

PERMEABILITÄTS- UND WIDERSTANDSDISPERSIONSMESSUNGEN AN BOHRKERNEN  
UNTER DRUCK

HUENGES, E.; NOVER, G. und WILL, G.

Lehrstuhl für Mineralogie und Kristallographie  
Mineralogisches Institut und Museum der Universität Bonn  
D53 Bonn Poppelsdorfer Schloß

---

1. EINLEITUNG

Die Physikalischen Eigenschaften von natürlichen Gesteinen werden stark von den im Porenraum der Gesteine enthaltenen Fluiden beeinflusst. Es ist deshalb erforderlich, die Materialgröße, die die Strömung der Fluide ermöglicht, im Labor unter simulierten in-situ Bedingungen, d.h. unter Druck und Temperatur zu messen. Eine Beschreibung des Strömungsverhaltens liefert die D'Arcy-Gleichung:

$$(1) \quad q = k \frac{A}{L} \frac{\Delta P}{\eta}$$

- k Permeabilität ( $d = 10^{-12} \text{m}^2$ )
- L Länge der Probe (m)
- A Querschnittsfläche der Probe ( $\text{m}^2$ )
- $\eta$  dynamische Viskosität ( $\text{Ns/m}^2$ )
- q Flußrate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $\Delta p$  Druckdifferenz ( $\text{N/m}^2$ )

Die Flußrate durch eine Probe wird also bei einer gegebenen Druckdifferenz von der Viskosität des strömenden Mediums, dem Geometriefaktor der Probe und der Permeabilität (mit der Dimension einer Fläche), bestimmt.

Permeabilitätsmessungen unter erhöhten Druckbedingungen im Labor erlauben somit bedingt die Durchströmbarkeit eines Gesteins in größeren Tiefen zu ermitteln. Wegen Beschränkungen in der Probengröße lassen sich natürlich nicht alle permeablen Schichten in der Tiefe mit Labormessungen simulieren. Jedoch ist man in der Lage genau wie bei Widerstandsmessungen (WILL et al.,1983; NOVER et al.,1984) definierte Zustände einzustellen, so daß man die Frequenzabhängigkeit des elektrischen Widerstandes zusammen mit Permeabilitätsmessungen interpretieren kann.

## 2. VERSUCHSAUFBAU ZUR PERMEABILITAETSMESSUNG UNTER DRUCK

Zylindrische Proben 10 mm hoch und 30 mm im Durchmesser wurden mit einem Schrumpfschlauch zusammen mit einem durchbohrten oberen und unteren Kolben gasdicht abgeschlossen. Diese Anordnung wurde dann unter einen mit einer Bohrung versehenen Stempel in einer Autoklaven gesetzt, der wiederum in einer Hydraulikpresse positioniert wurde (Abb. 1).

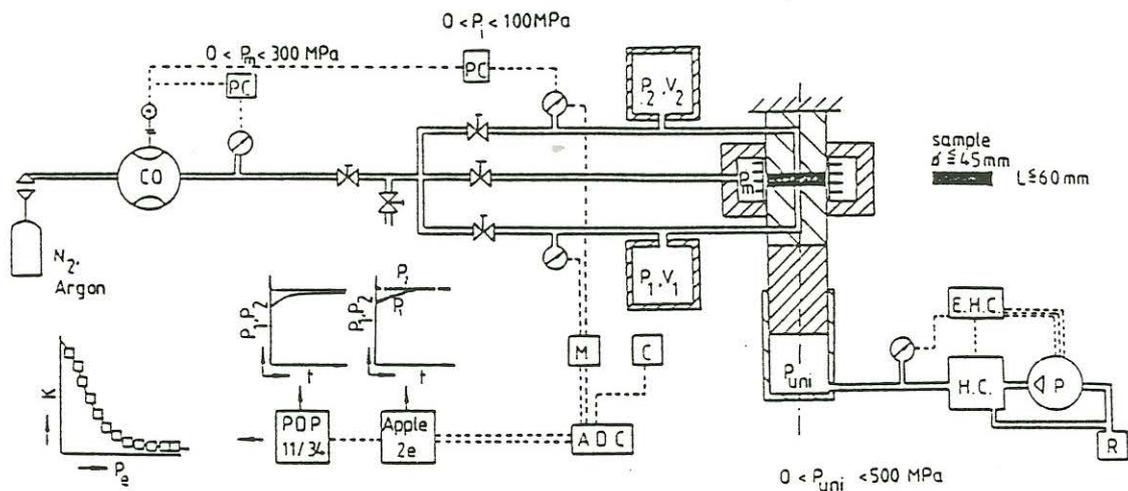


Abb. 1: Experimenteller Aufbau zur Permeabilitätsmessung als Funktion des hydrostatischen Gesteinsdruckes

PC Drucksteuerung, CO Kompressor, M Multiplexer, C Clock, ADC Analog Digital Wandler, EHC Elektronische Hydrauliksteuerung, HC Hydrauliksteuerung, P Pumpe, R Ölreservoir

Ein Manteldruck  $P_m$  bis zu 3 kbar kann auf den Schrumpfschlauch mit einem Argon- oder Strickstoffgas aufgebracht werden. Auf eine 30 mm Durchmesserprobe kann ein uniaxialer Druck bis 10 kbar mit der Hydraulikpresse erzeugt werden. Der Poreninnendruck wurde bei 50 bzw. bei 100 bar konstant gehalten. Die Porenströmung fließt in Richtung des uniaxialen Drucks.

Zur Permeabilitätsmessung wurde eine Druckausgleichstechnik ähnlich der von Brace (BRACE et al., 1968) benutzt. Dabei wurde der Druckausgleich zwischen zwei Volumina im Porensystem vor und hinter der Probe aufgezeichnet. Ähnlich wie von Zoback vorgeschlagen (ZOBACK et al., 1975) wurde das Volumen mit den höheren Druck künstlich auf unendlich gesetzt. Der niedrigere Druck lag bei Beginn der Registrierung 20 bar tiefer. Dadurch wird erreicht, daß der Poreninnendruck sich nur unmerklich ändert.

