

### 3.3 DRAXLER, J.: Erfahrungen mit Bohrlochmessungen im Kristallin

#### 3.3.1 Einleitung

Im Vergleich zu Tiefbohrungen der Öl- und Gasindustrie ist die Anzahl der Bohrungen, die im kristallinen Gebirge abgeteuft worden sind oder es erreicht haben, verschwindend klein:

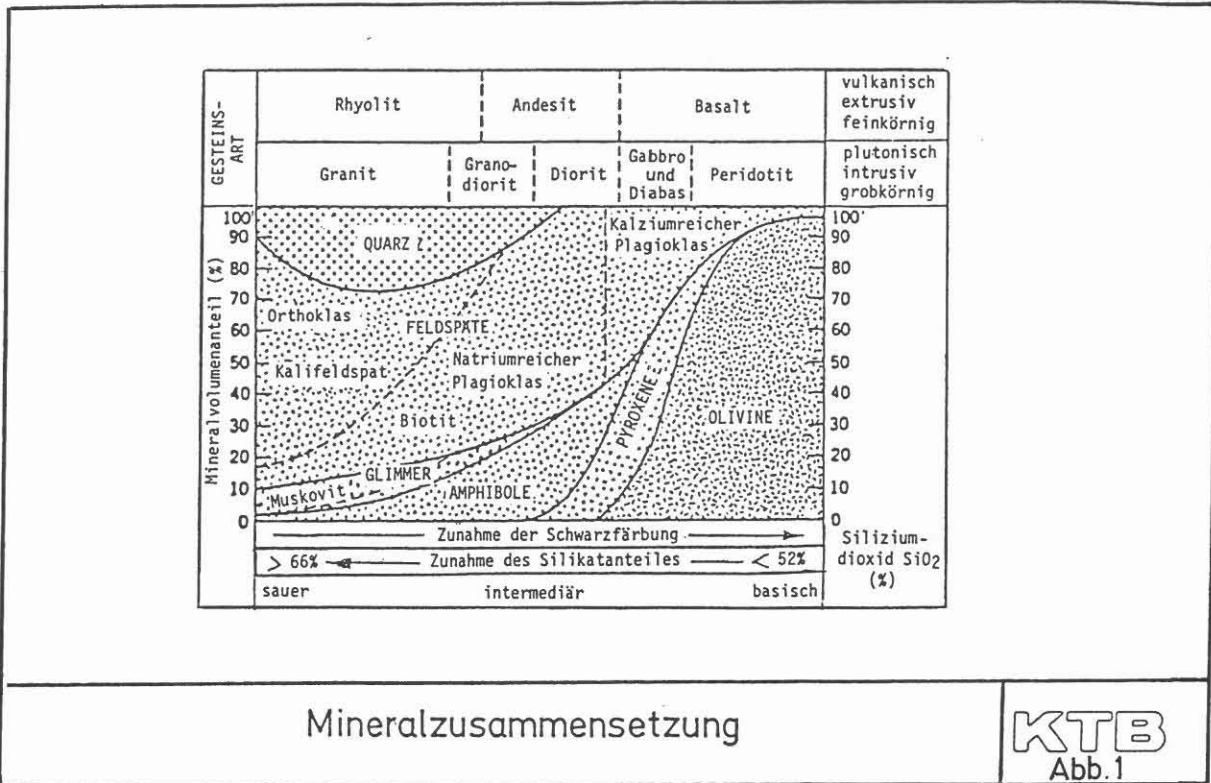
In Venezuela, Libyen, China und Argentinien sind es Bohrungen, die aus verwittertem Granit Erdöl fördern. In Japan und anderen Ländern wird aus kristallinem Gestein Erdgas produziert. Als Resultat der Suche nach alternativen Energien sind ab 1974 Bohrungen zum Studium der Hot Dry Rock Technik und zur Projektierung von Endlagern für radioaktiven Abfall niedergebracht worden (Los Alamos, USA; Urach 3, Deutschland; etc. und NAGRA, Schweiz). Außerdem wurde in verstärktem Maße der Aufschluß nach Naturdampf in Island, Italien und Japan vorangetrieben.

Anfang der siebziger Jahre begann die Sowjetunion mit der Bohrung Kola SG-3, um die äußere Kruste geowissenschaftlich zu untersuchen. Am 1. Juli 1986 war der Bohrbeginn für die erste tiefe Gasexplorationsbohrung des Kristallin in Schweden, im Gebiet des Siljan Ringes, um den Beweis für die Mantelgastheorie des amerikanischen Wissenschaftlers T. GOLD zu erbringen.

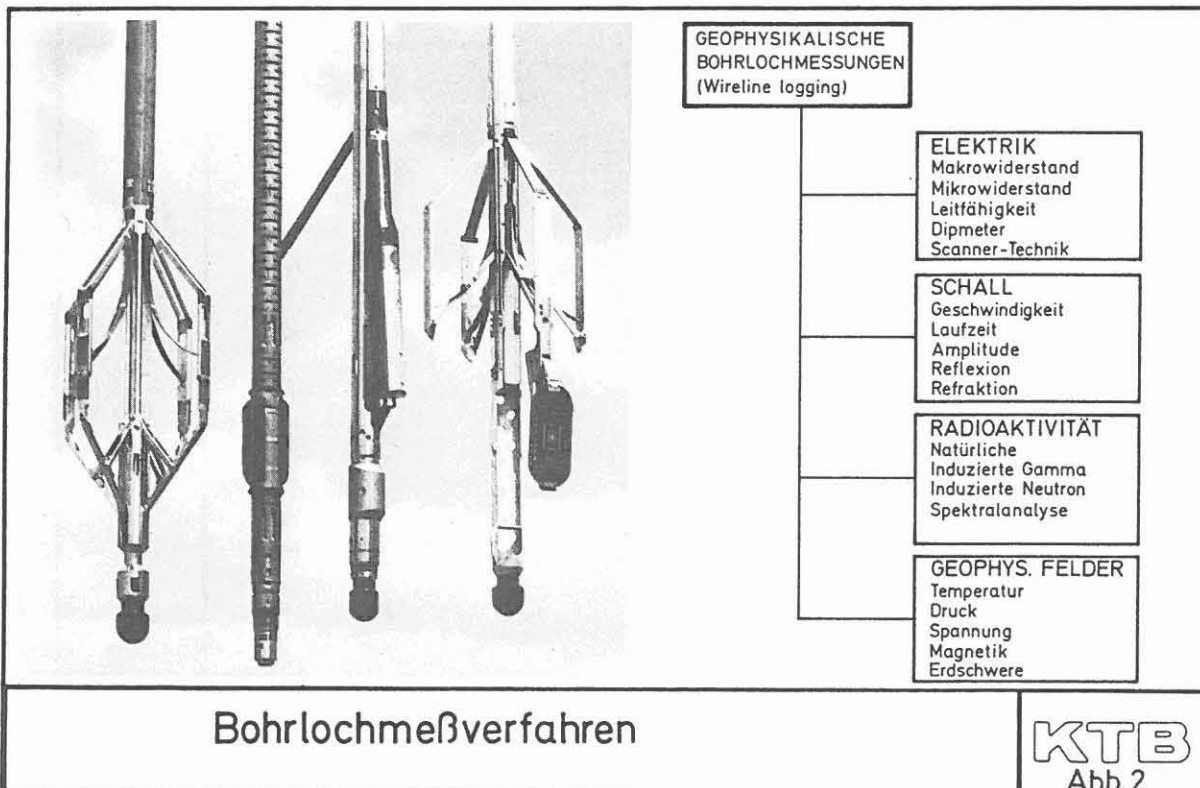
Ähnlich dem KTB-Projekt in Deutschland werden geowissenschaftliche Forschungsvorhaben in den Vereinigten Staaten und für geringere Teufen in Frankreich, Kanada und England geplant. Damit ist die Notwendigkeit gegeben, Methoden zu entwickeln, mit denen kristalline Gebirgsformationen erschlossen, untersucht und sicher bewertet werden können. Die in der Ölindustrie angewandten Verfahren sind nur zum Teil übertragbar. Sie müssen für diesen neuen Arbeitsbereich optimiert werden.

