

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Lehr- und Forschungsgebiet für Angewandte Geophysik

Lochnerstraße 4-20
5100 Aachen

Untersuchung zur Nutzung geophysikalischer
Bohrlochmessungen für die Entwicklung eines
lithologischen Bohrprofils im Kristallin

S. Haverkamp
J. Wohlenberg
R. Walter



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung.....	430
2. Pilotprojekt: Forschungsbohrung URACH 3 - Bereich der Vertiefung.....	431
2.1 Einleitung.....	431
2.2 Geologie.....	432
2.2.1 Geologischer Rahmen und Profilübersicht.....	432
2.2.2 Petrographie.....	435
2.2.2.1 Mikro-Quarzdiorit.....	435
2.2.2.2 Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis.....	437
2.2.2.3 Granitoide Einschaltungen und Aplite.....	438
2.2.2.4 Hydrothermale Veränderungen.....	439
2.2.2.5 Quantitative Mineralbestände und Klassifi- kation der Gesteine.....	439
2.2.3 Gefügekundliche Beobachtungen.....	444
2.3 Interpretation der bohrlochgeophysikalischen Meßergebnisse.....	445
2.3.1 Composite-Log, Cross-Plot, Elektrofazies- diagramm.....	445
2.3.2 Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit- Cordierit-Gneis.....	454
2.3.3 Mikro-Quarzdiorit mit bzw. ohne Parallel- textur.....	458
2.3.4 Granitoide Einschaltungen und Aplite.....	459
2.3.5 Hydrothermale Alteration.....	463
2.3.6 Offene Klüfte.....	465
2.4 Diskussion der Ergebnisse.....	466
2.5 Zusammenfassung.....	470
3. Literaturverzeichnis.....	471
4. Dankagung.....	474

1. Einführung

Um die wissenschaftliche Zielsetzung von KTB hinsichtlich der Erforschung des kristallinen Grundgebirges erfüllen zu können, ist für die Hauptbohrung eine ca. 30 %ige und für die bereits begonnene Vorbohrung eine kontinuierliche Kernentnahme geplant. Bohrtechnische und geologische Gegebenheiten haben jedoch jetzt schon das Kernentnehmen nicht immer zugelassen und werden es in größeren Bohrteufen zunehmend erschweren.

Um auch aus ungekernten Bohrstrecken oder aus Zonen mit großem Kernverlust Informationen zu erhalten, wird ein umfangreiches bohrlochgeophysikalisches Meßprogramm durchgeführt. Aus diesen geophysikalischen Informationen unter Berücksichtigung von Petrographie und Petrophysik ein geologisches Bohrprofil zu rekonstruieren, ist Aufgabe und Ziel des Forschungsvorhabens "FACIOLOG".

Die meisten Tiefbohrungen sind bisher von der Erdöl- und Erdgasindustrie niedergebracht worden. Da aus Kostengründen nur selten gekernt wurde, gewannen bohrlochgeophysikalische Messungen schnell an Bedeutung. Die Meßgeräte, Meßmethoden und computergesteuerten Auswertungsprogramme sind im wesentlichen auf die speziellen Bedürfnisse dieses Industriezweiges - und damit auf Sedimentgesteine - abgestimmt. Während die charakteristischen Antwortsignale der Meßsonden für die unterschiedlichen Sedimente heute weitgehend bekannt sind, ist dies im Kristallin nicht der Fall.

Erst während der letzten Jahre gewannen Bohrungen im Kristallin bei der Suche nach geothermalen Energiereserven, nach Endlagern für radioaktive Abfälle, nach kristallinen Erdöl- und Erdgasreservoirgesteinen, nach Minerallagerstätten und nicht zuletzt nach neuen Erkenntnissen über den Aufbau der Erdkruste an Bedeutung. Zwangsläufig ergab sich die Notwendigkeit, Loginterpretation auch auf kristallines Gestein auszudehnen. Basierend auf statistischen Verfahren wurden von der Industrie erste Programmsysteme hierzu entwickelt; grundlegende und systematische Untersuchungen zu den geologischen, petrophysikalischen und bohrlochgeophysikalischen Zusammenhängen befinden sich jedoch noch in den Anfängen.

Um eine zuverlässige Rekonstruktion der lithologischen Folge für die kontinentale Tiefbohrung zu gewährleisten, ist die wissenschaftliche Analyse dieser Beziehungen unbedingt notwendig. Hierzu bietet sich die Vorbohrung, die sowohl durchgehend gekernt als auch geophysikalisch vermessen werden soll, in einzigartiger Weise an.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens ließen sich erste bohrlochgeophysikalische Daten aus der KTB-Vorbohrung nicht vor 1988 erwarten. Neben dem Literaturstudium und der Kontaktaufnahme mit anderen Universitäten und einschlägigen Firmen galt es, bis zu diesem Zeitpunkt praktische Erfahrung in der Interpretation von Logs aus dem Kristallin zu sammeln. Mit dieser Zielsetzung sollte eine geeignete Bohrung bearbeitet werden - die Wahl fiel auf die Vertiefungsstrecke der Forschungsbohrung Urach 3.

2. Pilotprojekt: Forschungsbohrung URACH 3 - Bereich der Vertiefung

2.1. Einleitung

In der Schwäbischen Alb wurde 1977/78 die Bohrung Urach 3 im Rahmen einer groß angelegten Forschungskampagne niedergebracht (Abb.1).

Ziel des Vorhabens war insbesondere die Untersuchung des kristallinen Grundgebirges im Hinblick auf die Nutzung geothermaler Energie. Die Bohrung erreichte eine vorläufige Teufe von 3334m, konnte jedoch 1982/83 um 154m bis auf endgültig 3488m vertieft werden. Dieser Bohrlochabschnitt wurde im Auftrag der BEB von der Firma Schlumberger umfangreich vermessen, so daß er für den Versuch der Korrelation von bohrlochgeophysikalischen Meßergebnissen mit kristallinem Gestein als besonders geeignet erschien.

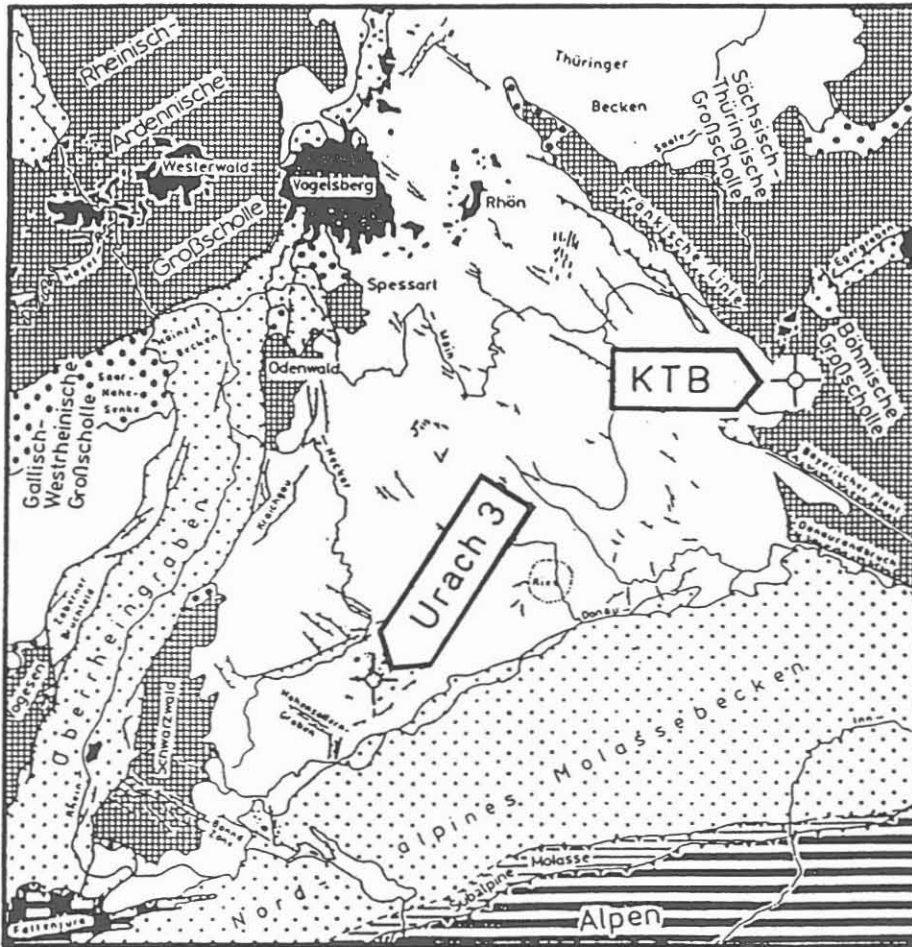


Abb.1: Lage der Forschungsbohrungen Urach 3 und KTB

2.2. Geologie

2.2.1. Geologischer Rahmen und Profilübersicht

Die Bohrung Urach 3 durchörterte fast horizontal gelagertes, konkordantes Mesozoikum (ca.400m Jura, 500m Trias), mächtige Rotliegendensedimente sowie Oberkarbon (DIETRICH 1982, Abb.2).

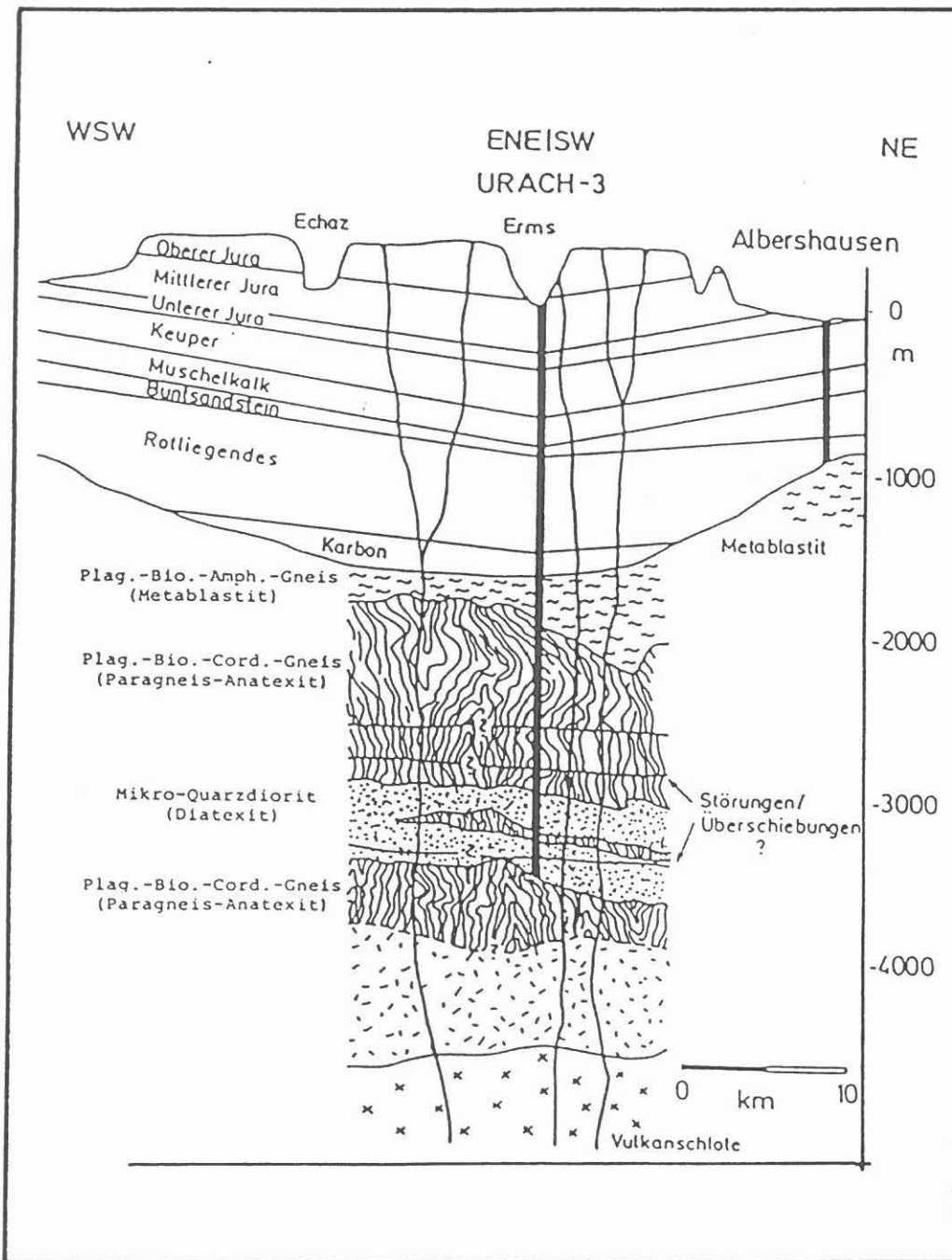


Abb.2: Geologisches Profil der Bohrung Urach 3 (nach: DIETRICH 1984)

Bei 1602m u.G. erreichte die Bohrung kristallines Grundgebirge, das auf Grund seiner petrographischen und geochemischen Charakteristika zum WSW-ENE-streichenden, moldanubischen Kristallin-gürtel des variszischen Gebirges gehört. Die wenig abwechs-lungsreiche Folge von Metablastiten, Metatexiten und Diatexiten (Abb.2) läßt sich mit der sogenannten "monotonen Serie" des Moldanubikums korrelieren (SCHÄDEL 1982).

Für die Genese des Kristallins (Abb.3, SCHÄDEL 1982) sind eine Hochdruck-Niedrigtemperatur-Metamorphose in geringer Tiefe während des Kambriums und eine zweimalige Anatexis mit zwis-chenzeitlicher kinematischer Metamorphose, die zur Vergneisung führte, während des Ordoviciums verantwortlich. Die variszische Ära hinterließ bis auf die Intrusion von granitischen Plutonen kaum Spuren. Während des Perms kam es zum Ausbruch eines sauren Vulkanismus, wovon Quarz-Porphyr-Decken und -Gänge zeugen. Der miozäne "Uracher Vulkanismus" förderte hingegen ultra-basische Tuffe (Melilith-führende Olivin-Nephelinite), die dem oberen Mantel entstammen (MÄUSSNEST 1982).

Infolge der Anatexis und des Magmatismus durchsetzen granitoide Dykes und Aplite sowie Durchschlagsröhren das zum Teil stark hydrothermal alterierte und intensiv zerklüftete Gebirge.

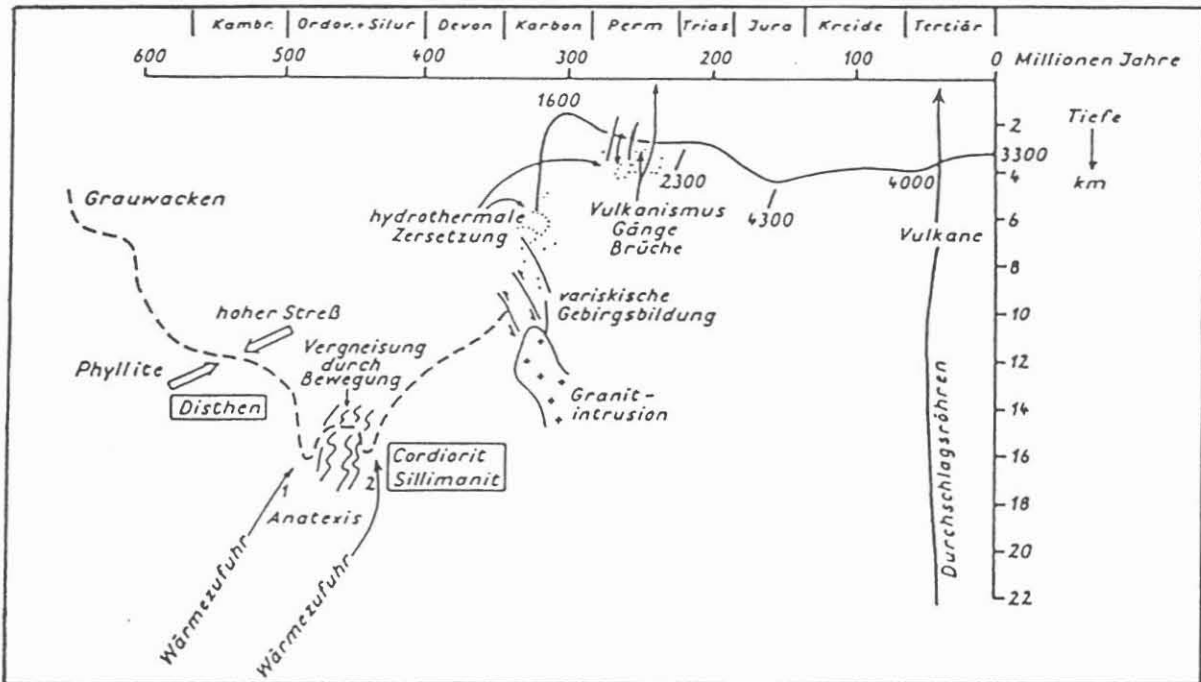


Abb.3: Genese des kristallinen Grundgebirges (Urach 3)
(aus: SCHÄDEL 1982)

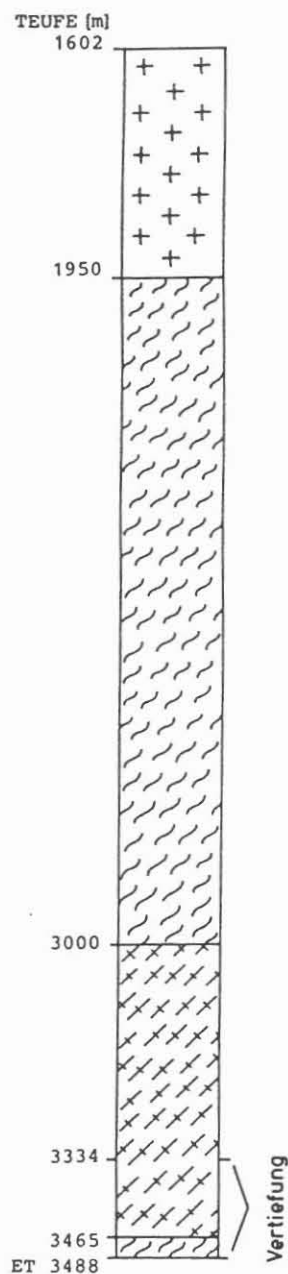
Im einzelnen wurden von der Bohrung Urach 3 folgende kristal-line Einheiten angetroffen (STENGER 1982, DIETRICH 1984, BAUER 1987) (vgl. Abb.2):

- grobkörnige, metablastische PLAGIOKLAS-BIOTIT-AMPHIBOL-GNEISE (Metablastit)

- mittel- bis grobkörnige, metablastische oder metatektische PLAGIOKLAS-BIOTIT-CORDIERIT-GNEISE (Paragneis-Anatexit)

- klein- bis mittelkörnige, homogene MIKRO-QUARZDIORITE (Diatexit)

- erneute Abfolge des PLAGIOKLAS-BIOTIT-CORDIERIT-GNEISES (Paragneis-Anatexit)



In dem für die hier anstehenden Untersuchungen interessanten Bereich der Vertiefung (3334m -3488m) repräsentiert der Kerngewinn mit insgesamt 9.55m etwa 6% der 154m langen Strecke (DIETRICH 1987). Der größte Teil dieses kristallinen Abschnitts läßt sich somit nur durch die nach jedem Bohrmeter entnommenen Spülproben belegen. Während des Abteufens der Bohrung wurden diese in 5 Bohrkleintypen unterteilt und in Form eines Sampler-Logs aufgetragen (DIETRICH 1984).