Die Drücke wurden mit Druckaufnehmern gemessen und zusammen mit der Zeit in einem Apple IIe Computer gespeichert. Die Auswertung der Druck-Zeit-Daten erfolgte mit einem PDP 11/34 Rechner. Dabei wurde die Permeabilität  $k$  mit der folgenden Gleichung (BRACE et al., 1968) an die Meßdaten angefügt:

$$(2) \quad P_1(t) - P_f = (P_1(t=0) - P_f) * (V_2 / (V_1 + V_2)) * \exp(-at)$$

$$a = kA / (\eta BL) (1/V_1 + 1/V_2) t$$

Die Indizes 2 und 1 beziehen sich auf das höhere und tiefere Druckvolumen,  $f$  zum Druck  $t \rightarrow \infty$ . Die Daten sind:

$V$ = Volumen,  $P$ = Druck,  $t$ =Zeit,  $\beta$ = Kompressibilität des Fluids,  
 $\eta$ = Viskosität des Fluids,  $L$ = Probenlänge,  $A$ = Probendurchmesser

Abb. 2 zeigt repräsentativ ein Beispiel für ein typisches Experiment. Während der höhere Druck im ersten Volumen bei 100 bar mit einem Komparator konstant gehalten wird, steigt der niedrigere Druck im zweiten Volumen bis zum Gleichgewicht. An die untere Kurve wird nun Gleichung (1) mit  $V_2 = \infty$  angefügt.

URACH 2416M PM=500 PI=100BAR

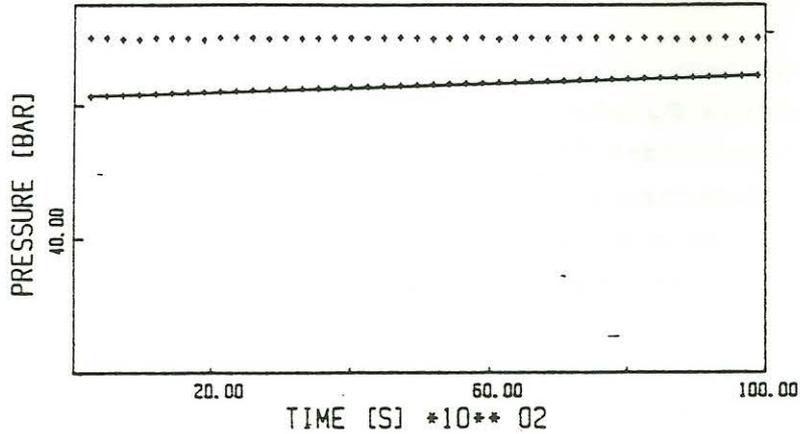


Abb. 2: Druckausgleich gegen Zeit der Bohrkernprobe Urach 2416 Tiefe bei  $P_m = P_{uni} = 500$  bar mit einem LSQ-Fit von Gleichung (1) (durchgezogene Linie)

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abb. 3a und b zeigen den Einfluß des effektiven Drucks = Gesamtdruck-Poreninnendruck auf die Permeabilität bei Raumtemperatur.

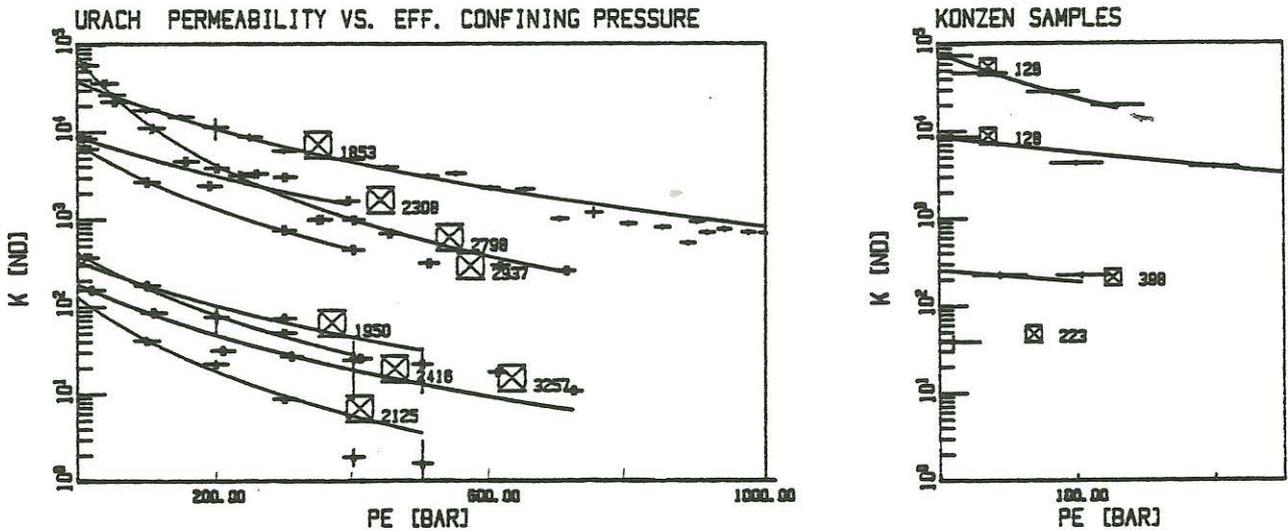


Abb. 3 a, b: Abhängigkeit der Permeabilität vom Druck gemessen an Urach Proben mit zugehörigen Tiefenangaben bei in-situ Druck und in-situ Permeabilität (3a) und Konzen Gesteinsproben mit obere Kurve 128m (|) zur Bohrachse und untere (||) zur Achse (3b); durchgezogene Linien sind Fits von (3) an die Daten

Die durchgezogenen Linien zeigen die angepaßten Kurven, in dem die Oberflächenpermeabilität ( $P_E = 0$ ) und der charakteristische Druck  $P_0$  ( $P_E = P_0: K = K_0/8$ ) an die Daten entsprechend der von Aamodt vorgeschlagenen Gleichung (AAMODT et al., 1978) angefitet wurden.

$$(3) K = K_0 / (1 + P_e / P_0)^3$$

Die Werte  $K_0$  und  $P_0$  sind in Tabelle 1 zusammen mit den daraus errechneten Permeabilitätsdaten bei in-situ Drücken für die jeweiligen Gesteinsproben angegeben. Zum Vergleich sind auch die aus Leitfähigkeitsmessungen errechneten Daten, Kompressibilitätswerte und Porositätsdaten bei Atmosphärendruck eingetragen.

