 °C aufgeheizt und dann die Gaszusammensetzung im Restraum bestimmt. Anschließend wurde der Restraum mit Stickstoff gespült und wieder dicht verschlossen, der Behälter erneut 24 Stunden aufgeheizt und die Gaszusammensetzung wieder bestimmt. Dieser Vorgang wurde viermal wiederholt, bis die freigesetzte Gasmenge bis auf weniger als 5 % der ersten abgefallen war. Ziel diese Versuchsreihe war die Ermittlung der maximal freisetzbaren Gasmenge aus dem Tongestein.

4.3 Geoelektrische Messungen

Die geoelektrischen Messungen dienen der Überwachung von Änderungen im Wassergehalt des Gebirges. Dabei wird ausgenutzt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Gesteinen in hohem Maße von ihrem Wassergehalt abhängt.

Die Messungen wurden als Dipol-Dipol-Messungen ausgeführt. Dabei wird ein niederfrequenter Wechselstrom I über zwei Elektroden A und B (der Speisedipol) ins Gebirge eingespeist und die resultierende Potentialdifferenz U zwischen zwei weiteren Elektroden M und N (der Messdipol) gemessen (siehe Abb. 4-3). Wenn alle Elektroden sich in einem homogenen isotropen Vollraum befinden, lässt sich aus dieser Messung die Resistivität ρ des Mediums errechnen als

$$\rho = 4\pi \frac{U}{I} K \quad (1)$$

mit dem Geometriefaktor $K = \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)^{-1}$, wobei die r_{ij} die Abstände zwischen den jeweiligen Elektroden sind /YAR 89/.

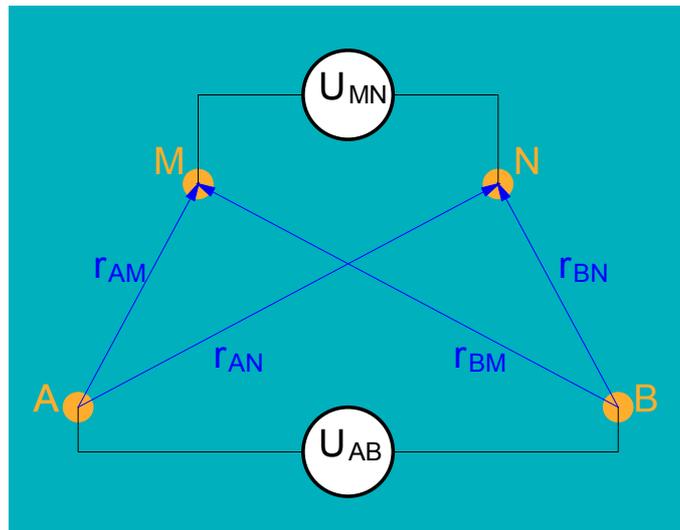


Abb. 4-3: Prinzip der geoelektrischen Vierpunktmessung

Da das zu untersuchende Gebirge im Allgemeinen keine homogene Resistivität aufweist, erhält man bei einer Einzelmessung aus der obigen Gleichung nur die sog. scheinbare Resistivität, die im Falle einer homogenen Resistivitätsverteilung die gleiche Potentialdifferenz ergeben würde. Um die tatsächliche Resistivitätsverteilung näherungsweise zu bestimmen, wird durch Variation des Speise- und des Messdipols eine Vielzahl von Einzelmessungen durchgeführt und durch Finite-Differenzen- oder Finite-Element-Modellierung ausgewertet, wobei die Abweichung zwischen den Messwerten und den für das aktuelle Modell berechneten Spannungswerte iterativ minimiert wird.

Diese Vorgehensweise wird auch als geoelektrische Tomografie bezeichnet. Das üblicherweise verwendete Verfahren zur Korrektur des Modells ist die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik (SIRT) oder eine Variante davon. Diese benutzen die sog. Sensitivität (partielle Ableitung des Potentials nach der Resistivität) zur Entscheidung, wie stark der Resistivitätswert einer Zelle den Messwert einer Konfiguration beeinflusst. Die über alle Einzelkonfigurationen kumulierte Sensitivitätsverteilung gibt Aufschluss darüber, welche Bereiche des Modells besonders gut oder schlecht durch die Messungen bestimmt sind.

Zur Auswertung der geoelektrischen Messungen wurde das zweidimensionale Finite-Element-Programm RESITOMO /KEM 96/ benutzt, das die Multiplikative Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik (MSIRT) einsetzt /KEM 95/. Es wurden Schnittebenen, die jeweils zwei Elektrodenbohrlöcher enthalten, ausgewertet; und zwar die Ebenen BHE 16 – BHE 17, BHE 17 – BHE 14 und BHE 14 – BHE 15. Pro Ebene wurden 578 Einzelkonfigurationen zur Auswertung herangezogen.

Aus der ermittelten Resistivitätsverteilung kann die Wassergehaltsverteilung bestimmt werden, wenn der Zusammenhang zwischen Resistivität und Wassergehalt bekannt ist. Zur Untersuchung dieses Zusammenhangs wurden Laborversuche durchgeführt.

4.4 Laboruntersuchungen zur Geoelektrik

Die Untersuchungen erfolgten an zwei zylindrischen Proben, die aus dem Bohrkern BHE 15 hergestellt wurden. In Tab. 4-2 sind ihre geometrischen Daten zusammengefasst.

Tab. 4-2: Geometrische Daten der untersuchten Proben des Bohrkerns BHE 15

	Teufenbereich (m)	Probenlänge (cm)	Probendurchmesser (cm)	Probenvolumen (cm ³)
Probe 1	3,79 – 3,89	9,99	7,18	405,4
Probe 2	3,90 – 4,00	9,99	7,19	406,2

Zunächst wurden Messungen im unbehandelten Zustand vorgenommen. Anschließend wurde der Wassergehalt der Proben durch Trocknung herabgesetzt.

Für die Bestimmung der Resistivitäten bei unterschiedlichen Wassergehalten wurden die Proben bei 50 °C unter Vakuum getrocknet. Zwischen jeder Trocknungsstufe erfolgte die Messung des zu jedem Trocknungszustand gehörigen elektrischen Widerstands. Unter Berücksichtigung der Ausgangsfeuchte wurden unter Verwendung der Massenverluste während der einzelnen Trocknungsstufen die jeweiligen Wassergehalte errechnet. Zur Bestimmung des Ausgangswassergehalts wurden die Probekörper nach Abschluss der elektrischen Widerstandsmessungen bei 105 °C getrocknet, bis keine signifikanten Gewichtsverluste mehr auftraten. Der Wassergehalt wurde auf die bei 105 °C getrocknete Probenmasse bezogen und berechnet sich aus:

$$W = \frac{m_w}{m_{Pr}} \quad (2)$$

mit dem Wassergehalt W , der Masse m_w des in der Probe befindlichen Wassers in kg und der Masse m_{Pr} der trockenen Probe in kg.

Die Resistivität der Probekörper wurde nach der Zweipunktmethode bestimmt. Hierbei wird über die Stirnflächen A der Probe ein elektrischer Strom I eingespeist und die Spannung U ebenfalls an den Stirnflächen über der gesamten Probenlänge L abgegriffen. Zur besseren Ankopplung der Elektroden an die Probe, wurden die Stirnflächen der Proben mit Leitlack versehen. Die Resistivität errechnet sich dann gemäß:

$$\rho = \frac{U \cdot A}{I \cdot L} \quad (3)$$

mit

ρ	Resistivität	Ωm
U	elektrische Spannung	V
I	elektrischer Strom	A
L	Probenlänge	m
A	Querschnittsfläche der Probe	m^2

Abb. 4-4 zeigt die prinzipielle Versuchsanordnung für die Messungen nach der Zweipunktmethode.

