



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

## **Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2)**

Abschlussbericht



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

## **Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2)**

Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand

Abschlussbericht

Klaus Wieczorek  
Peter Schwarzianeck

April 2004

### **Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter dem Förderkennzeichen 02E9118 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 - 198  
ISBN 3-931995-65-8**

**Deskriptoren:**

Aktiver Abfall, Endlager, Geomechanik, Geosphäre, Hydrodynamik, Langzeitsicherheit, Meßauswertung, Nichtaktiver Abfall, Permeabilität, Salz

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ziele des Projektes</b> .....	<b>3</b>
2.1	Gesamtziel .....	3
2.2	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele.....	3
<b>3</b>	<b>Untersuchungsprogramm</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>In-situ-Untersuchungen</b> .....	<b>7</b>
4.1	Beschreibung der Versuchsorte .....	7
4.1.1	AHE-Strecke, 800-m-Sohle .....	7
4.1.2	Dammjoch, 700-m-Sohle .....	10
4.1.3	Pfeiler Kammer 8/8b, 532-m-Sohle .....	11
4.1.4	TSDE-Versuchsfeld, 800-m-Sohle .....	12
4.2	Gebirgsspannungsmessungen .....	13
4.3	Permeabilitätsmessungen mit Gas.....	17
4.3.1	Mess- und Auswerteverfahren .....	17
4.3.2	Permeabilität im Bereich der AHE-Strecke .....	21
4.3.3	Permeabilität im unausgebauten und ausgebauten Bereich der Dammjochstrecke .....	22
4.3.4	Permeabilität im Pfeiler zwischen Kammer 8 und 8b .....	23
4.3.5	Permeabilität in der Sohle des TSDE-Versuchsfeldes .....	24
4.4	Permeabilität im Hohlraumnahbereich .....	25
4.4.1	Beschreibung der Messanordnung .....	26
4.4.2	Gasinjektionstests .....	30
4.4.3	Flüssigkeitsinjektion .....	31
4.4.4	Geoelektrische Messungen.....	33
<b>5</b>	<b>Laboruntersuchungen</b> .....	<b>41</b>
5.1	Permeabilitätsmessungen .....	41
5.2	Mikrostrukturelle Untersuchungen.....	43

<b>6</b>	<b>Modellierung des mechanischen Zustandes.....</b>	<b>45</b>
6.1	AHE-Strecke .....	45
6.2	Dammjoch .....	47
6.3	Pfeiler Kammer 8/8b .....	49
<b>7</b>	<b>Relation zwischen Permeabilität und Spannungszustand.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>59</b>

# 1 Einleitung

Für die Isolierung sowohl radioaktiver wie auch chemisch-toxischer Abfälle von der Biosphäre bietet das Konzept des untertägigen Endlagers besonders günstige Voraussetzungen, da sich Elementkreisläufe in der Lithosphäre über geologische Zeiträume erstrecken. Entscheidend ist dabei, dass die Abfälle in der Lithosphäre sicher eingeschlossen sind. Eines der geologischen Medien, die zur Errichtung von Endlagern favorisiert werden, ist das Steinsalz.

Zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses des Abfalls in einem Endlager wurde das Mehrbarrierenkonzept entwickelt. Neben der geologischen Barriere (z.B. der Steinsalzformation) sind geotechnische Barrieren in Form von Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüssen notwendig. Besondere Bedeutung kommt der Wechselwirkung zwischen geologischer und geotechnischen Barrieren zu.

Es ist bekannt, dass im Steinsalz in der Umgebung von Hohlräumen (Strecken, Bohrlöcher) eine Auflockerungszone (englisch: Excavation Damaged Zone, EDZ) existiert, die sich im Zuge der Spannungsumlagerungen durch Verformungen während und nach der Hohlraumerstellung ausbildet. Das Durchlässigkeitsverhalten einer solchen Auflockerungszone ist von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit von Bohrloch- bzw. Streckenverschlüssen. Zu seiner Untersuchung führte die GRS bis 1998 das Vorhaben „Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge“ (ALOHA) /WIE 98/ durch. Im Juli 1998 wurde das Nachfolgeprojekt „Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand“ (ALOHA2) begonnen, bei dem neben der Charakterisierung von Ausdehnung und hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone die mögliche Verheilung und der Zusammenhang mit dem Spannungszustand, der für die Prognostizierbarkeit entscheidend ist, im Mittelpunkt standen. Das Vorhaben wurde im Jahr 2000 in das von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften teilgeförderte und vom Forschungszentrum Karlsruhe koordinierte Projekt „Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories - Phase II“ (BAMBUS II, FIKW-CT-2000-00051) integriert und die Laufzeit angepasst. Die Untersuchungen wurden im April 2003 beendet.

Der Hauptteil der Arbeiten umfasste Messungen an mehreren untertägigen Versuchs-orten im Forschungsbergwerk Asse. Das Untersuchungsprogramm wurde durch

Laboruntersuchungen und Modellrechnungen zur Interpretation der Ergebnisse vervollständigt. Der vorliegende Abschlussbericht zum Vorhaben ALOHA2 enthält die wesentlichen Untersuchungsergebnisse, die im Projektzeitraum gewonnen wurden.

## **2 Ziele des Projektes**

### **2.1 Gesamtziel**

Die Wirksamkeit von Bohrloch- und Streckenverschlüssen in einem Endlager bzw. einer Untertagedeponie in Salzformationen wird durch die Auflockerungszone im umgebenden Gestein beeinflusst. Auflockerungszonen entstehen durch Verformungen und damit verbundene Spannungsumlagerungen während und nach der Hohlraum-erstellung. Es wird angenommen, dass infolge der Spannungsaufnahme bei Auflaufen des Gebirges auf einen Verschluss die Auflockerungszone allmählich wieder abgebaut wird. Ziel des Projektes war die Ermittlung der hydraulischen Materialparameter der Auflockerungszone in Abhängigkeit vom mechanischen Zustand und deren Entwicklung während der Phase der Rückbildung, da dies für die Wirksamkeit von Verschlüssen von entscheidender Bedeutung ist.

### **2.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele**

Die Rückbildung einer Auflockerungszone wird im Allgemeinen vergleichsweise lange Zeit in Anspruch nehmen und daher direkten Messungen nicht zugänglich sein. Aus diesem Grund war ein Hauptziel der Arbeiten die Herstellung eines mechanistischen Zusammenhangs zwischen Permeabilität des Steinsalzes und Spannungszustand unter In-situ-Bedingungen, denn der Spannungszustand lässt sich durch mechanische Modellierung auch über längere Zeiten prognostizieren.

Zur Erreichung dieses Ziels waren die Bestimmung sowohl der Permeabilität als auch der Gebirgsspannung bei unterschiedlichen Hohlraumgeometrien und -abständen notwendig. Da die Permeabilität nicht nur von der Spannung, sondern auch von Gefügeeigenschaften abhängt, wurden Permeabilitätsmessungen an verschiedenen Orten bei vergleichbaren Spannungen durchgeführt, um Schwankungsbreiten zu ermitteln.

Ein weiteres Ziel war die Entwicklung und Erprobung eines speziellen Messaufbaus zur Messung der Permeabilität im unmittelbaren Streckensaum (Streckenabstand kleiner etwa 1 m), da Standardsonden (Mehrfachpackersysteme) für derartige Messungen ungeeignet sind. Gerade im Streckensaum wird die Permeabilität jedoch am höchsten sein, so dass dieser am meisten zum hydraulischen Fluss beiträgt. Insbesondere im

Bereich des Streckensaums ist auch mit einer verstärkten Richtungsabhängigkeit der Permeabilität zu rechnen. Für die Wirksamkeit von Streckenverschlüssen ist dabei die zur Strecke parallel verlaufende Komponente der Permeabilität entscheidend.

Die Arbeitsziele des Projektes lassen sich damit folgendermaßen zusammenfassen:

1. Bestimmung von Ausdehnung und hydraulischen Eigenschaften, insbesondere der Permeabilität, von Auflockerungszonen
  - in der Umgebung verschiedener Hohlräume,
  - im unmittelbaren Streckensaum,
  - mit Blick auf eine mögliche Richtungsabhängigkeit der Permeabilität.
2. Ermittlung des jeweiligen Spannungszustandes,
3. Ableitung eines Zusammenhangs zwischen Permeabilität und Spannungszustand.

### 3            **Untersuchungsprogramm**

Zur Erreichung der in Abschnitt 2.2 genannten wissenschaftlichen und technischen Ziele des Projekts wurden drei Versuchsorte im Forschungsbergwerk Asse zur Durchführung von In-situ-Untersuchungen ausgewählt, die durch Laboruntersuchungen und Modellierung unterstützt wurden. Dabei handelt es sich um die sogenannte AHE-Strecke auf der 800-m-Sohle, die Dammjochstrecke auf der 700-m-Sohle und den Pfeiler zwischen den Kammern 8 und 8b auf der 532-m-Sohle. Zusätzliche Permeabilitätsmessungen im TSDE-Feld wurden nachträglich ins Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Der Untersuchungsplan umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

- Vorlaufende geoelektrische Kartierung des Versuchsortes AHE-Strecke zur Feststellung repräsentativer Bereiche, um für die Bohrlöcher zur Permeabilitätsmessung gezielt homogene Bereiche auswählen zu können (bei den anderen Versuchsorten waren derartige Messungen nicht möglich oder sinnvoll)
- Labormessungen an ausgewählten Bohrkernen von den Versuchsorten zur Bestimmung von mechanischem Zustand und spannungsabhängiger Permeabilität
- Durchführung von Gebirgsspannungsmessungen mittels des Überbohrverfahrens an den ausgewählten Versuchsorten zur Absicherung der mechanischen Modellierung (s. u.)
- Durchführung von In-situ-Permeabilitätsmessungen mit Gas in jeweils mehreren (zwei bis vier) Bohrlöchern in unterschiedlichen Tiefen an den Versuchsorten
- Entwicklung und Erprobung von einer Messanordnung zur Untersuchung der Permeabilität und der Permeabilitätsanisotropie im unmittelbaren Nahbereich von Hohlräumen, der konventionellen Packertests nicht zugänglich ist
- Ermittlung des Spannungszustandes an den Permeabilitätsmessstellen durch mechanische Finite-Element-Modellierung der Versuchsorte
- Vergleich Hydraulik - Mechanik durch Korrelation von Permeabilität und Spannungszustand und abschließende Auswertung

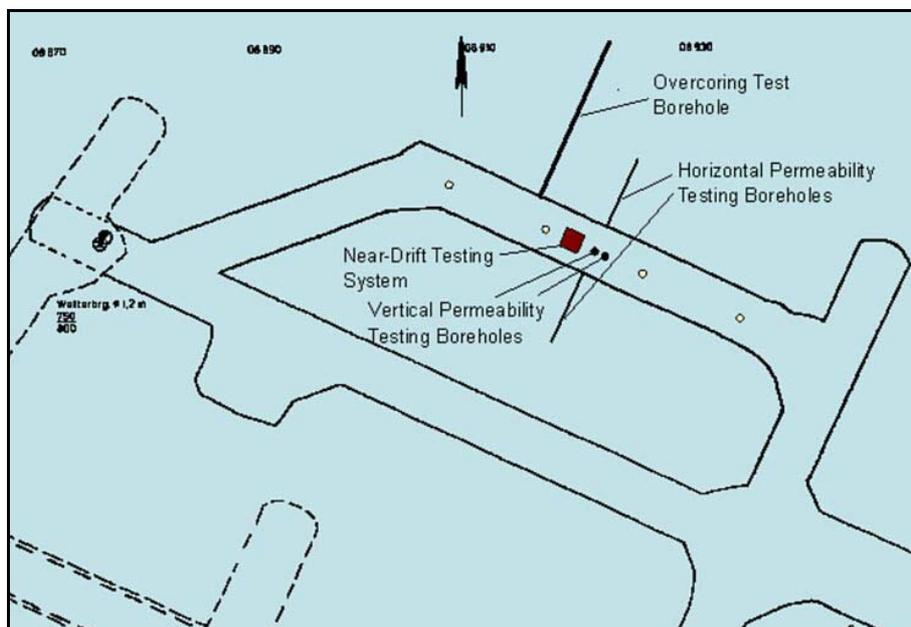
## 4 In-situ-Untersuchungen

### 4.1 Beschreibung der Versuchsorte

In diesem Abschnitt werden die Versuchsorte kurz vorgestellt. Zusätzlich zur Beschreibung der Versuchsorte sind in Abschnitt 4.1.1 die geoelektrischen Profilmessungen zur Vorerkundung der AHE-Strecke zu finden.

#### 4.1.1 AHE-Strecke, 800-m-Sohle

Als erster Versuchsort wurde die so genannte AHE-Strecke im älteren Steinsalz auf der 800-m-Sohle des Forschungsbergwerkes Asse ausgewählt. Es handelt sich um eine von einer Teilschnittmaschine aufgefahrene Strecke von typischen Dimensionen (ca. 4.5 m Breite bei ca. 4 m Höhe), die sich dadurch auszeichnet, dass der Spannungszustand in ihrer Umgebung auf Grund von Messungen der BGR bekannt ist /HEU 96/. Abbildung 4-1 zeigt einen Grundriss der Strecke.

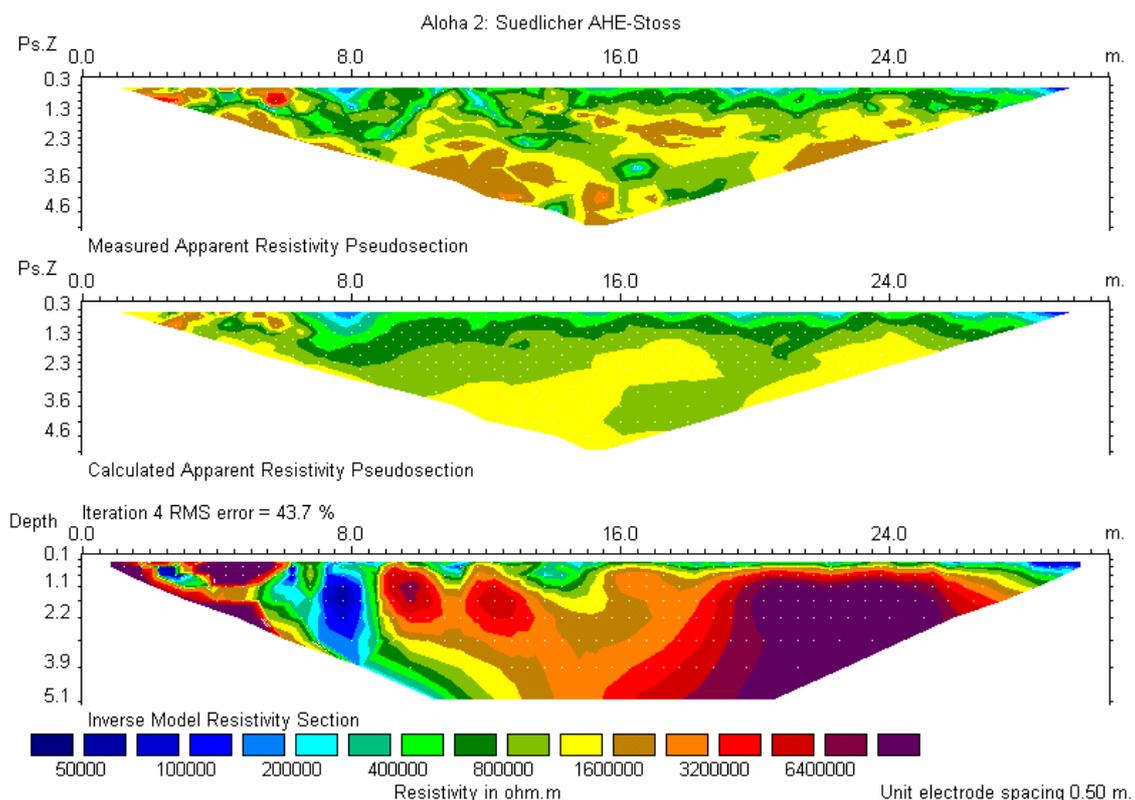


**Abb. 4-1:** Grundriss der AHE-Strecke mit der Lage der Messbohrlöcher und der hohlraumnahen Messanordnung

Zur Vorerkundung wurden in der AHE-Strecke geoelektrische Profilmessungen entlang der Sohle und des südlichen Stoßes durchgeführt. Mittels Wenner-Messungen wurde dabei die Resistivitätsverteilung in Sohlen- bzw. Stoßnähe ermittelt, um für die

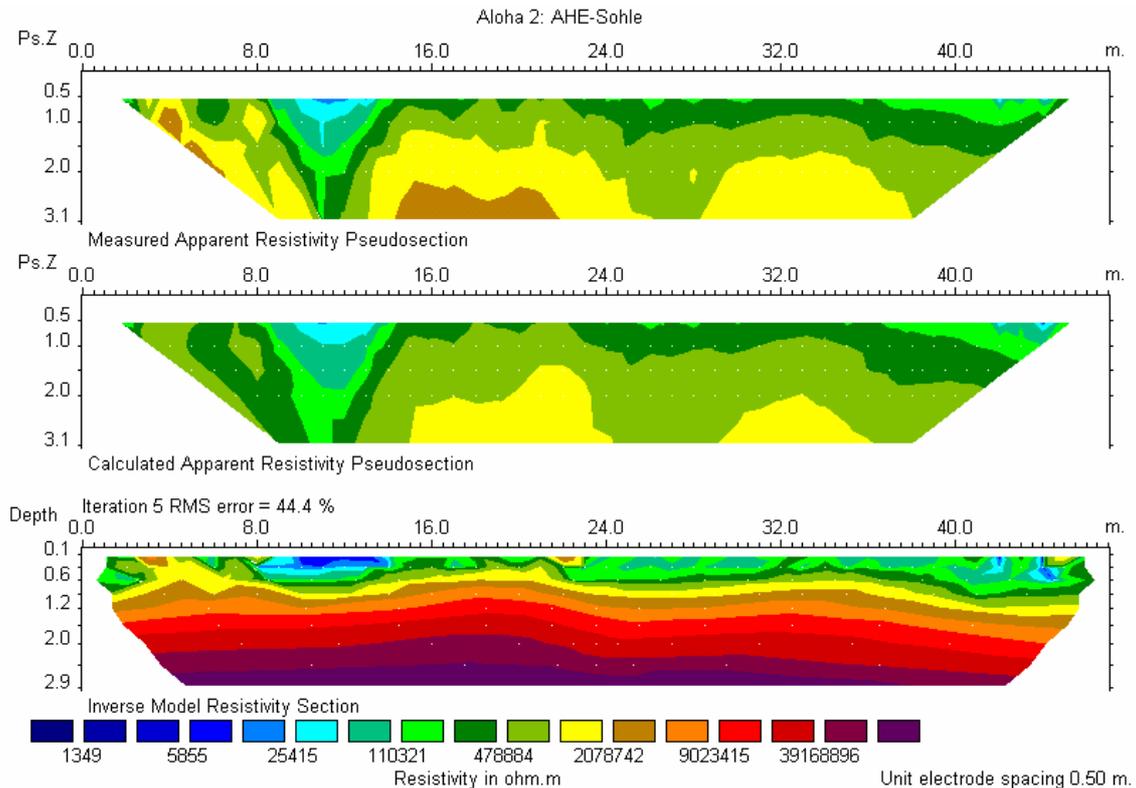
Bohrlöcher zur Permeabilitätsmessung gezielt homogene Bereiche auswählen zu können, die für die Auflockerungszone um die Strecke als repräsentativ anzusehen wären. Zur Auswertung wurde das Programm RES2DINV /RES 95/ eingesetzt.