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnten die Spülproben

nochmals überarbeitet werden, wobei sich 19 Bohrkleintypen differenzieren ließen (DIETRICH 1987).

Mit Hilfe dieser Daten wurde der Versuch unternommen, ein detailliertes geologisches Profil, ursprünglich im Maßstab 1:200, für den Bereich der Vertiefung aufzustellen (Abb.4):

Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis lassen sich durch textuelle Unterschiede, granitoide und aplitische Einschaltungen, Zonen intensiver hydrothermalen Alteration und Klüftigkeit untergliedern; die teufengerechte Einordnung dieser Merkmale erfolgte jedoch überwiegend auf der Basis von Spülproben und kann daher in keinem Falle zuverlässig sein.

2.2.2. Petrographie

Um den Einfluß der Gesteinspetrographie auf die bohrlochgeophysikalischen Messungen präzisieren zu können, stand die makroskopische und mikroskopische Beschreibung des Kernmaterials am Anfang der Studie. Wesentliche Anhaltspunkte hierzu boten die Kernaufnahmen von DIETRICH und NETH (DIETRICH 1987) sowie petrographische Untersuchungen von BAUER (1987) und STENGER (1982).

2.2.2.1. Mikro-Quarzdiorit

Nach petrographischen Analysen von STENGER (1982) wurden die in ca. 3000m bis 3334m Tiefe (E.T. der 1.Bohrphase) anstehenden Gesteine als DIATEXITE charakterisiert. Während der Vertiefung der Bohrung (2.Bohrphase) wurde das gleiche Gestein weiterhin bis zu einer Teufe von ca. 3465m angetroffen und bei der makroskopischen Kernaufnahme entsprechend als "Diatexit" beschrieben (DIETRICH 1987).

Inzwischen ergaben neue mikropetrographische Befunde von WIMMERAUER (in DIETRICH 1984) und BAUER (1987), daß es sich bei dem Gesteinstyp der Vertiefung nicht um einen Diatexit, sondern vielmehr um einen MIKRO-QUARZDIORIT handeln soll. Aus Gründen der Einheitlichkeit im Hinblick auf Arbeiten zur Vertiefung der Bohrung Urach 3 wird daher die Bezeichnung "Mikro-Quarzdiorit" übernommen.

Das schwarzgraue, spröde Gestein bricht muschelrig-splittrig und ist von meist mikrokristalliner sowie von feinst- bis fein- und gleichkörniger Struktur. Schwach angedeutete, metamorphe Paralleltextur (Einregelung der Biotite) ist im Hangenden kaum (bis ca. 3368m, Abb.4), zum Liegenden hin zunehmend, zu beobachten. Pyrit scheint im Hangenden angereichert zu sein (Sampler-Log).

Mineralbestandteile sind Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Biotit und Amphibol. Akzessorisch treten Apatit, Allanit, Monazit, Titanit, Zirkon, Xenotim und Erz (Ilmenit, Magnetit, Pyrit und weitere Cu-Fe-Zn-Pb-Sulfide) auf (BAUER 1987). Als Sekundär-

minerale liegen Hellglimmer, Carbonat, Epidot und Chlorit vor.

- Gefeldert oder undulös auslöschend füllen die xenomorphen Quarze mit gelegentlichen Rutileinschlüssen Zwickel oder verzahnen sich suturartig zu polykristallinen Aggregaten.

- Die Plagioklase sind meist hypidiomorph bis xenomorph, seltener als idiomorphe Blasten, ausgebildet. Engständige, polysynthetische Verzwilligung ist charakteristisch; ebenso läßt sich Zonarbau beobachten. Nach BAUER (1987) können die zonar gebauten Plagioklase im Kern An-Gehalte zwischen 43% und 63%, in den Randzonen zwischen 22% und 36% aufweisen. Wechselnd intensive Saussuritisierung der Plagioklase spiegelt die unterschiedlich starke Alteration des Gesteins wider. Hellglimmer (Serizit) und Carbonate sind die dabei im wesentlichen gebildeten Sekundärminerale. Teilweise ist die Umwandlung soweit fortgeschritten, daß der Plagioklas nur noch reliktsch erhalten ist.

- Kalifeldspäte treten vereinzelt als hypidiomorphe Kristalle auf.

- Die Biotite zeigen mehr oder weniger deutlichen Pleochroismus und liegen entweder als isolierte, idiomorphe Scheiter oder als lockeres Haufwerk vor. Als Umwandlungsprodukt des Biotits ist Chlorit zu beobachten.

- Amphibole, meist eng mit Biotit verwachsen, sind nur selten zu erkennen.

- Dünne Apatitnadeln durchwachsen nahezu alle Minerale.

2.2.2.2. Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis

Der bereits in ca. 1950m bis 3000m Tiefe angetroffene, metablastische bis metatektische Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Paragneis-Anatexit), der nach STENGER (1982) wahrscheinlich aus einer tonigen, Ca-reichen Grauwacke hervorging, wurde im Liegenden des Mikro-Quarzdiorits erneut erbohrt (ca. 3465m-3488m E.T., Abb.4).

Makroskopisch handelt es sich um einen bläulich-grauen bis dunkelgrünen Migmatit von mittel- bis grobkörniger und makrokristalliner Struktur. Das inhomogene, massige Gestein zeigt nahezu saiger stehende Lagentextur. Sowohl typisch metablastische, als auch durch metatektische Überprägung lagig-schlierige Bereiche (STENGER 1982) wechseln in cm-Abständen miteinander ab; d.h. Paläosom, Metatekt und Restit i.e.S. sind gleichermaßen zu identifizieren.

Neben den schwer mobilisierbaren metamorphen Relikten bestehen die Melanosome vorwiegend aus cm großen, bläulich-grünlichen, pinitisierten Cordieriten und chloritisierten Biotiten mit wenig Quarz und Feldspat. Die leukokraten, pegmatoiden Meta-

tektbänder und -schlieren setzen sich hauptsächlich aus grobkörnigem Quarz und Plagioklas, zum Teil Kalifeldspat und wenig Cordierit zusammen. Stellenweise ist an sie eine intensive sulfidische Vererzung gebunden. Akzessorien sind Zirkon, Apatit, Monazit, Erz (Pyrit, Ilmenit, Hämatit), Granat und wenig Graphit (BAUER 1987).

- Die xenomorphen Quarze sind gefeldert bzw. löschen undulös aus und verzahnen sich meist suturartig zu polykristallinen Aggregaten.

- Die Plagioklaskristalle, xenoblastisch und oft polysynthetisch verzwilligt, sind fast immer stark saussuritisiert, so daß oft nur noch "skelettartige, weitgehend aus Albit bestehende Restgitter" (BAUER 1987) zurückbleiben. Die dabei entstandenen Sekundärminerale sind Hellglimmer (Serizit), Carbonate (Calcit) und Chlorite.

- Einschlußreiche Kalifeldspat-Xenoblasten liegen in wechselndem Mengenverhältnis vor.

- Die Biotite sind fast immer chloritisiert und umfließen bänderförmig oder netzartig die Feldspatblasten. Seltener sind isolierte Biotitschuppen und -fetzen zu erkennen.

- Cordierit bildet gelbliche, runde bis ovale Pseudomorphosen aus Hellglimmer. Frische, gut erhaltene Kristalle sind nicht zu beobachten.

- Die als isolierte Einsprenglinge meist regellos im Gestein verteilten Erzminerale durchziehen den Gneis in leukokrateren Bereichen in Form von feinen Äderchen.

2.2.2.3. Granitoide Einschaltungen und Aplite

Innerhalb des Mikro-Quarzdiorits treten schlierig-nebulitische Nester und 4-10cm mächtige Gängchen granitoiden Charakters auf (Abb.4). Nach WIMMENAUER (in DIETRICH 1984) und BAUER (1987) sind diese als Differentiate des Mikro-Quarzdiorits zu interpretieren, während es sich nach STENGER (1982) um diatektisch mobilisierte Gesteine handelt. Ebenfalls lassen sich wenige, bis zu 5m mächtige Aplite beobachten. Der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis wird von kleineren, durchschnittlich 2cm mächtigen, granitoiden Gängen durchzogen.

Das Gestein ist von hellgrauer Farbe, fein- bis mittelkörnig und kann auf Grund von Kalifeldspatblasten ein porphyrtartiges Gefüge zeigen (STENGER 1982).

Mineralbestandteile sind Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Biotit und Akzessorien (Apatit, Zirkon). Besonders an die Aplite scheinen viele sulfidische Erze (z.B. Pyrit, Chalkopyrit, Galenit, Sphalerit u.s.w.) gebunden zu sein, die zusammen mit Allanit und Monazit häufig in Vergesellschaftung mit Biotit auftreten (BAUER 1987).

2.2.2.4. Hydrothermale Veränderungen

Im Bereich der Vertiefung ist das gesamte Kristallin mehr oder weniger stark alteriert.

Die retrograden Prozesse, die das Gestein unter hydrothermalen Bedingungen veränderten, sollen vor maximal 180 Mio. Jahren stattgefunden haben (HAMMERSCHMIDT & WAGNER 1983). Nach BAUER (1987) haben die Umwandlungsreaktionen das Kristallin zum einen in seiner Gesamtheit erfaßt, zum anderen führten sie zu partiell besonders intensiv alterierten Zonen, die im wesentlichen an Klüfte gebunden sind.

Die auffälligsten Umwandlungen sind im unteren Bereich des Mikro-Quarzdiorits (Kernnr. 53, 55; Abb.4) und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis zu beobachten, so daß die Alteration mit der Tiefe zuzunehmen scheint. Die veränderten Bereiche sind, insbesondere im Mikro-Quarzdiorit, an Klüfte und feine, netzartig verlaufende Äderchen gebunden, die mit Carbonaten (Ankerit, Calcit), Feldspäten (Adular, Albit), sulfidischen Erzen (hauptsächlich Pyrit), selten Anhydrit und Quarz gefüllt sind (BAUER 1987).

Das beidseitig der Klüfte im mm-Bereich gebleichte Gestein ist hellgrün mit gelegentlich leicht violetter Anflug und zeigt unter dem Mikroskop folgende typische Merkmale:

- die Plagioklase sind saussuritisiert, d.h. in ein Gemenge von feinschuppigem Hellglimmer, Calcit und gelegentlich Chlorit umgewandelt. Albit bleibt reliktdisch erhalten.
- Kalifeldspat ist weniger stark zersetzt, neigt jedoch auch zur Hellglimmerbildung.
- Die Biotite sind chloritisiert bzw. in Hellglimmer umgewandelt. Eisen- und titanhaltige Phasen werden ausgeschieden (Rutilnadeln, Leukoxen; STENGER 1982, BAUER 1987).
- Die Cordierite liegen als von Hellglimmern ausgefüllte Pseudomorphosen vor (Hydromuskovite).
- Muskovite sind als Neubildungen zu beobachten.
- Abscheidungen sulfidischer Erze treten am Rand der alterierten Zonen auf (BAUER 1987).

Die Paragenese dieser Umwandlungsminerale (Hellglimmer, Chlorit, Calcit, Albit) ist charakteristisch für eine relativ niedriggradierte Grünschieferfazies (SCHREYER 1967).

2.2.2.5. Quantitative Mineralbestände und Klassifikation der Gesteine

Mittels Integrationsanalyse wurden die Mineralbestände quanti-

tativ an 13 Schlifften bestimmt, die zum Teil von Kernproben in Aachen angefertigt, zum Teil leihweise überlassen worden waren (mit frdl. Genehmigung von Herrn Dr. F. BAUER).

Pro Schliff ließen sich 1000 bis 2000 Punkte auszählen. Dabei bot sich für den feinkörnigen Mikro-Quarzdiorit eine 48-fache und für den grobkörnigen Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis eine 28-fache Vergrößerung an.

Zersetzungsprodukte (Hellglimmer, Chlorit), die eine eigene, dem Primärmineral nicht mehr eindeutig zuzuordnende Sekundärphase bilden, werden separat aufgeführt. Hingegen mußten Kalifeldspat und Plagioklas weitgehend unter dem Oberbegriff "Feldspat" zusammengefaßt werden, da sich die beiden Minerale auf Grund der zum Teil sehr intensiven Serizitisierung - insbesondere des Plagioklases - kaum noch voneinander unterscheiden lassen. Sowohl im Mikro-Quarzdiorit als auch im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis tritt Kalifeldspat jedoch nur untergeordnet auf (durchschnittl. 3% bzw. 6%).

Die Ergebnisse der einzelnen Modalanalysen sowie die Durchschnittswerte für die jeweiligen Kerne und Gesteinstypen sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen (1):

- innerhalb des gesamten Mikro-Quarzdiorits bleiben die prozentualen Anteile der einzelnen Minerale bis auf Kernnr. 52 (extrem niedrige Quarz- bzw. hohe Biotitgehalte) relativ gleich (Tab.2). Die Kernnr. 53 und 55 haben, wie bereits makropetrographisch beobachtet, eine intensive hydrothermale Alteration erfahren, was sich in der zunehmenden Hellglimmer- und Chloritführung widerspiegelt. Opake Minerale, d.h. insbesondere sulfidische Erze sind im Hangenden häufiger als im Liegenden vertreten (s. auch Abb.4).

- Als ein ehemals sedimentäres, anatektisch partiell beanspruchtes Gestein zeigt der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis eine quantitativ heterogenere mineralogische Zusammensetzung als der Mikro-Quarzdiorit. Innerhalb eines nur 1.30m mächtigen Bereiches (Kernnr.56) können die einzelnen Mineralbestandteile bis zu ca. 20% alterieren (Tab.1).

Im Vergleich zum Mikro-Quarzdiorit ist der Gneis im Durchschnitt etwas quarz- und kalifeldspatreicher, d.h. insgesamt saurer (Tab.2). Ebenso ist ein erhöhter Anteil an Hellglimmer und Chlorit infolge der intensiveren Alteration sowie eine etwas stärkere Erzführung zu verzeichnen. Der Biotitgehalt ist hingegen wesentlich geringer als im Mikro-Quarzdiorit.

- Bei den granitoiden Einschaltungen ist der sehr viel höhere Kalifeldspatgehalt sowie das Fehlen der Sekundärminerale (Hellglimmer, Chlorit) von Bedeutung.

(1) Die Angaben für die granitoiden Einschaltungen beziehen sich auf STENGER (1982).