Hiervon sind besonders die Bohrlochmessungen betroffen, weil sie - im Unterschied zum Sediment - anderen Anforderungen und Aussagekriterien unterworfen sind: Kristalline Gesteine haben sehr geringe primäre Porosität, daher sehr hohen Widerstand. Erhöhte Porosität ist nur in sekundärer Form durch starke Klüftigkeit gegeben. Die gesteinsbildende Mineralzusammensetzung ist wesentlich vielfältiger und nicht genau abgegrenzt. Gesteine gleichen Ursprungs und mit identischen Komponenten können aufgrund unterschiedlicher Entstehungsbedingungen wesentlich voneinander abweichen, jedoch meßtechnisch sehr ähnlich erscheinen (Abb. 1).

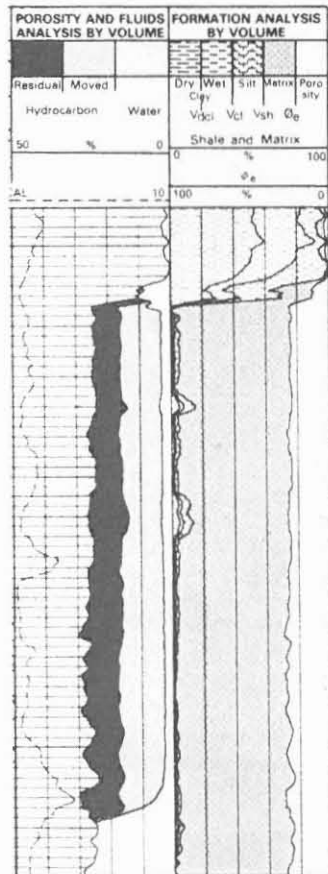
Elektrische Widerstands-, Radioaktivitäts- und akustische Meßgeräte müssen diesen Bedingungen angepaßt werden (Abb. 2). Die Erfassung der Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion, der Porenfluide und ihrer Bewegungen, auch über längere Zeiträume und in kleinsten Mengen, sind Prioritäten, die von den Geowissenschaftlern gesetzt worden sind. Die Erdschwere, magnetische Anomalien und die in-situ Gebirgsspannung sind Feldgrößen, die gemessen werden sollen. Hierfür sind Meßgeräte zu entwerfen und zu bauen (Abb. 3).



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

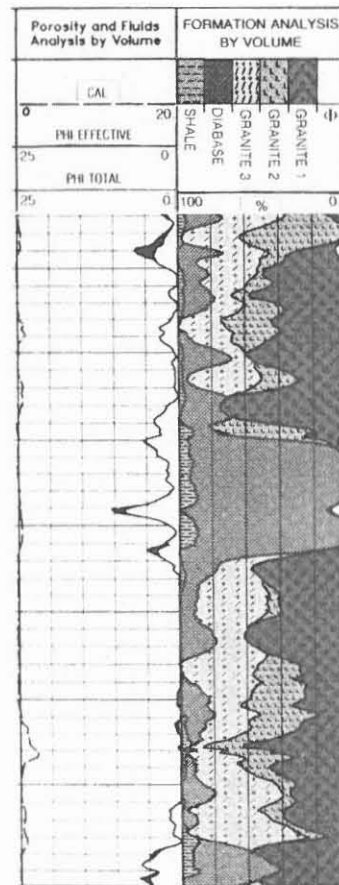


Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



## SEDIMENT

Effektive Porosität  
 Wassersättigung  
 Kohlenwasserstoffsättigung  
 Volumen Ton  
 Volumen Mineral 1-n  
 Druck  
 Volumen, Fluide  
 Temperatur  
 Permeabilität  
 Spannungen  
 Einfallen, Streichen



## KRISTALLIN

Druck  
 Temperatur  
 Wärmeleitfähigkeit  
 Wärmeproduktion  
 Porosität, Klüfte  
 Permeabilität  
 Porenfluide  
 Fluidbewegung  
 Lithologie  
 Diagenetische Verformung  
 Strukturelle, Texturale Eigenschaften  
 Spannungen  
 Gebirgsfestigkeit  
 Bohrbarkeit  
 Vererzung

Vergleich Sediment - Kristallin

**KTB**

Abb. 3

### 3.3.2 Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse

#### 3.3.2.1 Bestimmung der Lithologie und Mineralzusammensetzung

Die umfassendste Studie über die Anwendbarkeit von kommerziellen Erdöl-Bohrlochmeßverfahren für Aufschlüsse des Kristallins innerhalb eines begrenzten, europäischen Raumes wurde von der NAGRA in der Nordschweiz durchgeführt. Die Messungen und Auswertungen haben gezeigt, daß die Übertragbarkeit möglich ist, jedoch nicht alle Untertage-Messungen den Anforderungen entsprochen haben. Das Dual Laterolog zum Beispiel sättigt bei 60.000 Ohm m, obwohl höhere gemessene Widerstände sicher noch verwertbare Informationen liefern könnten.

Erst nach einem langwierigen Lernprozeß konnte für die Auswertung der gewonnenen Meßdaten ein Weg gefunden werden, der zu brauchbaren Ergebnissen führte. Es sei hier an das System der kontinuierlichen faziellen Bewertung mit Hilfe des FACIOLOG gedacht. Intensive Zusammenarbeit zwischen NAGRA und SCHLUMBERGER war notwendig, um überzeugende Beurteilungskriterien zu definieren. Damit war dann die Bestimmung der Lithologie und die sich daraus ergebende Porositätsermittlung gegeben.

Durch den Einsatz des Borehole Televiewer (BHTV) und des neuentwickelten und als Prototyp vorgestellten Formation MicroScanner konnte Klüftigkeit in hervorragender Weise nachgewiesen werden. Mit Hilfe dieser orientiert gefahrenen Messungen sind die gebohrten Kerne nachorientiert und teufenmäßig eingeordnet worden.

Seit der Vorlage der Technischen Berichte NAGRA-85-01 (Böttstein 1-5) im Juni 1985 ist die Entwicklung der Bohrlochmeßtechnik vorangetrieben worden. Gerätetechnische Neuerungen (z. B. Temperaturgrenzenerhöhung) sind von der Service-Industrie vorgestellt worden. Der Formation MicroScanner ist in Serienproduktion gegangen.

