

Elektrische Widerstandsmessungen an KTB-Bohrkernen

Rauen, A.¹, Huenges, E.², Lippmann, E.¹ & Soffel, H.C.³

¹ KTB-Feldlabor, D - 8486 Windischeschenbach

² Lehrgebiet für Ang. Geophysik der RWTH
Lochnerstr. 4-20, D - 5100 Aachen

³ Institut für Allg. und Ang. Geophysik der LMU
Theresienstr 41, D - 8000 München 2

Inhalt:

1. Einleitung.
2. Die Apparatur zur Messung des elektrischen Widerstandes an KTB-Bohrkernen.
 - 2.1. Elektrodenanordnung und Geometriefaktor.
3. Präparation der Bohrkerne und Durchführung einer Messung.
4. Ergebnisse der Messungen im Feldlabor.
5. Zusammenfassung.
6. Literaturverzeichnis.

Anhang: Abbildungen.

1. Einleitung

Labormessungen des elektrischen Widerstandes werden zur Interpretation von elektrischen Feldmessungen oder von elektrischen Bohrlochmessungen benötigt. Insbesondere können Labormessungen einen Beitrag liefern zur Frage nach der Natur der guten Leiter, die vielfach in der oberen oder mittleren Erdkruste nachgewiesen werden.

Bereits in der Vorerkundungsphase zur Lokationswahl des kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) wurde in der Oberpfalz auf die Existenz von mehreren gutleitfähigen Strukturen bis zu einer Tiefe von etwa 11 km hingewiesen (zusammengefaßt von UNTIEDT, 1986). Spätere Untersuchungen konnten die Existenz gutleitfähiger Strukturen bestätigen (z.B. JENSEN et al., 1990). Die im April 1989 bei 4000.1 m beendete KTB-Vorbohrung lieferte Material in Form von Bohrkernen ($\varnothing \approx 10$ cm), deren elektrische Leitfähigkeit mit einer neuartigen Apparatur unter Oberflächenbedingungen bestimmt wurde. Auch bei diesen Messungen konnten einige Bereiche erhöhter elektrischer Leitfähigkeit festgestellt werden. Die Vorbohrung wurde ebenfalls ausführlich mit Methoden der Bohrlochmessungen untersucht. Ein Vergleich der Labormessungen mit Bohrlochmessungen wird bei RAUEN et al. (1990 a und 1990 b) gegeben.

2. Die Apparatur zur Messung des elektrischen Widerstandes an KTB-Bohrkernen

Es wurde zunächst eine bei RAUEN et al. (1988) beschriebene Apparatur eingesetzt. Hier erfolgte die Einspeisung des Meßstroms (20 Hz) über die beiden Stirnflächen eines auf Zylinder-Geometrie präparierten Bohrkerns.

Um die zeitraubende Präparation der Kerne zu vermeiden, wurde in Zusammenarbeit von Mitarbeitern des Feldlabors und des Instituts für Geophysik in München eine neue Apparatur entwickelt (ausführlich beschrieben bei HUENGES et al., 1989). Die Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Meßanordnung. Ein Oszillator erzeugt eine rechteckförmige Wechselspannung der Frequenz 150 Hz. Mit dieser Wechselspannung wird die Stromquelle angesteuert. Dieser elektronische Baustein regelt die abgegebene Spannung so, daß ein Wechselstrom mit konstanter Amplitude abgegeben wird. Die Stromstärke kann über einen Schalter in 4 Stufen von 78 μA bis 0.15 μA eingestellt werden. Kann die vorgewählte Stromstärke nicht eingehalten werden, d.h. wird die Aussteuerungsgrenze der Spannungsquelle erreicht (z.B. durch einen zu hochohmigen Kern oder durch unterbrochenen Stromkreis), so leuchtet eine LED auf, die dem Benutzer die Übersteuerung anzeigt und die nächst niedrigere Stromstufe empfiehlt.

