

DRUCKEINFLÜSSE AUF DIE PERMEABILITÄT

W. Debschütz, J. R. Schopper

Zusammenfassung

Die Permeabilität als gesteinspezifische Größe läßt sich nur dann eindeutig ermitteln, wenn alle Einflußgrößen auf den im Labor gemessenen Permeabilitätswert korrigiert werden. Dabei erhält man durch die Korrektur weitere charakteristische Gesteinsparameter, die eine Verknüpfung zwischen den Einflußgrößen auf die Permeabilität und der inneren Struktur des Gesteins herstellen.

In der Überlagerungsdruckabhängigkeit von Permeabilität und KLINKENBERG-Konstante sind weitere Merkmale der inneren Porenraumstruktur enthalten, deren Interpretation jedoch bis heute noch nicht endgültig möglich ist. Besonders die Druckabhängigkeit bedarf weiterer Untersuchungen. Hier wäre besonders die Messung der Porosität und der porenraum-spezifischen inneren Oberfläche unter entsprechendem Überlagerungsdruck sicherlich hilfreich, allerdings gibt es bis heute zumindest für die Oberflächenmessung keine Methode, die eine Messung unter simulierter Auflast gestattet.

Die Untersuchungen der Einflüsse des lithostatischen Drucks haben besondere Bedeutung für die Praxis, wenn von Labor-messungen auf die Permeabilität in situ geschlossen werden soll. Man beachte, daß es dabei unzulässig ist, mit konstantem KLINKENBERG-Faktor zu rechnen. Dieser kann unterschiedlich stark gegensinnig, aber sogar gleichsinnig mit der Permeabilität variieren. Eine Extrapolation auf in situ-Bedingungen ist also sehr problematisch.

Die Permeabilität ist eine der wichtigsten petrophysikalischen Größen. Zur eindeutigen Bestimmung der Gesteinspermeabilität reicht es jedoch nicht aus, nur einen Permeabilitätswert zu messen, da die Messung dann nur bei genau einem Überlagerungsdruck, genau einem Porendruck und bei genau einer Strömungsgeschwindigkeit stattfindet. Alle drei Größen beeinflussen jedoch direkt den so gemessenen Permeabilitätswert. Will man also eine vergleichbare, gesteinspezifische Permeabilität bestimmen, ist es notwendig, alle meßtechnischen Einflüsse zu korrigieren. Andererseits sollte der Einfluß obiger Größen durch die Bestimmung weiterer Konstanten verifiziert werden, um so die Möglichkeit zu haben, die Permeabilität eines Gesteins für beliebige Randbedingungen aus den Labormessungen bestimmen zu können.

Bevor jedoch auf die einzelnen Einflußgrößen direkt eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst, zur Erinnerung, die Definition der Permeabilität nach D'ARCY vorangestellt werden.

Bei der Durchströmung eines Gesteins mit einer inkompressiblen Flüssigkeit gilt für das pro Zeiteinheit durch die Probe fließende Volumen folgender Zusammenhang :

$$\frac{V}{t} = \frac{A \cdot k}{\eta \cdot l} \cdot (P_1 - P_2)$$

mit:

- $\frac{V}{t}$ = Durchflußvolumen pro Zeiteinheit
- A, l = Querschnitt, Länge der Probe
- η = Viskosität des strömenden Mediums
- P_1, P_2 = Drücke an den Stirnflächen der Probe

Wird bei der Messung statt einer inkompressiblen Flüssigkeit ein kompressibles Gas verwendet, muß die D'ARCY-Gleichung dahingehend erweitert werden, daß die Kompressibilität des Gases bei der Auswertung berücksichtigt wird. Bei der Messung des Volumenstromes unter normalem Luftdruck P_1 folgt so für die D'ARCY-Gleichung :

$$\frac{V}{t} = \frac{A \cdot k}{\eta \cdot l} \cdot (P_1 - P_2) \cdot \frac{(P_1 + P_2)}{2} \cdot \frac{1}{P_1}$$

mit: $\frac{P_1 + P_2}{2}$ = mittlerer Porendruck

P_1 = Luftdruck (Druck der Volumenstrommessung)

Für Gase ergibt sich aber noch eine weitere Änderung, da Gase beim Durchfluß durch Kapillaren ein anderes Strömungsverhalten zeigen als Flüssigkeiten. Während bei Flüssigkeiten, im Fall laminarer Strömung, die Geschwindigkeit an der Kapillarwand verschwindet, ist die Geschwindigkeit eines Gases > 0 . Physikalisch bedeutet dies, daß der laminaren Strömung eine Diffusionsbewegung überlagert ist. Die gemessene Gaspermeabilität ist also größer, als die entsprechende Flüssigkeitspermeabilität. Um die Permeabilität als gesteinspezifische, vom Strömungsmedium unabhängige Größe zu erhalten, muß die Gaspermeabilität korrigiert werden.

