

¹⁾ Preussag AG
Erdöl und Erdgas, Labor Berkhöpen
Postfach 16 20
3150 Peine

²⁾ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
Projektgruppe KTB
Postfach 51 01 53
3000 Hannover 51

³⁾ Preussag AG
Erdöl und Erdgas, Systementwicklung und Simulation
Postfach 48 29
3000 Hannover 61

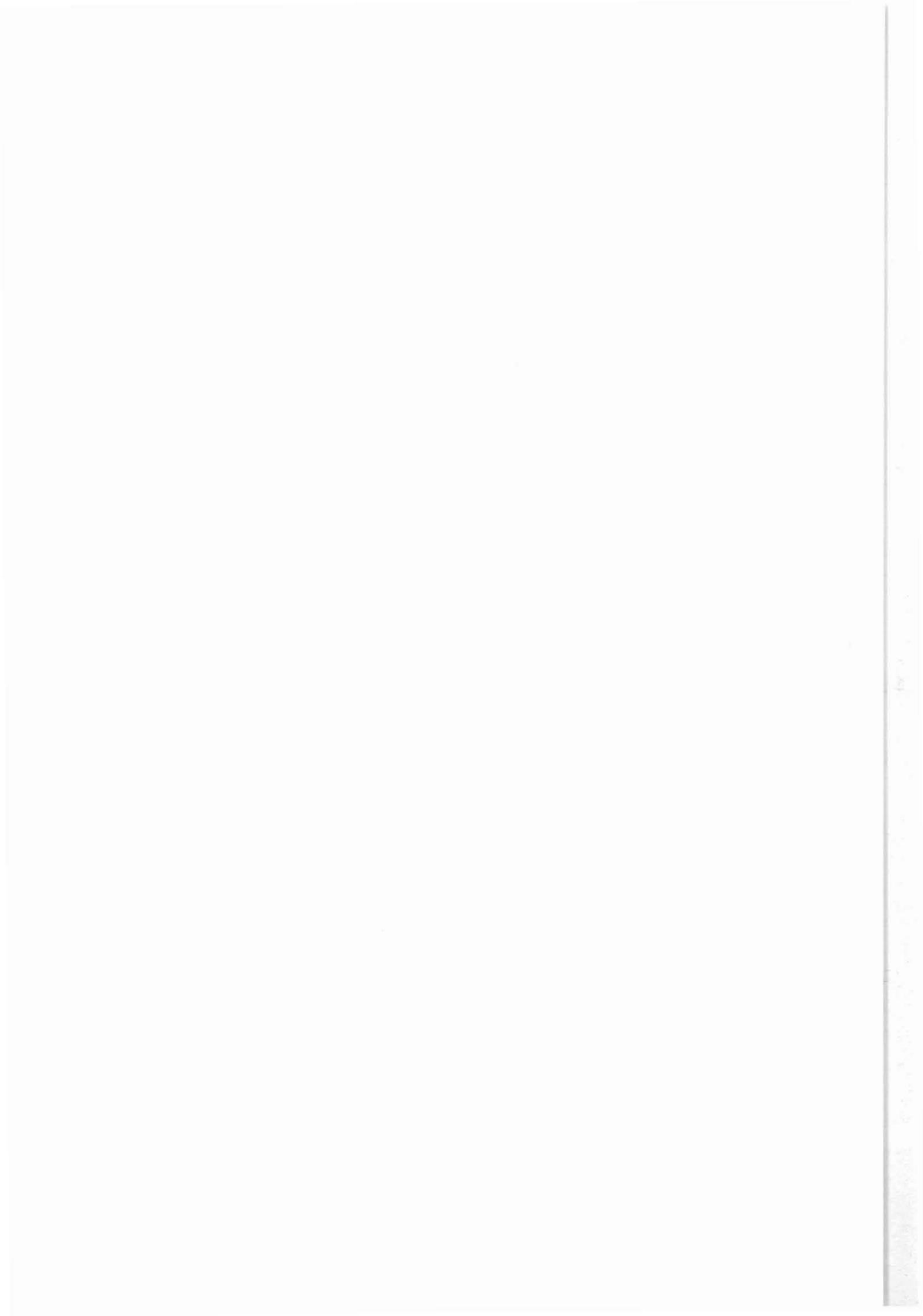
Entwicklung und Erprobung einer Meßanordnung mit geoelektrischer Anzeige im Labormaßstab zur Bestimmung von hydraulischen Parametern und Gebirgsspannungen

R. Sobott ¹⁾
W. Kessels ²⁾
G. Klingebiel ¹⁾
H. Winnacker ³⁾



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung/Abstract.....	233
1. Einleitung.....	234
2. Grundlagen zur Ermittlung der hydraulischen Parameter.....	235
3. Grundlagen zur Spannungsermittlung.....	239
4. Beschreibung der Meßanordnung mit geoelektrischer Anzeige.....	244
5. Beschreibung der Versuchsanlage.....	245
6. Versuchsdurchführung.....	245
6.1 Probenmaterial.....	245
6.2 Beschreibung des Versuchsablaufs.....	246
7. Versuchsergebnisse und deren Interpretation..	248
7.1 Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand als Funktion des Manschettendruckes.....	248
7.2 Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand als Funktion des Bohrlochdruckes.....	249
7.3 Zeitliche Abhängigkeit des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes beim Injizieren von Lösungen mit anderer Elektrolytkonzentration als die der Porenflüssigkeit ins Bohrloch mit konstanter Rate (Dispersionsversuche).....	251



		Seite
8.	Ausblick.....	252
9.	Literatur.....	253
10.	Anlagen.....	257

Zusammenfassung

Zum Verständnis der Dynamik der Erdkruste ist die Kenntnis des Spannungsfeldes in der Kruste und des Fluidtransportes in Gesteinen eine notwendige Voraussetzung. Deshalb kommt der experimentellen Bestimmung des rezent vorherrschenden Spannungsfeldes und der Parameter für den Fluidtransport innerhalb des KTB-Projektes große Bedeutung zu.

Alternativ zu konventionellen Bohrlochtesten in abgepackerten Bereichen, die möglicherweise aus technischen Gründen in Teufen von größer als 5000 m in absehbarer Zeit nicht realisierbar sind, sollte deshalb eine Sonde mit geoelektrischer Anzeige im Labormaßstab entwickelt und erprobt werden, deren Meßsignale eine Auswertung hinsichtlich der Bestimmung hydraulischer Parameter und des Spannungsfeldes zulassen. Das Meßprinzip beruht auf einer Änderung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Gesteins entweder als Folge der Invasion eines von der Porenflüssigkeit stark abweichenden Elektrolyten oder dem Öffnen bzw. Schließen von Mikrorissen durch Änderung des Bohrlochdruckes. Die Sonde wurde für Autoklavexperimente an zylindrischen Gesteinsproben von 16 cm Durchmesser und 8 cm Länge entwickelt. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Invasion verschieden leitfähiger Spülung in den Porenraum deutliche Änderungen der elektrischen Gesteinsleitfähigkeit hervorruft, die sich zur Bestimmung der hydraulischen Parameter des Gesteins auswerten lassen. Auch hinsichtlich der Erfassung des Spannungsfeldes konnte ein erwarteter Meßeffect nachgewiesen werden, der allerdings um Größenordnungen kleiner ist als der durch die Invasion hochleitfähiger Spülung in den Porenraum hervorgerufene.

Abstract

The understanding of the dynamics of the crustal evolution of the earth requires profound knowledge of the stress field in the crust and the fluid transport in rocks. Therefore, the experimental determination of the recent stress field and the parameters governing the fluid transport in rocks has a high priority among the projects related to the KTB. Alternatively to conventional packer tests in boreholes which for technical reasons may not be possible in depths greater than 5000 m in the foreseeable future, a probe with geoelectrical registration should be developed and tested which produces signals that can be evaluated with respect to the determination of hydraulic parameters and the stress field. The measuring principle of the probe depends on the change of the apparent specific electrical resistance of the rock either as a consequence of the invasion of an electrolyte different from the pore fluid or the opening or closure, resp., of microfracs by variation of the borehole pressure. The probe was developed for autoclave experiments using cylindrical rock samples with 16 cm diameter and 8 cm length. The results show that the invasion of differently conductive drilling fluids into the pore space produces distinct changes of the specific electrical rock conductivity which can be evaluated with respect to the determination of the hydraulic parameters.

Regarding the determination of the stress field, the autoclave experiments also demonstrated an expected measurable effect which is, however, by orders of magnitudes smaller than that produced by the invasion of highly conductive drilling fluid into the pore space.

1. Einleitung

Grundlegende Bedeutung für die Dynamik der Krustenentwicklung der Erde hat die Kenntnis des Spannungsfeldes in der Kruste und die Erfassung des Fluidtransportes im Gestein. Die experimentelle Bestimmung des rezent vorherrschenden Spannungsfeldes und der Parameter für den Fluidtransport sind daher gemäß den wissenschaftlichen Zielsetzungen des KTB-Projektes von hoher Priorität. Die aussagekräftigsten experimentellen Methoden sowohl zur Spannungsermittlung als auch zur Bestimmung der hydraulischen Parameter des Gebirges haben eine Druckänderung in der Spülungssäule zur Grundlage. Im allgemeinen werden diese Experimente im abgepackerten Bohrlochbereich durchgeführt.

Zur Spannungsermittlung wird dabei der Druck soweit gesteigert, bis das Gebirge aufreißt und ein Frac entsteht (BAUMGÄRTNER 1987). Ausgewertet wird dabei der zeitabhängige Druckverlauf im abgepackerten Bereich.

Zur Ermittlung der hydraulischen Parameter des Gebirges wird der Spülungsdruck im abgepackerten Bereich kurzzeitig positiv oder negativ gegenüber dem Normalzustand geändert und dann der Wiederangleichungsvorgang beobachtet und hinsichtlich der hydraulischen Parameter ausgewertet.

Beide Verfahren basieren also auf der Auswertung einer Spülungsdruckmessung. Insbesondere hinsichtlich der Meßteufe wird die Durchführbarkeit solcher Packerteste zur Zeit im wesentlichen durch die Einsatzgrenze der erhältlichen Packerkunststoffe bestimmt und liegt zur Zeit bei ca. 5000 m. Eine Packertechnologie, die Teste bis in den Teufenbereich von 10000 m ermöglichen könnte, ist zur Zeit nicht in Sicht.

Eine Alternative zu einem Packertest im zeitabhängiger Druckregistrierung kann die Bestimmung der elektrischen Gesteinsleitfähigkeit während einer Druckänderung in der Spülungssäule sein. Koppelt man z. B. eine solche Druckänderung mit einer plötzlichen Freisetzung eines salinen Tracers in der Spülung, so wird diese relativ hochleitfähige Spülung in den Porenraum des Gesteins eindringen und seine elektrische Leitfähigkeit verändern. Eine Beobachtung einer zeitlichen Änderung einer integralen Gesteinsleitfähigkeit mit genügender Eindringtiefe läßt also Aussagen über das Eindringen der Spülung in das Gestein zu.

Maßgebend für die Geschwindigkeit des Eindringvorganges sind dabei die hydraulische Leitfähigkeit, das Speicher- und das Rückhaltevermögen des Gesteins für den verwendeten Tracer.

Die Ermittlung der hydraulischen und dispersiven Parameter des Gesteins durch Messung seiner elektrischen Leitfähigkeit bietet gegenüber einem konventionellen hydraulischen Test den Vorteil, daß der zu untersuchende Bohrlochabschnitt nicht vom Restbohrloch durch Packer hydraulisch isoliert werden muß. Eine Permeabilitätsbestimmung kann also dadurch durchgeführt werden daß der Druck der gesamten Spülungssäule um einige bar geändert und gleichzeitig ein Leitfähigkeitstracer freigesetzt wird. Die Registrierung der Gesteinsleitfähigkeit kann dann mit einem Dipmeter oder FMST-Logging-Gerät ohne Packereinsatz durchgeführt werden. Hierdurch erscheint auch in großen Teufen eine Bestimmung der hydraulischen Parameter möglich zu sein.

Leitfähigkeitsänderungen im Gestein können auch durch Öffnen und Schließen von Mikrorissen infolge von Druckänderungen hervorgerufen werden. Da dieser Mechanismus vom im Gebirge herrschenden Spannungsfeld abhängig ist, kann man erwarten, daß Aussagen über das Spannungsfeld mit Hilfe geoelektrischer Messungen möglich sind.

Durch die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse von Autoklavexperimenten, die im Labor Berkhöpen der PREUSSAG AG, Erdöl und Erdgas, durchgeführt wurden, wird gezeigt, daß die Invasion unterschiedlich leitfähiger Spülung in das Gestein deutliche Änderungen der elektrischen Gesteinsleitfähigkeit hervorruft. Für eine Bestimmung der hydraulischen Parameter steht damit ein sehr empfindlich registrierendes Meßsystem zur Verfügung. Auch hinsichtlich einer Spannungsinterpretation wurde mit den Autoklavmessungen ein erwarteter Meßeffect festgestellt. Allerdings liegt dieser nicht in der Größenordnung, die eine Invasion hochleitfähiger Spülung in den Porenraum des Gesteins hervorruft. Trotzdem bleibt gegenüber den üblichen Hydrofrac-Spannungsmessungen der Vorteil, daß mit den geoelektrischen Messungen im wesentlichen Mikrorisse und keine großräumigen Fracs erzeugt werden müssen. Die hier vorgestellten Messungen wurden unter Verwendung sehr niederfrequenter Wechselströme durch eine Sonde mit 4-Punkt-Elektrodenanordnung an der Bohrlochwand ermittelt.

2. Grundlagen zur Ermittlung der hydraulischen Parameter

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß in einer Bohrung eine geoelektrische 4-Punkt-Anordnung, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, installiert wird.

Der mit dieser Anordnung ermittelte scheinbare spezifische Widerstand wird sich mit der Veränderung der Spülungsinvasionszone ebenfalls verändern, wenn die Spülung eine vom Formationswasser unterschiedliche Leitfähigkeit besitzt.