Über die stromzuführenden Elektroden und den Bohrkern wird der Stromkreis geschlossen. Die Elektroden selbst bestehen aus porösen Kunststoff-Stiften von nur einigen mm^2 Kontaktfläche zur Bohrkernoberfläche, die in Hülsen aus Messing stecken. Das Kunststoff-Material wird mit einem Elektrolyt getränkt (aus Gründen der Bedienungs-Vereinfachung Leitungswasser), so daß die Übergangswiderstände zum Bohrkern (gegenüber direktem metallischen Kontakt) erniedrigt werden.

Über zwei weitere, identische Elektroden wird die Meßspannung abgegriffen. Die Spannung wird zunächst über einen Differential-Meßverstärker auf den Eingang des Lock-in-Verstärkers gegeben. Dieser Lock-in-Verstärker erhält direkt vom Oszillator ein Referenzsignal, das in der Phase dem an die Probe abgegebenen Strom entspricht. Der Verstärker mißt nur bei dieser Phasenlage, d.h. Rauschen, das der eigentlichen Meßspannung überlagert ist, kann nicht die Messung verfälschen. Am Ausgang des Lock-in-Verstärkers liegt eine Gleichspannung an, die proportional ist zum in-Phase-Anteil der gemessenen Wechselspannungs-Amplitude. Die Ausgangsspannung wird von einem handelsüblichen Digitalmultimeter registriert.

Der Bediener muß nicht bei jeder Messung die Stromstärke bestimmen, was die Meßgeschwindigkeit erhöht. Einzige Meßgröße ist die abgegriffene Spannung, die daher direkt ein Maß für den spezifischen elektrischen Widerstand ist.

2.1. Elektroden-Anordnung und Geometriefaktor

Die 4 Meß-Elektroden sind auf einer Linie mit gleichen Abständen zueinander parallel zur Bohrkernachse auf dessen Mantelfläche angeordnet. Für diese 'Miniatur-WENNER'-Anordnung berechnet sich ein "scheinbarer" spezifischer elektrischer Widerstand ρ_s nach der folgenden Formel:

$$\rho_s = \frac{U}{I} * K * f \quad [1]$$

mit : U = Spannung [V]

I = Strom [A]

K = Geometriefaktor = $2 * \pi * a$

$\pi = 3.14..$

a = Abstand zweier benachbarter Elektroden = 2 cm

f = Korrekturfaktor

Der scheinbare spezifische Widerstand entspricht dem realen spezifischen Widerstand für den Fall, daß der zu messende Untergrund einem homogenen Halbraum entspricht. Der Bohrkern kann mit hinreichender Genauigkeit als Halbraum angesehen werden ($f=1$), wie aus eigenen Testmessungen an Eichkernen und theoretischen Überlegungen (WEIDELT, 1989) folgt. Einen Vergleich gemessener und berechneter Geometriefaktoren zeigt Abb. 2.

3. Präparation der Bohrkerne und Durchführung einer Messung

Die Bohrkerne wurden über Nacht (ca. 24 Stunden) in ein Bad aus Leitungswasser eingelegt. Durch die feuchte Bohrkernoberfläche wird die elektrische Ankopplung verbessert. Oberflächennahe Risse füllen sich mit Wasser, so werden ähnliche Bedingungen wie im mit Bohrspülung gefüllten Bohrloch eingestellt. Der Kern wird auf zwei parallelen Rollen gelagert, die eine Rotation des Kerns um seine z-Achse ermöglichen. Mit der in Abschnitt 2.1. beschriebenen Elektrodenanordnung werden 12 Messungen, im Azimutabstand von 30° , durchgeführt und hieraus der arithmetische Mittelwert des Widerstandes bestimmt und zusammen mit dem Variationsbereich vom größten zum kleinsten gemessenen Widerstand abgespeichert.

Im Interesse einer umfangreichen, quasi-kontinuierlichen Datenaufnahme wurde bewußt unter nicht exakt definierten elektrochemischen Randbedingungen (also nur einfaches Einlegen in Leitungswasser) gemessen. Ergebnisse von LODEMANN et al. (1990) zeigen, daß die in-situ Fluide, erhalten aus Zuflußttests, im wesentlichen CaCl und NaCl- Wasser mit Konzentrationen bis zu 100 g/l sind. Es zeigt sich ein Trend zu höheren Ca-Konzentrationen mit größeren Teufen.

