

Elektrische Leitfähigkeit in der Kontinentalen Tiefbohrung - In Situ-Messungen

Kück, Jochem, KTB Logging Center, 92667 Windischeschenbach, Germany,
E-mail: kueck@ktb.bgr.d400.de; Fax: +49 9681 / 400 67

Zusammenfassung

Bohrlochmessungen liefern wichtige Aussagen zum Gesamtbild von Struktur und Aufbau elektrisch leitfähiger Systeme im Untergrund der KTB Lokation. Im weitaus größten Teil der beiden KTB Bohrungen zeigen Bohrlochmessungen die für kristalline Gesteine typischen, sehr hohen Werte des elektrischen Gesteinswiderstands ($> 1000 \Omega\text{m}$). In nur wenigen, diskreten Zonen mit geringer Mächtigkeit treten jedoch niedrige Resistivitäten auf. So ganz besonders in den Teufenbereichen um 500 m, 2000 m und 7800 m. Einige dieser Bereiche korrelieren mit erhöhtem Graphit- und Sulphidanteil im Bohrklein, andere mit Anzeichen erhöhter Salinität in hydraulisch aktiven Zonen. Eine detaillierte Untersuchung vermag eine Unterscheidung der Horizonte mit geringem Widerstand in solche mit elektrolytischem und/oder metallischem Ladungstransport zu erstellen.

Resistivitätsprofil als Indikator für gute Leiter. (Abb. 1 - 290 m bis 8100 m)

Das Resistivitätsprofil liefert eine Aussage über Lage und Art von elektrisch anomalen Horizonten, den 'guten Leitern'. In der Hauptbohrung (HB) des Kontinentalen Tiefbohrprojekts der Bundesrepublik Deutschland, KTB, wurde der spezifische elektrische Gesteinswiderstand im Tiefenbereich von 290 m bis 8096 m mit der Dual LateroLog Sonde (DLL) vermessen. Die DLL Sonde der Fa. Schlumberger bestimmt den spezifischen Widerstand (Resistivität) in zwei horizontalen Eindringtiefen: 'deep' - tiefer als 3 m; 'shallow' - $\ll 0.5$ m [Serra, 1984]. Ein Ausschnitt der Ergebnisse ist in der Abb.1 als Resistivitätsprofil für den Abschnitt 3000 - 7200 m dargestellt. Im Gegensatz zu den Verhältnissen in Sedimenten liefern die Messungen im kristallinen Gestein keine signifikanten lithologische Unterscheidungskriterien. Sie zeigen jedoch einige starke, offenbar nicht an lithologische Einheiten gebundene Resistivitätsanomalien. Die Spülungsleitfähigkeit (Mud resist.) wurde während oder kurz vor der DLL Messung ermittelt. Analysen der Cuttings (Bohrklein) und weitere Bohrlochmessungen (z.B. IP, SP, Caliper) können Auskunft geben über die Träger der niedrigen Resistivitäten, bzw. hohen Leitfähigkeiten. In Abb.1 ist eine Quantifizierung des Vorkommens von Graphit und Fe-Sulphiden dargestellt. Die Daten zum Vorkommen von Graphit, Pyrit und FeS wurden durch die Arbeitsgruppe Geologie, das Profil des Schwefelvorkommens von der Arbeitsgruppe Geochemie, beide im KTB Feldlabor, erstellt.

