

Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - Labormessungen an einem Kern aus der Störungszone in 7012 m Tiefe

Armin Rauen, KTB Feldlabor, Postfach 67, D-92667 Windischeschenbach.
e-mail: Rauen@ktb.bgr.d400.de

1. Einleitung

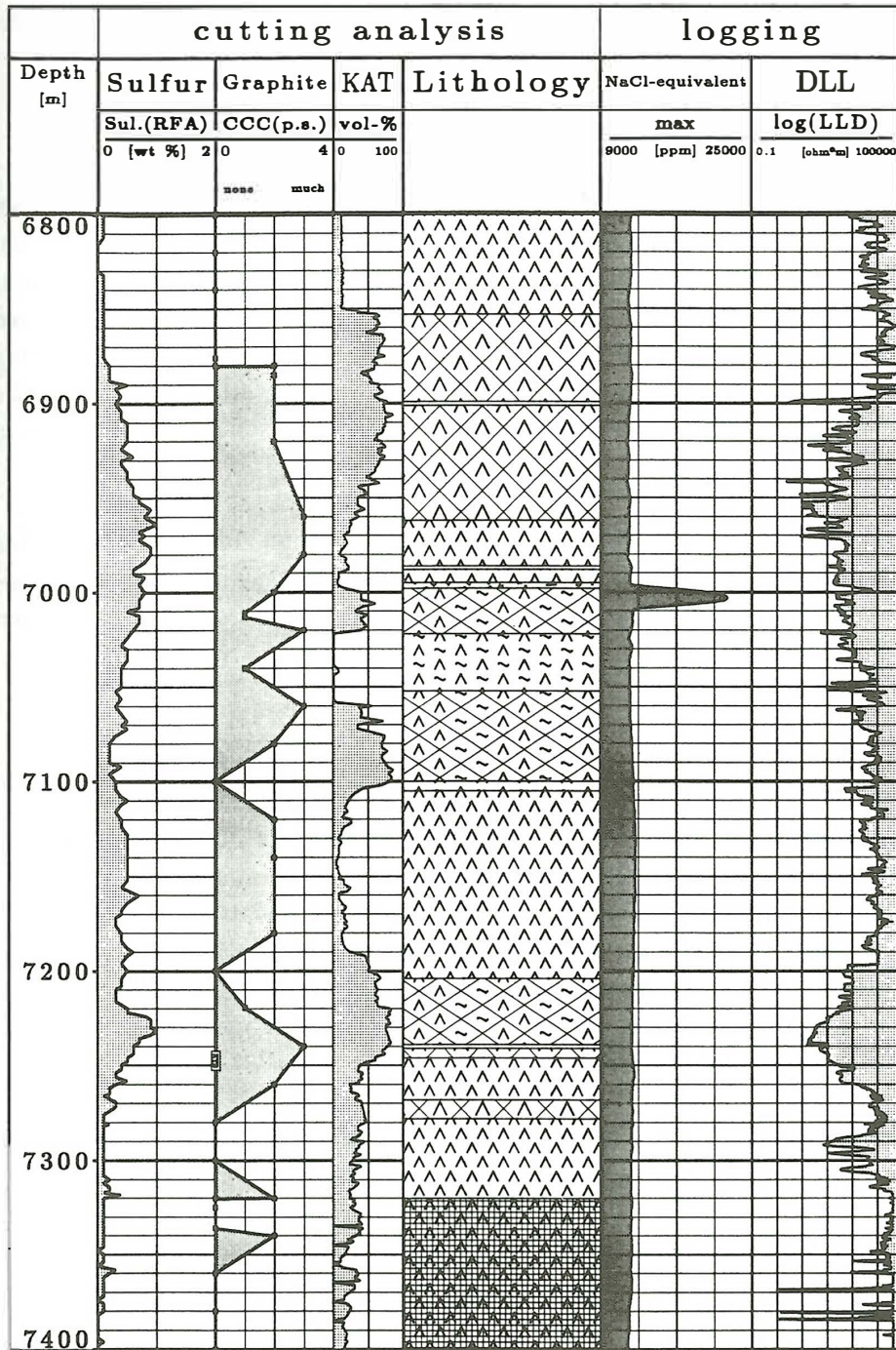
Die Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland (KTB) durchbohrte zwischen 6700 m und 7220 m ein ganzes Bündel von Störungszone (Duyster et al., 1993). Es konnte eine Anreicherung von sulfidischen Erzmineralen und von Graphit, ebenso wie ein hoher Anteil an Kataklyse nachgewiesen werden. Während des Bohrens wurde über die Messung des elektrischen Widerstandes der Spülflüssigkeit ein salinärer Zufluß bei 7004 m detektiert. Diese Beobachtungen sprechen für die Existenz von guten elektrischen Leitern in der Störungszone, die sowohl elektronischer, also metallischer, Natur sind (Erzminerale und Graphit), als auch elektrolytischer Natur (Kataklyse und fluide Phasen). Die Bohrlochmessung des Gesteinswiderstandes zeigt in einigen Teufenbereichen dann auch Widerstände bis $< 10 \Omega\text{m}$ an. Die angesprochenen Befunde sind in der Abbildung 1 zusammengefaßt.

