

Korrelation bohrlochgeophysikalischer Messungen mit kristallinem Gestein

S. Haverkamp, J. Wohlenberg & R. Walter (Aachen)

Um die wissenschaftlichen Zielsetzungen von KTB erfüllen zu können, ist für die Vorbohrung eine kontinuierliche Kernentnahme geplant. Bohrtechnische und geologische Gegebenheiten haben jedoch bereits jetzt schon das Kern nicht immer zugelassen und werden es in größeren Bohrteufen zunehmend erschweren. Um auch aus Zonen mit Kernverlust Informationen zu erhalten, soll ein umfangreiches bohrlochgeophysikalisches Meßprogramm durchgeführt werden. Diese geophysikalischen Daten in ein lithologisches Bohrprofil umzusetzen, ist Ziel des Forschungsvorhabens FACIOLOG.

Während die charakteristischen Antwortsignale der Meßsonden für die unterschiedlichen Sedimentgesteine heute weitgehend bekannt sind, ist dies im Kristallin nicht der Fall. Für KTB mußte daher zunächst erprobt werden, inwieweit und mit welcher Methodik sich auch kristalline Lithologie auf der Basis von Logs rekonstruieren läßt. Mit dieser Zielsetzung sollte zu Beginn des Forschungsvorhabens - d.h. im Juli letzten Jahres - eine Pilotstudie bearbeitet werden; die Wahl fiel auf die Vertiefungsstrecke der Bohrung URACH 3.

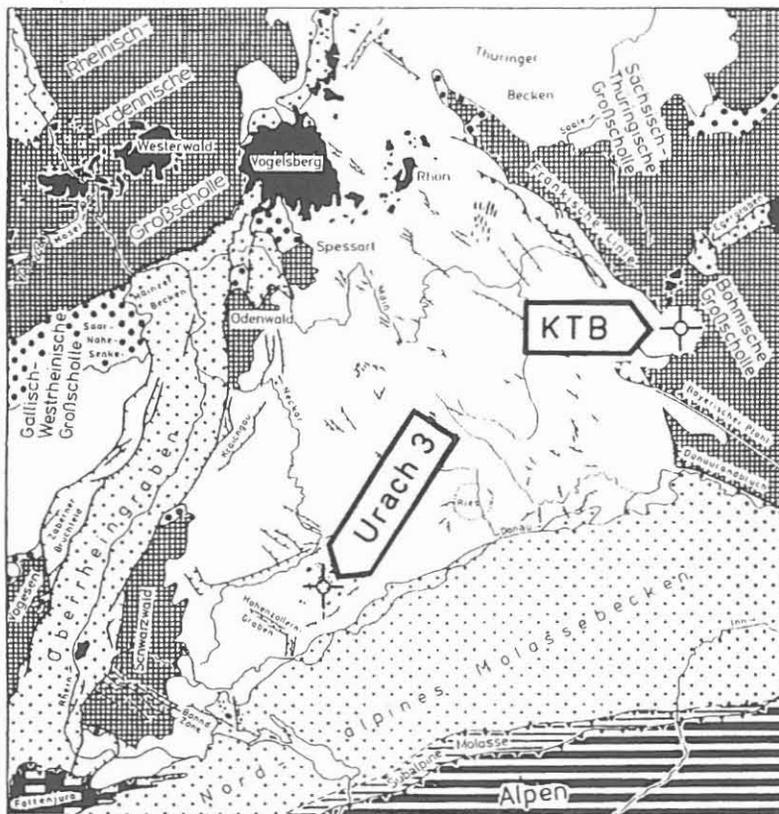


Abb. 1: Lage der Forschungsbohrungen Urach 3 und KTB

Die Forschungsbohrung URACH 3 (Abb. 1) wurde Ende der 70er Jahre in der Schwäbischen Alb abgeteuft und erreichte bei etwa 1600 m u.G. das kristalline Grundgebirge, das zum moldanubischen Kristallingürtel des variszischen Gebirges gehört. Zu Beginn der 80er Jahre konnte die Bohrung von ursprünglich 3334 m bis auf endgültig 3488 m vertieft werden. Diese 154 m lange Strecke der Vertiefung wurde von der Firma Schlumberger geophysikalisch umfangreich vermessen. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit dem für KTB geplanten Meßprogramm bot sie sich daher für den Versuch einer Korrelation bohrlochgeophysikalischer Meßergebnisse mit kristallinem Gestein als besonders geeignet an.