Zwischen der gemessenen Permeabilität und der "wahren" Permeabilität existiert nach KLINKENBERG der folgende Zusammenhang :

$$k_a = k_t \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{P}\right)$$

mit: k_a = scheinbare Permeabilität (Meßwert)
 k_t = wahre Permeabilität
 α = KLINKENBERG-Konstante
 P = mittlerer Porendruck

Weiter gilt :

$$\frac{\alpha}{P} = \frac{4 \cdot c \cdot \lambda}{R}$$

mit: c = Proportionalitätsfaktor (≈ 1)
 λ = mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle
 R = effektiver hydraulischer Radius

Für die KLINKENBERG-Korrektur ist es also notwendig, mehrere Permeabilitätswerte für verschiedene mittlere Porendrucke zu messen und diese Werte linear gegen den Kehrwert des mittleren Porendrucks aufzutragen. In dieser Darstellung (Abb. 1) erhält man nun alle Messwerte auf einer Geraden, deren Achsenabschnitt die wahre Permeabilität k_t ergibt. Der Quotient aus Steigung und Achsenabschnitt liefert die KLINKENBERG-Konstante α . Die KLINKENBERG-Konstante, die im wesentlichen den reziproken effektiven hydraulischen Radius repräsentiert, wächst im allgemeinen mit abnehmender Permeabilität.

An dieser Stelle soll nun kurz auf die technische Durchführung der Messung eingegangen werden. Während der Messung befindet sich die Probe in einer Gummimanschette in einer triaxialen HASSLER-Zelle (Abb. 2), in der die Gummimanschette und der Hinterdruckstempel mit dem Druck P_M an die Probe angepreßt werden. Der Druck ist einerseits notwendig, um Randflüsse zu vermeiden, simuliert jedoch andererseits einen lithostatischen Druck auf die Probe. Der Differenzdruck über der Probe wird dadurch erzeugt, daß auf die eine Probenstirnfläche ein konstanter Überdruck P_1 wirkt, während die rückwärtige Stirnfläche unter äußerem Luftdruck $P_2 = P_1$ verbleibt. Durch Änderung des Vorderdrucks können so verschiedene Porendrucke, wie sie für die KLINKENBERG-Korrektur notwendig sind, erzeugt werden.