Die Aufgabenstellung der Interpretation einer solchen Messung besteht nun darin, aus dem Zeitverlauf des scheinbaren spezifischen Widerstandes unter Verwendung einer Inversionsrechnung auf die maßgebenden hydraulischen Parameter und Transportfaktoren zu schließen. Der formale Ablauf einer solchen Bohrlochmessung könnte folgendermaßen durchgeführt werden:

- Ablassen einer entsprechenden Geoelektriksonde in den zu untersuchenden Horizont
- Anlegen der Elektroden an die Bohrlochwand (z. B. mit einem Pad-System)
- Freigabe eines Salztracers im zu untersuchenden Bohrlochabschnitt
- Registrierung der zeitlichen Veränderung des Formationswiderstandes zur Feststellung, ob ein Spülungsabfluß auftritt
- Erhöhung des Druckes in der Spülungssäule und erneute Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der hochleitfähigen Invasionszone durch Beobachtung der zeitabhängigen scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit.

Diese in der Zielsetzung skizzierte Bohrlochmessung entspricht den in diesem Bericht beschriebenen Autoklavmessungen, wenn man von Maßstabsfragen absieht.

Obwohl es nicht Aufgabe dieses KTB-Projektes war, ein Inversionsverfahren zur Interpretation der Zeitabhängigkeit des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes zu erarbeiten, soll nachfolgend kurz skizziert werden, welche Gesetzmäßigkeit einem solchen Inversionsverfahren zugrunde liegen. Die folgende Erläuterung erfolgt der Deutlichkeit halber in der Reihenfolge einer Modell- und nicht der Inversionsrechnung.

Ausgangspunkt einer solchen Modellrechnung ist

1. die Berechnung des Porendruck- und Strömungsfeldes nach einer plötzlichen Änderung des Druckes in der Spülungssäule. Die dazu benötigten Gleichungen sind die DARCY- und die Kontinuitätsgleichung (BEAR 1972, KESSELS 1987a):

$$v_D = -\frac{K}{\eta} \nabla p \quad (\text{ Gl. 1 })$$

$$\nabla \left(\frac{\gamma \cdot K}{\eta} \nabla p \right) = \gamma \cdot S \frac{\delta p}{\delta t} \quad (\text{ Gl. 2 })$$

p = Druck
t = Zeit
K = Permeabilität
S = Speicherkoeffizient
 η = Viskosität
v = Strömungsvektor
 γ = Dichte
 ∇ = Nabla-Operator

Nach der Berechnung des Strömungsfeldes muß der Transport des hochleitfähigen Elektrolyts im Porenraum berechnet werden.

2. Grundlage für die Ausbreitung des hochleitfähigen Salztracers ist eine Kontinuitätsgleichung, in die das unter 1. berechnete zeitabhängige Geschwindigkeitsfeld v mit eingeht, wie aus Gleichung 3 ersichtlich wird (HADERMANN 1980):

$$\nabla (\hat{D} \nabla c - v \cdot c) = R \frac{\delta c}{\delta t} \quad (\text{ Gl. 3 })$$

\hat{D} = Dispersionstensor
R = Retentionsfaktor
C (r,t) = Tracerkonzentration

Der erste Term auf der linken Seite in Gleichung 3 beschreibt dabei die dispergierende Wirkung des Porensystems, der zweite den konvektiven Tracertransport, während das Produkt auf der rechten Seite der Gleichung die Rückhaltefähigkeit des Porensystems für den Tracer beschreibt.

3. Nach Bestimmung der Tracerkonzentration im Porenraum mit Hilfe von Gleichung 3 kann diese in den spezifischen Widerstand der Porenflüssigkeit umgerechnet werden, wobei in den meisten Fällen ein Ansatz gemäß Gleichung 4 ausreichend ist.

$$\rho(r, t) = \rho_0 + A \cdot c(r, t) \quad (\text{Gl. 4})$$

- $\rho(r, t)$ = spezifischer elektrischer Widerstand
 ρ_0 = spezifischer elektrischer Widerstand vor Einbringen des Tracers
A = Konstante

4. Der letzte Schritt der modellmäßigen Betrachtung ist die Berechnung der mit der 4-Punkt-Anordnung bestimmten scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände ρ aus der Leitfähigkeitsverteilung $\chi(r, t)$ (KERTZ 1969, KESSELS et al. 1985).

Für eine Inversionsrechnung besteht nach den vorstehend erläuterten Zusammenhängen grundsätzlich die Möglichkeit, daß die gesteinspezifischen Parameter

- Permeabilität K
- Speicherkoeffizient S
- Dispersionskonstante \tilde{D}
- Retentionsfaktor R
- Porosität ϕ

ermittelt werden können.

Ein besonders einfach zu berechnender Fall ist ein Tracerexperiment mit konstanter Einpreßrate, wenn von einer kolbenförmigen Verdrängung der ursprünglich vorhandenen Porenflüssigkeit ausgegangen werden kann. Dies ist, wie auch die Messungen zeigen, am ehesten bei der Injektion einer hochsalinaren Flüssigkeit in einen Porenraum, der ursprünglich mit einer niedrigsalinaren Flüssigkeit gefüllt ist, möglich. Wird im umgekehrten Fall versucht, mit destilliertem Wasser eine hochsalinare Lösung aus dem Porenraum zu verdrängen, ist der Rückhalte- und Dispersionseffekt so stark, daß nicht mehr von einer kolbenförmigen Verdrängung ausgegangen werden kann.

Bei einem Test mit konstanter Einpreßrate q erhält man bei kolbenförmiger Verdrängung die Invasionstiefe h der in das Gestein injizierten Flüssigkeit durch die Gleichung 5.

$$h = \sqrt{R^2 + \frac{4 \cdot q \cdot t}{\pi \cdot h \cdot \phi}} - R \quad (\text{Gl. 5})$$

- t = Zeit nach Beginn der Injektion
 ϕ = Porosität

Als Gesteinsparameter geht hier nur die Porosität des Gesteins ein. In erster Näherung wird nun unter Verwendung von h als obere Schichtdicke für kleine Eindringtiefen von einem geoelektrischen Zweischichtfall ausgegangen, so daß sich die scheinbaren spezifischen Widerstände in bekannter Art und Weise berechnen lassen (MUNDRY & HOMILIUS 1979). Wie stark eine Änderung der Porosität auf das Zeitverhalten des scheinbaren spezifischen Widerstandes wirkt, geht aus der Abbildung 1 hervor. Zugrunde gelegt wurden hier die Daten des Autoklavexperimentes Nr. 9. Allerdings stimmt der Geometriefaktor für die Berechnung des scheinbaren spezifischen Widerstandes, der in diesem Fall gemäß Schlumberger Anordnung angesetzt wurde, nicht mit der tatsächlichen überein. Für den Anfangszustand wurde dabei ein spezifischer Widerstand von $\rho = 25 \Omega m$ angesetzt und für die Invasionszone ein solcher von $\rho = 5 \Omega m$. Die beste Anpassung an das Experiment 9 wird für eine Porosität von ca. 5% erreicht. Diese Porosität ist etwas höher als die labormäßig bestimmte durchschnittliche Porosität von 3,3%, was mit den hier in Anwendung gebrachten Vereinfachungen sowohl hinsichtlich der geoelektrischen als auch der strömungsmechanischen Modellierung zu erklären ist.

Für eine Bestimmung der anderen Transportparameter des Gesteins (neben der Porosität) müßte dann allerdings der zeitabhängige Druckverlauf in der Bohrung mit berücksichtigt werden, was erst durch eine vollständige Modellierung, wie vorstehend aufgezeigt, möglich ist.

3. Grundlagen zur Spannungsermittlung

Für eine Spannungsermittlung unter Verwendung einer geoelektrischen Messung ist es im Gegensatz zu dem in Abschnitt 2 beschriebenen Meßverfahren von größter Bedeutung, daß Spülungsleitfähigkeit und Leitfähigkeit der Fluide im Porenraum gleich sind.

Notwendig ist dies, da aus der zeitlichen Änderung des spezifischen Gesteinswiderstandes bei Druckänderung der Spülungssäule auf das Öffnen und Schließen von Mikrorissen geschlossen werden soll, was nur relativ kleine Änderungen des spezifischen Widerstandes erwarten läßt, die nicht von Leitfähigkeitsänderungen der Porenflüssigkeit überdeckt werden sollen.

Der Einfluß der Änderung der Spannung in einem Probenkörper auf einen spezifischen elektrischen Widerstand ist schon in diversen Veröffentlichungen (BRACE, W.F., ORANGE, A.S. & MADDEN, T.R. 1965, KRANZ, R.L. 1979, LOCKHARDT, N.C. 1980, LOCKNER, D.A. & BYERLEE, J.D. 1985a, PARKHOMENKO, E.I. 1982) behandelt worden.

Diese meist im Druckspannungsbereich vorgenommenen Untersuchungen zeigen mit wachsender mittlerer Spannung eine Zunahme des spezifischen Widerstandes, besonders im Druckspannungsbereich bis 2 kbar. Erklärt werden kann diese Änderung des spezifischen Widerstandes durch ein Schließen von vorhandenen Mikrorissen durch den außen an die Probe angelegten Druck. Diese im wesentlichen elastische Deformation des Porenraums und das bevorzugte Schließen von flachen Mikrorissen erzeugt nach BRACE et al. (1965) Widerstandsänderungen bis zu einem Faktor 2 bei Änderung des hydrostatischen Druckes um 100 bar. Wie stark der Porenraum auf eine solche Änderung reagiert, hängt dabei sehr stark von der in Abbildung 2 gezeigten Modellvorstellung für die Mechanik eines Mikrorisses ab. Dieses Modell entspricht den Vorstellungen von JUNG (1986) mit dem Unterschied, daß hier von einem Kräftegleichgewicht und nicht vom effektiven Streßkonzept ausgegangen wird.

Die Rißweite W des Mikrorisses, die entscheidend für den Ionentransport im Elektrolyt ist, wird vorgegeben durch das großräumige Spannungs- und Porenwasserdruckfeld im Gebirge. Wie stark eine Änderung beider sich auf eine Änderung der Rißweite und damit der Porosität auswirkt, hängt im wesentlichen von der mechanischen Steifheit der Kontaktpunkte des Mikrorisses ab, an denen die beiden Rißoberflächen sich berühren. Symbolisch sind diese Kontaktpunkte in Abbildung 2 durch Federn dargestellt. Selbstverständlich gibt es Punkte zwischen beiden Rißoberflächen, die erst dann anfangen, eine Stützwirkung auszuüben, wenn eine bestimmte mittlere Rißweite unterschritten wird. Eine solche Kontaktstelle wird in Abbildung 2 durch die mittlere Feder symbolisiert. Abhebevorgänge von Rißoberflächen wurden durch Bestimmung des elektrischen Übergangswiderstandes von zwei senkrecht belasteten übereinanderliegenden Metallblechen von KESSELS (1986) untersucht. Hier wurde nachgewiesen, daß der Abhebevorgang der Bleche voneinander bei Druckbeaufschlagung zwischen der hydraulischen Spannungskompensation beginnt. Scherkräfte entlang der Rißoberfläche werden in diesem einfachen Modell nicht betrachtet.

Der ganze Riß befindet sich im Kräftegleichgewicht. Es gilt eine Beziehung, die besagt, daß die Matrixspannung durch die Kraft des Porenwasserdruckes und die Kraftübertragung durch die Stützstellen kompensiert wird, so daß gilt:

$$K_0 = \sum_i K_i + K_p \quad (\text{Gl. 6})$$

- K_0 = Normalkraft auf den Riß durch die Gebirgsspannung
 K_i = Kraft der i -ten Stützstelle
 K_p = Kraft durch Porendruck

Für eine große Zahl von Stützstellen, die jede ihre individuelle Federcharakteristik besitzt, kann nun eine Ersatzfeder-Charakteristik angesetzt werden, die i.a. für große Druckänderungen nicht mehr linear ist. Für das einfache Modell in Abbildung 2 gilt:

$$K_0 = F((\hat{\sigma}\vec{n})\vec{n}) = (\sum_i c_i)W + P \cdot f \quad (\text{Gl. 7})$$

- $\hat{\sigma}$ = Spannungstensor des Gebirges
- F = gesamte Rißfläche
- \vec{n} = Normalvektor der Rißfläche
- f = mit Flüssigkeit benetzter Anteil der Rißfläche
- P = Flüssigkeitsdruck im Riß (Porendruck)
- c_i = Federkonstante an der i-ten Rißstelle
- W = mittlere Rißweite

Wird nun das Kräftegleichgewicht durch Änderung der Gebirgsspannung oder des Flüssigkeitsdruckes P gestört, werden sich die drei Größen F , f und W so ändern, daß wieder ein Kräftegleichgewicht hergestellt wird. Eine Veränderung bzw. Vergrößerung von P führt i.a. zu einer Vergrößerung von W und F . Beides führt, wenn man eine Rißaufweitung betrachtet, zu einer Herabsetzung des spezifischen Gesteinswiderstandes durch stärkere Vernetzung und Vergrößerung der elektrolytischen Leitungsquerschnitte. Insbesondere der Öffnungsmechanismus von Mikrorissen wird selbstverständlich neben den hier beschriebenen einfachen Modellannahmen durch die großräumigen Einspannverhältnisse und die mikroskopischen inhomogenen Spannungsfelder der Mineralkörner bestimmt. Bei Vernachlässigung des Anteils, bei dem das Gestein direkt in Kontakt ist, ergibt sich durch $f=F$ automatisch aus Gleichung 7 das Konzept des effektiven Stresses, bei dem der Flüssigkeitsdruck von der Normalkraft durch die Gebirgsspannung einfach subtrahiert wird.

Wird nun die Kraft der Porenflüssigkeit größer oder gleich der außen auf den Riß drückenden Kraft der Matrix, werden die beiden Rißoberflächen voneinander abheben und über die Kontaktstellen wird im Mittel keine Kraft mehr zwischen beiden Rißoberflächen übertragen. Der Porendruck (nun gleich oder größer als der Frac-Druck) genügt, um das Kräftegleichgewicht herzustellen. Wenn der Porendruck makroskopisch größer als die kleinste Hauptspannung ist, dann ist die Rißaufweitung nur noch von der großräumigen mechanischen Einspannung des gesamten Gesteinsbereiches abhängig.