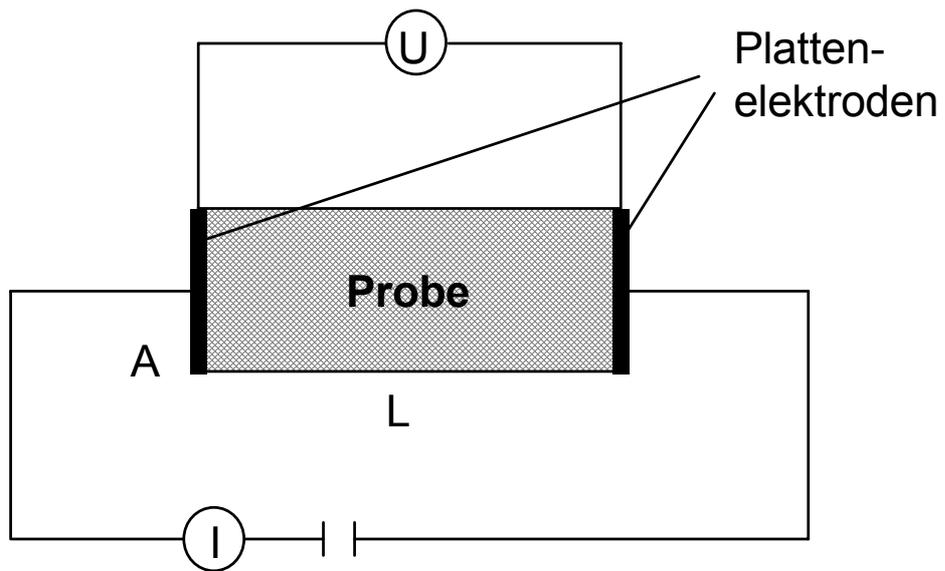


Abb. 4-4: Prinzipdarstellung der Zweipunktanordnung zur Bestimmung der Resistivität

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Messungen im Versuchsfeld und im Labor zur Gasfreisetzung aus dem Tongestein sowie der geoelektrischen Messungen zusammengefasst. Im Anhang sind die Ergebnisse der Gasfreisetzungsmessungen tabellarisch zusammengestellt (Tab. 5-1, 5-2 und 5-3).

5.1 Messungen zur Gasfreisetzung im Versuchsfeld

Die Ergebnisse der Messungen zur Gasfreisetzung aus dem nicht aufgeheizten Gebirge für die Komponenten Helium, Methan, Summe der Kohlenwasserstoffe C_1 bis C_4 und Kohlendioxid sind in den Abb. 5-1 bis 5-6 bzw. in Tab. 5.1 zusammengestellt. In den Abb. 5-1 bis 5-4 werden diese Komponenten für jedes der vier Bohrlöcher und in den Abb. 5-5 und 5-6 die Komponenten Methan und Kohlendioxid für die verschiedenen Bohrlöcher vergleichend dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits bei Gebirgstemperatur (ca. 14 °C) Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe und in geringem Umfange Helium freigesetzt werden. Die Konzentration der Komponenten in den verschiedenen Bohrlöchern, die zueinander einen Abstand von 0,35 m (BHE 10 – BHE 11) haben, variiert bis zu einem Faktor von 15. Daraus ist zu folgern, dass der Opalinus-Ton, der im Versuchsfeld makroskopisch sehr homogen erscheint, hinsichtlich des Gasgehaltes und der Gasfreisetzung nicht homogen ist. Die Darstellungen zeigen weiterhin, dass durch die Probenahme und die anschließende Ersetzung der Probenmenge durch Stickstoff, insbesondere am 14.04.01 und am 14.08.01 (4 Monate), eine Verdünnung eintritt. Daher kann keine Aussage gemacht werden, ob sich in den verschiedenen Bohrlöchern für die jeweilige Gaskomponente bereits die Sättigungskonzentration eingestellt hat. Für derartige Messungen in Zukunft sollten Proben aus dem System weniger häufig und auch in geringeren Mengen entnommen werden.

Als Vergleich und zur Kontrolle sind zusätzlich Luftproben aus der Versuchsfeldnische entnommen worden. Sie zeigen, dass selbst die Grubenluft infolge der Entgasung des Gebirges einen erhöhten Gehalt an Helium (bis 40 vpm) und Kohlendioxid (bis 600 vpm) gegenüber der Außenluft (5 bzw. 320 vpm) hat. Die starken Schwankungen werden durch unterschiedliche Bewetterung hervorgerufen. Die Schwankungen des

Sauerstoffgehaltes von 21,6 bis 22,6 % sind durch die Messfehler der Gasanalytik mit 3 bis 5 % begründet.

Die absolute Feuchtigkeit in den Messvolumina schwankte zwischen 8,4 und 13,8 l/m³. Sie ist im nicht aufgeheizten Zustand des Gebirges von der Temperatur in der Versuchsfeldnische beeinflusst. Diese Temperatur ist abhängig von der Jahreszeit und der Bewitterung des gesamten Versuchsfeldes.

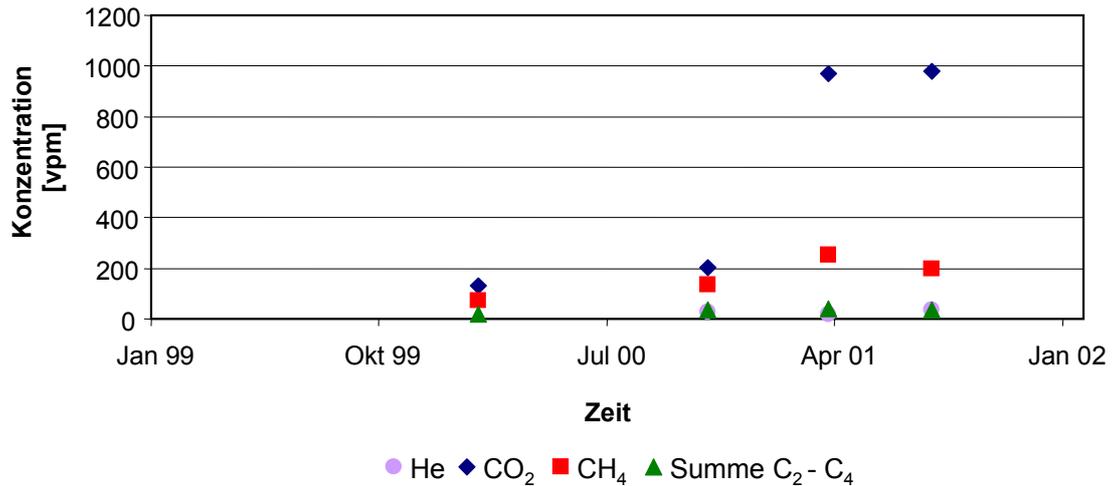


Abb. 5-1: Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C1 bis C4 in der Bohrung BHE 10

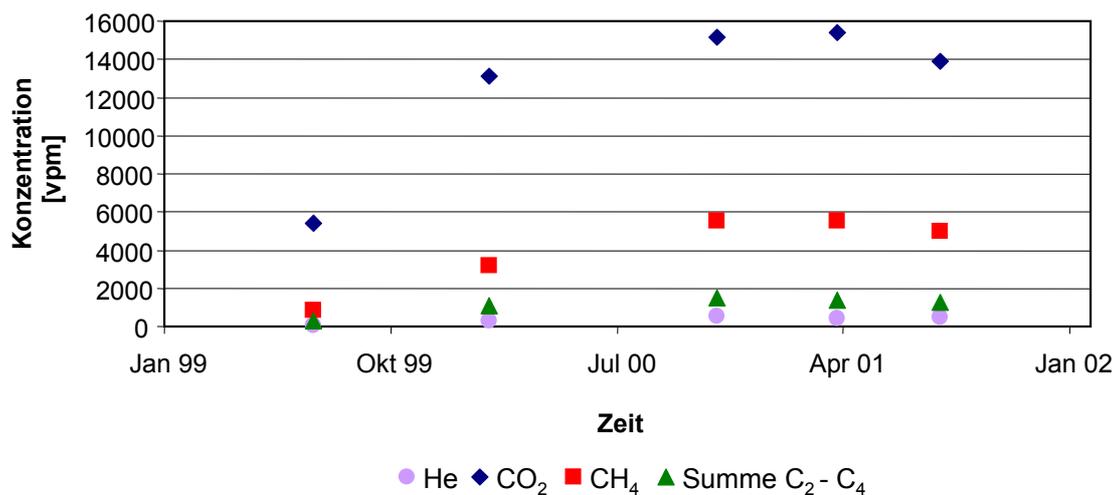


Abb. 5-2: Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C1 bis C4 in der Bohrung BHE 11