In Abb. 3a und b ist ein Abfall der Permeabilität mit steigendem Gesteinsdruck zu beobachten. Die Permeabilität der Proben bezogen auf einen definierten hydrostatischen Druck ist unterschiedlich für Proben aus verschiedenen Entnahmetiefen. So liegt in der Bohrung Urach eine schlecht fluidleitende Zone bei 2416m Tiefe oberhalb einer gut leitenden Schicht bei 2798 m Teufe. Dieser Effekt korreliert mit einer gleichartigen Variation des Bohrloch-widerstandslogs.

Permeabilitätswerte, die aus elektrischen Widerstandsdaten errechnet wurden (WILL et al., 1983) zeigen ähnliche Tendenzen wie die direkten hydraulischen Permeabilitätsmessungen. Unterschiede können zum Teil mit Unsicherheiten in der Bestimmung des Elektrolytwiderstands, der Porosität unter Druck und des mittleren hydraulischen Radius erklärt werden.

Tabelle 1:

Gesteinsphysikalische Daten von Bohrkernproben von Urach und Konzen: Tiefe, IN SITU Druck  $P_{is}$ , Druck  $P_0$  (siehe Text), Permeabilität bei Atmosphärendruck  $K_0$ , Permeabilität bei IN SITU Druck  $K_{is}$  direkte Messungen Index d, berechnet aus Leitfähigkeitsmessungen Index c, Kompressionsmodul  $k'$  und Porosität bei Atmosphärendruck.

Tiefe m	$P_{is}$ bar	$P_0$ d bar	$K_0$ d uD	$K_{is}$ d uD	$K_0$ c uD	$K_{is}$ c uD	$k'$ kbar	$\theta$ %
Urach								
1635 II	330		.008(2)		14	11	682(3)	0.9(2)
1853 II	370	380(11)	32(1)	4.2				1.2(2)
1853 I							586(3)	
1950 II	390	416(98)	.33(6)	.045	19	.4	722(3)	1.0(2)
1950 I							557(3)	
2125 II	430	214(57)	.13(4)	.005	58	4	473(4)	1.6(2)
2308 II	460				4.8	4.6	705(4)	0.7(2)
2308 I		480(80)	9(1)	1.2			626(7)	
2416 II	480	349(43)	.19(1)	.014	81	8		
2798 I	560	124(7)	74(3)	.44				1.2(2)
2934 II	590				44	1.5	539(2)	1.4(2)
3053 II	610		.004(1)				642(7)	
3257 II	650	408(6)	.27(1)	.015	15	4.1		0.9(2)
Konzen								
68 II							615(5)	3.2(2)
128 II		657(126)	8.3(8)				613(3)	3.0(2)
128 I		200(30)	77(5)					
223 II			.038(7)				431(4)	1.4(2)
223 I							560(3)	
287 II							783(8)	
398 II		900(300)	.25					

(I) bedeutet Kerne senkrecht zur Bohrkernachse

(II) parallel zur Bohrkernachse

Die Kompressibilität wurde bei Raumtemperatur in einer Standardhochdruckzelle ermittelt. Der Druck wurde in Schritten von 1 kbar bis ca. 20 kbar erhöht, wobei die Höhenänderung der Probe gemessen wurde. Der Kompressionsmodul  $k'$  wurde durch Fitten der Murnaghan-Gleichung (MURNAGHAN, 1951) an die Daten berechnet. Für  $k'$  wurden Werte zwischen 400 und 800 kbar ermittelt. Der Kompressionsmodul der Konzenproben ist anisotrop. Senkrecht zur Schichtung bei der Tiefe 223 m ca. entsprechend einer Orientierung der Probe annähernd parallel zur Bohrlochachse, wurde ein niedrigerer Kompressionsmodul als parallel zur Schichtung gemessen. Ebenso wurde eine Anisotropie des Kompressionsmoduls bei den Urachneisen beobachtet. Der Textureinfluß kann bei den Proben 1950 m und 2308 m beobachtet werden.

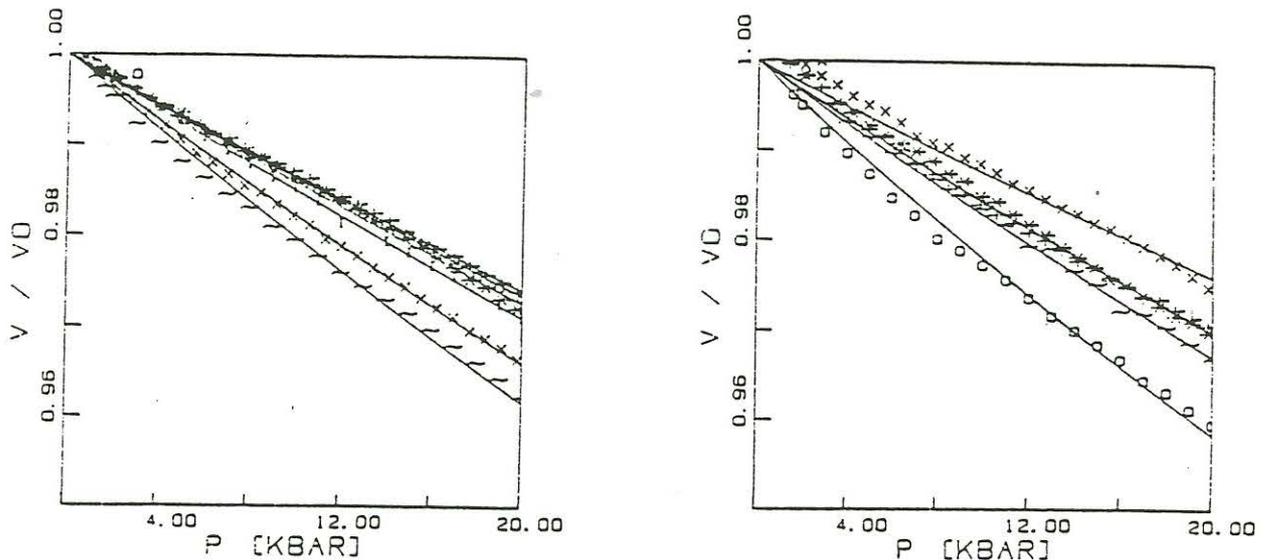


Bild 4a, b: Kompressibilität von trockenen Bohrkernproben. Die Meßwerte wurden nach dem LSQ-Verfahren mit der Murnaghan-Gleichung (verbundene Linie) gefittet.