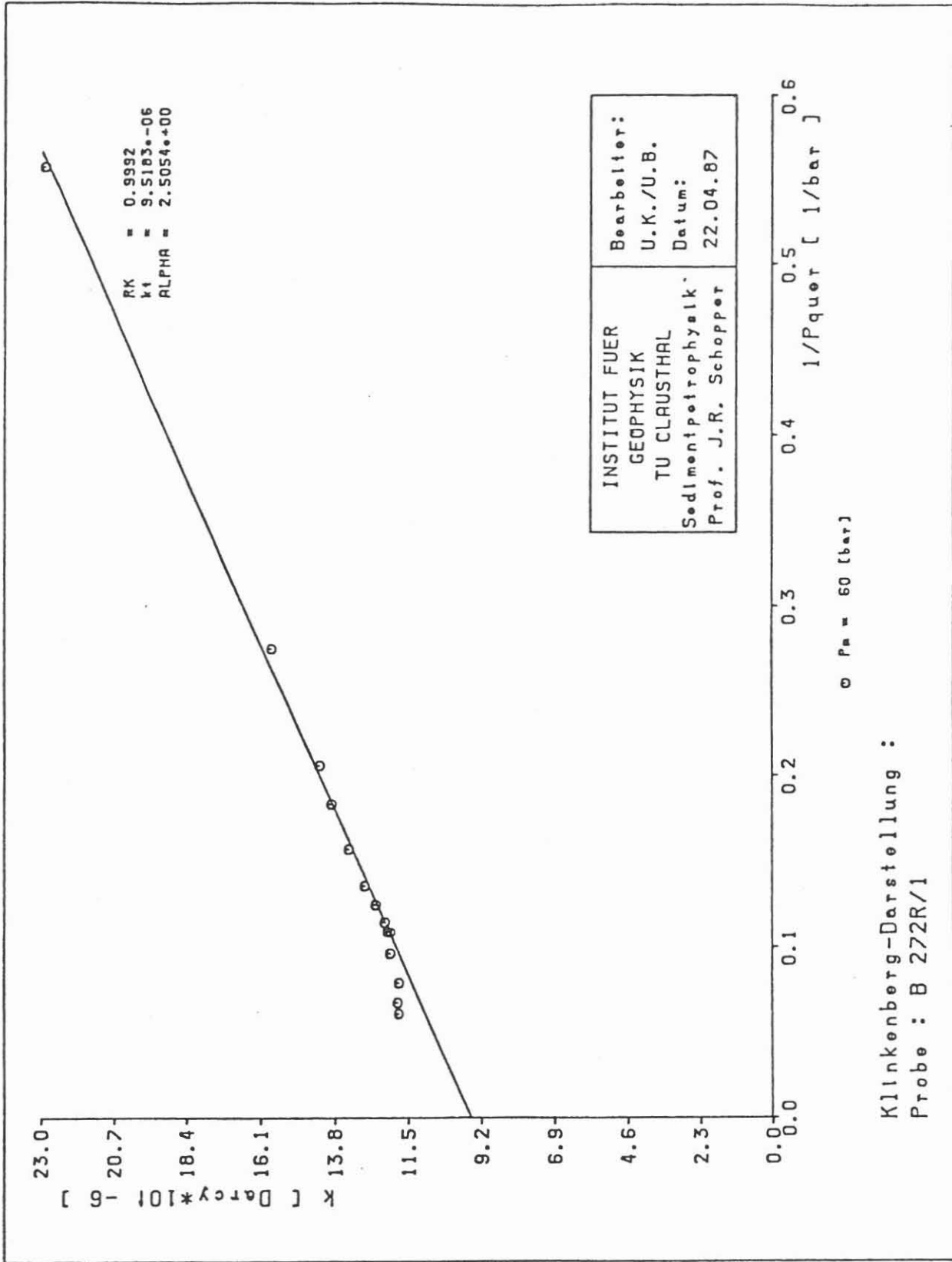


Abb. 1: KLINKENBERG-Darstellung für eine Sandstein-Probe

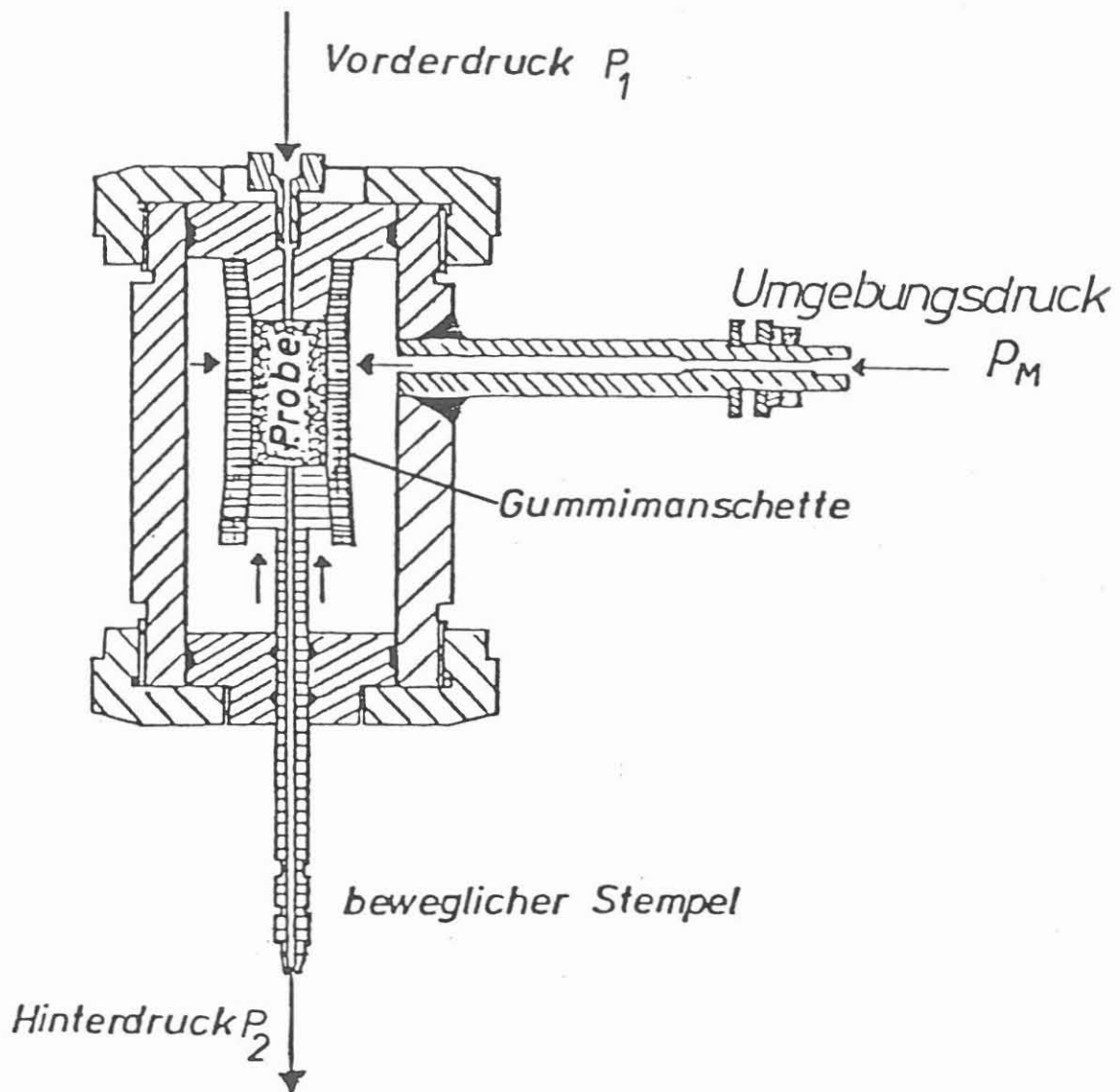


Abb. 2: Schematische Darstellung der triaxialen HASSLER-Zelle für Permeabilitätsmessungen

Diese Art der Messung bewirkt jedoch auch eine Variation des Differenzdrucks, und damit eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, mit zunehmendem mittleren Porendruck. Nun gibt es jedoch, individuell für jedes Gestein, eine Strömungsgeschwindigkeit, ab der außer den viskosen Kräften zusätzlich Trägheitskräfte einen wesentlichen Einfluß bekommen. Dies äußert sich in der KLINKENBERG-Darstellung durch eine überproportionale Abnahme der Permeabilität gegenüber der ausschließlich porendruckabhängigen Abnahme der Permeabilität (Abb. 3a).