Schliff Nr.	gez. P. zahl	Teufe	Kern-Nr.	Quarz	F. spat	Biotit	Chlorit	Hellgl.	Amphib.	Cord.	Opake	Gesamt %	
7	2000	3374,52	51	31,7	38,5	28,9	-	-	0,7	-	0,2	100	
52/IIII	1000	3392,85	52	13,7	47,0	39,2	-	-	-	-	0,1	100	
52/IIIIj	1000	3392,85	52	22,5	42,6	33,9	-	-	0,3	-	0,7	100	Mikro-
4	1000	3413,21	53	28,3	40,7	24,4	-	6,6	-	-	-	100	
3	1000	3440,60	54	31,2	43,9	24,7	-	-	0,2	-	-	100	Quarz-
8a	1000	3462,90	55	32,6	42,9	24,1	0,2	0,2	-	-	-	100	
8b	2000	3463,18	55	29,7	43,0	25,7	0,4	1,0	0,1	-	0,1	100	Diorit
1	1000	3463,52	55	26,8	42,2	26,0	-	5,0	-	-	-	100	
9	2000	3480,70	56	30,9	35,2	14,6	2,8	14,0	-	2,4	0,1	100	Plag.-
10	2000	3481,00	56	28,9	45,7	8,2	1,9	10,2	-	4,3	0,8	100	Biotit-
56/2I	2000	3481,35	56	45,0	37,4	8,9	3,6	1,6	-	3,5	-	100	Cord.-
56/2II	2000	3481,45	56	30,2	51,6	0,3	14,4	1,5	-	1,7	0,3	100	
56/3II	2000	3482,00	56	23,6	34,9	12,0	6,4	19,8	-	2,1	1,2	100	Gneis

Tab.1: Modalbestände von kristallinen Gesteinen aus der Bohrung Urach 3

Teufe	Kern-Nr.	Quarz	F. spat	Biotit	Chlorit	Hellgl.	Amphib.	Cord.	Opake	Gesamt
3374,5-3375,2	51	31,7	38,5	28,9	-	-	0,7	-	0,2	100
3392,4-3393,6	52	18,1	44,8	36,6	-	-	0,1	-	0,4	100
3413,0-3414,4	53	28,3	40,7	24,4	-	6,6	-	-	-	100
3440,5-3441,35	54	31,2	43,9	24,7	-	-	0,2	-	-	100
3461,0-3463,6	55	29,7	42,7	25,3	0,2	2,1	-	-	-	100
3480,5-3483,3	56	31,7	41,0	8,8	5,8	9,4	-	2,8	0,5	100
<u>Durchschnittswerte:</u>										
Mikro-Quarzdiorit:		27,8	42,1	28,0	0,1	1,7	0,2	-	0,1	100
Plag.-Biotit-Cord.-Gn.:		31,7	41,0	8,8	5,8	9,4	-	2,8	0,5	100
Granitoide Einsch.:		29,3	42,8/17,4 Plag./Kfp.	10,1	-	-	-	-	0,4	100

Tab.2: Modalbestände von kristallinen Gesteinen aus der Bohrung Urach 3
(Durchschnittswerte)

Die Darstellung der Modalanalysen im Dreiecksdiagramm QUARZ-FELDSPÄTE-MAFITE (Abb.5A) verdeutlicht graphisch den höheren Anteil an Mafiten im Mikro-Quarzdiorit, während sich der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis und die granitoiden Einschaltungen quarz- und feldspatbetonter zeigen.

Aus dem Diagramm QUARZ-PLAGIOKLAS-KALIFELDSPAT (1) nach STRECKEISEN (1976) wird ersichtlich, daß die Mikro-Quarzdiorite tonalitischen und die Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneise granodioritischen Charakter haben (Abb.5B). Auch die saureren granitoiden Einschaltungen fallen im Durchschnitt noch in das Feld der Granodiorite.

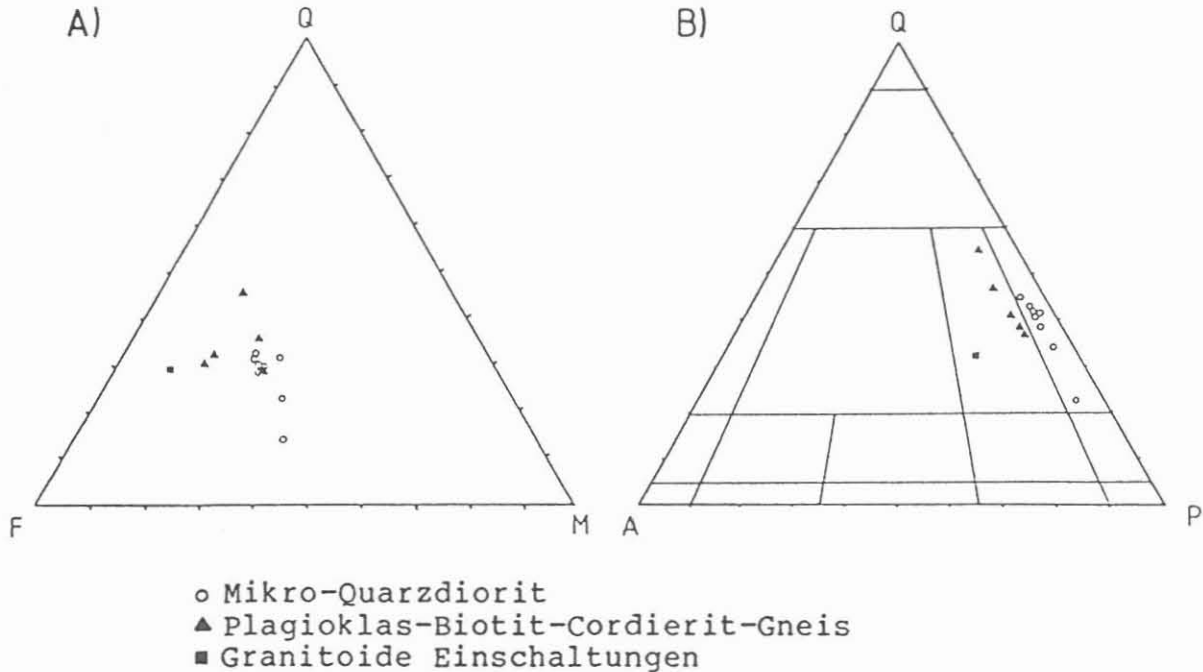


Abb.5: Mineralbestände des Mikro-Quarzdiorits, des Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneises und der granitoiden Einschaltungen im Diagramm QUARZ-FELDSPÄTE-MAFITE (A) und im Diagramm QUARZ-PLAGIOKLAS-ALKALIFELDSPAT (nach STRECKEISEN 1976) (B)

Ein ähnliches Bild ergibt sich aus der Darstellung von 18 chemischen Analysen (BAUER 1987) im binären DE LA ROCHE Diagramm (1980). Für den Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis läßt sich der granodioritische, für den Mikro-Quarzdiorit ein tonalitischer bis monzodioritischer bzw. quarzmonzonitischer und für die granitoiden Einschaltungen ein tonalitischer bis granitischer Charakter ablesen (Abb.6).

- (1) Die Anteile an Kalifeldspat für Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis sind mit durchschnittlich 3% bzw. 6% geschätzt.

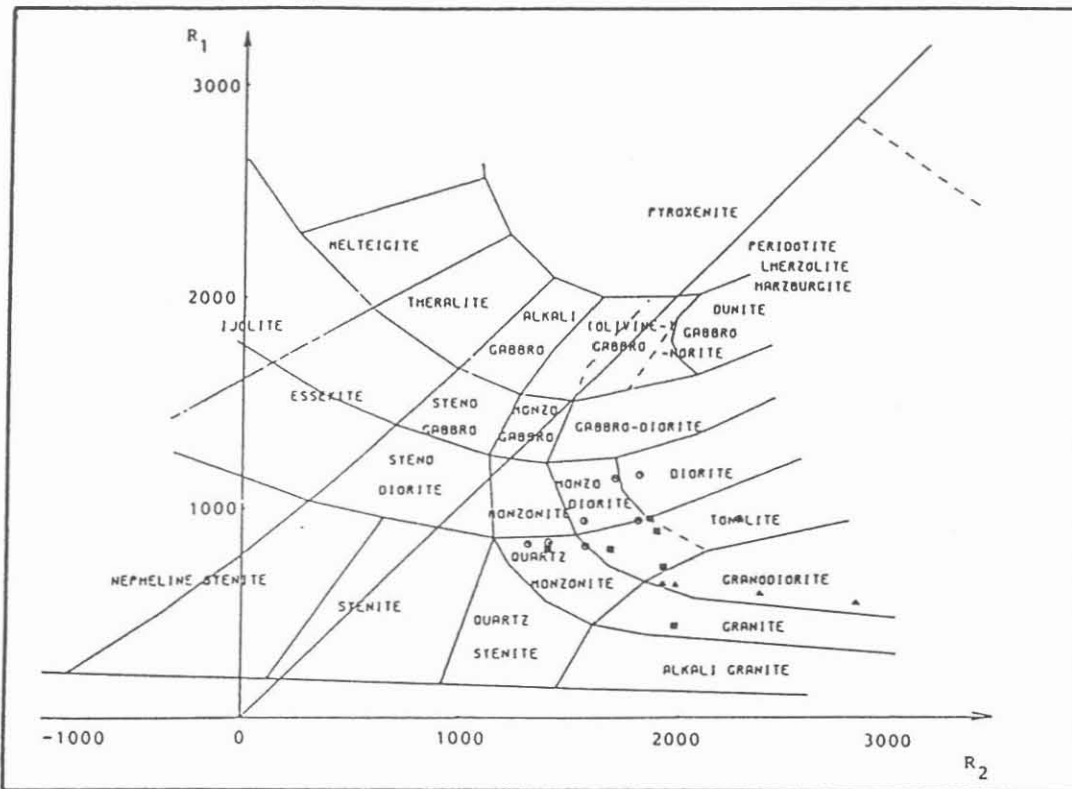


Abb.6: Darstellung von
 ○ Mikro-Quarzdiorit
 ▲ Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis
 ■ Granitoiden Einschaltungen
 im R1-R2-Diagramm nach DE LA ROCHE & LETERRIER (1980)

2.2.3. Gefügekundliche Beobachtungen

Sämtliche an den Kernen erkennbaren Gefügemerkmale wurden aufgezeichnet, eingemessen und um die Bohrlochabweichung (N 64° E bis N 76° E; 8° - 16° Neigung) korrigiert (DIETRICH 1984). Auf Grund der Gefügeanalysen und des geologischen Profils (Abb.2) ergibt sich eine gestörte Lagerung des Kristallins, verursacht durch Überschiebungen. Die Bewegungen erfolgten "an Aufschiebungen bzw. schrägen Aufschiebungen" (DIETRICH 1987).

Die mit stark wechselndem Fallwinkel (10° - 90°) vornehmlich W-E streichenden (75° - 105°) Kluftflächen zeigen zum Teil lineare Striemungen und Harnische, zum Teil sind sie mit Carbonat, Chlorit, Feldspat, Quarz und sulfidischem Erz (Pyrit) bestegt oder verheilt. Offene Klüfte sind im gesamten Bereich der Vertiefung mehr oder weniger häufig zu verzeichnen; Klüfte mit Bleichzonen lassen sich am vorhandenen Kernmaterial nur im Mikro-Quarzdiorit beobachten. Dieser weist zudem eine höhere Klüftigkeitsziffer sowie eine größere Kluftweite (0.5-2cm) auf als der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (bis 0.5cm; DIETRICH 1984).

Die meist nur angedeutete metamorphe Paralleltextur des Mikro-Quarzdiorits und die Lagentextur des metatektisch beanspruchten Gneises haben steile Einfallswinkel zwischen 50° und 90°.

2.3. Interpretation der bohrlochgeophysikalischen Meßergebnisse

2.3.1. Composite-Log, Cross-Plot, Elektrofaziesdiagramm

Nach Abschluß der Messungen wurden die Ergebnisse von der Firma Schlumberger in die jeweiligen physikalischen Einheiten formatiert, hinsichtlich der Bohrlocheffekte normalisiert, teufenkorrigiert und in Form eines Composite-Logs, ursprünglich im Maßstab 1:200, zur Interpretation überlassen (Abb.7):

- in Spur 9 sind die vom Dual Laterolog (DLL) gemessenen Widerstandskurven mit mittlerer (LLS) und großer Eindringtiefe (LLD) aufgetragen. Beide Logs unterscheiden sich in ihrem Verlauf auf Grund der fehlenden Infiltrationszone im Kristallin kaum voneinander. Da die Meßergebnisse insgesamt Schwankungen über drei Dekaden zeigen (30 bis 50.000 ohm m), scheint das DLL auch im Kristallin empfindlich genug zu sein, um Unterschiede des Gebirgswiderstandes registrieren zu können. Höhere Widerstände als 50.000 ohm m wurden auf Grund der bis dato zur Verfügung stehenden Hardware nicht aufgezeichnet.

- Die Werte des SP-Logs (Spur 8), das weder markante Sprünge noch charakteristische Tendenzen zeigt, schwanken zwischen - 140 mV und + 60 mV. In welchem Maße die einzelnen Potentiale zum elektrischen Eigenpotential beitragen, ist für kristallines Gestein bislang noch nicht bekannt (NAGRA 1985).

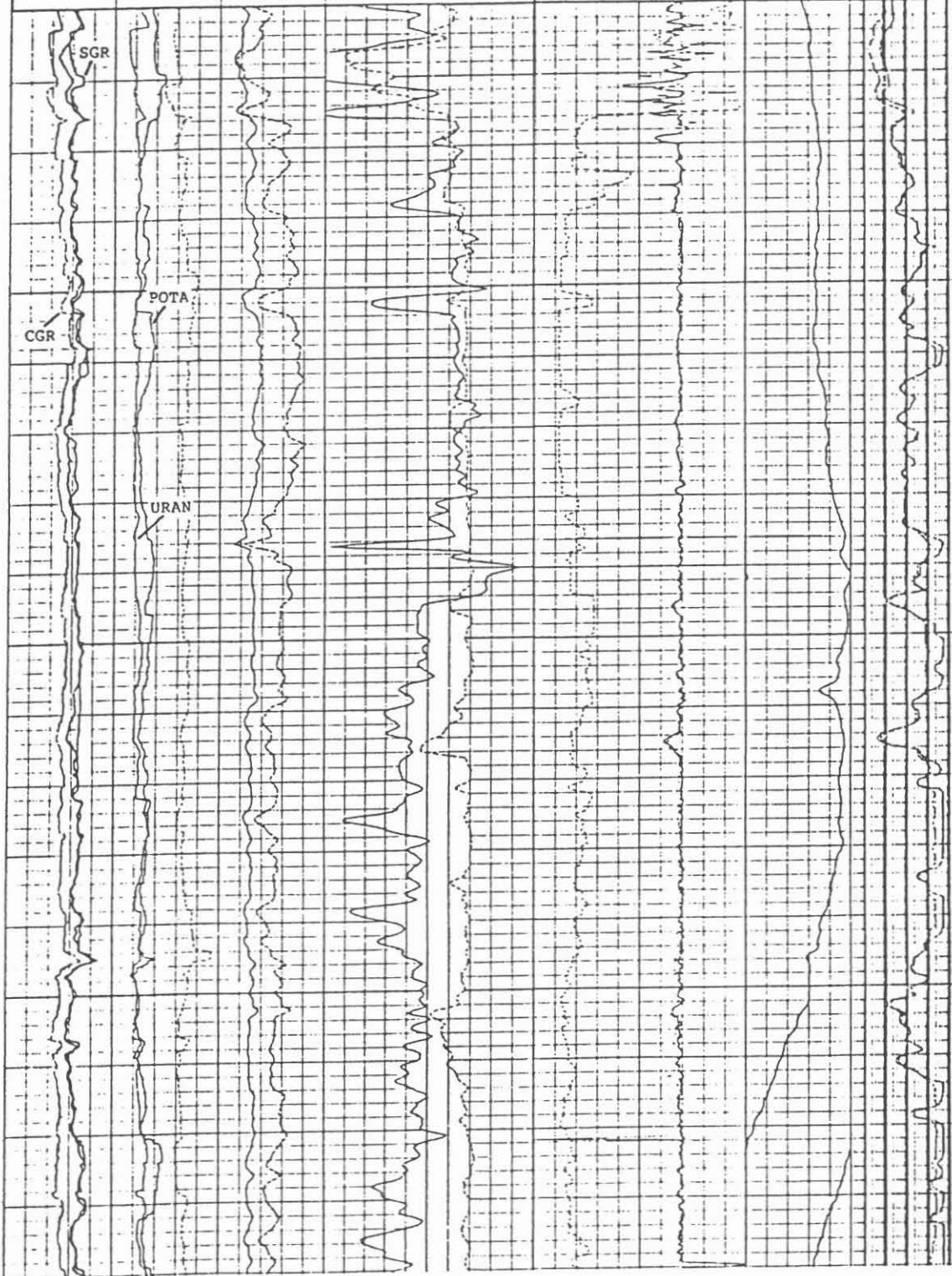
- Wenig charakteristisch sind auch die von der Sonic-Sonde gemessenen Laufzeiten (Spur 7). Die Geschwindigkeiten schwanken im wesentlichen zwischen 5,1 und 6,4 km/sec. Bis auf einige Ausnahmen verlaufen das Short (DT)- und das Long (DTL)-Spacing-Log eng zusammen; die wenigen scharfen Peaks sind wahrscheinlich "cycle skipping" zuzuschreiben.

- Spur 6 gibt Auskunft über den Durchmesser des Bohrlochs, das mit 5 7/8 " abgeteuft wurde. Das Caliber wird vom Liegenden zum Hangenden mit Ausbrüchen bis zu 2" zunehmend schlechter. Oberhalb von 3350m sind die Meßergebnisse wegen der großen Auswaschungen nicht mehr interpretierbar.

