

# Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - Vergleich von Labor- und Bohrlochmessungen

H. Winter (Windischeschenbach)<sup>1</sup>

## Einführung

Die Kontinentale Tiefbohrung befindet sich in unmittelbarer Nähe von Leitfähigkeitsanomalien. Während der Vorerkundungsphase wurden oberflächennahe Zonen hoher elektrischer Leitfähigkeit und eine ausgedehnte Eigenpotentialanomalie gefunden (Haak et al., 1991). Audiomagnetotellurische Messungen deuten auf steilstehende Strukturen mit ausgeprägter Richtungsabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit hin (Anisotropie in den Daten), die NW-SE streichen und mindestens bis in 5 km Tiefe reichen (Eisel, 1994). In größeren Tiefen wurde mit dem LOTEM-Verfahren auf einem W-E-Profil ein regionaler guter elektrischer Leiter gefunden, dessen obere Grenze bei etwa 10 km Tiefe liegt (Osman et al., 1994). Mit Magnetotellurik und erdmagnetischer Tiefensondierung wurde auf einem etwa 20 km östlich der KTB gelegenen N-S-Profil ebenfalls ein guter elektrischer Leiter in 10 km Tiefe gefunden. Diese Resultate schließen an ein weltweit beobachtetes Phänomen an: Gute elektrische Leiter findet man nicht nur in Deutschland, sondern existieren unter vielen Kontinenten in 10 km Tiefe! (z.B. ERCEUGT, 1992; Jones, 1992; Hjelt, 1991) Der KTB fällt hier eine Schlüsselrolle zu, da ihre Zieltiefe gerade in diesem Teufenbereich liegt. Als Ursache der elektrischen Leiter werden Fluide einerseits und Graphite bzw. Sulfide andererseits diskutiert (z.B. Nesbitt, 1993; Haak and Hutton, 1986).

Die Kontinentale Tiefbohrung hat mittlerweile eine Teufe von rund 9000 m erreicht. Welche Erkenntnisse lassen sich bereits heute zu den verschiedenen Krustenabschnitten ableiten?

## Beobachtungen aus den KTB Bohrungen VB und HB

### 1. Messungen an Bohrkernen der KTB Vor- und Hauptbohrung (Bild 1)

Das Profil der elektrischen Leitfähigkeitsmessungen an Kernen der Vorbohrung (VB, 0-4000 m) zeigt, daß der Gesteinswiderstand im wesentlichen von der Lithologie unabhängig ist (Rauen, 1991). Im Gegensatz dazu folgt das Profil der Dichte der Lithologie, erkennbar an den Mittelwerten: Gneis  $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  bzw. Amphibolit  $2,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Der elektrische Widerstand gruppiert sich um einen Mittelwert aller Messungen von  $3600 \Omega\cdot\text{m}$ . Zwei Anomalien fallen deutlich auf. Zum einen der Teufenbereich von 1600 bis 1700 m mit Widerständen zwischen 300 und  $1000 \Omega\cdot\text{m}$ . Hier durchteufte die Vorbohrung eine mächtige Kataklysezone. Zum zweiten die Abschnitte bei 1900 m und 3550 m mit minimalen Widerständen bis zu  $1 \Omega\cdot\text{m}$ . Diese Widerstandserniedrigung wird von Graphit auf Störungszonen verursacht. Mit der Teufe ist ein deutlicher Trend zu niedrigeren Widerständen zu erkennen: Oberflächennah werden im Mittel  $10000 \Omega\cdot\text{m}$  gemessen, bei dem Kern aus 8079 m Tiefe dagegen nur noch  $300 \Omega\cdot\text{m}$ . Hier wirken sich künstlich entstandene Mikrorisse aus, die infolge zunehmender Druckentlastung während des Transports aus immer größerer Tiefe entstehen. Die Messung erfolgt in Leitungswasser, das in diese geöffneten Risse eindringt und zu dem niedrigeren Widerstand führt.