Auch hier ist eine Korrektur möglich, indem man den Kehrwert der Permeabilität linear über der Fließgeschwindigkeit aufträgt (Abb. 3b). Nach FORCHHEIMER erhält man hierbei eine Gerade, die durch folgende Gleichung beschrieben werden kann :

$$\frac{1}{k} = a + b \cdot \frac{Q \cdot P_1}{A} \cdot \frac{M}{\eta \cdot R \cdot T}$$

- mit: a = Kehrwert der Permeabilität bei $Q = 0$
b = FORCHHEIMER-Konstante
Q = gemessene Durchflußrate ($\hat{=} \frac{V}{t}$ in D'ARCY-Gleichung)
 P_1 = Luftdruck
M = Molekulargewicht des Strömungsmediums
R = universelle Gaskonstante
T = absolute Temperatur der Messung

Multipliziert man nun die FORCHHEIMER-Konstante b mit der Strömungsgeschwindigkeit und zieht diesen Wert vom Kehrwert der gemessenen Permeabilität ab, so erhält man nach erneuter Kehrwertbildung einen von Trägheitskräften unbeeinflussten Permeabilitätswert :

$$k_{a, \text{korr}} = \left[\frac{1}{k_a} - b \cdot \frac{Q \cdot P_1 \cdot M}{A \cdot \eta \cdot R \cdot T} \right]^{-1}$$

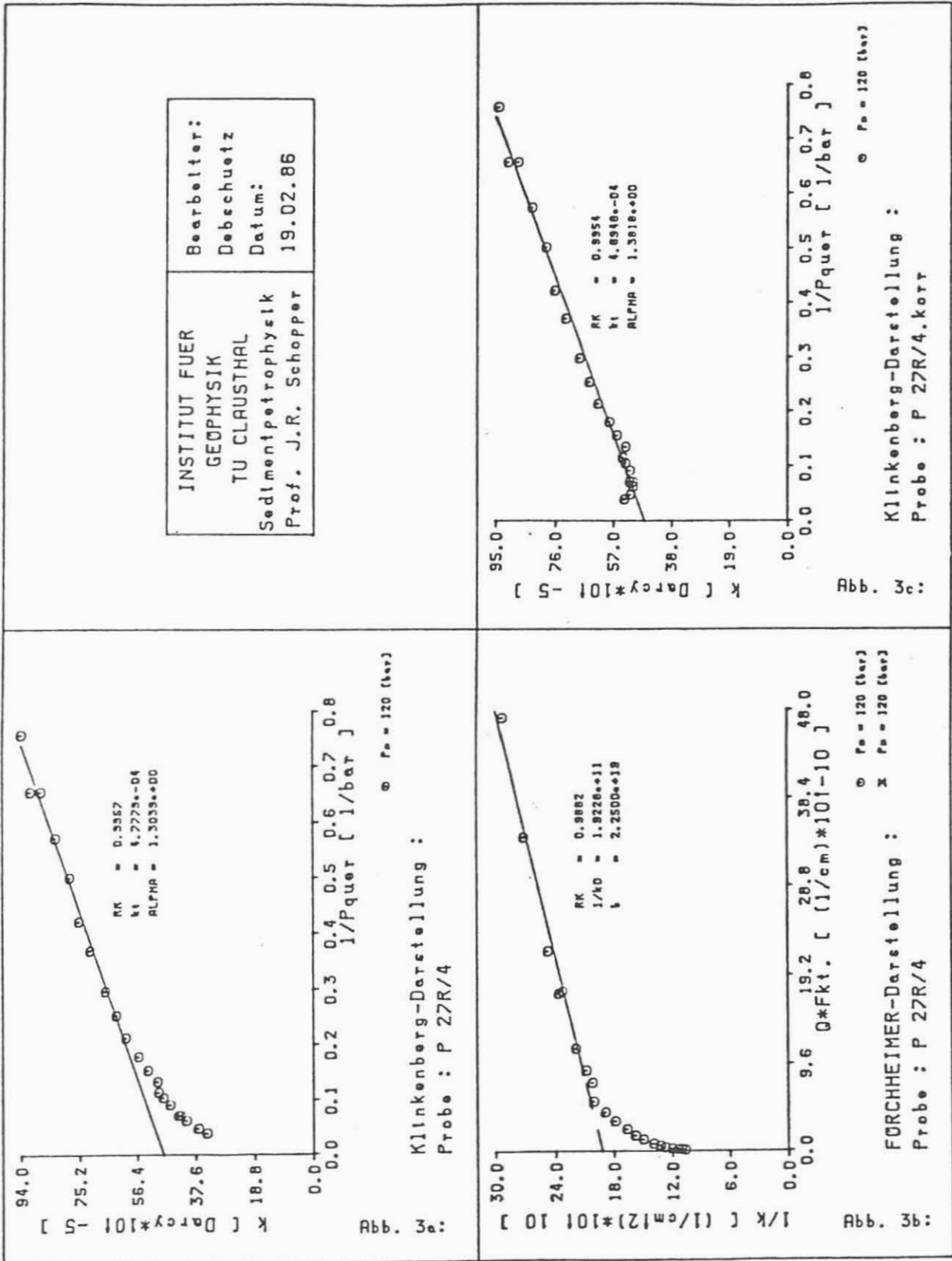


Abb. 3: Graphische Darstellung zur Korrektur des Inertiaeffekts nach FORCHHEIMER

Eine erneute KLINKENBERG-Darstellung mit den korrigierten Permeabilitätswerten zeigt Abbildung 3c.