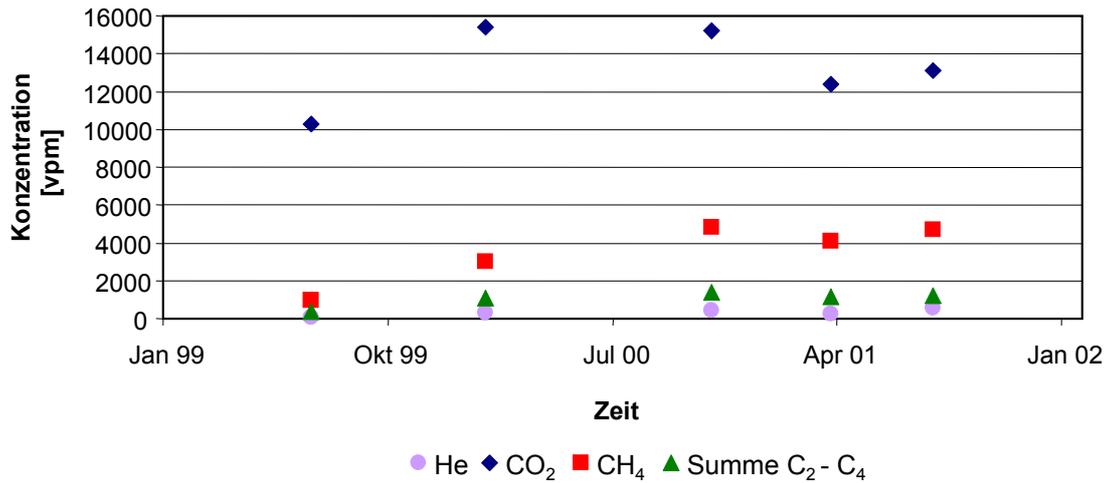


Abb. 5-3: Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C1 bis C4 in der Bohrung BHE 12

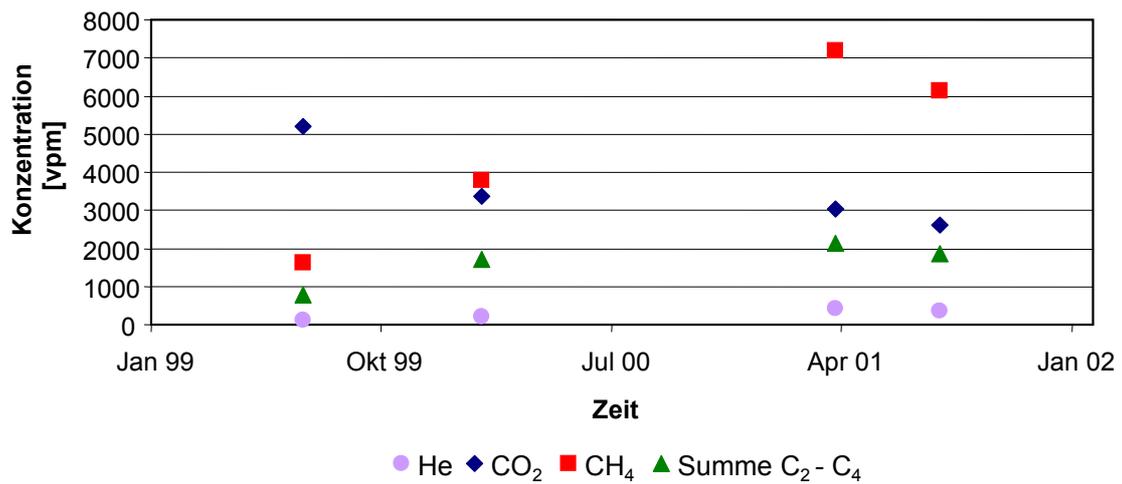


Abb. 5-4: Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C1 bis C4 in der Bohrung BHE 13

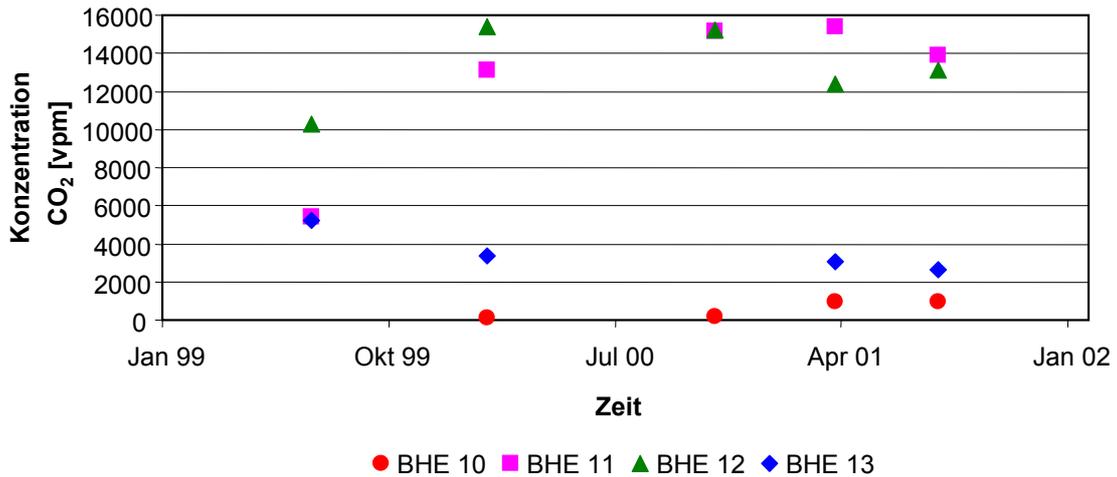


Abb. 5-5: Konzentration der Gaskomponente Kohlendioxid in den Bohrungen BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13

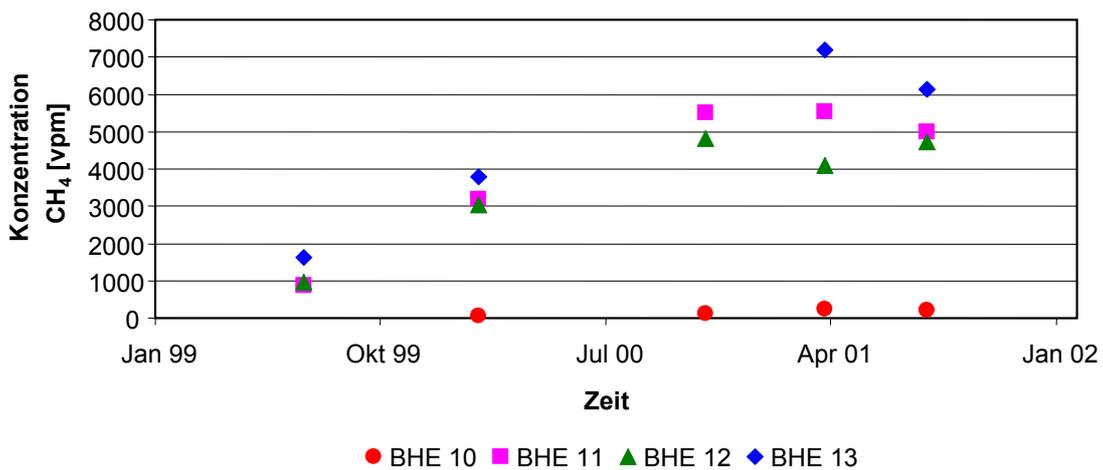


Abb. 5-6: Konzentration der Gaskomponente Methan in den Bohrungen BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13

5.2 Messungen zur Gasfreisetzung im Labor

Ziel der Laboruntersuchungen war einerseits zu ermitteln, ob sich über dem Tongestein für die freigesetzten Gase eine Sättigungskonzentration einstellt, und andererseits die potentiell freisetzbare Gasmenge zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in der Abb. 5-7 bzw. in Tab. 5-2 für eine große Probenmenge in einem kleinen Restvolumen

und in Abb. 5-8 bzw. Tab. 5-3 für eine kleine Probenmenge in einem großen Restvolumen zusammengestellt.

Sie zeigen, dass die bedeutendste Gaskomponente Kohlendioxid ist. Eine Gleichgewichtskonzentration über dem Opalinus-Ton bei 100 °C stellt sich bereits nach ca. 10 Tagen ein. Findet die Gasfreisetzung im freien Raum statt (großes Restvolumen und tägliches Spülen des Entgasungsbehälters), so ist die Gasfreisetzung nach vier Tagen weitestgehend abgeschlossen. Für Kohlendioxid liegt die Gleichgewichtskonzentration im Bereich von 200 000 vpm (20 vol%) und die maximal freisetzbare Menge bei 500 bis 1 000 l/1 000 kg (428 bzw. 837). Um diese Gleichgewichtskonzentration von 20 vol% zu erreichen, wurden unter den Versuchsbedingungen (Verhältnis Probenmenge/Restvolumen) 50 bis 100 l/1 000 kg, d. h. 10 % des freisetzbaren Kohlendioxides an das Restvolumen abgegeben.