Abbildung 4-2 zeigt die gemessenen und modellierten scheinbaren Resistivitäten sowie die modellierte Verteilung der Resistivität im südlichen Streckenstoß. Im linken (westlichen) Profilbereich erkennt man kleinräumige Anomalien hoher und niedriger Resistivität, die wegen der dort sehr kleinen eingespeisten Stromstärke jedoch vermutlich auf mangelhafte Ankopplung der Elektroden zurück zu führen sind. Im rechten (östlichen) Profilbereich erkennt man eine dünne Schicht (< 0.5 m) leicht verringerter Resistivität (ca.  $4 \cdot 10^5 \Omega\text{m}$ ) und darunter Resistivitäten oberhalb  $10^6 \Omega\text{m}$ . Der Bereich extrem hoher Resistivität unten rechts ist ein numerischer Effekt, der nicht quantitativ interpretiert werden kann; ansonsten entspricht der gesamte östliche Profilbereich in seiner Resistivität den Werten für trockenes Steinsalz /YAR 94/.



**Abb. 4-2:** Geoelektrische Profilmessung am südlichen Stoß der AHE-Strecke.  
 Oben: Gemessene Resistivitätsverteilung (Pseudosektion)  
 Mitte: Modellierte Resistivitätsverteilung (Pseudosektion)  
 Unten: Resistivitätsverteilung nach inverser Modellierung

In Abbildung 4-3 sind die Ergebnisse der Profilmessungen auf der Sohle dargestellt. Das Modell zeigt einen sehr homogenen Aufbau mit hoher Resistivität unter einer ca. 1 m mächtigen Schicht leicht erniedrigter Resistivität (ca.  $2 \cdot 10^5 \Omega\text{m}$ ), abgesehen von einer Anomalie mit niedriger Resistivität im westlichen Bereich zwischen Profilmeter 8 und 15.



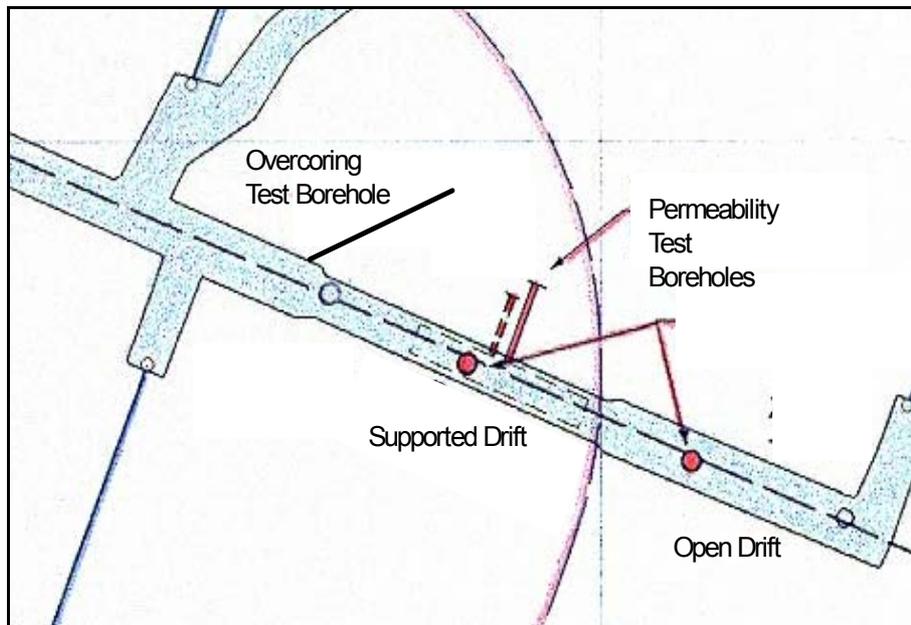
**Abb. 4-3:** Geoelektrische Profilmessung auf der Sohle der AHE-Strecke.  
 Oben: Gemessene Resistivitätsverteilung (Pseudosektion)  
 Mitte: Modellierte Resistivitätsverteilung (Pseudosektion)  
 Unten: Resistivitätsverteilung nach inverser Modellierung

Aus den geoelektrischen Messungen wurde geschlossen, dass der gesamte Streckenbereich mit Ausnahme des westlichen Endes für die geplanten Permeabilitätsmessungen geeignet ist. Daher wurden je ein horizontales Bohrloch in den südlichen und nördlichen Stoß sowie zwei vertikale Bohrlöcher mit 1 m Abstand in die Streckensohle entsprechend Abbildung 4-1 etwa auf halber Streckenlänge gestoßen. Diese Bohrlöcher haben eine Länge von je 7 m und einen Durchmesser von 86 mm und wurden für Packertests benutzt (siehe Abschnitt 4.3.2). Die Messanordnung für hohlraumnahe Untersuchungen (Abschnitt 4.4) wurde in unmittelbarer Nähe zu den vertikalen Bohrlöchern auf der Sohle installiert. Eine Bohrung zur Spannungsermittlung

durch Überbohren (Abschnitt 4.2) befindet sich weiter westlich im nördlichen Stoß (Abbildung 4-1).

#### 4.1.2 Dammjoch, 700-m-Sohle

Auf der 700-m-Sohle des Forschungsbergwerkes Asse wurde eine 1911 aufgefahrne Strecke bereits 1914 auf einer Länge von 25 m mit einem Dammjoch aus Gussstahlübblingen versehen und der verbleibende Zwischenraum betoniert. Dieser Versuchsort ist besonders interessant, da hier die mögliche Verheilung der Auflockerungszone untersucht werden konnte. Zur Permeabilitätsmessung wurden drei 7 m tiefe Bohrlöcher durch den Tübbingausbau ins Salz gestoßen, und zwar eins horizontal, eins vertikal nach unten und eins um 45° nach unten geneigt (siehe Abbildung 4-4). Ein weiteres Bohrloch wurde für Vergleichsmessungen außerhalb des ausgebauten Bereiches in die Sohle gestoßen. Ein Bohrloch für Überbohrversuche wurde vom nicht ausgebauten Bereich schräg hinter den Ausbau geführt (Abbildung 4-4). Abbildung 4-5 zeigt den Blick in die ausgebaute Strecke von Westen.



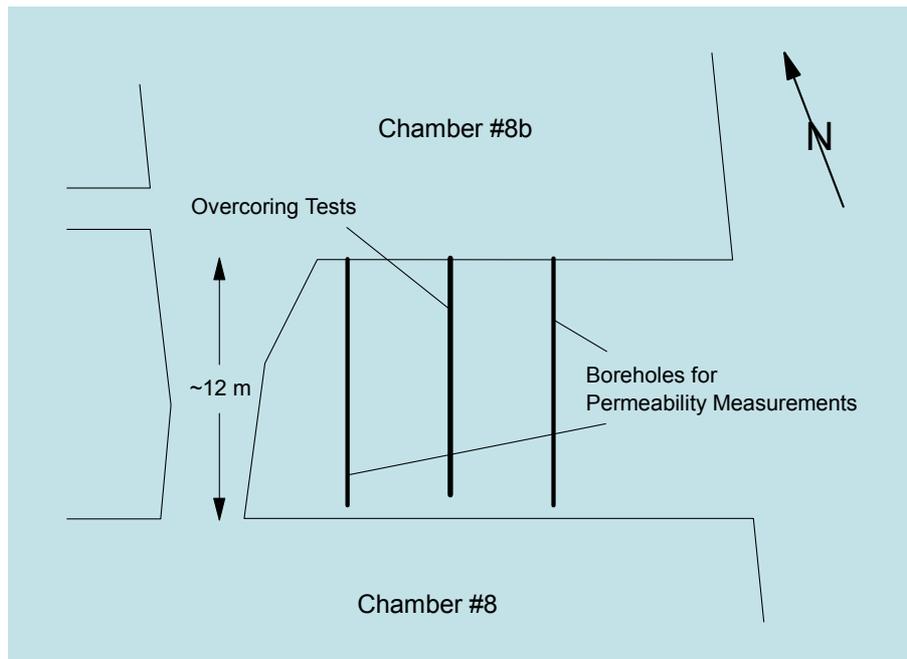
**Abb. 4-4:** Grundriss der Dammjochstrecke mit der Lage der Messbohrlöcher



**Abb. 4-5:** Blick in die Dammjochstrecke

#### **4.1.3 Pfeiler Kammer 8/8b, 532-m-Sohle**

Der dritte Versuchsort befindet sich im jüngeren Steinsalz auf der 532-m-Sohle. Hier wurden Permeabilitätsmessungen und Überbohrversuche in dem etwa 12 m breiten Pfeiler zwischen den Kammern 8 und 8b durchgeführt. Diese Kammern wurden zwischen 1956 und 1961 angelegt und waren ursprünglich 15 m hoch. Die unteren 10 m der Kammer 8b wurden in 2000 mit Salzgrus verfüllt. Zwei Bohrlöcher zur Permeabilitätsmessung und eines für Überbohrversuche wurden horizontal von der neuen Sohle der Kammer 8b in Richtung auf Kammer 8 geführt (siehe Abbildung 4-6). Die Bohrlöcher wurden 1 m über der durch Teilverfüllung neu geschaffenen Sohle bzw. ca. 4 m unter der Firste angesetzt. Ein Foto des Versuchsortes in Kammer 8b zeigt Abbildung 4-7.



**Abb. 4-6:** Lage der Messbohrlöcher im Pfeiler zwischen Kammer 8 und 8b

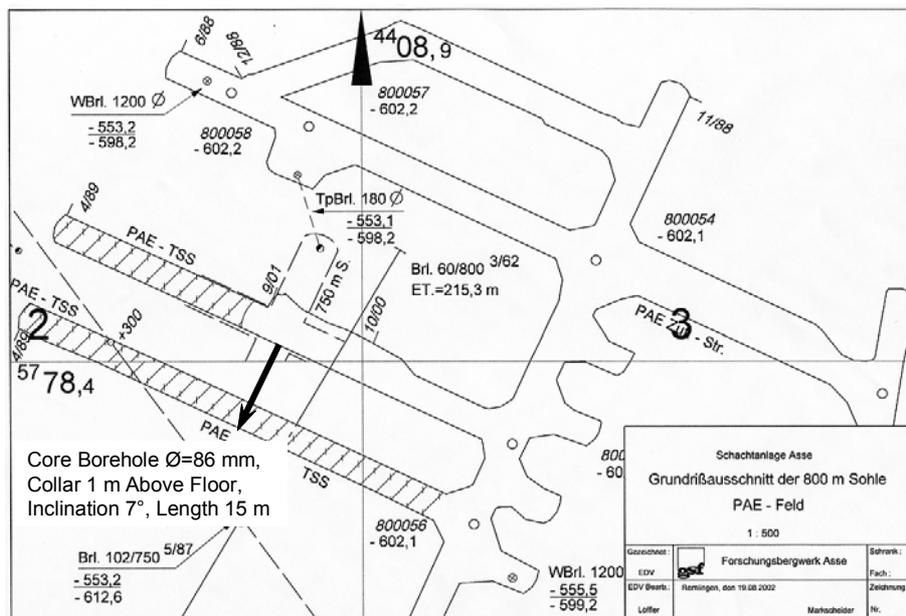


**Abb. 4-7:** Blick in die teilweise verfüllte Kammer 8b auf der 532-m-Sohle

#### 4.1.4 TSDE-Versuchsfeld, 800-m-Sohle

Im TSDE-Versuchsfeld wurde die direkte Endlagerung bestrahlter Brennelemente in Strecken in Polluxbehältern durch einen elektrischen Erhitzerversuch simuliert. Insgesamt sechs Polluxdummies waren in zwei parallelen Strecken auf der 800-m-Sohle

eingelagert und mit Salzgrus hinterfüllt worden. Von 1990 bis 1999 wurden die Behälter, der umgebende Versatz und das Gebirge aufgeheizt. Nach Ende der Heizphase wurde ein Teil der nördlichen Einlagerungsstrecke aufgewältigt (siehe Abbildung 4-8). In der Sohle wurden Makrorisse festgestellt, und es erhob sich die Frage, ob diese eine Folge der schnellen Abkühlung oder auch der Entlastung der Sohle nach Entnahme von Versatz und Behältern sei. Daher wurde ein zusätzliches Messprogramm in das Projekt aufgenommen, bei dem die Permeabilität in einem Bohrloch in der Sohle der zwar abgekühlten, aber nicht entlasteten südlichen Einlagerungsstrecke bestimmt werden sollte. Dieses Bohrloch wurde als Kernbohrung von der geöffneten nördlichen Einlagerungsstrecke schräg unter die südliche Strecke gestoßen (siehe Abbildung 4-8).



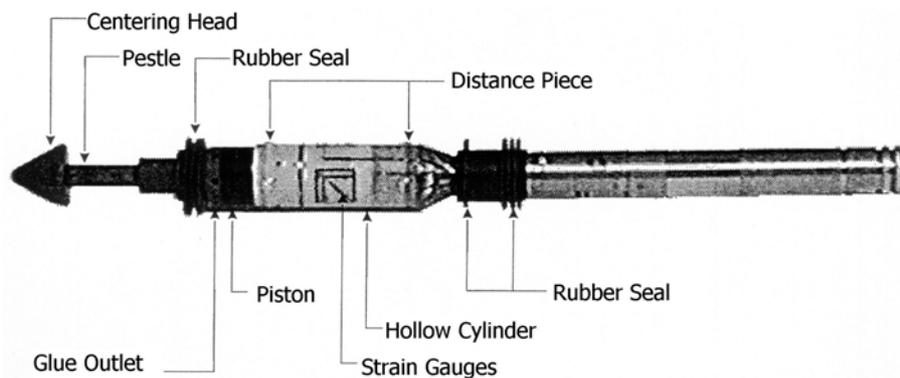
**Abb. 4-8:** Grundriss des TSDE Versuchsfeldes auf der 800-m-Sohle mit der Lage der Permeabilitätsmessbohrung

#### 4.2 Gebirgsspannungsmessungen

Zur Ableitung einer Relation zwischen Permeabilität und Spannungszustand ist es notwendig, den Spannungszustand an den Permeabilitätsmessstellen zu kennen. Dazu wurde der Spannungszustand an den Versuchsorten durch mechanische Modellierung ermittelt (siehe Kapitel 6). Zur Absicherung der Modellierungsergebnisse sollte der Spannungszustand an jeweils zwei bis drei Punkten an jedem Versuchsort durch

Überbohrversuche bestimmt werden. Das Überbohrverfahren wurde ausgewählt, weil es als einziges die Ermittlung des dreidimensionalen absoluten Spannungszustandes ermöglicht. Es wurden insgesamt acht Messungen im Auftrag der GRS von der Firma GIF (Ettlingen) durchgeführt; für die Auswertung war GRS verantwortlich.

Bei der Überbohrtechnik wird zunächst eine Sonde in ein Pilotbohrloch eingebaut. Hier handelte es sich um eine Triaxialsonde vom Typ CSIRO, die im Wesentlichen aus einem Hohlzylinder aus Kunststoff besteht, auf dem neun unterschiedlich orientierte Dehnungsmessstreifen aufgeklebt sind (siehe Abbildung 4-9). Über einen Kolben wird beim Einbau Aralditkleber aus dem Hohlzylinder in den Ringraum zwischen Sonde und Bohrlochwand gedrückt und die Sonde dadurch fixiert. Nach einigen Stunden ist die Verbindung fest.



**Abb. 4-9:** CSIRO-Triaxialsonde für Überbohrversuche

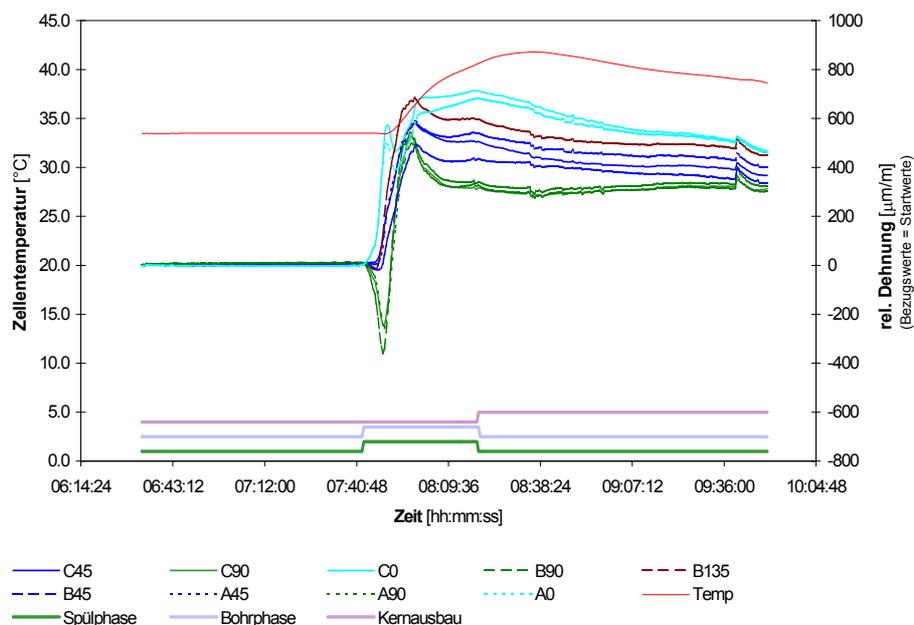
Wenn die Sonde angekoppelt ist, wird das Pilotbohrloch überbohrt, wobei die Signale der Dehnungsmessstreifen kontinuierlich über einen auf die Sonde aufgesteckten Bohrlochcomputer registriert werden. Einen Bohrkern mit eingebauter Sonde und Bohrlochcomputer zeigt Abbildung 4-10.

In Abbildung 4-11 ist eine typische Registrierung dargestellt, die sich bei der Entlastung während des Überbohrvorgangs ergibt. Bei Überbohrversuchen in idealelastischen Gesteinen ließe sich aus der Differenz der Dehnungsmesswerte vor und nach dem Überbohren unmittelbar der dreiaxiale Spannungszustand ableiten. Im Steinsalz, das ein ausgeprägtes viskoplastisches Verhalten zeigt, führt eine solche Auswertung zu falschen Ergebnissen. Stattdessen muss der Überbohrvorgang mechanisch modelliert werden und durch Variation des äußeren Spannungszustandes eine Anpassung an die Kurvenform der Registrierungen erreicht werden. Bei der BGR sind derartige

Auswertungen – allerdings für einen anderen Sondentyp – bereits erfolgreich durchgeführt worden /HEU 88, HEU 96/.



**Abb. 4-10:** Bohrkern mit eingebauter Triaxialsonde und Bohrlochcomputer



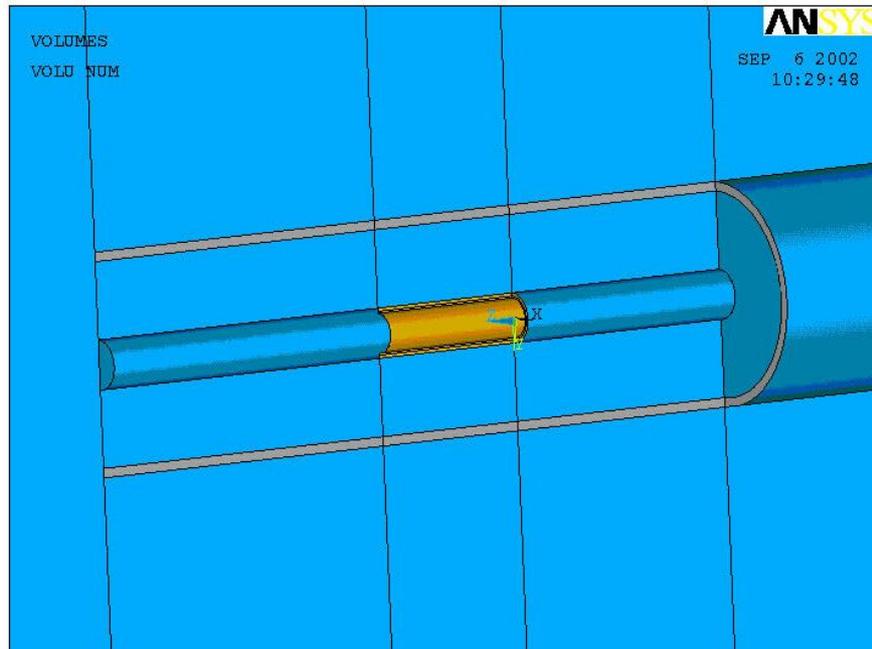
**Abb. 4-11:** Typische Registrierung eines Überbohrvorgangs mit der CSIRO-Triaxialsonde

Zur mechanischen Modellierung wurde der Finite-Element-Code ANSYS eingesetzt. An einem dreidimensionalen Modell, bestehend aus 14676 fast ausschließlich regulären Achtknoten-Elementen mit insgesamt 14583 Knoten wurde die Sequenz

- homogenes Gebirge
- Bohrlöcherstellung mit Pilotbohrung

- Installation der Probe
- schrittweises Überbohren

simuliert, wobei sowohl Ansätze mit ausschließlich sekundärem Kriechen als auch Ansätze, die primäres Kriechen mit berücksichtigen, eingesetzt wurden. Ein Ausschnitt des Modells ist in Abbildung 4-12 gezeigt.