4. Ergebnisse der Messungen im Feldlabor

Mit der zuerst angewandten Apparatur (Stromeinspeisung über die Stirnflächen des Kerns) konnten einige Proben aus Teufen bis 992 m vermessen werden. Die Ergebnisse sind bei RAUEN et al. (1988) dargestellt und werden hier nicht erläutert. Ergebnisse, die mit der 'Mini-WENNER' Anordnung erhalten wurden, sind in verschiedenen KTB-Reports veröffentlicht (KTB-Reports 88-6, 89-2, 89-4, 89-5 & 90-2). Eine kurze Zusammenfassung für die gesamte Vorbohrung findet sich bei BÜCKER et al. (1990) und RAUEN et al. (1990 b).

In der Abbildung 3 ist das quasi-kontinuierliche Log der Widerstände, gemessen an 1241 Bohrkernen, gezeigt. Die Mittelwerte liegen größtenteils zwischen 1000 Ω m und 10000 Ω m, wie in der Häufigkeitsverteilung der Mittelwerte (Abb. 4 oben) deutlich wird. Die Abbildung 4 zeigt auch, daß die Logarithmen der Widerstände in etwa normalverteilt sind (siehe WIENAND et al., 1989). Es ist keine deutliche Trennung der Meßwerte der beiden Hauptgesteinseinheiten, Metabasite und Gneise, zu sehen. Dementsprechend liegen die mittleren Widerstände auf ähnlichem Niveau (Gneise 4211 Ω m und Metabasite 4120 Ω m). Jedoch ist die Häufigkeitsverteilung der Metabasit-Widerstände etwas breiter gestreut als die der Gneis-Widerstände (Abb. 4, Mitte und unten).

Wie schon in der Abbildung 3 in der Länge der Variationsbalken sichtbar wird, ist die Verteilung der Widerstände an einzelnen Kernstücken sehr inhomogen. Die Variationsbreite vom größten zum kleinsten Meßwert umfaßt oft mehr als eine Dekade. Ein solches Beispiel zeigt die Abbildung 5, gemessen an einem Graphit-haltigen Kern aus der Zone um 1920 m Teufe mit teilweise stark erniedrigten Widerständen. In dieser graphithaltigen Zone konnten an einzelnen Proben Widerstände bis unter 10 Ω m gemessen werden.

Stark erniedrigte Widerstände sind im Zusammenhang mit Graphitvorkommen gemessen worden, so bei 1920 m und bei 3535 m Teufe. Aber auch Widerstandserniedrigungen ohne Graphitbeteiligung waren meßbar. Im Übergangsbereich von den Amphiboliten zu den Gneisen (Grenze bei 1610 m Teufe) ist eine graduelle Erhöhung der Leitfähigkeit zu sehen (Abb. 5). Diese Leitfähigkeitserhöhung kann durch die erhöhte Klüftigkeit des erbohrten Gesteins zu begründen sein (ausgedrückt in der Anzahl der makroskopisch sichtbaren Zahl der Klüfte pro Meter Kernmaterial, rechts in Abb. 6), so daß die Widerstandserniedrigung durch eine Zunahme der elektrolytischen Leitung verursacht sein dürfte.

Mit der beschriebenen 4-Punkt-Elektrodenanordnung konnten auch Messungen bezüglich der Anisotropie des spezifischen Widerstandes durchgeführt werden. Dazu wurden die Elektroden auf die oberen und unteren Stirnflächen von 9 ausgesuchten und zylinderförmig präparierten Kernen gedrückt und bei verschiedenen Orientierungen gegenüber der Feldlabor-Refe-

renzlinie gemessen. In der Abbildung 7 sind zwei repräsentative Messungen gezeigt. Die Amphibolitprobe erscheint optisch homogen und isotrop und zeigt keine meßbare Anisotropie des Widerstandes. Der Gneiskern weist dagegen eine Foliation auf, die mit etwa 45° bezüglich der z-Achse des Kerns einfällt. Hier konnte eine deutliche Anisotropie des Widerstandes bestimmt werden, mit einem Verhältnis vom maximalen zum minimalen Widerstand von etwa 3, was einem Anisotropiefaktor von $\sqrt{3} \approx 1.7$ entspricht. Diese hohe Anisotropie ist wahrscheinlich höher als die in-situ Anisotropie. Bei der Druckentlastung des Bohrkerns öffnen sich Mikrorisse bevorzugt parallel zur Foliation und füllen sich mit Wasser, was in Foliationsrichtung einen erniedrigten Widerstand hervorruft.