Zur exakten Bestimmung des Trägheitseinflusses ist es jedoch besser, eine getrennte Messung bei konstantem Porendruck und variablem Differenzdruck durchzuführen, um eine zusätzliche Beeinflussung der gemessenen Permeabilität durch variablen "gas-slip" auszuschließen.

Nachdem man nun auf diese Weise alle Einflüsse der Strömung bzw. des strömenden Mediums korrigiert hat, verbleibt immer noch der Einfluß des Überlagerungsdruckes auf die Permeabilität. Man benötigt also noch Messungen, wie bereits beschrieben korrigiert, die bei unterschiedlichen Überlagerungsdrücken durchgeführt wurden.

Abbildung 4 zeigt zunächst einmal eine KLINKENBERG-Darstellung für 4 verschiedene Überlagerungsdrucke einer Sandstein-Probe. Man sieht also hier recht deutlich, daß einerseits die Permeabilität mit zunehmendem Überlagerungsdruck abnimmt und daß andererseits auch die Steigung der KLINKENBERG-Geraden kleiner wird. Es fällt weiterhin auf, daß die Abnahme der Permeabilität für konstante Überlagerungsdruckdifferenzen nicht zu konstanten Permeabilitätsdifferenzen führt. Hieraus ergibt sich der Schluß, daß die Permeabilitätsabnahme der Permeabilität selbst proportional ist.

Mathematisch läßt sich dies wie folgt ausdrücken :

$$k = k_0 \cdot \text{EXP}(-\gamma \cdot (P_M - \beta \cdot P))$$

mit: k_0 = Permeabilität des unbelasteten Gesteins
 P_M = Überlagerungsdruck (lithostatischer Druck)
 γ = Kompaktionskoeffizient
 β = Porendruckkoeffizient ($\beta \approx 1$)
 P = mittlerer Porendruck
 $(P_M - \beta P)$ = effektiver Überlagerungsdruck

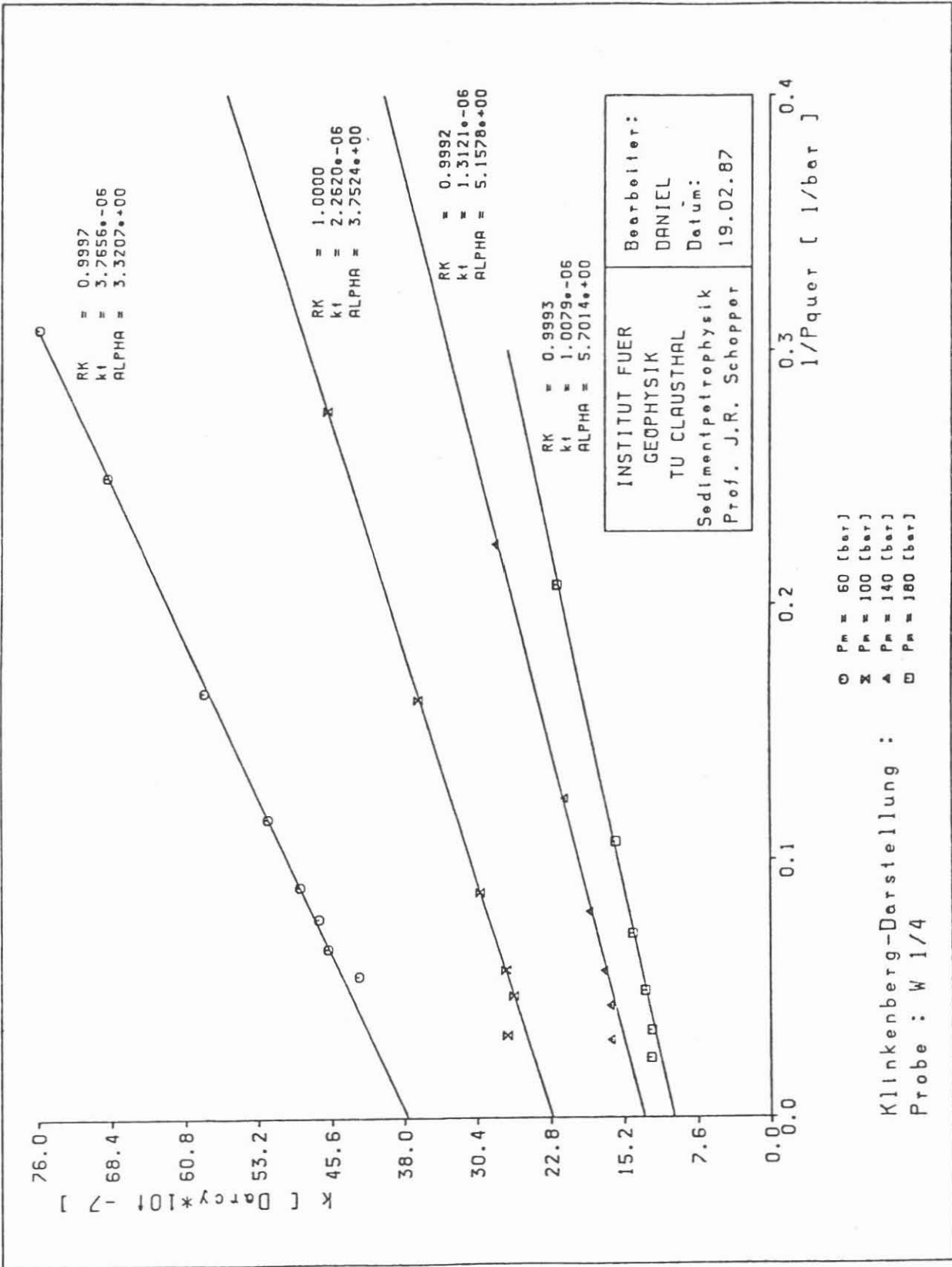


Abb. 4: KLINKENBERG-Darstellung zur Überlagerungsdruck-abhängigkeit der Permeabilität einer Sandstein-Probe

