

# The Effect of Pressure on the Electrical Conductivity of KTB Rocks

D. Freund, GeoForschungsZentrum Potsdam, D-14473 Potsdam.

**AUFGABE:** Ziel der vorliegenden Aufgabe ist es, aus Permeabilitätsdaten unter Drücken bis 60 MPa, zusammen mit 'elektrischen' Werten, die in einem zweiten und den der Permeabilitätsmessung überschreitenden Druckversuch bestimmt werden, eine indirekte Erweiterung der Permeabilitätsbestimmung zu höheren Drücken hin (< 300 MPa) zu erreichen.

**AUSGANGSMODELL:** Für die Bestimmung der Permeabilität  $k$  gering poröser Gesteine ist erheblicher Aufwand an Maßzeit und -technik notwendig. Während bis zu ca.  $10^{-4}$  mD die konventionellen stationären (steady-state) Methoden eingesetzt werden, bevorzugt man für Gesteine mit geringeren Permeabilitäten, instationäre (transient pulse) Methoden. So werden letztere vor allem für Messungen von  $k$  unter hydrostatischer Druckbelastung verwendet, bei denen sich dieser Parameter um mehrere Größenordnungen reduzieren kann. Neben den physikalischen Parametern wie Relaxationszeit der magnetischen Kernresonanz, spezifische Porenoberfläche und Kationenaustauschkapazität steht für eine Korrelation zur Permeabilität auch die elektrische Leitfähigkeit eines Gesteines  $\sigma$ , zur Verfügung. Das Verhältnis der Leitfähigkeit des den Porenraum füllenden Elektrolyten  $\sigma_e$  zu  $\sigma$ , ist gleich dem Formationsfaktor  $F$ , der mit der Porosität  $\Phi$  durch  $F = \Phi^{-n}$  verknüpft ist. Eine Version dieses Archie-Gesetzes, die den Zusammenhang zwischen den genannten Parametern herstellt, ist in seiner Form adäquat der Kozeny-Karman-Gleichung, die die Beziehungen zwischen der Permeabilität, Porosität und spezifischer Oberfläche regelt. Unter Voraussetzung, daß sowohl für das Strömen einer fluiden Phase als auch für das Fließen des elektrischen Stromes von identischen Bahnen ausgegangen werden kann, d.h. für beide Prozesse die gleiche Tortuosität besteht, existiert das 'equivalent-channel-model' - ECM (Paterson 1983; Walsh & Brace 1984; Pape, Riepe, Schopper 1981, 1982, 1985). Nach diesem einfachen Modell ergibt sich ein Zusammenhang  $k = F^2$ , wobei der Exponent  $n$  zwischen 1 und 3 variieren kann. Diese Relation ist sowohl an Sediment- als auch an kristallinen Gesteinen untersucht worden und bestätigt sich vor allem bei Experimenten unter dem Einfluß hoher hydrostatischer Drücke (Bernabe 1986, 1988, 1991; Lockner & Byerlee 1985; Katsube & Hume 1987; Sen et al. 1990; Freund 1990; Freund & Nover, im Druck).

**EXPERIMENTELLE VORAUSSETZUNGEN:** Für den Vergleich druckinduzierter Änderungen von Permeabilität und Leitfähigkeit standen zur Verfügung:

- KTB-Proben der Vor- und Hauptbohrung aus dem Feldlabor und dem Mineralogischen Institut der Uni Bonn mit den druckabhängigen  $k$ -Daten,
- eine hydrostatische Druckkammer (< 500 MPa) im GFZ Potsdam,
- ein Impedanz-Analysator SI 1260 mit Hard- und Software (GFZ).

Zum obengenannten Projekt wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Erprobung eines neuen Druckzellenaufbaus für die Hochdruckanlage. Zur Gewährung günstiger Drainagebedingungen wurden Metallfilterscheiben aus Sinterinox-Material getestet und erfolgreich eingesetzt. Diese gering kompressiblen Werkstoffe garantieren eine ausreichende Aufnahme des austretenden Porenelektrolyten (0,1M KCl) und damit die Aufrechterhaltung eines atmosphärischen Porennindrucks.