- a) Urach bei 1635m(\*); 1950m(+); 2125m(~); 2308m(o); 2934m(x); 3053m(I)  
b) Konzen bei 68m(\*); 128m(+); 223mS(~); 223mP(o); 287m(x)

Die Porosität wurde mit einem Quecksilberporosimeter (WILL et al., 1983; Becker et al., 1985) gemessen. Die niedrigen Porositätsdaten der Urachneise korrespondieren nicht mit den Permeabilitätsdaten. Es ist also hier nicht möglich die Menge der verbundenen Poren aus Porositätsdaten zu erkennen.

#### 4. VERSUCHSAUFBAU ZUR WIDERSTANDSDISPERSIONSMESSUNG UNTER IN SITU BEDINGUNGEN

##### 4.1 AUTOKLAV UND ELEKTRISCHER VERSUCHSAUFBAU

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit an Bohrkernproben erfolgte in einem speziell für diese Zwecke gebauten Autoklaven. (NOVER et al., 1984).

Der elektrische Widerstand wurde als Funktion der Frequenz im Bereich  $10^{-5}$  bis  $10^{+5}$  Hz ermittelt. Bei vorgegebener Frequenz muß hierzu die komplexe Spannung und der dadurch bewirkte komplexe Strom durch die Probe gemessen werden (siehe Abb. 5).

Im Frequenzbereich von 1 bis 20000 Hz wurde ein Frequenz-Generator verwendet, der die Anregespannung erzeugt. Ein Lock-In-Verstärker (M5206) mißt über einen Vorverstärker (M 178) den komplexen Strom, der durch die Probe fließt.

Bei Frequenzen unter 10 Hz übernimmt eine "Fast Fourier Transform" Technik (FFT) die Messung. Dabei wird in einem Potentiostat eine Superposition von Anregewellen bei verschiedenen Frequenzen erzeugt und die Antwort der Probe registriert. Mit einer inversen FFT wird diese Superposition wieder in diskrete Frequenzdaten zerlegt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß nicht für jede Frequenz die Polarisationszeit abgewartet werden muß.

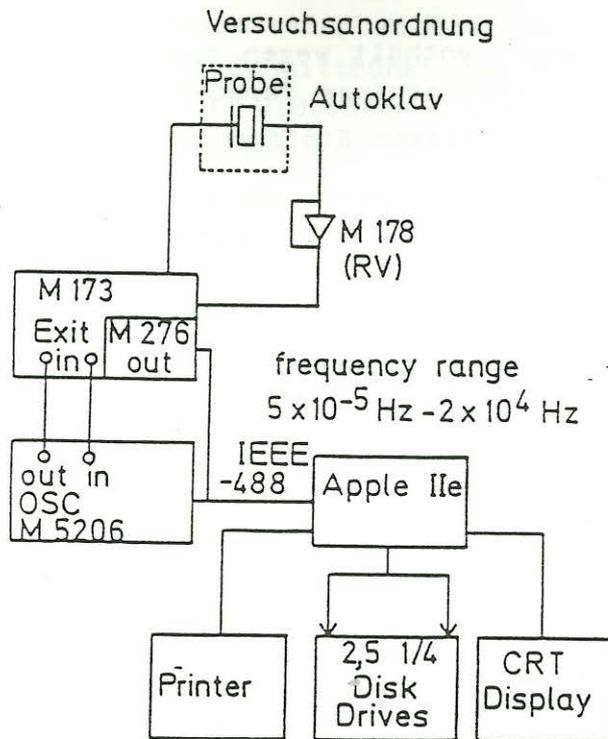


Abb.5 Block-Diagramm des AC Impedance System : (M178) Elektrometer, (M276) Interface, (M173) Potentiostat, (M5206) Lock In Analyser

#### 4.2 Theoretische Betrachtungen zur Widerstandsdispersion von Gesteinen

Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  und die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  sind Materialgrößen, die die durch die elektrische Feldstärke  $\underline{E}$  hervorgerufene Stromdichte bzw. Verschiebung  $\underline{D}$  bestimmen.

$$\underline{J} = \sigma \underline{E} \quad (4)$$

$\underline{E}$  Elektrische Feldstärke

$\sigma$  Elektrische Leitfähigkeit

$$\underline{D} = \epsilon \underline{E} \quad (5)$$

$\underline{D}$  Verschiebungsstromdichte

$\epsilon$  Dielektrizitätskonstante

$\epsilon_0$  Dielektrizitätskonstante im Vakuum

K Relative Dielektrizitätskonstante des Materials

$$\epsilon = \epsilon_0 K \quad (6)$$

Die gemessene Leitfähigkeit enthält wegen des Ladungstransportes ohmsche und wegen Diffusionsvorgänge faradayische Anteile. Deshalb müssen wir von den komplexen Stoffgrößen  $\sigma^*$  und  $K^*$  ausgehen, so daß gilt:

$$(7) \quad \sigma^* = \sigma' + i \sigma''$$

$$(8) \quad K^* = K' - i K''$$

Dadurch wird ein effektiver komplexer elektrischer Leitwert definiert:

$$(9) \quad j = \sigma_{\text{eff}}^* E$$

mit

$$(10) \quad \sigma'_{\text{eff}} = \sigma' + \varepsilon_0 K''$$

$$(11) \quad \sigma''_{\text{eff}} = \varepsilon_0 K' + \sigma''$$

Der von uns gemessene spezifische elektrische Widerstand entspricht dem komplexen Kehrwert von  $\sigma_{\text{eff}}^*$ . Zur Zuordnung weniger charakteristischer Zahlen der Widerstandsdispersion bieten sich elektrische Ersatzschaltbilder an. Die Meßpunkte ( $P'$ ,  $P''$ ) einer einfachen Anordnung von einem Widerstand und einem dazu parallelen Kondensator, für ein ganzes Frequenzspektrum durchgemessen, ergeben in der komplexen Zahlenebene, dem s.g. Cole Cole Plot (COLE et al., 1941) einen Halbkreis (siehe Abb.6).