Auf der Basis des gewonnenen Kernmaterials und der Spülproben wurde zunächst ein geologisches Bohrprofil, ein LITHOLOG, aufgestellt (Abb. 2). Zu unterscheiden sind der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis im Liegenden und der Mikro-Quarzdiorit im Hangenden, der in seinem oberen Abschnitt eine verstärkte Pyritführung, im unteren eine schwach angedeutete metamorphe Paralleltexur zeigt.

In der gesamten lithologischen Folge treten immer wieder schliefrignebulitische Nester und bis zu 10 cm mächtige Gänge granitoiden Charakters auf. Neben solchen Bereichen mit granitoiden Einschaltungen sind auch wenige, max. 5 m mächtige Aplite zu beobachten.

Obgleich das angetroffene Kristallin in seiner Gesamtheit hydrothermal alteriert ist, heben sich partiell besonders intensiv überprägte Zonen deutlich vom Restgestein ab.

Schließlich läßt sich dem LITHOLOG noch entnehmen, in welchen Teufen das Kristallin intensiv geklüftet zu sein scheint.

Auf Abbildung 3 sind die im Bereich der Vertiefung von den Schlumbergersonden registrierten Messungen in Form eines Composite-Logs abgebildet. Bei der Interpretation der Daten blieben das Sonic- und das SP-Log, die hier insgesamt recht wenig Charakter zeigen, weitgehend unberücksichtigt. Nur im Bereich der oberen 20 m sind die Bohrlochauskesselungen so groß, daß die Meßergebnisse nicht mehr auswertbar sind.

Ziel war nun, alle im LITHOLOG aufgenommenen, geologischen Einheiten und Merkmale mit Hilfe der Logs zu erkennen, von einander zu unterscheiden und in einem synthetischen Bohrprofil, dem FACIOLOG, teufengerecht einzuordnen. Für die Entwicklung eines solchen synthetischen Bohrprofils muß in den Logs der "fingerprint" eines jeden lithologischen Merkmals erkannt werden. Voraussetzung hierzu sind petrographische, geochemische und petrophysikalische Untersuchungen am Kernmaterial. Unter deren Berücksichtigung können mit Hilfe von Cross-Plots tatsächlich bestimmte Wertebereiche in den Logs ganz bestimmten lithologischen Parametern zugeordnet werden. Sukzessive läßt sich somit jedes lithologische Merkmal durch eine Elektrofazies, charakterisieren.

Das erste Elektrofaziesdiagramm (Abb. 4 oben) enthält alle von den Meßsonden im Bereich der Vertiefung registrierten Werte. Die Skalierung ist so gewählt, daß die aufgenommenen Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Logs ein Referenzrechteck ergeben. Auf Grund der hohen natürlichen Gammastrahlung (bis 300 API) und des hohen Gebirgswiderstandes (50000 ohmm) muß es sich bei der vermessenen Formation um kristallines Gestein handeln.

Vergleich der beiden geologischen Bohrprofile

Teufe [m]