**Abb. 4-12:** Ausschnitt des dreidimensionalen Modells zur Simulation eines Überbohrvorgangs mit der CSIRO-Triaxialsonde

Trotz des erheblichen Modellierungsaufwandes war es nicht möglich, die registrierten Dehnungen während des Überbohrvorganges zu reproduzieren. Die Auswertung der Überbohrversuche musste daher als gescheitert betrachtet werden. Für die mechanische Modellierung der Versuchsorte bedeutet dies, dass eine direkte Kontrolle durch Messergebnisse fehlt, obwohl Anhaltspunkte bezüglich der Randbedingungen für diese Modellierung vorhanden sind (siehe Kapitel 6).

## 4.3 Permeabilitätsmessungen mit Gas

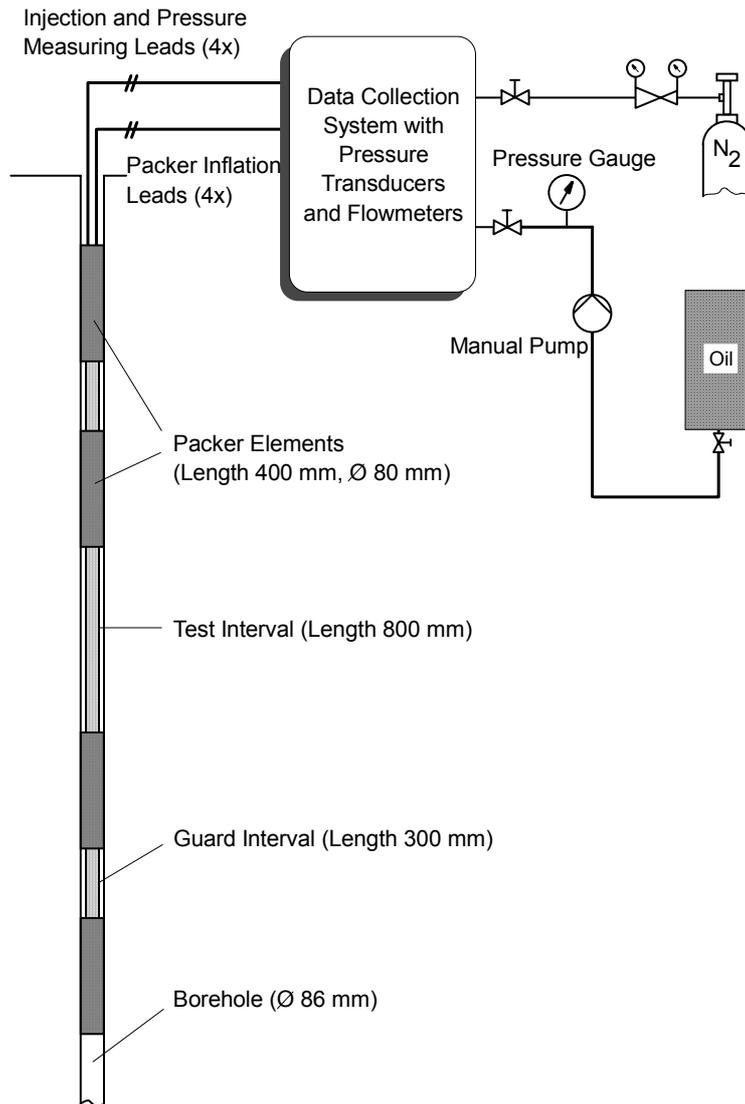
### 4.3.1 Mess- und Auswerteverfahren

Die Permeabilitätsmessungen wurden als Gasinjektionstests mit einer hydraulisch angekoppelten Vierfachpackersonde in 86 mm durchmessenden Bohrlöchern durchgeführt. Die Länge der Dichtelemente beträgt je 40 cm, das zentrale Testintervall hat eine Länge von 80 cm und die beiden äußeren Intervalle eine Länge von je 30 cm (siehe Abbildung 4-13). Für die Messungen am Dammjoch wurde die Sonde zerlegt und als Doppelpackersonde eingesetzt, da ihre Länge sonst zu groß gewesen wäre. Die Gasinjektion wurde mit Stickstoff über einen Durchflusscontroller mit typischer Rate von 400 ml/min und maximalem Druck von 1.5 bis 2 MPa vorgenommen. Bei sehr hoher Permeabilität konnte die Injektionsrate auf maximal 2000 ml/min erhöht werden. Der Druck in den Testintervallen wurde während der Injektionsphase und der darauf folgenden Einschussphase über ein PC-basiertes Datenerfassungssystem (Hersteller: Geodata GmbH, Garbsen), das sich bereits im Vorgängerprojekt „Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge“ /WIE 98/ bewährt hat, registriert. Es besteht aus einem Zehnkanaal-Hydraulik/Pneumatikbaugruppenträger mit Druckaufnehmern und Durchflussmessern und einem staubgeschützten Datenerfassungsrechner und wurde um einen elektronischen Durchflussregler erweitert.

Die registrierten Messwerte wurden in der Regel mit Hilfe des Programms Weltest 200 /WEL 97/ ausgewertet. Es berechnet die analytische Lösung der Diffusionsgleichung (diese Option wurde benutzt) oder erlaubt die ein- oder zweidimensionale Modellierung der Druckverteilung. Iterativ wird dann die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Druckverläufen minimiert. Bei Messungen mit Gas wird dabei wegen der hohen Druckabhängigkeit der Materialdaten zunächst der Druck in den so genannten Pseudodruck  $m(p)$  transformiert:

$$m(p) = 2 \int_{p_i}^p \frac{p}{\mu(p)z(p)} dp$$

mit dem Anfangsporendruck  $p_i$ , der Viskosität  $\mu(p)$  und dem z-Faktor  $z(p)$ .



**Abb. 4-13:** Vierfachpackersonde zur Durchführung von Gasinjektionstests

Die Parameter, durch die der berechnete Druckverlauf bestimmt wird, sind die Gebirgspermeabilität, die Porosität, der so genannte Wellbore-Storage-Koeffizient, und der Skinfaktor.

Der Skinfaktor beschreibt eine Zone erhöhter oder verringerter Permeabilität nahe der Bohrlochwand, die zum Beispiel durch den Bohrvorgang erzeugt worden sein kann. Derartige Effekte wurden in den vergleichsweise kleinen Messbohrlöchern nicht nachgewiesen, so dass ein Skinfaktor bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurde.

Die berechneten Druckkurven sind ausgesprochen unempfindlich gegenüber Änderungen der Porosität. Daher wurde die Porosität konstant auf 0.2% gesetzt. Dies ist ein sinnvoller Wert für ungestörtes Steinsalz, während die Porosität in dilatanten

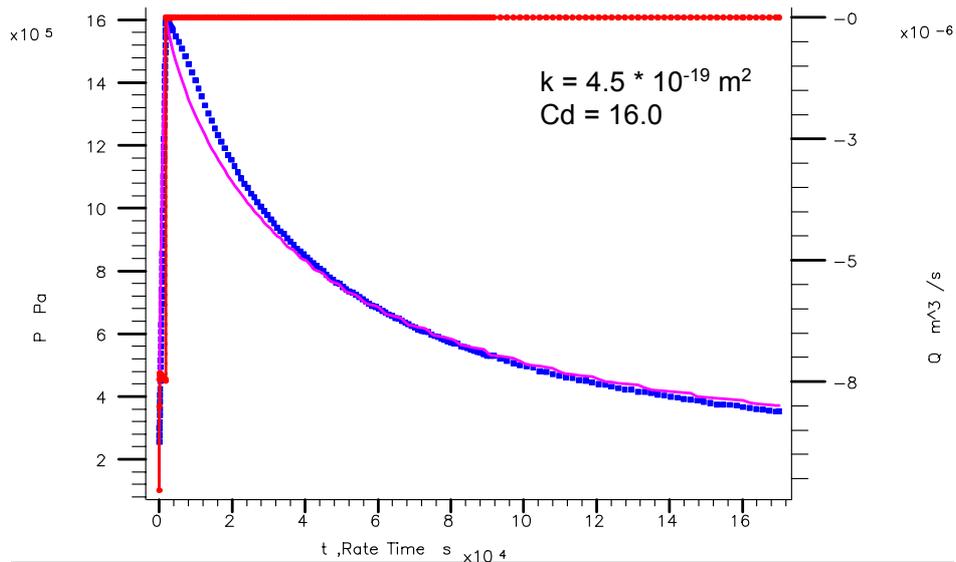
Bereichen höher sein wird, aber selbst eine Erhöhung der Porosität um den Faktor zehn hat bei der Kurvenanpassung keinen Einfluss auf den optimalen Permeabilitätswert.

Wellbore Storage ist während der Injektionsphase bedeutsam und steuert den Maximaldruck, der während der Injektion erreicht wird. Die Kurvenform, insbesondere während der Einschlussphase, wird durch die Permeabilität bestimmt.

Die Permeabilität wurde jeweils unter Annahme eindimensionalen radialen Flusses optimiert. Andere Autoren /HAE 01/ empfehlen die Zugrundelegung von zweidimensionalem Fluss bei isotroper Permeabilität. Dies führt grundsätzlich zu niedrigeren Permeabilitätswerten und ist für das ungestörte Gebirge sinnvoll. Wie in Abschnitt 4.4 gezeigt wird, ist die Permeabilität in der Auflockerungszone jedoch hochgradig anisotrop. Während eine eindimensionale Auswertung (Fluss quer zur Strecke vernachlässigbar gegenüber Fluss parallel zur Strecke) hier eine obere Grenze der Permeabilität liefert, führt die zweidimensional-isotrope Auswertung zu einer Unterschätzung der Permeabilität parallel zur Strecke. Für die Auflockerungszone erhält man daher bei eindimensionaler Auswertung den konservativeren Wert.

Eine typische Messkurve für mittlere Permeabilität zeigt Abbildung 4-14. Man erkennt, dass eine sehr gute Anpassung erreichbar ist; Abweichungen der angepassten Permeabilität um weniger als 10 % führen bereits zu erheblich schlechteren Anpassungen. Die Genauigkeit wird nicht durch die Anpassung bestimmt, sondern durch die Modelleinschränkung (s. o.) und die Dichtheit des Messsystems.

Bei sehr geringer Permeabilität sind zwar auch sehr gute Kurvenanpassungen erreichbar, aber der Druckverlust im Messsystem verfälscht die Druckkurve. Zur Abschätzung dieses Effektes wird die Sonde vor Messbeginn in einem Stahlrohr angekoppelt, Gas in die Messintervalle injiziert und der Druckabfall über der Zeit gemessen. Auch aus diesen Kurven lassen sich „Permeabilitäten“ bestimmen. Untersuchungen im Rahmen des Vorgängerprojektes ALOHA /WIE 98/ zeigten, dass gemessene Permeabilitätswerte von  $10^{-21} \text{ m}^2$  und darunter nur als obere Grenze zu verstehen sind; die tatsächliche Permeabilität kann in diesem Bereich durchaus wesentlich kleiner sein. Entsprechend werden Gebirgsbereiche mit einer Permeabilität in der Größenordnung von  $10^{-21} \text{ m}^2$  und darunter als ungestörtes Gebirge interpretiert.



**Abb. 4-14:** Gemessene Druckkurve (blau) und Durchflusskurve (rot) sowie angepasste Druckkurve (pink) für eine typische Messung im mittleren Permeabilitätsbereich (532-m-Sohle)

Bei einigen Messungen, insbesondere in der Sohle des TSDE-Versuchsfeldes, war die Permeabilität so hoch, dass eine exakte Auswertung nicht möglich war. Die Gasinjektion führte zu einem konstanten Druckanstieg, der bei Injektionsende sofort auf Null zurück ging. Der Druckanstieg war also nur durch den Fließwiderstand des Gesamtsystems bestimmt. Nimmt man an, dass der Druckanstieg ausschließlich durch einen stationären Fluss in das Gebirge verursacht wird (d. h. man vernachlässigt den Fließwiderstand der Apparatur), so erhält man einen unteren Grenzwert für die Permeabilität durch

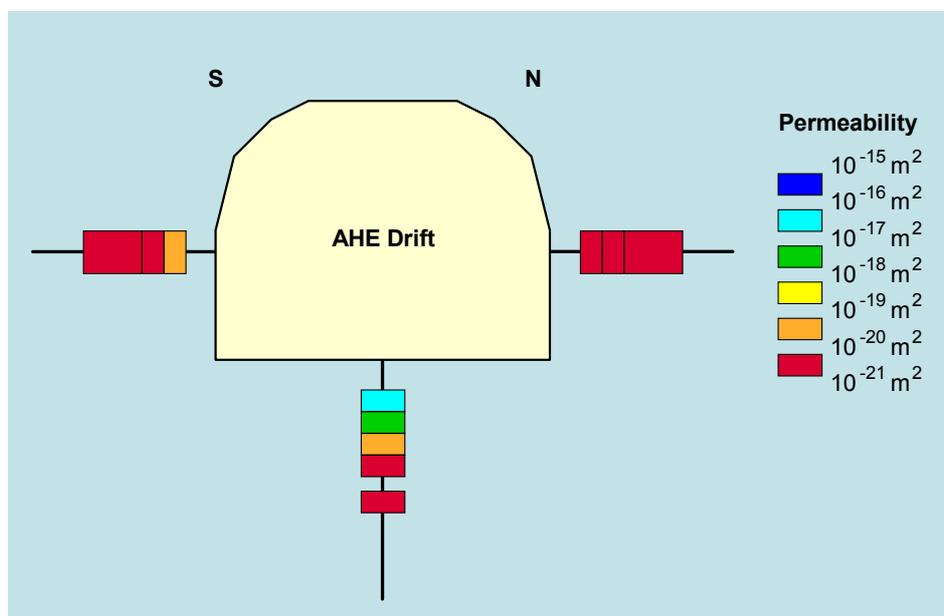
$$k = \frac{\eta_D}{2\pi h \Delta p} \frac{dV}{dt} \ln\left(\frac{r_e}{r_B}\right)$$

mit der Permeabilität  $k$ , der dynamischen Viskosität  $\eta_D$  ( $1.88 \cdot 10^{-10}$  bar·s) von Stickstoff, der Testintervalllänge  $h$  (0.8 m bzw. 0.3 m), der Fließrate  $\frac{dV}{dt}$  und dem Bohrlochradius  $r_B$  (0.043 m). Der effektive Radius  $r_e$  ist der Radius, bei dem der Druck auf Umgebungsdruck zurückgegangen ist. Dieser Radius ist unbekannt, aber da er als Argument im natürlichen Logarithmus steht, ist die Permeabilität relativ unempfindlich gegenüber  $r_e$ . Zur Auswertung wurde  $r_e$  auf 1 m gesetzt; da hier nur eine grobe Abschätzung durchgeführt wird, ist dies zulässig.

### 4.3.2 Permeabilität im Bereich der AHE-Strecke

In den beiden horizontalen und den beiden vertikalen Permeabilitätsmessbohrlöchern der AHE-Strecke (siehe Abschnitt 4.1.1) wurden Gasinjektionstests, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, durchgeführt, um die Ausdehnung und Permeabilität der EDZ zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 4-15 zusammengefasst. Während in den Streckenstößen keine signifikante Permeabilitätserhöhung in Tiefen größer als 0.6 m festgestellt wurde, befindet sich unter der Sohle eine ausgeprägte Auflockerungszone von 1 bis 1.2 m Ausdehnung, mit einer maximalen gemessenen Permeabilität von  $4 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  in 0.6 m Tiefe. Die Messergebnisse der beiden Vertikalbohrlöcher waren sehr ähnlich, so dass sie hier nicht getrennt dargestellt wurden.

Packertests in geringeren Tiefen als 0.6 m konnten wegen der Länge der Dichtelemente nicht durchgeführt werden. Grundsätzlich sind konventionelle Packertests für extrem stoßnahe Messungen nicht geeignet. Daher wurde eine spezielle Anordnung für hohlraumnahe Messungen entwickelt und in der AHE-Strecke eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abschnitt 4.4 dargestellt.

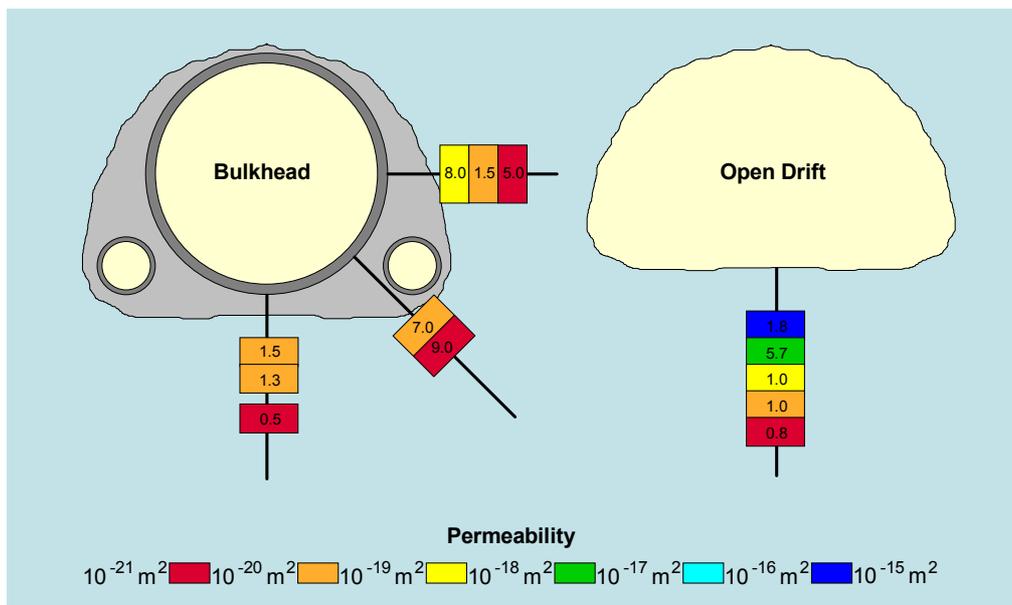


**Abb. 4-15:** Permeabilität in der Umgebung der AHE-Strecke (die Farbe der Rechtecke entspricht der Größenordnung der Permeabilität)

### 4.3.3 Permeabilität im unausgebauten und ausgebauten Bereich der Dammjochstrecke

Die Dammjochstrecke (Abschnitt 4.1.2) war für die Untersuchungen besonders interessant, da hier bereits 1914 ein stützender Ausbau eingebaut worden war und der Spannungszustand (siehe Abschnitt 6.2) die mögliche Verheilung der Auflockerungszone begünstigen sollte.

Da der Innendurchmesser des Tübbingausbaus nur 2.3 m beträgt, wurde die Vierfachpackersonde für die Messungen in der Mitte geteilt und als Doppelpackersonde eingesetzt. Die Permeabilitätsmessungen wurden wieder als Gasinjektionstests durchgeführt und entsprechend Abschnitt 4.3.1 ausgewertet. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4-16 zusammengefasst.