Für die verschiedenen Kohlenwasserstoffe ergaben sich im Entgasungsbehälter Konzentrationen von 5 bis 100 vpm und spezifisch freisetzbare Mengen bis 0,06 l/1 000 kg. Ob diese Werte die Gleichgewichtskonzentration und die maximal freisetzbaren Mengen sind, muss durch weitere Messungen überprüft werden.

Helium konnte im Gegensatz zu den Messungen im Versuchsfeld im Labor nicht nachgewiesen werden, da einerseits die im Opalinus-Ton gespeicherte Menge sehr gering ist und andererseits Helium auf Grund der hohen Mobilität sowie der geringen Adsorption bei der Probengewinnung bereits entwichen sein wird.

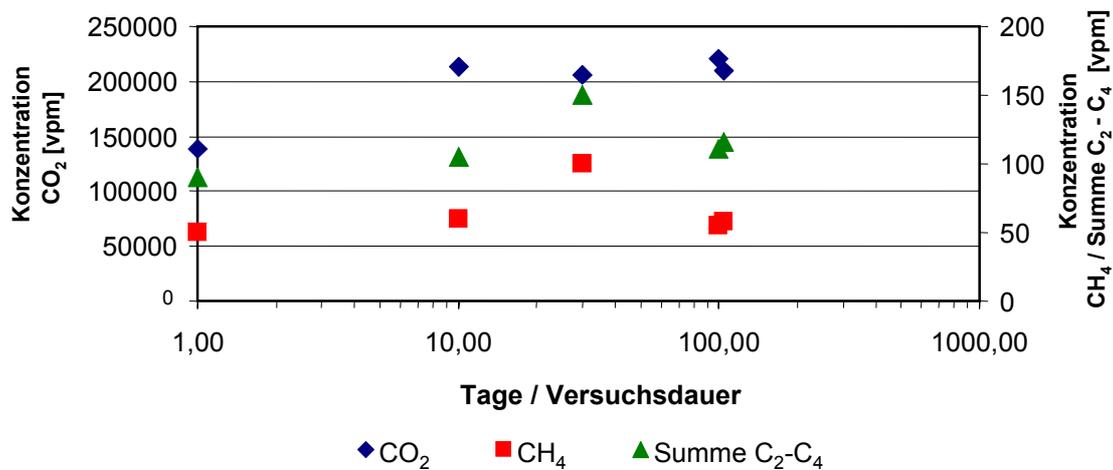


Abb. 5-7: Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration im Entgasungsbehälter (100 °C, große Probenmenge / kleines Restvolumen)

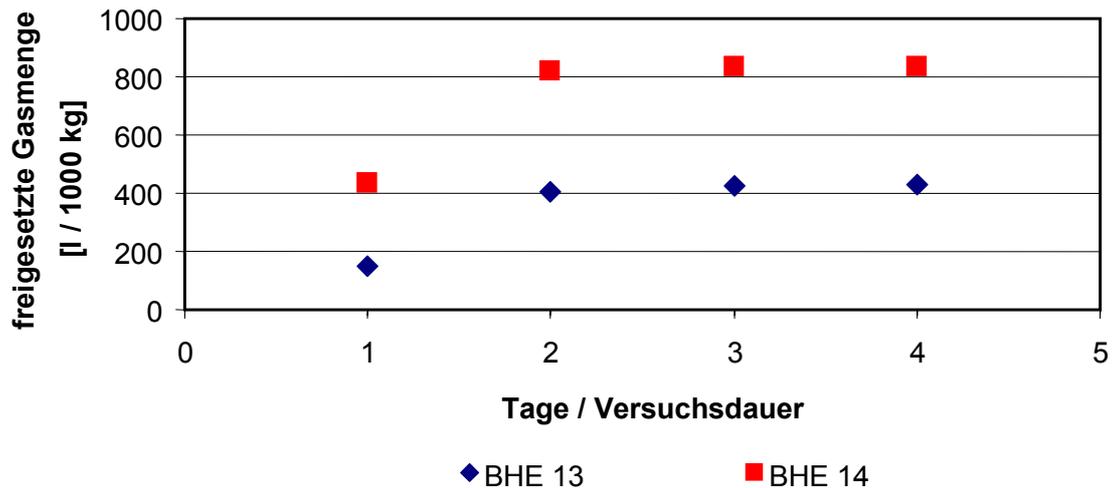


Abb. 5-8: Freigesetzte Kohlendioxidmenge in Abhängigkeit von der Zeit (100 °C, kleine Probenmenge / großes Restvolumen)

5.3 Geoelektrische Messungen im Versuchsfeld

Nach ersten Testmessungen im Juni 1999 wurden die geoelektrischen Tomografie-messungen in vollem Umfang im Juli 1999 aufgenommen. Täglich wurde eine komplette Messung durchgeführt. Da mit der Aufheizung noch nicht begonnen wurde und daher wesentliche Änderungen in der Resistivitätsverteilung weder erwartet noch festgestellt wurden, wurde die Auswertung nach der Anfangsphase nur noch vierteljährlich durchgeführt.

Es werden jeweils die Ebenen BHE 16 – BHE 17, BHE 17 – BHE 14 und BHE 14 – BHE 15 getrennt ausgewertet. Abb. 5-9 zeigt die kumulierte Sensitivität für die drei Ebenen in einer dreidimensionalen Darstellung, wobei die Werte jeweils auf den Maximalwert normiert und logarithmiert sind. Werte nahe Null bedeuten dabei eine hohe Sensitivität und damit eine hohe Genauigkeit bei den ermittelten Resistivitätswerten, während sehr niedrige Werte entsprechend unsichere Bereiche der Resistivitätsbestimmung charakterisieren. Man erkennt, dass die höchste Sensitivität erwartungsgemäß in der Nähe der Elektrodenketten auftritt. Bereiche niedriger Sensitivität beschränken sich auf den oberen und unteren Randbereich des Modells. Die für diese Bereiche ermittelten Resistivitäten sind am schlechtesten abgesichert, entsprechend besitzen Resistivitätsschwankungen in diesen Bereichen nur geringe Signifikanz.

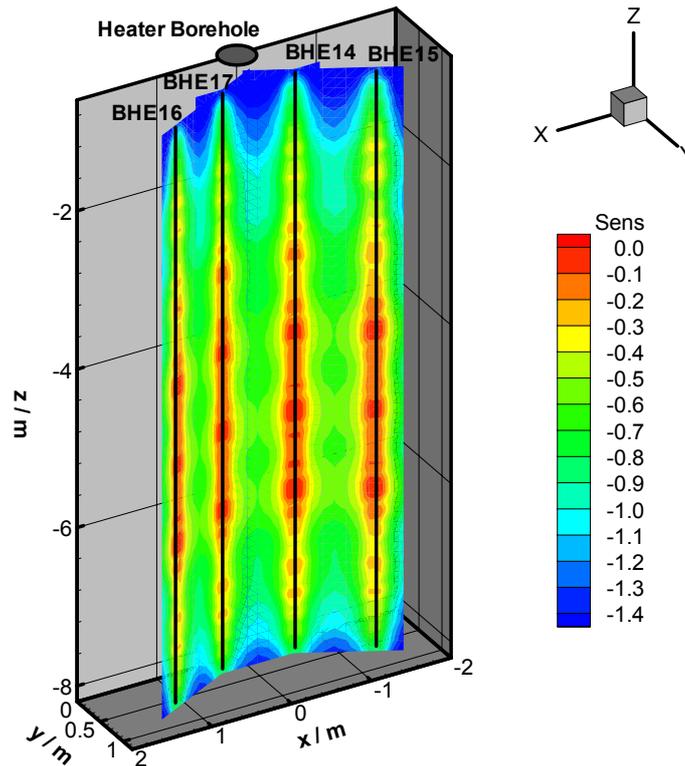


Abb. 5-9: Kumulierte Sensitivitätsverteilung für die Geoelektrik-Messebenen

Als beispielhafte Inversionsergebnisse werden in den Abb. 5-10 bis 5-13 die Tomogramme vom 16.07.1999 (Messbeginn), vom 07.03.2000, vom 01.12.2000 und vom 20.12.2001 gezeigt. Dabei ist anzumerken, dass die Messung vom 20.12.2001 bereits mit dem neuen Messsystem durchgeführt wurde (vgl. Abschnitt 3.2).