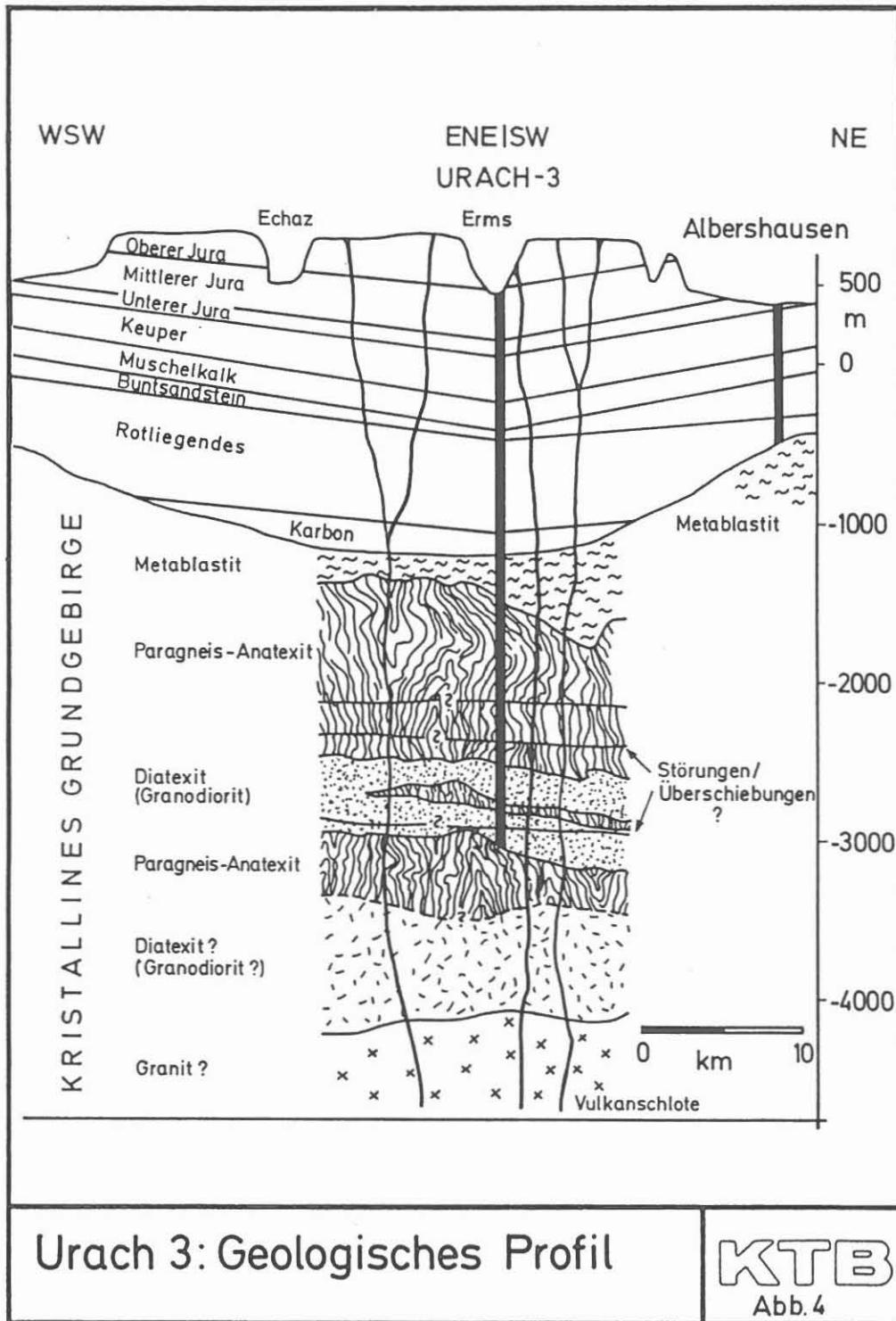
Am Beispiel der deutschen Hot Dry Rock-Bohrung Urach 3 soll das neuentwickelte Sediment-Interpretationsprogramm "ELAN" (Elemental Analysis) der Firma SCHLUMBERGER auf das Kristallin übertragen und vorgestellt werden. Im Abschnitt der Vertiefung dieser Bohrung von 3 320,0 - 3 483,0 m waren im Jahre 1983 Bohrlochmessungen gefahren worden, die für diese Auswertung verwendet werden konnten.

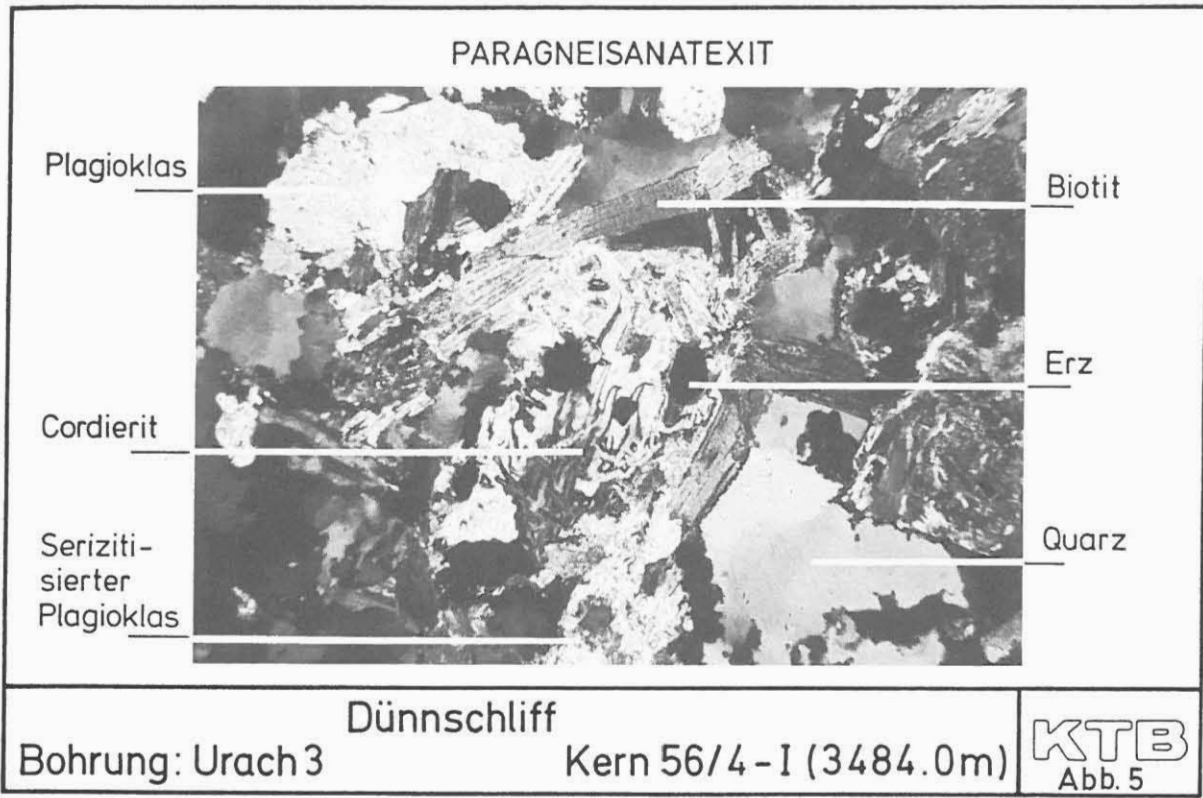
Das geologische Vorprofil zeigt für dieses Intervall bis zu einer Teufe von 3 465,0 m Granodiorit (Diatexit) und bis zur Endteufe Paragneis-Anatexit. Fünf Kerne mit einer Gesamtlänge von 10,8 m wurden erbohrt, jedoch nur eine Länge von 7,0 m gewonnen (Abb. 4).

Aus Spülproben, diesen Kernen und daraus angefertigten Dünnschliffen wurde nicht nur die geologische Voraussage bestätigt, sondern auch die Mineralzusammensetzung bestimmt.