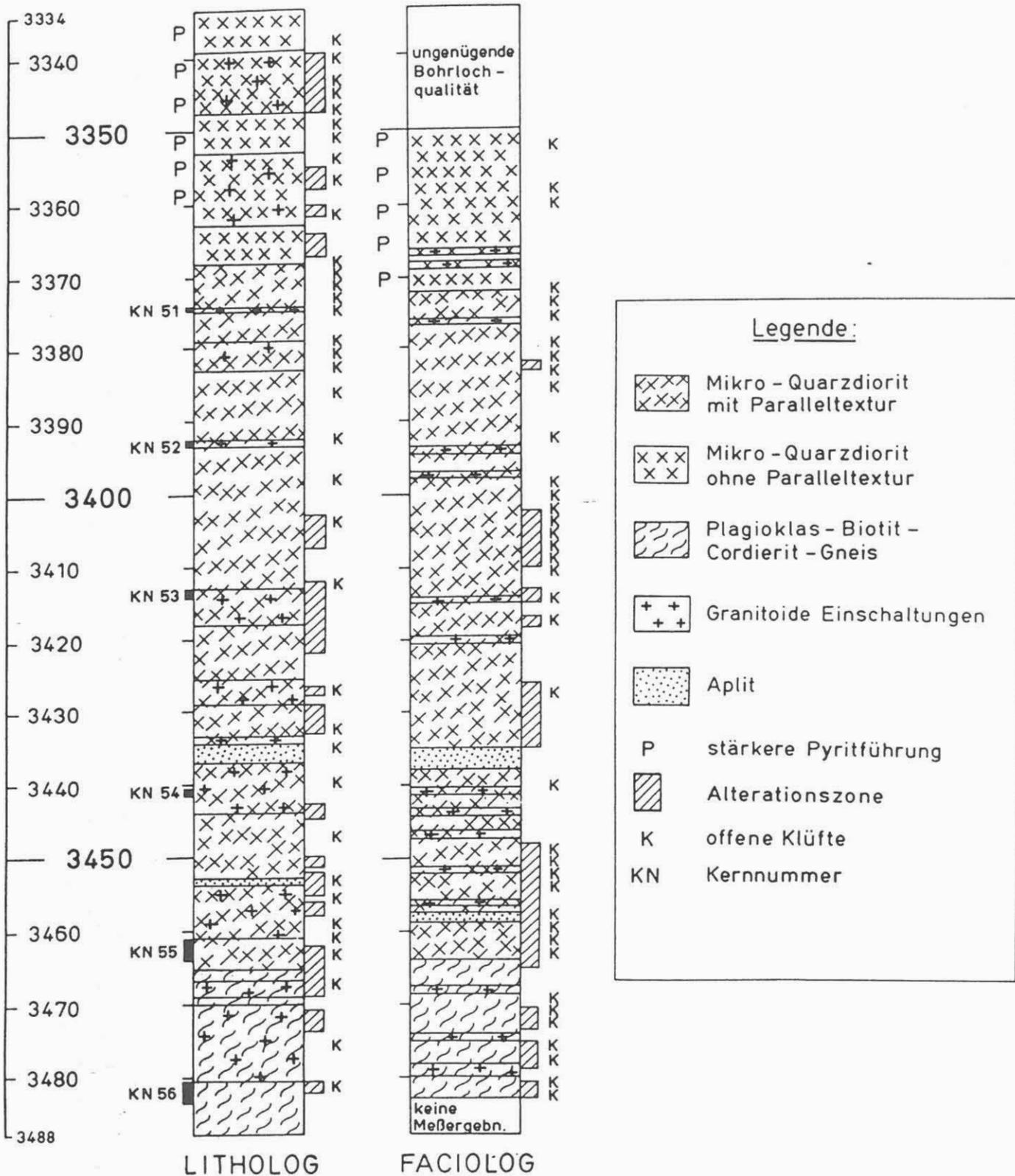


Abb. 2

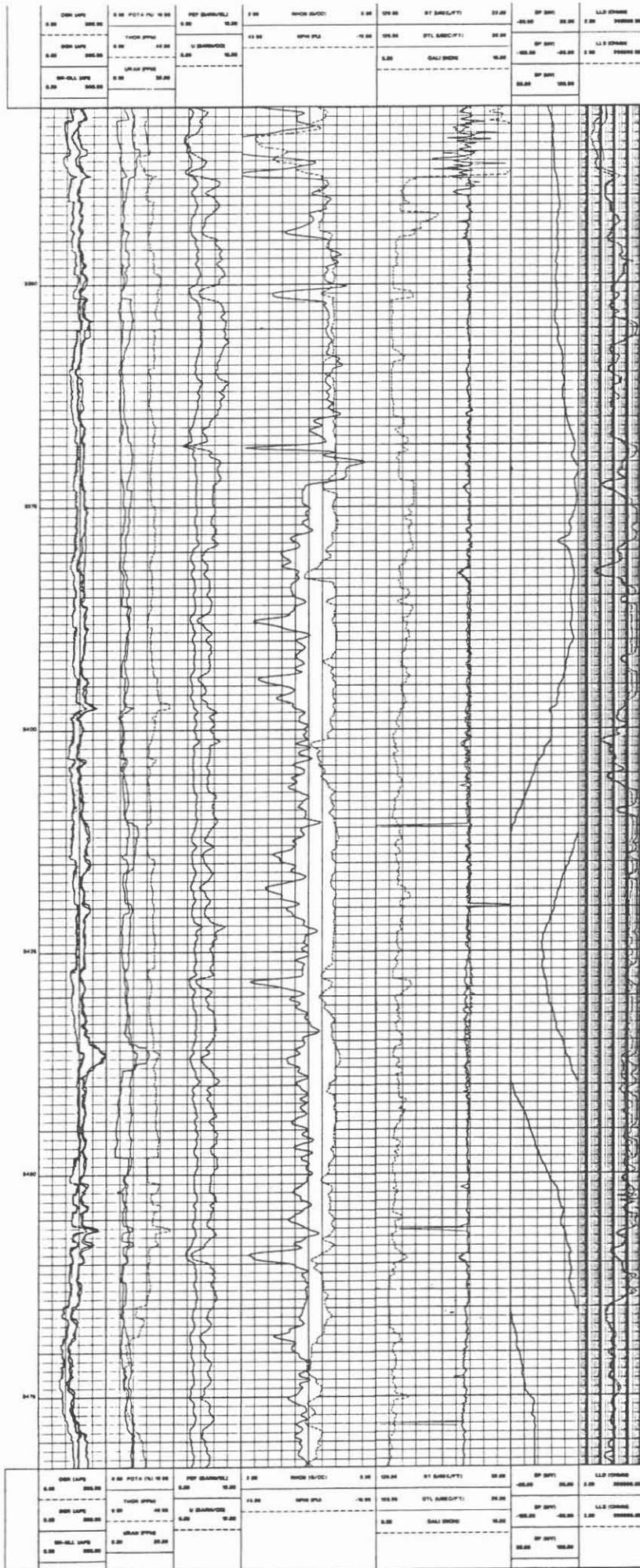


Abb. 3: Bohrlochgeophysikalische Messungen
aus der Vertiefung der Bohrung Urach 3