Aus dieser Störungszone konnte Material in Form eines großkalibrigen Bohrkerns (H031, Durchmesser 23.5 cm, Teufe 7011-7013 m) gewonnen werden. Dieser Kern bietet die einmalige Möglichkeit, die elektrischen Leitfähigkeitsmechanismen direkt, im Labor, zu untersuchen. Der Kern besteht aus stellenweise stark kataklastischem Hornblendegneis mit einem 3-5 cm mächtigen, steilstehenden basischen Gang. An der Begrenzung dieser basischen Lage zum umgebenden Gneis ist eine bis zu mehreren mm mächtige graphitbelegte Störung mit Spiegelharnischen ausgebildet. An mehreren Stellen des Bohrkerns sind idiomorphe mm große Quarzkristalle in offenen Poren makroskopisch sichtbar.

2. Methoden

Ein Kleinbereichsprofil vom Hornblendegneis über die basische Lage wieder in den Hornblendegneis wurde mit 5 Proben (Durchmesser 25.4 mm) aus dem Bohrkern realisiert. An diesen 5 Minikernen wurden gesteinsphysikalische Untersuchungen und Analysen von Riß- und Erzmineraleinregelungen durchgeführt (Rauen et al., 1994).

Hier sollen nur die elektrischen Messungen vorgestellt werden. Das Frequenzspektrum der komplexen elektrischen Leitfähigkeit wurde von 0.8 Hz bis 120 kHz mit einer 4-Pol-Anordnung in einer Elektrolytzelle unter Normaldruck und Raumtemperatur registriert (Rauen, 1991). Im weiteren wird der Betrag der Leitfähigkeit und die Phasenverschiebung gegenüber dem Anregungssignal aus dem niederfrequenten Anteil des Spektrums (Mittelwert 1.9 Hz) betrachtet.



05.10.94 15:48 / BORNSCHEIN

Abb.1: Daten aus der Störungszone in der Hauptbohrung. Von links nach rechts: Schwefel als Anzeiger für sulfidische Erzminerale aus der RFA-Analyse von Bohrklein, Graphit (halbquantitative Skala von 0=nichts bis 4=viel), Kataklyse und Lithologie aus der Binokular-Analyse von Bohrklein, NaCl-Äquivalentkonzentration aus der Messung des elektrischen Widerstandes der Spülflüssigkeit, Gebirgs-widerstand aus der Bohrlochmessung Latero Log Deep (LLD, Schlumberger).