---

<sup>1</sup> Anschrift des Autors: KTB Feldlabor, Postfach 67, 92667 Windischeschenbach  
E-Mail: winter@ktb.bgr.d400.de

## 2. Bohrlochmessungen und Feldlabordaten der KTB Hauptbohrung (Bild 2)

Bei dem Latero Log Deep (LLD) in der Hauptbohrung ist der umgekehrte Trend im Vergleich zu den Kernmessungen zu sehen: Eine Zunahme des elektrischen Widerstands mit der Tiefe. Auch hier ist er unabhängig von den lithologischen GroÙeinheiten Gneis bzw. Amphibolit. Die kräftigen, z.T. über mehrere Dekaden reichenden Anomalien mit niedrigen Widerständen um  $10 \Omega \cdot m$  haben mehrere Ursachen: Offene, fluidgefüllte Klüfte bzw. graphitisierte Störungszonen. Aus dem Widerstandsbetrag des LLD-Logs allein ist eine Unterscheidung von Fluiden und Graphiten bzw. Sulfiden jedoch noch nicht möglich. Zur Identifikation werden hier Feldlabordaten und Bohrlochmessungen nebeneinander gestellt und gemeinsam interpretiert. Ein anderer methodischer Weg, aus der Kombination von verschiedenen Bohrlochmessungen diese Differenzierung zu erhalten, wird von Kück (1994) beschrieben.

Aus der Analyse des Bohrkleins im Feldlabor erhält man den Graphit- und Sulfidgehalt, beides typische Vertreter von elektronisch leitenden Mineralen. Der Schwefelgehalt wird aus der RFA in % sowie Graphit und Erze in einer semi-quantitativen Skala von 1 bis 4 aus Dünnschliffanalysen bestimmt.

Durch wiederholte Spülungsspiegelabsenkungen (Absenktests) wurden Zuflüsse in die Bohrung stimuliert. Aus dem anschließend gemessenen Log der Spülungsleitfähigkeit wird ein äquivalenter NaCl-Gehalt der Spülung berechnet. Eine Anomalie in diesem Log zu höheren Werten wird als salinärer Zufluß gedeutet. Diese Kombination aus Absenkttest und Messung der Spülungsleitfähigkeit wurde bis in eine Teufe von 6000 m durchgeführt. Im Abschnitt oberhalb etwa 2600 m konnten keine salinaren Zuflüsse gefunden werden. Süßwasserzuflüsse werden allerdings von dieser Methode nicht erfaßt. Im Abschnitt von 2600 m bis 6000 m konnten diskrete salinare Zuflüsse erkannt werden. Die gleichzeitigen Pegelschwankungen in der Vorbohrung während der hydraulischen Tests in der Hauptbohrung sind Hinweis auf ein lateral ausgedehntes Fluidsystem (Kessels und Kück, 1993). Unterhalb 6000 m erfolgten die Messungen der Spülungsleitfähigkeit unter hydrostatischen Bedingungen ohne vorherige Absenkung. Der hohe Peak bei 7000 m wird durch einen starken überhydrostatischen Fluidzufluß verursacht. Ein weiterer Zufluß wurde mit der Gas- und Spülungsanalytik während des Bohrens in der Teufe 8650 m entdeckt.

### Zur Frage des Leitfähigkeitsmechanismus (Bilder 2 und 3)

Aus beiden Datensätzen, Kernmessungen und Bohrlochmessungen, geht hervor, daß die elektrische Leitfähigkeit lithologieunabhängig und damit auch unabhängig vom gesteinsbildenden Mineralbestand ist. Vielmehr sind es die Strukturen innerhalb der Matrix, die die elektrische Leitfähigkeit kontrollieren. Dafür kommen Graphite und Erzminerale als elektronische Leiter bzw. Fluide als elektrolytische Leiter in Frage, die die Strukturen ausfüllen können. In der Bohrung wurden beide an definierten Stellen gefunden. In Bild 3 ist ihre Vergesellschaftung auf engem Raum dokumentiert. Eine offene Kluft aus dem Kern H031 (7001 m) ist von Salbändern aus Graphit (schwarz) und Pyrit (glänzend) umgeben. Dieses Resultat deckt sich mit der Modellvorstellung zur Erklärung der Eigenpotentialanomalie, die das gemeinsam Vorhandensein von Graphit und Fluiden fordert (Stoll et al., 1994). Es stellt sich die Frage, inwieweit diese spezifiziert und zwischen beiden unterschieden werden kann. Anhand der gemeinsamen Auftragung der Einzelergebnisse können Korrelationen zwischen niedrigen Widerständen im LLD-Log und sowohl hohem Graphit- bzw. Sulfidgehalt einerseits sowie Fluiden andererseits erkannt werden. Immer dann, wenn im LLD-Log ein Minimum mit hohem Graphit- oder Sulfidgehalt im Bohrklein korreliert, wird die Teufenstrecke des LLD-Logs, die kleinere Werte als  $3600 \Omega \cdot m$  aufweist, als durch elektronische Leitung verursacht angesehen. Nach gleichem Schema werden die Teufenstrecken von LLD-Minima, die mit Fluidanzeigern korrelieren, der elektrolytischen Leitung zugeordnet. In Bild 2 werden die Teufenabschnitte im LLD-Log jeweils elektronischen Leitern (schwarz) bzw. elektrolytischen Leitern (grau) zugeordnet. Aus der Anzahl der Teufenmeter an der gesamten Meßstrecke erfolgt eine Abschätzung der Anteile beider Mechanismen (Tabelle 1).