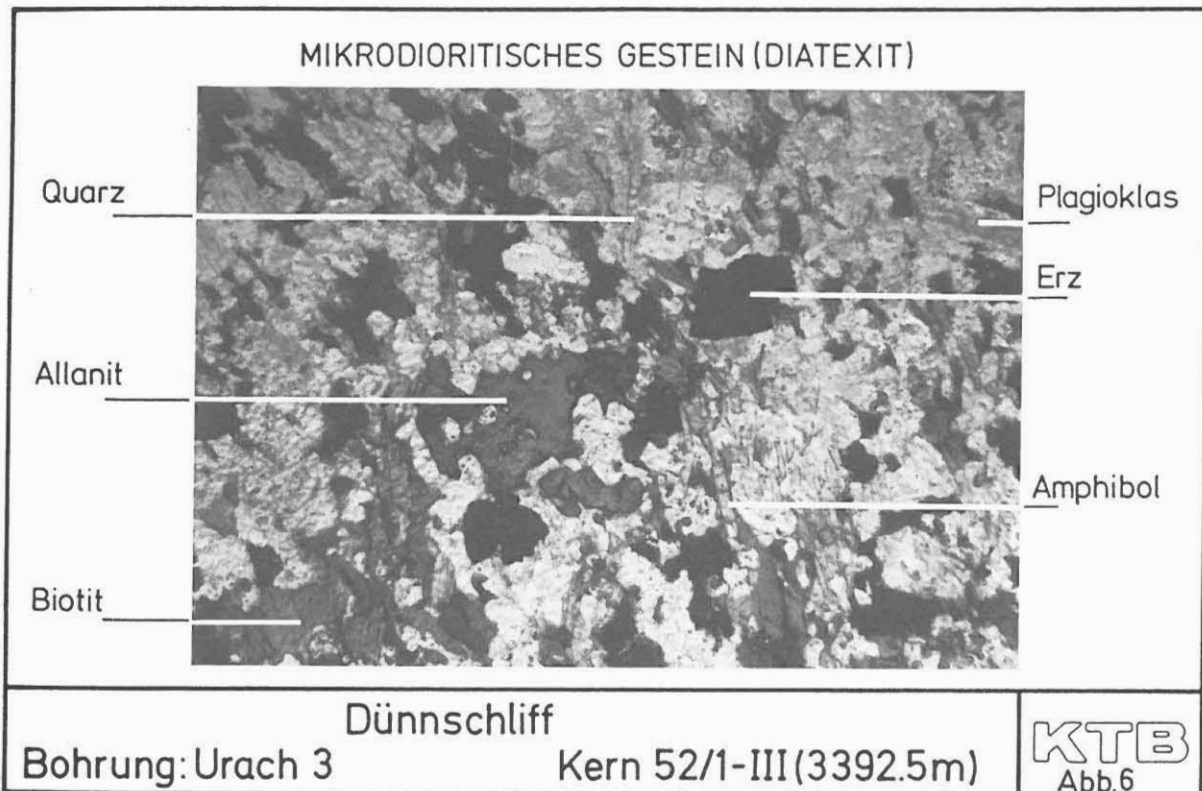
Für die Auswertung der Bohrlochmessungen zur Ermittlung einer volumetrischen Formationsanalyse ist es notwendig, ein mineralogisches Interpretationsmodell vorzugeben. Dies kann sich nur auf die geologisch-mineralogischen Untersuchungen stützen. Die Verbindung zur Meßtechnik wird über die sogenannte

X-Plot Analyse hergestellt. Als klar erkennbare Minerale sind in den Dünnschliffen Quarz, Plagioklas (auch serizitisiert), Biotit, Albanit, Cordierit und Vererzungen sichtbar. Aus Spülproben konnte Aplit als Ganggestein nachgewiesen werden. "Vergrünungen" in Form von Schlieren und Nestern waren an den Kernen erkennbar (Abb. 5, 6).



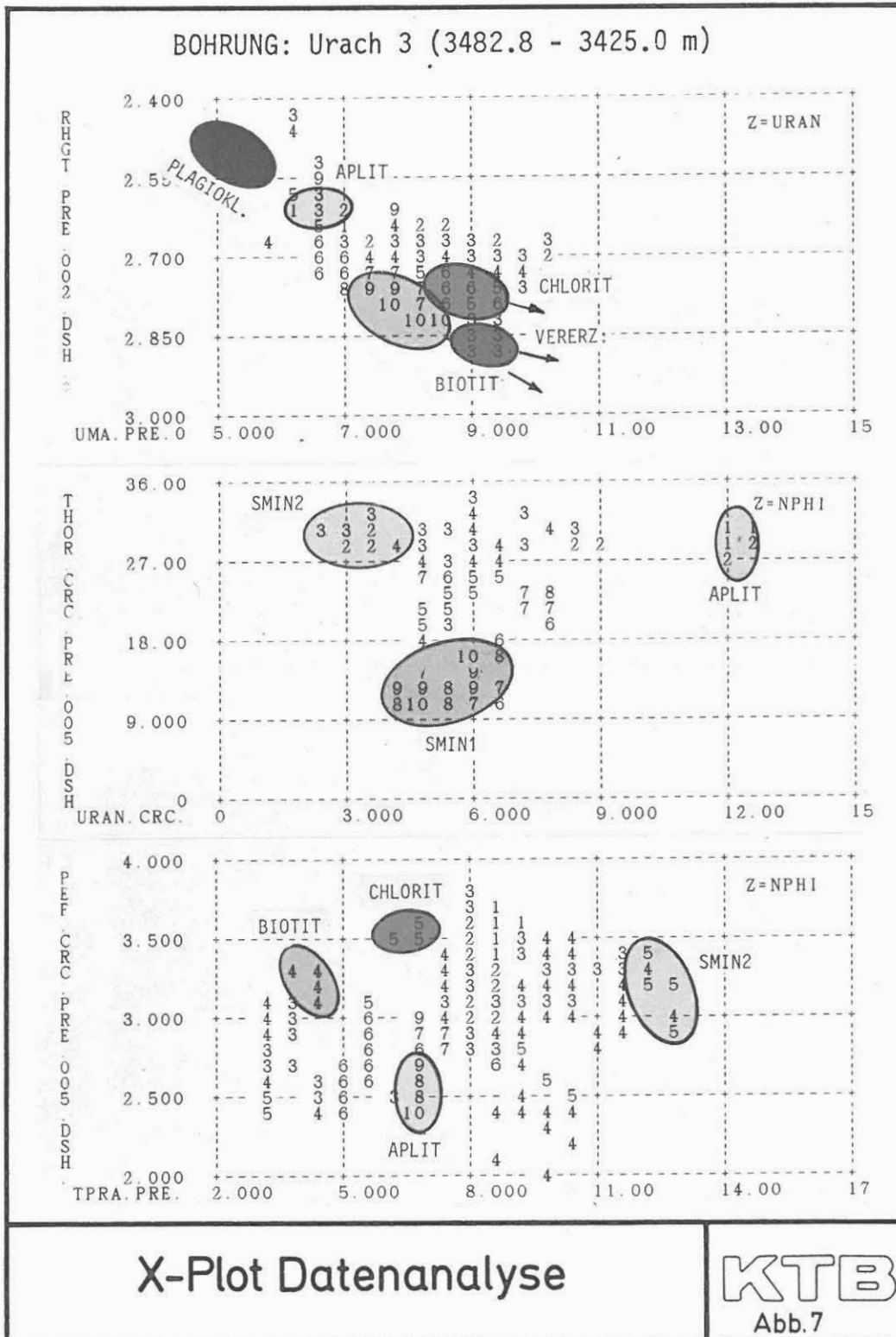


Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Die in zwei- oder dreidimensionalen X-Plots verarbeiteten Meßdaten bestätigen entweder direkt (Aplit) oder durch Trends diese Mineralkomponenten (Abb. 7).



X-Plot Datenanalyse

**KT B**

Abb.7

Mit Hilfe von vorgegebenen oder definierten Meßparametern (Abb. 8) wurde für die 8 vorhandenen Messungen ein Interpretationsmodell mit 7 Mineralen plus Porosität als 8. Parameter erstellt.

Nach dem Prinzip der Fehlerminimierung wurden theoretische Logansprachen entsprechend den physikalischen Gerätefunktionen ermittelt und mit den in der Bohrung registrierten, für Bohrlocheinfluß korrigierten Messungen verglichen. Bei guter Übereinstimmung ist der mögliche Fehler klein und das erzielte Resultat die bestmögliche Lösung. Die Zahl der gewählten Bestandteile des untersuchten Gesteins hängt von der Anzahl der Messungen ab. Die Mindestforderung ist ein ausgeglichenes System, d. h. die Anzahl der Parameter im Modell entspricht der Anzahl der Messungen. Besser wäre ein überbestimmtes System, d. h. mehr Messungen als Unbekannte im Interpretationsmodell.

Das Beispiel Urach 3 wurde mit Chlorit (+ "Bound Water" als Tonwasser), Biotit, Plagioklas (Na), Aplit, Vererzung, "Special Mineral 1" (Anatexit), "Special Mineral 2" (Diatexit) und Porosität gerechnet (Abb. 9).