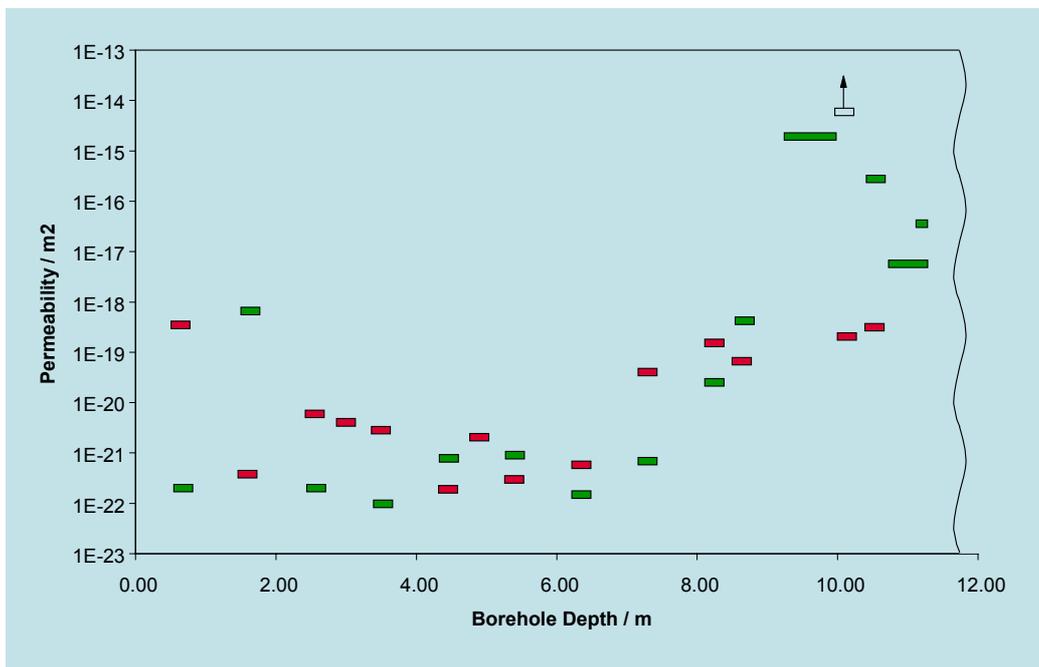
**Abb. 4-16:** Gemessene Permeabilitätswerte in den Bohrlöchern um den Stahlbau (links) und unter der offenen Strecke (rechts); die Farbe der Rechtecke entspricht der Größenordnung der Permeabilität, die Zahlenwerte in den Rechtecken dem Multiplikator

Unter der offenen Strecke befindet sich eine typische Auflockerungszone (Abb. 4-16, rechts) mit einer Ausdehnung von 1.5 m und einer Permeabilität, die bis über  $10^{-16} m^2$  ansteigt. Um den ausgebauten Teil der Strecke (Abb. 4-16, links) ist die Situation vollkommen anders. Mit Ausnahme der streckennächsten Messung im Horizontalbohrloch liefern alle Messungen Permeabilitäten unterhalb von  $10^{-19} m^2$  und zeigen

damit zwar eine gegenüber dem ungestörten Steinsalz erhöhte Permeabilität, die aber deutlich geringer als die der üblichen streckennahen Auflockerungszone ist. Dies ist offenbar eine Folge des Unterschiedes im Spannungszustand, der in Abschnitt 6.2 diskutiert wird. An Hand der Messwerte kann allerdings nicht entschieden werden, ob eine tatsächliche Verheilung der EDZ mit Rekristallisation stattgefunden hat oder ob Mikrorisse nur durch die Spannung zugeedrückt worden sind. Laboruntersuchungen an Kernproben aus den Messbohrlöchern unterstützen die letztere Annahme (siehe Kapitel 5).

#### 4.3.4 Permeabilität im Pfeiler zwischen Kammer 8 und 8b

Im Pfeiler zwischen den Kammern 8 und 8b auf der 532-m-Sohle wurden Packertests zur Permeabilitätsbestimmung in zwei horizontalen Bohrlöchern, die von Kammer 8b in Richtung Kammer 8 gebohrt worden waren, durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1.3). Versuchsdurchführung und –auswertung entsprechen Abschnitt 4.3.1. Die Ergebnisse der Messungen in beiden Bohrlöchern sind in Abbildung 4-17 zusammengefasst.



**Abb. 4-17:** Gemessene Permeabilitätswerte im Pfeiler zwischen Kammer 8b (linke Begrenzung) und Kammer 8 (rechte Begrenzung); rot: Messwerte des östlichen Bohrlochs, grün: Messwerte des westlichen Bohrlochs

Das Zentrum des Pfeilers scheint mehr oder weniger ungestört. Eine Auflockerungszone deutet sich nahe Kammer 8b (links) an, ist aber wesentlich weniger ausgeprägt als der gestörte Bereich, der von Kammer 8 (rechts) etwa 4 m in den Pfeiler hinein reicht. Die hohe Permeabilität bei etwa 10 m Bohrlochtiefe im westlichen Bohrloch wird vermutlich durch gebrochene Anhydritlagen in diesem Bereich verursacht. Anhydritbänder konnten dort mittels einer Bohrlochkamera festgestellt werden, während ein ursprünglich vermuteter Makroriss nicht gefunden wurde.

Der Unterschied in der Ausprägung der Auflockerungszonen an den beiden Seiten des Pfeilers ist keine Folge der Teilverfüllung von Kammer 8b in 2000, sondern wird durch einen Unterschied im Spannungszustand bewirkt, der daher rührt, dass über und unter Kammer 8b keine Hohlräume vorhanden sind, während offene Kammern über und unter Kammer 8 liegen, mit Schweben von jeweils 6 m Mächtigkeit. Dies wird in Abschnitt 6.3 gezeigt.

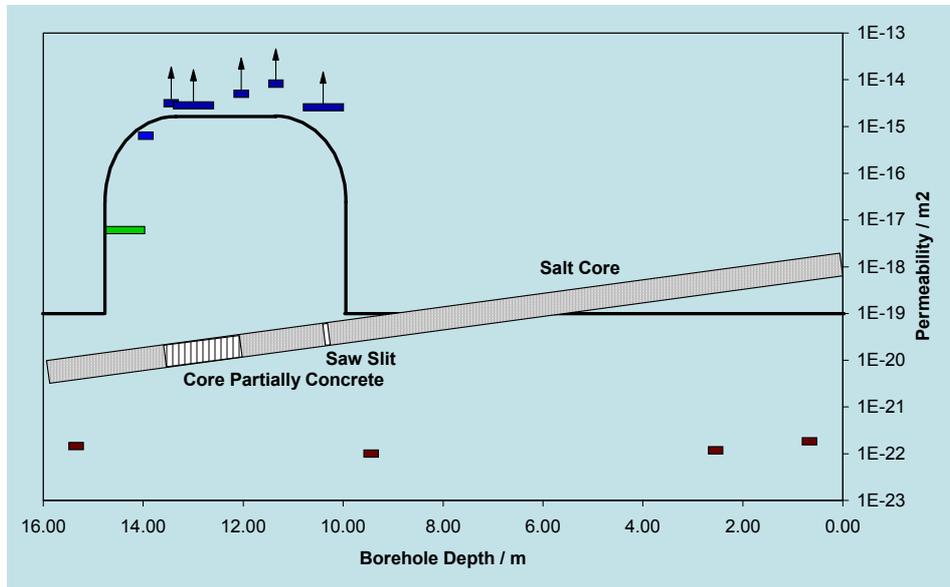
#### **4.3.5 Permeabilität in der Sohle des TSDE-Versuchsfeldes**

Im TSDE-Versuchsfeld wurden Gasinjektionstests in einer Kernbohrung durchgeführt, die von der geöffneten nördlichen unter die südliche Strecke gestoßen wurde (siehe Abschnitt 4.1.4). Dabei sollte die Frage geklärt werden, ob die in der geöffneten Strecke durch Messungen von G.3S festgestellte drastische Permeabilitätssteigerung eine Folge der Abkühlung oder der Entlastung nach Deinstallation der Erhitzer war. Das Messbohrloch ist leicht geneigt und liegt 0.2 m (am nördlichen Stoß) bis 0.8 m (am südlichen Stoß) tief unter der Sohle der südlichen Erhitzerstrecke (siehe Abschnitt 4.1.4).

Der erbohrte Kern wies einen Sägeschlitz in 10.4 m Bohrlochtiefe (etwa 0.4 m vom nördlichen Stoß der verfüllten Strecke) auf und bestand zwischen 12.1 und 13.6 m Tiefe teilweise aus Beton (siehe Abbildung 4-18). Dies sind Folgen der 1989/90 durchgeführten Installationsarbeiten im TSDE-Feld. Der Rest des Kerns war in normalem Zustand.

Abbildung 4-18 zeigt die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen im Überblick. Im bzw. unterhalb des Pfeilers zwischen den beiden Versuchsstrecken und unter dem südlichen Stoß der südlichen Versuchsstrecke wurden Permeabilitäten unterhalb von  $10^{-21} \text{ m}^2$  festgestellt. In der Sohle der südlichen Strecke ist die Permeabilität so hoch, dass, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, nur eine untere Grenze angegeben werden

konnte, die oberhalb von  $10^{-15} \text{ m}^2$  liegt. Die tatsächliche Permeabilität wird noch erheblich höher sein (in Abbildung 4-18 durch die Pfeile angedeutet). Nur nahe dem südlichen Stoß, wo das Messbohrloch tiefer (etwa 0.7 bis 0.8 m) unter der Sohle liegt, wurden Permeabilitäten von  $10^{-18} \text{ m}^2$  bis  $10^{-15} \text{ m}^2$  gemessen.



**Abb. 4-18:** Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen im TSDE-Feld

Da die extrem hohen Permeabilitäten nicht nur im durch Installationen gestörten Bohrlochbereich, sondern auch um 11 m Bohrtiefe (Abb. 4-18) festgestellt wurden, kann man davon ausgehen, dass der primäre Grund für Rissbildung die Abkühlung war. Die Entfernung von Versatz und Erhitzern kann höchstens einen zusätzlichen Einfluss haben.

#### 4.4 Permeabilität im Hohlraumnahbereich

Die Bestimmung der Permeabilität im unmittelbaren Nahbereich von Hohlräumen ist mit konventionellen Packertests sehr problematisch, da eine ausreichende Packerlänge zur Abdichtung des Bohrloches zum Bohrlochmund hin erforderlich ist. Die Annahme eindimensionalen radialen Flusses während des Injektionstests würde dadurch verletzt, dass der Großteil des Injektionsfluids direkt in die offenen Strecke abfließt. Auswertung unter Berücksichtigung eines zweidimensionalen Flusses löst das Problem nicht, da die Permeabilität im unmittelbaren Streckensaum hochgradig anisotrop sein wird. Die interessierende Permeabilität in paralleler Richtung zur Strecke kann nur bestimmt werden, wenn der Fluss in die Strecke hinein unterbunden wird.

Dazu wurde ein System entwickelt, bei dem durch eine auf die Sohle geklebte und verankerte Kunststoffplatte mehrere 0.1 bis 0.7 m lange Bohrlöcher zur Strecke hin abgedichtet wurden. Diese Bohrlöcher wurden zu Injektionstests mit Gas und Salzlösung eingesetzt.

#### 4.4.1 Beschreibung der Messanordnung

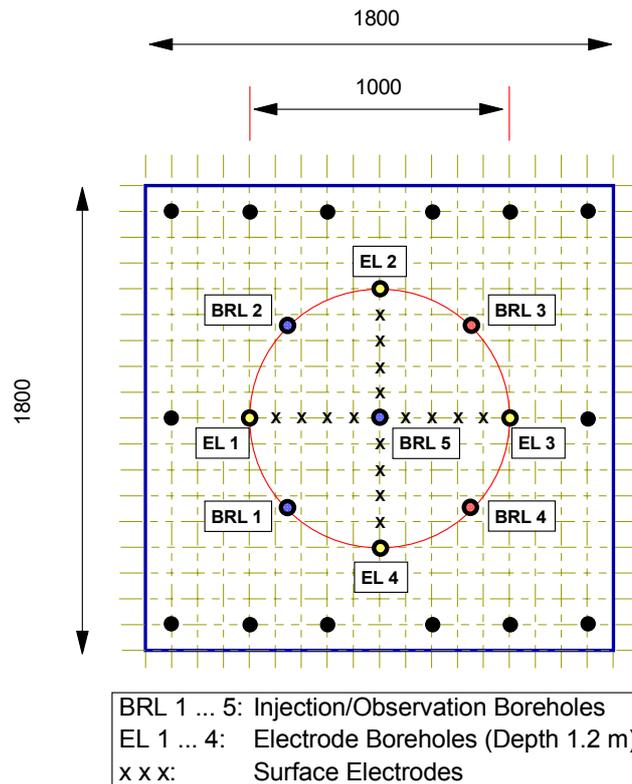
Die Messanordnung wurde auf der Sohle der AHE-Strecke in unmittelbarer Nähe der beiden vertikalen Bohrlöcher, die für konventionelle Packertests eingesetzt worden waren (Abschnitt 4.3.2), installiert, um die mit dem neuen System erhaltenen Messergebnisse mit den übrigen vergleichen zu können.

Das System besteht aus einer quadratischen Kunststoffplatte von 1.8 m Kantenlänge, die in eine Lage aus frischem Salzbeton gelegt und mit der Sohle verschraubt wurde. Nach Abbinden des Salzbetons wurde eine dichte Versiegelung der Sohle erreicht. Die Versiegelungsmethode durch das System Salzbeton/Kunststoffplatte war zuvor im GRS-Labor geprüft worden.

Nach Installation der Platte und Abbinden des Salzbetons wurden fünf Bohrlöcher in die Sohle unter der Platte gebohrt (siehe Abbildung 4-19). Die Bohrlochabmessungen sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt.

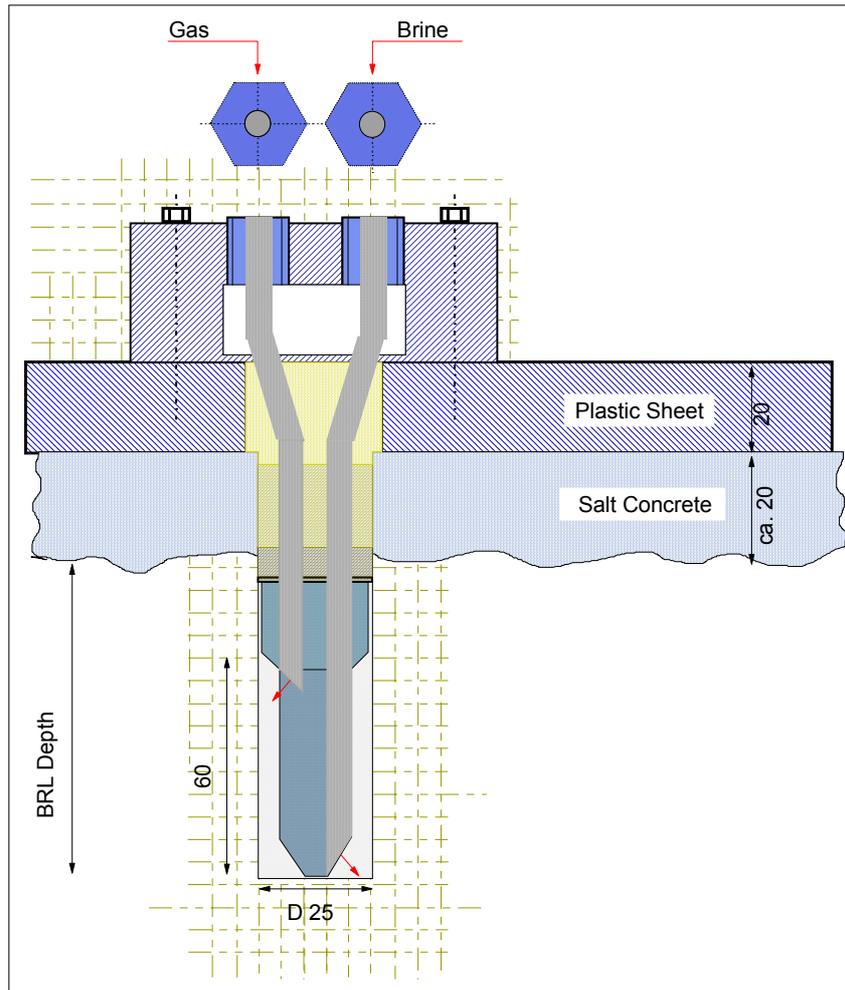
**Tabelle 4-1:** Dimensionen der Injektions-/Beobachtungsbohrlöcher BRL1 – BRL5

Bohrloch	Durchmesser / mm	Gesamttiefe / mm	Mächtigkeit Platte/Salzbeton / mm	Tiefe im Salz / mm	Testintervalllänge / mm
BRL1	25	185	79	106	60
BRL2	25	185	75	110	60
BRL3	25	562	69	493	60
BRL4	25	820	82	738	60
BRL5	25	188	88	100	60



**Abb. 4-19:** Anordnung der Bohrlöcher des Systems für hohlraumnahe Messungen

Jedes der fünf Bohrlöcher ist im Tiefsten mit einem Stopfen versehen, der ein 60 mm langes, offenes Testintervall festlegt sowie Anschlüsse für zwei Injektions-/Entlüftungsleitungen aufweist (siehe Abbildung 4-20). Das Bohrloch oberhalb des Stopfens ist mit Kunstharz verfüllt, und in der Platte oberhalb des Bohrlochs befindet sich eine Verschraubung. Abbildung 4-21 zeigt ein Foto der Stopfen. Auf dem Foto Abbildung 4-22 ist die installierte Kunststoffplatte mit den Anschlüssen für die Injektionstests zu sehen.



**Abb. 4-20:** Auslegung eines Injektions-/Beobachtungsbohrlochs des Systems für hohlraumnahe Messungen



**Abb. 4-21:** In den Bohrlöchern eingesetzte Stopfen



**Abb. 4-22:** Auf der Sohle der AHE-Strecke installierte Kunststoffplatte mit den Anschlussleitungen für Injektionstests

Nach der Durchführung von Gasinjektionstests in den Bohrlöchern wurde das System erweitert, um die Ausbreitung von Salzlösung bei Flüssigkeitsinjektionstests durch geoelektrische Messungen verfolgen zu können. Vier Bohrlöcher (EL1 – EL4) wurden gemäß Abbildung 4-19 durch die Platte in die Sohle gebohrt. Jedes Bohrloch wurde mit 13 Elektroden mit einem Abstand von 0.1 m bestückt. Zwischen den Bohrlöchern wurden Oberflächenprofile, ebenfalls mit einem Elektrodenabstand von 0.1 m, installiert, wobei ebenfalls durch die Kunststoffplatte gebohrt wurde. Die Bohrlöcher wurden mit Salzbeton verfüllt, wodurch die Bohrlochelektroden ans Gebirge angekoppelt wurden. Die Oberflächenelektroden wurden ebenfalls mittels Betonierung angekoppelt.