- Vom Bohrllochdurchmesser am meisten beeinflusst sind die in Spur 5, 4 und 3 dargestellten Logs der Neutronenporosität (NPFI), der Dichte (RHOB), des photoelektrischen Querschnitts ($U = RHOB \times PEF$) und des photoelektrischen Effekts (PEF). Im Bereich von Auskesselungen wird durch den Einfluß der Spülung eine höhere Neutronenporosität vorgetäuscht, während die Werte für RHOB, U und PEF abnehmen.

Das Compensated Neutron Tool (CNT) ist im allgemeinen auf wassergesättigten Kalkstein geeicht. Für Sedimentgesteine existieren Korrekturkurven, von denen sich Absolutwerte für die jeweilige Lithologie ablesen lassen. Korrekturkurven dieser Art sind für kristallines Gestein bis heute nicht bekannt. Ähnliches gilt für das Litho-Density Tool (LDT). Daher liefern die

CGR (API) 0 300	0 POTA (G) 10	PEF (BARN/EL) 0 10	2.0 PHOB (G/CC)	3.5	120 DT (USEC/FT)	20	SP (MV) -80 20	LLD (OHMM) 2 200000
SGR (API) 0 300	THOR (PPM) 0 40	U (BARN/CC) 0 15	45 NPPI (PU)	-15	120 DTL (USEC/FT)	20	SP (MV) -180 -80	LLS (OHMM) 2 200000
GR-DLL (API) 0 300	URAN (PPM) 0 20				5 CALI (INCH)	15	SP (MV) 20 120	



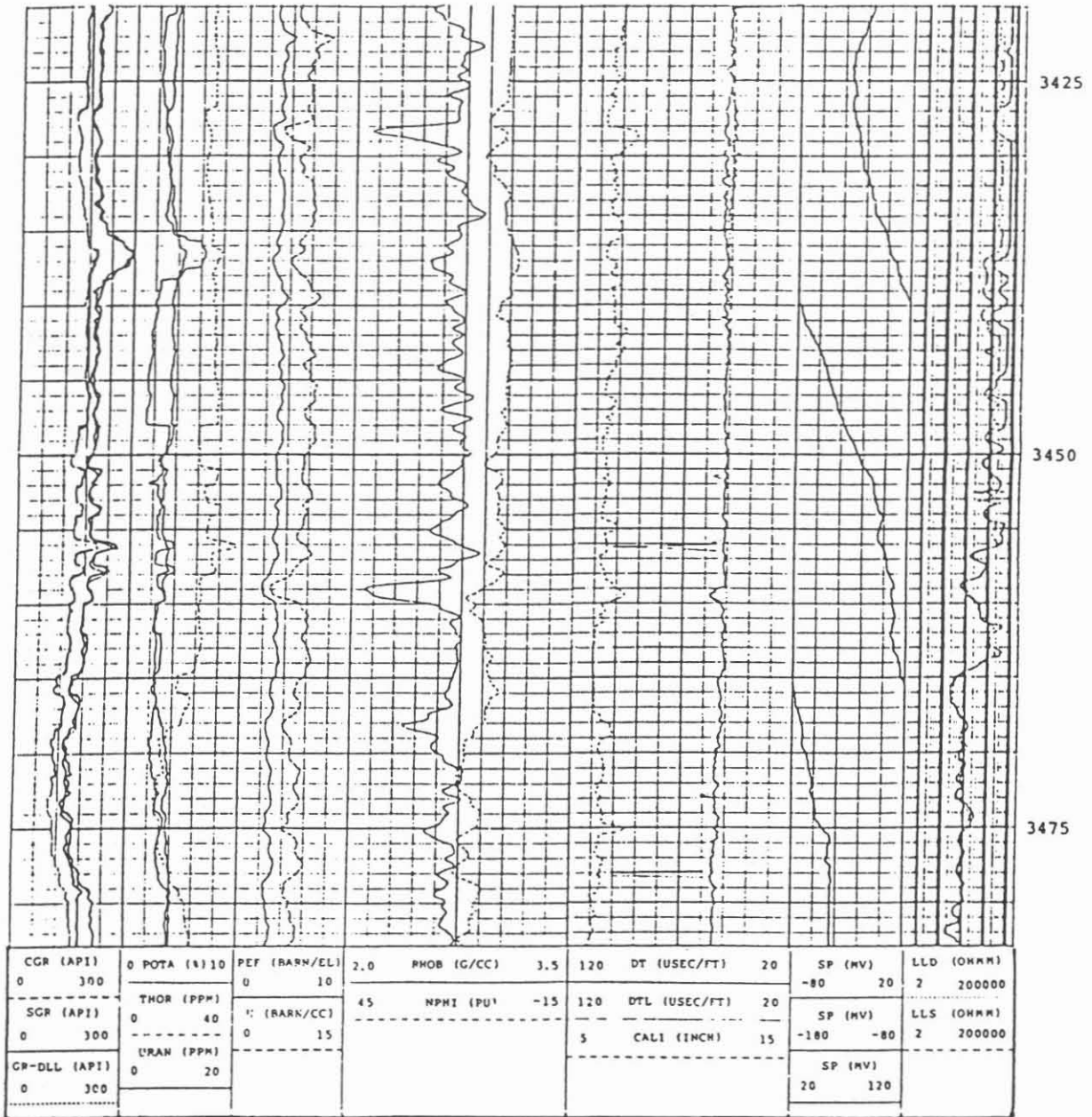


Abb.7: Bohrlochgeophysikalische Messungen aus der Vertiefung der Bohrung Urach 3

von CNT (NPHI 1-17 p.u.) und LDT (RHOB 2-3,35 g/cm³ ; U 3-12,2 barns/cm³ ; PEF 1-4,2 barns/el) gemessenen Logs im Kristallin nur relative Werte für die jeweiligen gesteinsphysikalischen Parameter.

- Die von der Natural Gamma Spectrometry (NGS)- und der Gamma Ray (GR)-Sonde registrierten Kurven der natürlichen Gesteinsradioaktivität sind den Spuren 2 und 1 zu entnehmen. Spektrometrisch wurden Kalium (POTA 2-5 %), Thorium (10-39 ppm) und Uran (2-13 ppm) bestimmt. Die Gesamtstrahlenaktivität (SGR, GR-DLL) schwankt zwischen 135 und 300 API, die Gammastrahlung abzüglich des Urangehaltes (CGR) zwischen 90 und 210 API.

Bei der Auswertung der Daten blieben die SP- und Sonic-Messungen weitgehend unberücksichtigt, da beide Logs nur wenig Charakter zeigen. Ebenso entfiel eine Bearbeitung des LLS, da das LLD auf Grund seiner größeren Eindringtiefe zuverlässigere Werte erwarten läßt. Das Bohrlochcaliber ist über die gesamte Strecke hinweg relativ schlecht, so daß auch in Auskesselungen registrierte Werte miteinbezogen werden mußten.

Um ein erstes Verständnis für die Sondenantworten im Kristallin zu entwickeln, wurden zunächst statistische Mittel herangezogen. Mit der Cross-Plot-Methode 1), bei der zwei bzw. drei digitalisierte Logs teufengleich miteinander korreliert werden, lassen sich Häufigkeitsverteilungen für das Auftreten bestimmter Wertepaare ermitteln. Einzelne charakteristische Punktwolken können lithologischen Parametern wie der mineralogischen oder chemischen Zusammensetzung bzw. dem Gesteinsgefüge zugeordnet werden.

Auf diese Weise kristallisieren sich individuelle Elektrofazies heraus. Eine Elektrofazies, d.h. ein Satz von Logantworten, der eine lithologische Einheit charakterisiert und von anderen unterscheidet, wird konventionell in Form eines Leiterdiagramms dargestellt (SERRA 1986).

Die Skalierung des ersten Elektrofaziesdiagramms (Abb.8) ist so gewählt, daß die aufgetragenen Minimum- und Maximumwerte, die von den einzelnen Sonden für den gesamten Bereich der Vertiefung registriert wurden, ein Referenzrechteck ergeben. Die Daten hierzu wurden aus dem Composite-Log (Abb.7) abgelesen und übersichtlich in der Tabelle 3/5 zusammengestellt.

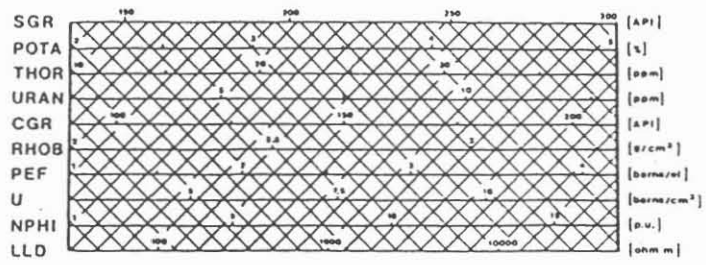
Die insgesamt sehr hohe natürliche Gammastrahlung (bis 300 API) und der große Gebirgswiderstand (50.000 ohm m) lassen vermuten, daß es sich bei der vermessenen Formation um Kristallin handelt (Abb.9 A).

1) Für die Cross-Plots wurde das Caliber auf 6 6/8" eingeschränkt

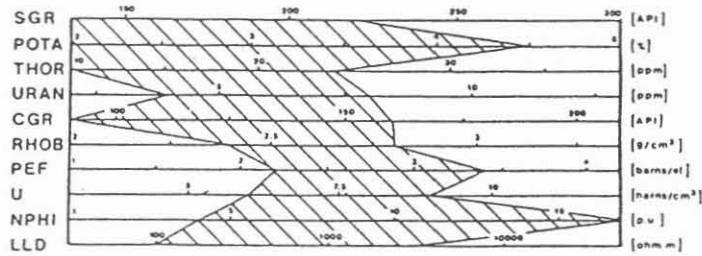
LOG	Offene Klüfte im Plag.-Biotit-Cord.-Gneis	Hydrothermale Alteration im Plag.-Biotit-Cord.-Gneis	Granitoide Einschaltg. im Plag.-Biotit-Cord.-Gneis	Plag.-Biotit-Cord.-Gneis 3464,5-3463 m	Kristallin Bohrg. Urach 3350-3483 m	Mikro-Quarzdiorit 3350-3464,5 m	Mikro-Quarzdiorit (ohne Paralleltect.) 3350-3372 m	Mikro-Quarzdiorit (mit Paralleltect.) 3372-3464,5 m	Granitoide Einschaltg. bzw. Aplite im Mikro-Quarzdiorit	Hydrothermale Alteration im Mikro-Quarzdiorit	Offene Klüfte im Mikro-Quarzdiorit	()
SCR	> 135 ≤ 220	> 135 ≤ 220	> 160 ≤ 220	> 135 ≤ 220	> 135 ≤ 300	> 150 ≤ 300	> 150 ≤ 240	> 170 ≤ 300	> 195 ≤ 300	> 170 ≤ 250	> 150 ≤ 250	API
POTA	≥ 3,5 ≤ 4,5	> 2 ≤ 4,5	≥ 3 ≤ 4,5	> 2 ≤ 4,5	≥ 2 ≤ 5	≥ 2 ≤ 5	≥ 2 ≤ 4	≥ 2 ≤ 5	≥ 3 ≤ 5	≥ 2 ≤ 4	≥ 2 ≤ 4	z
THOR	≥ 10 ≤ 24	≥ 10 ≤ 24	≥ 12 ≤ 24	≥ 10 ≤ 24	≥ 10 ≤ 39	≥ 24 ≤ 32	≥ 24 ≤ 32	≥ 24 ≤ 39	≥ 28 ≤ 39	≥ 24 ≤ 32	≥ 24 ≤ 32	ppm
URAN	> 4 ≤ 8	≥ 5 ≤ 8	≥ 4,5 ≤ 8	≥ 4 ≤ 8	> 2 ≤ 13	> 3 ≤ 5	> 3 ≤ 5	> 2 ≤ 13	> 2 ≤ 13	≥ 5 ≤ 9	> 3 ≤ 8	ppm
CGR	≥ 90 ≤ 160	≥ 90 ≤ 160	> 105 ≤ 160	≥ 90 ≤ 160	≥ 90 ≤ 210	> 120 ≤ 210	≥ 130 ≤ 190	> 120 ≤ 210	≥ 160 ≤ 210	> 120 ≤ 180	> 120 ≤ 180	API
RHOB	> 2,62 ≤ 2,8	> 2,62 ≤ 2,8	> 2,4 ≤ 2,62	> 2,4 ≤ 2,8	> 2 ≤ 3,35	> 2 ≤ 3,35	> 2 ≤ 3,35	> 2,1 ≤ 2,9	> 2 ≤ 2,9	> 2 ≤ 2,9	> 2,1 ≤ 3,2	g/cm³
PEF	> 2,5 ≤ 3,4	> 2,5 ≤ 3,4	> 2,7 ≤ 2,5	≥ 2,2 ≤ 3,4	> 1 ≤ 4,2	> 1 ≤ 4,2	> 1 ≤ 4,2	> 2 ≤ 4,2	> 1 ≤ 3	> 2 ≤ 4	> 2 ≤ 4	barsns/el
U	> 6,6 ≤ 9	> 6,6 ≤ 9	≥ 6 ≤ 6,6	≥ 6 ≤ 9	> 3 ≤ 17,2	> 3 ≤ 12,2	> 3 ≤ 12,2	> 4 ≤ 10	> 3 ≤ 8	> 4 ≤ 9,6	> 4 ≤ 12	barsns/cm³
NPHI	> 10,8 ≤ 17	> 10,8 ≤ 17	≥ 9 ≤ 10,8	> 4 ≤ 17	> 1 ≤ 17	≥ 3 ≤ 9	≥ 3 ≤ 9	> 1 ≤ 17	> 1 ≤ 6	> 4,2 ≤ 17	> 4,2 ≤ 17	p.u.
LLD	> 100 ≤ 1000	> 100 ≤ 1500	≥ 1000 ≤ 3000	> 100 ≤ 3000	> 30 ≤ 50000	≥ 100 ≤ 50000	≥ 100 ≤ 50000	> 30 ≤ 50000	> 6000 ≤ 50000	> 30 ≤ 50000	> 30 ≤ 15000	ohm m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Tab.3: Datenbasis zu den Elektrofaziesdiagrammen (diskriminante Werte sind unterstrichen)

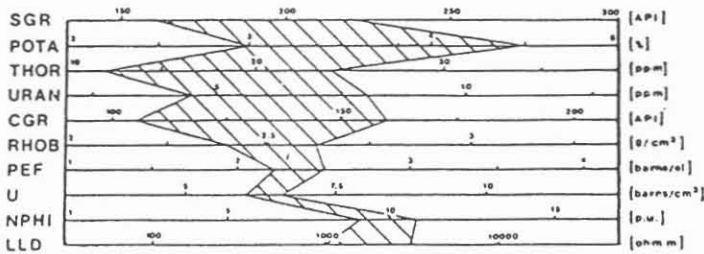
Kristallin



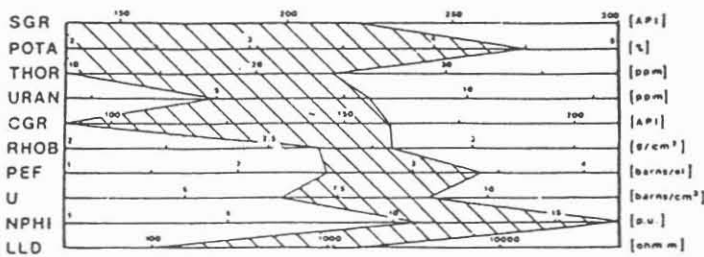
Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis



Granitoide Einschaltungen



Hydrothermale Alteration



Offene Klüfte

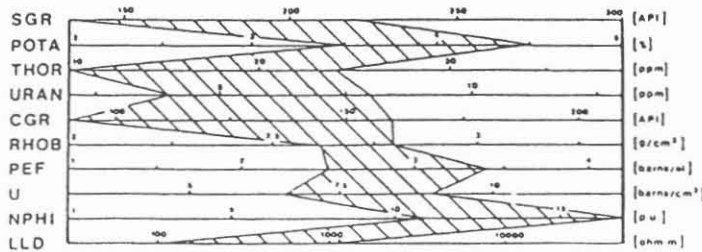
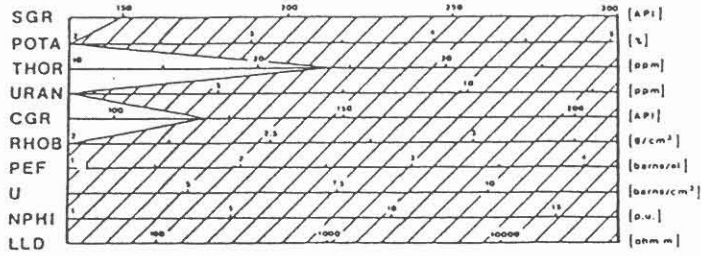


Abb. 8:

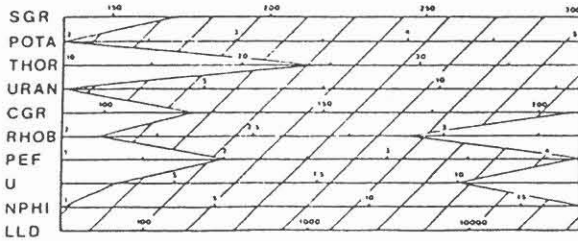
Elektrofazies-
diagramme zur
Entwicklung
eines

FACIOLOGS

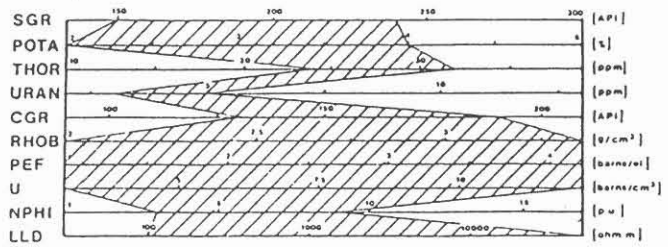
Mikro-Quarzdiorit



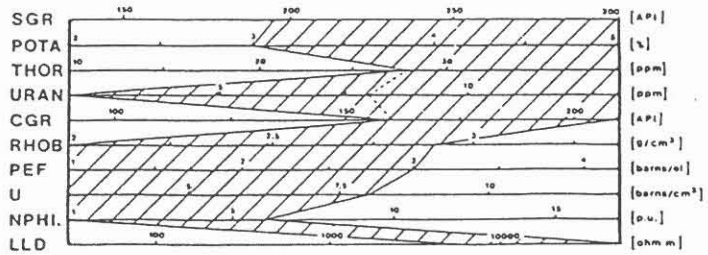
Mikro-Quarzdiorit (mit Paralleltex.)