Bei mikroskopischer Betrachtungsweise kann für die Mikrorißbildung davon ausgegangen werden, daß insbesondere kristalline Gesteine ein Gefüge besitzen, das durch unterschiedliche Mineralkornzusammensetzung im mikroskopischen Bereich ein inhomogenes Spannungsfeld aufweist und auch inhomogen reagiert. KESSELS (1987) beschreibt dies sowohl für den Entlastungs- als auch für abkühlungsfall des Gesteins. Durch die unterschiedlichen Kompressionsmoduli und thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mineralkörner (CORRENS 1968) reagieren die Kristalle im Gestein auf eine Spannungs- oder Temperaturänderung durch ein im mikroskopischen Bereich der Mineralkorngröße sehr inhomogenes Spannungsfeld. Hieraus folgt, daß schon vor dem Erreichen des makroskopischen Frac-Druckes an einzelnen Mineralkörnern Spannungen entstehen, die in ihren Hauptachsenbeträgen kleiner als die Gebirgsspannungen sind. In diesen makroskopischen Gebieten niedriger Matrixspannung können sich bei Erhöhung des Porendruckes Mikrorisse öffnen, bevor der makroskopische Frac-Druck erreicht ist. Belegt wird dies durch diverse Accoustic Emission Experimente (RUMMEL 1965).

Diese Mikrorißaufweitung, die bei Erhöhung des Spülungsdruckes auftritt, gilt es mit Hilfe der hier beschriebenen geoelektrischen Messungen im Bohrloch festzustellen. Die Zielsetzung ist dann die Messung hinsichtlich der Stärke und Orientierung des Spannungsfeldes interpretieren zu können, bevor der Spülungsdruck den makroskopischen Frac-Druck erreicht (RUMMEL 1983).

Wie sich der makroskopische Öffnungsvorgang eines Risses in der Bohrlochswand auswirkt, ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die Mikrorißbildung ist hierbei in ihrer statistischen Orientierung entsprechend der Orientierung des Spannungsfeldes als Vorläufer des makroskopischen Fracs anzusehen. In der linken Abbildung oben ist ein vorhandener Riß im Gestein vor dem Durchteufen dargestellt. Bei einem angenommenen hydrostatischen Spannungszustand wird ein Volumenelement am Rande der noch zu erstellenden Bohrlochswand von allen Seiten gleichmäßig belastet. Diese konstante Spannung geht auch aus dem mittleren Diagramm hervor. Neben dieser Abbildung ist der Zustand des Risses nach dem Durchteufen dieses Gesteinsabschnittes dargestellt. Der hier vertikal angeordnete Riß ist durch die hohe Tangentialspannung, die sich am Bohrlochrand ausbildet, senkrecht zur Rißfläche belastet, so daß seine mittlere Öffnungsweite sich verringert hat. Die Tangentialspannung, die senkrecht zur Rißfläche wirkt, ist durch die Entlastung beim Bohrvorgang gestiegen, während die Radialkomponente auf den Spülungsdruck abgesunken ist.

Im rechten Diagramm ist skizziert, was passiert, wenn der Spülungsdruck z. B. im abgepackerten Bereich über die Gebirgsspannung gesteigert wird. Die Tangentialspannungen fallen dann unter den Spülungsdruckwert und die Bohrlochwand wird weiter auseinandergedrückt als dies im unverritzten Gebirge der Fall war, und der Riß kann sich öffnen. Im unteren Diagramm ist wiederum der Spannungsverlauf im Gestein dargestellt. Die gestrichelten Linien stellen in der Abbildung die Lage der Gesteinspunkte im unverritzten Gebirge dar.

Der eben geschilderte Fall bezieht sich allerdings auf ein kontinuumsmechanisch homogenes Gestein mit einem vorhandenen Riß.

Neben den mikroskopischen Spannungen, die zu einer Mikrorißbildung vor dem Erreichen des Frac-Druckes führen, ist auch noch eine Plastifizierung des Bohrlochrandes mit zu berücksichtigen (SOKOLOWSKI 1955). In Abbildung 3 ist der Spannungsverlauf bei Plastifizierung für die Tangential- und Radialkomponente dargestellt. Die Plastifizierung bewirkt, daß die Tangentialspannung, die mit ihrem Gegendruck zum Gebirge für eine offene Bohrung sorgt, ihr Maximum nicht am Rand sondern erst in einem Abstand von der Bohrlochwand besitzt. Die Radialspannung wird dagegen weniger von der Plastifizierung beeinflusst, da ihr Wert an der Bohrlochwand aus Gleichgewichtsgründen vorgegeben ist.

Wird nun in einem Bohrloch mit plastifiziertem Bohrlochrand der Spülungsdruck erhöht, wird das Gebirge elastisch reagieren, so daß die durch die Plastifizierung ohnehin schon abgesunkene Tangentialspannung noch weiter absinkt und so kleiner als der Spülungsdruck werden kann. Dies bedeutet, daß auch das Kriterium für die makroskopische Öffnung von Rissen an der Bohrlochwand schon vor Erreichen des Frac-Druckes erfüllt ist. Allerdings gilt dies nur für einen bohrlochnahen Bereich.

Für das hier diskutierte Verfahren bedeutet dies, daß eine gute Chance besteht, mit geoelektrischen Methoden eine verstärkte Mikrorißbildung festzustellen, die vor dem Erreichen des originären Spannungszustandes verstärkt zunimmt und gestattet, auf das großräumige Fracturing des Gesteins zu verzichten.

Bei einem mehrachsigen Spannungszustand besteht die Möglichkeit, mit orientierten Pads das Öffnen und Schließen der Mikrorisse in den unterschiedlich beanspruchten Bohrlochwandbereich zu detektieren. So ist es z. B. möglich, daß bei Plastifizierung in Richtung der großen horizontalen Hauptspannungsachse die Mikrorisse bei Erhöhung des Spülungsdruckes erst einmal geschlossen werden, bevor sie sich dann wieder aufweiten.

Bei starken Spannungsanisotropien können in diesem Bereich durchaus im Nahbereich der Bohrlochwand tangentiale Zugspannungen auftreten. Mit den im folgenden erläuterten Autoklav-Versuchen konnte eine verstärkte Mikrorißbildung vor Erreichen des Frac-Druckes geoelektrisch nachgewiesen werden.

4. Beschreibung der Meßanordnung mit geoelektrischer Anzeige

Die Entwicklung der Meßanordnung (Abbildung 4) ging von einem zylindrischen Gesteinsprobenkörper mit ca. 16 cm Durchmesser und 9 cm Länge aus, der eine zentrale Bohrung von 3 cm Durchmesser zur Aufnahme einer mit Elektroden bestückten Sonde besitzt.

Der Sondenkörper besteht aus einem gummiähnlichen Material (FLEXAN) und ist am oberen und unteren Ende als Packer ausgebildet. Im Mittelteil befinden sich sechs Elektroden, jeweils drei ober- und unterhalb der Öffnung, zur Injektion von Flüssigkeiten ins Bohrloch. Die Einspeisung eines konstanten Stroms erfolgt über die äußeren Elektroden 1 und 6, die Messung der Potentialdifferenz zwischen den inneren Elektroden 3 und 4. Die obere und untere Stirnfläche des Gesteinszylinders wird mit Bronzescheiben, die Mantelfläche mit einer Gummimanschette abgedeckt. Durch unter Druck stehendes Öl im Autoklaven werden die Bronzescheiben und Gummimanschette an die Probe gepreßt und schließen sie druckdicht ab.

Zur Montage der Meßanordnung wird zuerst die Probe über die Sonde, welche durch die Kabelzüge und Injektionsleitung mehr oder weniger fest mit einer der frontalen Abdeckungen aus Bronze verbunden ist, geschoben. Bevor dann die zweite Bronzescheibe auf die Gesteinsprobe gelegt wird, muß die Gummimanschette über die Probe gezogen werden, da die beiden frontalen Abdeckscheiben durch vier dicht am Gesteinskörper verlaufende Schrauben zentrisch miteinander verbunden werden. Zwischen den Bronzescheiben und dem Gesteinszylinder befinden sich dünne TEFLON-Scheiben mit eingearbeiteten ringförmigen Nuten zur Aufnahme abdichtender O-Ringe. Durch das plastische Verhalten der Druckbelasteten TEFLON-Scheiben werden etwaige geringfügige Abweichungen in der Planparallelität der Stirnflächen des Gesteinszylinders zueinander ausgeglichen. Die zweite Bronzescheibe enthält eine zentrale Bohrung, in der ein zylindrischer Bolzen durch das Anziehen einer Druckschraube an die Sonde gepreßt wird und durch die so hervorgerufene Stauchung des Gummikörpers die Packer und Elektroden fest an die Gesteinsoberfläche in der Bohrung preßt.

Die montierte Meßanordnung wird mit vier Schrauben am Deckel des horizontal stehenden Autoklaven befestigt.

Bei den ersten Versuchen traten Probleme mit der druckdichten Kabelführung durch die Bronzescheibe und der Abdichtung der montierten Meßanordnung durch die Gummimanschette auf. Die Lösung des ersten Problems gelang durch den nachträglichen Einbau einer ölgefüllten Schleusenkammer. Durch Verwendung einer doppelagigen Gummimanschette und Herstellen einer möglichst glatten Mantelfläche am Gesteinszylinder konnte auch das zweite Problem gelöst werden.

5. Beschreibung der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage (Abbildung 5) besteht aus dem Autoklaven, in den die montierte Meßanordnung eingebaut wird, den Pumpen zur Erzeugung des Autoklavdruckes und Injektion von Flüssigkeiten in die Probe, sowohl über die vordere Stirnfläche als auch durch die Sonde ins Bohrloch, und den Einheiten zur Erfassung der Meßdaten.

Durch Absolutdruckaufnehmer werden P_m , der Druck im Autoklaven, P_2 , der Druck auf der Injektionsseite der Probe, und P_b , der Druck im Bohrloch registriert und von einem Data-Logger gespeichert bzw. an einen Rechner Typ HEWLETT & PACKARD 85 zur Protokollierung weitergegeben. Der Druck am Probenausgang, P_1 , entspricht entweder dem momentanen Luftdruck oder dem an einem Druckhalteventil eingestellten Druck P_{DH} .

Für die elektrische Potentialmessung nach der 4-Punkt-Methode wurde eine Konstantstromquelle der Firma TIME Electronics Ltd. verwendet. Der in die Probe eingespeiste Gleichstrom wurde zur Vermeidung von Störungen durch Polarisations-effekte und Eigenpotentialbildungen mit einem Datapulser der Firma Indigel gepulst ($\nu = 0.2 \text{ Hz}$). Die Potentialmessung erfolgte mit dem hochohmigen Multimeter 1071 der Firma Datron, die Aufzeichnung der digital angezeigten Meßwerte mit einem Zweikanal-Schreiber der Firma Philips.

6. Versuchsdurchführung

6.1 Probenmaterial

Alle Versuche wurden mit Granitproben aus dem Okertal /Harz nördlich der Romkerhalle Wasserfälle durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein grobkörniges angewittertes Gestein. Das Auftreten zahlreicher kleiner miarolithischer Hohlräume von einigen Millimeter Durchmesser weist darauf hin, daß es sich um den Granit der Randfazies des Okerplutons handeln muß.

Der Mineralbestand ist Quarz, Kalifeldspat mit perthitischer Entmischung, Plagioklas, welcher z. T. stark umgewandelt (sericizisiert) ist, Biotit (gebleicht und teilweise chloritisiert) und Muskovit, der nur in den Miarolen aufzutreten scheint.

Aus einem großen Granitblock wurden sechs zylindrische Proben mit 3 cm Durchmesser und Längen zwischen 4.13 und 7.25 cm präpariert und deren Porositäten durch Auftriebsswägung bestimmt. Als Mittelwert der sechs Messungen ergab sich eine Porosität von $3.32 \pm 0,2\%$. Die Porosität der Proben wird primär durch Spaltrisse in der Größenordnung von 1 - 1000 μm Dicke entlang von Korngrenzen und durch Mineralkörner sowie durch die bereits erwähnten Miarolen verursacht (Abbildung 6). Unter Zugrundelegung der Durchschnittsporosität besitzen die verwendeten zylindrischen Probekörper von 9 cm Länge und 16 cm Durchmesser ein Porenvolumen von ca. 60 cm^3 . (Das freie Volumen in der abgepackerten Bohrung, dessen Kenntnis für die Interpretation der Dispersionsversuche notwendig ist, wurde zu ca. 19 cm^3 bestimmt.)

Insgesamt wurden drei zylindrische Probekörper aus Granit mit den oben genannten Abmessungen hergestellt und mit den Nummern 1, 2 und 3 gekennzeichnet. An den Proben 2 und 3 wurden die absoluten Flüssigkeitspermeabilitäten für linearen und radialen Fluß bestimmt (siehe 4.2). Dabei ergaben sich folgende Meßwerte, die eine deutliche Anisotropie der Permeabilität erkennen lassen:

Probe 2

Probe 3

K (abs, linear) = 0.11 mD
K (abs, radial) = 0.07 mD

K (abs, linear) = 0,28 mD
K (abs, radial) = 0,69 mD

6.2 Beschreibung des Versuchsablaufs

Zuerst wird die Gesteinsprobe mit einem Elektrolyten definierter Zusammensetzung getränkt. Um eine vollständige Sättigung des Porenraums zu erreichen, verbleibt die Probe 24 Stunden in der Lösung bei einem Unterdruck von 800 Pa. Anschließend wird die Meßanordnung wie oben beschreiben zusammengebaut und am Autoklavdeckel, der Anschlüsse für Kapillarleitungen und einen 6-poligen druckdichten Stecker für elektrische Leitungen enthält, befestigt. Die Injektion und Produktion von Lösungen erfolgt über Kapillarleitungen, die Einspeisung des elektrischen Stroms und die Potentialdifferenzmessung über Kupferkabel. Der Autoklav wird geschlossen und der Manschettendruck ($P_{\text{max.}} = 100 \text{ MPa}$) durch Einpumpen von Öl erzeugt. Die Temperatur im Autoklaven ($25 < T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$) wird während des Versuchs konstant gehalten.