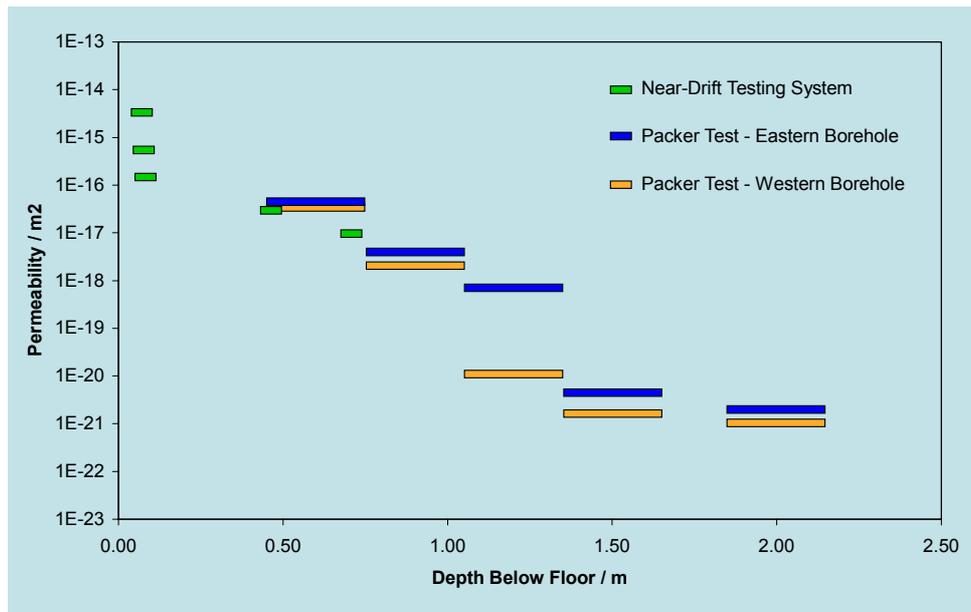
#### 4.4.2 Gasinjektionstests

Für die Gasinjektionstests wurde eine PC-basierte Datenerfassung mit Druckaufnehmern und einem programmierbaren Durchflusscontroller eingesetzt. Die Druckaufnehmer sind an die fünf Testintervalle angeschlossen. Jedes der Testintervalle konnte als Injektionsintervall fungieren, indem eine Stickstoffflasche über den Durchflusscontroller angeschlossen wurde. In allen fünf Testintervallen wurden Gasinjektionstests mit einer Injektionsrate von 200 ml/min durchgeführt. In den drei Intervallen in unmittelbarer Sohlennähe (BRL1, BRL2 und BRL5, siehe Tabelle 4-1) wurde bei der Injektion ein stationärer Zustand bei einem Druck von 0.39 MPa, 0.72 MPa bzw. 0.2 MPa erreicht. Bei den tiefer gelegenen Intervallen BRL3 und BRL4 (0.46 bzw. 0.71 m unter der Sohle) wurde bis zu einem Maximaldruck von 1 MPa injiziert, ohne dass ein stationärer Zustand erreicht wurde. Die Auswertung der Druckverläufe von Injektions- und nachfolgender Einschlussphase erfolgte in der gleichen Weise wie die der konventionellen Packertests (siehe Abschnitt 4.3.1) und lieferte für die sohlenahen Intervalle  $5.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (BRL1),  $1.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (BRL2) und  $3.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (BRL5) sowie  $3.0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  (BRL3) und  $1.0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  (BRL4) für die beiden tiefer gelegenen Intervalle. Bei allen Intervallen wurde der gleiche Wellbore Storage Koeffizient ( $0.0014 \text{ m}^3/\text{bar}$ ) ermittelt, was angesichts der identischen Intervalldimensionen plausibel ist.

Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen als Funktion der Tiefe unter der Sohle sind in Abbildung 4-23 dargestellt, zusammen mit den Permeabilitätswerten, die bei den konventionellen Packertests in der Sohle (siehe Abschnitt 4.3.2) ermittelt wurden. Für vergleichbare Tiefen liefern beide Methoden übereinstimmende Ergebnisse.

Die Gasinjektionstests wurden nach der Durchführung von Flüssigkeitsinjektionstests im Zentralbohrloch BRL5 (siehe Abschnitt 4.4.3) wiederholt, um festzustellen, ob der Einfluss einer Teilsättigung des Porenraums durch die Flüssigkeitsinjektion auf die Permeabilität gegenüber Gas nachweisbar wäre.

Bei den tiefer gelegenen Testintervallen BRL3 und BRL4 wurde keine Beeinflussung erwartet, da die geoelektrischen Messungen (siehe Abschnitt 4.4.4) gezeigt hatten, dass die gesamte injizierte Salzlösung in geringerer Tiefe verblieb. Die hier ermittelten Permeabilitäten waren tatsächlich auch identisch mit den vor der Flüssigkeitsinjektion gemessenen.



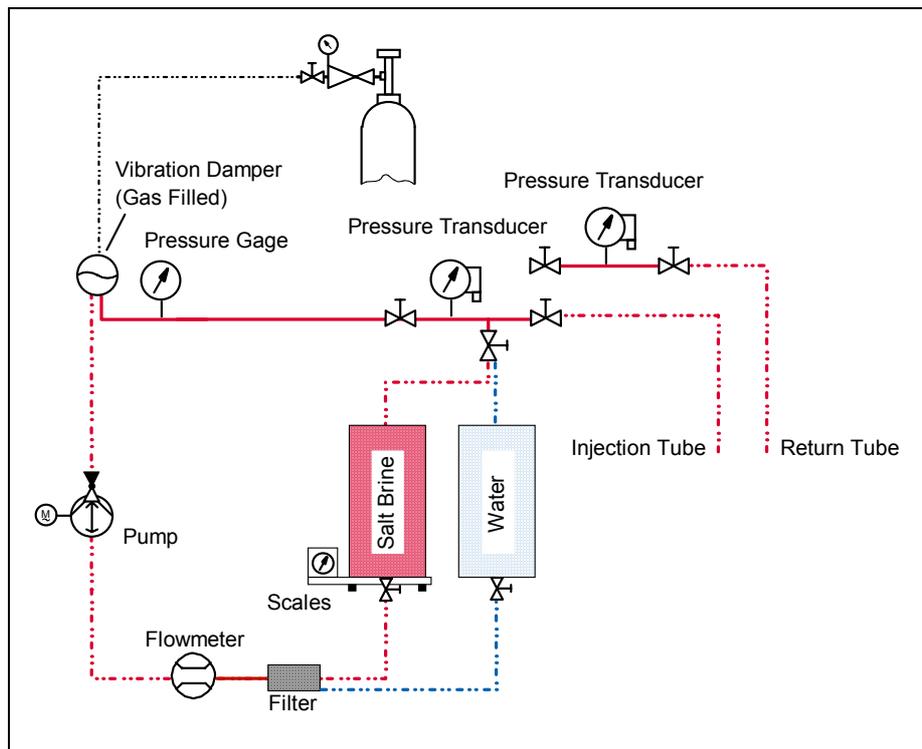
**Abb. 4-23:** Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit dem hohlraumnahen Messsystem (grün) und mit der konventionellen Packersonde (blau und orange), die Länge der Balken entspricht der Länge der Messintervalle

Nahe den drei sohlennahen Testintervallen BRL1, BRL2 und BRL5 kann auf Grund der Flüssigkeitsinjektion von einer Teilsättigung des Porenraums mit Salzlösung ausgegangen werden. Trotzdem wurde keine Verringerung der Gaspermeabilität festgestellt. Darüber hinaus konnte keine Salzlösung aus den Testintervallen herausgedrückt werden, als die Intervalle mit Gas gespült wurden. Dies ist ein Hinweis auf große Porendimensionen und einen geringen Sättigungsgrad.

#### 4.4.3 Flüssigkeitsinjektion

Das Flüssigkeitsinjektionssystem war im vorlaufenden Projekt ALOHA /WIE 98/ entwickelt und erfolgreich eingesetzt worden. Den Aufbau zeigt Abbildung 4-24. Salzlösung kann über ein Filter und ein Durchflussmessgerät in das Testintervall gepumpt werden. Sowohl Injektions- als auch Rückleitung sind mit direkt anzeigenden Druckaufnehmern ausgestattet. Die Rückleitung wird zur Entlüftung des Testintervalls benötigt. Die injizierte Lösungsmenge wird über das Durchflussmessgerät gemessen; zusätzlich wird sie über eine Waage, auf der sich der Lösungsbehälter befindet, bilanziert. Pumpe und Durchflussmessgerät sind für Injektionsraten zwischen 200 und 1800 ml/min ausgelegt; der maximal mögliche Injektionsdruck beträgt 10 MPa. Anstelle des Salzlösungsbehälters kann ein Süßwasserbehälter angeschlossen werden, um die

Anlage nach der Injektion zu spülen. Durchflussmessgerät und Druckaufnehmer sind an ein PC-basiertes Datenerfassungssystem angeschlossen.



**Abb. 4-24:** Flüssigkeitsinjektionssystem

Zur Flüssigkeitsinjektion wurde nur das zentrale Testintervall BRL5 eingesetzt. Während drei Injektionskampagnen (siehe Tabelle 4-2) wurden insgesamt 10850 g (8.8 l) gesättigter Salzlösung (IP9) bei Raten von 1400 bis 1800 ml/min injiziert. Die Idee war, bei den ersten Injektionen den Porenraum aufzusättigen und die letzte Injektion hinsichtlich Permeabilität gegenüber Flüssigkeit auszuwerten, was ähnlich wie bei den Gasinjektionstests durchgeführt werden kann und im Projekt ALOHA /WIE 98/ durchgeführt wurde.

**Tabelle 4-2:** Daten zur Flüssigkeitsinjektion

	Datum	Dauer / min	Mittlere Fließrate / ml/min	Injiziertes Volumen / ml
Test 1	26.11.2002	55	1500	1180
Test 2	27.11.2002	160	1500	4060
Test 3	03.12.2002	113	1800	3560

Bei keiner der Injektionskampagnen wurde ein Druckanstieg im Testintervall festgestellt. Dies bedeutet, dass die Salzlösung als benetzende Phase schneller in den

Porenraum gesogen wurde, als sie von der Pumpe nachgeliefert werden konnte; im Gegensatz zu früheren Injektionstests in 1 m Bohrlochtiefe /WIE 98/ mit der gleichen Apparatur. Als Folge war der Porenraum nur teilgesättigt. Ohne Druckaufbau im Testintervall konnte auch kein Permeabilitätswert ermittelt werden, der bei Teilsättigung überdies von geringer Aussagekraft gewesen wäre.

Während der zweiten Injektionsphase wurden feuchte Bereiche auf der Sohle am Rand der Kunststoffplatte nahe den Bohrlöchern EL1 und EL3 (siehe Abbildung 4-19) festgestellt. Während der dritten Injektionsphase dehnten sich diese Bereiche aus. Diese Beobachtung stützt die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen (siehe Abschnitt 4.4.4).

#### **4.4.4 Geoelektrische Messungen**

Für die geoelektrischen Messungen wurde eine Gleichstromgeoelektrik-Apparatur eingesetzt, die im Wesentlichen aus folgenden Komponenten besteht:

- Widerstandsmessgerät Syscal R2,
- Gleichspannungsquelle,
- Sondenmultiplexer mit Erweiterungsrahmen,
- Mess- und Steuerungsrechner.

Die einzelnen Komponenten befinden sich in einem 19-Zoll-Schrank (siehe Abbildung 4-25). Bis zu 240 Elektroden können angeschlossen werden. Eine detaillierte Beschreibung des Systems findet sich in /YAR 89/. Das System wurde bereits in anderen Projekten erfolgreich eingesetzt /WIE 98/.

Die elektrische Leitfähigkeit poröser Gesteine wird durch die Porenflüssigkeit bestimmt. Daher sind geoelektrische Messungen zur Bestimmung der Resistivität (des spezifischen elektrischen Widerstandes) und ihrer Änderungen geeignet, um Änderungen im Wassergehalt solcher Gesteine zu überwachen. Für Steinsalz existiert eine umfangreiche Datenbasis zur Relation zwischen Resistivität und Wassergehalt (siehe Abbildung 4-26).



Abb. 4-25: Geoelektrische Messapparatur

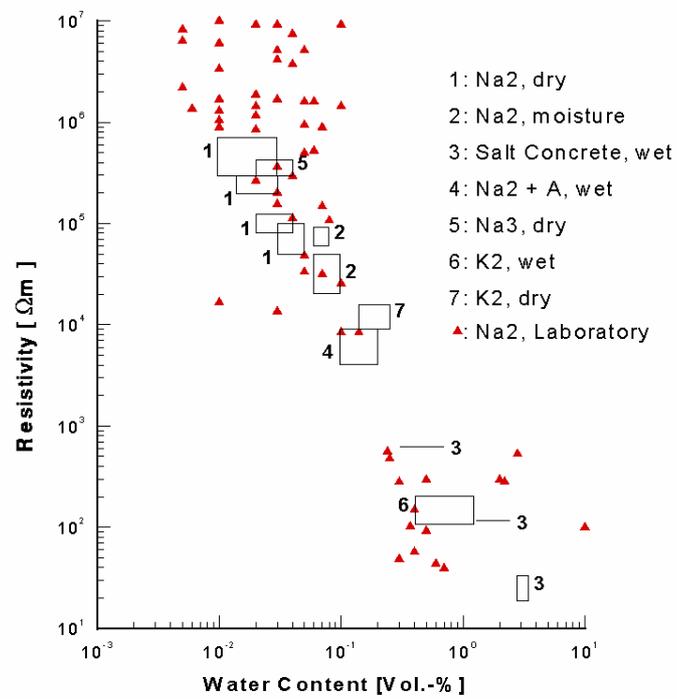


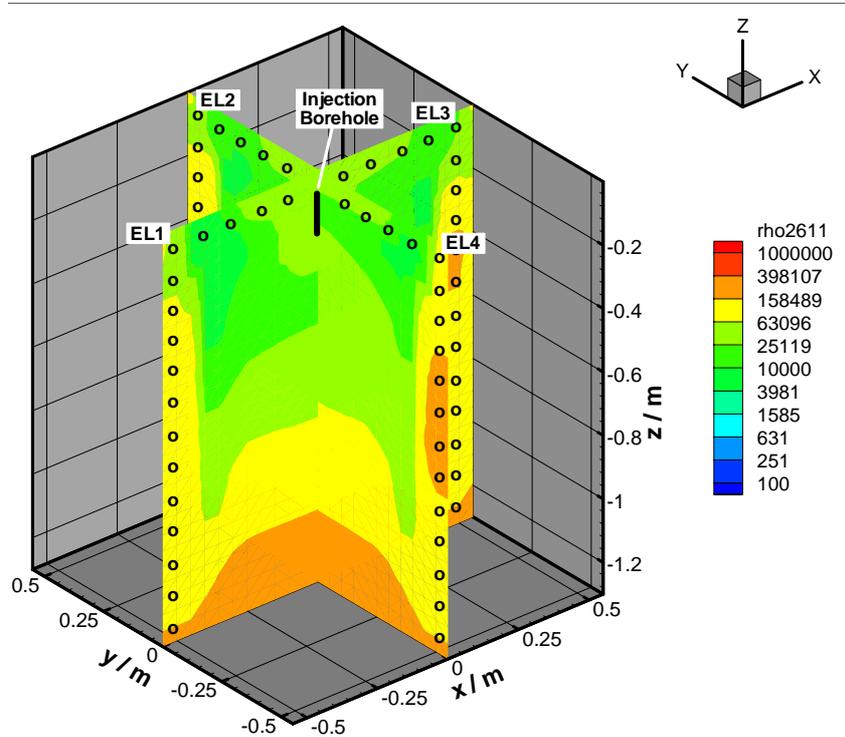
Abb. 4-26: Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Resistivität für Steinsalz /KUL 93, YAR 94/

Die geoelektrischen Messungen wurden als Dipol-Dipol-Messungen durchgeführt. Über zwei Elektroden wurde ein niederfrequenter Wechselstrom ins Gebirge eingespeist und die resultierende Potenzialdifferenz zwischen zwei anderen Elektroden gemessen. Das Ergebnis einer solchen Messung ist ein scheinbarer spezifischer Widerstand. Durch Variation von Einspeise- und Messdipol, die sich in gleichen oder unterschiedlichen Bohrlöchern oder an der Oberfläche befinden können, erhält man einen kompletten Datensatz von 4056 Einzelmessungen.

Die Daten zweier vertikaler Ebenen, die das zentrale Injektionsintervall BRL5 enthalten (d. h. die durch EL1 und EL3 und die zwischen diesen liegenden Oberflächen-elektroden definierte Ebene bzw. die Ebene, die EL2 und EL4 sowie die zugehörigen Oberflächenelektroden enthält; siehe Abbildung 4-19) dienten jeweils als Eingabe für inverse Finite-Element-Modellierung mittels des Programms SensInv2D /FEC 01/. Aus dem Vektor der scheinbaren spezifischen Widerstände wird die Resistivitätsverteilung in der betrachteten Ebene als beste Übereinstimmung zwischen Messdaten und berechneter Modellantwort ermittelt. Die verwendete Optimierungsmethode war die multiplikative simultane iterative Rekonstruktionstechnik (MSIRT) /KEM 95/.

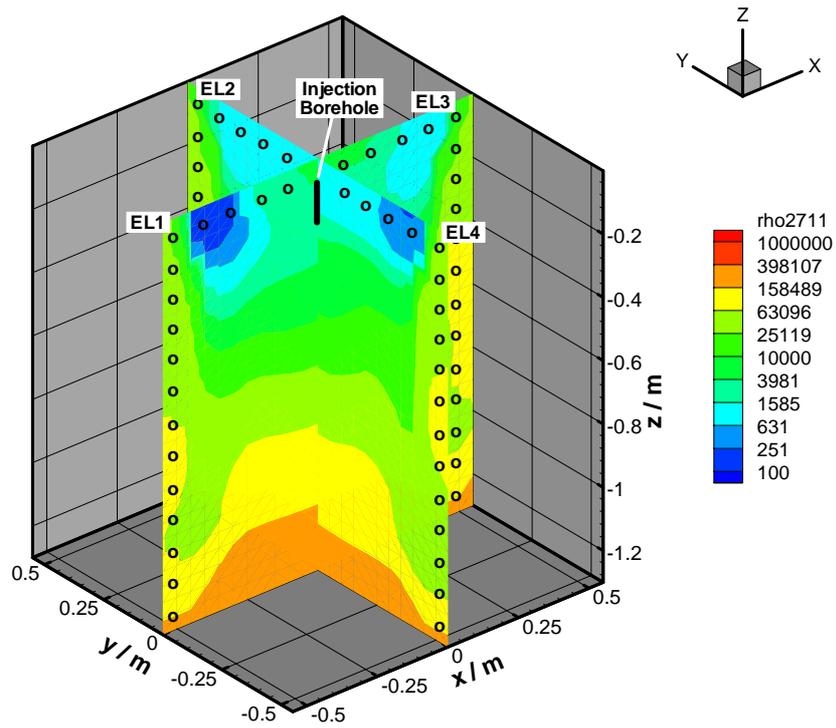
Die Auflösung der Methode wird durch den halben Elektrodenabstand begrenzt, daher wurde ein FE-Netz mit einer Elementgröße von 5 cm mal 5 cm zu Grunde gelegt. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist vom Ort abhängig und variiert entsprechend der kumulativen Sensitivitätsverteilung. Jede Einzelmessung ergibt eine so genannte Sensitivitätsverteilung als Matrix der partiellen Ableitungen der gemessenen Impedanz gegen die Resistivität. Daher beschreibt die Sensitivität in einem speziellen finiten Element, wie empfindlich der Messwert gegenüber einer Änderung der Resistivität dieses Elements ist, oder umgekehrt, wie sicher die Resistivität durch den Messwert bestimmt ist. Die kumulative Sensitivität ist die Summe der Sensitivitätsmatrizen der Einzelmessungen und beschreibt als solche, in welchen Bereichen die ermittelte Resistivität durch die Gesamtheit der Einzelmessungen gut abgesichert ist und wo nicht. Im Allgemeinen ist die kumulative Sensitivität am höchsten in der Nähe der Elektroden und am geringsten in Bereichen, die schlecht durch Elektroden überdeckt sind. Für die hier benutzten Elektrodenarrays ist die Sensitivität nur im Zentrum der Unterkante der Messebenen gering. Vor der Auslegung der Elektrodenanordnung war an Hand von Modellrechnungen nachgeprüft worden, dass die installierten Elektroden und gewählten Messkonfigurationen geeignet sein würden, die erwarteten Effekte nachzuweisen.

Eine komplette geoelektrische Messung dauerte 190 Minuten. Messungen wurden nachts jeweils vor, zwischen, und nach den Flüssigkeitsinjektionskampagnen durchgeführt. Die folgenden Abbildungen 4-27 bis 4-30 zeigen die Resistivitätsverteilungen in den beiden Messebenen vor Injektion sowie nach jeder Injektionsphase in einer quasi-dreidimensionalen Darstellung.