Der Ladungstransport im Gestein (Gesteinsleitfähigkeit σ_G) kann prinzipiell auf mehrere Arten erfolgen: über in der Porenflüssigkeit gelöste Ionen (Volumenleitfähigkeit σ_V), über Ladungsverschiebungen und -Polarisationen an internen Grenzflächen (Oberflächenleitfähigkeit σ_O) oder über die Erzminerale und Graphit in der Gesteinsmatrix (Matrixleitfähigkeit σ_M):

$$\sigma_G = \sigma_V + \sigma_O + \sigma_M$$

Die eigentliche Matrix aus silikatischen Mineralen ist in erster Näherung, zumindest bei Raumtemperatur, ein Isolator. Die Volumenleitfähigkeit kann mit folgendem, vereinfachten Verfahren getrennt von der Kombination aus Oberflächen- und Matrixleitfähigkeit bestimmt werden: Sättigt man den Porenraum mit einer Salzlösung, so stellt man genügend Ionen zur Verfügung, so daß der Elektrolyt im Porenvolumen den Hauptteil der elektrischen Leitung übernimmt. Ist dagegen der Porenraum mit destilliertem Wasser gesättigt, so stellen die Oberflächen- und die Matrixleitfähigkeit den Hauptanteil an der elektrischen Leitung (Schön, 1983, S.256 ff).

Zur Quantifizierung des Porenraums wurde die Porosität an den identischen Proben archimedisch gemessen. Der Gehalt an Erzmineralen und Graphit wurde durch mikroskopische Ansprache von Anschliffen aus der unmittelbaren Nachbarschaft der Proben bestimmt (genauer bei Rauen et al., 1994).

3. Ergebnisse

Die Abb. 2 zeigt Betrag und Phase der komplexen Leitfähigkeiten, die Porositäten und den Summen-Erzmineralegehalt (incl. Graphit). Deutlich ist eine Korrelation der Volumenleitfähigkeit mit der Porosität und eine Korrelation der Oberflächen/Matrixleitfähigkeit mit dem Erzgehalt zu sehen. Die Probe B aus dem basischen Gang zeigt die kleinste Volumenleitfähigkeit und die kleinste Porosität, aber die größte Oberflächen/Matrixleitfähigkeit und den höchsten Gehalt an Erzmineralen. Der Phasenwinkel beider Leitfähigkeiten zeigt einen ähnlichen Verlauf und korreliert mit dem Erzgehalt.

Druckabhängige Leitfähigkeitsmessungen zur in-situ-Simulation anhand der 5 betrachteten Proben ergeben folgendes (Abb. 3, Rauen et al., 1994): Mit steigendem Druck sinkt die gemessene Leitfähigkeit (normaler Druckeffekt) in den Proben A,C,D und E. Eine der Proben, nämlich die mit der größten Oberflächen/Matrixleitfähigkeit (Probe B), zeigt jedoch bei höheren Drucken einen anomalen Druckeffekt: mit dem Druck zunehmende Leitfähigkeiten.