Eine umfassendere Untersuchung der Anisotropie wird in Zukunft möglich werden durch den Einsatz einer neuen Apparatur, mit deren Hilfe Ströme in radialer Richtung durch den Kern realisiert werden. Diese Apparatur wird den frequenzabhängigen, komplexen und richtungsabhängigen elektrischen Widerstand bestimmen, so daß auch neue Aussagen bezüglich der Leitungsmechanismen (Graphit/Fluid ?) möglich sein werden.

5. Zusammenfassung

Mit einer neu entwickelten 4-Punktelektroden-Apparatur konnte der elektrische Widerstand unter Oberflächenbedingungen quasikontinuierlich an Bohrkernen der KTB-Vorbohrung bestimmt werden. Der mittlere gemessene Widerstand im Teufenintervall von 1000 m bis 4000 m beträgt etwa 4000 Ωm . Der Widerstand hängt praktisch nicht von der Lithologie ab, obwohl die Widerstände der Metabasite etwas breiter streuen. Widerstandserniedrigungen treten in Zonen erhöhten Graphitvorkommens auf (bis $\approx 10 \Omega\text{m}$), aber auch in Bereichen erhöhter Klüftigkeit (bis $\approx 100 \Omega\text{m}$), so daß sowohl elektronische als auch elektrolytische Leitungsmechanismen sichtbar werden. Der Graphit ist an relativ geringmächtige Bereiche gebunden (z.B. um 1920 m), während erhöhte Klüftigkeit sich über mehrere Meter (z.B. um 1610 m) als erhöhte Leitfähigkeit bemerkbar macht. An einzelnen Gneisproben konnten Anisotropiefaktoren bis etwa 1.7 beobachtet werden.

6. Literaturverzeichnis

BÜCKER, C., HUENGES, E., LIPPMANN, E., RAUEN, A., STREIT, M., WIENAND, J. & SOFFEL, H.C. (1990): KTB pilot hole. Results obtained in the KTB Field-Laboratory. KTB-Report 90-8, Hannover.

HUENGES, E., BÜCKER, C., WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A. & LIPPMANN, E. (1989): Feldlaborbericht, Teufenbereich 1709 m bis 2500 m, KTB-Report 89-2, Hannover.

JENSEN, U., KARMANN, R. & MARTINEZ, M. (1990): Elektromagnetische Tiefensondierungen 1989 im Umfeld der Kontinentalen Tiefbohrung, KTB-Report 90-3, Hannover.

KOEFOED, O. (1979): Geosounding Principles, 1, Amsterdam.

LODEMANN, M., FRITZ, RAUERT, TRIMBORN, BEHR, HORN, REUTEL, TOPP, HEINSCHILD, KAMM, MERZ, WITTENBECHER (1990): Isotope geochemistry on fluids from open fractures (3000-4000 m) in the KTB VB, chemistry and stable isotopes of brines and fluid inclusions in fracture calcites; Posterbeitrag zum KTB-Kolloquium Gießen 1990, KTB-Report 90-4, S. 568, Hannover.

RAUEN, A., LIPPMANN, E., HUENGES, E., BÜCKER, C., WIENAND, J. & WOLTER, K.E. (1988): Feldlaborbericht, Teufenbereich 992 m bis 1530 m, KTB-Report 88-6, Hannover.

RAUEN, A., HUENGES, E., BÜCKER, C., WOLTER, K.E. & WIENAND, J. (1990 a): Feldlaborbericht, Teufenbereich 3500 m bis 4000.1 m, KTB-Report 90-2, Hannover.