- Einarbeitung in die Meßtechnik mit dem Impedanz-Analysator. Der Einsatz des Impedanzanalysators SI 1260 für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit ist von großem Vorteil. So blieben sich mit der Messung der komplexen Leitfähigkeit in einem verfügbaren Frequenzbereich von 10 mHz bis 32 MHz günstige Möglichkeiten. Zum einen kann die für Druckversuche unkompliziert einsetzbare Zweielektrodenmethode angewendet werden, und zum anderen können die verschiedenen Parameter der Impedanzmessung Auskunft über Leitungsmechanismen und deren Anteile geben (Will & Nover 1986, Nover & Will 1991, Bömer 1991, Ruffet et al. 1991, Glover et al., im Druck).

**PROBENMATERIAL:** Gelestet wurden die Proben 410F1w, 751A1d (Permeabilitätsdaten <30 bzw. <50 MPa aus dem KTB-Feldlabor) und die Proben 315F1g, 328B1g und 543A2f ( $k$ -Daten im Min. Inst. in Bonn bis zu 60 MPa gemessen, vergl. Huenges, 1987) aus der Vorbohrung (KTB-VB Proben). Die Proben 027A1d und 030B2d entstammen der Hauptbohrung (KTB-HB). Ihre Permeabilitätsdaten wurden ebenfalls in Bonn ermittelt. Die Probenkollektion bestand aus unterschiedlich zusammengesetzten Gneisen (3) und Amphiboliten (4), deren Mineralbestand durch die petrografische Dünnschliffanalyse halbquantitativ bestimmt wurden.

**ERGEBNISSE:** Die Abnahme der Permeabilität der untersuchten Proben mit steigendem Effektivdruck zeigt Abb. 1. Die Reduzierung der Permeabilität beläuft sich für den Großteil der Proben auf eine Größenordnung. Lediglich für die Probe KTB-HB027A1a wurde eine Verringerung von  $k$  um zwei Größenordnungen registriert. Im Anschluß an diese Experimen-

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

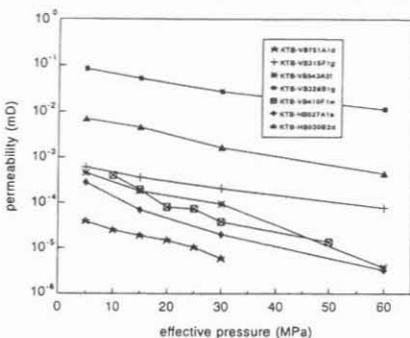


Abb. 1: Permeabilität  $k$  (mD) in Abhängigkeit vom effektiven Druck (max. 60 MPa) für Amphibolite und Gneise der KTB Vor- und Hauptbohrung.

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

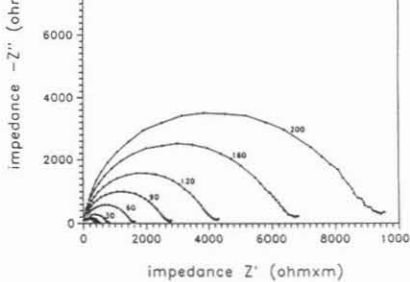


Abb. 2: Darstellung der frequenzabhängigen Widerstandswerte  $Z'$  (Realteil) und  $Z''$  (Imaginärteil) für die Probe HB030B2d bei Druckstufen von 5 (1. Halbkreis, links beginnend) bis 200 MPa (größter Halbkreis) in der komplexen Ebene (Cole-Cole-Diagramm; vergl. Text).

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

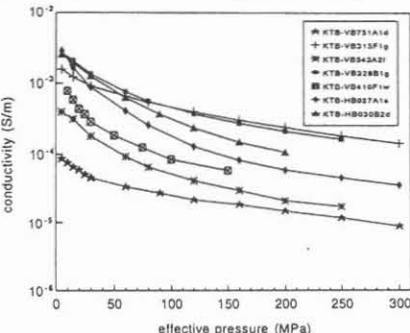


Abb. 3: Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (S/m) aller untersuchten KTB-Proben vom hydrostatischen Druck (MPa).