Die Übereinstimmung der gerechneten mit den registrierten Messungen ist gut - bis auf die Sonic-Messung und über kürzere Abschnitte der Neutron-Messung. Eine Optimierung der Sonic- und Neutron-Mineralesingabewerte könnte eine weitere Resultatverbesserung bringen (Abb. 10).

Die Abweichungen der Dichtemessung sind Fehllesungen im Bohrloch, die durch starke Auskesselungen verursacht sind. Das vorläufige Resultat zeigt den Übergang von Diatexit zu Paragneis bei 3 464,0 m, zwei Aplitgänge bei 3 438,0 m - 3 440,0 m und 3 452,0 - 3 453,0 m. Im Bereich der granitoiden Mobilisate (Schlieren und Nester) ist ein erhöhter Chloritgehalt angezeigt (3 449,0 - 3 464,0 m). Der Übergang dieses "überprägten" in den "unvergrüntem" Bereich ist bei 3 448,0 m gut erkennbar. Der Paragneis-Anatexit zeichnet sich durch eine Zunahme der Porosität aus (Abb. 11).

In der Bohrung Urach 3 war über diesem Abschnitt 1983 kein Borehole Televierwer (BHTV) gefahren worden.

### 3.3.2.2 Klufiterkennung

Noch im Herbst 1986 wird die WESTFÄLISCHE BERGGEWERKSCHAFTSKASSE, Bochum (WBK), das für höhere Temperaturen modifizierte SABIS-Borehole-Televierwer-Gerät in dieser Bohrung testen. Die Ergebnisse dürften für die weitere Bewertung dieser Zone von Bedeutung sein. Das Auflösungsvermögen der neuen Generation von Geräten sei an einem Beispiel gezeigt.



Parameter Gesteinsart	RHOB (g/cm <sup>3</sup> )	PHIN (l.p.u.)	DTC (μsec/ft)	DTS (μsec/ft)	Σ (c.u.)	Pe (barn/el)	U (barn/cm <sup>3</sup> )	GR (API)	THOR (ppm)	K (%wt)	URAN (ppm)
Silikate Quarz	2.65	- 2	55.5	88	4.26	1.81	4.79		2	0	0.7
Feldspäte Orthoklas	2.55	- 3	69		15.51	2.86	7.21	~220	8-12	10-16	-
Plagioklas	2.62	- 2	49	85	7.47	1.68	4.35	-	0.01-3	0.5	0.02-5
Glimmer Muskovit	2.83	20-25	49-60	149	16.85	2.40	6.74	~270	20-25	7.8-9.8	2-8
Biotit	3.01	21	50.8		29.83	6.27	18.75	200-350	5-50	6.2-10	1-40
Pyroxene Augit	3.38	0.3-1	82	112	17.2			84-90	2-25	-	0.01-40
Olivene Forsterit	3.21	1.6-2	35	66	19.7			4-30	<0.01	-	0.01
Amphibole Hornblende	3.2	8	43.8	81.5	18.12	5.99	19.17		5-50	-	1-30
Eruptivgesteine Granit	2.65		42-61	82-113	11.6				14-62	2-6	3.6-16
Gabbro	2.95		45.7	87.7					2.7-38	0.5-0.6	0.8-0.9
Basalt	2.95		46-57	86-103					2-6	0.6-1	0.2-1.4
Rhyolit	2.39		73-75	123-131	12.9					4.2	5
Metamorphes Gestein Gneis	2.68-3.04		49-69	94-121							

Logging Parameter für Minerale und Gesteinsarten  
des Kristallins

**KTB**  
Abb.8

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

MINERALOGISCHES AUSWERTEMODELL

	CHLORIT	BIOTIT	PLAGIO- KLAS	APLIT	VER- ERZUNG	SPEZ. MIN.1 (ANATEXIT)	SPEZ. MIN.2 (DIATEXIT)	POROS. φ
RHOB	2.77	3.08	2.59	2.57	4.99	2.85	2.67	1.10
NPHI	52	21	-2	-5	-3	30	1	100
DT	90	51	47	54	39	65	52	189
U	17	19.8	4.5	5	85	8.6	7.1	0.39
CT	0.3				0	0	0	2.5
POTA	8	10	1	6	0	7	3	0
URAN	20	20	0	25	0	5	2.5	0
THOR	6	40	0	40	0	12	35	0

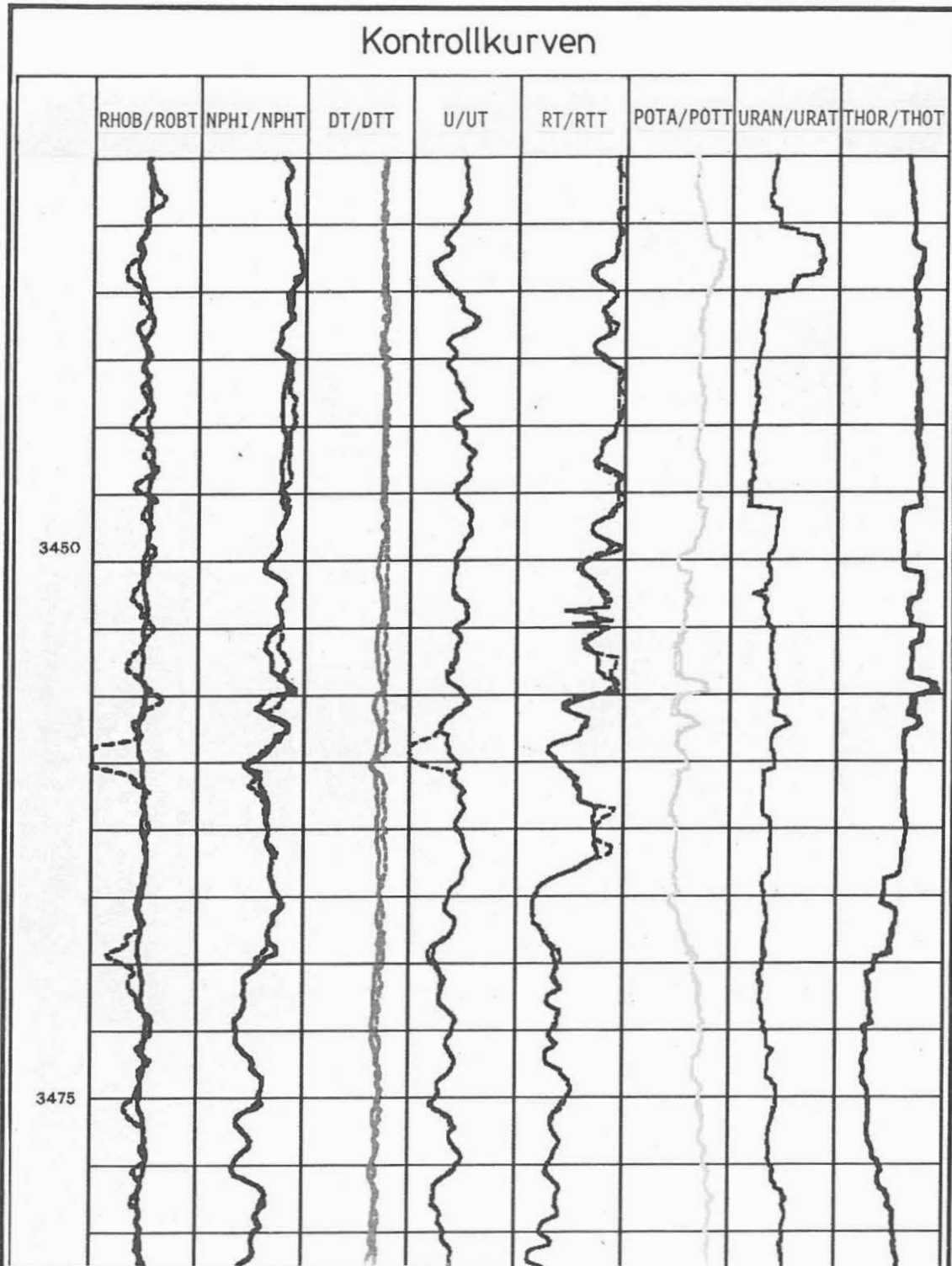
"ELAN"-Auswertung

Bohrung: Urach 3

Intervall: (3 482.8-3425.0m)