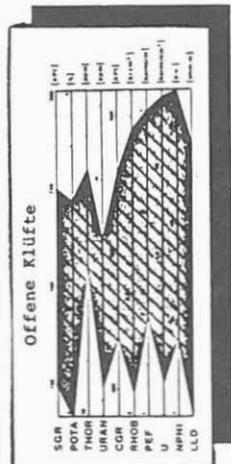
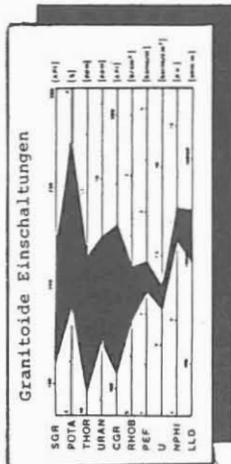
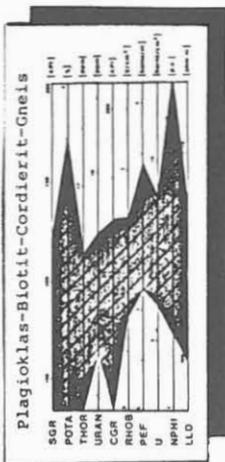
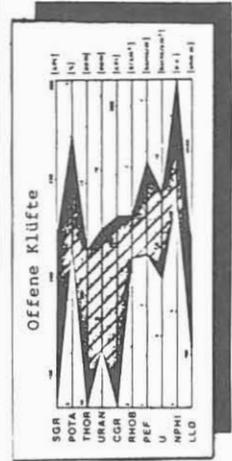
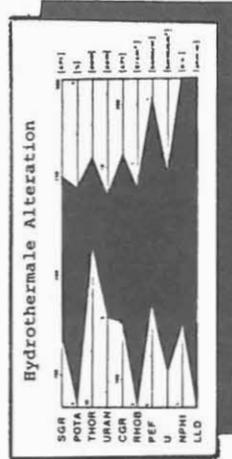
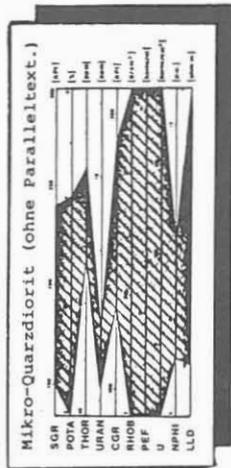
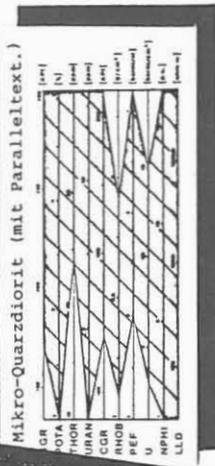
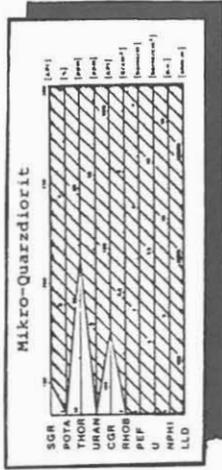
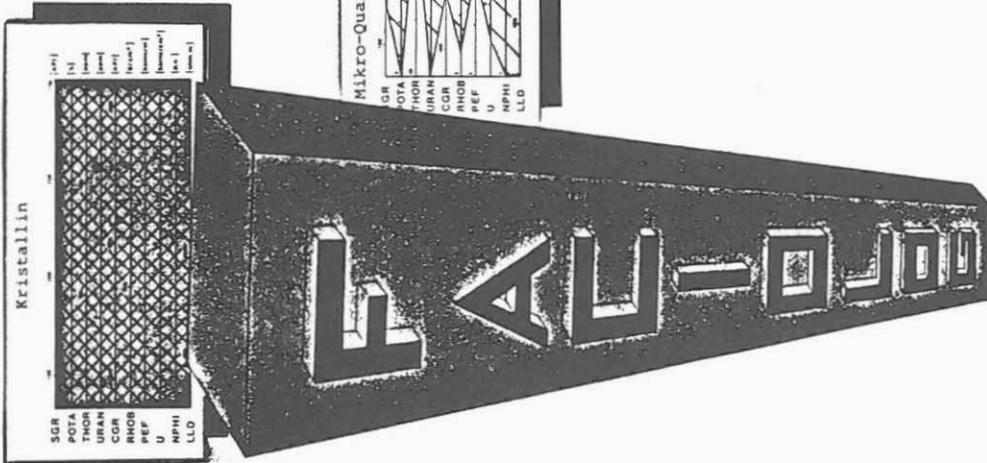


Abb. 4

Innerhalb dieses Kristallinabschnitts können der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis und der Mikro-Quarzdiorit mit Hilfe der gemessenen Thoriumgehalte signifikant voneinander unterschieden werden. Trägt man die Werte des Thoriumlogs gegen z.B. die des Kaliumlogs auf einem Cross-Plot auf (Abb. 5), so lassen sich deutlich zwei Bereiche differenzieren; der eine mit Thoriumwerten > 24 ppm, der andere mit Werten < 24 ppm.