Die Probe kann auf zweierlei Weise mit Flüssigkeiten durchströmt werden: linear bei Injektion über eine der Stirnflächen und radial bei Injektion ins Bohrloch.

Die produzierte Flüssigkeit tritt in beiden Fällen über eine Stirnfläche aus.

Bei Bestimmung der Flüssigkeitspermeabilität für den linearen Fluß wird die Gesteinsprobe bei abgesperrter, ins Bohrloch führender Kapillarleitung parallel zur Zylinderachse durchströmt, und der sich einstellende konstante Differenzdruck für eine vorgegebene konstante Fließrate registriert. Die Permeabilität wird nach der DARCY-Gleichung für inkompressible Medien berechnet (von ENGELHARDT 1960):

$$K = \frac{q \cdot \mu \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (\text{Gl. 8})$$

K = Permeabilität in D (= 10^{-8} cm²)
q = Fließrate in cm³ /s
l = Länge der Probe in cm
A = Querschnittsfläche der Probe in cm²
 η = Viskosität der Flüssigkeit in Pa.s
 Δp = Differenzdruck in Pa

Bei Bestimmung der Permeabilität für den radialen Fluß wird bei abgesperrter, auf die Stirnfläche führender Kapillarleitung mit konstanter Rate ins Bohrloch injiziert, und der sich einstellende konstante Druck im Bohrloch gemessen. Die Permeabilität errechnet sich dann folgendermaßen (von ENGELHARDT 1960):

$$K = \frac{q \cdot \mu \cdot \ln r_e / r_w}{h \cdot \Delta p} \quad (\text{Gl. 9})$$

r_e = äußerer Radius der Probe in cm
 r_w = Bohrlochradius in cm
h = Höhe der Probe in cm

Zur Einstellung einer konstanten initialen Porendruckverteilung in der Probe wird über die Stirnfläche gegen ein Druckhalteventil ($P_{DH}(\text{max}) = 15 \text{ MPa}$) auf der Produktionsseite injiziert.

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

1. Belasten einer gesättigten Probe auf maximal 40 MPa und Entspannen auf Normalbedingungen ohne Injektion von Flüssigkeiten bei einem dem Luftdruck entsprechenden Porendruck.

2. Bei konstantem Manschettendruck Injektion des Sättigungselektrolyten mit steigender Rate ins Bohrloch bis der Bohrlochdruck knapp unterhalb des Manschettendruckes liegt.
3. Bei konstantem Manschettendruck Injektion eines Elektrolyten mit von der Sättigungsflüssigkeit abweichender Konzentration mit konstanter Rate ins Bohrloch.

Die sich während des Versuches einstellenden Potentialdifferenzen zwischen den inneren Elektroden der Sonde (siehe oben) werden kontinuierlich aufgezeichnet. Bei Kenntnis der eingespeisten Stromstärke und Geometrie der Elektrodenanordnung ergibt sich für die Berechnung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes folgende Formel (KERTZ 1969):

$$\rho = \frac{\pi \cdot U}{4 \cdot I} \cdot \frac{L^2 - a^2}{a} \quad (\text{Gl. 10})$$

ρ = scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand in Ωm
 U = Potentialdifferenz zwischen den Meßelektroden in V
 I = eingespeiste konstante Stromstärke in A
 L = Abstand der einspeisenden Elektroden in cm
 a = Abstand der Potentialmeßelektroden in cm

Diese Beziehung ist allerdings nur für die Messung an einer ebenen Oberfläche gültig. Da bei den hier durchgeführten Messungen insbesondere relative Änderungen von ρ^* interpretiert werden sollen, ist der Fehler wegen unvollständiger Erfüllung der Voraussetzungen bei Verwendung von Gleichung 10 nicht so erheblich. Bei zukünftigen Untersuchungen sollte allerdings der Geometriefaktor stärker berücksichtigt werden.

7. Versuchsergebnisse und deren Interpretation

7.1 Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand als Funktion des Manschettendruckes

Die in Abbildung 7 dargestellten Meßergebnisse stehen in scheinbarem Gegensatz zu der Erwartung, daß mit steigendem effektiven Matrixdruck, i.e. die Differenz zwischen Manschetten- und Porendruck, eine Zunahme des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes einhergeht, weil es zu einer Verringerung der Porosität kommt, die bei überwiegend elektrolytischer Leitung durch die Porenflüssigkeit die Größe des scheinbaren elektrischen Widerstandes entscheidend bestimmt.

Abgesehen davon, daß die registrierten Widerstandsänderungen insgesamt sehr klein waren, ergaben sich eher leicht fallende Werte für steigende Manschettendrücke. Bei Entspannung der Proben gingen die Widerstandswerte geringfügig zurück.

Diese Ergebnisse können dahingehend interpretiert werden, daß die gemessenen Änderungen des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes der Proben nicht unmittelbar auf die Veränderungen des Manschettendruckes zurückzuführen sind, sondern durch meßtechnische Effekte verursacht wurden und noch innerhalb einer statistischen Schwankungsbreite von + 10% liegen. Eine quantitative Abschätzung der Abnahme des Porenvolumens bei Zugrundelegung eines Kompressibilitätskoeffizienten c_r in der Größenordnung von 10^{-5} bar^{-1} und von $P_m = 40 \text{ MPa}$ ergibt :

$$c_r = \frac{\Delta PV}{\Delta P} \cdot \frac{1}{PV} \quad (\text{Gl. 11})$$

$$\Delta PV = 0.004 \quad PV$$

PV = Porenvolumen in cm^3

Bei Verwendung der ARCHIE-Gleichung würden sich die Formationswiderstände der Gesteinsproben bei $P_m \sim 0.1 \text{ MPa}$ und $P_m = 40 \text{ MPa}$ folgendermaßen verhalten:

$$\frac{R_G(P_m \sim 0.1 \text{ MPa})}{R_G(P_m = 40 \text{ MPa})} = \frac{\phi_b^{-2}}{(\phi_b(1 - 0.004))^{-2}} = 0.99$$

Diese minimale Änderung wurde offenbar nicht registriert.

7.2 Scheinbarer spezifischer elektrischer Widerstand als Funktion des Bohrlochdruckes

Die hierzu ausgeführten Experimente sollten prüfen, ob die mit Annäherung von P_b an P_m durch verstärkte Mikrorißbildung und damit einhergehende Porositätsvergrößerung hervorgerufene Änderung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes der Probe als deutlicher, reproduzierbarer Meßeffect registriert werden kann.

Mit den vorliegenden Untersuchungsergebnissen (Abbildung 8 und 9) konnte tatsächlich eine verstärkte Mikrorißbildung vor Erreichen des Frac-Druckes geoelektrisch nachgewiesen werden. Allerdings wurde auch festgestellt, daß, wie unten weiter ausgeführt, die Beschaffenheit der Probe auf den Meßeffect einen Einfluß hat.

Alle untersuchten Granitproben lassen zunächst eine kontinuierliche Abnahme des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes mit steigendem Bohrlochdruck erkennen.

Dies ist dadurch zu erklären, daß mit zunehmendem Bohrloch- und damit anwachsendem Porendruck der effektive Matrixdruck abnimmt, und die mittlere Mikrorißweite und -vernetzung zunimmt, was durch die Abnahme des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes angezeigt wird. Die Erhöhung des Porenflüssigkeitsdruckes führt im wesentlichen nicht zur Öffnung neuer Mikrorisse sondern zum Erweitern vorhandener. Wenn im Zuge der Mikrorißaufweitung Rißsysteme unterschiedlicher Dimensionen stärker miteinander vernetzen und dadurch die Tortuosität herab- und die Porosität heraufgesetzt werden, kommt es zu stärkeren Abnahmen des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes. Dies wird deutlich an den Ergebnissen für Probe 3 (Abbildung 8), bei der der Einfluß eines makroskopisch sichtbaren Risses auf den scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand für Bohrlochdrücke oberhalb 30 MPa durch ein deutliches reproduzierbares Abbiegen von der vorher im logarithmischen Maßstab vorhandenen Geraden angezeigt wird. Dies ist ein Nachweis dafür, daß bei Annäherung an den Manteldruck (= Manschettendruck) verstärkt Mikrorisse geöffnet werden.

Im Sinne dieser Annahmen wäre auch das Verhalten der Probe 2 erklärbar, die bei einer Einzelmessung eine sprunghafte Änderung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes bei ca. 20 MPa erkennen ließ. Hier wird vermutet, daß Miarolen oder größere Risse mit einigen mm³ Porenvolumen plötzlich miteinander kommunizierten.

Gerade am Verhalten der Probe 2 wird deutlich, wie sehr die Beschaffenheit der Gesteinsprobe auf das Versuchsergebnis Einfluß nimmt. Der untersuchte Granit mit einer Durchschnittsporosität von 3,32% und Flüssigkeitspermeabilitäten in der Größenordnung von 0,1 mD ist sicher nicht für einen in situ-Gebirgszustand repräsentativ. Ein deutlicherer Widerstandseffekt wird von Proben mit geringeren Porositäten und Permeabilitäten erwartet, bei denen die Zahl und Dimension ursprünglicher Mikrorisse kleiner sein dürfte. Bei solchen Proben wird es zu einer besonders verstärkten Öffnung neuer Mikrorisse oberhalb eines kritischen Porendruckes kommen. Es kann davon ausgegangen werden, daß dieser Druck unter dem Frac-Druck P_f liegt. Für Proben, die im Autoklavexperiment einem Manschettendruck P_m (= Matrixdruck) ausgesetzt sind, gilt folgende empirische Beziehung (RUMMEL, F., HEUSER, U., MÜLLER, W., OTTO, F. 1986):

$$P_f = P_\infty + K \cdot P_m \quad (\text{Gl. 12})$$

- P_∞ = Zugfestigkeit der Probe bei Normalbedingungen
 $K = 1$ für ein permeables, rißbehaftetes Gestein
 $K = 2$ für ein rißfreies Gestein

Wären also mikroskopische Inhomogenitäten des Korngefüges mit den zugehörigen Spannungsinhomogenitäten nicht vorhanden, würde dies bedeuten, daß der erwartete Effekt beim scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand je nach der Zugfestigkeit des verwendeten Gesteins bei Porendrücken deutlicher größer als P_m auftreten würde. Für die verwendeten Granite, deren relativ geringe scheinbare Widerstände mit geringen Zugfestigkeiten korrelieren (FRITSCH, V., TAUBER, A. F. 1970), war die Differenz zwischen P_f und P_m nicht allzu groß, wenn von einem rißbehafteten Gestein ausgegangen wird.

Für die verwendete Versuchsanordnung bedeutet dies, daß die Bedingung $P_b > P_m$ nur für nahezu impermeable Gesteine erfüllt werden kann. Denn bei einer deutlichen Permeabilität des Gesteins kommt es zum Druckabbau über die Probe und einem Aufblasen der Manschette bei $P_b > P_m$. Je nach der Kompressibilität des Systems kommt es dann zu einem Abreißen der Manschette von der Mantelfläche oder nur zu einer Ausbeulung in den Autoklavraum mit der Folge, daß bei weiterer Erhöhung von P_b auch P_m zunimmt, d.h. der Autoklav über die Bohrlochinjektionsleitung aufgepumpt würde.

7.3 Zeitliche Abhängigkeit des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstandes beim Injizieren von Lösungen mit anderer Elektrolytkonzentration als die der Porenflüssigkeit ins Bohrloch mit konstanter Rate (Dispersionsversuche)

Bei den Dispersionsversuchen wurde die Probe initial mit einem Elektrolyten definierter Konzentration gesättigt und dann bei konstantem Manschettendruck ein höher- bzw. geringerkonzentrierter Elektrolyt mit konstanter Rate ins Bohrloch injiziert. Die Experimente sollten darüber Aufschluß geben, wie schnell der scheinbare spezifische elektrische Widerstand der Probe auf Änderungen der Elektrolytkonzentration reagiert und inwieweit die Rate der zeitlichen Änderung eine Ableitung der Permeabilität der Probe gestattet.

Die Ergebnisse (Abbildung 10, 11, 12, 13) zeigten, daß sich bei der Injektion einer Lösung mit einer hohen Elektrolytkonzentration in einen Porenraum, der mit einem geringerkonzentrierten Elektrolyten gesättigt ist, schneller stabile Widerstandswerte einstellen als im umgekehrten Fall der Injektion eines geringer als die Porenflüssigkeit konzentrierten Elektrolyten ins Bohrloch der Probe.

Diese Beobachtung erklärt sich durch den entscheidenden Einfluß einer hohen Elektrolytkonzentration im Netzwerk kommunizierender Poren auf den scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstand der Probe:

die Zugabe von kleinen Mengen hochkonzentrierter Salzlösung zu destilliertem Wasser verändert dessen elektrische Leitfähigkeit deutlich, die Zugabe von etwas destilliertem Wasser zu einer hochkonzentrierten Salzlösung dagegen verändert deren elektrische Leitfähigkeit nur unmerklich. Der hochkonzentrierte Elektrolyt verdrängt den geringkonzentrierten mehr oder wenig kolbenartig aus den Strömungsbahnen und bestimmt dort die elektrische Leitfähigkeit. Der durch Diffusion allmählich stattfindende Konzentrationsausgleich zwischen der geringkonzentrierten, in den Sackporen verbliebenen Lösung und der hochkonzentrierten in den Strömungsbahnen beeinflusst die Leitfähigkeit nur minimal. Im umgekehrten Fall führt die Wanderung von Ionen aus den Sackporen mit hoher Elektrolytkonzentration in die Strömungsbahnen mit geringer Elektrolytkonzentration zu einer deutlichen Beeinflussung, deren zeitliche Dauer vom Verhältnis Strömungsrate zu Diffusionsgeschwindigkeit abhängt.