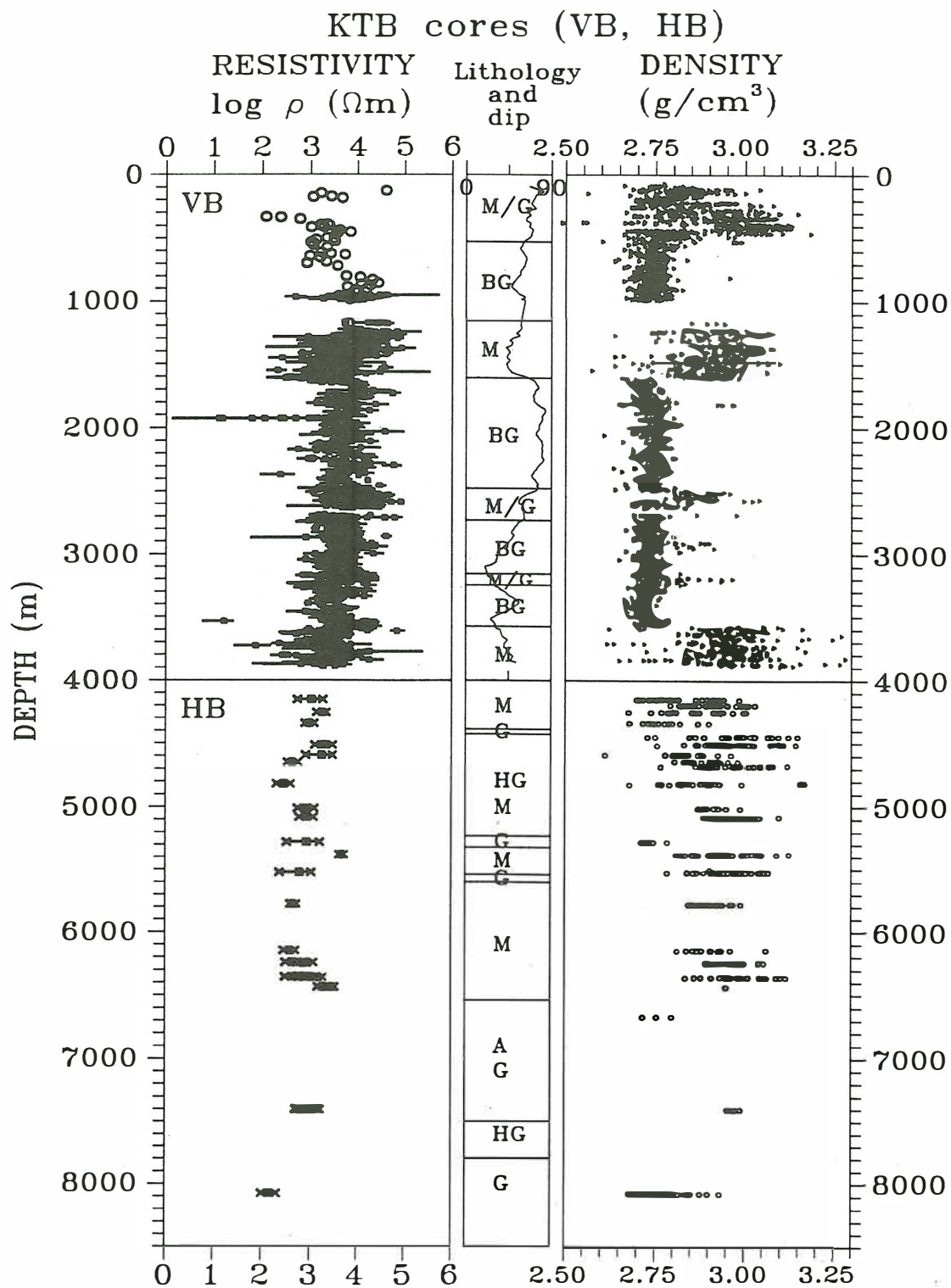


Bild 1: Messungen des spezifischen elektrischen Widerstandes (links) und der Dichte (rechts) an Bohrkernen aus Vor- und Hauptbohrung im KTB-Feldlabor, jeweils unter Normalbedingungen.