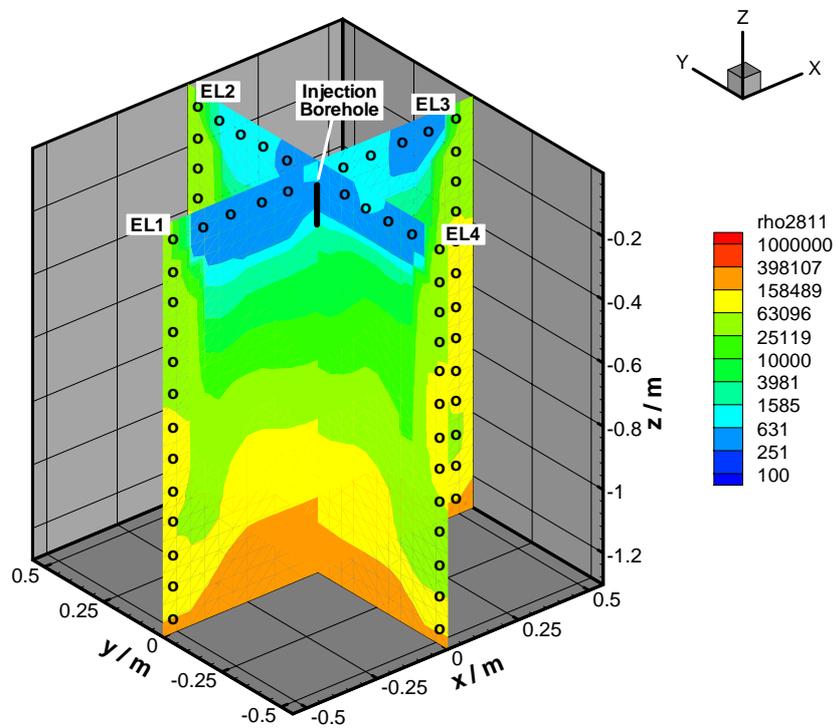


**Abb. 4-27:** Resistivitätsverteilung am 26. November 2002 (vor Flüssigkeitsinjektion)

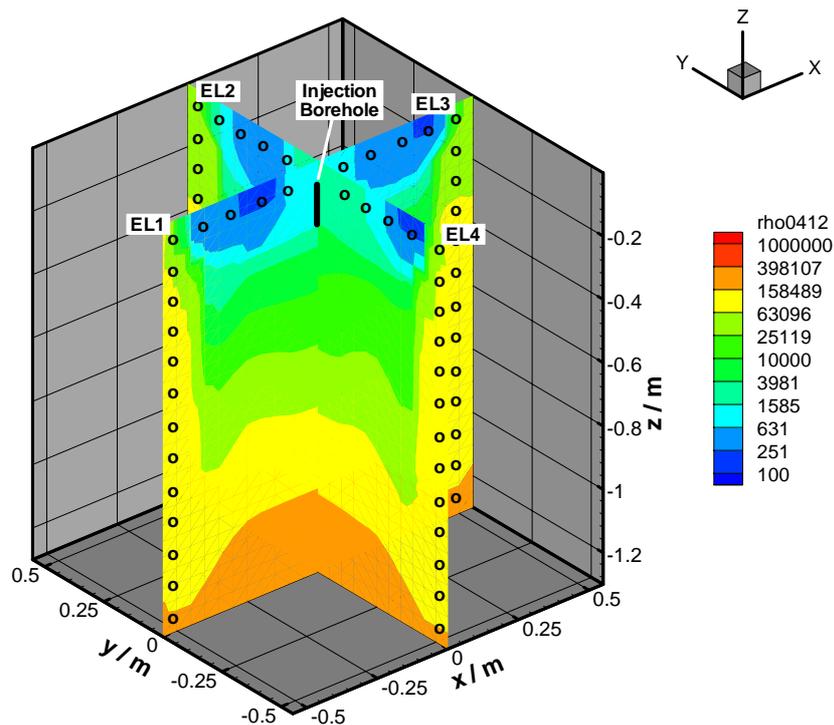
Die Messung vom 26. November 2002 (vor Flüssigkeitsinjektion, Abbildung 4-27) zeigt eine sehr gleichmäßige Resistivitätsverteilung mit Werten zwischen 10000 und 60000  $\Omega\text{m}$  und erhöhten Resistivitäten zu den seitlichen und unteren Modellrändern hin (Randeffekte). Die Werte sind im typischen Bereich für Steinsalz.



**Abb. 4-28:** Resistivitätsverteilung am 27. November 2002 (nach erster Flüssigkeitsinjektion)



**Abb. 4-29:** Resistivitätsverteilung am 28. November 2002 (nach zweiter Flüssigkeitsinjektion)



**Abb. 4-30:** Resistivitätsverteilung am 04. Dezember 2002 (nach dritter Flüssigkeitsinjektion)

Nach der ersten Flüssigkeitsinjektion (Abbildung 4-28) erkennt man eine deutliche Erniedrigung der Resistivität, die allerdings auf die oberen 30 cm unterhalb der Sohle beschränkt ist. Nach der zweiten Injektion (Abbildung 4-29) wird der Effekt noch verstärkt; die Resistivitätsverteilung nach der dritten Injektion (Abbildung 4-30) ist der vorherigen ähnlich.

Keine der Flüssigkeitsinjektionen führte zu einer Resistivitätserniedrigung in Tiefen größer als 30 cm unterhalb der Sohle. Die gesamte Salzlösung verblieb in den oberen Dezimetern des Salzes und verbreitete sich in horizontaler Richtung bis über die Kunststoffplatte hinaus, wie während der zweiten und dritten Injektionsphase beobachtet wurde (siehe Abschnitt 4.4.3). Dies ist auch eine Bestätigung der Auswertemethode der Gasinjektionstests. Eindimensionaler radial-horizontaler Fluss aus den Messbohrlöchern entspricht offenbar eher der Realität in der Auflockerungszone als eine zweidimensionale Ausbreitung; der vertikale Fluss scheint vernachlässigbar.

Die Resistivität des durchfeuchteten Bereichs liegt um  $200 \Omega\text{m}$ , was einem Wassergehalt um 1 vol% entspricht (siehe Abbildung 4-25). Nimmt man eine radiale

Ausbreitung der Salzlösung in einer Schicht von 30 cm Mächtigkeit und einen gleichförmigen Wassergehalt von 1 vol% an, so wäre der Radius der feuchten Zone 1 m, was wiederum in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen während der Injektion ist (die Seitenlänge der Kunststoffplatte beträgt 1.8 m, und die ersten Zentimeter des Salzes jenseits der Platte wurden feucht).

Da nachgewiesen wurde, dass bei den Flüssigkeitsinjektionen nur eine Teilsättigung des feuchten Bereiches erreicht wurde, muss die Porosität der oberen Dezimeter des Salzes in der Sohle deutlich höher als 1 % sein.

## 5 Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen konzentrierten sich auf Kernmaterial aus den Messbohrungen der Dammjochstrecke. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Ursache für die Permeabilitätsreduktion im ausgebauten Bereich zu ergründen. Dabei wurden von GRS Permeabilitätsmessungen im Labor durchgeführt, während das Carlsbad Field Office (CBFO) der Sandia National Laboratories im Rahmen des Projektes BAMBUS II mikrostrukturelle Untersuchungen durchführte.

### 5.1 Permeabilitätsmessungen

Die Messungen wurden an jeweils drei Proben aus jedem der vier Messbohrlöcher der Dammjochstrecke (siehe Abschnitt 4.1.2) durchgeführt. Die Proben haben jeweils einen Durchmesser von 71.45 mm und eine Länge von etwa 100 mm. Die Probenbezeichnungen sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

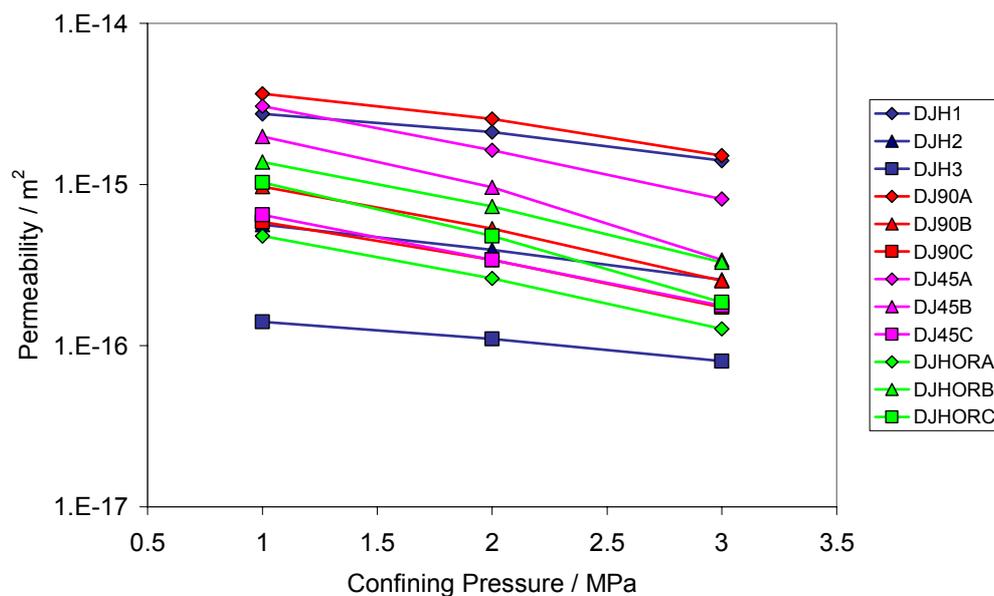
**Tabelle 5-1:** Probenbezeichnung und Herkunft der Proben für Permeabilitätsmessungen

Bezeichnung	Bohrloch	Tiefe / m
DJH1	Vertikalbohrloch, unausgebaute Strecke	0.98
DJH2	Vertikalbohrloch, unausgebaute Strecke	2.47
DJH3	Vertikalbohrloch, unausgebaute Strecke	5.0
DJ90A	Vertikalbohrloch, ausgebaute Strecke	2.0
DJ90B	Vertikalbohrloch, ausgebaute Strecke	4.97
DJ90C	Vertikalbohrloch, ausgebaute Strecke	5.9
DJ45A	Schrägbohrloch, ausgebaute Strecke	3.4
DJ45B	Schrägbohrloch, ausgebaute Strecke	4.3
DJ45C	Schrägbohrloch, ausgebaute Strecke	5.0
DJHORA	Horizontalbohrloch, ausgebaute Strecke	1.2
DJHORB	Horizontalbohrloch, ausgebaute Strecke	2.0
DJHORC	Horizontalbohrloch, ausgebaute Strecke	5.0

Die Messungen umfassten die Untersuchung der Permeabilität in Abhängigkeit vom Manteldruck (alle Proben) sowie bei einem Teil der Proben in Abhängigkeit von der

Einspannzeit oder vom Injektionsdruck und wurden an naturfeuchten, nicht vorher getrockneten Proben durchgeführt.

Die ermittelten Permeabilitäten in Abhängigkeit vom Manteldruck sind in Abbildung 5-1 zusammengestellt. Man erkennt die zu erwartende Abnahme der Permeabilität mit dem Manteldruck, die allerdings bei allen Proben bei einer Steigerung von 1 MPa auf 3 MPa weniger als eine halbe Größenordnung beträgt. Für alle Bohrlöcher mit Ausnahme der Probe DJHORA gilt, dass die Permeabilität mit zunehmender Entnahmetiefe geringer wird, was dafür spricht, dass die Schädigung durch das Erbohren der Kerne nicht der primäre Grund für die Durchlässigkeit ist (sonst sollten die Permeabilitätswerte regellos verteilt sein). Die Permeabilitätswerte selbst entsprechen in der Größenordnung der Permeabilität, die in situ 0.6 m tief unter der offenen Strecke gemessen wurde (siehe Abschnitt 4.3.3) bzw. liegen etwas höher. Wichtig ist, dass die Permeabilität der Kerne aus dem ausgebauten Bereich bezüglich Größe und Verhalten vergleichbar derjenigen der Kerne aus der offenen Strecke ist. Dies legt nahe, dass in der Umgebung des Tübbingausbaus keine Verheilung im Sinne einer Rekristallisation stattgefunden hat, sondern dass der Grund für die gegenüber einer typischen Auflockerungszone niedrige Permeabilität ein Zudrücken der entstandenen Mikrorisse durch die herrschende Spannung ist. Gleichzeitig widerlegt dieses Ergebnis die mögliche Theorie, dass der Tübbingausbau in der Strecke eingebracht wurde, bevor sich eine Auflockerungszone entwickeln konnte.



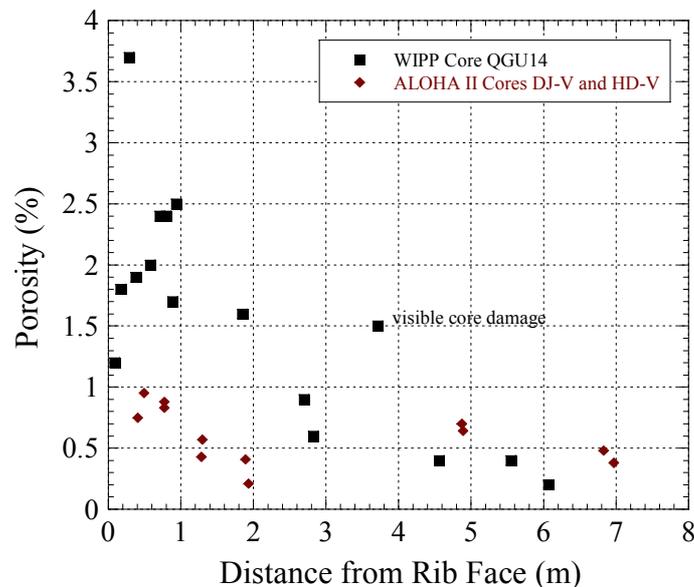
**Abb. 5-1:** Permeabilität der Kernproben aus der Dammjochstrecke in Abhängigkeit vom Einspanndruck

Die Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit von der Einspanndauer wurden an den drei Proben aus dem Schrägbohrloch bei 4 MPa bzw. 5 MPa Mantelspannung durchgeführt und zeigten bei einer Einspanndauer von fünf Wochen eine Permeabilitätsreduktion um insgesamt eine halbe bis eine Größenordnung. Die Kurvenform flacht stark ab, so dass auch aus den Labormessungen ersichtlich ist, dass zumindest sehr große Zeiträume erforderlich sind, um die Permeabilität des ungestörten Salzes zu erreichen.

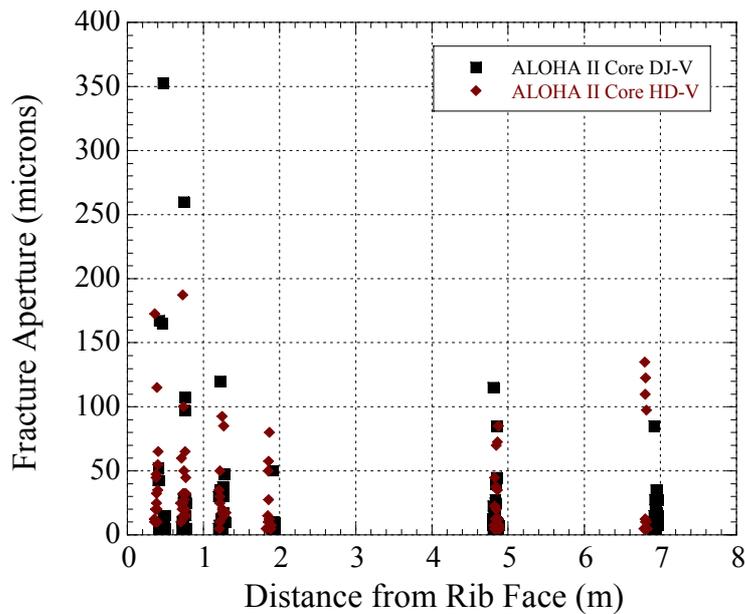
Der Injektionsdruck hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen.

## 5.2 Mikrostrukturelle Untersuchungen

CBFO untersuchte jeweils sechs Kernproben aus den beiden vertikalen Messbohrlöchern im unausgebauten bzw. ausgebauten Bereich der Dammjochstrecke. Dabei wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, wobei die Bestimmung von Rissporosität und Rissöffnungsweiten in Abhängigkeit vom Streckenabstand durch petrografische Kartierung an ca. 1 mm dicken Schnitten mittels Imprägnation durch fluoreszierendes Epoxidharz von besonderem Interesse ist. Die Abbildungen 5-2 und 5-3 zeigen die entsprechenden Ergebnisse.



**Abb. 5-2:** Rissporosität der Kernproben aus der Dammjochstrecke in Abhängigkeit vom Streckenabstand (braun; zusätzlich dargestellt sind in schwarz Ergebnisse von Proben der WIPP Site)



**Abb. 5-3:** Rissöffnungsweite der Kernproben aus der Dammjochstrecke in Abhängigkeit vom Streckenabstand (DJ-V: ausgebauter Bereich, HD-V: offene Strecke)

In beiden Abbildungen erkennt man tendenziell die zu erwartende Abnahme der Rissporosität bzw. -öffnungsweite mit dem Streckenabstand. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass sich die Proben aus dem ausgebauten und dem offenen Streckenbereich nicht grundlegend unterscheiden; die größten Rissöffnungsweiten wurden sogar an Proben aus dem ausgebauten Bereich ermittelt. Dies bestätigt die Folgerungen aus den Ergebnissen der Permeabilitätsmessungen im Labor. Eine Verheilung der Auflockerungszone durch Rekristallisation hat bisher nicht stattgefunden, die Permeabilitätsreduktion wird durch Zudrücken von Rissen erreicht.

## **6 Modellierung des mechanischen Zustandes**

Um den Zusammenhang zwischen Permeabilität und Spannungszustand zu untersuchen, muss der Spannungszustand an den Permeabilitätsmessstellen ermittelt werden. Der Ansatz hierzu war die mechanische Modellierung der Versuchsorte AHE-Strecke, Dammjochstrecke, und Kammer 8/8b durch Finite-Element-Berechnungen (das TSDE-Versuchsfeld wurde wegen der zusätzlichen Komplizierung durch Aufheiz- und Abkühlungseffekte nicht berücksichtigt). Eine Überprüfung dieser Modellrechnungen durch Spannungsmessungen war wegen der Probleme bei deren Auswertung leider nicht möglich.

Die Modellrechnungen wurden mit dem Finite-Element-Programm ANSYS /ANS 92/ durchgeführt. Bei der Modellierung des Steinsalzes wurden nur elastisches Verhalten und sekundäres Kriechen berücksichtigt. Die Dilatanz als Ursache für die Permeabilitätsänderung in der Auflockerungszone konnte nicht modelliert werden, obwohl sie durch Entfestigung eine Rückwirkung auf das Spannungsfeld hat. Dieser Effekt wird vermutlich jedoch weniger kritisch sein als andere Quellen der Unsicherheit der Spannungsverteilung, wie Inhomogenität des Steinsalzes, primäres Kriechen, Modelldiskretisierung. Modelle, die Dilatanz und Entfestigung berücksichtigen, werden derzeit entwickelt.