Um für die Dispersionsversuche eine weitere Interpretationsmöglichkeit zu erschließen, wurden die produzierten Lösungen fraktioniert gesammelt, und der Chloridgehalt in den einzelnen Proben in Abhängigkeit von der Zeit nach Aufnahme der Injektion durch Titration bestimmt. Die graphische Darstellung der Ergebnisse zeigt die Abbildung 13. Eine einfache Methode zur Auswertung der Konzentrationsdaten hinsichtlich der mathematischen Beschreibung der Verdrängung im Porenraum durch die Diffusionsgleichungen gibt BRIGHAM (1974).

8. Ausblick

Die durchgeführten Laborexperimente haben gezeigt, daß mittels geeigneter geoelektrischer Meßmethoden Effekte nachweisbar sind, deren Auftreten mit dem Spannungszustand und der Permeabilität einer Gesteinsprobe verknüpft sind. Folgerichtig sollten sich dann diese Größen aus entsprechenden Meßdaten ableiten lassen. Anhand des gewonnenen Datenmaterials gilt es nun, entsprechende Auswerteverfahren, deren Grundlagen oben dargelegt wurden, zu entwickeln.

Den Versuchen im Autoklaven sollten Feldmessungen mit einer improvisierten Bohrlochsonde (Dipmeter) folgen, um die aus Laborexperimenten abgeleiteten Auswerteverfahren zu überprüfen. Im Falle einer erfolgreichen Bestätigung der Auswerteverfahren sollte die Entwicklung und Konstruktion einer speziellen Sonde erfolgen, die alternativ zu konventionellen Packertesten die Bestimmung der Permeabilität durchteufter Gesteinsschichten gestattet und bei der Ermittlung der in situ-Spannungszustände break down-Teste überflüssig macht.

9. Literatur

- BAUMGÄRTNER, J. (1987) : Anwendung des Hydraulic-Fracturing-Verfahrens für Spannungsmessungen im geklüfteten Gebirge, dargestellt anhand von Meßergebnissen aus Tiefbohrungen in der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich und Zypern.- Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, Reihe A, Nr. 21
- BEAR, J. (1972) : Dynamics of fluids in porous media.- Elsevier Science, New York
- BRACE, W.F., ORANGGE, A.S., MADDEN, T.R. (1965) : The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks.- J. Geophys. Res. 70, 5669-5678
- BRIGHAM, W.E. (1974) : Mixing equations in short laboratory cores. Transactions AIME, Vol. 257, 91 - 99.
- CORRENS, C. (1968): Einführung in die Mineralogie.- Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, New York
- ENGELHARDT, W. von (1960): Der Porenraum der Sedimente.- Springer Verlag, Heidelberg, Göttingen, Berlin
- FRITSCH, V., TAUBER, A.F. (1970): Der spezifische Widerstand des Granits.- Acta Hydrophysica 14/4, 339 - 370
- HADERMANN, J. (1980) : Radionuclide transport through heterogeneous media.- Nucl. Technol. 47, 312
- JUNG, R. (1986) : Erzeugung eines großflächigen künstlichen Risses im Falkenberger Granit durch hydraulisches Spalten und Untersuchung seiner mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. - Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, Reihe A, Nr. 20
- KERTZ, W. (1969): Einführung in die Geophysik. Band 1.- Bibliographisches Institut Mannheim

- KESSELS, W. (1986): Operational principle, testing, and applications of the AWID-flat jack for absolute stress determinations using voltage measurements.- Rock Mechanics and Engineering 19, 165 - 183
- KESSELS, W. (1987a): The storage coefficient with regard to matrix compressibility.- Nlfb, Hannover, Archiv-Nr. 101317
- KESSELS, W. (1987b): Das Spannungsfeld der Erdkruste und seine Wirkung auf eine Übertiefe Bohrung.- KTB-Report 87-2, Beiträge zur Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft 1987. Hrsg.: KTB PL, HÄNEL, R., SCHOPPER, R.
- KRANZ, R.L. (1979): Crack growth and development during creep of Barre granite.- Int. J. Rock Mech. Min.Sci. 16, 23 - 35
- LOCKHART, N.C. (1980): Electrical properties and the surface characteristics and structure of clays.I. Swelling clays.- J. Colloid and Interface Sci. 74, 520 -529
- LOCKNER, D.A., BYERLEE, J.D. (1985a): Complex resistivity measurements, Schlumberger array.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- PARKHOMENKO, E.I. (1982): Electrical resistivity of minerals and rocks at high temperature and pressure. Rev. Geophys. and Space Phys. 20, 193 - 218
- RUMMEL, F. (1965): Geräuschmessungen zur Untersuchung der Verformungen in Gesteinsproben bei einachsiger Belastung.- Technische Mitteilungen 65/1, Gebirgsmechanik, Gesellschaft für angewandte Geophysik
- RUMMEL, F., BAUMGÄRTNER, J., ALHEID, H.J. (1983): Hydraulic fracturing stress measurements along the Eastern boundary of the SW-German block.- Proceedings Workshop Hydraulic Fracturing Stress Measurements Nat. Academy Press, Wash. D.C., 3 - 17

RUMMEL, F., HEUSER, U., MÜLLER, W., OTTO, F. (1986): Basisdaten und Modelluntersuchungen zur Rißausbreitung bei Stimulationsuntersuchungen in geringpermeablen Sedimenten der norddeutschen Erdgasträgerformationen.- Abschlußbericht-Teil 1 zum DGMK-Projekt 167/3 Stimulation geringpermeabler tiefer Gaslagerstätten (Phase III). DGMK-Forschungsbericht 167-4

SOKOLOVSKIJ, V.V. (1955): Theorie der Plastizität.- VEB Verlag Technik, Berlin



10. Anlagen

(Abbildungen der Versuchsanlage,
graphische und tabellarische Darstellungen
der Meßergebnisse)

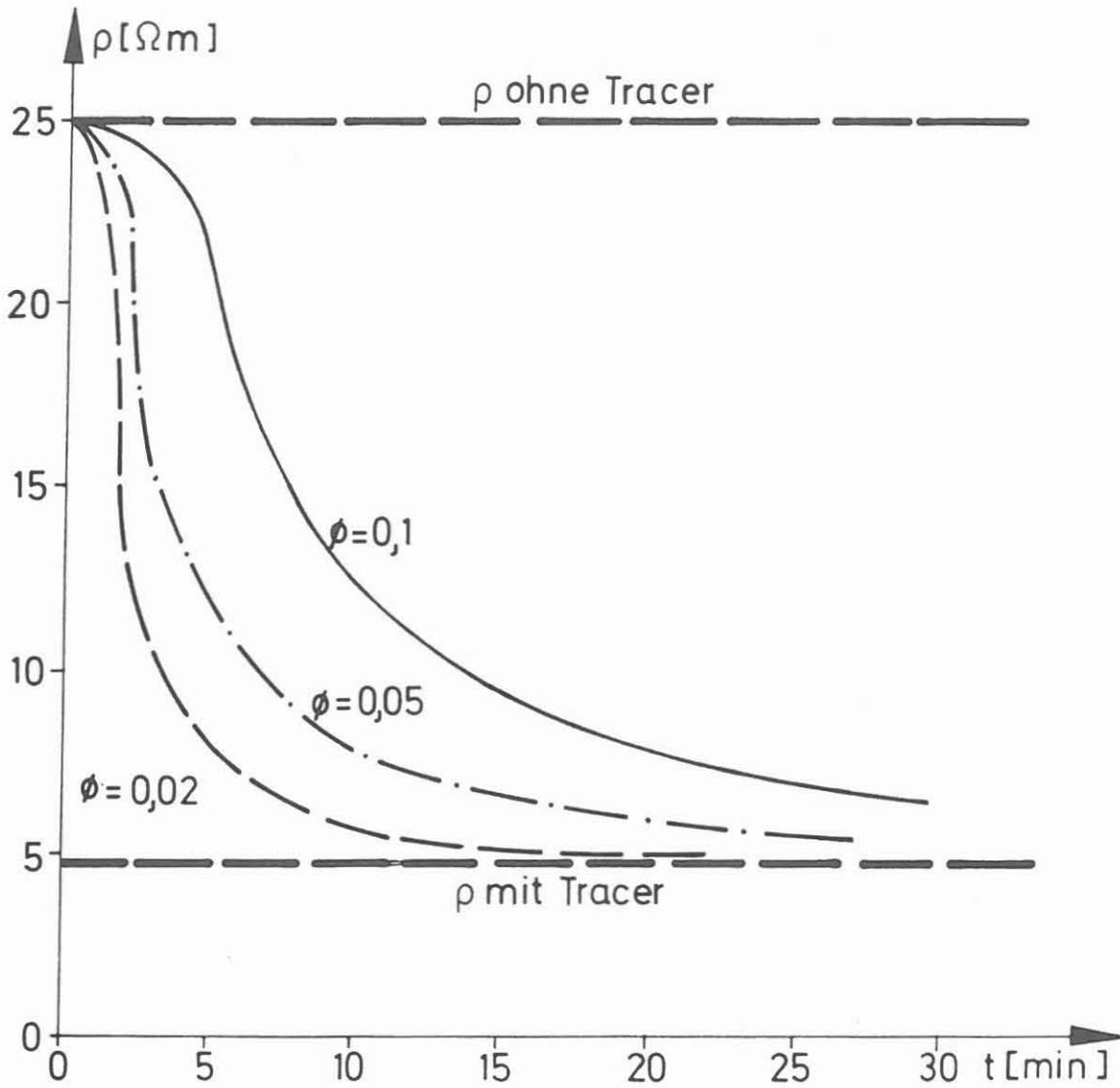
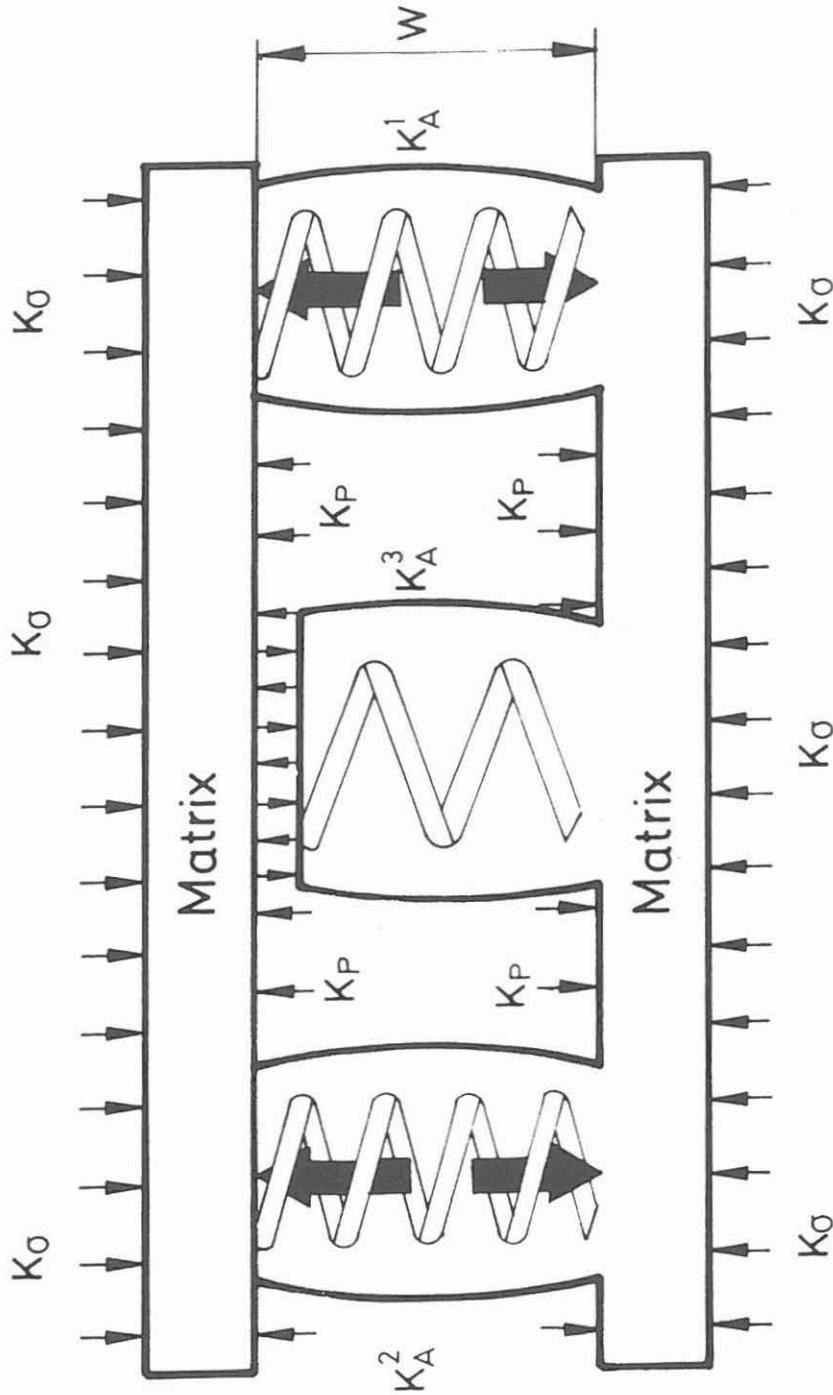


Abb. 1: Zeitliche Änderung des spezifischen elektrischen Gesteinswiderstandes bei Invasion von hochleitfähiger Spülung in den Porenraum für Porositäten von 2, 5 und 10%



K_σ = Kraft durch Spannung im Korngefüge
 K_P = Kraft durch den Flüssigkeitsdruck im RiB
 K_A^i = Kraft im i -ten Auflagepunkt
 W = RiBweite

Abb. 2: Einfaches Modell zum Kräftegleichgewicht an einem RiB mit verschiedenen Auflagepunkten in Anlehnung an JUNG (1986)