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

Dieser Exponent ist für die einzelnen Proben angegeben und bewegt sich in dem vom ECM vorgegebenen Wertebereich zwischen 1 und 3. Aus

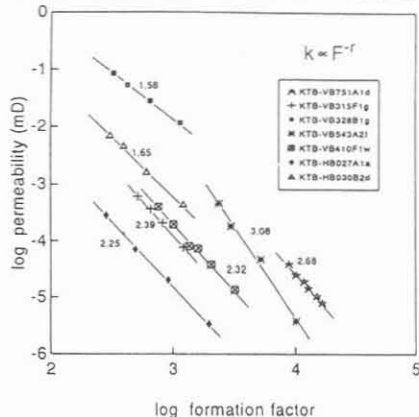


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Permeabilität  $k$  (mD) und dem Formationsfaktor  $F$  gemäß dem 'equivalent-channel model' (ECM:  $k = F^2$ ;  $1 < r < 3$ ) für alle Proben innerhalb der für beide Parameter experimentell angewendeten hydrostatischen Druckbelastung (max. 30 bzw. 60 MPa). Der Exponent  $r$  entspricht in doppeltlogarithmischer Darstellung dem Anstieg der Regressionsgeraden (Korrelationskoeffizient  $0.96 < R < 0.99$ ).

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

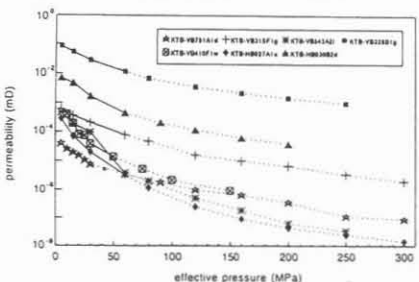


Abb. 5: Permeabilität (mD) als Funktion des effektiven hydrostatischen Druckes (MPa) für alle Proben; komplette Linie: direkte Messungen, gepunktete Linie: indirekte Meßwerte (abgeleitet aus den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und den Regressionsgeraden der Abb. 4), die bei Drücken bis max. 300 MPa im Bereich von  $10^{-4}$  mD liegen.

te wurden im GFZ, Potsdam, die oben erwähnten Impedanzmessungen bis zu einem Druck von maximal 300 MPa durchgeführt, wobei im unteren Druckbereich (max. 60 MPa) die gleichen Werte wie bei den Permea-

**Literatur:**  
 Bernabe, Y., *Mechanics of Materials* 5 (1986), 235-249.  
 Bernabe, Y., *PAGEOPH* 127 (1988), 607-625.  
 Bernabe, Y., *Geophysics* 56 (1991), 436-446.  
 Bömer, F., *Dissertation*, Bergakademie Freiberg 1991, 127S.  
 Freund, D., *Bericht FHD*, Potsdam 1990, 51 S.  
 Freund, D., *Abstr. 6. KTB-Kolloquium, DFG-SPP* Gießen 1993, 188-189.  
 Freund, D.; Nover, G., *Annales Geophysicae* 11, (1993) 1, C19.  
 Freund, D.; Nover, G., *Surveys in Geophysics*, in press.  
 Glover, P.W.J., Meredith, P.G., Sammonds, P.R., Murell, S.A.F., *J. Geophys. Res.*, in press.  
 Huenges, E., *Dissertation*, Rh. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn 1987.  
 Katsube, T.J.; Hume, J.P., *Geophysics* 52 (1987), 342-352.  
 Lockner, D.A.; Byerlee, J.D., *J. Geophysics* 90 (1985), 7837-7847.  
 Nover, G.; Will, G., *unveröffentl. Manuskript* 1991, 29 S.  
 Paterson, M.S., *Mechanics of Materials* 2 (1983), 345-352.  
 Pape, H.; Riepe, L.; Schopper, J.R., *Trans. 7th Eur. Log. Symp.*, Paris 1981.  
 Pape, H.; Riepe, L.; Schopper, J.R., *47th EAEG-Meeting Budapest* 1985.  
 Ruffet, C.; Guegan, Y.; Darot, M., *Terra Nova* 3 (1991), 265-275.  
 Sen, P.N.; Straley, C.; Kenyon, W.E.; Wittingham, M.S., *Geophysics* 55 (1990), 61-69.  
 Walsh, J.B.; Brace, W.F., *J. Geophys. Res.* 89 (1984) 9425-9431.  
 Will, G.; Nover, G., *Annales Geophysicae* 4, B, 2, (1986), 173-182.