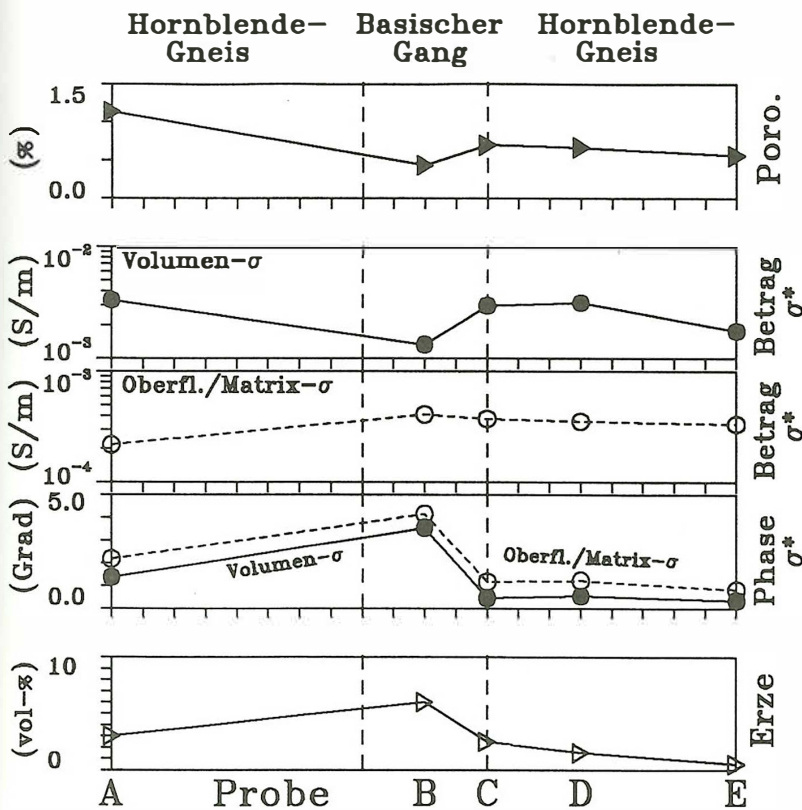


Abb. 2: Untersuchungen an 5 Proben (A bis E) aus einem Kleinbereichsprofil über einen basischen Gang aus dem Bohrkern H031 (Proben aus 7012.8 bis 7012.9 m Tiefe der Hauptbohrung). Von oben nach unten: Porosität (archimedisch unter Normaldruck), Volumenleitfähigkeit (gemessen nach Sättigung des Porenraums mit 0.1 molarer NaCl-Lösung), kombinierte Oberflächen/Matrixleitfähigkeit (gemessen nach Sättigung des Porenraums mit destilliertem Wasser), Phasenwinkel der Leitfähigkeiten gegenüber dem Anregungssignal (bei 1.9 Hz Frequenz unter Normaldruck), Summengehalt an Erzmineralen (Ilmenit, Pyrrhotin, Pyrit, Titanit) und Graphit aus mikroskopischen Anschliffuntersuchungen.

4. Diskussion

Volumenleitfähigkeit: Die größte Volumenleitfähigkeit von $3.3 \cdot 10^{-3}$ S/m (entsprechend 300 Ωm) wurde in der Probe A mit der größten Porosität von 1.2 % gemessen. Die positive Korrelation zwischen Porosität und Gesteinsleitfähigkeit (Abb. 2) ist nach dem Archie-Gesetz zu erwarten (Schön, 1983, S. 237 ff).

Die gemessene Volumenleitfähigkeit ist allerdings auf in-situ-Verhältnisse nur bedingt zu übertragen: Einerseits ist die in den Proben angetroffene Porosität zum Teil artifiziell (Begründung folgt) und damit auch die gemessene Volumenleitfähigkeit, andererseits sind die in-situ offenen Poren, die in Form von mm großen idiomorphen Quarz-Kristallen im Bohrkern sichtbar sind, in den Minikernen des Profils unterrepräsentiert. Aufgrund von präparationstechnischen Schwierigkeiten konnten diese echten Porositäten nicht beprobt werden.

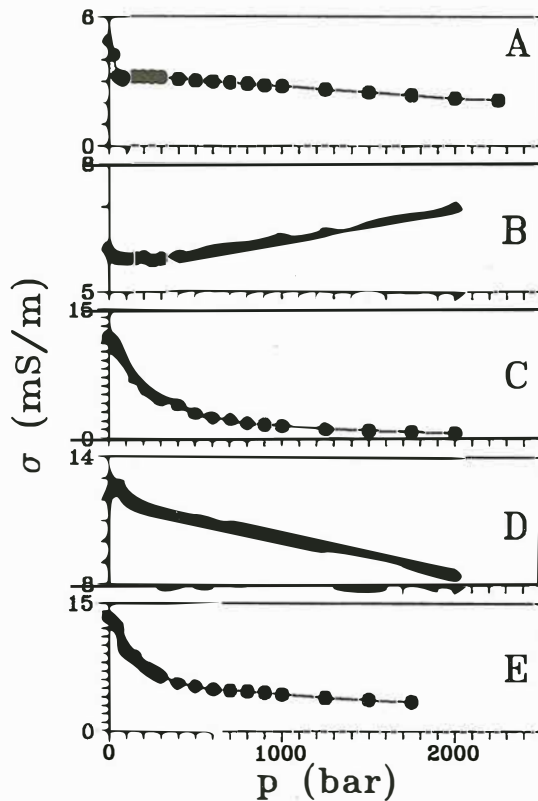


Abb. 3: Elektrische Leitfähigkeit als Funktion des hydrostatischen Umgebungsdrucks, gemessen an den 5 Proben A-E (siehe Abb. 2). Die Proben waren mit 1 molarer NaCl-Lösung gesättigt. Messungen mit einer 2-Pol-Anordnung bei 1 kHz Frequenz (Duba et al., 1994).