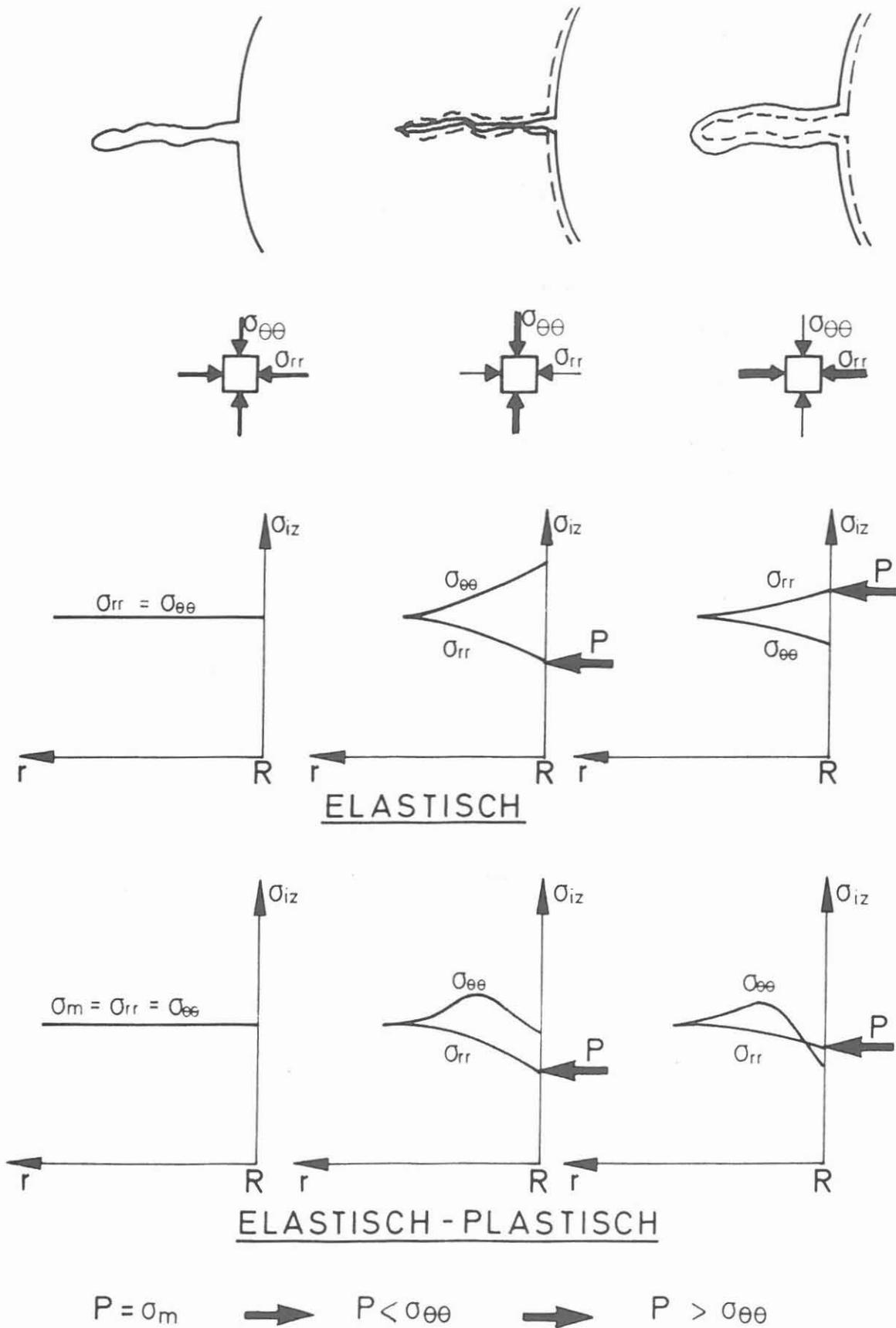


Abb. 3: Öffnungsvorgang von Rissen in der Bohrlochswand bei Änderung des Spülungsdruckes (KESSELS 1987b)

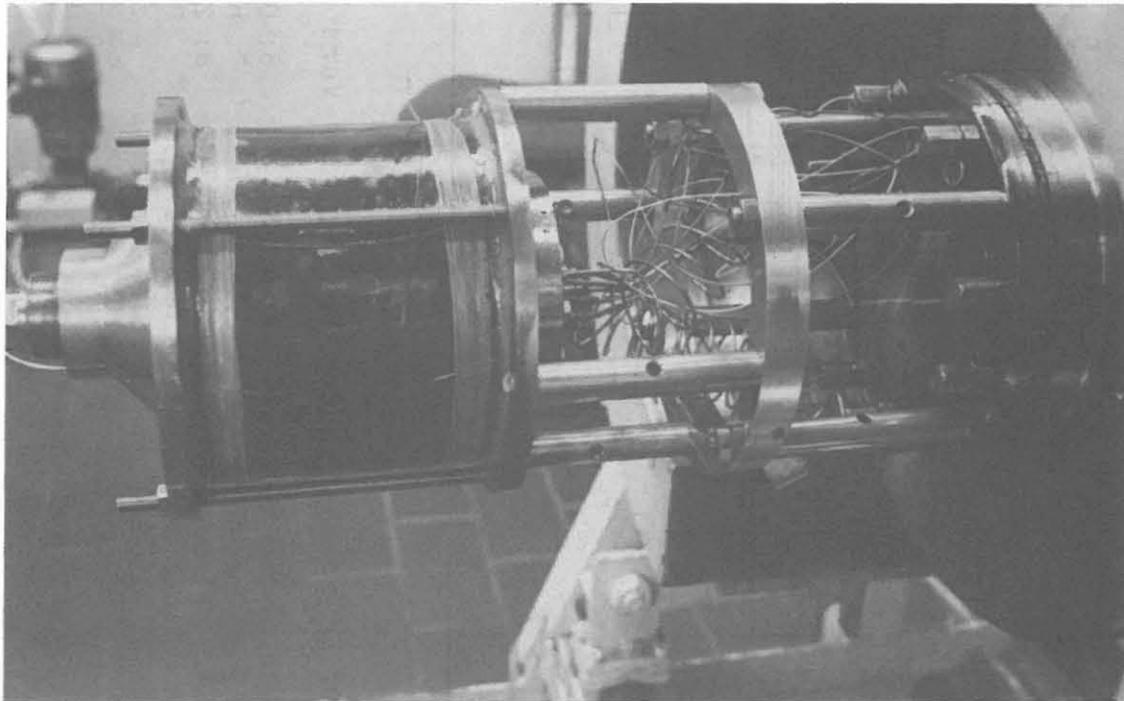
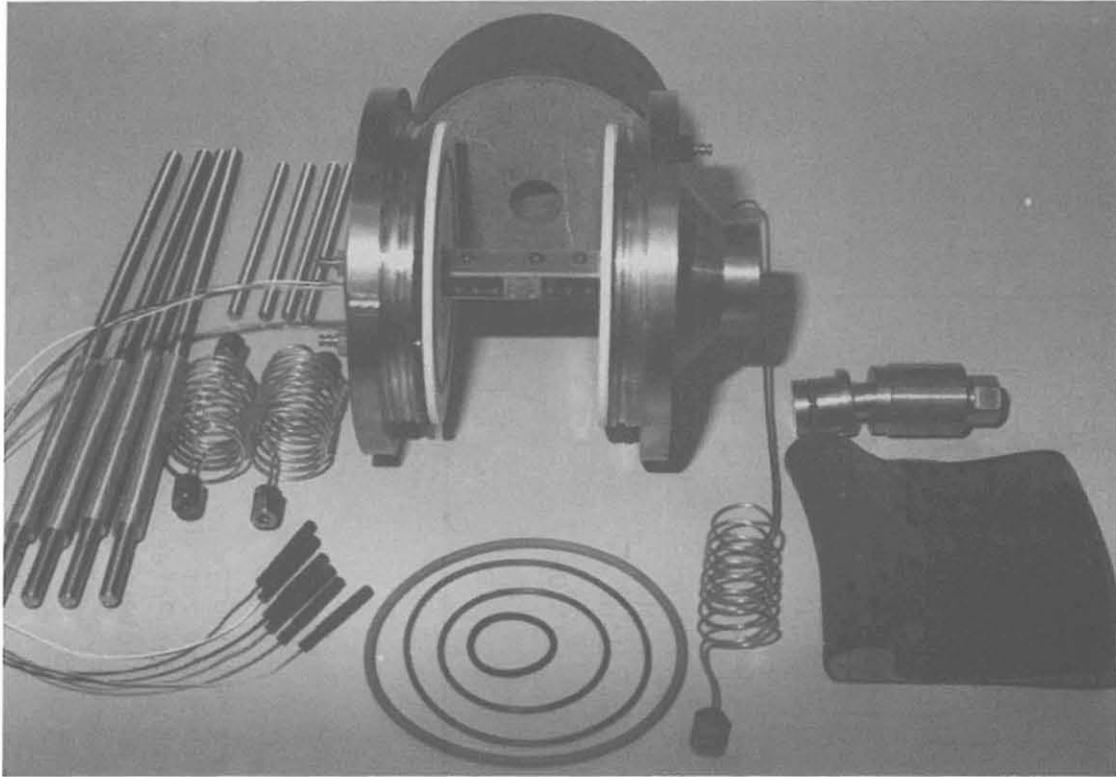
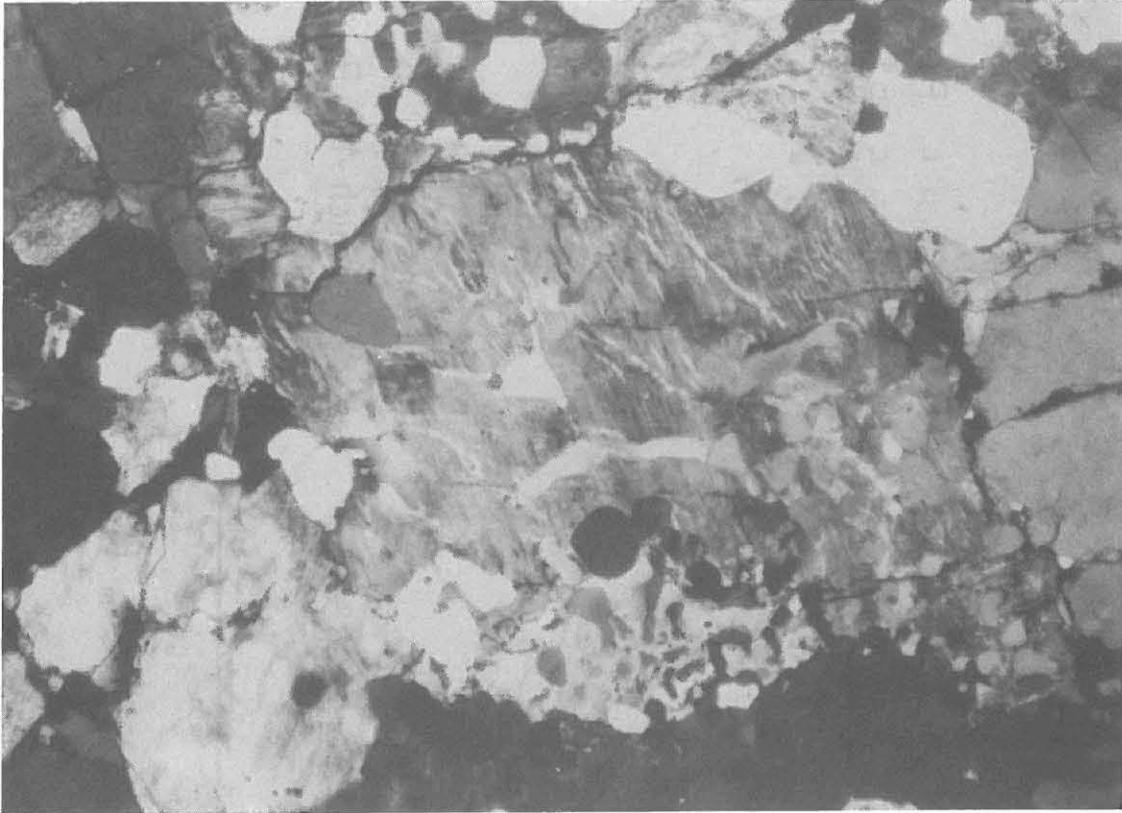


Abb. 4: Die Meßanordnung im zerlegten Zustand (oben) und komplett montiert am Autoklavdeckel befestigt (unten).



1000µm

Abb. 6: Dünnschliff-Photographie einer Okergranit-Probe.
In der Bildmitte: Kalifeldspat mit Perthit-Ent-
mischung. Ober- und unterhalb der Bildmitte:
Myrmekitischer Quarz. Auftreten von Mikrorissen
entlang von Korngrenzen und als Spaltrisse im
Feldspat.