Die Messung vom 16.07.1999 (Abb. 5-10) zeigt eine sehr homogene Resistivitätsverteilung mit Werten zwischen 5 und 15 Ωm . Nur im oberen Modellbereich sind hochohmige Anomalien erkennbar, die vermutlich auf eine schlechte Ankopplung einiger Elektroden zurückzuführen sind. Wie bereits erwähnt, sind hier allerdings auch die Sensitivitäten am geringsten.

Die Tomogramme aus 2000 (Abb. 5-11 und 5-12) zeigen ebenfalls große Bereiche mit Resistivitätswerten zwischen 5 und 15 Ωm , allerdings werden auch Bereiche mit höheren Resistivitäten um 25 Ωm ermittelt. Die hochohmigen Anomalien nahe der Oberfläche sind ebenfalls stärker ausgeprägt.

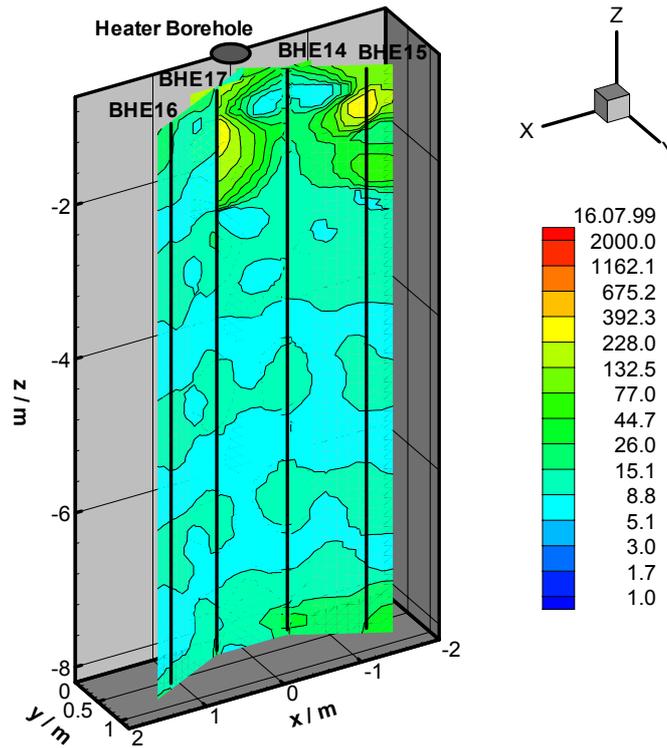


Abb. 5-10: Tomogramm der Messung vom 16.07.1999

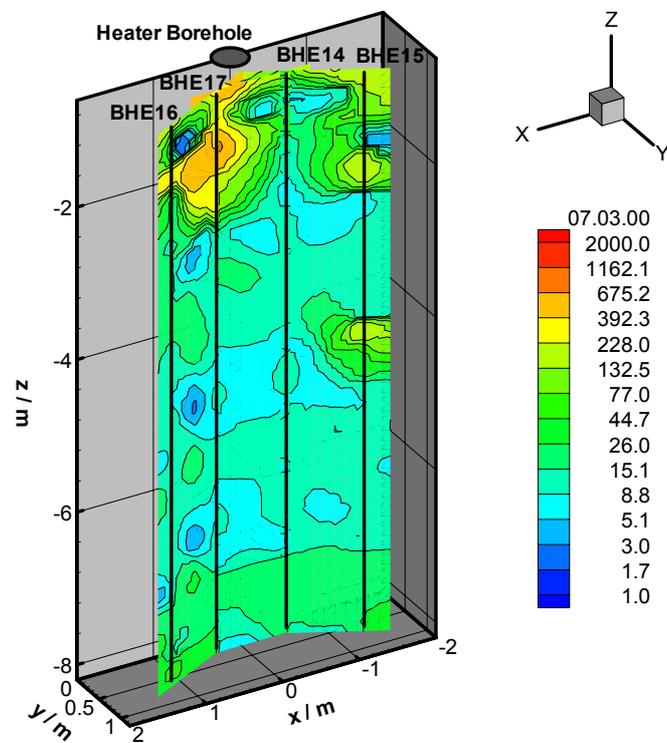


Abb. 5-11: Tomogramm der Messung vom 07.03.2000

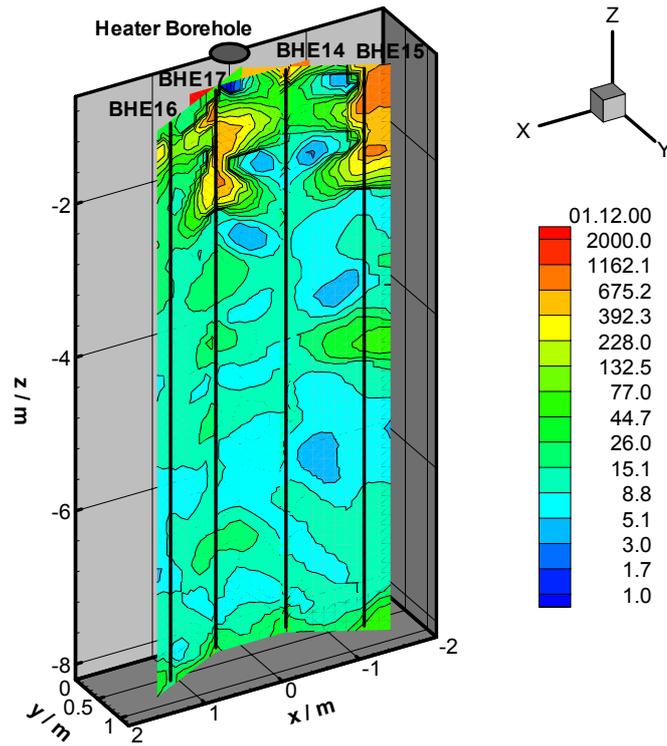


Abb. 5-12: Tomogramm der Messung vom 01.12.2000

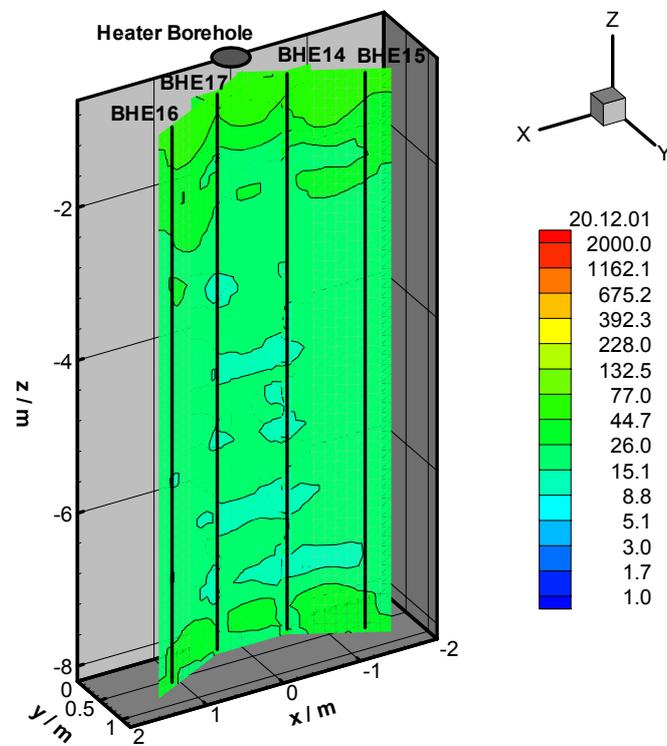


Abb. 5-13: Tomogramm der Messung vom 20.12.2001

Das Tomogramm der Messung vom Dezember 2001 (Abb. 5-13) wirkt im Gegensatz zu den anderen deutlich gleichmäßiger. Dies ist sicher auch auf eine höhere Stabilität der Messwerte der neuen Anlage zurückzuführen. Allerdings sieht man auch hier, wenn auch wesentlich schwächer ausgeprägt, die Anomalie im Sohlenbereich. Im übrigen Bereich liegt die Resistivität sehr gleichmäßig um 10 bis 25 Ωm , was die früheren Messungen bestätigt. Dieser Resistivitätsbereich entspricht vermutlich dem vollgesättigten Tongestein. Die etwas niedrigeren Werte zu Beginn der Messungen im Juli 1999 lassen sich als Effekte der Verfüllung der Elektrodenbohrlöcher mit dem sehr dünnflüssigen tonhaltigen Spezialbeton erklären.