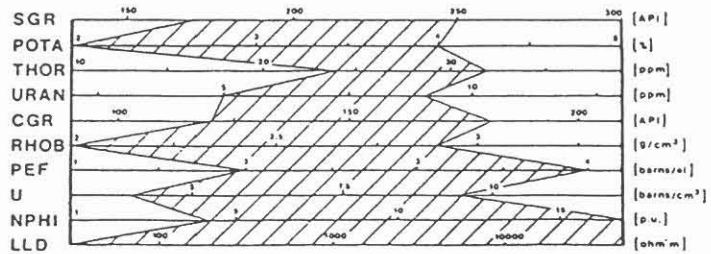
Mikro-Quarzdiorit (ohne Paralleltex.)



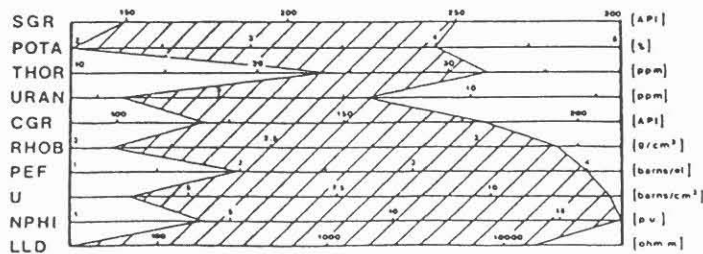
Granitoide Einschaltungen bzw. Aplite



Hydrothermale Alteration



Offene Klüfte



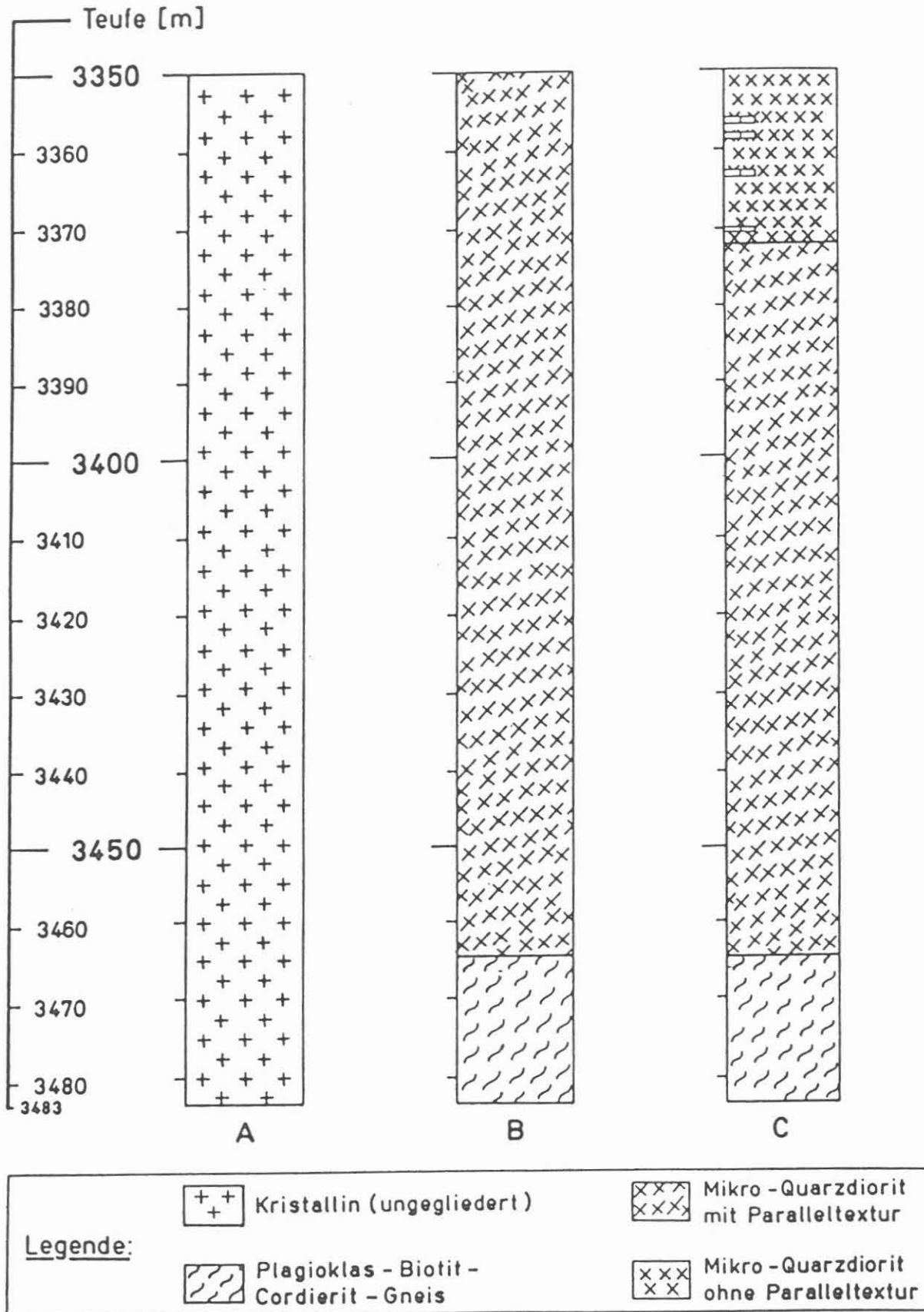
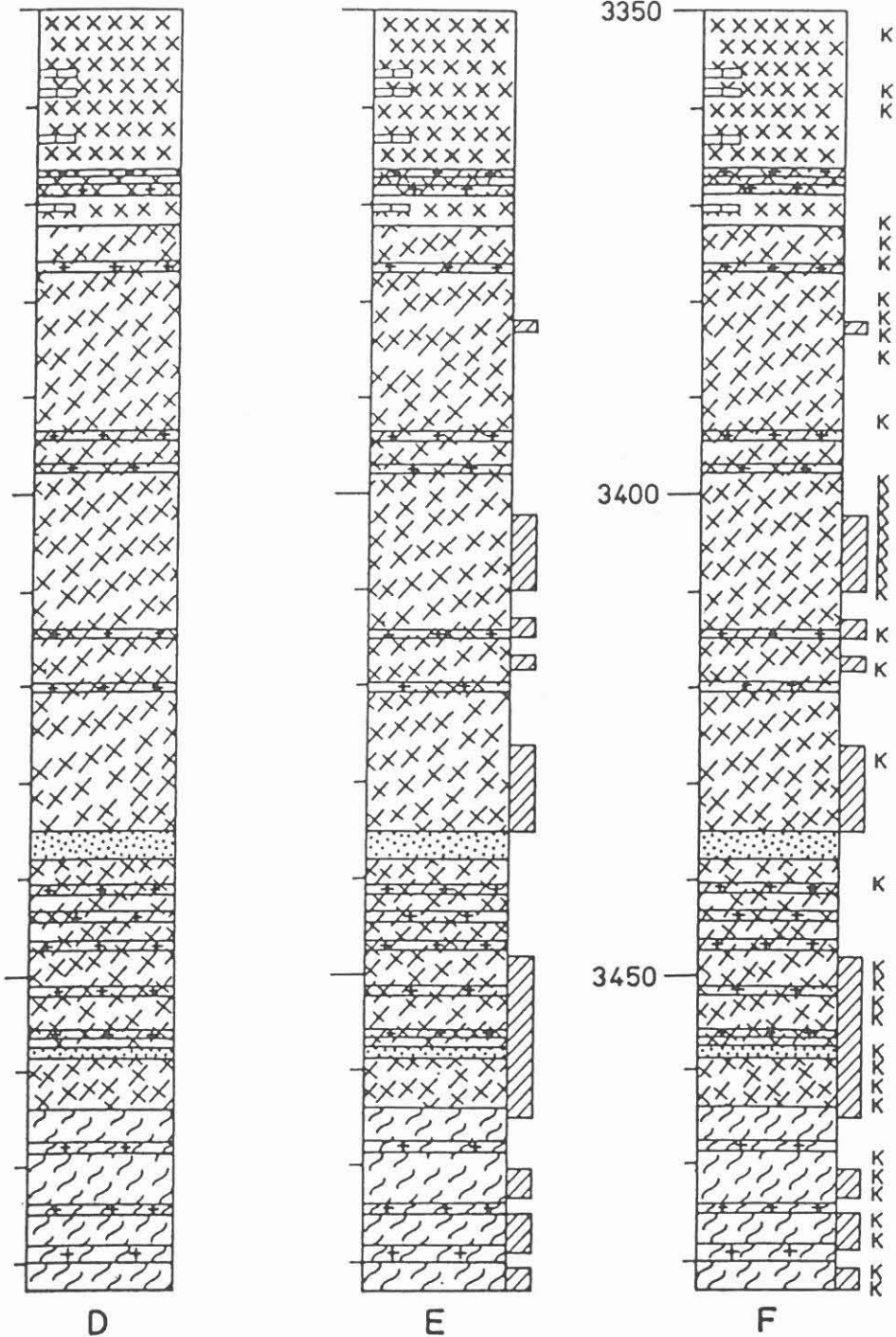


Abb.9: Bohrung Urach 3 - Vertiefung
Entwicklungsstadien eines synthetischen, geologischen Bohrprofils



Granitoide Einschaltungen



Aplit



stärkere Pyritführung



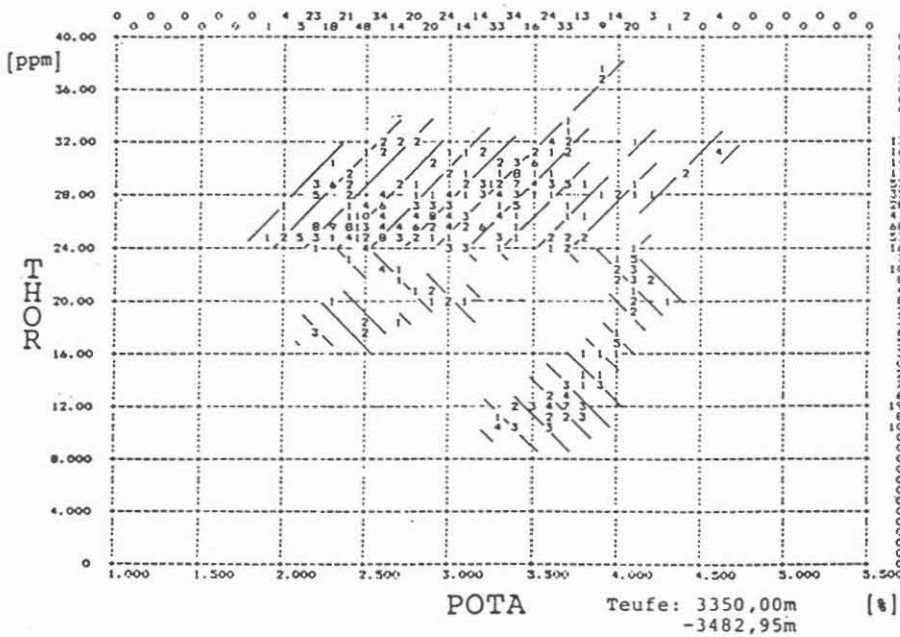
Alterationszone

K

offene Klüfte

2.3.2. Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis

Innerhalb des gesamten Kristallins der Vertiefung sind als wesentliche geologische Einheiten Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis voneinander zu unterscheiden (Abb.4). Auf dem Cross-Plot (1) "Thorium gegen Kalium" (Abb.10) lassen sich zwei Bereiche differenzieren: die Thoriumwerte des einen liegen bei ≥ 24 ppm, die des anderen bei < 24 ppm. Der höhere Thoriumgehalt entspricht dem Mikro-Quarzdiorit, der niedrigere dem Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis, was sich aus dem Mineralbestand der Gesteine erklären läßt:



Anzahl der Meßwerte: 466

Abb.10: Unterscheidung des Mikro-Quarzdiorits  und des Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneises 

Thorium ist auf Grund seines großen Ionenradius, seiner hohen Valenz und Elektronegativität am Aufbau der normalen gesteinsbildenden Minerale kaum beteiligt (Tab.4). Nur in geringen Mengen kann es an diese durch folgende Mechanismen gebunden werden:

- Einbau in fehlerhafte Kristallgitter
- Auftreten in fluiden Einschlüssen
- Ablagerung entlang von Klüften
- Absorption auf Kristalloberflächen

(ADAMS, OSMOND & ROGERS 1959).

(1) Im folgenden gilt die Schraffur von links unten nach rechts oben für den Mikro-Quarzdiorit und v.v. für den Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis.

Die Hauptmenge des Thoriums (bis zu 90 %) konzentriert sich in einigen Akzessorien, in deren Kristallgitter es eingebaut werden kann (ROGERS & ADAMS 1969). Während die häufiger auftretenden Nebengemengteile (Zirkon, Titanit (Sphene), Apatit, Epidot) nur mäßig Thorium aufweisen, ist in den seltener vorkommenden Mineralen (Monazit, Allanit und Thorit) der wesentliche Thoriumanteil konzentriert (LARSEN & PHAIR 1954; vgl. Tab.4).

MINERAL	THORIUM (ppm)	MINERAL	THORIUM (ppm)
Accessory		Major	
Allanite	500-20000	Biotite	0.5-50
Apatite	20-150	Hornblende	5-50
Epidote	50-500	Potassium feldsp.	3-7
Magnetite	0.3-20	Olivine	low
Monazite	25000-200000	Plagioclase	0.5-3.0
Sphene	100-600	Pyroxene	2-25
Xenotime	low	Quartz	0.5-6.0
Zircon	50-4000		

Tab.4: Thorium in Mineralen magmatischer Gesteine
(nach: ADAMS, OSMOND & ROGERS 1959)

- Im Gegensatz zum Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis treten im Mikro-Quarzdiorit zum einen Hornblenden auf, zum anderen enthält er im Durchschnitt ca. 20 % mehr Biotit (Tab.2). Unter den gesteinsbildenden Mineralen besitzen gerade diese beiden den größten Anteil an Thorium (Tab.4).

- Von den thoriumreichen Akzessorien sind Apatit und Monazit in beiden Gesteinen vertreten (Kap. 2.2.2.). Epidot, Titanit, Magnetit und insbesondere Allanit werden jedoch nur im Mikro-Quarzdiorit beobachtet, der zudem mehr Zirkone als der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis enthält.

Spektrometrische Untersuchungen an Gesteinsproben aus dem Bereich oberhalb der Vertiefung ergaben ebenfalls unterschiedliche Thoriumwerte für Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Tab.5).

Im Hinblick auf die Loginterpretation kann der Thoriumgehalt demnach als ein eindeutiges Unterscheidungskriterium zwischen den beiden lithologischen Einheiten gelten. Der Vergleich der Laborergebnisse (Tab.5) mit denen der bohrlochgeophysikalischen Messungen zeigt zudem, daß die NGS-Sonde auch im Kristallin recht zuverlässige Absolutwerte liefert.

Differenziert man im Composite-Log (Abb.7) die beiden Bereiche mit Thorium größer bzw. kleiner 24 ppm, so ergeben sich mit den Maximum- und Minimumwerten der übrigen Logs die Elektrofaziesdiagramme für Mikro-Quarzdiorit (Abb.8; Tab.3/6) und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Abb.8; Tab.3/4):

- die höheren SGR- und CGR- Werte des Mikro-Quarzdiorits sind

durch dessen größeren Thoriumgehalt bedingt.

	Probennr.	Teufe (m)	Thorium (ppm)
Plag.-Biotit- Cord.-Gneis	30	2013	13,5
	31		13,6
	32	2195	31,9
	33	2420	17,7
	34		17,5
Mikro-Quarzdiorit	37	3128	25,7
	38	3301	27,8
	39	3306	27,4
	40	3328	27,6

Tab.5: Bestimmung von Thorium an Kernen aus der Bohrung Urach 3
(nach: HÄNEL & ZOTH 1982)

- Ebenso werden im Mikro-Quarzdiorit z.T. höhere Dichten (RHOB) als im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis registriert. Tendenziell stimmt dies mit Labormessungen an Kernproben aus dem Bereich oberhalb der Vertiefung überein. Gravimetrisch wurden durchschnittliche Dichten von $2,76 \text{ g/cm}^3$ für den Mikro-Quarzdiorit und von $2,71 \text{ g/cm}^3$ für den Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis ermittelt (PLAUMANN & WOHLBERG 1982). Identische Mittelwerte lassen sich auch mit Hilfe der Modalanalysen (Tab.2) und den in der Literatur angegebenen Mineraldichten (Tab.6) berechnen.