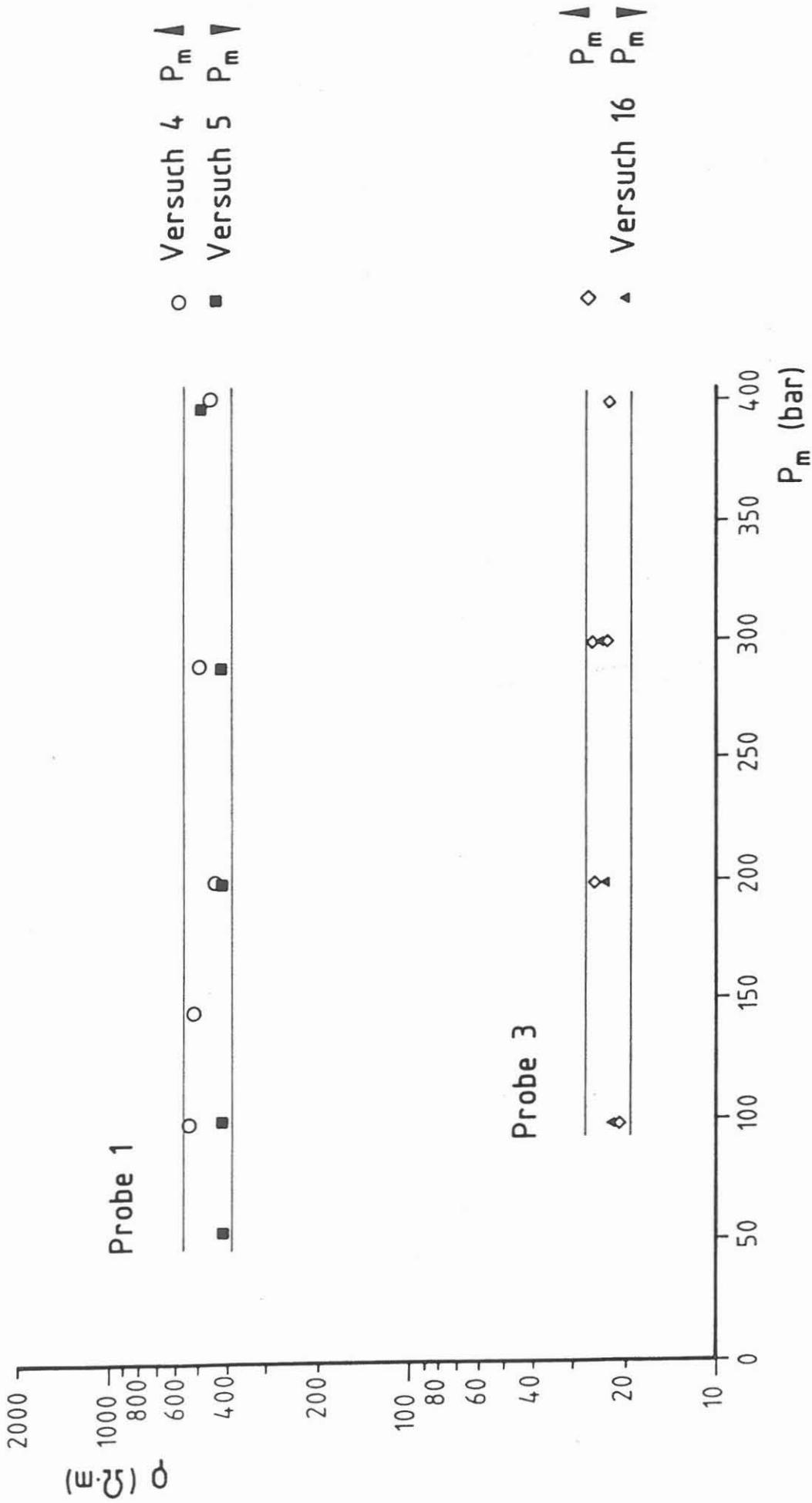
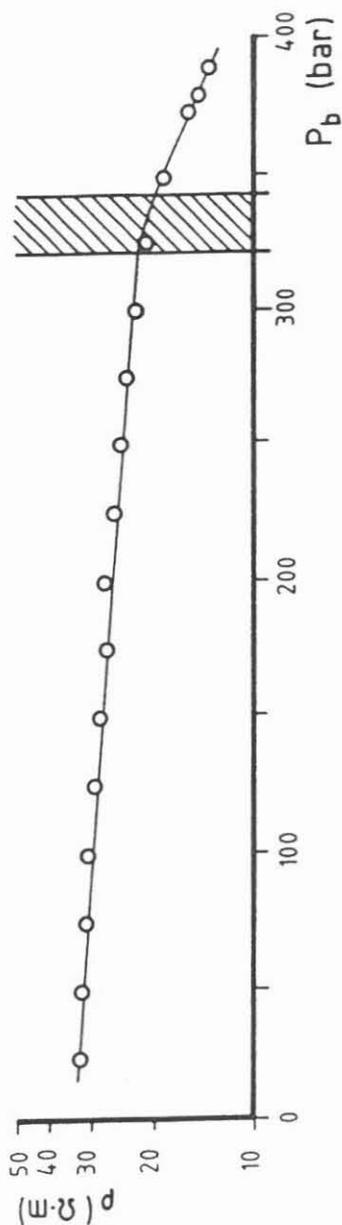


Abb. 7: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand als Funktion des Manschettendruckes

$P_m = 400 \text{ bar}$

Probe 3

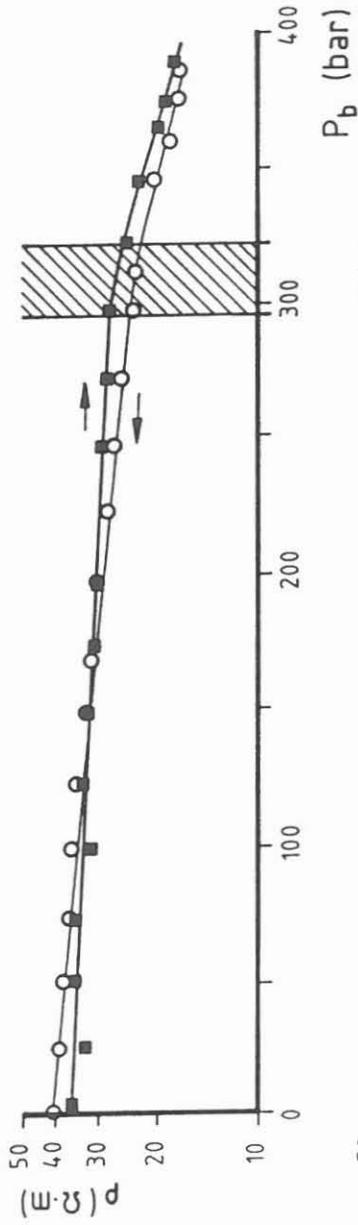
Versuch 17



○—○

Versuch 18 $P_m \blacktriangle$

Versuch 19 $P_m \blacktriangledown$

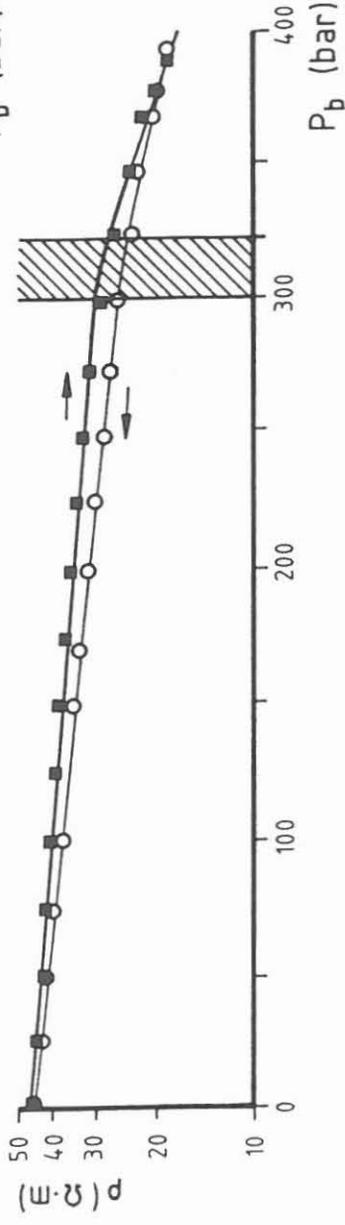


■—■

○—○

Versuch 20 $P_m \blacktriangle$

Versuch 21 $P_m \blacktriangledown$



■—■

○—○

Abb. 8: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand als Funktion des Bohrlochdruckes bei konstantem Manschettendruck (Elektrolytkonzentration der Injektions- und Porenflüssigkeit identisch)

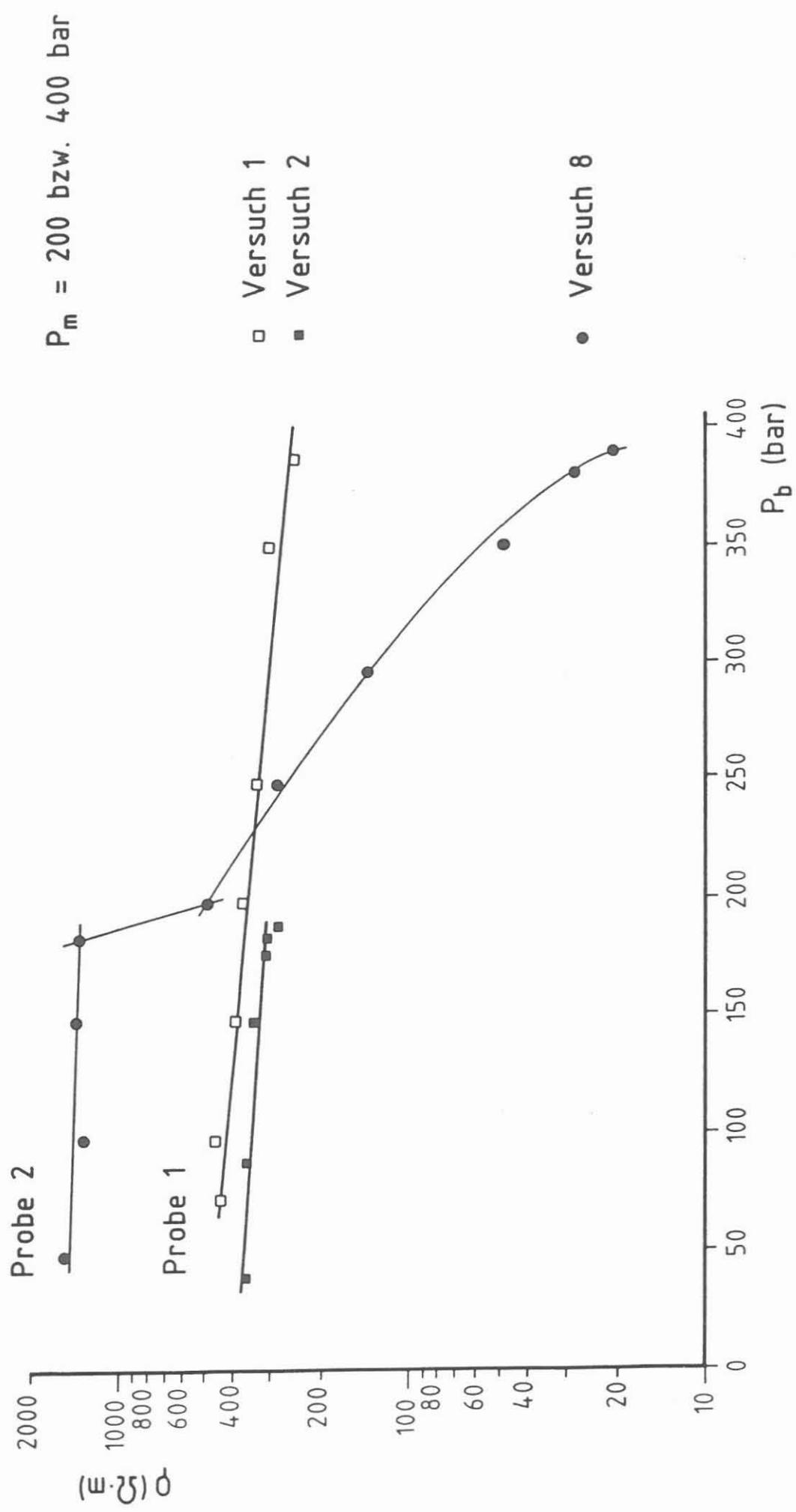


Abb. 9: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand als Funktion des Bohrlochdruckes bei konstantem Manschettendruck (Elektrolytkonzentration der Injektions- und Porenflüssigkeit identisch)

$P_m = 100 \text{ bar}$

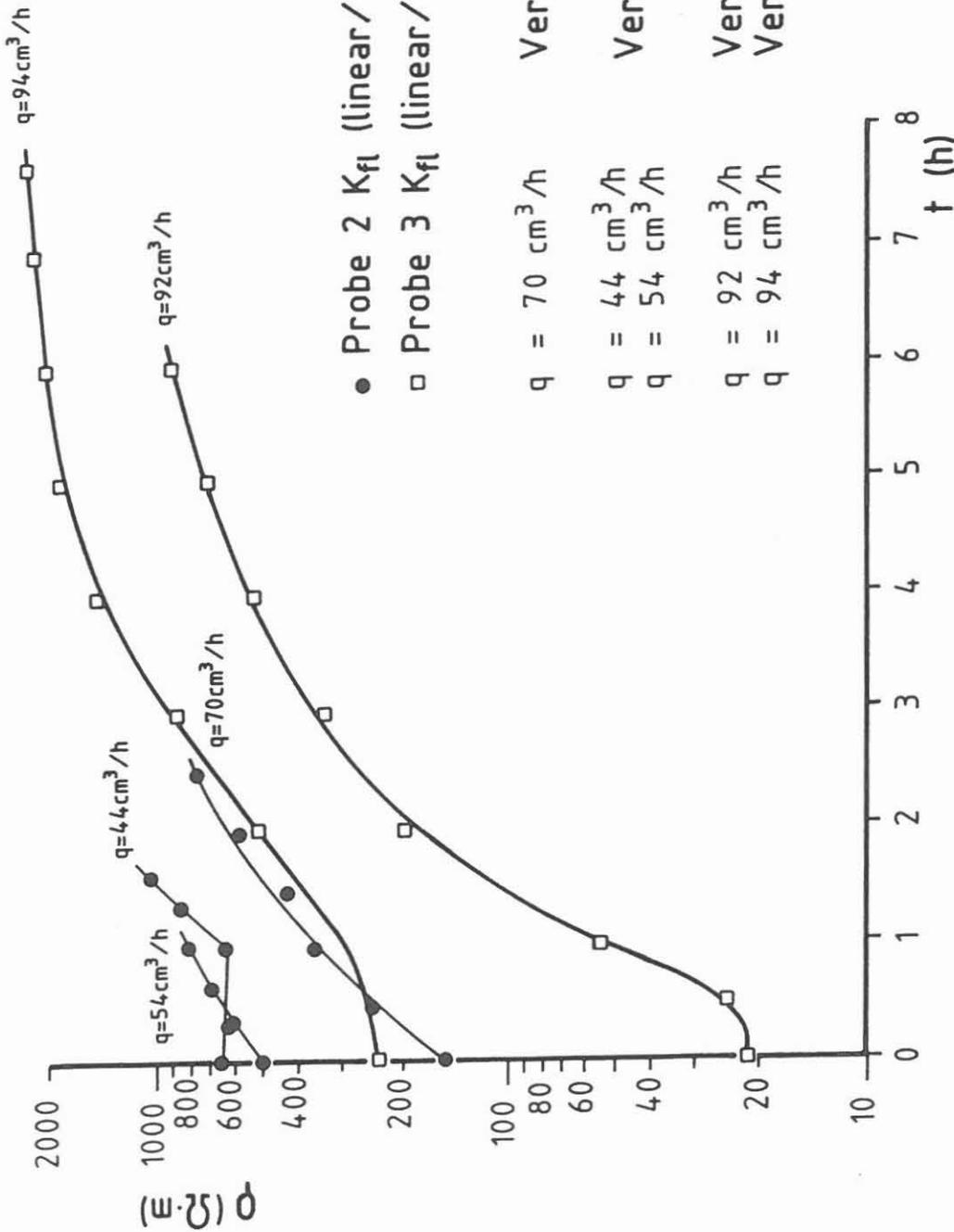


Abb. 10: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand als Funktion der Zeit bei der Injektion eines geringer als die Porenflüssigkeit konzentrierten Elektrolyten für verschiedene Raten

