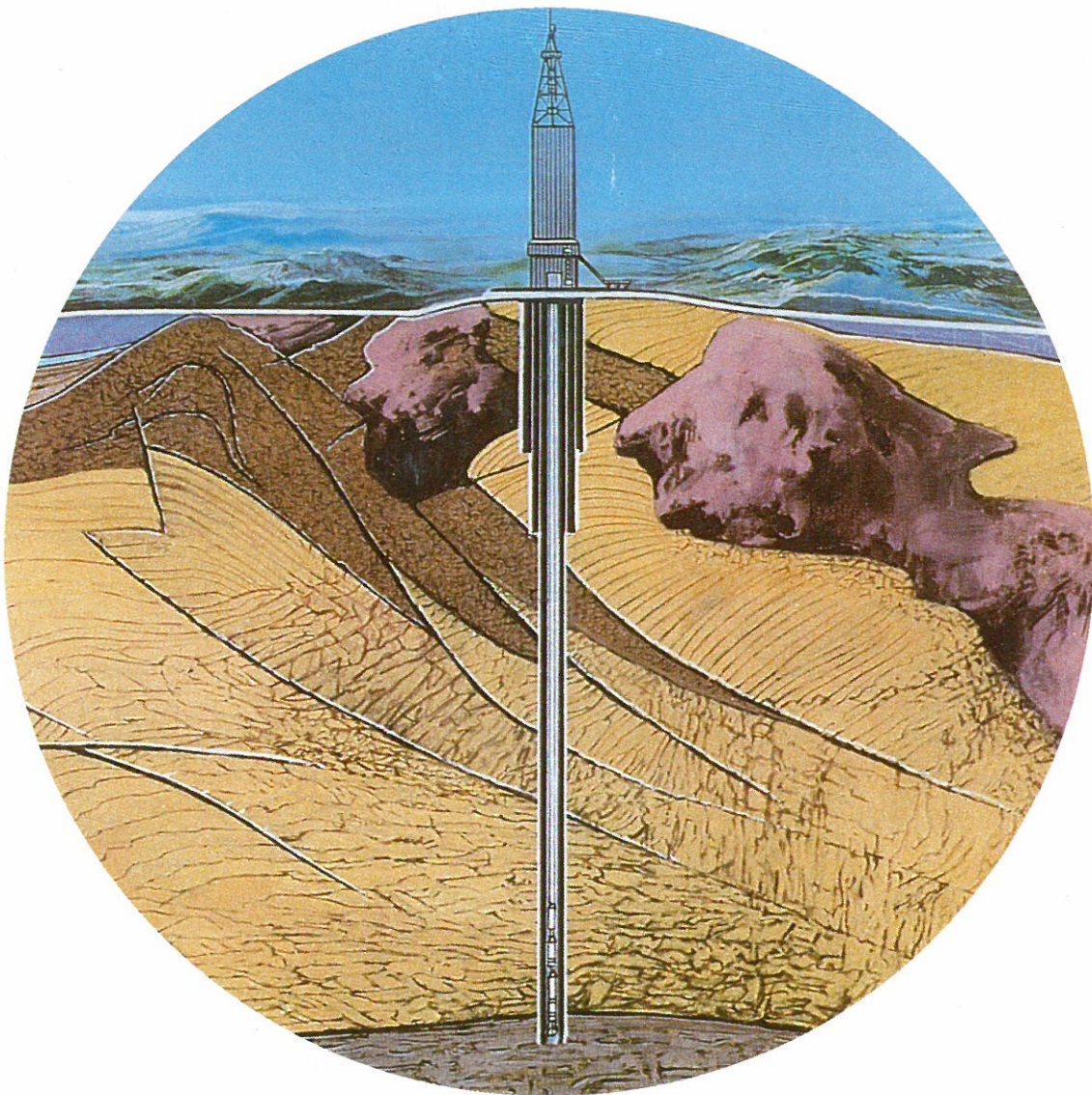


KTB REPORT 87-1

**Vorträge der Bereiche Geowissenschaften,
Operative Geologie und Technik der Projektleitung
beim KTB – Kolloquium Seeheim
19. – 21.9.1986**



Herausgegeben von der
Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland
im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

Redaktion: DR. PETER HEINRICH

Titelbild: GÜNTHER RADTKE

Druck: A. Bernecker, 3508 Melsungen

Für den sachlichen Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

Anschrift des Herausgebers: Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Postfach 510153, D-3000 Hannover 51. Telefon (0511) 643 2670.