Die Argumente für die teilweise artifizielle Natur der in den Proben gemessenen Porosität sind: (1) Viele Risse durchschlagen Mineralkörner. Sie zeigen scharfe Grenzen und sind nicht randlich mineralisiert (Rauen et al., 1994). (2) Aufgrund des anisotropen mechanischen Spannungszustandes in situ entstehen beim Bohren subhorizontale Risse. Diese Risse sind sowohl mikroskopisch, als auch makroskopisch sichtbar und führen bei gehäuftem Auftreten zu scheibenförmigem Bohrkernzerfall (core diskings, Röckel et al., 1992). (3) Hochempfindliche Registrierungen der Bohrkernausdehnung nach der Entnahme aus dem Bohrloch (in der Größenordnung von $\mu\text{m}/\text{m}$) zeigen einen Zusammenhang mit akustischen Emissionen aus dem Kern. Beide Prozesse werden auf das Aufreißen von Mikrorissen bei der Spannungsrelaxation des Bohrkerns zurückgeführt (Wolter & Berckhemer, 1989).

Oberflächen/Matrixleitfähigkeit: Sie beträgt im verzerrten Bereich maximal $4 \cdot 10^{-4}$ S/m (entsprechend $2500 \Omega\text{m}$) und wäre damit für einen guten Leiter zu klein. In situ sollte sie allerdings höher sein, weil der Graphit in den betrachteten 5 Proben unterrepräsentiert ist. Der im Bohrkern aufgeschlossene Graphit ist sowohl in Form von mikroskopischen Leisten in der Gesteinsmatrix verteilt (in den 5 gemessenen Proben), bedeckt aber auch in zum Teil mm mächtiger Schicht die Störungsfläche an der Begrenzung des basischen Gangs. Diese Störung verursacht ein Zerbrechen des Kerns, demzufolge kann keine solide Probe präpariert werden, die den Graphit dieser Störungszone enthält. Für die elektrische Leitung spielt diese graphitisierte Fläche eine große Rolle, wie sich mit einem normalen Ohmmeter zeigen läßt: im 10-er cm Bereich existieren elektrische Verbindungen auf der graphitbelegten Störungsfläche.

Druckabhängige Leitfähigkeitsmessungen: Der normale Druckeffekt wird erklärt durch mit dem Druck abnehmende Volumenleitfähigkeit: Die mit Salzwasser gefüllten Mikrorisse werden unter Druck komprimiert (entwässert) und tragen damit weniger zur Gesteinsleitfähigkeit (=hauptsächlich Volumenleitfähigkeit) bei. Sowohl Rauen et al. (1994), als auch Duba et al. (1994) diskutieren den anomalen Druckeffekt als unter Druck erhöhte Oberflächen/Matrixleitfähigkeit. Nach Duba et al. (1994) spräche der anomale Druckeffekt für unter in-situ Bedingungen erhöhte metallische Leitfähigkeit durch vermehrte Erzmineralkontakte. Nach Rauen et al. (1994) entstünde der anomale Druckeffekt durch eine Umverteilung von Porenhalten innerhalb des Kluftsystems und eine dadurch erhöhte Konnektivität des Mikroriß-Erzmineralsystems. Nach der letzteren Hypothese beruhe der anomale Druckeffekt auf dem Vorhandensein von artifiziellen Rissen und ließe daher keine in-situ-Aussage zu.

5. Schlußfolgerung

Im betrachteten Kernmaterial aus der Störungszone (7012 m) wird die elektrische Leitfähigkeit im wesentlichen von den elektronisch leitfähigen Erzmineralen und Graphit verursacht.