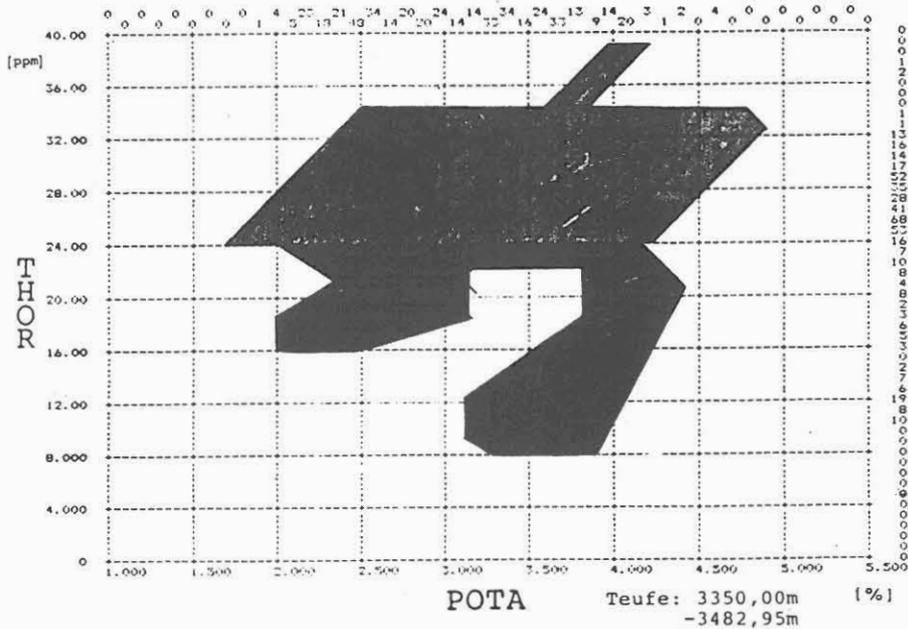


Abb.5: Unterscheidung des Mikro-Quarzdiorits (oben) und des Plag.-Biot.-Cord.-Gneises (unten).

Der höhere Thoriumgehalt entspricht dem Mikro-Quarzdiorit, der niedrigere dem Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis, was sich aus dem Mineralbestand der beiden Gesteine erklären läßt:

Der Mikro-Quarzdiorit enthält im Gegensatz zum Gneis Amphibole und durchschnittlich 20% mehr Biotit. Unter den gesteinsbildenden Mineralen besitzen gerade diese beiden den größten Anteil an Thorium. Zudem werden von den sehr viel thoriumreicheren Akzessorien Allanit, Epidot, Titanit und Magnetit nur im Mikro-Quarzdiorit beobachtet, der außerdem wesentlich mehr Zirkone enthält als der Gneis.

Differenziert man nun im Composite-Log die Bereiche mit Thorium $>$ bzw. $<$ 24 ppm, so ergeben sich mit dem Maximum- und Minimumwerten der übrigen Logs die beiden Elektrofaziesdiagramme für Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Abb. 4). Die Grenze zwischen den beiden lithologischen Einheiten ist eindeutig bei 3464,5 m zu ziehen (Abb. 2).

Ähnlich wie an diesem Beispiel dargestellt, lassen sich auch für die lithologischen Merkmale, immer unter Berücksichtigung der jeweiligen Gesteinseigenschaften und mit Hilfe von Cross-Plots, solche charakteristischen Elektrofaziesdiagramme aufstellen.

Für die Unterscheidung des Mikro-Quarzdiorits mit verstärkter Pyritführung und dem mit schwach angedeuteter Paralleltextur (Abb. 4) sind insbesondere die Meßwerte der Dichte und des Photoelektrischen Querschnitts diskriminant. Ihre plötzliche Zunahme im oberen Bereich des Mikro-Quarzdiorits (Abb. 3) spiegelt den höheren Pyritgehalt und das scheinbar kompaktere Gesteinsgefüge wieder, so daß sich innerhalb dieser lithologischen Einheit bei 3372 m eine Grenze ziehen läßt (Abb.2).

Die Entwicklung der Elektrofazies für die granitoiden Einschaltungen im Mikro-Quarzdiorit und im Gneis (Abb. 4) basiert auf folgenden Überlegungen:

Erstens unterscheiden sich die granitoiden Einschaltungen vom Restgestein insbesondere durch ihren größeren Anteil an Kalifeldspat. Neben Kalium reichert sich bei der magmatischen Differentiation auch Thorium an, so daß die Sonden im Bereich granitoider Gänge erhöhte Kalium- und Thoriumwerte registriert haben sollten. Die Dichte granitoider und granitischer Gesteine ist im allgemeinen geringer als die des Mikro-Quarzdiorits und des Gneises. Ähnliches gilt für den photoelektrischen Effekt, den photoelektrischen Querschnitt und die Neutronenporosität.