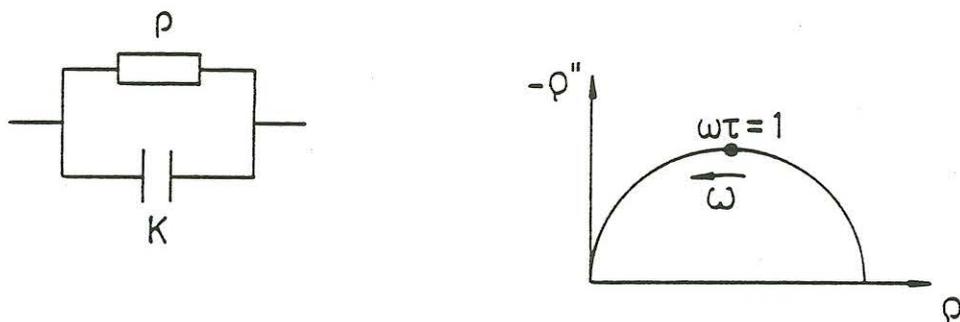


Abb. 6 Ersatzschaltbild und Cole-Cole Plot für eine parallele Anordnung von Widerstand und Kondensator

Hierbei sind  $P$  spezifischer Widerstand und  $K$  Dielektrizitätskonstante. Der rechte Schnittpunkt des Halbkreises mit der Abszisse hat die Größe des Widerstands und am Maximum läßt sich aus der dazugehörigen Frequenz die Relaxationzeit bestimmen. Das ist die Zeit, die sich aus dem Produkt des Widerstandswertes mit der Kapazität des Kondensators ergibt. Entsprechend ergeben eine Anordnung von drei RC-Gliedern im Cole-Cole-Plot drei Halbkreise. Dabei muß jedoch die Voraussetzung erfüllt sein, daß sich die Relaxationszeiten der einzelnen Glieder stark unterscheiden. Nähern sie sich an, so beginnen sich die Halbkreise zu überlappen, bis ein neuer größerer Halbkreis, entsteht.

Diese Bilder erweisen sich zur Interpretation der elektrischen Eigenschaften von geologischen Proben als nützlich. Bei steigender Frequenz haben wir von links nach rechts in der Hauptsache drei Effekte (MANKO, 1984): Elektroden-, Korngrenzen- und Volumeneffekt.

Jeweils eines der drei RC-Glieder kann dabei als Superposition von mehreren RC-Gliedern betrachtet werden, die sich in ihren Relaxationszeiten nicht stark unterscheiden. Die Halbkreise dieser kleinen Beiträge können sich zu einem großen Halbkreis überlagern. Solange der Unterschied der Relaxationszeiten der drei Effekte groß genug ist, kann man jeden dieser Effekte durch jeweils ein parallelgeschaltetes RC-Glied beschreiben und alle drei hintereinanderschalten.

Bei Mineralen und Gesteine liegen komplizierte Relaxationprozesse vor, da dort die Ladungsverteilung deformiert ist. Als Ursache dieser Polarisation kann z.B. die Coulombabschirmung der Ladungsträger in ihrer Umgebung, welche bei Ladungstransport langsamer nachkommt, angesehen werden. Ferner kommt die sprunghafte Orientierungsänderung der Dipole, die man als einseitig verankert betrachten kann (JONSCHER, 1977), als Polarisationsmechanismus in Frage. Das hat zur Folge, daß der dielektrische Verlust der oben eingezeichneten Kondensatoren frequenzabhängig ist. Damit nimmt das Modell die in Abb.7 gezeigte Form an.

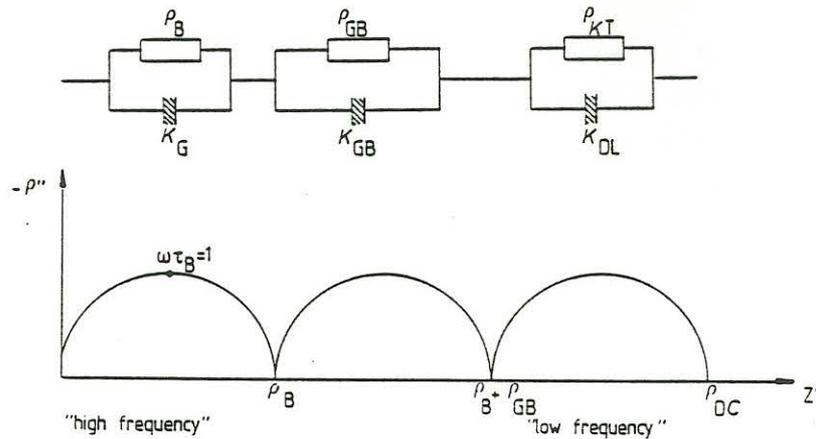


Abb. 7 Theoretisches Ersatzschaltbild und dazugehöriges Cole-Coleplot einer Widerstandsdispersion einer Gesteinsprobe

Jedes der drei Glieder beschreibt im Impedanzdiagramm einen Halbkreis, der jetzt jedoch nicht mehr auf der reellen Achse steht, sondern auf einer Geraden, die mit der  $\rho'$ -Achse einen Winkel von  $n \frac{\pi}{2}$  mit  $0 \leq n \leq 1$  bildet. Der Wert  $n$  hängt von dem niederfrequenten Deformationsanteil der Polarisation ab. Rein rechnerisch lassen sich diese Größen nach einem Modell von Jonscher durch Hinzufügen eines von  $n$  abhängigen Geometriewertes berechnen.