VORWORT

Der KTB-Report ist als eine Publikationsreihe für Arbeitsberichte, kontinuierliche Mitteilungen aus dem Feldlabor, Zwischenergebnisse, Literaturkompilationen, Tagungsauswertungen u.ä. gedacht. Er soll alle Mitarbeiter des KTB rasch informieren und alle für den bohrtechnischen, meßtechnischen und interpretativen Ablauf der Bohrung entscheidenden Schritte und Daten registrieren. Die Einzelhefte erscheinen je nach Bedarf in zwangloser Folge, in der Regel mit einer Auflage von 500 Stück. Die Exemplare sind über die Projektleitung KTB im NLFb erhältlich.

Der Report ist ein Organ, das der KTB-Projektleitung und dem DFG-Schwerpunktprogramm "KTB" gleichermaßen offensteht. Die redaktionellen Arbeiten und die drucktechnische Ausführung werden von der Projektleitung KTB übernommen. Da keine zusätzliche Personalkapazität zur Verfügung steht, müssen die Manuskripte druckfertig und mit Zeilenausgleich geschrieben sowie mit eingeklebten Abbildungen eingereicht werden. Eine ausführliche Schreibanleitung kann bei der KTB-Projektleitung angefordert werden. Manuskripte sind entweder über den betreffenden Fachbereich¹⁾ oder die Schwerpunktkoordination²⁾ zu leiten. Die Eröffnung der Reihe fällt mit dem Beginn der Vorbohrung zusammen. Das erste Heft enthält die wichtigsten Vorträge von Mitgliedern der KTB-Projektleitung, die auf der Tagung in Seeheim im September 1986 gehalten worden sind. Soweit notwendig wurde der Inhalt der Beiträge für diese Veröffentlichung aktualisiert.

Hannover, September 1987

KTB-Projektleitung

DFG-Schwerpunkt

Anschriften:

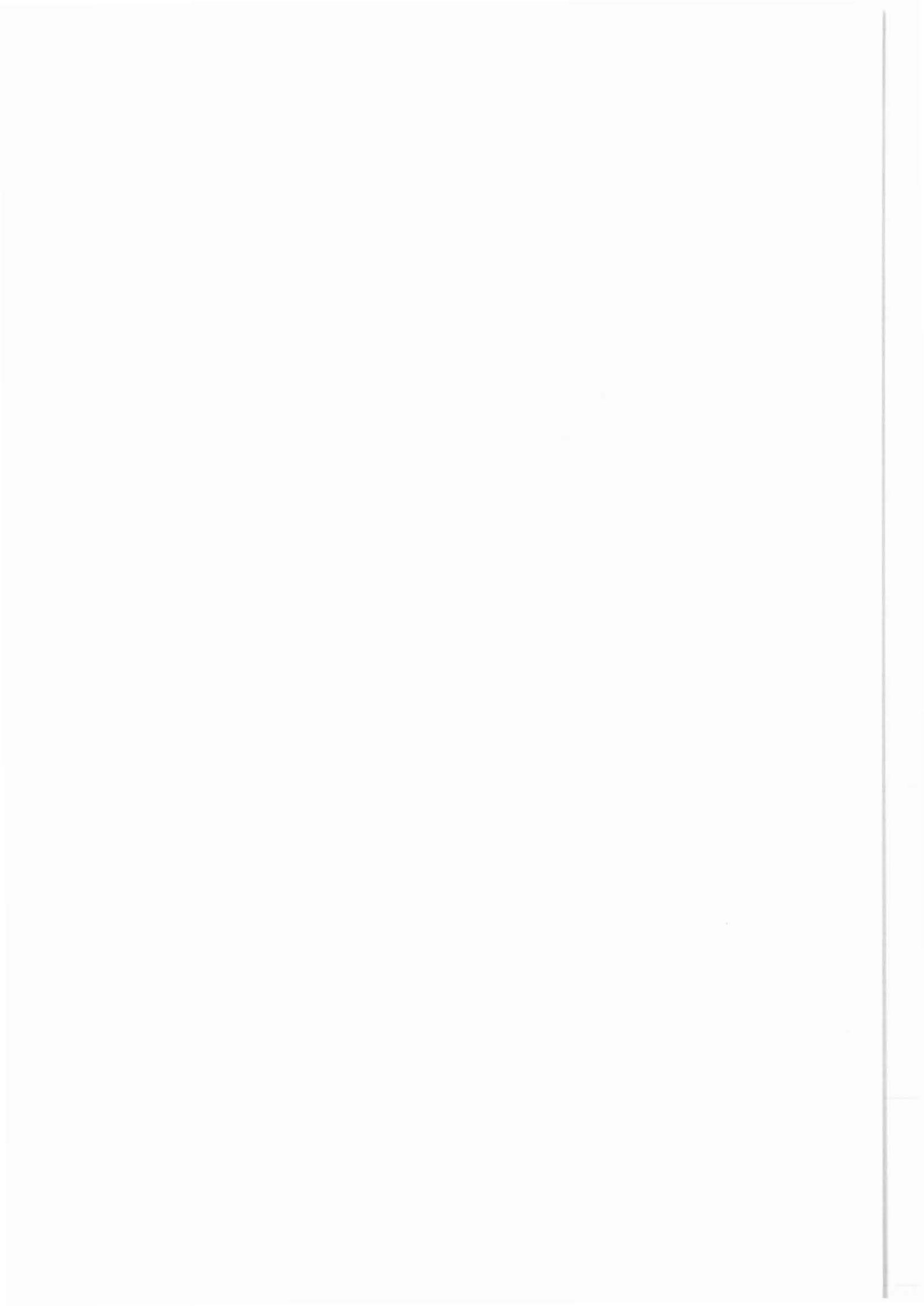
- 1) Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, (Fachbereich Geowissenschaften, Operative Geologie oder Technik), Stilleweg 2, D - 3000 Hannover 51
- 2) KTB-Koordinationsbüro im Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung der Justus-Liebig-Universität, Senckenbergstr. 3, D - 6300 Gießen