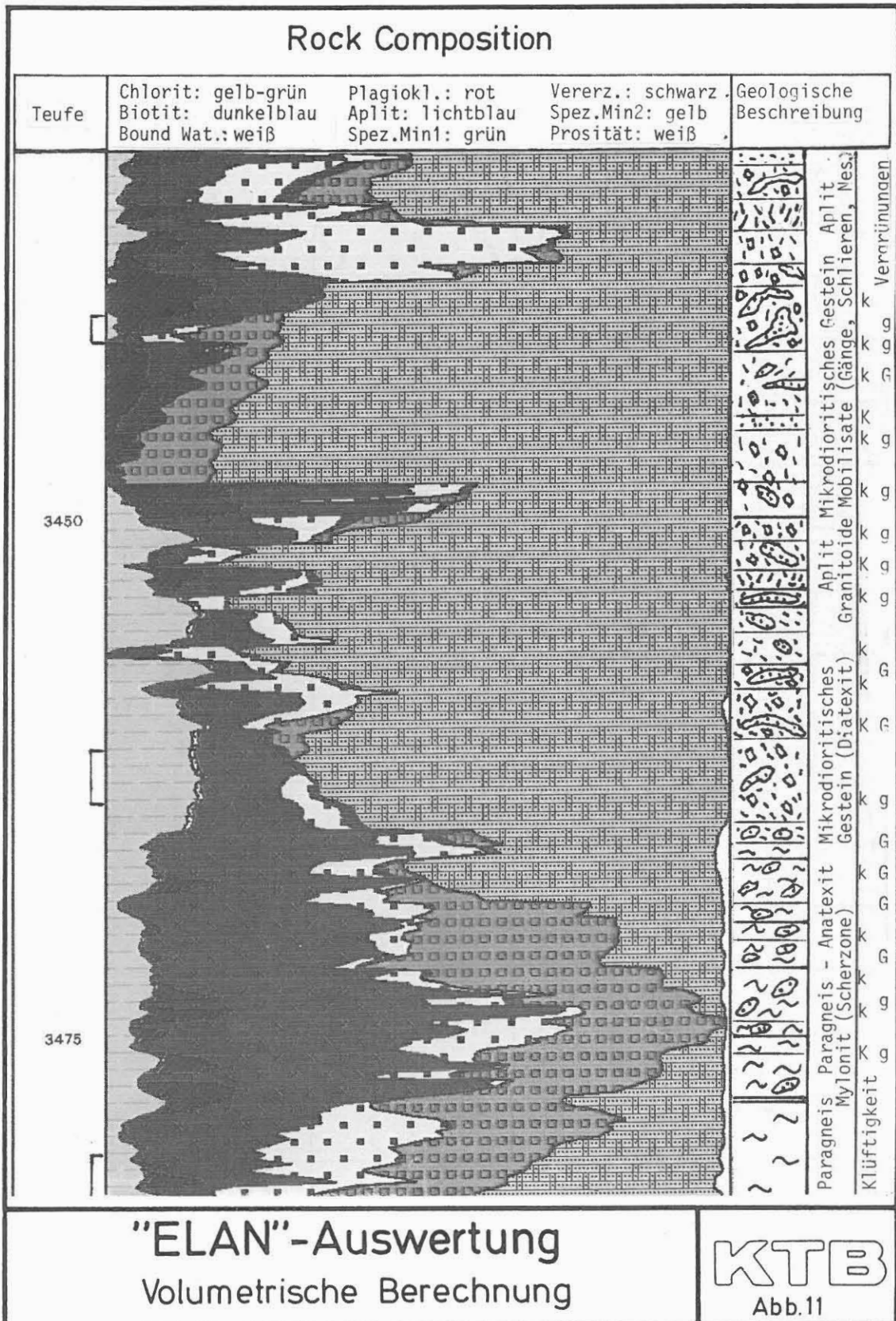
**KTB**  
Abb.9

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



**"ELAN"-Auswertung**  
Kontrolle: wirkliche / theoretische Messungen

**KTB**  
Abb. 10



# SABIS TELEVIEWER

Bohrung : 2 SCHÖNMATT

OFFENE KLUFT

Einfallen: 108°

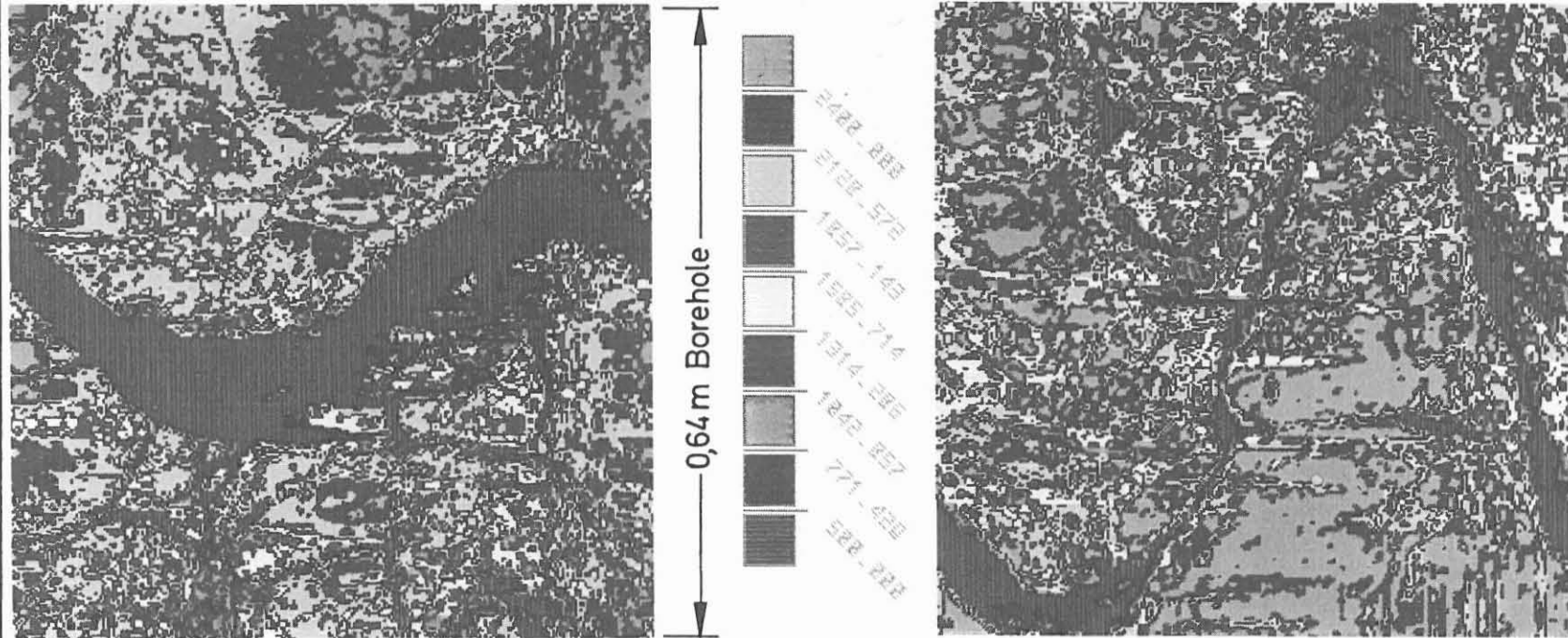
Neigung: ~30°

OFFENE KLUFT

Einfallen: 54°

Neigung: 80°

## AMPLITUDENDARSTELLUNG



### Kluftekennung

Strukturelle und texturale Erkundung

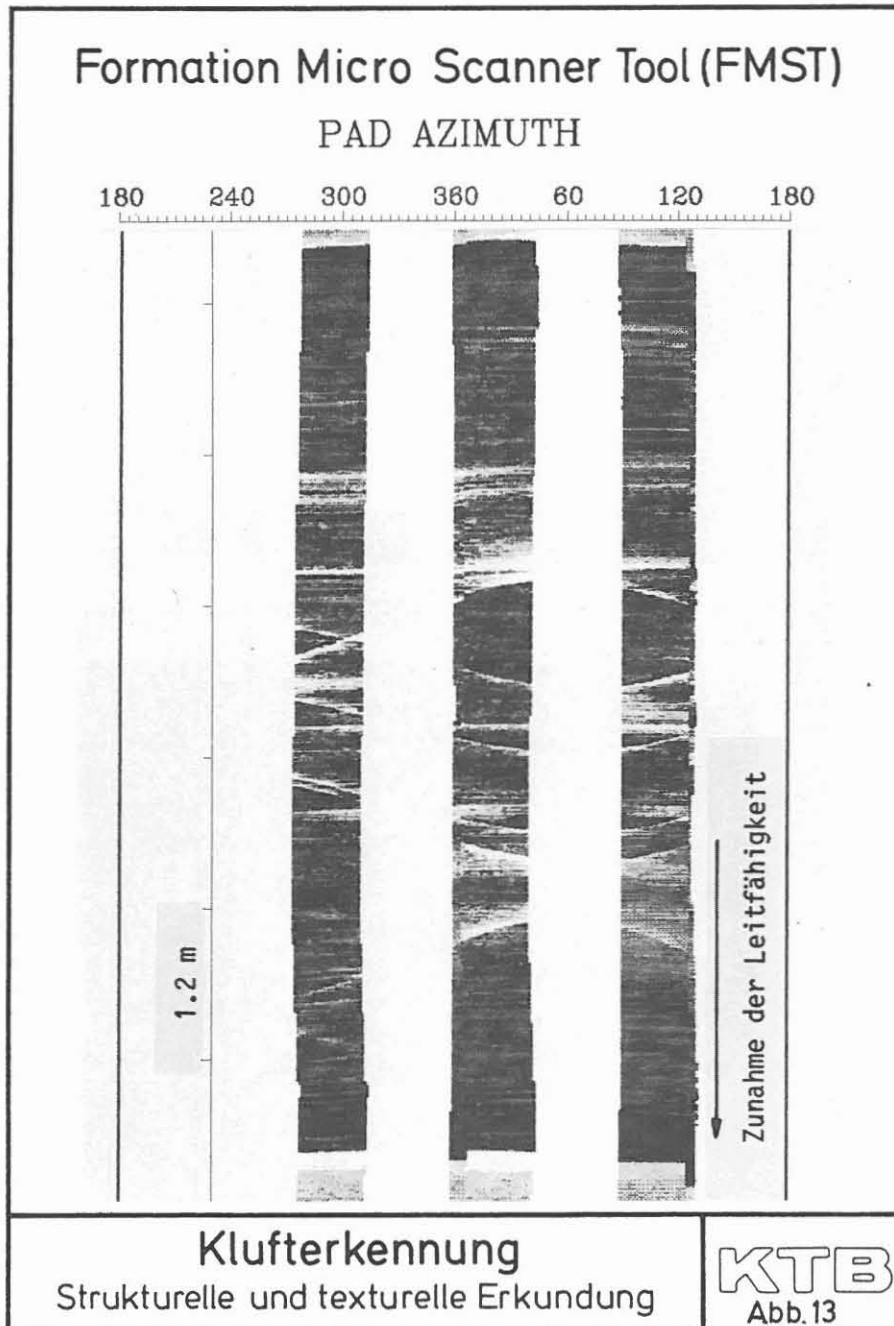
**KT B**

Abb.12

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