Für den Fall, daß $P_M \gg P$ gilt, läßt sich für den effektiven Überlagerungsdruck näherungsweise schreiben :

$$P_M - \beta \cdot P \approx P_M$$

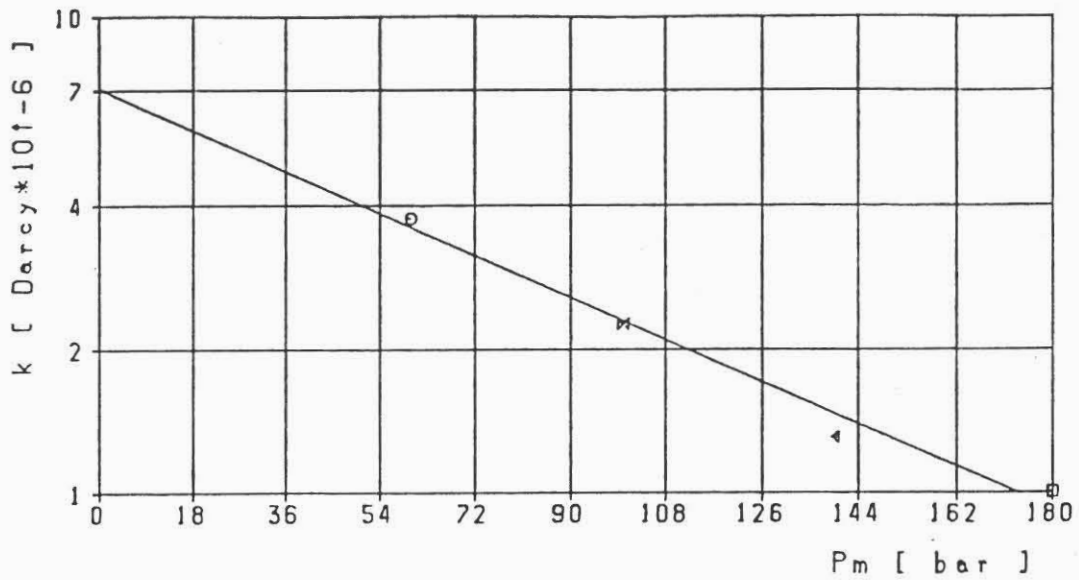
Obige Gleichung vereinfacht sich somit zu

$$k = k_0 \cdot \text{EXP}(-\gamma \cdot P_M)$$

Trägt man also den Logarithmus der Permeabilität über dem linearen Überlagerungsdruck auf, müßten die Permeabilitätswerte entsprechend diesem Zusammenhang auf einer Geraden negativer Steigung liegen. In Abbildung 5 ist dies dargestellt und man sieht, daß sich der eben beschriebene Zusammenhang bestätigen läßt. Neben der k_t vs. P_M - Darstellung ist hier in gleicher Weise auch die KLINKENBERG-Konstante vs. P_M dargestellt, die in ähnlicher Weise, jedoch mit positivem Exponenten mit dem Überlagerungsdruck korreliert. Dies entspricht den Erwartungen, da α als Maß des reziproken hydraulischen Kapillarradius allgemein mit abnehmender Permeabilität ansteigt.

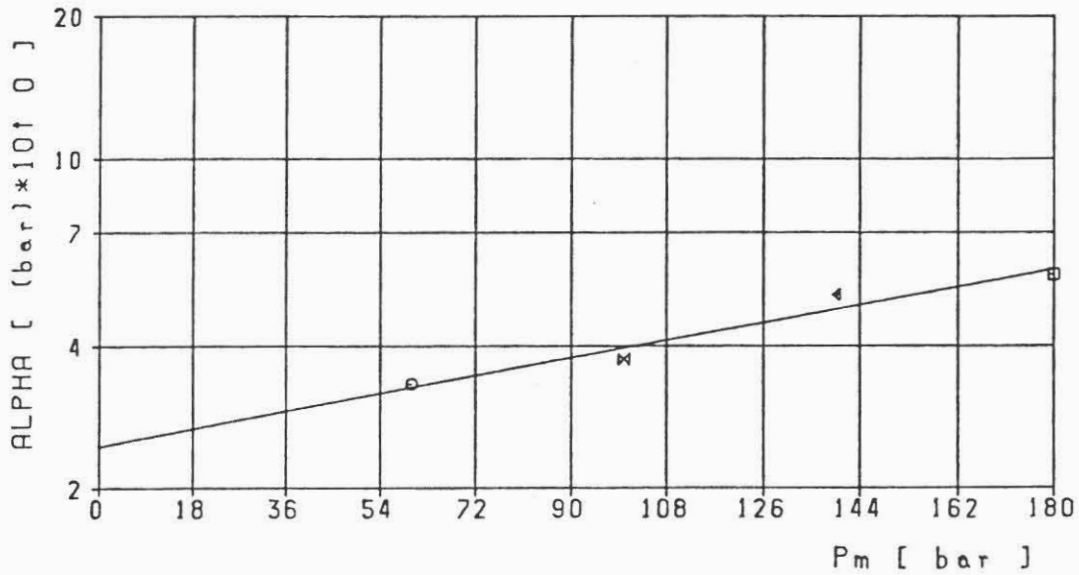
An dieser Stelle soll nun eine Darstellung der KLINKENBERG-Korrektur für eine Granit-Probe für 4 verschiedene Überlagerungsdrucke betrachtet werden (Abb. 6). Auf den ersten Blick sind auch hier keine generellen Unterschiede gegenüber der eben gezeigten Probe zu erkennen. Auch hier nimmt sowohl der Achsenabschnitt, als auch die Steigung der KLINKENBERG-Geraden mit zunehmendem Überlagerungsdruck ab.