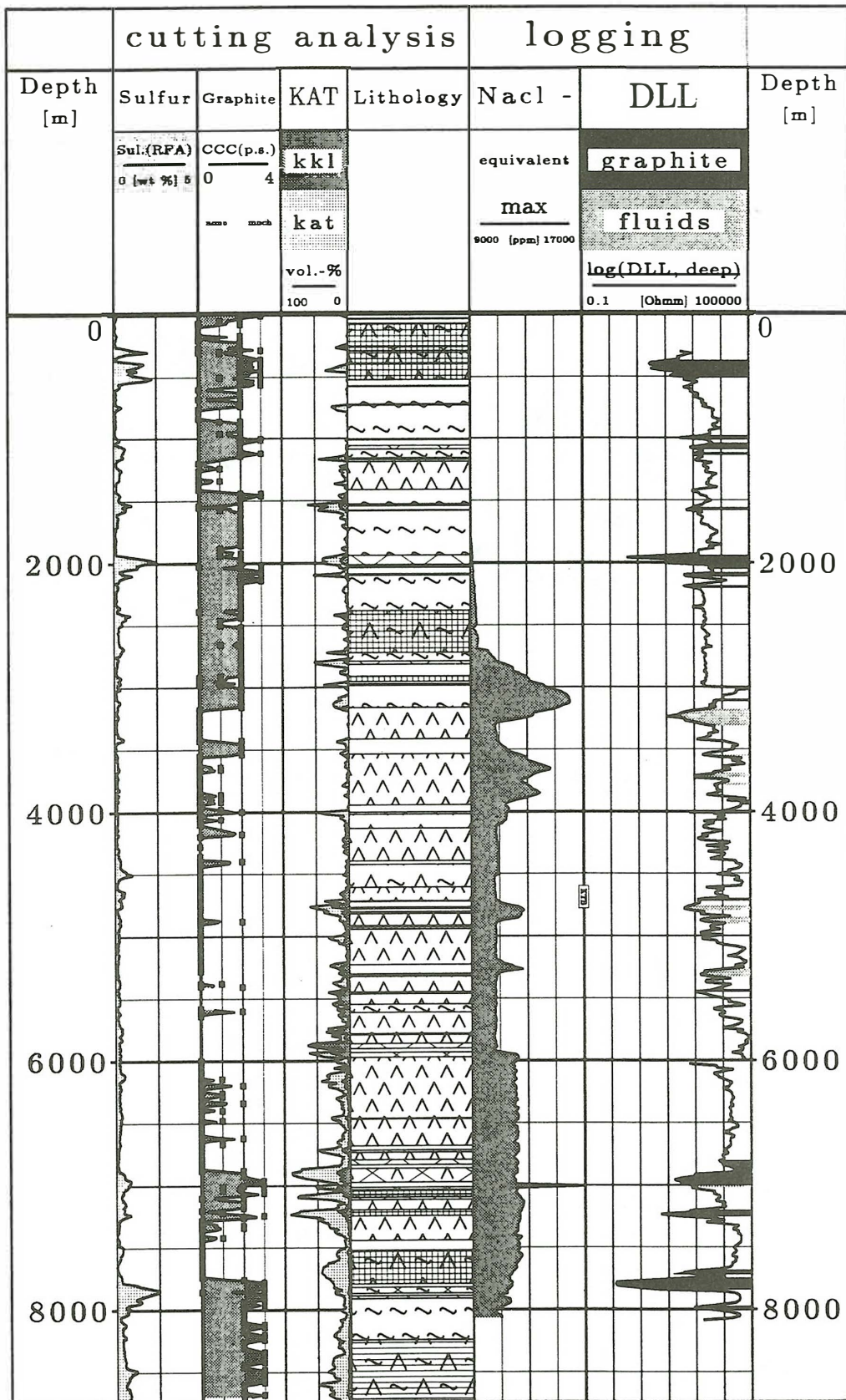


Bild 2: Zusammenstellung von Feldlaborergebnissen und Bohrlochmessungen der Hauptbohrung. Links Bohrkleinanalysen: Schwefelgehalt, Graphit- und Kataklasteanteil, Lithologisches Profil. Rechts Bohrlochmessungen: NaCl-Äquivalent der Spülungsleitfähigkeit, LLD-Log. Die Anomalien im LLD sind entsprechend den zugeordneten Leitfähigkeitsmechanismen markiert: elektronisch (schwarz) und elektrolytisch (grau).