### **6.1 AHE-Strecke**

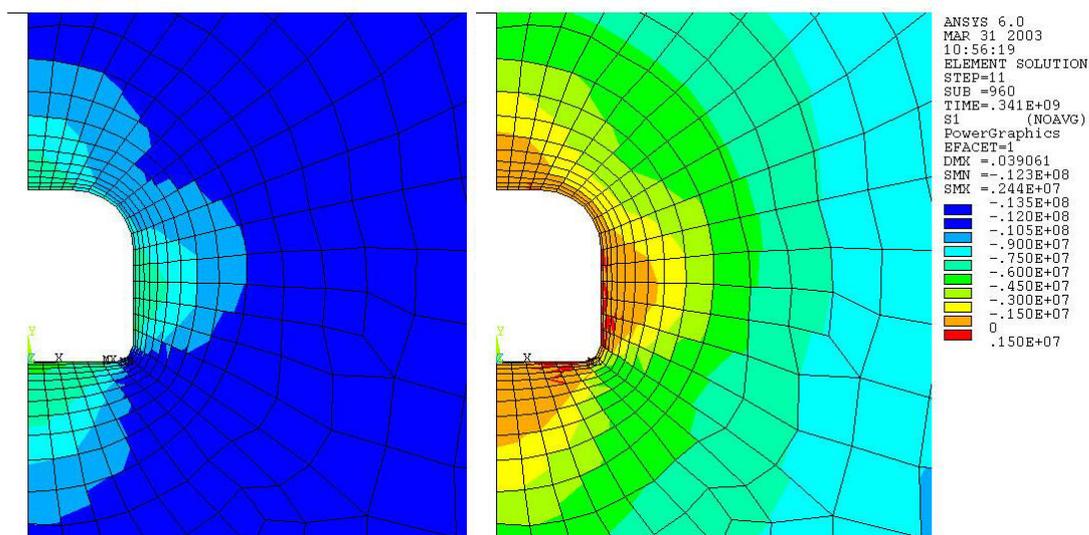
Die AHE-Strecke wurde durch ein vertikales zweidimensionales Plane-Strain-Modell (ebener Schnitt mit unterdrückter Dehnung senkrecht zur Ebene) von runder Form mit 100 m Radius modelliert. Es bestand aus 728 Acht-Knoten-Elementen. Die Randbedingungen waren eine vertikale Symmetrieachse durch die Streckenmitte, die Unterdrückung vertikaler Bewegung am Modelläquator und ein am Modellrand aufgetragener Gebirgsdruck, der mit der Tiefe entsprechend der Dichte des Steinsalzes zunimmt und auf der Höhe der Strecke einen Wert von 12.5 MPa hat. Dieser Wert wurde durch Spannungsmessungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in der Nähe des Versuchsortes ermittelt /HEU 96/.

Als Materialeigenschaften für Steinsalz wurden eine Dichte von  $2180 \text{ kg/m}^3$ , ein Elastizitätsmodul von 24 GPa und eine Poissonzahl von 0.27 angenommen, sowie das verbreitete Stoffgesetz für stationäres Kriechen:

$$\dot{\varepsilon} = 2.0833 \cdot 10^{-6} \text{MPa}^{-5} \text{s}^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \cdot \sigma_{\text{eff}}^5$$

mit der Kriechrate  $\dot{\varepsilon}$ , der Aktivierungsenergie  $Q$  (54 kJ/mol), der allgemeinen Gaskonstante  $R$  (8.3143 J/(mol·K)), der Temperatur  $T$  (305 K) und der effektiven Spannung  $\sigma_{\text{eff}}$ . Es wurde zunächst ein homogenes, aus Steinsalz bestehendes Modell mit den Randbedingungen beaufschlagt, um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Danach wurden die die Strecke repräsentierenden Elemente entnommen (als Simulation der Streckenauffahrung 1988) und die Rechnung anschließend über etwa 11 Jahre weitergeführt.

Da von den Ergebnissen der Modellierung für die Fragestellung nur die Spannungsverteilung in der Umgebung der Strecke bei Berechnungsende von Bedeutung ist, sind in Abbildung 6-1 die berechnete maximale und minimale Hauptspannung des interessierenden Modellausschnittes dargestellt. Man erkennt einen die Strecke umgebenden Bereich geringer minimaler Hauptspannung (< 1.5 MPa), dessen Ausdehnung in der Sohle am größten ist. Die minimale Hauptspannung ist erwartungsgemäß bezüglich der Strecke radial gerichtet. Die tangential gerichtete maximale Hauptspannung ist in Streckennähe gegenüber dem Anfangswert von 12.5 MPa ebenfalls verringert, als Konsequenz der Spannungsumverteilungen in den 11 Jahren seit Auffahrung der Strecke.



**Abb. 6-1:** Ausschnitt der modellierten Spannungsverteilung um die AHE-Strecke nach 11 Jahren; links: Maximale Hauptspannung, rechts: Minimale Hauptspannung

## 6.2 Dammjoch

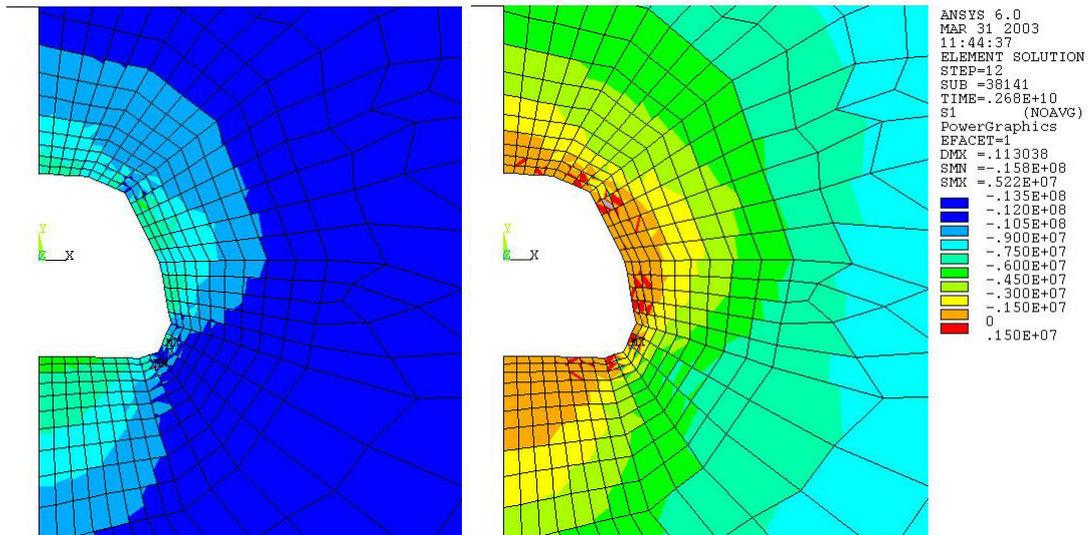
Ähnlich wie die AHE-Strecke wurde auch die Dammjochstrecke als vertikales zweidimensionales Plane-Strain-Modell von runder Form mit 100 m Radius modelliert. Tatsächlich wurden zwei nahezu identische Modelle für den offenen und den ausgebauten Teil der Strecke benutzt, die sich nur dadurch unterscheiden, dass der Tübbingausbau und die Betonhinterfüllung bei der nicht ausgebauten Strecke offen gelassen wurden. Das Modell bestand aus 778 Acht-Knoten-Elementen. Die Randbedingungen waren die gleichen wie beim AHE-Modell, abgesehen davon, dass der außen anliegende Gebirgsdruck mit 15 MPa auf Streckenniveau angenommen wurde, da sich die Dammjochstrecke in einem Bereich des Salzbergwerks Asse befindet, der weit von anderen Hohlräumen entfernt ist.

Die Materialeigenschaften des Steinsalzes wurden wie in Abschnitt 6.1 eingesetzt. Der Beton wurde wie Steinsalz modelliert, und der Gussstahl hatte eine Dichte von  $8000 \text{ kg/m}^3$ , ein Elastizitätsmodul von 183 GPa und eine Poissonzahl von 0.3.

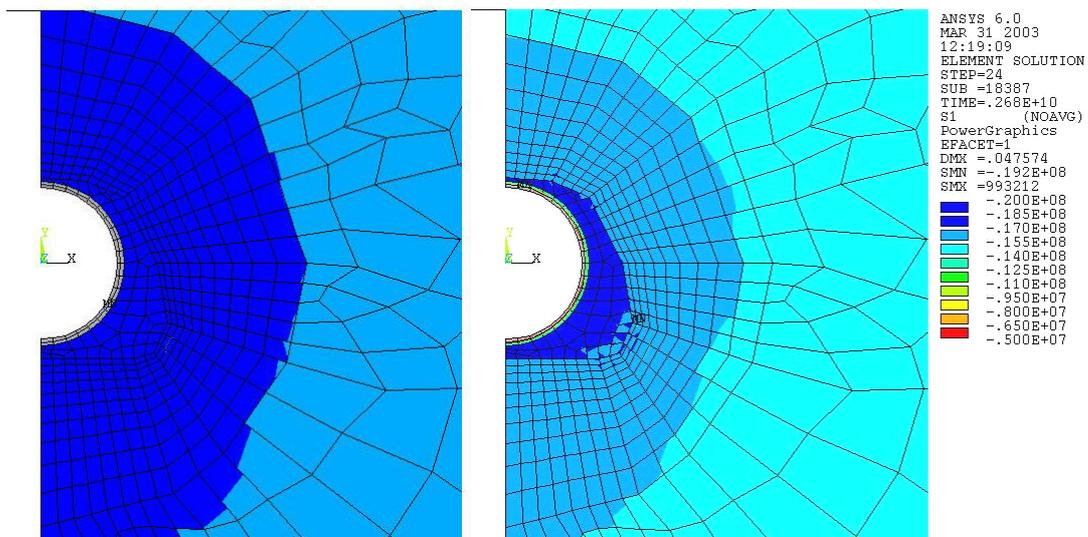
Die Berechnung wurde mit einem homogenen, aus Steinsalz bestehenden Modell zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes gestartet, danach wurden die Streckenelemente entnommen. Für die offene Strecke folgte ein Rechanlauf über 85 Jahre. Bei der ausgebauten Strecke wurden nach drei Jahren Stahlausbau und Beton eingesetzt, bevor die Rechnung über die restliche Zeit durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse für die offene Strecke (Abbildung 6-2) sind mit denen der AHE-Strecke vergleichbar (siehe Abschnitt 6.1). Die größere Ausdehnung des Bereiches geringerer minimaler Hauptspannung in der Sohle gegenüber den Stößen und der Firste ist deutlicher als bei der AHE-Strecke, was wahrscheinlich durch den Unterschied in der Form des Streckenquerschnitts begründet ist. Der Unterschied in der Spannungsrandbedingung (15 MPa gegenüber 12.5 MPa) ist offenbar nicht kritisch.

Erwartungsgemäß sieht die Spannungsverteilung im Bereich der ausgebauten Strecke völlig anders aus (siehe Abbildung 6-3). Um den steifen Einschluss des Gussstahlausbaus erhält man Spannungskonzentrationen derart, dass selbst die minimale Hauptspannung größer als 15 MPa ist. Die maximale Hauptspannung erreicht Werte von nahezu 20 MPa. Damit spiegelt sich das in Abschnitt 4.3.3 gezeigte unterschiedliche hydraulische Verhalten im unterschiedlichen Spannungszustand zwischen der offenen und der ausgebauten Strecke deutlich wieder.



**Abb. 6-2:** Ausschnitt der modellierten Spannungsverteilung um die unausgebaute Dammjochstrecke nach 85 Jahren; links: Maximale Hauptspannung, rechts: Minimale Hauptspannung



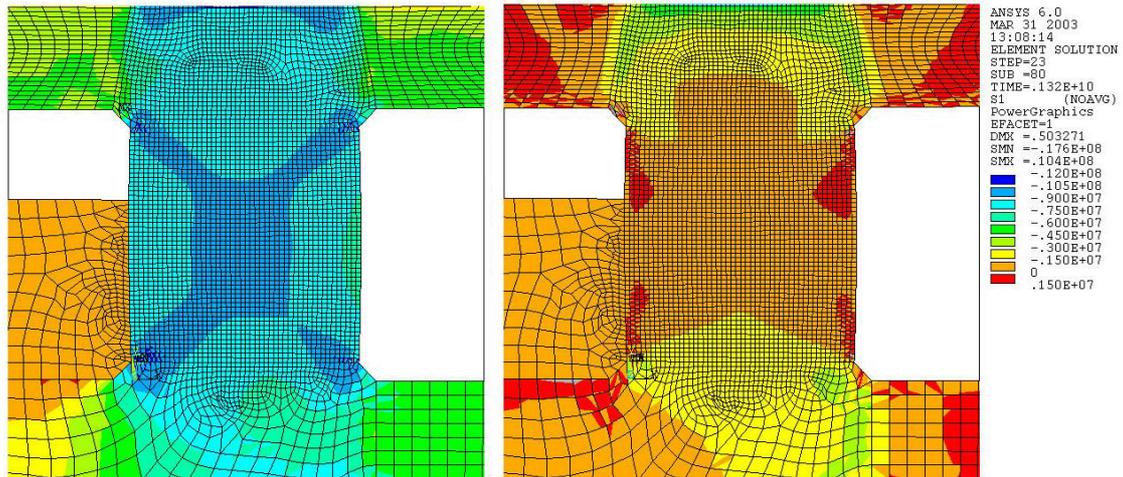
**Abb. 6-3:** Ausschnitt der modellierten Spannungsverteilung um die ausgebaute Dammjochstrecke nach 85 Jahren; links: Maximale Hauptspannung, rechts: Minimale Hauptspannung

### 6.3 Pfeiler Kammer 8/8b

Wie die AHE-Strecke und die Dammjochstrecke wurde auch der Versuchsort Kammer 8/8b als vertikales Plane-Strain-Modell modelliert. Wegen der von den Strecken abweichenden Geometrie und Randbedingungen ist dieses Modell jedoch etwas komplizierter. Das Modell ist rechteckig und erstreckt sich seitlich bis zum Zentrum der Kammer 8 bzw. der Kammer 8b, wo als Randbedingung horizontale Bewegungen unterdrückt sind. In vertikaler Richtung reicht es nach unten und oben bis in die unter bzw. über Kammer 8 gelegenen Kammern. An der unteren Modellgrenze ist die Vertikalbewegung als Randbedingung unterbunden. Die Druckrandbedingung ist ein Druck von 9 MPa auf die obere Modellgrenze im Bereich des Pfeilers. Der Wert von 9 MPa stammt aus persönlicher Kommunikation mit dem Institut für Gebirgsmechanik (Leipzig), das umfangreiche dreidimensionale mechanische Modellrechnungen zum Forschungsbergwerk Asse durchgeführt hat. Das Modell besteht aus 7325 Acht-Knoten-Elementen; die Materialparameter für Steinsalz sind identisch mit denen der übrigen Modellrechnungen.

Nachdem zunächst über 40 Jahre mit offenen Kammern gerechnet wurde, wurde die Teilverfüllung von Kammer 8b mit Salzgrus modelliert und anschließend über weitere zwei Jahre gerechnet. Die Verfüllung der Kammer 8b hatte auf den Spannungszustand im Pfeiler keinen Einfluss.

Die Ergebnisse bei Berechnungsende für die maximale und die minimale Hauptspannung im Bereich des Pfeilers sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Wie durch die Randbedingung vorgegeben, beträgt die maximale Hauptspannung im Pfeiler etwa 9 MPa. Die minimale Hauptspannung ist sehr gering, nahe den Pfeileroberflächen treten sogar Zugspannungen auf. Dies konnte sowohl auf Grund der Geometrie als auch wegen der Permeabilitätsmessergebnisse (Abschnitt 4.3.4) erwartet werden. Die Ausdehnung des Zugspannungsbereiches nahe Kammer 8 ist größer als diejenige nahe Kammer 8b. Dies ist auf den Einfluss der Kammern zurückzuführen, die oberhalb und unterhalb von Kammer 8 liegen, und erklärt die unterschiedliche Ausprägung der Auflockerungszonen im Pfeiler, die bei den Permeabilitätsmessungen festgestellt wurde.



**Abb. 6-4:** Ausschnitt der modellierten Spannungsverteilung im Pfeiler zwischen der teilverfüllten Kammer 8b auf der linken Seite der Bilder und der offenen Kammer 8 auf der rechten Seite; links: Maximale Hauptspannung, rechts: Minimale Hauptspannung

## 7 Relation zwischen Permeabilität und Spannungszustand

Die Permeabilitätserhöhung in der Auflockerungszone wird durch dilatantes Verhalten des Steinsalzes verursacht. Dilatanz, d. h. Volumenvergrößerung durch Mikrorissbildung, kann bei bestimmten Spannungszuständen, die in Hohlraumnähe herrschen können, auftreten. Verschiedene Autoren haben die folgenden Dilatanzkriterien vorgeschlagen, die durch Laborversuche ermittelt wurden:

$$\sqrt{J_2} \geq 0.83 \cdot \sigma_m + 1.9 \quad \text{Spiers et al. /SPI 88/}$$

$$\sqrt{J_2} \geq 0.81 \cdot \sigma_m \quad \text{Ratigan et al. /RAT 91/}$$

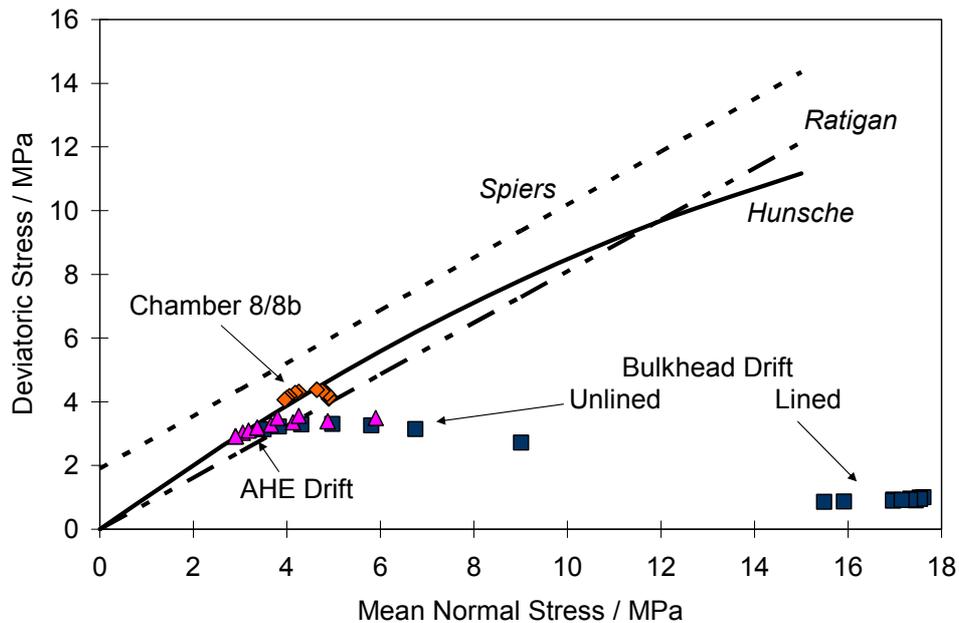
$$\sqrt{\frac{2}{3} \cdot J_2} \geq 0.86 \cdot \sigma_m - 0.0168 \cdot \sigma_m^2 \quad \text{Hunsche /HUN 92/}$$

mit der mittleren Normalspannung  $\sigma_m$  und der zweiten Spannungsinvariante  $J_2$ , definiert durch

$$J_2 = \frac{1}{6} \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2).$$

Allen Gleichungen ist gemeinsam, dass Dilatanz eine hohe deviatorische Spannung  $\sqrt{J_2}$  und damit eine große Differenz zwischen den Hauptspannungskomponenten  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  erfordert. In Kapitel 6 wurde gezeigt, dass diese Bedingung in Hohlraumnähe an den verschiedenen Versuchsorten mit Ausnahme der ausgebauten Dammjochstrecke erfüllt ist.

Abbildung 7-1 zeigt den Verlauf der drei Dilatanzkriterien in der durch die mittlere Normalspannung  $\sigma_m$  und die deviatorische Spannung  $\sqrt{J_2}$  aufgespannten Ebene, zusammen mit den der mechanischen Modellierung (Kapitel 6) entnommenen berechneten Spannungszuständen, unter denen die Permeabilitätsmessungen in der AHE-Strecke, in der Dammjochstrecke und im Pfeiler zwischen Kammer 8 und 8b durchgeführt wurden. Dabei sind die Dilatanzkriterien so zu verstehen, dass oberhalb der jeweiligen Kurve Dilatanz möglich ist, während unterhalb ein kompressiver Spannungszustand herrscht.