Ähnliches gilt für den photoelektrischen Effekt (PEF) und somit auch für den photoelektrischen Querschnitt (U). Sowohl aus den Logs (Tab.3) als auch aus der theoretischen Berechnung auf der Grundlage der Gesteinsmatrix ergeben sich für beide physikalischen Parameter höhere Werte im Mikro-Quarzdiorit (Tab.6: $3,25 \text{ barns/el}$; $9,25 \text{ barns/cm}^3$) als im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis ($2,80 \text{ barns/el}$; $7,85 \text{ barns/cm}^3$).

Zum einen ist das LDT nicht auf kristallines Gestein geeicht, so daß keine absoluten Meßwerte erwartet werden können, zum anderen sind schon wegen der großen Bohrlochauskesselungen keine präzisen Sondenantworten für RHOB und PEF möglich. Die Ergebnisse der Messungen sind daher für eine klare Differenzierung der beiden Gesteine nicht geeignet; Tendenzen - wie oben beschrieben - lassen sich dennoch deutlich erkennen.

- Die niedrigste scheinbare Neutronenporosität (NPPI) wird im Mikro-Quarzdiorit gemessen, obwohl dieser insgesamt stärker geklüftet ist als der Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Kap.2.2.3.).

Der Literatur können experimentell bzw. rechnerisch ermittelte Werte entnommen werden, die anzeigen, in welcher Größenordnung die Messung der Neutronenporosität von den einzelnen Mineralen beeinflusst wird (Tab.6). Mit Hilfe der Modalanalysen (Tab.2)

	ρ (g/cm ³)	Pe (barns/el)	U (barns/cm ³)	ϕ CNT (p.u.) Limestone	Δt (μ s/ft)	Formel
Quarz	2,65	1,81	4,79	-2	55,5	SiO ₂
Orthoklas	2,55	2,86	7,21	-3	69	KAlSi ₃ O ₈
Plagioklas (30% An/70% Ab)	2,66	2,12	5,62	-2	47,8	
Albit	2,62	1,68	4,35	-2	49	NaAlSi ₃ O ₈
Anorthit	2,76	3,13	8,58	-2	45	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Biotit	3,01	6,27	18,75	21	50,8	K(Mg,Fe) ₃ (OH) ₂ [(Al,Fe)Si ₃ O ₁₀]
Chlorit	2,77	6,3	17,38	52	?70	(Mg,Fe,Al) ₆ (OH) ₈ [(Si,Al) ₄ O ₁₀]
Muskovit	2,83	2,4	6,74	20-25	49-60	KAl ₂ (OH,F) ₂ [AlSi ₃ O ₁₀]
Amphibol	3,2	5,99	19,17	8	43,8	Ca ₂ NaMg ₂ Fe ₂ (O,OH) ₂ [AlSi ₈ O ₂₂]
Cordierit	2,6	?3	?7,8	?2	?55	Mg ₂ Al ₃ [AlSi ₅ O ₁₈]
Pyrit	5,0	?16,9	84,68	-3	39,2	FeS ₂
Mikro-Quarzdiorit	2,76	3,25	9,25	5	51,5 (5,9km/sec)	
Plagioklas-Biotit- Cordierit-Gneis	2,71	2,80	7,85	6	53,9 (5,6km/sec)	
Granitoide Einsch.	2,68	2,64	7,30	0	54,0 (5,6km/sec)	

Tab.6: Logcharakteristika von Mineralen in Sedimentgesteinen (nach: SERRA 1986).
 (Die Werte für die Gesteine wurden auf der Grundlage
 ihrer jeweils durchschnittlichen Mineralzusammensetzung
 (Tab.2) berechnet.)

läßt sich berechnen, wieviel allein die Gesteinsmatrix zu der registrierten Neutronenporosität beiträgt.

Die Werte wurden für Minerale im Sedimentgestein ermittelt; die in situ-Bedingungen des Gebirges sind nicht berücksichtigt. Dennoch wird deutlich, daß im Mikro-Quarzdiorit allein auf Grund der durchschnittlichen mineralogischen Zusammensetzung niedrigere Neutronenporositäten (5 p.u.) als im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (6 p.u.) zu erwarten sind.

Die im Durchschnitt höheren Neutronenporositäten des Gneises lassen sich außerdem durch dessen intensivere hydrothermale Alteration sowie durch seinen ursprünglich sedimentären Charakter und der damit verbundenen textuellen Heterogenität begründen. Verglichen mit dem Mikro-Quarzdiorit ist der Gneis von grobkörnigem und weniger dichtem Habitus und zeigt eine ausgeprägte Lagentextur. Auch RITCH (1975) vermerkt für Parametamorphite eine Abhängigkeit der Logantworten vom sedimentären Edukt.

- Der relativ niedrige Gebirgswiderstand, der im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis gemessen wird (<3000 ohm m), steht zum einen mit dem etwas höheren Erzanteil des Gneises (Tab.2), zum anderen mit dessen Textur und alterierten Gesteinsmatrix, d.h. mit der höheren Neutronenporosität, in Zusammenhang.

- Auch durch die seismischen Geschwindigkeiten - wenngleich im Elektrofaziesdiagramm nicht dargestellt - lassen sich die beiden lithologischen Einheiten voneinander unterscheiden. Im Mikro-Quarzdiorit treten mittlere v_p -Werte von ca. 5,9 km/sec auf, im Gneis verlangsamen sich die Geschwindigkeiten auf ca. 5,4 km/sec (Abb.7). Ähnliche Werte lassen sich auch auf Grund der mineralogischen Zusammensetzung (Tab.6) errechnen und werden außerdem für die gleichen Gesteine oberhalb der Vertiefung von WOHLBERG (1982) und STENGER (1982) als repräsentativ angegeben.

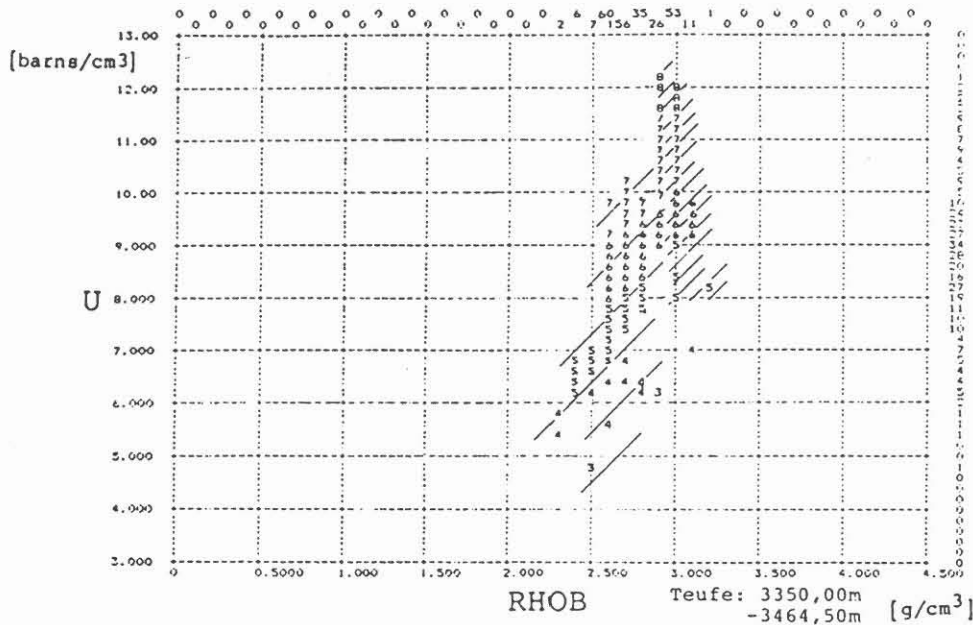
Zusammenfassend unterscheiden sich die beiden Elektrofaziesdiagramme mit Thorium als diskriminantestem Parameter insoweit, als daß sich die Grenze zwischen Mikro-Quarzdiorit und Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis eindeutig bei 3464,5 m ziehen läßt (Abb.9 B).

2.3.3. Mikro-Quarzdiorit mit bzw. ohne Paralleltextrur

Aus dem Composite-Log (Abb.7) ist für den oberen Bereich des Mikro-Quarzdiorits eine plötzliche Dichtezunahme (RHOB) abzulesen. Das gleiche gilt, allerdings weniger deutlich, für den photoelektrischen Querschnitt (U) und für den photoelektrischen Effekt (PEF).

Die Neutronenporosität (NPFI) zeigt dementsprechend kleinere Werte als im Liegenden. Der Gebirgswiderstand (LLD) erreicht zwar noch Spitzen von 50.000 ohm m, ist insgesamt aber erniedrigt.

Auf dem Cross-Plot "U gegen RHOB mit PEF in der Z-Achse" (Abb.11) läßt sich dieser Bereich mit Dichten größer $2,9 \text{ g/cm}^3$ ($U > 8 \text{ barns/cm}^3$) deutlich von dem mit Dichten kleiner $2,9 \text{ g/cm}^3$ ($U < 10 \text{ barns/cm}^3$) unterscheiden.



Z-Achse: PEF

[1=1barn/el
10=5barns/el]

Anzahl der Meßwerte: 357

Abb.11: Unterscheidung des Mikro-Quarzdiorits mit  bzw. ohne Paralleltextrur 

Betrachtet man im Vergleich hierzu das geologische Profil (Abb.4), so erkennt man, daß gerade dieser Abschnitt des Mikro-Quarzdiorits im Gegensatz zum Liegenden keine angedeutete metamorphe Paralleltextrur, dafür aber eine verstärkte Pyritführung (Kap.2.2.2.5.) zeigt. D.h., die Sonden haben das kompaktere Gesteinsgefüge und /oder den höheren Pyritgehalt im oberen Bereich des Diorits erkannt.

Mit RHOB, U und NPFI als diskriminante Parameter können zwei Elektrofaziesdiagramme (Abb.8), deren Werte auch Tabelle 3/7 bzw. Tabelle 3/8 zu entnehmen sind, aufgestellt werden. Die Grenze zwischen dem Mikro-Quarzdiorit mit Paralleltextrur und dem ohne Paralleltextrur, aber stärkerer Pyritführung, liegt auf Grund der Messungen bei 3372m (Abb.9 C).

2.3.4. Granitoide Einschaltungen und Aplite

Sowohl im Mikro-Quarzdiorit als auch im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis treten granitoide Einschaltungen auf (Abb.4).

Als saure Differentiate unterscheiden sie sich von dem Restgestein durch ihren größeren Anteil an Kalifeldspat (Tab.2) und dem damit verbundenen höheren Kaliumgehalt (chem. Analysen, BAUER 1987). Bei der magmatischen Differentiation reichert sich neben Kalium auch Thorium an (WHITFIELD, ROGERS & ADAMS 1959). Dies gilt besonders für granitische Gesteine, die nicht über aktiven Subduktionszonen, sondern, wie hier, intrakrustal gebildet wurden (HAACK 1982, Tab.7). Unter dieser Voraussetzung lassen sich auf dem Cross-Plot "Thorium gegen Kalium" (Abb.12) zwei Bereiche markieren, in denen die spektrometrischen Meßwerte für die granitoiden Einschaltungen zu suchen sind ($K > 3\%$, $Th > 28\text{ ppm}$ bzw. $> 12\text{ ppm}$).

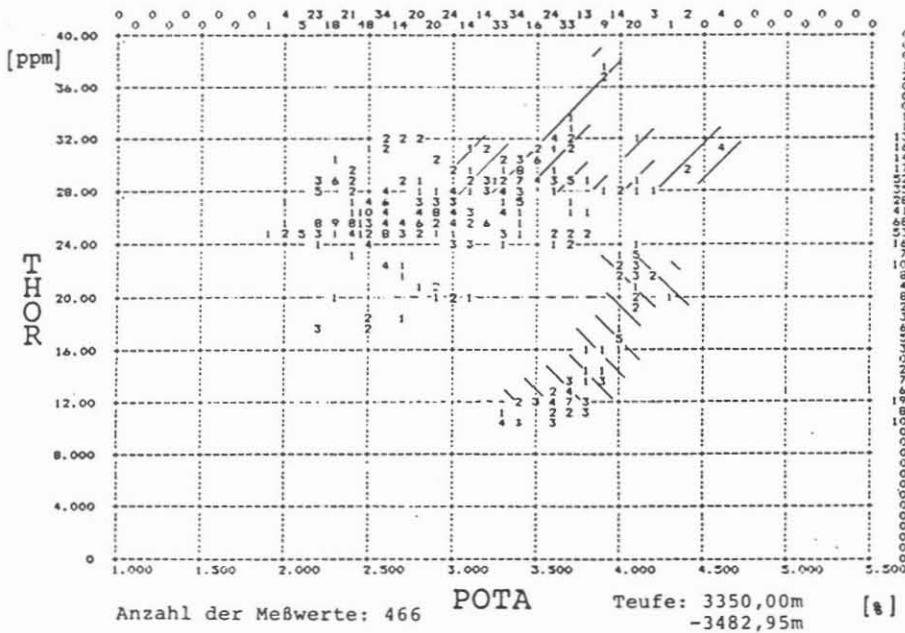




Abb.12: Unterscheidung granitoider Einschaltungen bzw. Aplite im Mikro-Quarzdiorit  und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis 

Die Dichte granitoider und granitischer Gesteine ist im allgemeinen relativ niedrig (meist $< 2,7\text{ g/cm}^3$; WOHLBERG 1982). Auch für die hier eingeschalteten Granitoide ergibt sich auf der Basis der mineralogischen Zusammensetzung (Tab.6) eine geringere Dichte ($2,68\text{ g/cm}^3$) als für den Mikro-Quarzdiorit und den Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Kap.2.3.2.). Ähnliches gilt für den photoelektrischen Effekt ($2,64\text{ barns/el}$) und den photoelektrischen Querschnitt ($7,30\text{ barns/cm}^3$). Auf dem Cross-Plot "U gegen RHOB mit PEF in der Z-Achse" ist daher der Bereich mit den niedrigsten Werten den granitoiden Einschaltungen zuzuordnen (Abb.13). Im Vergleich zur Dichte ist hier der photoelektrische Effekt als Parameter diskriminanter.

Granite lassen sich in der Loganalyse nicht zuletzt auch durch ihre niedrige Neutronenporosität von anderen Gesteinen unterscheiden (KEYS 1979; Tab.6). Im Bereich des Mikro-Quarzdiorits ist dies deutlich aus dem Cross-Plot "NPHI gegen CGR

	K (%) AM min...max	Th (ppm) AM min...max	U (ppm) AM min...max
1			
Old Sediments:			
Greywackes	1,33 0,4...2,1	6,9 1,5...12,3	2,0 0,5...4,6
Shales & siltstones (excluding black shales)	2,29 0,64..8,5	11,5 3,35..33,5	3,4 1,0...9,0
Metamorphic rocks:			
Gneisses	3,10 0,32..4,33	12,5 0,98..24,8	4,1 0,50..13,1
2			
Diorites, quarzdiorites	1,83 0,5...2,72	9,2 0,9...23,0	2,6 0,37...9,4
3			
Granodiorites not above active subduction zones	2,61 1,22..4,68	14,6 2,7...36,0	3,6 0,74..14,4
Granites not above active subduction zones	3,89 1,4...6,4	26,0 2,23..139,1	5,9 0,63...35,2
Aplitic Granites	3,45 3,2...3,7	25,9 12,6...39,2	10,5 3,0...21,1

Tab.7: Gehalte an Kalium, Thorium und Uran in

mit plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis s. 1),
mit Mikro-Quarzdiorit s. 2),
mit granitoiden Einschaltungen bzw. Apliten s. 3)
vergleichbaren Gesteinen (nach: HAACK 1982)

(=THOR+POTA)" abzulesen (Abb.14). Mit ansteigendem Thorium- und Kaliumgehalt nimmt die scheinbare Neutronenporosität ab.