In den Erkundungsbohrungen für das KTB-Projekt wurden BHTV-Messungen gefahren. Aus der Bohrung 2 in Schön matt liegen hervorragende Aufnahmen vor. Die Messung läßt erkennen, daß der anstehende Gneis stark geklüftet ist. Das Beispiel zeigt zwei offene Klüfte, die unter verschiedenen Neigungswinkeln die Bohrung kreuzen (Abb. 12). Als Gegenstück, verheilte Klüfte mit niedrigen Einfallswinkeln, zeigt die Abbildung eine MicroScanner-Leitfähigkeitsmessung. Sie stammt aus einer Sedimentbohrung (Abb. 13).

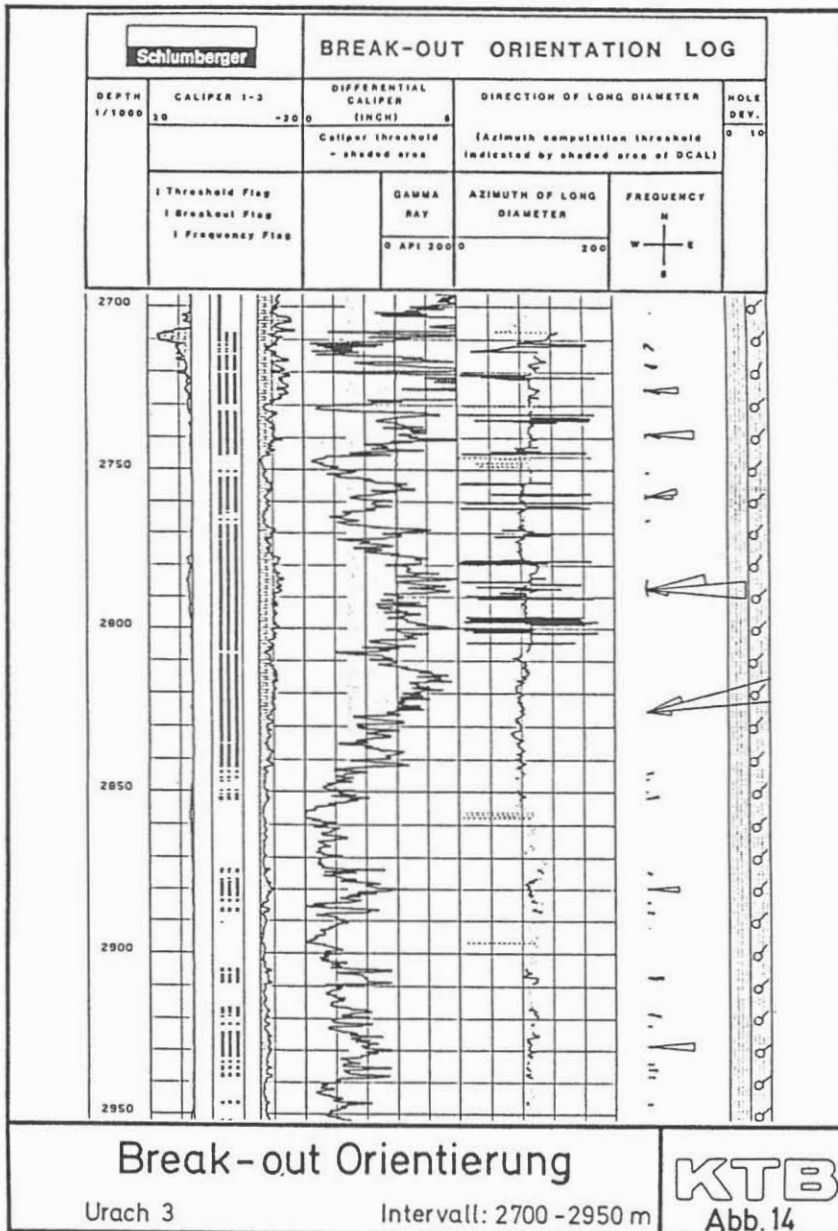
Beide Messungen ergänzen sich in ihrer Aussagekraft und sind schon von der NAGRA als unentbehrlich eingestuft worden.