RAUEN, A., LIPPMANN, E., HUENGES, E. & SOFFEL, H.C. (1990 b): Aufbau einer Apparatur zur Messung komplexer elektrischer Eigenschaften von KTB-Proben, erste Ergebnisse; Posterbeitrag zum KTB-Kolloquium Gießen 1990, KTB-Report 90-4, S. 462, Hannover.

UNTIEDT, J. (1986): Die elektrische Leitfähigkeit in der Erdkruste in den Zielgebieten Oberpfalz und Schwarzwald - Zusammenfassung der Ergebnisse der elektromagnetischen Voruntersuchungen. Protokoll über das 11. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", Lerbach, 1986.

WEIDELT, P. (1989): persönliche Mitteilungen. Institut für Geophysik und Meteorologie der Univ. Braunschweig.

WIENAND, J., RAUEN, A., HUENGES, E., BÜCKER, C. & WOLTER, K.E. (1989): Feldlaborbericht, Teufenbereich 3000 m bis 3500 m, KTB-Report 89-5, Hannover.

WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A., LIPPMANN, E., HUENGES, E. & BÜCKER, C. (1989): Feldlaborbericht, Teufenbereich 2500 m bis 3009 m, KTB-Report 89-4, Hannover.

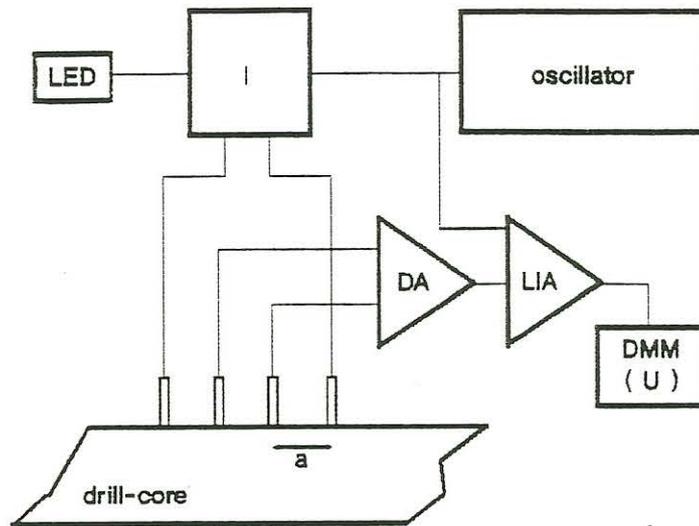


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Apparatur zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit an Bohrkernen. Der Bohrkern ist nicht gesägt, es können auch Kernbruchstücke vermessen werden.

Es bedeuten :

- LED = Leuchtdiodenanzeige bei Übersteuerung.
- I = geregelte Wechselstromquelle mit konstanter Amplitude.
- DA = Differential-Meßverstärker.
- LIA = Lock-in-Verstärker.
- DMM = Digitales Voltmeter (Multimeter).
- a = Abstand der Elektroden in WENNER-Konfiguration (hier : 2 cm).

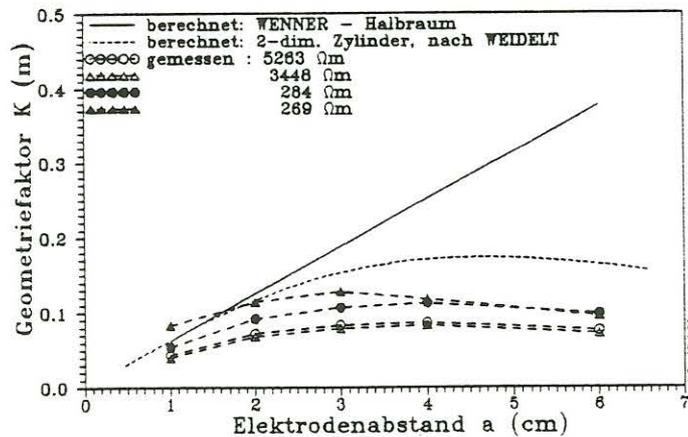


Abb. 2.: Geometriefaktor K in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand a (siehe Gl. [1]). Die durchgezogene Linie stellt K der WENNER-Anordnung dar ($K=2 \cdot \pi \cdot a$). Die unterbrochene Linie wurde von WEIDELT (1989) für einen Probendurchmesser von 10 cm berechnet. Die Punkte wurden an einem Plexiglas-Zylinder ($\phi=10$ cm), gefüllt mit verschiedenen Elektrolyten bekannter Leitfähigkeit bestimmt. Für Elektrodenabstände bis 2 cm sind die drei Geometriefaktoren in guter Übereinstimmung.