Für die Erkennung der Aplite ist hier zusätzlich ein hoher Urangehalt Voraussetzung.

Die Bereiche, in denen die Werte der Elektrofaziesdiagramme mit denen der Logs übereinstimmen, sind auf Abbildung 2 als granitoide Einschaltungen bzw. Aplite gekennzeichnet.

Die intensiv hydrothermal alterierten Zonen zeichnen sich durch erhöhte primäre und sekundäre Porositäten aus, die eine erhöhte Fluidführung erlauben. Im Dünnschliff ist zudem eine Saussuritisierung der Plagioklase, eine Pinitisierung der Cordierite und die Chloritisierung der Biotite zu erkennen, d.h. es entstanden OH-reiche Sekundärminerale, wie Hellglimmer und Chlorite. Auf Grund dieser erhöhten Wasserstoff-Ionenkonzentration in den überprägten Bereichen ist für ihre Identifizierung in jedem Falle das Neutronenporositätslog signifikant.

Die umgewandelten Zonen des Uracher Kristallins unterscheiden sich vom Restgestein außerdem durch ihren leicht abnehmenden Oxydationsgrad, d.h. die Alterationsprozesse scheinen in schwach reduzierendem Milieu abgelaufen zu sein. Für Uran, relativ leicht mobilisierbar, aber unter reduzierenden Bedingungen unlöslich, muß daher angenommen werden, daß es gemeinsam mit sulfidischen Erzmineralen in den Zersetzungszone ausgefällt wurde.

In die Elektrofaziesdiagramme für die hydrothermal alterierten Gesteine (Abb. 4) geht daher zum einen eine erhöhte Neutronenporosität, zum anderen eine Zunahme an Uran ein. Die teufengerechte Einordnung der überprägten Zonen im Mikro-Quarzdiorit und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis ist Abbildung 2 zu entnehmen.

In Bereichen offener und damit meist wasserführender Klüfte müssen zum einen erhöhte Neutronenporositäten gemessen worden sein. Zum anderen sind auf Grund der hohen Salinität der aus der Vertiefung gewonnenen Lösungen erniedrigte Gebirgswiderstände zu erwarten. Beide Bedingungen gehen in die entsprechenden Elektrofaziesdiagramme ein (Abb. 4). Auf Abbildung 2 ist zu erkennen, daß sich die Zonen intensiver Klüftigkeit naturgemäß mit denen hydrothermalen Alteration überschneiden.

Vergleicht man abschließend dieses synthetische Bohrprofil, das FACIOLOG, mit dem ursprünglich aufgestellten LITHOLOG, so lassen sich folgende Aussagen treffen (Abb. 2):

- Die bohrlochgeophysikalischen Messungen enthalten auch im Kristallin so viel Information, daß sich aus den Daten ein detailliertes geologisches Profil erarbeiten läßt.
- Unter Benutzung besonders signifikanter Logs können sämtliche im LITHOLOG aufgenommenen Kriterien auch im FACIOLOG voneinander unterschieden werden.
- Bei der Festlegung der Grenzen zwischen den einzelnen Einheiten ergeben sich Teufenunterschiede in den beiden Profilen. Da das LITHOLOG im wesentlichen auf der Auswertung von Spülproben beruht, sollten den Grenzen, die aus den Bohrlochmessungen ermittelt wurden, eine größere Genauigkeit zuzuschreiben sein.
- Neben der besseren Teufeneinordnung wird im FACIOLOG, wie am Beispiel der granitoiden Gänge zu erkennen, auch die Lithologie genauer erfaßt.

Insgesamt hat das Pilotprojekt URACH 3 für die Loginterpretation im Kristallin sehr erfolgversprechende Ergebnisse geliefert, so daß man hoffen kann, auch für die KTB Vorbohrung eine lückenlose Rekonstruktion der lithologischen Folge gewährleisten zu können.