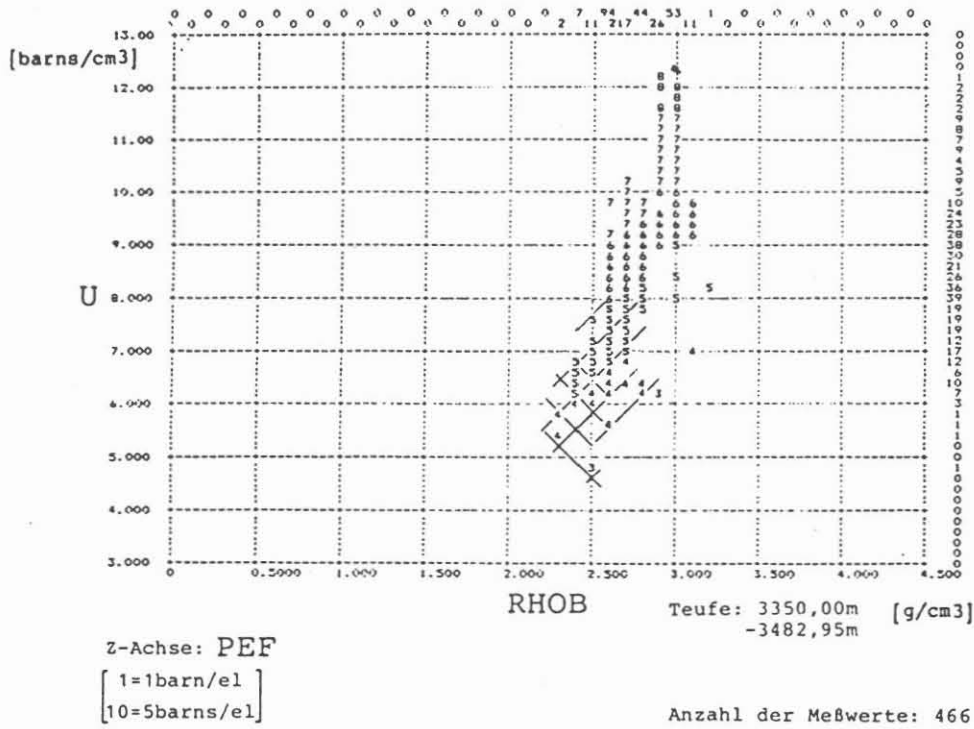




Abb.13: Unterscheidung granitoider Einschaltungen bzw. Aplite im Mikro-Quarzdiorit  und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis 

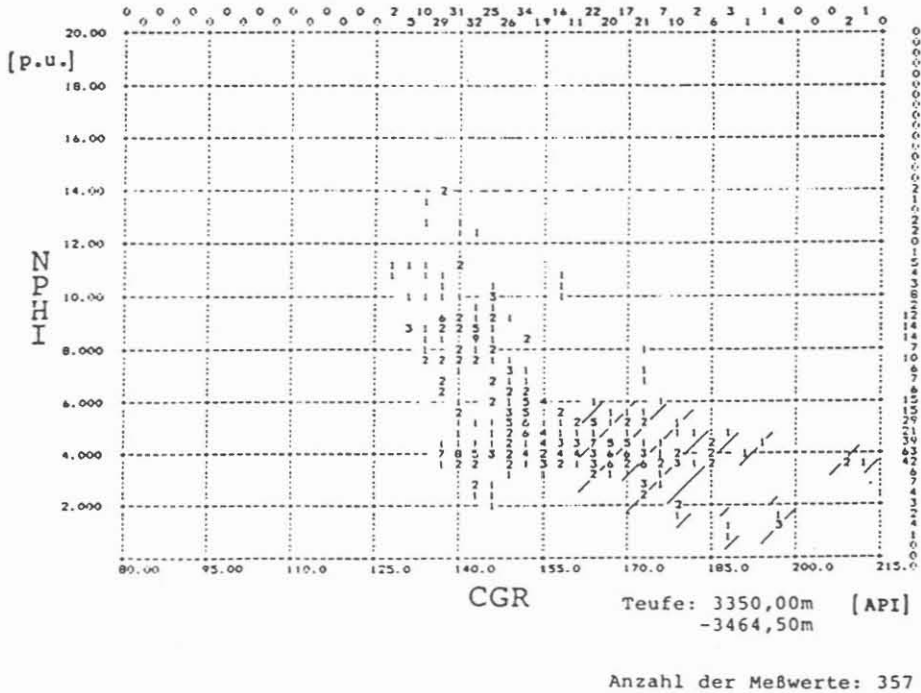


Abb.14: Unterscheidung granitoider Einschaltungen bzw. Aplite im Mikro-Quarzdiorit

Unter Berücksichtigung der obengenannten Parameter ergeben sich die beiden Elektrofaziesdiagramme für granitoide Einschaltungen im Mikro-Quarzdiorit (Abb.8, Tab.3/9) und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (Abb.8, Tab.3/3). Für die Erkennung von Apliten ist ein zusätzlich hoher Urangehalt Voraussetzung (>8 ppm; s. auch Tab.7).

In Abbildung 9 D sind die Bereiche, in denen die Werte des Composite-Logs mit denen der Elektrofaziesdiagramme übereinstimmen, als granitoide Einschaltungen bzw. Aplite gekennzeichnet.

2.3.5. Hydrothermale Alteration

Generell sind für Quarzdiorite mittlere Thoriumgehalte von 9,2 ppm charakteristisch; im einzelnen sind jedoch Schwankungen zwischen ca. 1 ppm und 23 ppm möglich (Tab.7, HAACK 1982). In tonigen Grauwacken, dem Edukt des Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneises, bewegt sich der Thoriumgehalt zwischen ca. 7 ppm und 12 ppm (vgl. auch Tab.7). Verglichen mit diesen Literaturwerten werden im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (10-24 ppm) und im Mikro-Quarzdiorit (≥ 24 ppm) recht hohe Thoriumgehalte gemessen, wengleich auch die Spitzenwerte den granitoiden Einschaltungen zuzuordnen sind.

Inwieweit für die Zufuhr von Thorium metasomatische Prozesse verantwortlich sind, ist bisher noch nicht eindeutig geklärt. Nach WHITFIELD, ROGERS & ADAMS (1959) lassen sich erhöhte Thoriumgehalte jedoch sekundär durch hydrothermale Alteration erklären (Kap.2.2.2.4.)

Um besonders intensiv überprägte Zonen im Bereich der Vertiefung (Abb.4) identifizieren zu können, bietet sich zunächst das NPHI-Log an. Die vom CNT registrierte Wasserstoff-Ionenkonzentration ist abhängig von

- der primären intergranularen Porosität
- der sekundären Kluftporosität und
- dem Kristallwasser, d.h. den OH-Gruppen der Minerale.

HINZE, NOVER & WILL (1981) fanden in hydrothermal alterierten Kernen aus dem Bereich oberhalb der Vertiefung ca. 10-20% erhöhte Porositäten, die eine vermehrte Elektrolytführung erlauben. Die für die Alteration verantwortlichen Fluide sind im Kristallin hauptsächlich an die Wegsamkeit von Klüften gebunden, so daß die sekundäre Kluftporosität in hydrothermal veränderten Zonen erhöht sein muß. Zudem bildeten sich bei der Alteration OH-reiche Sekundärminerale wie Muskovit und Chlorit (Tab.2, Kap.2.2.2.4.).

Für den Mikro-Quarzdiorit und insbesondere für den intensiv zersetzten Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis ist daher anzunehmen, daß in den hydrothermal besonders stark überprägten Zonen erhöhte Neutronenporositäten gemessen werden. Solche erhöhten Werte können jedoch auch von offenen, wasserführenden Klüften hervorgerufen werden, weshalb für die eindeutige Identifizierung der alterierten Zonen zusätzliche Kriterien notwendig sind.

In normalen, gesteinsbildenden Mineralen ist Uran genau wie Thorium nur in sehr geringen Mengen eingebaut, während sich in wenigen Akzessorien höhere Konzentrationen finden. Der größte Teil des Urans liegt fein verteilt als submikroskopische Einschlüsse auf Korngrenzen, Rissen und inneren Oberflächen lose gebunden vor und läßt sich relativ leicht mobilisieren (HAACK 1982).

Unter reduzierenden Bedingungen ist Uran in seiner tetravalenten Form (z.B. UO_2 , Uraninit) unlöslich (SERRA, BALDWIN & QUIREIN 1980). Im Gegensatz zu Thorium läßt es sich in Abhängigkeit vom Oxydationspotential, der Temperatur, dem Druck und der Zusammensetzung des Systems zum sechswertigen Uran oxydieren. Dieses ist meist in Form des Uranyl-Ions (UO_2^{2+}) sehr leicht löslich, wodurch die häufig irreguläre Verteilung von Uran zu erklären ist (ADAMS, OSMOND & ROGERS 1959).

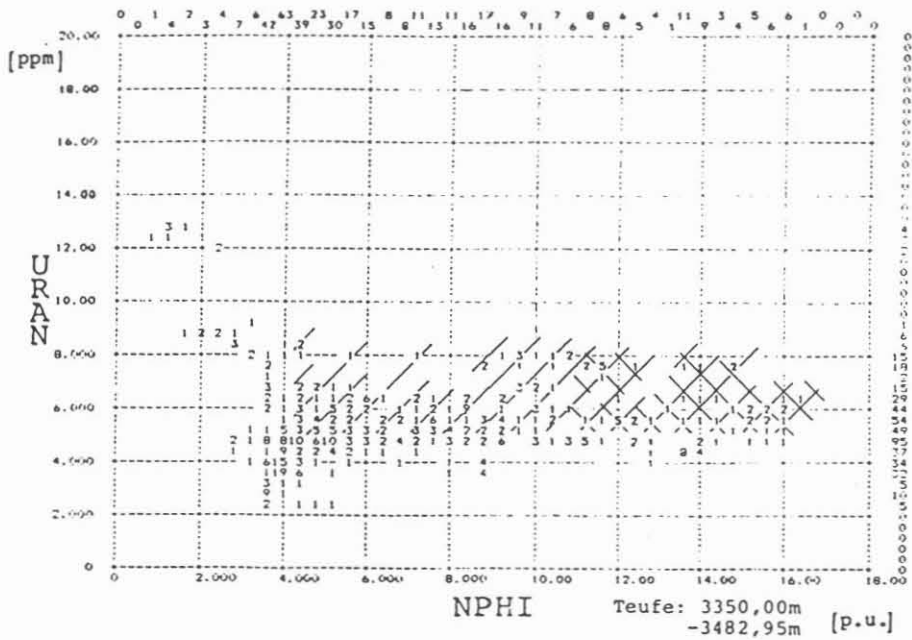
Das Thorium/Uran-Verhältnis im Bereich der Vertiefung (2 bis 10; NGS-Messung) weicht deutlich von dem für Intrusivgesteine typischen Wertebereich von 3 bis 5 (STUCKLESS, BUNKER, BUSH, DOERING & SCOTT 1977, HEIER & ADAMS 1965) ab. Neben der Zufuhr von Thorium spricht dies für eine hydrothermal verursachte Mobilisierung des Urans (ROGERS & ADAMS 1969).

Nach STENGER (1982) unterscheiden sich die frischen und alterierten Zonen des Uracher Kristallins im Oxydationsgrad ($100 Fe_2O_3 / Fe_2O_3 + FeO$). In den hydrothermal veränderten Gesteinen nimmt der Oxydationsgrad leicht ab; d.h. die Alterationsprozesse scheinen in schwach reduzierendem Milieu abgelaufen zu sein.



Die enge Vergesellschaftung sulfidischer Erzminerale (Pyrit) mit den Zersetzungszonen bestätigt dies (Kap.2.2.2.4.). Da Uran im reduzierenden Milieu unlöslich ist, kann angenommen werden, daß es in den intensiv alterierten Bereichen gemeinsam mit den Erzmineralen ausgefällt wurde (Epidot als Sekundärmineral). Für die hydrothermale Lösung muß ein zunächst relativ hoher Sauerstoffgehalt und unter veränderten chemophysikalischen Bedingungen eine Absenkung desselben vermutet werden. Die in den Fluiden u.a. gelösten Uranyl-Ionen und Sulfate sind im wesentlichen entlang von Kluftflächen transportiert worden, weshalb die zersetzten Zonen rezent von verheilten Äderchen und zum Teil noch offenen Klüften durchsetzt sind.

Die hydrothermal intensiv alterierten Gesteine lassen sich somit durch eine erhöhte scheinbare Neutronenporosität ($>4,2$ p.u. bzw. $>10,8$ p.u.) sowie durch eine Zunahme an Uran (≥ 5 ppm) charakterisieren. Auf dem Cross-Plot "URAN gegen NPHI" (Abb.15) sind die jeweiligen Bereiche für die alterierten Zonen im Mikro-Quarzdiorit und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis markiert (1).

- (1) Die extrem hohen Uranwerte mit kleinen Porositäten stehen nicht mit der Alteration in Verbindung, sondern sind den Apliten und zum Teil den granitoiden Einschaltungen zuzuordnen (Kap.2.3.4.).



Anzahl der Meßwerte: 466

Abb.15: Unterscheidung hydrothermaler Alterationen im Mikro-Quarzdiorit  und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis 

Entsprechend ergeben sich zwei Elektrofaziesdiagramme (Abb.8, Tab.3/10, 3/2); die teufengerechte Einordnung der intensiv überprägten Gesteine ist Abbildung 9 E zu entnehmen.

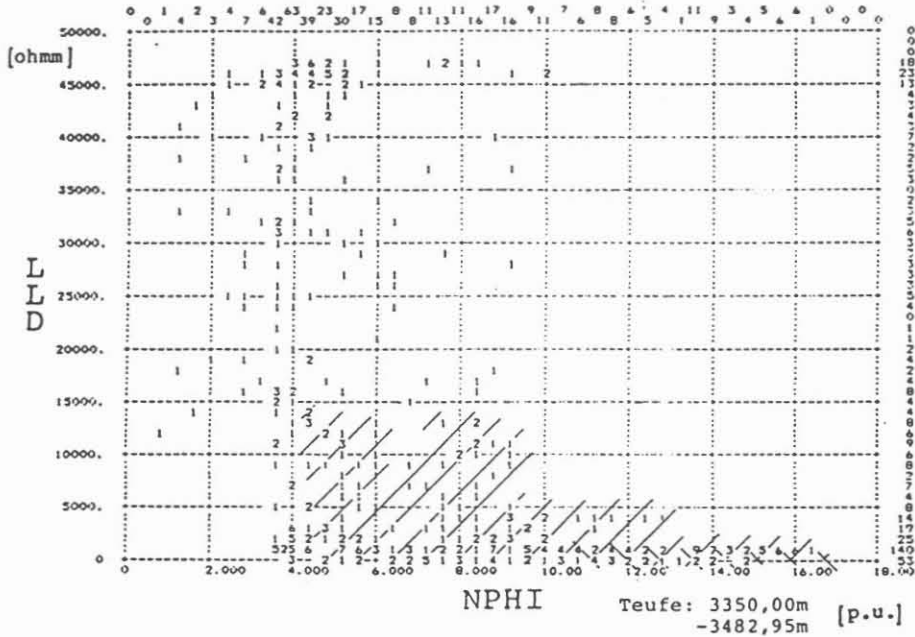
Ähnliche Zusammenhänge zwischen hydrothermalen Alterationsprozessen und bohrlochgeophysikalischen Meßergebnissen werden berichtet vom Schweizer Kristallin (Bohrung Böttstein, NAGRA 1985), von den Granite Mountains in Wyoming (STUCKLESS & NKOMO 1978) und von präkambrischen Gesteinen in New-Mexico (WEST & LAUGHLIN 1976).

2.3.6. Offene Klüfte

Die Salzgehalte der aus der Vertiefung der Bohrung Urach 3 gewonnenen Lösungen liegen um 10%. Nach BAUER, KAROTKE & ALTHAUS (1984) muß die Quelle für diese relativ hohen Salinitäten in den Kluftwässern liegen; etwaige Fluideinschlüsse in Mineralen können nur einen geringen Beitrag liefern. Damit sind für die offenen, wasserführenden Klüfte nicht nur erhöhte Neutronenporositäten sondern auch erniedrigte Widerstände zu erwarten.

Der gemessene Gebirgs widerstand, der zudem auch von alterierten Zonen beeinflusst wird, ist jedoch auf Grund des Groningen-Effekts (d.h. hohe Widerstände im Hangenden überlagern niedrigere im Liegenden) kein sehr zuverlässiger Parameter. Dennoch

lassen sich unter Vorbehalt auf dem Cross-Plot "NPHI gegen LLD" (Abb.16) Bereiche für intensiv geklüftete Zonen im Mikro-Quarzdiorit (NPHI >4,2 p.u., LLD ≤15000 ohm m) und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis (NPHI >10,8 p.u., LLD <1000 ohm m) markieren.



Anzahl der Meßwerte: 466

Abb.16: Offene Klüfte im Mikro-Quarzdiorit  und im Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis 

Dem synthetischen geologischen Profil (Abb.9 F) ist zu entnehmen in welchen Bereichen die in den Elektrofaziesdiagrammen (Abb.8; Tab.3/11, 3/1) enthaltenen Bedingungen erfüllt sind. Naturgemäß überschneiden sich Zonen mit hohen Klüftigkeitsziffern häufig mit denen intensiver hydrothermalen Alteration.

Zuverlässiger für die Ortung offener Klüfte wären in jedem Falle die Meßergebnisse des Borehole-Televierers gewesen. Trotz mehrerer Einfahrten lieferte dieser für den Bereich der Vertiefung jedoch bislang keine interpretierbaren Daten.

2.4. Diskussion der Ergebnisse

Die Analyse der bohrlochgeophysikalischen Messungen hat verdeutlicht, daß die Logs auch im Kristallin ausreichend Charakter zeigen, um eine qualitative Interpretation zu erlauben. Über mehrere Entwicklungsstadien kristallisierte sich für den Bereich der Vertiefung der Bohrung Urach 3 ein synthetisches Bohrprofil, ein FACIOLOG, heraus (Abb.9 F). Vergleicht man

dieses mit dem auf der Basis von Kernmaterial und Spülproben aufgestellten geologischen Profil, dem LITHOLOG (Abb.4), so sind folgende Aussagen zu treffen:

- sämtliche im Litholog aufgenommenen, geologischen Kriterien lassen sich auch im Faciolog voneinander unterscheiden (Abb.17).