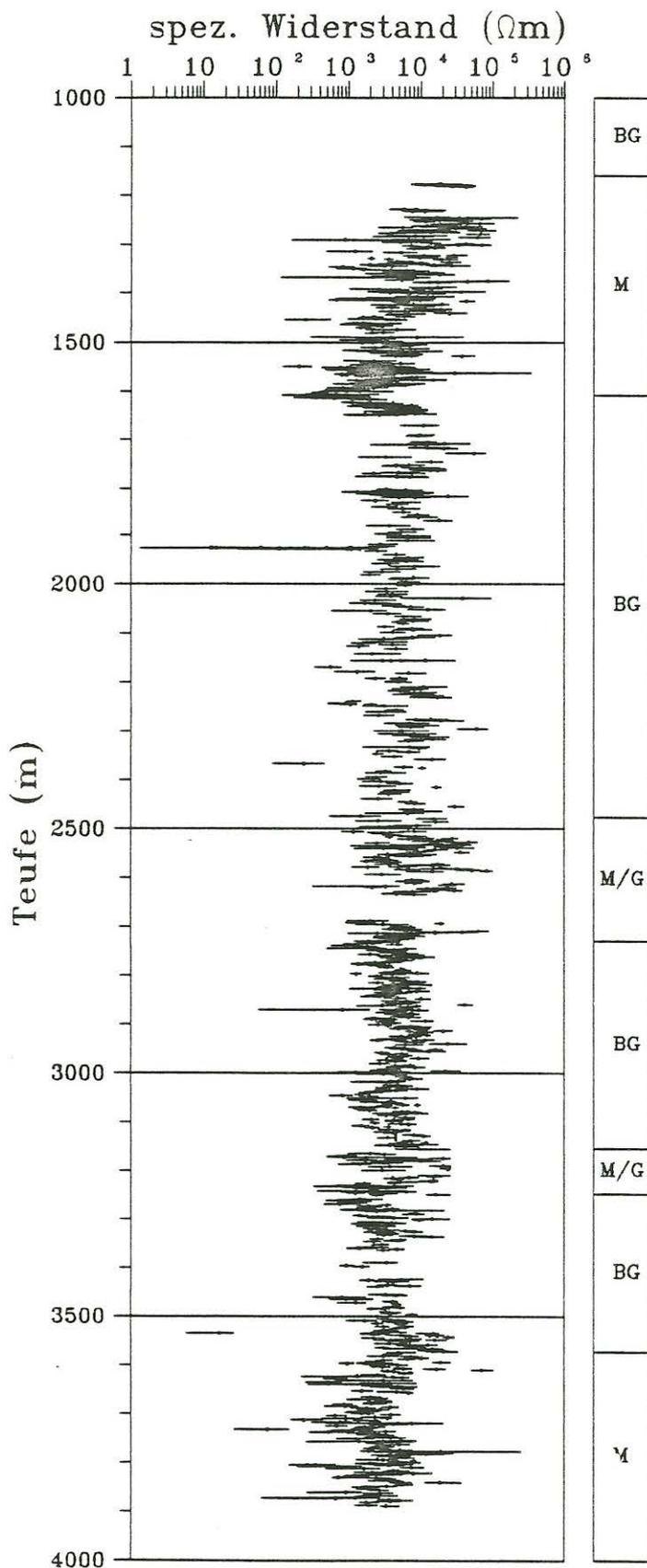


Abb. 3.: Teufenlog des spezifischen elektrischen Widerstandes, gemessen an Bohrkernen der KTB-Vorbohrung bei 150 Hz Meßfrequenz. Eingezeichnet ist das arithmetische Mittel aus 12 Einzelmessungen an verschiedenen Stellen der Bohrkernmantelfläche, zusammen mit der Variation vom größten zum kleinsten Meßwert. Rechts stark vereinfachtes lithologisches Profil (M=Metabasite, BG=Biotitgneise, M/G=Wechselagerung von Metabasiten und Gneisen).