$P_m = 100 \text{ ba}$

Probe 3

Versuch 9 ● gesättigte NaCl-Lsg → 50g NaCl-Lsg

Versuch 10 □ 50g NaCl-Lsg → gesättigte NaCl-Lsg

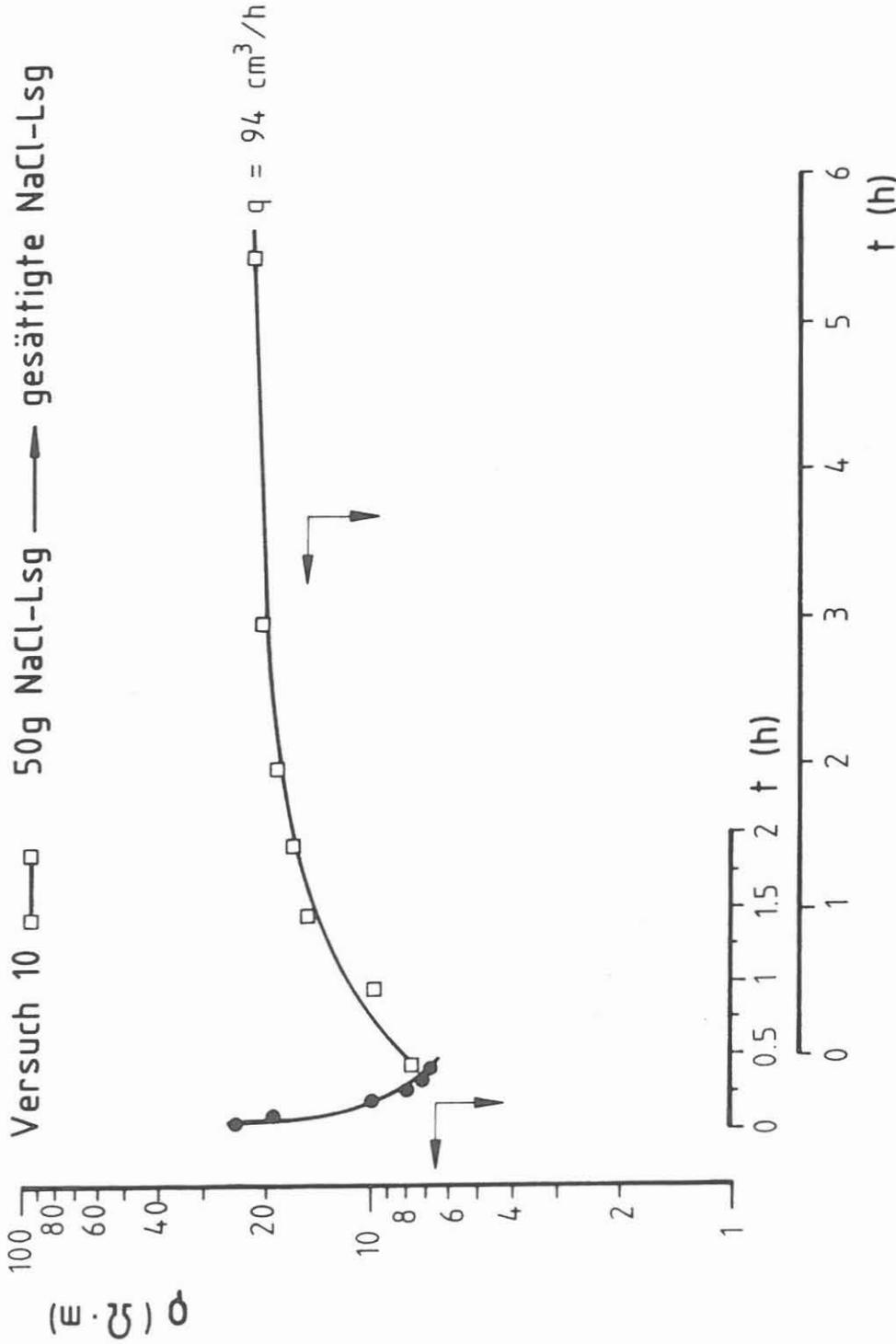


Abb. 11: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand als Funktion der Zeit bei der Injektion einer von der Konzentration des Elektrolyten im Porenraum verschiedenen Salzlösung

Versuch 14

$P_m = 100 \text{ bar}$

gesättigte NaCl-Lsg \rightarrow 50g NaCl/l-Lsg

Probe 3

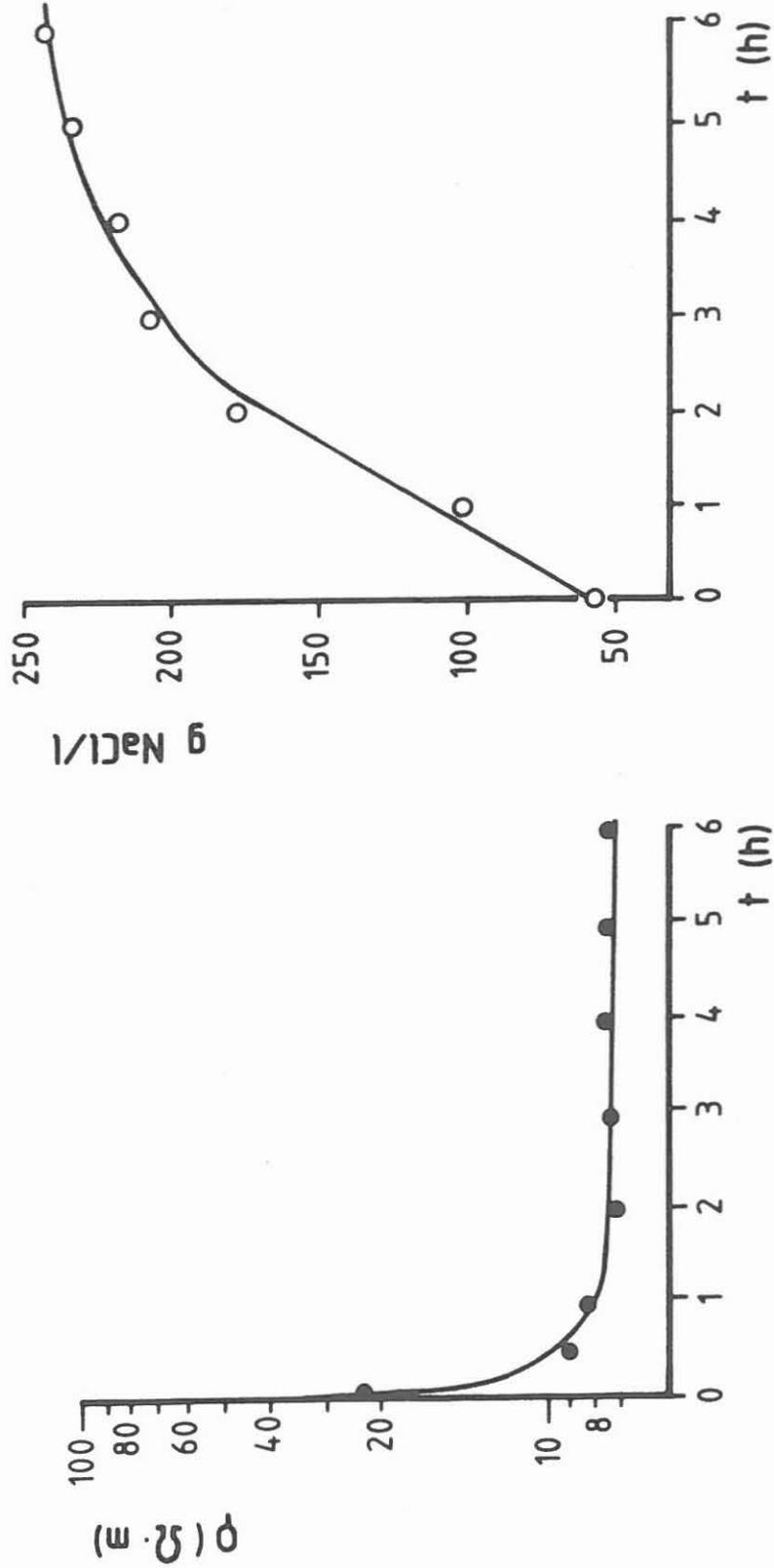


Abb. 12: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand (links) und Salzkonzentration der produzierten Lösung (rechts) als Funktion der Zeit bei der Injektion einer von der Konzentration des Elektrolyten im Porenraum verschiedenen Salzlösung

Versuch 15

$P_m = 100 \text{ bar}$

50g NaCl/l-Lsg \longrightarrow gesättigte NaCl-Lsg

Probe 3

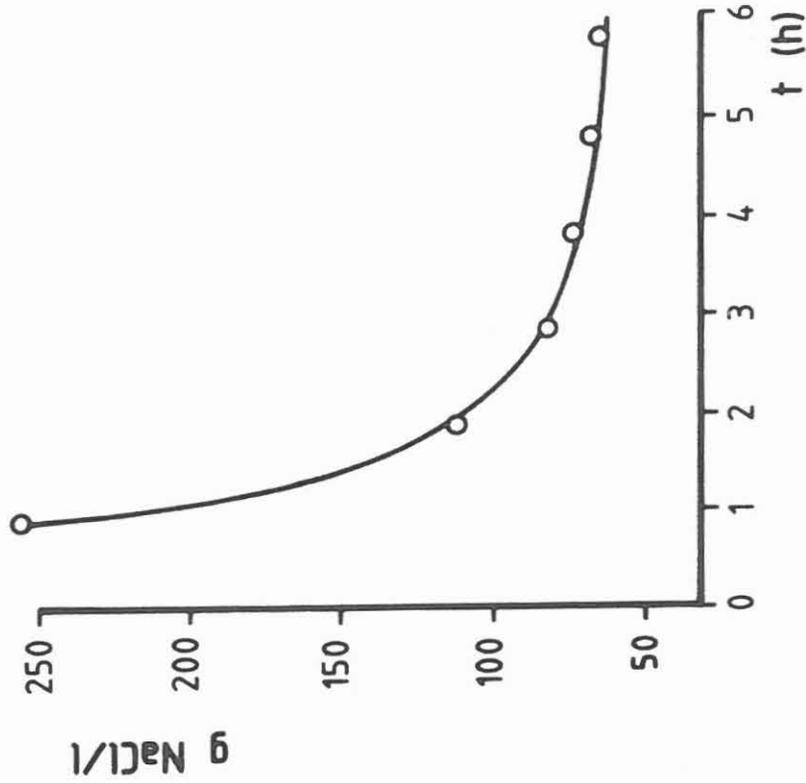
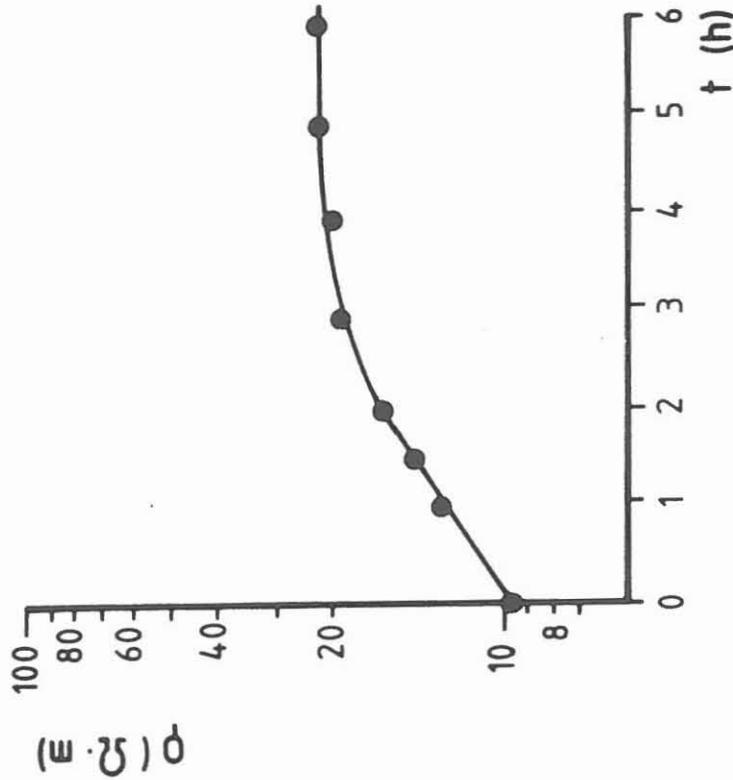


Abb. 13: Scheinbarer spezifischer elektrischer Gesteinswiderstand (links) und Salzkonzentration der produzierten Lösung (rechts) als Funktion der Zeit bei der Injektion einer von der Konzentration des Elektrolyten im Porenraum verschiedenen Salzlösung