### 3.3.2.3 Bohrlochstabilität

In Bohrungen, die in Gebieten mit unausgeglichene Spannungssystemen abgeteuft werden, sind Bohrlochrandausbrüche zu beobachten. Sie entstehen durch Scherbrüche an der Bohrlochwand. Dadurch entsteht eine Ovalisierung des Bohrlochquerschnittes. Die lange Achse orientiert sich nach der Richtung der kleinsten horizontalen Spannungskomponente, in der die Scherbrüche auftreten. Diese Richtung kann durch eine orientierte Vierarm-Kalibermessung gemessen und über das sogenannte Break-out Orientation-Log kontinuierlich ausgewertet werden. In der Bohrung Urach 3 wurde für den Abschnitt von 1 830,0 - 3 315,0 m diese Auswertung durchgeführt. Die Richtung ist 70 - 80° Ost. Rechtwinkelig hierzu wäre die Hauptspannungsrichtung zu finden.

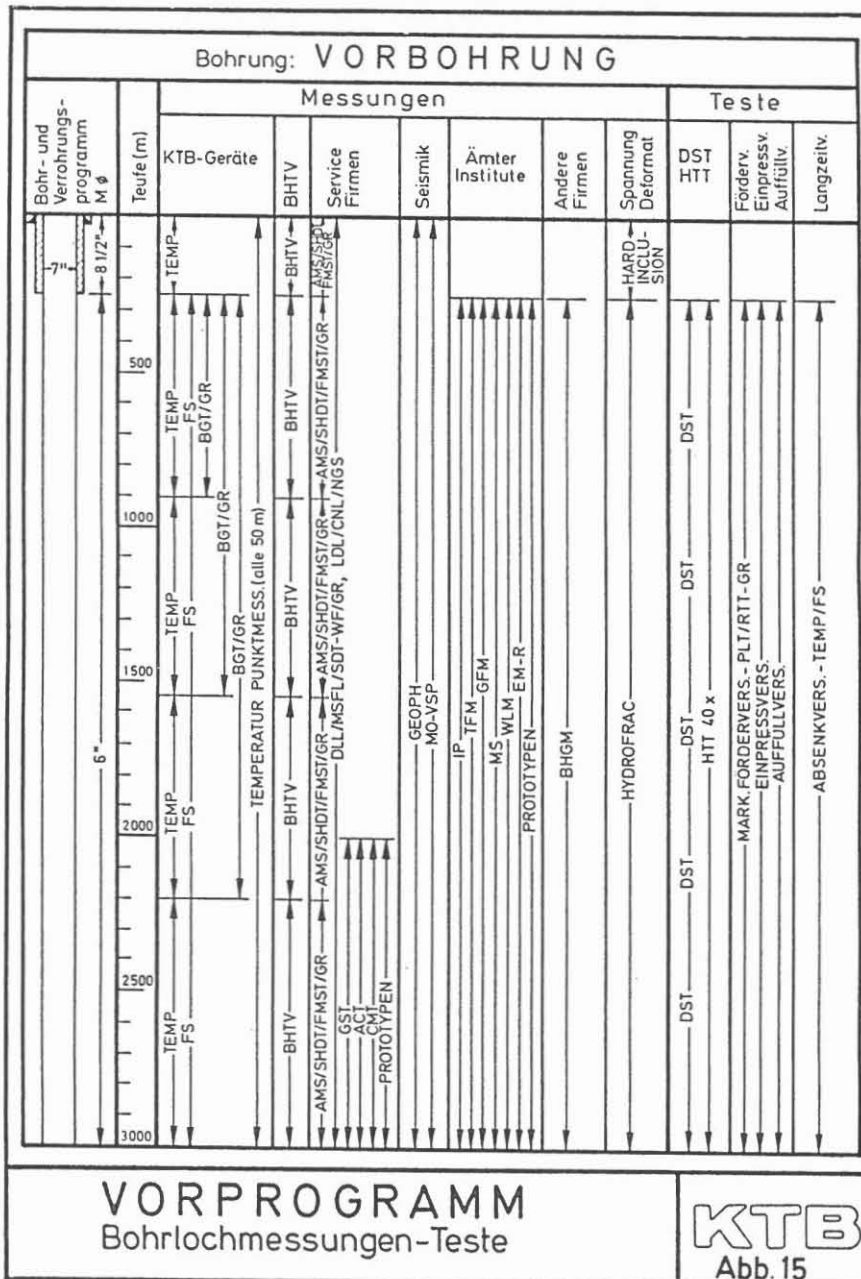
Das gezeigte Beispiel stammt ebenfalls aus der Bohrung Urach 3, jedoch nicht aus dem Abschnitt der Vertiefung (Abb. 14).



### 3.3.2.4 Messprogramm für die KTB-Vorbohrung

Das entworfene Vorprogramm für Messungen und Tests in der Vorbohrung entspricht den von den Geowissenschaften geforderten Prioritäten und berücksichtigt die bereits in Bohrungen des Kristallins gemachten Erfahrungen. Die genaue Ermittlung der Temperaturen, der Standfestigkeit des Gebirges, die Erkennung der Klüftigkeit als mögliche Bewegungsbahn von Fluiden und die Bewertung der Lithologie und Textur sind Ziel der Untersuchung (Abb. 15).

Als Vorerkundung für die Hauptbohrung sind seismische Untersuchungen (VSP-MO) vorgesehen. In einer Langzeit-Testperiode sollen Fluidbewegungen, Permeabilität, Wärmeproduktion etc. festgestellt und registriert werden. Die gewonnenen Kenntnisse sollen der Planung für die Hauptbohrung dienen.



### 3.3.3 Zusammenfassung

Bohrlochmessungen sind ein ganz wichtiger Teil der Untertage-Datenerfassung. Nur sie garantieren Parameter, die unter in situ-Bedingungen gemessen worden sind und ergeben ein kontinuierliches geologisch-mineralogisches Profil. Die Kalibrierung der Messungen an vorhandenen Kernen erlaubt die Übertragung der Information auf Zonen, die nicht gekernt worden sind oder in denen Kernverlust zu verzeichnen war. Das sehr kostenintensive Bohren von orientierten Kernen kann entfallen, da mit Hilfe der modernen, billigeren Bohrlochmeßtechnik die Nachorientierung von Kernen durchgeführt werden kann.

In der Hauptbohrung, in der nur bestimmte Intervalle gekernt werden sollen, werden Bohrlochmessungen unverzichtbar sein.

Die für sedimentäre Gesteine entwickelten Meßverfahren und Auswertemethoden sind nach vorhergehender Optimierung auf das Kristallin übertragbar. Jedoch ist es notwendig, Neuentwicklungen durchzuführen, sie zu testen und entsprechend dem Auftrag dieses Forschungsvorhabens zu integrieren. Die heute bereits zur Verfügung stehenden HEL-Geräte haben eine Temperaturgrenze von 260 °C. Einige Geräte der Geothermie erreichen bereits 300 °C.

Wenn das vorgeschlagene Meßprogramm für die Vorbohrung durchgeführt wird, ist eine breite Basis an Erfahrungen vorhanden, auf die sich die Programmerstellung für die Hauptbohrung stützen kann. Eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie, den Hochschulen und Ämtern ist Voraussetzung.

### 3.3.4 Literaturliste

- DIETRICH, H.G. (1984): Zwischenbericht Bohrung Urach 3. - Stadtwerke Bad Urach, Bad Urach.
- DRAXLER, J.K., EDWARDS, D.P. (1984): Carboniferous Study. - Schlumberger EUR, London.
- NAGRA (1985): Technischer Bericht 85-01 (Sondierbohrung Böttstein - Untersuchungsbericht). - Baden/Schweiz.
- SCHLUMBERGER (1982): Well Evaluation Developments, Continental Europe. - Baden-Baden.
- SCHLUMBERGER (1985): Well Evaluation Conference China 1985. - Peking.
- SPWLA (1982): Geothermal Log Interpretation Handbook. - Tulsa.
- VATTENFALL (1986): Deep Gas Project - The Siljan Ring. - Gas Project G.-2; 5; Stockholm.