Bild 3: Offene Kluft aus dem Bohrkern H031 (7011 m). Die Kluft ist mit Quarzkristallen belegt und von Graphit- (schwarz) sowie Pyritbändern (glänzend) umgeben. Bildbreite ca. 1 cm.

**Tabelle 1:** Beeinflussung der LLD-Bohrlochmessungen (HB) durch elektrische Leiter. Abschätzung der Teufenstrecken durch gemeinsame Auswertung von Bohrlochmessung und Bohrkleinanalyse im LLD-Meßintervall 290-8100 m.

	Teufenstrecke	Anteil
"Normale" Krustengesteine	6379 m	82 %
Elektronische Leiter (Graphit, Erze)	955 m	12 %
Freie Fluide	460 m	6 %

### Analyse von Verteilungsfunktionen (Bilder 4, 5 und 6)

Die Logarithmen aller gemessenen spezifischen Widerstände werden in einem normierten Häufigkeitsdiagramm aufgetragen. In Bild 4 werden die Kernmessungen der Vorbohrung mit den LLD-Meßwerten verglichen. Beide sind angenähert log-normalverteilt und zeigen sogar einen gleichen geometrischen Mittelwert von etwa  $3600 \Omega \cdot m$ . Trotz der unterschiedlichen Methoden und Dimensionen - Kernmessung  $\approx 150$  Hz und Zentimeter sowie LLD  $\approx 35$  Hz und Eindringtiefen von einigen Metern - sind die Resultate vergleichbar. Offenbar wird die elektrische Leitfähigkeit in beiden Fällen von gleichartigen Strukturen kontrolliert. Bei den Kernmessungen sind die niedrigeren Widerstände unterrepräsentiert, da die meisten Stücke mit Klüften oder Graphitbelägen zerbrochen sind und für die Messung ausscheiden. In Bild 5 werden die LLD-Messungen von Vorbohrung (60-3986 m) und Hauptbohrung (300-8100 m) miteinander verglichen. Auch hier ist eine Übereinstimmung im Mittelwert festzustellen, die Messung in der Hauptbohrung ist aber nicht mehr allein durch eine einzelne Normalverteilung zu beschreiben. Ein weiteres Nebenmaximum bei etwa  $40000 \Omega \cdot m$  hebt sich hervor. Betrachtet man einzelne Abschnitte der LLD-Logs der Hauptbohrung, dann bestätigt sich der Trend zu höheren Widerständen mit zunehmender Tiefe (vgl. Bild 2). In Bild 6 werden die LLD-Meßabschnitte 300 - 3000 m und 6000 - 7200 m der Hauptbohrung miteinander verglichen. Beide Strecken zeigen ein Hauptmaximum mit mehreren Nebenmaxima, die gegeneinander deutlich verschoben sind.

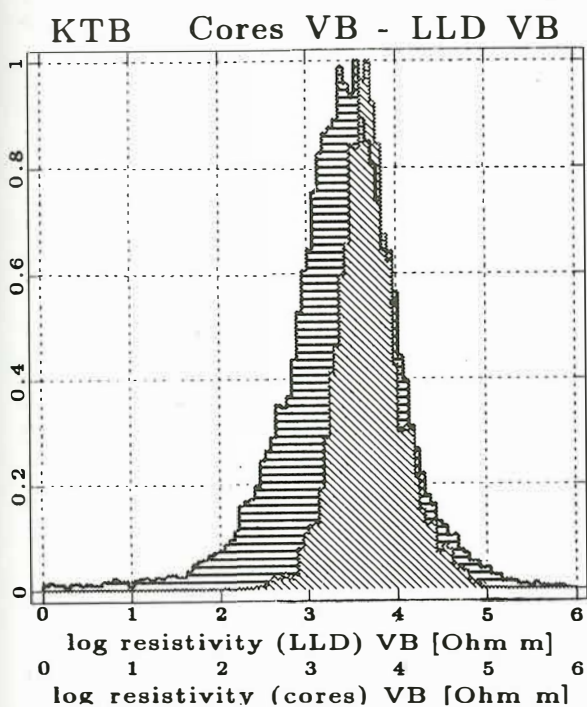


Bild 4: Normierte Häufigkeit der Logarithmen des elektrischen Widerstandes: Kerne VB (schräg schraffiert) und LLD VB 60-3985 m (horizontal schraffiert).