Trägt man nun für diese Probe die Permeabilität und die KLINKENBERG-Konstante über dem Überlagerungsdruck auf (Abb. 7), macht man die ungewohnte Feststellung, daß auch die KLINKENBERG-Konstante mit zunehmendem Überlagerungsdruck abnimmt.



kt vs. Pm :
Probe : W. 1/4

RK = 0.9805
k10 = 7.0644e-06
GAMMA = -4.8846e-03



ALPHA vs. Pm :
Probe : W 1/4

RK = 0.9559
ALPHA0 = 2.4450e+00
GAMMA = 2.1060e-03

Abb. 5: Darstellung zur Abhängigkeit der wahren Permeabilität und der KLINKENBERG-Konstanten vom Überlagerungsdruck für eine Sandstein-Probe

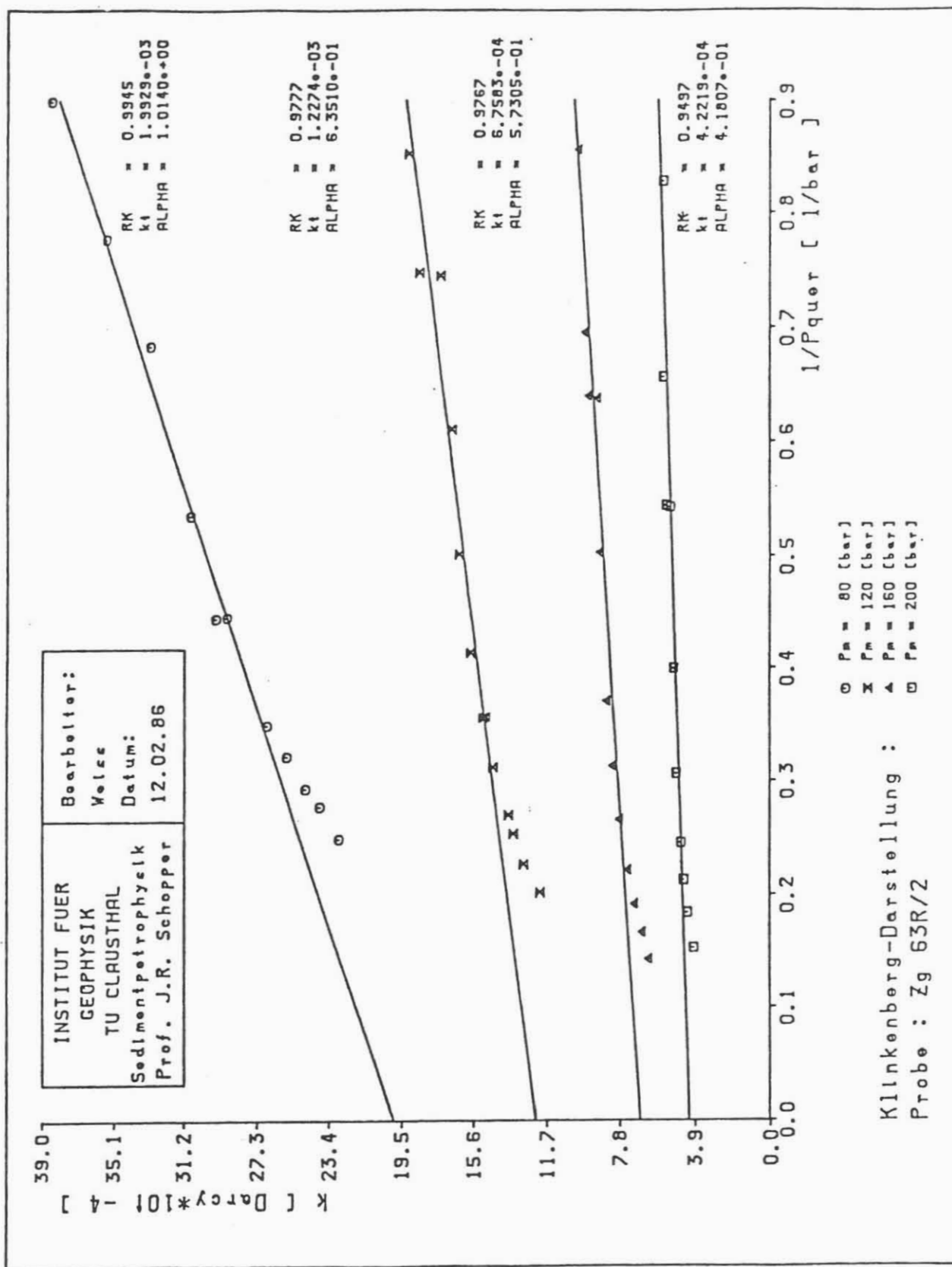


Abb. 6: KLINKENBERG-Darstellung zur Überlagerungsdruck-abhängigkeit der Permeabilität einer Granit-Probe