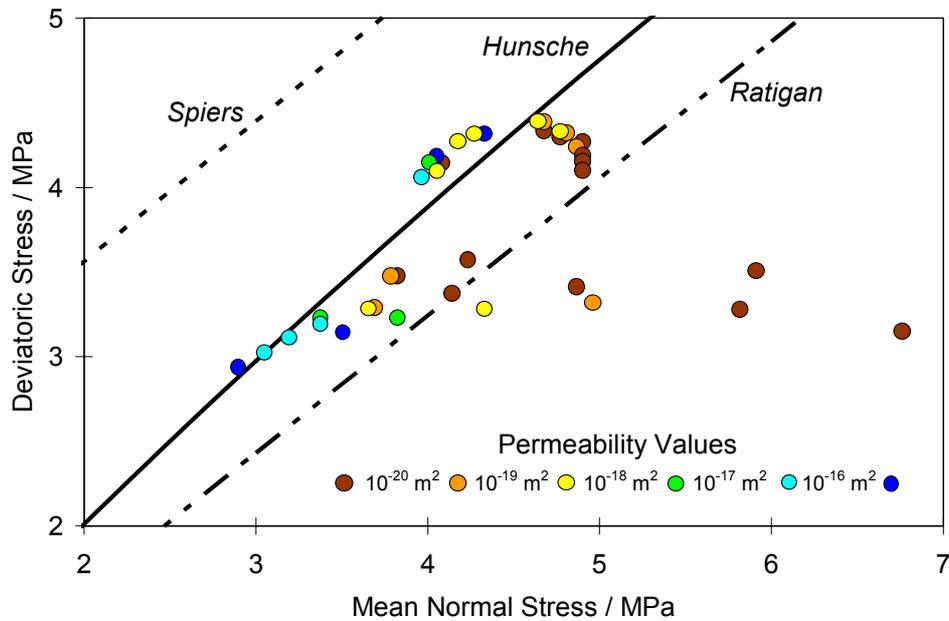


**Abb. 7-1:** Lage der Permeabilitätsmessstellen in der Spannungsebene, zusammen mit den Dilatanzkriterien von Spiers, Ratigan und Hunsche

Erwartungsgemäß ist für die Messungen in der Umgebung der ausgebauten Dammjochstrecke keines der Dilatanzkriterien erfüllt. Im Bereich der AHE-Strecke und der unausgebauten Dammjochstrecke überschreitet ein Teil der Messstellen Ratigans Kriterium und ist sehr nahe an dem von Hunsche. Diese beiden Serien von Messungen wurden unter sehr ähnlichen Spannungsverhältnissen durchgeführt. Die Messungen bei Kammer 8/8b erfolgten unter etwas höheren deviatorischen Spannungen. Ratigans Kriterium ist für alle Messstellen und Hunsches für einen Teil erfüllt. Das Kriterium von Spiers trifft für keine der Permeabilitätsmessstellen zu. Es wurden keine Messungen unter Bedingungen durchgeführt, bei denen der Spannungszustand sehr weit im dilatanten Bereich liegt, da deviatorische Spannungen durch das Kriechen des Salzes abgebaut werden und derartige Spannungszustände über größere Zeiträume nicht aufrecht erhalten werden.

In Abbildung 7-2 ist der interessante Bereich von Abbildung 7-1 vergrößert dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen durch einen Farbcode mit angegeben. Wenn man sich auf die Frage „Dilatanz (bzw. Permeabilitätserhöhung) ja/nein“ beschränkt, scheint Hunsches Kriterium angemessener für die Situation im Pfeiler Kammer 8/8b zu sein, während Ratigans Kriterium die Situation um die Strecken besser beschreibt. Es gibt allerdings auch Messstellen ohne jegliche Permeabilitätserhöhung, obwohl eines oder beide Kriterien erfüllt sind. Die Dilatanzkriterien

beinhalten keine unmittelbare Aussage über die Permeabilität, sie sagen lediglich aus, dass eine dilatanzbedingte Permeabilitätserhöhung möglich ist. Grund dafür ist die Abhängigkeit der Permeabilität nicht allein vom (makroskopischen) Spannungszustand, sondern auch von der Struktur des Steinsalzes, Verunreinigungen, oder anderen Einflüssen.



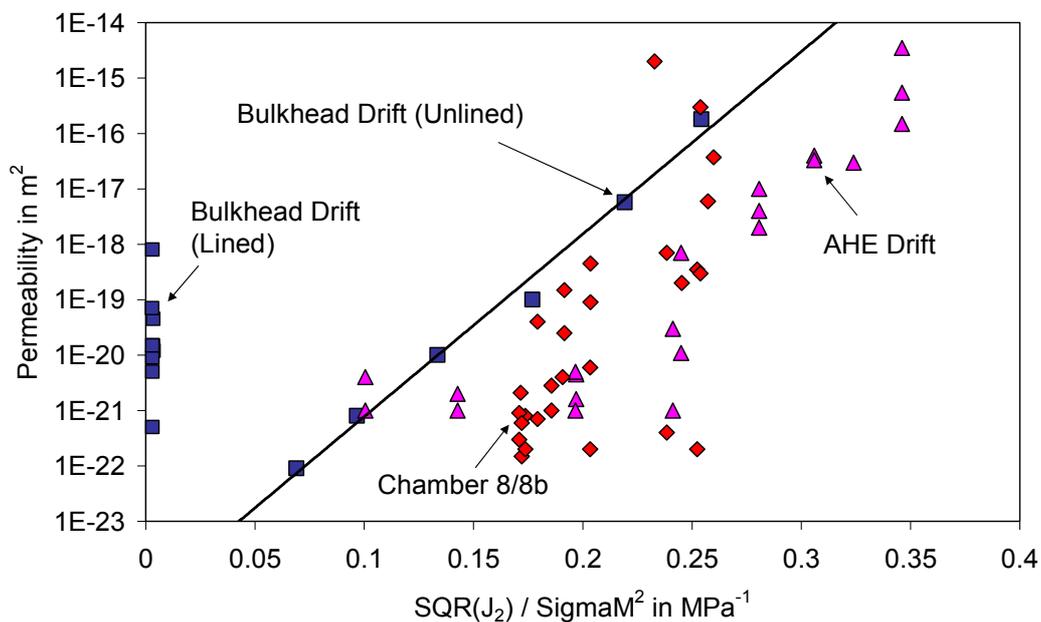
**Abb. 7-2:** Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen in der Spannungsebene; die Farben der Kreise kennzeichnen die Größenordnung der Permeabilität (z. B. bedeutet gelb eine Permeabilität zwischen  $10^{-19} \text{ m}^2$  und  $10^{-18} \text{ m}^2$ )

Aus Abbildung 7-2 ist auch ersichtlich, dass die Permeabilitätserhöhung als Funktion beispielsweise des Abstandes von einem Dilatanzkriterium in der Spannungsebene nicht angegeben werden kann. Besonders deutlich wird dies bei den Messungen im Pfeiler nahe den Pfeileroberflächen (die Häufung von Messwerten bei 4 MPa mittlerer Normalspannung und 4 MPa Deviatorspannung in Abbildung 7-2). Hier variiert die Permeabilität über vier Größenordnungen bei einem nahezu gleichen berechneten Spannungszustand.

Obwohl die Daten für die Ableitung einer allgemeinen mathematischen Relation nicht ausreichend sind, ist jedoch eine recht klare Entwicklung von höherer zu niedrigerer Permeabilität bei steigender mittlerer Normalspannung (entsprechend dem Hohlraumabstand) für die Messungen um die AHE-Strecke und die Dammjochstrecke erkennbar. In Abbildung 7-3 sind die Ergebnisse aller Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit

vom Quotienten aus deviatorischer Spannung und Quadrat der mittleren Normalspannung dargestellt. Aus dieser Ableitung lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Messergebnisse der unausgebauten Dammjochstrecke liegen auf einer Geraden. Die Regressionsgerade ist ebenfalls in Abbildung 7-3 eingetragen.
- Die Permeabilitäten der AHE-Strecke scheinen, zumindest was die erhöhten Werte angeht, einer parallelen Linie zu folgen; die Gründe für den Unterschied mögen in der Ungewissheit der Spannungsbestimmung oder auch in einer anderen Struktur des Salzes liegen.
- Die Messergebnisse von Kammer 8/8b passen nicht in dieses Schema, jedoch liegen nahezu alle Werte unterhalb der Regressionsgeraden der Dammjochstrecke.
- Die Permeabilität um die ausgebaute Dammjochstrecke ist im Vergleich zu ungestörtem Salz immer noch erhöht, trotz der hohen Kompressionsspannung und einer vernachlässigbaren deviatorischen Spannung.



**Abb. 7-3:** Gemessene Permeabilitätswerte als Funktion des Quotienten aus deviatorischer Spannung und Quadrat der mittleren Normalspannung

Da nahezu alle im Bereich von offenen Strecken oder Kammern gemessenen Permeabilitätswerte unterhalb der Regressionskurve für die Werte der unausgebauten AHE-Strecke liegen, bietet es sich an, diese als obere Grenze für die Perme-

abilitätserhöhung in der Auflockerungszone als Funktion des Spannungszustandes anzusetzen. Natürlich sind mehr Permeabilitätsmesswerte und insbesondere zuverlässige Spannungsbestimmungen notwendig, um diesen Ansatz zu bestätigen, wobei neben der Absicherung der Spannungsberechnung durch Messwerte auch die Einbeziehung der Dilatanz bzw. Entfestigung in die mechanische Modellierung anzustreben ist.

Ein durch diesen Ansatz nicht erfasstes Problem ist die Zeitabhängigkeit der Verheilung der Auflockerungszone. Aus Abbildung 7-1 ist ersichtlich, dass die Messstellen im Bereich der ausgebauten Dammjochstrecke unter hoher mittlerer Normalspannung und sehr geringer deviatorischer Spannung stehen; weit entfernt von jedem Dilatanzkriterium. Trotzdem ist die Permeabilität noch immer um ein bis zwei Größenordnungen gegenüber ungestörtem Steinsalz erhöht (siehe Abbildung 7-3). Dieses Problem wurde auch schon unter Laborbedingungen untersucht /MÜL 99/. Dabei wurde festgestellt, dass Verheilung bei Anwesenheit von Salzlösung als Testfluid in Abhängigkeit von der Kompressionsspannung nicht mehr als einige Jahre braucht; für naturtrockenes Steinsalz konnte dagegen keine derartige Aussage getroffen werden, da die Messzeiten nicht lang genug waren. Die Messungen am Dammjoch zeigen, dass selbst 85 Jahre nicht ausreichend waren, um das Steinsalz in seinen Ausgangszustand zu versetzen, obwohl eine Permeabilitätsreduktion erfolgt ist.

Im Gegensatz dazu zeigten Messungen der Permeabilität im TSDE-Feld vor Aufheizende sowie mikrostrukturelle Laboruntersuchungen an Proben aus diesem Versuchsfeld im Rahmen des Projektes BAMBUS II, dass hier, allerdings natürlich unter völlig anderen Temperaturrandbedingungen, eine tatsächliche Verheilung stattgefunden hat. Neben der Abhängigkeit von Spannungszustand und Zeit ist danach Verheilung auch von anderen Größen, wie Wassergehalt und Temperatur, abhängig. Auch die Verheilungseffekte im TSDE-Feld konnten bisher modelltechnisch nicht nachvollzogen werden /ROT 03/.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Eine große Zahl von Permeabilitätsmessungen wurde an vier verschiedenen Versuchsorten im Forschungsbergwerk Asse durchgeführt, um die Ausdehnung und die hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalz zu untersuchen. An allen Versuchsorten in offenstehenden Strecken wurde eine Auflockerungszone nachgewiesen, die bis etwa 1.5 m in die Sohle und nicht mehr als 0.5 m in die Streckenstöße reicht. Die Permeabilität kann nahe der Hohlraumoberfläche Werte von  $10^{-16} \text{ m}^2$  bis  $10^{-15} \text{ m}^2$  erreichen, im Vergleich zu nicht mehr als etwa  $10^{-21} \text{ m}^2$  für ungestörtes Salz. Eine Erhitzung und Abkühlung des Salzes um den Hohlraum, wie im Fall des TSDE-Versuchsfeldes, ermöglicht durch Abkühlungsrisse erheblich höhere Permeabilitäten. In einem 40 Jahre alten Pfeiler zwischen zwei großen Kammern wurde ein ausgedehnterer Bereich erhöhter Permeabilität (bis zu 4 m) festgestellt.

Die Untersuchung der Permeabilität in unmittelbarer Hohlraumnähe erforderte die Entwicklung eines Messsystems, das die Hohlraumoberfläche mittels einer Kunststoffplatte versiegelt und den Fluss in den Hohlraum hinein unterbindet. Dieses System ermöglicht die Ermittlung der Richtungsabhängigkeit der Permeabilität, da außer Gasinjektionstests auch Flüssigkeitsinjektionstests durchgeführt und die Ausbreitung der Flüssigkeit (Salzlösung) im Gebirge durch geoelektrische Messungen verfolgt werden konnten. Das System wurde erprobt und erfolgreich eingesetzt. Es ist nicht nur für Steinsalz, sondern auch für andere Formationen geeignet.

In der Umgebung einer 1914 mit Stahlübblingen und Beton ausgebauten Strecke wurde eine geringere Permeabilität ( $10^{-20} \text{ m}^2$  bis  $10^{-18} \text{ m}^2$ ) als für Auflockerungszonen üblich gemessen. Dies ist eine Folge der hohen Kompressions- und geringen deviatorischen Spannung im untersuchten Gebiet (s. u.). Die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Steinsalzes wurde jedoch bisher nicht erreicht. Laboruntersuchungen an Kernen aus den Messbohrlöchern zeigten, dass die Ursache der Permeabilitätsreduktion das Zudrücken von Mikrorissen auf Grund des Spannungszustandes ist, jedoch keine erkennbare Verheilung von Rissen stattgefunden hat.

Beim Vergleich der Permeabilitätsmessergebnisse mit dem jeweiligen durch Finite-Element-Modellierung ermittelten Spannungszustand wurde festgestellt, dass eine mathematische Funktion, die ausschließlich Spannungszustand und Permeabilität

verknüpft, nicht angegeben werden kann. Das ist nicht überraschend, da die Permeabilität auch von Mineralogie und Struktur des Salzes abhängen wird. Aus den Messergebnissen wurde jedoch eine Funktion als obere Grenze der Permeabilität in Abhängigkeit vom Quotienten aus deviatorischer Spannung und Quadrat der mittleren Normalspannung ermittelt. Zur Bestätigung eines solchen Vorschlags sind jedoch mehr Permeabilitätsmesswerte und insbesondere zuverlässige Spannungsbestimmungen notwendig, wobei neben der Absicherung der Spannungsberechnung durch Messwerte auch die Einbeziehung der Dilatanz bzw. Entfestigung in die mechanische Modellierung anzustreben ist. Die Absicherung der mechanischen Modellierung durch Überbohrversuche war nicht erfolgreich.

Die Verheilung der Auflockerungszone wird durch die vorgeschlagene Grenzfunktion nicht erfasst. Verheilung ist offenbar stark zeitabhängig, wobei neben dem Spannungszustand noch andere Größen, wie z. B. der Wassergehalt oder die Temperatur, wichtig sind.

Im Hinblick auf die Bedeutung der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit von Endlagern oder Untertagedeponien lassen sich folgende Schlüsse aus den Untersuchungsergebnissen ziehen, die auch bei der „European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories“ im November 2003 in Luxemburg bestätigt wurden:

- Wegen des Kriechvermögens von Steinsalz wird in der Nachbetriebsphase eines Endlagers irgendwann ein Zeitpunkt erreicht, ab dem im gesamten Endlager compressive Spannungsverhältnisse herrschen. Die Messungen am Dammjoch belegen, dass von da an überall eine Permeabilitätsreduktion eintritt, so dass die Auflockerungszone für die Langzeitsicherheit nur in der Umgebung von Verschlüssen von Bedeutung ist.
- Im Bereich von Verschlussystemen ist noch nachzuweisen, ob die festgestellte Permeabilitätsreduktion ausreichend ist, oder ob ein Nachschneiden der Hohlräume im Verschlussbereich unmittelbar vor Verschlusseinbringung nötig und/oder wirksam ist. Um die Permeabilitätsreduktion sicher quantitativ zu prognostizieren, ist eine Weiterentwicklung und Absicherung der Modelle zur Beschreibung von Schädigung und Verheilung notwendig. Die Wirksamkeit des Nachschneidens von Hohlräumen zur Minimierung der Auflockerungszone ist noch durch geeignete Messungen nachzuweisen. Außerdem stellt die Kontaktzone zwischen Verschluss und Gebirge ein spezielles zu untersuchendes Problem dar.

## 9 Literatur

- /ANS 92/ „ANSYS User's Manual“, Swanson Analysis Systems, Houston (1992)
- /FEC 01/ Fechner, T., „SensInv2D-Manual“, Geotomographie, Neuwied (2001)
- /HAE 01/ Häfner, F., Belohlavek, K.-U., Behr, A., Förster, S., Pohl, A., „In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge“, Abschlussbericht, TU Bergakademie Freiberg (2001)
- /HEU 88/ Heusermann, S., „Aspects of Overcoring Stress Measurements in Rock Salt“, in The Mechanical Behavior of Salt. Proceedings of the Second Conference, Hanover, September 24 – 28, 1984, Trans Tech Publications (1988)
- /HEU 96/ Heusermann, S., „Measurement of Initial Rock Stress at the Asse Salt Mine“, in The Mechanical Behavior of Salt. Proceedings of the Third Conference, Palaiseau, September 14 – 16, 1993, Trans Tech Publications (1996)
- /HUN 92/ Hunsche, U. E., „Failure behaviour of rock salt around underground cavities“, 7<sup>th</sup> International Symposium on Salt, Kyoto (1992)
- /KEM 95/ Kemna, A., „Tomographische Inversion des spezifischen Widerstandes in der Geoelektrik“, Dissertation, Universität Köln (1995)
- /KUL 94/ Kulenkampf, J., Yaramanci, U., „requency dependent complex resistivity of rock samples and related petrophysical parameters“, Geophysical prospecting, Vol. 41, p 995-1008 (1993)
- /MÜL 99/ Müller-Lyda, I., „Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz – Ableitung einer Permeabilitäts-Druck-Relation für Langzeitsicherheitsanalysen“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-151, Braunschweig (1999)

- /RAT 91/ Ratigan, J. L., Van Sambeek, L. L., De Vries, K. L., Nieland, J. D., „The influence of seal design on the development of the disturbed rock zone in the WIPP alcove seal tests“, Topical Report RSI-0400 (1991)
- /RES 95/ „RES2DINV – 2D resistivity inversion using the Gauss-Broyden least-squares method“, Campus Geophysical Instruments Ltd, Birmingham (1995)
- /SPI 88/ Spiers, C. J., Peach, C. J., Brzesowski, R. M., Schutjens, P. M. T. M., Liesenberg, J. L., Zwart, H. J., „Long term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks“, EUR 11848, Utrecht (1988)
- /WEL 97/ „Welttest 200 Technical Description“, Schlumberger-Geoquest, Logined BV (1997)
- /WIE 98/ Wieczorek, K., Zimmer, U., „Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge“, Abschlussbericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2651, Braunschweig (1998)
- /YAR 89/ Yaramanci, U., Flach, D., „Entwicklung einer vollautomatischen Gleichstrom-Geoelektrikanlage für den Einsatz im Vorhaben Dammbau im Salzgebirge“, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) mbH, GSF-TL 1/89, Braunschweig (1989)
- /YAR 94/ Yaramanci, U., „Relation of in situ resistivity to water content in salt rocks“, Geophysical Prospecting, Vol. 41, p 229-239 (1994)

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**