Für ein RC-Glied gilt:

$$(12) \rho^*_{\text{calc}} = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{1}{\rho_i} + \frac{\tau_i}{\rho_i} \cot \frac{n \pi}{2} \omega^{n_i} + i \frac{\tau_i \omega^{n_i}}{\rho_i} \right)^{-1}$$

Nach einer Hintereinanderschaltung dreier solcher RC-Glieder können wir jetzt eine Formel für  $\rho'$  und  $\rho''$  angeben. Hierzu sind 9 Parameter erforderlich, um das dazugehörige Cole-Cole-Plot zu interpretieren: Die Relaxationszeiten, die Widerstände und die Zahlen  $n$  der 3 Effekte an den Übergängen Elektrode Probe, an den Korngrenzen und im Volumen.

Der Begriff Relaxationszeit gilt strenggenommen nur für  $n=1$ , sonst bekommt diese Größe nicht die Dimension einer Zeit.

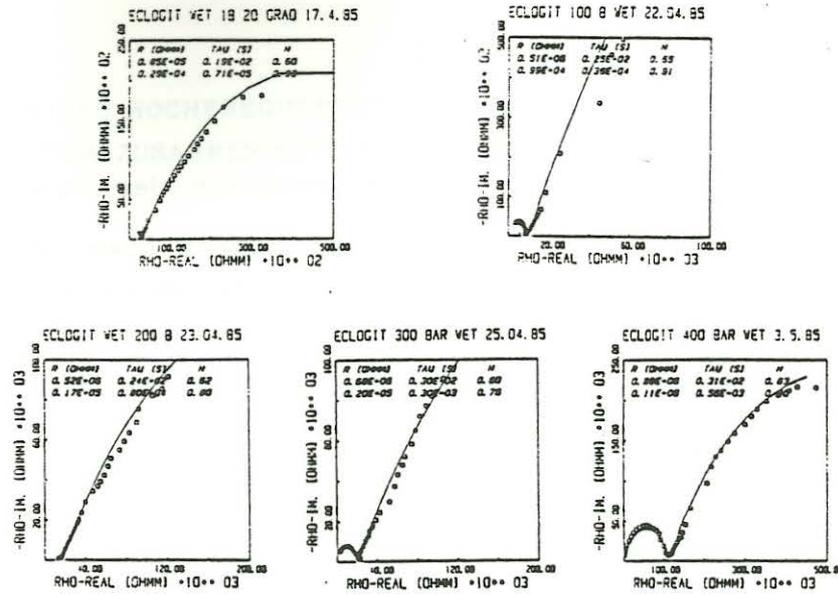


Abb. 8 a-e: Widerstandsdispersionen von 100 % feuchten Eklogit im Frequenzbereich zwischen  $10^{-4}$  bis  $2 \cdot 10^4$  Hz in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck.

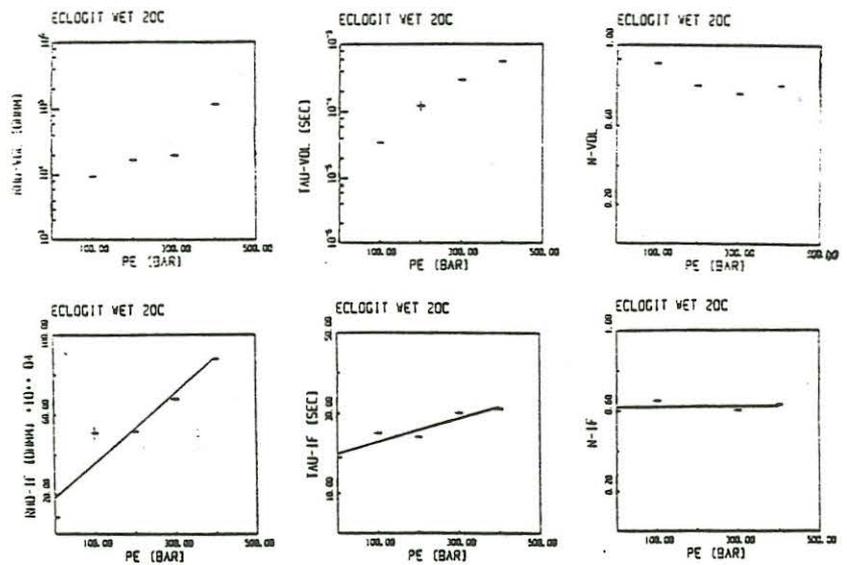


Abb. 9: Anpassungsparameter an Widerstandsdispersionen (in Abb. 8) gemäß Gleichung (12) in Abhängigkeit vom Druck.

## 5. Programm RHOFIT

Zur Analyse und Interpretation der Meßdaten wurde ein Programm RHOFIT geschrieben. Es minimiert über alle Frequenzen die Summe der Quadrate der Abweichungen der gemessenen Realteile von den mit den o.g. Parametern errechneten Werten zuzüglich der entsprechenden Imaginär-Werte. Da die Widerstandswerte u.U. innerhalb einer Dispersion mehrere Größenordnungen einnehmen können wurden die o.g. Abweichungen durch die Division mit dem Meßwert selber, einem abgeschätzten Fehler, normiert.

$$(13) \quad \sum_w \left( \frac{(\rho'_{\text{obs}} - \rho'_{\text{calc}})^2}{\rho'_{\text{obs}}} + \frac{(\rho''_{\text{obs}} - \rho''_{\text{calc}})^2}{\rho''_{\text{obs}}} \right)$$

Der R-Wert wurde wie folgt definiert:

$$(14) \quad R_{\text{wert}} := \frac{\sum_w ((\rho'_{\text{obs}} - \rho'_{\text{calc}})^2 + (\rho''_{\text{obs}} - \rho''_{\text{calc}})^2)}{\sum_w (\rho'^2_{\text{obs}} + \rho''^2_{\text{calc}})}$$

Das Programm sucht nun nach Vorgabe von sinnvollen Startwerten die besten Parameter im Sinne eines minimalen R-Wertes.

Als Modell wurde das einfache für den Frequenzbereich von DC bis 100000 Hz verwendbare Ersatzschaltbild der Serienschaltung von 3 parallelen RC-Gliedern mit komplexen Kondensatorkapazitäten gewählt (siehe Abb. 7).