Beobachtungen

Das DLL zeigt die für kristalline Gesteine typischen hohen bis sehr hohen Werte (80% Meßwerte $> 1000 \Omega\text{m}$). Der geometrische Mittelwert über dem gesamten Meßbereich beträgt $3600 \Omega\text{m}$, (Avrg deep in Spur 1). Allgemein ist ein mit der Tiefe zunehmender Trend zu größeren Werten erkennbar. In einigen wenigen Zonen mit geringer Mächtigkeit treten, wie ähnlich schon in der KTB VB zu sehen war [Kück, 1992], sehr niedrige Werte auf. Ihr Anteil an der 7794 m langen Meßstrecke liegt mit 184 m unter 3 Prozent. Auffällig ist eine sehr gute Übereinstimmung der Teufenlage dieser Anomalien mit Zonen, in denen besonders starke **Graphit- und Schwefelvorkommen** aus Bohrkleinanalysen nachgewiesen wurden (Abb.1, Spur 6,7 & 8). Bei deutlicher Graphitanzeige liegt stets auch eine sehr starke Resistivitätsanomalie vor. Eine verstärkte Sulphidanzeige verhält sich fast immer proportional zu den erniedrigten Resistivitäten (eine Ausnahme: 4400 m - 4550 m, sehr hohe spezifische Widerstandswerte bei deutlicher Sulphidanzeige). Das **Bohrlochkaliber** zeigt in nahezu allen Anomalietiefen keine oder nur leichte Bohrlochausbrüche an. Eine Verfälschung der Resistivitätsmessung durch ein stark erweitertes, mit hoch leitfähiger Spülung gefülltes Bohrloch ist damit hier auszuschließen.

Im Bohrlochbereich 3000 m bis 6000 m wurde während eines hydraulischen Tests an mehreren Stellen Zuflüsse angeregt, diese wurden mit einer **Salinitäts**sonde lokalisiert. Dabei wird die Salinität aus Spülungswiderstand und -temperatur berechnet und in NaCl-Äquivalent ausgedrückt. Die hierbei ermittelten Salinitätsverteilungen sind in Abb. 2 - Spur 4 (Salinity) dargestellt.

Elektrolytische oder Metallische Leitung ?

Im DLL Log erscheinen deutliche Anomalien, welche nicht durch Graphit- oder Sulphidvorkommen erklärt werden können (z.B. 3200 m - 3300 m, 3520 m - 3530 m, 3700 m - 3740 m, 4800 m, 5300). Eine plausible Erklärung für solche Zonen ist die elektrolytische Leitung in den Verschnittstellen der Bohrung mit fluidführenden Horizonten. Die aus Analysen der in der KTB VB geförderten Fluide mit hoher Salinität und damit guter Leitfähigkeit unterstützt diese Vorstellung [Heinschild, 1990; Pekdeger et al., 1990]. Ein zwischen Vor- und Hauptbohrung (horizontale Distanz ≈ 200 m) durchgeführtes **Cross-Hole Experiment** beweist eindeutig die Existenz von elektrischer Verbindung und hydraulisch weiträumiger Kommunikation [Kessels et al., 1993; Stoll, 1993].

In Zonen, die hydraulisch aktive Horizonte durchteufen, die also durch erhöhte Mikroklüftigkeit gekennzeichnet sind, wird das fern der Bohrlochwand lesende DLL deep dem nur im Nahbereich lesenden DLL shallow gleich niedrige Werte ermittelt. Die Erniedrigung der Differenz 'deep-shallow' ist bei gleichzeitig geringen Resistivitäten ($< 1000 \Omega\text{m}$) ein guter Indikator für ein fluidführendes Gebirge, vgl. Abb.1 - Spur 2 (Differenz). Ein ebensolcher Effekt tritt auch bei Graphit- oder Pyrit-führendem Gebirge auf. Eine Unterscheidung ist allein mit den DLL Messungen daher noch nicht möglich.

Es ist davon auszugehen, daß bei dem hydraulischen Test alle weiträumig permeablen Bereiche im Testintervall 3000 - 6000 m fluide gefördert haben, somit alle Horizonte mit der Salinitätssonde detektiert wurden. Ein weiterer Zufluß wurde später ohne hydraulischen Test bei 7000 m registriert. Die Teufenlagen der sehr kleinen Differenzen 'deep-shallow' stimmen vorzüglich mit den Unterkanten der einzelnen Salinitätsereignisse überein. Eine detaillierte Untersuchung bestätigt sogar, daß zu nahezu jedem Salinitätsereignis eine Anzeige in 'deep-shallow' vorliegt. Zusammen mit den Graphit- und Sulphid-Profilen lässt sich eine Unterscheidung in elektrolytische und/oder metallische Leitung vornehmen, sie ist in Abb.1 - Spur 5 wiedergegeben (grau = elektrolytisch; schwarz = metallisch). Das in allen relevanten Bereichen sehr gute Bohrlochkaliber bestätigt die Vertrauenswürdigkeit der Differenzen 'deep-shallow'. Da im Bereich oberhalb 3000 m und unterhalb 6000 m keine sichere Information über alle Zuflußhorizonte vorliegt, kann eine solche Unterscheidung dort nicht eindeutig durchgeführt werden.