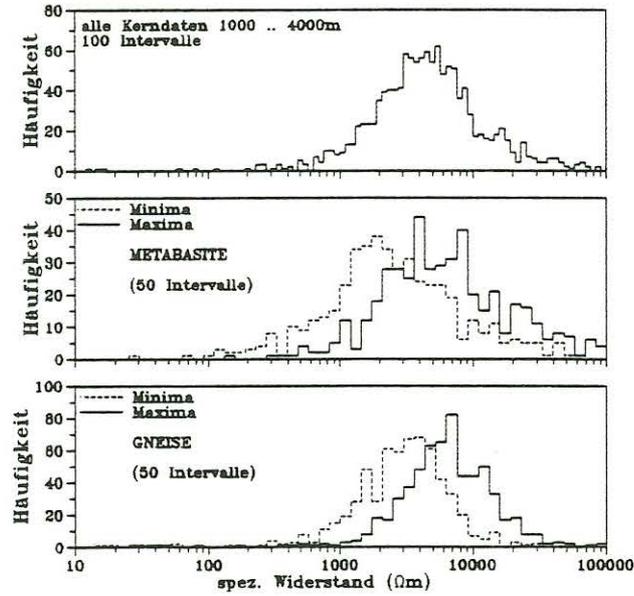


Abb. 4.: Oben: Häufigkeits-Verteilung der Mittelwerte aller 1241 Kernwiderstände. Das Widerstandsintervall von 10 Ωm bis $10^5 \Omega m$ wurde logarithmisch in 100 Intervalle geteilt. Mitte: kleinste und größte Widerstände aus Metabasiten (1160-1609 m und 3574-4000 m). Unten: kleinste und größte Widerstände aus Gneis-Bereichen (1609-2477/2730-3175/3247-3574 m).

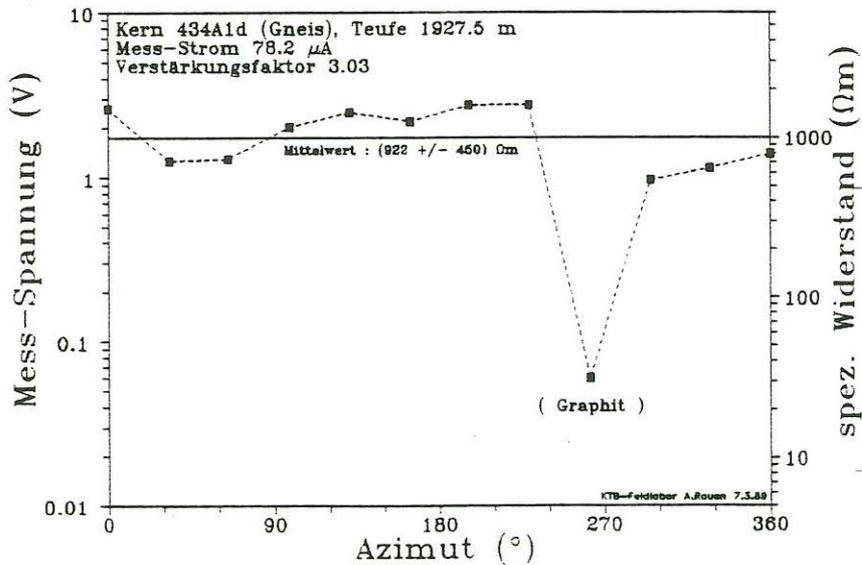


Abb. 5.: Beispiel einer Meßserie, die mit der in Abschnitt 2 beschriebenen Apparatur aufgenommen wurde. Links ist die Ausgangsspannung des Lock-in-Verstärkers in Abhängigkeit vom Meß-Azimut (bzgl. Feldlabor-Referenzlinie) dargestellt und rechts der nach Gleichung [1] berechnete (scheinbare) spezifische Widerstand. Das Minimum von ca. 30 Ωm wurde in der Nähe eines Graphit-belegten Risses (einige mm mächtig) gemessen.