In den untersuchten Kernproben sind jedoch sowohl die graphitisierten Störungsflächen, als auch die offenen, in situ fluidgefüllten, Klüfte unterrepräsentiert. An solchen Stellen war die Gesteinsfestigkeit zu gering, um Proben zu präparieren (Probendurchmesser 25.4 mm, Skalenproblem!). Trotz dieser Präparationsprobleme bietet der Kern H031 anschaulich die beiden Leitfähigkeitsmechanismen dar: eine in einer Länge von 1.4 m aufgeschlossene steilstehende graphitbelegte Störungsfläche ebenso wie offene Poren mit idiomorphen Kristallen, die rezente Fluide beweisen (Abb. 3 in Winter, 1994 im gleichen Band).

Weitere Informationen zur Abschätzung der elektrolytischen und elektronischen Anteile liefern die in-situ durchgeführten Bohrlochmessungen : Obwohl in 7004 m Tiefe ein ein der Teufe eng begrenzter salinärer Zufluß ins Bohrloch die Existenz von elektrolytisch leitfähigen Fluiden belegt, wird der Gebirgswiderstand im Latero Log Deep davon scheinbar nicht beeinflusst (keine Korrelation zwischen LLD und NaCl-Äquivalent in Abb. 1). Dagegen korreliert der Gebirgswiderstand sehr gut mit dem Gehalt an Schwefel als Anzeiger für sulfidische Erzminerale und Graphit und damit mit metallischen Leitern (Abb. 1, siehe auch Kück, 1994, im gleichen Band).

Sowohl aus Ergebnissen der Bohrlochmessungen, als auch aus den berichteten Laboruntersuchungen, wird eine Dominanz der metallischen Leitung im betrachteten Teufenbereich der 7000 m-Störung deutlich. Eine Abschätzung der Leitfähigkeitsmechanismen für die gesamte Hauptbohrung nimmt Winter (1994, im gleichen Band) vor.

Danksagung: Ich danke Frau Dr. A. Kontny und Herrn Dr. J. Duyster aus der Arbeitsgruppe Geologie im Feldlabor für die Mikroriß- und Erzmineralanalysen, Herrn P. Bornschein (Feldlabor) für die Anfertigung einer Abbildung und Frau S. Heikamp (Univ. Bonn) für die Durchführung der druckabhängigen Leitfähigkeitsmessungen.

Literatur

Duba A., Heikamp S., Meurer W., Nover G. & Will G. (1994): Evidence from borehole samples for the role of accessory minerals in lower-crustal conductivity. *Nature* vol. 367, 59-61.

Duyster J., Figgemeier C., Godizart G., Hoffmann A., Kontny A., Lich S., Machon L., Pribnow D., Rauen A., Röckel T., Spangenberg E., Umsonst T., deWall H., Winter H., Wöhl T. & Dietrich H.G. (1993): The lithological profile of the KTB Hauptbohrung 6000 - 7200 m. Report of the Field Laboratory: Geology, Geochemistry and Geophysics. In: Emmermann, Lauterjung, Umsonst (eds.), KTB Report 93-2, 15-63, NLFb, Hannover.

Kück J. (1994): Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - In-situ-Messungen (im gleichen Band).

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

Rauen A., Duyster J., Kontny A., Röckel Th. & Heikamp S. (1994): Electrical conductivity of a KTB core from 7000 m - effects of cracks and ore minerals. *Scientific Drilling*, submitted.

Röckel Th., Natau O. & Dietrich H.G. (1992): Core reorientation by comparison of core instabilities and borehole instabilities. In: Emmermann, Dietrich, Lauterjung, Wöhl (Hrsg.), KTB Report 92-2, F1-F17. NLFb Hannover.

Schön J. (1983): *Petrophysik*. Enke Verlag Stuttgart.

Winter H., Rauen A. & Kück J. (1994): Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - Vergleich von Labor- und Bohrlochmessungen (im gleichen Band).

Wolter K.E. & Berckhemer H. (1989): Time dependent strain recovery of cores from the KTB-deep drill hole. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 22, 273-287.