Die Auswertung sei am Beispiel einer Messung an einem Eklogit demonstriert. In diesen Cole-Cole-Darstellungen (siehe Abb. 8a-e) sind für 5 Drücke die Frequenzabhängigkeiten der elektrischen Widerstände gezeigt. Die Frequenz variierte von  $10^{-4}$  Hz (letzter Meßpunkt rechts) bis  $2 \cdot 10^4$  Hz (erster Meßpunkt links). Es wurden jeweils 2 Halbkreise angepaßt. Die Werte am Minimum zwischen beiden Halbkreisen wurden unter Atmosphärendruck bei ca. 1000 Hz und unter 500 bar bei ca. 10 Hz gemessen (siehe Abb. 8). Für 2 Relaxationsprozesse erhalten wir 6 Zahlen die in Abb. 9 in Abhängigkeit vom Druck aufgetragen sind.

## 6. INTERPRETATION DES HOCHFREQUENTEN ANTEILS ( $10^2 - 2 \cdot 10^4$ HZ) DER WIDERSTANDSDISPERSION ZUSAMMEN MIT PERMEABILITÄTSMESSUNGEN UNTER DRUCK

Die Abbildungen 10, 11 und 12 zeigen den Einfluß, den ein durch Druck verkleinerter Strömungsquerschnitt auf die o.g. Dispersionsparameter hat.

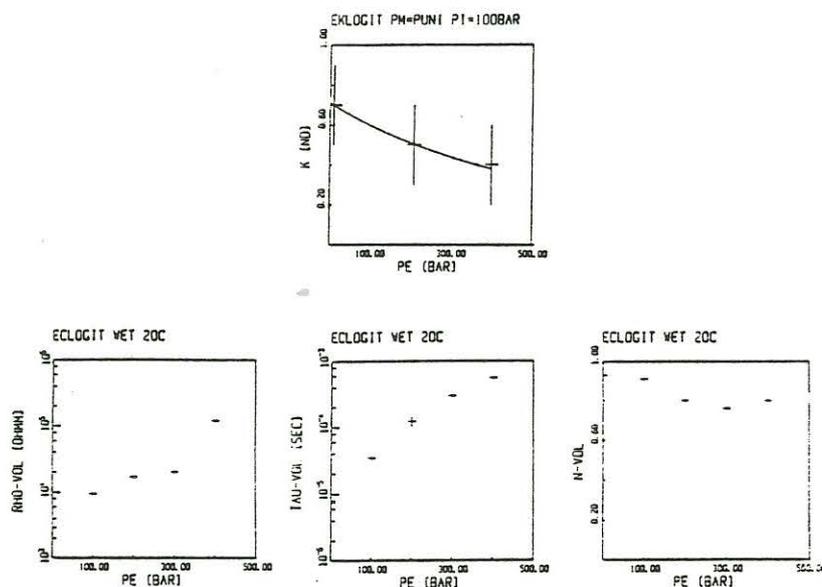


Abb. 10 a-d: Permeabilität und Widerstandsdispersionsparameter von Eklogit unter Druck.

Beim Eklogit wurden sehr niedrige Permeabilitäten unter 1  $\mu\text{D}$  ( $=10^{-21} \text{ m}^2$ ) (siehe Abb. 10 a) und damit übereinstimmend hohe Volumenwiderstände (siehe Abb. 10b) gemessen. Trotzdem muß wegen der zu beobachtenden Druckabhängigkeit davon ausgegangen werden, daß der elektrische Strom vorwiegend im Elektrolyten auf Leitungsbahnen fließt, die stark vom Druck abhängen können. Die Relaxationszeit steigt mit steigendem Druck. Das bedeutet, daß für die Polarisationsvorgänge in der Volumenleitung die Querschnitte der Leitungsbahnen eine Rolle spielen. Somit bietet die Messung der Frequenzabhängigkeit des elektrischen Widerstands an Gesteinen die Möglichkeit zumindestens 2 Größen zur Beschreibung der Leitungskanäle zu liefern.

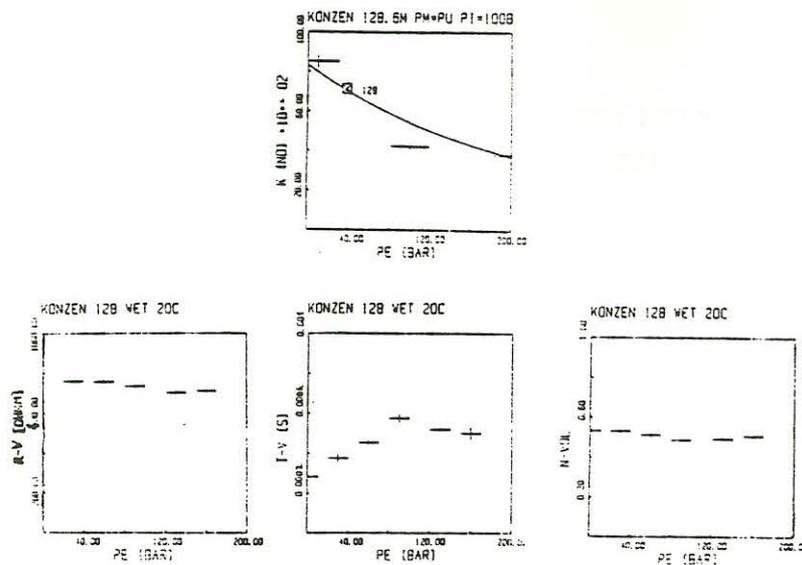


Abb. 11 a-d: Permeabilität und Widerstandsdispersionsparameter von der Bohrkernprobe Konzen 128 m unter Druck

Auch die Probe aus der Bohrung Konzen (NOVER et al.,1985), die höhere Permeabilitäten und niedrigere Volumenwiderstände besitzt, zeigt diesen Anstieg im Widerstand und in der Relaxationszeit wobei schnell ein Sättigungsbereich im Widerstand und bei höheren Drücken in der Relaxationszeit zu beobachten ist.