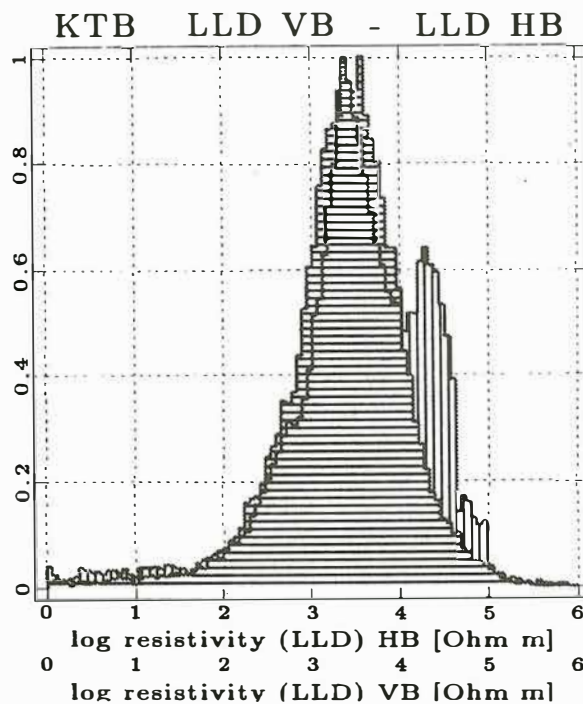


Bild 5: Normierte Häufigkeit der Logarithmen des elektrischen Widerstandes: LLD VB 60-3986m (horizontal schraffiert) und LLD HB 290-8100 m (vertikal schraffiert).

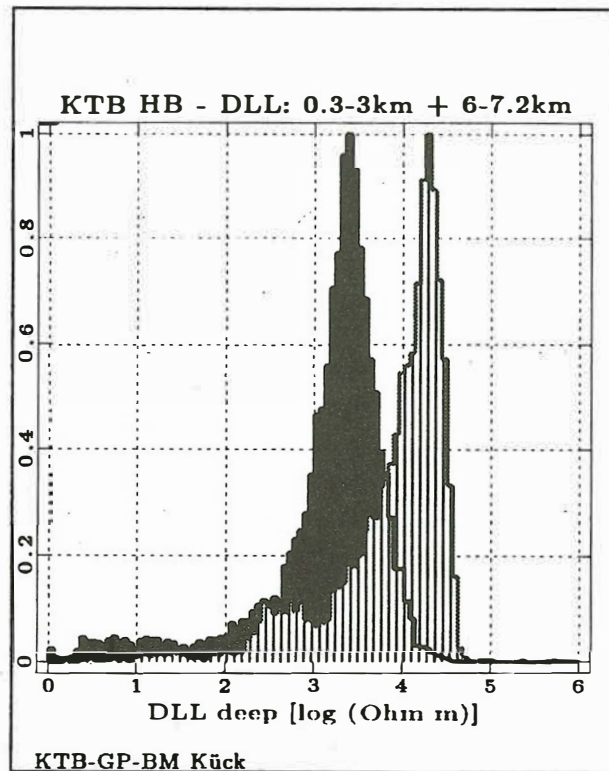


Bild 6: Normierte Häufigkeit der Logarithmen des elektrischen Widerstandes: LLD HB Abschnitt 0,3-3 km (schwarz) und LLD HB Abschnitt 6-7,2 km (vertikal schraffiert).

### Ausblick

Die präsentierten Resultate sind erste Schritte zur Klärung prinzipieller Fragen, die sich um das Phänomen der elektrischen Leiter in der kristallinen Kruste gruppieren.