5.4 Geoelektrische Messungen im Labor

Die Berechnung der Ausgangswassergehalte der beiden Proben aus BHE 15 ergab Werte von 6,93 % (Probe 1) und 7,27 % (Probe 2), d. h. die Proben waren bei Beginn der Messungen nicht voll gesättigt. Entsprechend ergaben sich Anfangsresistivitäten bei diesen Wassergehalten von 34 Ωm (Probe 1) und 39 Ωm (Probe 2), im Vergleich zur In-situ-Resistivität von 10 bis 25 Ωm .

Die Wassergehalte nahmen während der einzelnen Trocknungsstufen bei 50 °C bis auf ca. 0,7 % ab. Die zugehörigen Resistivitäten lagen bei etwa 15300 Ωm bzw. 24300 Ωm . Der Verlauf der Resistivitäten beider Proben für die unterschiedlichen Wassergehalte ist in der Abb. 5-14 dargestellt. Nach der Trocknung bei 105 °C wurde die Resistivität der trockenen Proben zu jeweils etwa 289000 Ωm ermittelt; diese Werte sind nicht in Abb. 5-14 aufgeführt.

Beide Proben weisen einen nahezu gleichen Resistivitätsverlauf auf. Während die Kurven bei einem Wassergehalt unterhalb 4 % sehr steil sind, scheinen sie bei höherem Wassergehalt stark abzuflachen. Hier sind weitere Messungen mit höher gesättigten bis voll gesättigten Proben notwendig, um die Interpretation der In-situ-Messungen abzusichern. Darüber hinaus sind für die Zukunft Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit der Resistivität geplant, um die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen bei Aufheizung des Versuchsfeldes interpretieren zu können.

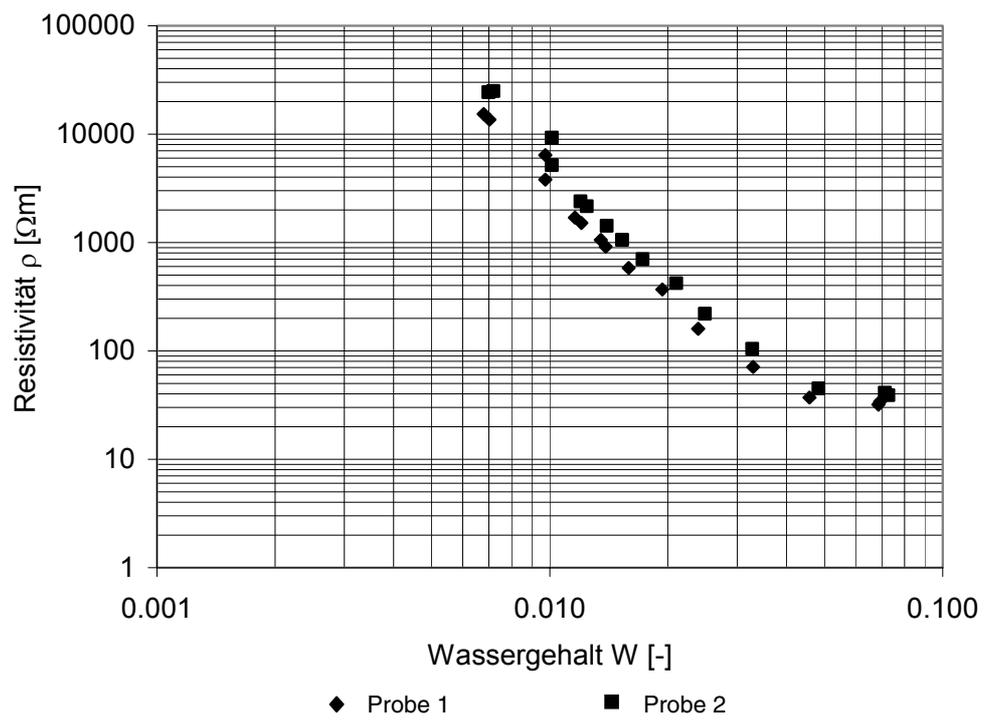


Abb. 5-14: Abhängigkeit der Resistivität der Proben 1 und 2 des Bohrkerns BHE 15 vom Wassergehalt

6 Weiterführung des Versuches

Der Erhitzerversuch wurde im Jahre 1998 geplant, im Jahre 1999 angelegt und instrumentiert. Von Juni 1999 bis Dezember 2001 wurden die Messungen im nicht aufgeheizten Gebirge durchgeführt. Es ist geplant, im 1. Quartal 2002 die elektrischen Erhitzer einzuschalten und über 2 Jahre mit einer Temperatur von ca. 100 °C an der Verrohrung zu betreiben. GRS soll dabei die thermisch induzierte Gasfreisetzung aus dem Tongestein sowie die thermisch induzierte Wasserumverteilung im Tongestein erfassen. Nach einer dann folgenden Abkühlphase von einem Monat sollen die Instrumentierungen rückgewonnen und bewertet werden. Aus dem Versatz und dem umliegenden Gebirge sollen Proben für die weiteren Untersuchungen entnommen und im Labor der Einfluss der Aufheizung unter den physiko-chemischen Randbedingungen des Versuchsfeldes ermittelt werden. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse sollen dann mit den Modellrechnungen verglichen werden (Validierung).

Zur Bestimmung der Gas- und Wasserfreisetzung im Versuchsfeld wurden bisher aus den vier Untersuchungsbohrlöchern im vierteljährlichen Abstand Proben entnommen und das entnommene Volumen durch Stickstoff wieder ersetzt. Die Gasproben wurden für die qualitative und quantitative Analyse in das chemische Labor der GRS in Braunschweig überführt. Nachteil dieses Verfahren ist, dass einerseits relativ große Probenmengen (ca. 1 Liter für eventuell notwendige Mehrfachanalysen) entnommen werden müssen und andererseits zwischen Probennahme und Analyse eine längere Zeit (ca. eine Woche) vergeht, wodurch sich die Proben infolge Temperaturschwankungen und Gasadsorption auf der Wandung der Transportbehälter verändern können. In Zukunft ist geplant, mit einem im Versuchsfeld installierten Messgerät die Analysen sofort während der Gasprobenahme zu bestimmen. Das System wird durch wesentlich geringere Probenmengen von 10 bis 100 ml weniger gestört, und eine Veränderung der Probe während der Zeitspanne zwischen Entnahme und Analyse wird vermieden. Falls die Bohrlöcher mit Formationswasser aus dem umliegenden Gebirge geflutet werden, können mit diesem Gerät die im Wasser gelösten Gase bestimmt werden. Das bisherige Analyseverfahren wird mit dieser neuen Methode wesentlich verbessert.

Ergänzend zu den Gasfreisetzungsmessungen in den vier Untersuchungsbohrungen vor, während und nach der Aufheizphase soll im Labor die Gasfreisetzung für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden. Hierfür sollen aus dem Opalinus-Ton anderer Versuchsfelder und nach Beendigung der Heizphase

aus dem thermisch beeinflussten und dem unbeeinflussten Bereich des HE-Versuches Kerne gewonnen werden, die chemisch und mineralogisch analysiert werden, und an den dann die Gasfreisetzung unter definierten Bedingungen (Aufmahlen der Proben und stufenweise Aufheizung bis auf 90 °C) bestimmt wird. Aus den im Versuchsfeld und im Labor gewonnenen Daten sollen Modelle für die Gasentwicklung und -freisetzung aus dem Opalinus-Ton unter den physiko-chemischen Randbedingungen eines Endlagers entwickelt werden.

Um Feuchtigkeitsänderungen im Bereich des Erhitzers zu verfolgen, werden wie bereits in der ersten Projektphase in vier senkrechten Bohrlöchern, die in der Nähe des Erhitzerbohrlochs verteilt und in denen Elektrodenketten installiert sind, geoelektrische Widerstandsmessungen durchgeführt, wobei vor allem im Tomographie-Modus (Dipol-Dipol-Anordnung) gemessen wird. Die Elektrodenketten sind mit Elektroden im Abstand von 25 cm bestückt.

Um die räumliche und zeitliche Änderung der Widerstandsverteilung zu erfassen, werden die Messungen mit einer vollautomatischen und computergesteuerten Datenerfassungsanlage mit 240 Kanälen durchgeführt, damit große Elektrodenarrays gehandhabt werden können. Die Daten können per Modem übertragen und sofort ausgewertet werden. Dadurch ist eine ständige Überwachung der Feuchteverteilung um den Erhitzer möglich.