Verglichen mit den extrem kleinen Resistivitäten bei 500 m, 2000 m und 7800 m sind die Anomalien im Bereich 3000 m bis 6000 m um fast zwei Größenordnungen schwächer ausgeprägt. Offenbar treten gute Leiter mit metallischer Leitung bedeutend stärker im Resistivitätslog der KTB HB auf, als solche mit elektrolytischer Leitung.

Aus der Zusammensicht der angeführten Bohrlochmessungen scheint eine nur auf Bohrlochmessungen gestützte Identifikation des Leitungstyps möglich zu sein. Hierzu bedarf es aber noch eingehender Untersuchungen des umfangreichen Datenmaterials aus dem KTB Projekt.

Besonderheit im Teufenbereich 5600 m bis 6000 m.

In diesem Bereich treten mehrere für die gesamte Bohrung ungewöhnliche Effekte auf. So liegen hier die höchsten vorkommenden Resistivitäten ($\approx 20\,000 \Omega\text{m}$). Auch in viel größeren Tiefen treten wieder vergleichbare hohe Resistivitäten auf, in diesem Teufenbereich jedoch handelt es sich um einen ungewöhnlichen Wert. Es konnten trotz umfangreicher hydraulischer Tests keine Zuflüsse detektiert werden, vgl. Abb.2. Es liegt kein Anzeichen zur Graphit- und nur schwache Anzeigen zur Sulphidführung vor, Abb.1. Das Kaliber zeigt starke Ausbrüche, was auf ein Spröbruchverhalten schließen läßt [Röckel, 1992], wie es bei sehr kompetenten, meist impermeablen Gesteinen auftritt. Aus den beschriebenen und weiteren hydraulischen Tests bis zu den jüngsten Versuchen Ende Februar 94 ist bekannt, daß oberhalb etwa 6000 m ein deutlich niedrigeres Druckniveau als darunter vorliegt. Möglicherweise durchteuft die KTB HB eine die beiden hydraulischen Horizonte trennende Abdichtung (sealing body) in diesem Teufenabschnitt, vgl. auch Huenges et al., 1994.

Literaturverzeichnis:

Dieses Thema ist ausführlicher behandelt in:

Kück J., Anomalies of the electrical resistivity in the KTB-Oberpfalz main borehole HB, KTB-Report 94-1

Draxler, H., 1993, Logging Operations at casing depth 6018 m (drilling depth), KTB-Report 93-1, p.97-175

Heinschild, H.-J., 1990, Ergebnisse der geochemischen Bearbeitung gewonnener Fluidproben, KTB-Report 90-5, p.439-470

Huenges, E., 1994, Engeser, B., Kück, J., Kamm, C., Zoth, G., Formation-pressure down to 8.7 km depth of the Kontinentale Tiefbohrung (KTB), KTB-Report 94-1, in press

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

Kück, J., 1992, A comparison of electrical resistivities obtained from logging the KTB pilot hole with surface electromagnetic measurements, Scientific Drilling, 1992, No.3, p. 100-104.

Serra, O., 1984, Fundamentals of well-log interpretation, The acquisition of logging data, Developments in Petroleum Science, 15A, Elsevier, 1984, p. 51-76.

Stoll, J., 1993, A Mise-à-la-Masse experiment for detecting an electric network in cataclastic zones around the KTB-site, KTB-Report 93-1, p. 237-250

Pekdeger, A., Sommer v. Jarmersted, C., Woith, H., 1990, Zwischenbericht über erste Ergebnisse der Hydrochemie an der KTB-VB. (Pumpversuch vom 07.04.90 - 11.04.90), KTB-Report 90-5, p. 474-481

Röckel, T., 1992, Zusammenstellungen von Untersuchungsergebnissen vom Feldlabor zum 12 1/4" Bohrlochabschnitt in der Hauptbohrung, Anlage 6 - Felsmechanik, Sitzungsvorlage am 18. 8. 1992 in Windischeschenbach; sowie persönliche Mitteilungen.