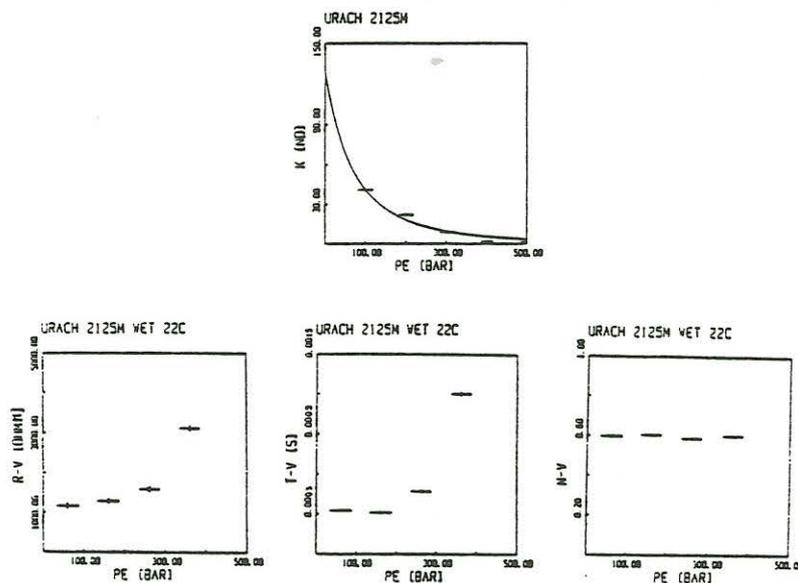


Abb.12 a-d: Permeabilität und Widerstandsdispersionsparameter von der Bohrkernprobe Urach 2125 m unter Druck.

Bei den in Abb. 12 dargestellten Messungen an der Probe Urach 2125m sind wiederum die oben dargestellten Zusammenhänge zu beobachten. Die Relaxationszeit des Volumeneffektes erhöht sich also mit kleiner werdendn Porenquerschnitt. Das bedeutet, daß die Ladungstrennung, die von einem elektrischen Feld erzeugt wird, in engeren Leitungsbahnen langsamer von statten geht.

#### 7. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde dankeswerterweise durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn, West Germany, unter O3E-6187-A, gefördert.

#### 8. LITERATURE

- AAMODT, R.L., D.W. BROWN, H.N. FISHER, Y.C. HSU, R.G. LAWTON, H.D. MURPHY, R.M. POTTER and I.W. TESTER, Los Alamos Scientific Lab. LA 7109-PR Annual Report, 1977
- BECKER, R., H. LENTZ, E. HINZE, G. NOVER, G.WILL, Ein Quecksilberporosimeter hoher Präzision und seine Anwendung zur Charakterisierung dichter Gesteine, Ber. der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, (in print)
- BRACE, W.F., J.B. WALSH, W.T. FRANGOS, Permeability of Granite under High Pressure, J. Geophys. Res., 73, 2225-2236, 1968
- BRACE, W.F., Permeability of crystalline and argillaceous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 17, 241-251, 1980
- BRACE, W.F., Permeability of crystalline rocks: New in situ measurements, J. Geophys. Res., 89, B6, 4327-4330, 1984
- COLE, K.S., COLE, R.: Dispersion and adsorption in dielectrics I, alternating current characteristics, J. Chem. Phys. V9, 341-351, 1941
- HUENGES, E., NOVER, G., and WILL, G., Einfluß der Temperatur auf die Dispersion des elektrischen Gesteinswiderstandes von Basaltproben im Temperaturbereich von 20 °C bis 1000 °C, Sitzungsberichte der 15. Sitzung der FKPE-Arbeitsgruppe "Ermittlung der Temperaturverteilung im Erdinnern, 82-86, 1985
- JONSCHER, A.K., Physical basis of dielectric loss, Nature, 253, 717-719, 1975

- JONSCHER, A.K., The Interpretation of Non-Ideal Dielectric Admittance and Impedance Diagramms, Phys. Stat. Sol., (a)82, 665-676, 1975
- JONSCHER, A.K., Analysis of the alternating current properties of ionic conductors, J. Mat. Sci., 13, 553-562, 1978
- NOVER, G., E. HINZE AND G. WILL, Elektrische Leitfähigkeitsmessungen an Gesteinen in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Gesteinstatus, BMFT Forschungsbericht T 84-279, 1984
- NOVER, G., E. HUENGES and G. WILL, Petrophysical Properties and Electrical Conductivity of Core Samples from the Research Borehole Konzen, Hohes Venn (West Germany), N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 171 (1-3), 169-181, 1985
- MORROW, C., D. LOCKNER, D. MOORE and J. BYERLEE, Permeability of Granite in a Temperature Gradient, J. Geophys. Res., 86, B4, 3002-3008, 1981
- MORROW, C., L.Q. SHI and J.D. BYERLEE, Permeability of Fault Gouge Under Confining Pressure and Shear Stress, J. Geophys. Res., 89, B5, 3193-3200, 1984
- MURNAGHAN, F.D., Finite Deformation of an Elastic Solid, London, (Wiley & Sons), 1951
- WILL, G., L. CEMIC, E. HINZE, K.-F., SEIFERT and R. VOIGT, Electrical Conductivity Measurements on olivines and pyroxenes under defined thermodynamic activities as a function of temperature and pressure, Phys. Chem. Minerals, 4, 139-197, 1979
- WILL, G., E. HINZE, L. CEMIC and M. MANKO, Electrical Conductivity Measurements on Synthetic Olivines at High Pressures and Temperatures under Defined Thermodynamic Conditions. In: W. SCHREYER (Ed.): High Pressure Research in Geoscience, 393-406; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung)
- WILL, G., E. HINZE and G. NOVER, Porosity, Electrical Conductivity and Permeability of Rocks from the Deep Drilling Urach 3 and the Hot Dry Rock Project of Falkenberg (West Germany), J. Geomagn. and Geoelectr., 35, 787-804, 1983
- ZOBACK, M.D. and J.D. BYERLEE, The Effect of Microcrack Dilatancy on the Permeability of Westerly Granite, J. Geophys. Res., 80 (5), 752-755, 1975