Während diese Untersuchungen in der ersten Projektphase unter isothermen Bedingungen bereits erfolgreich durchgeführt wurden, kommen während der Heizphase Messungen bei erhöhter Temperatur bzw. unter Temperaturgradienten hinzu. Um die Temperatureffekte auf die Leitfähigkeitsverteilung von den erwarteten Austrocknungseffekten trennen zu können, sind erweiterte Laborkalibrationen bei verschiedenen Temperaturen notwendig.

Es ist bekannt, dass die Leitfähigkeit des Porenraumelektrolyten von der Temperatur abhängt. Dies gilt insbesondere für tonige Materialien, da Ton aufgrund seiner Schichtstrukturen neben der Volumenleitfähigkeit, die von der Porenraumfüllung bestimmt wird, eine vom Elektrolyten abhängige Grenzflächenleitfähigkeit aufweist. Der Einfluss auf die Leitfähigkeit bei Veränderung des Sättigungszustands des Gesteins überlagert zusätzlich die reinen Temperatureinflüsse. Um geoelektrische In-situ-Messungen in temperaturbeeinflussten Materialien hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und Genauigkeit bei der Feuchtebestimmung abzusichern, sind daher begleitende Laboruntersu-

chungen bei den relevanten erhöhten Temperaturen zur Ermittlung des Einflusses auf die Leitfähigkeit notwendig.

Nach Kompensation der Temperatureffekte wird versucht, durch die verschiedenen Messebenen ein dreidimensionales Bild der Austrocknungszone um den Erhitzer zu konstruieren und die räumliche und zeitliche Veränderung dieser Zone zu verfolgen, die sich wegen der Abnahme des Wassergehaltes infolge Austrocknung des Gebirges um den Erhitzer durch eine Widerstandserhöhung auszeichnet.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Messungen zur Gasfreisetzung im Versuchsfeld haben ergeben, dass für die angelegten Überdrucke von 0,1 bar die Systeme, bestehend aus den Messvolumina in den Bohrlöchern, den Verschraubungen, den Rohrleitungen, den Ventilen, den Manometern und dem umgebenden Gebirge, gasdicht sind. Die Bohrlöcher untereinander haben auch keine Verbindung, da die Gaszusammensetzungen in ihren Messvolumina sehr unterschiedlich sind (Tab. 5-1).

Die Bohrungen BHE 11 und BHE 12 mit einem hohen Kohlendioxid- und Methangehalt haben einen niedrigen Sauerstoffgehalt, im Gegensatz dazu hat die Bohrung BHE 10 einen niedrigen Kohlendioxid- und Kohlenwasserstoffgehalt und einen hohen Sauerstoffgehalt. Offensichtlich oxidieren bereits bei der Gebirgstemperatur von 14 °C die Kohlenwasserstoffe unter Freisetzung von Kohlendioxid und Verbrauch von Sauerstoff. Die Bohrung BHE 13 hat im Vergleich zu den anderen Bohrungen zwar einen hohen Gehalt an Kohlenwasserstoffen, aber nur einen mittleren Gehalt an Sauerstoff und Kohlendioxid. Offensichtlich ist in dieser Bohrung die Oxidation noch nicht so weit fortgeschritten. Da von den Kernen aus den Bohrungen keine Analysen zur chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und keine feinstratigraphische Kartierungen vorliegen, können die Unterschiede der Gasgehalte und Gaszusammensetzung nicht eindeutig geklärt werden.

Der Heliumgehalt in den Bohrungen hat seinen Ursprung im α -Zerfall des im Opalinus-Ton vorhandenen Urans /RÜB 99/, /RÜB 02/.

Die großen Schwankungen der Gaszusammensetzungen in den verschiedenen Bohrungen um den Faktor 15 zeigen, dass der Opalinus-Ton im Versuchsfeld kleinräumig in seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und in seinem Urangehalt sehr inhomogen sein muss. Dies geht auch aus den dünnen Sand- und Kalziteinlagerungen hervor.

Die absolute Feuchtigkeit in den Messvolumina schwankte im Bereich zwischen 8,4 und 13,8 l/m³. Sie ist direkt von der Temperatur in der Versuchsfeldnische abhängig. Diese Temperatur wird durch die Bewetterung beeinflusst.

Die bisherigen Messungen im Labor zeigen, dass sich bei 100 °C über dem Opalinus-Ton eine Kohlendioxidkonzentration von etwa 20 % einstellt. In den dicht verschlossenen Bohrlöchern ist daher bei ähnlicher Temperatur ein Druckanstieg aus der Gasfreisetzung von 0,02 MPa (0,2 bar) zu erwarten.

Die geoelektrischen Messungen im Versuchsfeld zeigen, abgesehen von einer hochohmigen Anomalie im Sohlenbereich, eine sehr homogene Resistivitätsverteilung mit Werten zwischen 10 und 25 Ωm , die vermutlich Vollsättigung entspricht. Zur Absicherung dieser Annahme sind weitere Laboruntersuchungen notwendig. Während der kommenden Aufheizphase des Versuchsfeldes werden die geoelektrischen Messungen fortgeführt, um mögliche Austrocknungseffekte festzustellen. Zur Interpretation der Feldmessungen werden Laboruntersuchungen bei erhöhter Temperatur durchgeführt, um Temperatureffekte bei den In-situ-Resistivitätsänderungen von Sättigungsänderungen trennen zu können.

8 Literatur

- /FUE 98/ Fuentes-Cantillana J. L. et al. (1998): HE-B experiment: Preliminary design TN 98-27
- /GEO 02/ Geotechnical Institute Ltd., Bern (2002): Mt. Terri Project, Programme Overview and Work Programme of Phase 7
- /JOC 01/ Jockwer, N., Wiezcorek, K. (2001): HE experiment: Installation protocol TN 2001-24
- /KEM 95/ Kemna, A. (1995): Tomographische Inversion des spezifischen Widerstandes in der Geoelektrik, Dissertation, Universität Köln.
- /KEM 96/ Kemna, A. (1996): RESITOMO – Programmpaket zur 2.5D Modellierung und 2D Inversion von DC-Widerstandsdaten, HarbourDom GmbH, Köln.
- /RÜB 99/ Rübél, A., Lippmann, J., Sonntag, Ch. (1999): Noble Gases and Isotopes from Porewater and Rocks, in “Mont Terri Rock Laboratory - Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments, Performed in 1996 and 1997”, Geologischer Bericht Nr. 23, pp. 148-151, Landeshydrologie und –geologie, Bern (Schweiz) 1999
- /RÜB 01/ Rübél, A., Sonntag, CH., Lippmann, J., Pearson, F.J., Gautschi, A., (2002): Solute transport in formations of very low permeability: Profiles of stable isotopes and dissolved noble gas contents of pore water in the Opalinus Clay, Mont Terri, Switzerland, Geochimica Cosmochimica Acta, Vol 66/8, pp. 7-17, (2002)
- /YAR 89/ Yaramanci, U., Flach, D. (1989): Entwicklung einer vollautomatischen Gleichstrom-Geoelektrikanlage für den Einsatz im Vorhaben „Dammbau im Salzgebirge“, GSF-Bericht 1/89, Braunschweig-München

/SNHGS/ In den von SNHGS herausgegebenen Technical Notes TN 96-01 bis TN 96-32, TN 97-01 bis TN 97-36, , TN 98-01 bis TN 98-67, TN 99-01 bis TN 99-84, TN 2000-01 bis TN 2000-61 und TN 2001-01 bis TN 2001-26 sind die im Mt. Terri-Projekt durchgeführten Labor- und In-situ-Messungen mit den erzielten Ergebnissen zusammengestellt.