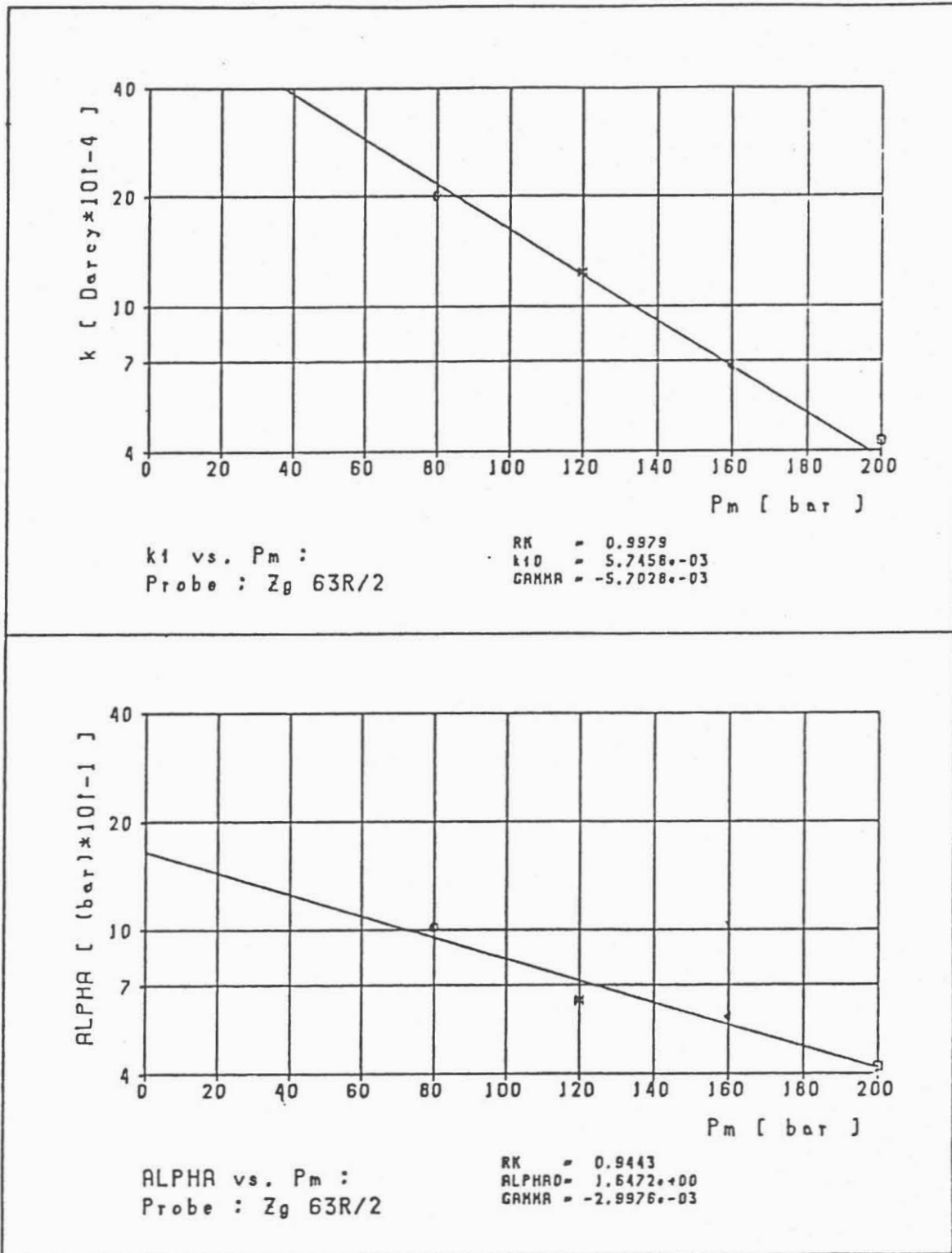


Abb. 7: Darstellung zur Abhängigkeit der wahren Permeabilität und der KLINKENBERG-Konstanten vom Überlagerungsdruck für eine Sandstein-Probe

Dies bedeutet aber, daß sich mit zunehmendem Überlagerungsdruck das Verhältnis zwischen D'ARCY-Strömung und KNUDSEN-Fluß zu Gunsten der D'ARCY-Strömung ändern müßte. Eine mögliche Porenraumstruktur, die ein derartiges Verhalten zeigen könnte, wäre beispielsweise das Nebeneinander von Kapillaren und Mikrorissen im Gesteinsgefüge. Für den Fall, daß die Mikrorisse so eng sind, daß in ihnen ausschließlich KNUDSEN-Fluß stattfindet, sie andererseits aber mit Zunahme der Auflast vollständig geschlossen werden, müßte ALPHA genau diese beobachtete Abnahme mit zunehmendem Überlagerungsdruck zeigen. An dieser Stelle sei verraten, daß die hier gezeigte Granitprobe tatsächlich unter dem Stereomikroskop einen deutlichen Riß in Strömungsrichtung erkennen läßt.