Einige Ergebnisse zeichnen sich jetzt schon ab. Die deutlichen Minima der LLD-Messungen korrelieren mit diskreten elektrischen Leitern, die an begrenzte Strukturen (Graphitbahnen und Erze sowie Fluide in Klüften) gebunden sind. In diesen Strukturen mit einem nur kleinen Teufenanteil findet offenbar der größte Teil der Leitung von elektrischen Strömen in der kristallinen Kruste statt. Dagegen scheinen die "normalen" Krustengesteine nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, obwohl sie das größte Volumen umfassen. Die großräumige Verbundenheit dieser leitfähigen Strukturen ist eine gemeinsame Grundlage jener Modelle, die sowohl die AMT-Daten als auch die Eigenpotentialanomalie am besten erklären können (Eisel, 1994; Stoll et al., 1994).

Wie aus den Kernmessungen ersichtlich ist, wird der mittlere Widerstand der KTB-Gesteine von feinen Strukturen, vor allem Mikroklüfte, kontrolliert. Eine höhere Rißdichte korreliert mit einem niedrigeren mittleren Widerstand. Die Bohrlochmessungen deuten durch ihren Trend zu höheren Widerständen mit der Tiefe (Abb. 2 und 6) auf abnehmende Mikroklüftigkeit in den Gesteinen hin, was aufgrund des zunehmenden lithostatischen Drucks durchaus plausibel erscheint. Dagegen sind makroskopische, offene Klüfte, auf denen Fluide zirkulieren können, in großer Tiefe nach wie vor vorhanden und deutlich meßbar. Die Ursachen der guten elektrischen Leiter in der kristallinen Kruste sind nach dem jetzigen Kenntnisstand sowohl in diesen fluidführenden Klüftstrukturen als auch in den Graphitbahnen zu suchen.

Die Anteile der prinzipiellen Leitfähigkeitsmechanismen in Tabelle 1 sind als ein erstes Startmodell zu verstehen. Methodisch gesehen sind die LLD-Messungen als in situ-Verfahren im Vorteil, da sie von den artifiziellen Einflüssen der Kernmessungen befreit sind. Durch Korrelation mit anderen Bohrlochmeßverfahren können die Anteile der Leitfähigkeitsmechanismen möglicherweise weiter verifiziert werden. Ein Beispiel hierzu findet sich bei Kück (1994). Ein weiterer Ansatz liegt in der Auswertung der Häufigkeitsverteilungen im Hinblick auf Abmessungen, Verteilung und Verbundenheit leitfähiger Strukturen.

#### Literatur- und Quellenangabe

Eisel, M. (1994). Interpretation of Magnetotelluric Measurements in the Vicinity of the KTB. In: KTB-Report 94-1. Herausg.: Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (Red.: R. Emmermann und P. Giese), im Druck.

ERCEUGT group (1992). An electrical resistivity transect from the Alps to the Baltic Sea (Central Segment of the EGT). *Tectonophysics*, 207, 123-139.

Haak, V., Stoll, J. and Winter, H. (1991): Why is the electrical resistivity around the KTB hole so low? *Phys. Earth Planet. Interior*, 66, 12-23.

Haak, V. and Hutton, V.R.S. (1986): Electrical resistivity in the lower crust. In: Dawson, Carswell, Hall and Wedepohl (editors), *The nature of the continental lower crust*. Geol. Soc. London Spec. Publ., 24, 35-49

Hjelt, S.-E. (1991): Geoelectric studies and conductivity structures of the eastern and northern parts of the Baltic Shield. *Tectonophysics*, 189, 249-260.

Jones, A. G. (1992): Electrical conductivity in the continental lower crust. In: *The continental lower crust*, Elsevier, New York, 81-143.

Kessels, W. und J. Kück (1993): Hydraulic communication in crystalline rocks between the two boreholes of the Continental Deep Drilling Program in Germany. KTB-Report 93-1, 337-365.

Kück, J. (1994): Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - In-Situ-Messungen. Protokoll 15. Kolloquium "Elektromagnetische Tiefenforschung", dieser Band.

Nesbitt, B. (1993): Electrical resistivities of crustal fluids. *Journ. Geophys. Research*, 98, 4301-4310.

Osman, A. Hördt, A., Tezkan, B., Strack, K.-M. (1994): Der Krustenleiter unter der Oberpfalz: Ein Beitrag von der LOTEM- Methode. Vortrag auf der 54. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Münster.

Rauen, A. (1991): Untersuchungen des komplexen elektrischen Widerstandes, insbesondere dessen Anisotropie und Frequenzabhängigkeit, von Proben des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB). Dissertation. Universität München.

Stoll, J., Bigalke, J. and E. W. Grabner (1994): Electrochemical modelling of self-potential anomalies. Accepted by *Surveys in Geophysics*.