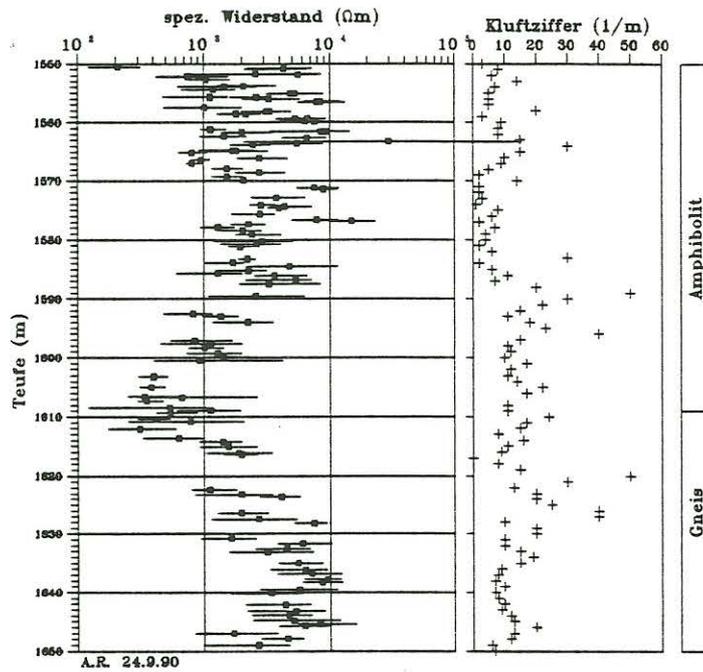


Abb. 6.: Log des spezifischen elektrischen Widerstandes im Übergangsbereich vom Amphibolit zum Gneis. Rechts vereinfachtes lithologisches Profil, in der Mitte die Klüftigkeitsziffer (= Anzahl der makroskopisch am Kern sichtbaren Klüfte pro Meter).

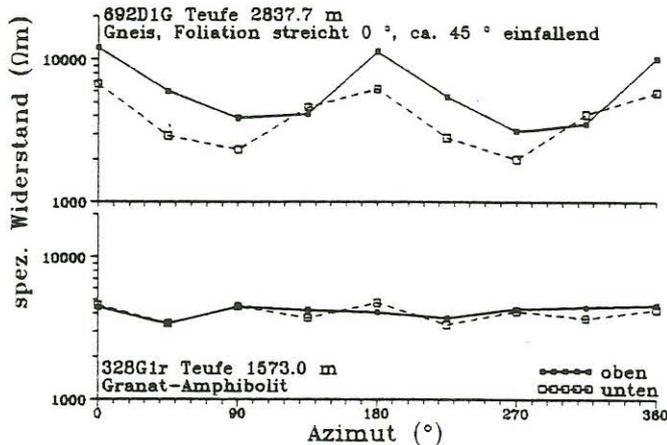


Abb. 7.: Messungen der Anisotropie des Widerstandes. Die lineare 4-Punkt-Elektrodenanordnung nach Abschnitt 2.1 wurde auf die beiden Stirnflächen (oben und unten) von zylinderförmig präparierten Bohrkernen gedrückt und der Winkel der Elektroden bezüglich der Feldlabor-Referenz variiert. Unten: Optisch homogener Amphibolit, ohne Foliation. Oben: Gneis mit einer makroskopisch sichtbaren Foliation (Streichen 0°). Die Richtung der Elektrodenanordnung mit minimalem Widerstand steht senkrecht zum Streichen der Foliation, nicht parallel zu ihr (!). Dies wird erklärt durch das 'Anisotropie-Paradoxon' der elektrischen Leitfähigkeit (siehe KOEFOED, 1979).