- Bei der Festlegung der Grenzen zwischen den einzelnen Einheiten ergeben sich geringfügige Teufenunterschiede in den beiden Profilen (Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis/ Mikro-Quarzdiorit; Mikro-Quarzdiorit mit/ Mikro-Quarzdiorit ohne Paralleltexur, aber verstärkter Pyritführung; granitoide Einschaltungen und Aplite). Da das Litholog im wesentlichen auf der Auswertung von Spülproben beruht, ist den Grenzen, die aus den Bohrlochmessungen ermittelt wurden, eine größere Genauigkeit zuzuschreiben.

- Die Zonen mit zunehmender und abnehmender hydrothermalen Alteration bzw. Klüftigkeit stimmen teufenmäßig in beiden Profilen - insbesondere im Liegenden - gut miteinander überein.

- Die Bereiche der granitoiden Einschaltungen erscheinen im Litholog sehr mächtig. Dies liegt daran, daß auf der Basis des Sampler-Logs granitoide Gängchen nicht von unregelmäßig im Gestein auftretenden, leukokraten Schlieren unterschieden werden können. Im Faciolog sind, der geringeren Mächtigkeit und klaren Abgrenzung nach zu urteilen, hingegen granitoide Gänge i.e.S. erfaßt worden.

Im Hinblick auf die Vorbohrung der KTB sind nach Bearbeitung des Pilotprojekts Urach 3 folgende Ergebnisse festzuhalten:

- die Bohrlochmessungen enthalten auch im Kristallin so viel Information, daß sich aus den Daten ein detailliertes geologisches Profil erarbeiten läßt.

- Für die zuverlässige Eichung der Meßergebnisse an der Lithologie ist ein umfangreicher Kerngewinn Voraussetzung.

- Ebenso bedeutend ist ein wenig gestörtes Caliber. Für die im Bereich von Auskesselungen registrierten Werte existieren nur Korrekturen, die für Sedimente entwickelt wurden und damit zu neuen Fehlern führen.

- Eine makroskopische Beschreibung des Kernmaterials reicht im Kristallin für eine aussagekräftige Loginterpretation nicht aus. Im Gegensatz zum Sediment (Porosität, Textur!) hängen die petrophysikalischen Eigenschaften hier fast ausschließlich von der komplexen mineralogischen Zusammensetzung ab. Eine qualitative und quantitative, mikroskopische Analyse ist daher Voraussetzung, um die Zusammenhänge zwischen Lithologie, Petrophysik, Geochemie und Bohrlochgeophysik verstehen zu können.

- Für die Zuordnung der unterschiedlichen Sondenantworten zu

den einzelnen lithologischen Parametern erwies sich die Cross-Plot-Methode von grundlegender Bedeutung. Mit Hilfe der Cross-Plots lassen sich die Elektrofaziesdiagramme und damit letztlich auch das synthetische Bohrprofil entwickeln.

- In Abbildung 18 ist zusammenfassend nochmals dargestellt, welche Logs für die Identifizierung welcher lithologischen Einheiten und Merkmale als besonders signifikant einzustufen sind.

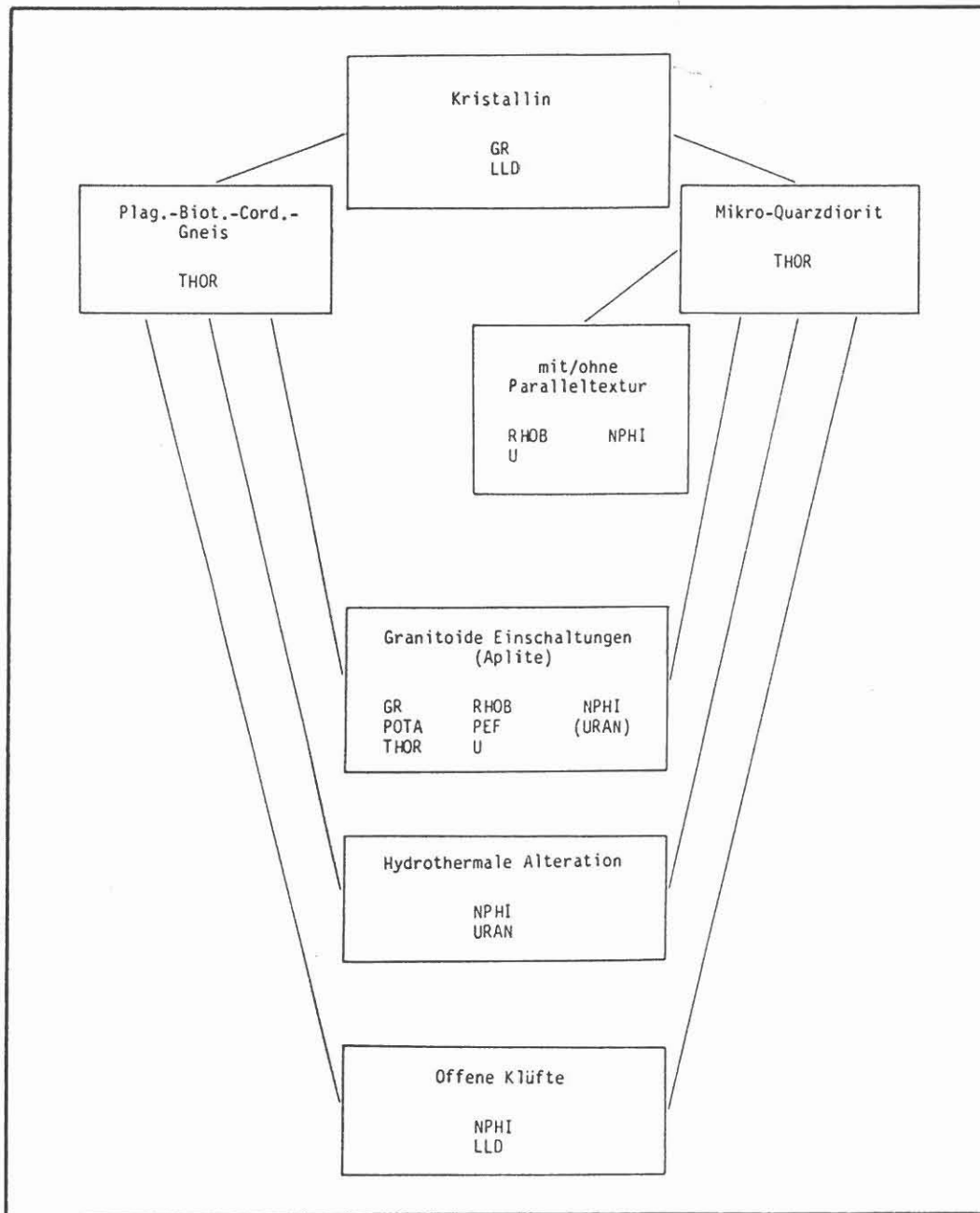


Abb.18: Die für die Identifizierung der einzelnen lithologischen Parameter signifikanten Logs.

- Detailliertere Aussagen zum Gefüge sind für KTB insbesondere auf Grund der BHTV- und der FMST-Messungen zu erwarten.

- Im Sinne einer zuverlässigen Auswertung wären ein besseres Auflösungsvermögen des DLL im Bereich hoher Gebirgswiderstände, eine Eichung des LDT und CNL im Gneisgebirge sowie die Entwicklung von Korrekturprogrammen für kristallines Gestein hilfreich.

2.5. Zusammenfassung

Im Rahmen der Kontinentalen Tiefbohrung ist es Ziel des Forschungsvorhabens FACIOLOG mit Hilfe bohrlochgeophysikalischer Meßdaten ein lithologisches Bohrprofil zu rekonstruieren. Um zu erproben, inwieweit und mit welcher Methodik dies für kristallines Gestein möglich ist, wurde die geophysikalisch umfangreich vermessene Vertiefungsstrecke (3334m- 3488m) der Bohrung Urach 3 in Form eines Pilotprojektes bearbeitet.

Auf der Basis des Sampler-Logs und makro- sowie mikropetrographischer Analysen am Kernmaterial ließ sich ein geologisches Bohrprofil, ein Litholog, aufstellen. Unter Berücksichtigung von Petrographie, Petrophysik und Geochemie konnten die Meßergebnisse der einzelnen Sonden (GR,NGS,LDT,CNT,SLS,DLL) insoweit interpretiert werden, als daß sich alle im Litholog aufgenommenen geologischen Einheiten bzw. Merkmale voneinander unterscheiden und in einem synthetischen Bohrprofil, dem Faciolog, teufengerecht einordnen lassen. Eindeutig zu differenzieren sind Plagioklas-Biotit-Cordierit-Gneis, Mikro-Quarzdiorit, Mikro-Quarzdiorit mit bzw. ohne metamorphe Paralleltexur, aber verstärkter Pyritführung, granitoide Einschaltungen bzw. Aplite, intensiv hydrothermal alterierte Zonen und offene Klüfte.

Auch im Kristallin enthalten die Logs demnach soviel Information, daß sich mit ihrer Hilfe ein lithologisches Bohrprofil erarbeiten läßt. Methodisch erwies sich die Anwendung von Cross-Plots und von Elektrofaziesdiagrammen als außerordentlich hilfreich. Ein Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Sondenantworten und Lithologie war erst durch die Kenntnis der quantitativen Mineralzusammensetzung (Modalanalysen) möglich.

Zusammenfassend hat das Pilotprojekt Urach 3 für die Loginterpretation im Kristallin sehr erfolversprechende Ergebnisse geliefert. Betrachtet man das Faciolog, so erscheint die Untergliederung des Bohrlochabschnitts außerordentlich detailliert und im Hinblick auf die teufengerechte Einordnung sogar zuverlässiger als das Litholog.

3. Literaturverzeichnis

- ADAMS, J.A.S., OSMOND, J.K. & ROGERS, J.J.W. (1959): The Geochemistry of Thorium and Uranium.- In: AHRENS, L.H., PRESS, F., RANKAMA, K., RUNCORN, S.K. (Hrsg.): Physics and Chemistry of the Earth.-3: 298-348; London (Pergamon Press).
- BAUER, F. (1987): Die Kristallingesteine aus der Bohrlochvertiefung Urach 3 und ihre fluiden Einschlüsse: Eine Interpretation der hydrothermalen Überprägung anhand der Fluiddaten aus Einschlußmessungen.- Diss. Universität Karlsruhe.
- BAUER, F., KAROTKE, E., ALTHAUS, E. (1984): Bericht des Arbeitsbereichs Geochemie.- In: DIETRICH, H.-G. (1982): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- Forschungsarbeiten im Rahmen des BMFT-Projektes 03 E-6060-A, 2. Zwischenbericht.
- DIETRICH, H.-G. (1982): Geological Results from the Urach 3 Borehole and the Correlation with other Boreholes.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- DIETRICH, H.-G. (1984): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Gneisgebirge) der Bohrung Urach 3.- Forschungsarbeiten im Rahmen des BMFT-Projektes 03 E-6060-A, 2. Zwischenbericht.
- DIETRICH, H.-G. (1987): Erweiterte Zirkulation wässriger Fluide im Hot Dry Rock-System (Grundgebirge) der Bohrung Urach 3.- Forschungsarbeiten im Rahmen des BMFT-Projektes 03 E-6060-A, Endbericht.
- HAACK, U. (1982): Radioaktivität der Gesteine.- In: ANGENHEISTER, G. (Hrsg.): Landolt-Börnstein. Physikalische Eigenschaften der Gesteine.- V, 1 (b); Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- HAMMERSCHMIDT & WAGNER (1983): K-Ar-Bestimmung an Biotiten aus der Forschungsbohrung Urach 3.- N. Jb. Miner., Mh. 83 (1): 35-48.
- HÄNEL, R. & ZOTH, G. (1982): Temperature Measurements and Determination of Heat Flow Density.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- HEIER, K.S. & ADAMS, J.A.S. (1965): Concentration of radioactive elements in deep crustal material.-

- Geochim. et Cosmochim. Acta, 29: 53-61; Northern Ireland (Pergamon Press).
- HINZE, E., NOVER, G. & WILL, G. (1981): Elektrische Leitfähigkeitsmessungen an Gesteinen des Kristallins der Forschungsbohrung Urach 3.- Fortschr. Miner., 59 (1): 66-68.
- KEYS, W.S. (1979): Borehole Geophysics in Igneous and Metamorphic Rocks.- SPWLA, 20th Ann. Logg. Symp., O: 1-26.
- LARSEN, E.S.Jr. & PHAIR, G. (1954): The distribution of uranium and thorium in igneous rocks.- In: FAUL, H.(Hrsg.): Nuclear Geology.- 75-88; New York (John Wiley & Sons).
- MÄUSSNEST, O. (1982): The Volcanic Phenomena in the Urach Region.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- NAGRA (1985): Sondierbohrung Böttstein.- Untersuchungsbericht NTB 85-01.
- PLAUMANN, S. & WOHLBERG, J. (1982): Determination of Rock Densities in the Urach Borehole.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- RITCH, H.J. (1975): An open hole logging evaluation in metamorphic rocks.- SPWLA, 16th Ann. Logg. Symp., V: 1-11.
- ROCHE, H. DE LA & LETERRIER, J. (1980): A Classification of volcanic and plutonic rocks using R1 R2 diagram and major element analysis - its relationships with current nomenclature.- Chem. Geol., 29: 183-210.
- ROGERS, J.J.W. & ADAMS, J.A.S. (1969): Thorium.- In: WEDEPOHL, K.H. (Hrsg.): Handbook of Geochemistry.- 2 (4): 90-B-90-O; Berlin (Springer).
- ROGERS, J.J.W. & ADAMS, J.A.S. (1969): Uranium.- In: WEDEPOHL, K.H. (Hrsg.): Handbook of Geochemistry.- 2 (4): 92-B-92-O; Berlin (Springer).
- SCHÄDEL, K. (1982): The Geology of the Heat Anomaly of Urach.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- SCHREYER, W. (1967): Das Grundgebirge in der Umgebung von Deggendorf an der Donau.- Geol.Bav., 58: 77-85.

- SERRA, O. (1986): Fundamentals of well-log interpretation.- 2; Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo (Elsevier).
- SERRA, O., BALDWIN, J. & QUIREIN, J. (1980): Theory, Interpretation and Practical Application of the Natural Gamma Ray Spectrometry.- SPWLA, 12th Ann. Logg. Symp., Q: 1-28.
- STENGER, R. (1982): Das Kristallin der Forschungsbohrung Urach im Rahmen des süddeutschen Grundgebirges.- Diss. Universität Freiburg.
- STRECKEISEN, A. (1976): To each plutonic rock its proper name.- Earth Sci.Rev., 12: 1-34.
- STUCKLESS, J.S., BUNKER, C.M., BUSH, C.A., DOERING, W.P., & SCOTT, J.H. (1977): Geochemical and petrological studies of a uraniferous granite from the Granite Mountains, Wyoming.- Jour. Research U.S. Geol. Surv., 5 (1): 61-81.
- STUCKLESS, J.S. & NKOMO, I.T. (1978): Uranium-Lead Isotope Systematics in Uraniferous Alkali-rich Granites from the Granite Mountains, Wyoming: Implications for Uranium Source Rocks.- Economic Geology, 73: 427-441.
- WEST, F.G., & LAUGHLIN, A.W. (1976): Spectral gamma logging in crystalline basement rocks.- Geology, 4 (10): 617-618; Colorado.
- WHITFIELD, J.M., ROGERS, J.J.W. & ADAMS, J.A.S. (1959): The relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks.- Geochim. et Cosmochim. Acta, 17: 248-271; Northern Ireland (Pergamon Press).
- WOHLENBERG, J. (1982): Seismo-acoustic and Geoelectric Experiments within the Urach 3 Borehole.- In: HÄNEL, R. (Hrsg.): The Urach Geothermal Project; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- WOHLENBERG, J. (1982): Dichte der Gesteine.- In: ANGENHEISTER, G. (Hrsg.): Landolt-Börnstein. Physikalische Eigenschaften der Gesteine.- V, 1 (a); Berlin-Heidelberg-New York (Springer).

4. Danksagung

Die Bearbeitung des vorliegenden Pilotprojekts erfolgte auf Anregung der KTB-Projektleitung (Herr Draxler, Dr. Dietrich). Kernproben aus der Forschungsbohrung Urach 3 überließen uns die Stadtwerke Urach (Herr Tenzer), einige Dünnschliffe und wertvolle Informationen zur Petrographie erhielten wir vom Mineralogischen Institut der Universität Karlsruhe (Dr. Bauer). Die Logs, die die BEB (Dr. Betz, Herr Hoffmann) zur Verfügung stellte, wurden von der Firma Schlumberger in Hannover korrigiert. Neben vielen anderen Hilfestellungen (Herr Schwab, Herr Lingnau) konnten dort zudem zahlreiche Cross-Plots hergestellt werden.

Bei allen oben erwähnten Herren möchten wir uns für die hervorragende Kooperation, für die vielfache Unterstützung und das Interesse, das unserer Arbeit entgegengebracht wurde, bedanken.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch Frau Quadflieg und Herrn Röhrs für die tatkräftige Unterstützung bei der technischen Ausführung des Berichtes.