/VEL 01/ Velasco, M. (2001): Analyses of the test site conditions, TN 2001-20

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Organigramm des Mt. Terri-Projektes	2
Abb. 1-2:	Grundriss des Mt. Terri Untertagelabors	2
Abb. 3-1:	Grundriss der HE-Versuchsfeldnische mit der zentralen Er- hitzerbohrung und den Untersuchungsbohrungen BHE 1 bis BHE 20	9
Abb. 3-2:	Auslegung der Gasprobenahmebohrlöcher BHE 10 bis BHE 13 mit dem hydraulischen Packer, den Kapillaren zu Gas- und Wasserprobenahme und der Bohrlochverfüllung	11
Abb. 3-3:	Ventilstation zur die Gasprobenahme aus den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE 13	12
Abb. 4-1:	Handpumpe mit Manometer zur Gasprobenahme aus den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE 13.....	17
Abb. 4-2:	Geräteanordnung zur Probenahme und Feuchtigkeitsbestim- mung.....	17
Abb. 4-3:	Prinzip der geoelektrischen Vierpunktmessung	19
Abb. 4-4:	Prinzipdarstellung der Zweipunktanordnung zur Bestimmung der Resistivität.....	22
Abb. 5-1:	Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C ₁ bis C ₄ in der Bohrung BHE 10	24
Abb. 5-2:	Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C ₁ bis C ₄ in der Bohrung BHE 11	24
Abb. 5-3:	Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C ₁ bis C ₄ in der Bohrung BHE 12	25
Abb. 5-4:	Konzentration der Gaskomponenten Helium, Kohlendioxid, Methan und Kohlenwasserstoffe C ₁ bis C ₄ in der Bohrung BHE 13	25

Abb. 5-5:	Konzentration der Gaskomponente Kohlendioxid in den Bohrungen BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13.....	26
Abb. 5-6:	Konzentration der Gaskomponente Methan in den Bohrungen BHE 10, BHE 11, BHE 12 und BHE 13.....	26
Abb. 5-7:	Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration im Entgasungsbehälter (100 °C, große Probenmenge / kleines Restvolumen).....	27
Abb. 5-8:	Freigesetzte Kohlendioxidmenge in Abhängigkeit von der Zeit (100 °C, kleine Probenmenge / großes Restvolumen).....	28
Abb. 5-9:	Kumulierte Sensitivitätsverteilung für die Geoelektrik-Messebenen.....	29
Abb. 5-10:	Tomogramm der Messung vom 16.07.1999.....	30
Abb. 5-11:	Tomogramm der Messung vom 07.03.2000.....	30
Abb. 5-12:	Tomogramm der Messung vom 01.12.2000.....	31
Abb. 5-13:	Tomogramm der Messung vom 20.12.2001.....	31
Abb. 5-14:	Abhängigkeit der Resistivität der Proben 1 und 2 des Bohrkerns BHE 15 vom Wassergehalt	33

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1:	Übersicht über die zur chromatographischen Gasanalyse eingesetzten Systeme	16
Tab. 4-2:	Geometrische Daten der untersuchten Proben des Bohrkerns BHE 15	20
Tab. 5-1:	Gaskomponenten in den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE13.....	47
Tab. 5-2:	Thermische Gasfreisetzung aus dem Opalinus-Ton bei 100 °C in Abhängigkeit von der Zeit. Ermittlung der Gleichgewichtskonzentration der Komponenten Methan, Kohlenwasserstoffe C ₁ - C ₄ , und Kohlendioxid	48
Tab. 5-3:	Thermische Gasfreisetzung aus dem Opalinus-Ton bei 100 °C. Ermittlung absolut freigesetzter Gasmenge der Komponenten Methan, Kohlenwasserstoffe C1 - C4 und Kohlendioxid.....	49

Anhang

In diesem Anhang sind die Ergebnisse der im Versuchsfeld und im Labor durchgeführten und im Bericht genannten Messergebnisse tabellarisch zusammengestellt.

Tab. 5-1: Gaskomponenten in den Bohrlöchern BHE 10 bis BHE13

Bohrloch	Gaskomponente							Absolute Feuchtigkeit [g/m ³]	Temp. HE-nische [°C]
	O ₂ [Vol%]	He [vpm]	CO ₂ [vpm]	CH ₄ [vpm]	C ₂ H ₆ [vpm]	C ₃ H ₈ [vpm]	i-C ₄ H ₁₀ [vpm]		
Datum der Probenahmen: 15.07.1999									
BHE 10	Probebeutel war undicht, keine Messung möglich							12,9	18,0
BHE 11	11,70	85	5 424	871	137	150	43	13,8	17,7
BHE 12	12,40	89	10 310	970	165	160	42	12,8	18,3
BHE 13	5,42	119	5 217	1 620	310	374	98	12,9	18,4
Luft-HE-nische	22,20	n.d.	600	Spuren	n.d.	n.d.	n.d.	11,5	15,6
Datum der Probenahme: 14.02.2000									
BHE 10	14,6	n.a.	130	70	10	7	Spuren	n.a.	n.a.
BHE 11	2,9	300	13 140	3 200	500	480	125	n.a.	n.a.
BHE 12	3,4	300	15 410	3 030	500	475	120	n.a.	n.a.
BHE 13	7,1	200	3 360	3 800	710	790	210	n.a.	n.a.
Luft-HE-nische	22,6	40	530	15	Spuren	Spuren	n.d.	n.a.	n.a.
Datum der Probenahme: 17.11.2000									
BHE 10	n.a.	28	203	135	20	13		n.a.	n.a.
BHE 11	n.a.	540	15 160	5 510	695	650	2	n.a.	n.a.
BHE 12	n.a.	440	15 200	4 800	630	600	160	n.a.	n.a.
BHE 13	21,0	30	660	180	97	180	150	n.a.	n.a.
Luft-HE-nische	21,6	35	480	n.d.	n.d.	n.d.	65	n.a.	n.a.
Datum der Probenahme: 11.04.2001									
BHE 10	2,1	16	970	252	29	10	n.d.	8,6	13,4
BHE 11	n.a.	450	15 400	5 530	640	600	150	8,4	13,0
BHE 12	5,5	220	12 400	4 100	515	500	130	8,5	12,9
BHE 13	n.a.	410	3 050	7 200	930	970	250	8,8	13,0
Luft-HE-nische	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Datum der Probenahme: 14.08.2001									
BHE 10	6,2	37	980	200	26	8	n.d.	10,2	14,0
BHE 11	1,5	480	13 900	4 990	625	575	43	11,1	14,0
BHE 12	1,3	540	13 100	4 710	590	550	42	11,5	14,0
BHE 13	2,6	370	2 620	6 150	880	900	98	11,3	14,0
Luft-HE-nische	21,6	20	480	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10,3	14,0

n.a. = nicht analysiert

n.d. = nicht bestimmbar, kleiner als die Nachweisgrenze

vpm = Volumen per Million

10 000 vpm = 1 vol%

Tab. 5-2: Thermische Gasfreisetzung aus dem Opalinus-Ton bei 100 °C in Abhängigkeit von der Zeit.
Ermittlung der Gleichgewichtskonzentration der Komponenten Methan, Kohlenwasserstoffe C₁ - C₄, und Kohlendioxid

Lauf- Zeit [Tage]	Proben- menge [kg]	freies Volu- men im Entgasungs- behälter [m ³] • 10 ³	Konzentration der Gaskomponente im Entgasungsbehälter							freigesetzte Gasmenge									
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	ΣC ₂ -C ₄	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	ΣC ₂ -C ₄	CO ₂					
													[vpm]		[l/1000 kg]				
1	3,261	1,232	40	5	35	50	90	139 045	0,02	<0,01	0,01	0,02	<0,03	52,5					
10	3,218	1,265	40	5	40	60	105	212 760	0,02	<0,01	0,02	0,02	0,04	83,6					
30	3,261	1,238	55	5	45	100	150	205 630	0,02	<0,01	0,02	0,04	0,06	78,1					
100	3,127	1,284	66	10	46	55	111	220 420	0,03	<0,01	0,02	0,02	0,05	90,5					
105	3,261	1,232	64	11	47	58	116	209 140	0,02	<0,01	0,02	0,02	0,04	79,0					

Tab. 5-3: Thermische Gasfreisetzung aus dem Opalinus-Ton bei 100 °C. Ermittlung absolut freigesetzter Gasmenge der Komponenten Methan, Kohlenwasserstoffe C1 - C4 und Kohlendioxid

Probe	Zeit	Probenmenge	freies Volumen im Entgasungsbehälter	freigesetzte Gasmenge					
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	ΣC ₂ C ₄	CO ₂
	[Tage]	[g]		[l/1000 kg]					
BHE13	1	11,75	2592	4	n.d.	n.d.	n.d.		149
	2			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		255
	3			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		21
	4			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		4
	Summe 1 - 4 Tage				4	-	-	-	
BH14/1	1	10,43	2602	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		433
	2			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		388
	3			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		14
	4			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		2
	Summe 1 - 4 Tage				-	-	-	-	

n. d. = nicht bestimmbar, kleiner als die Nachweisgrenze

Deskriptoren:

Deponie, Endlagerung, Gasbildung, Langzeitsicherheit, Wasserbelastung