| | Seite |
|---|-------|
| VORWORT | I |
| INHALTSVERZEICHNIS | II |
| 1 FACHBEREICH GEOWISSENSCHAFTEN | 1 |
| 1.1 BEHR, H.-J.: KTB und kontinentale Krustenforschung - warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm? | 1 |
| 1.1.2 Die ozeanische Kruste, der Schlüssel zur Platten- tektonik - vom DSDP/ODP zum KTB..... | 2 |
| 1.1.3 Von der Krusten- zur Lithosphärenforschung..... | 3 |
| 1.1.4 Satellitengeologie, der Weg zur vergleichenden Geodynamik..... | 5 |
| 1.1.5 Wasser, das Blut der Lithosphäre..... | 5 |
| 1.1.6 Tiefenseismik, elektrische Leiter, 3-D-Seismik - der Weg zur Tomographie von Lithosphäre und Erd- mantel, zum Verständnis und zur Rekonstruktion von 3 Milliarden Jahren Krustenentwicklung..... | 6 |
| 1.1.7 Extensionsorogen und Transpress-Tektonik versus Kon- vergenzorogen..... | 18 |
| 1.1.8 Haben low-velocity-Zonen die Funktion einer intra- krustalen Asthenosphäre?..... | 24 |
| 1.1.9 Transects - Großprofile durch die Kontinente..... | 27 |
| 1.1.10 Tiefbohrprojekte - Sonden der inneren Raumfahrt..... | 27 |
| 1.1.11 "Unternehmen Krustenfenster" - das KTB und seine Begleitprogramme..... | 28 |
| 1.1.12 Ausblick..... | 32 |
| 1.1.13 Referenzliste..... | 33 |
| 2 FACHBEREICH TECHNIK | 36 |
| 2.1 RISCHMÜLLER, H.: Das "Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland", eine technische Herausforderung | 36 |
| 2.1.1 Einleitung..... | 36 |
| 2.1.2 Das Gesamtkonzept - ein Synergismus von Vorbohrung, Hauptbohrung, wissenschaftlichem und Bohrlochmeßpro- gramm..... | 38 |
| 2.1.2.1 Vorbohrung..... | 38 |
| 2.1.2.2 Hauptbohrung..... | 42 |
| 2.1.3 Das F- und E-Konzept..... | 47 |
| 2.1.4 Zeitplan..... | 48 |
| 2.1.5 Schluß und Ausblick..... | 48 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.2 | CHUR, C., JÜRGENS, R., OPPELT, J., WOHLGEMUTH, L.: Konzept für das Abteufen der Vorbohrung - Eine Synthese von Rotary- und Bergbautechnik..... | 50 |
| 2.2.1 | Aufgaben der Vorbohrung..... | 50 |
| 2.2.2 | Anforderung an die Vorbohrung..... | 51 |
| 2.2.3 | Bohrverfahren zum Abteufen der Vorbohrung..... | 51 |
| 2.2.3.1 | Rotarybohrverfahren..... | 51 |
| 2.2.3.2 | Bergbauverfahren..... | 52 |
| 2.2.3.3 | Vergleich der Bohrverfahren..... | 52 |
| 2.2.3.4 | Bohrergebnisse im kristallinen Grundgebirge..... | 53 |
| 2.2.4 | Technisches Konzept der Vorbohrung..... | 56 |
| 2.2.5 | Literatur..... | 58 |
| 2.3 | SPERBER, A., CHUR, C.: Konzept der Hauptbohrung - Bohrprogramm und Verrohrungsschema..... | 59 |
| 2.3.1 | Einleitung..... | 59 |
| 2.3.2 | Bohr- und Verrohrungsschema..... | 60 |
| 2.3.2.1 | Bohr- und Verrohrungsschema bei Kohlenwasserstoffex- plorationsbohrungen..... | 60 |
| 2.3.2.2 | Einfluß des Bohrdurchmessers auf Bohrkosten..... | 62 |
| 2.3.2.3 | Bohr- und Verrohrungsschema der Kontinentalen Tief- bohrung..... | 63 |
| 2.3.3 | Schlußbetrachtung..... | 68 |
| 2.3.4 | Literatur..... | 68 |
| 2.4 | ENGESER, B., UJMA, K.-H.: Spülungssysteme in der Vor- und Hauptbohrung..... | 69 |
| 2.4.1 | Einleitung..... | 69 |
| 2.4.2 | Aufgaben der Bohrspülung..... | 69 |
| 2.4.3 | Spülungskonzept - Vorbohrung..... | 70 |
| 2.4.3.1 | Spezielle Anforderungen..... | 70 |
| 2.4.3.2 | Bohrlochhydraulik..... | 71 |
| 2.4.3.3 | Spülungssysteme..... | 74 |
| 2.4.3.3.1 | Wasser..... | 74 |
| 2.4.3.3.2 | Wasserbasierte-Polymerpülungen..... | 74 |
| 2.4.4 | Spülungskonzept - Hauptbohrung..... | 76 |
| 2.4.4.1 | Bohrtechnische Überlegungen..... | 76 |
| 2.4.4.1.1 | Feststoffgehalt/Dichte..... | 76 |
| 2.4.4.1.2 | Hydraulik..... | 78 |
| 2.4.4.1.3 | Korrosion/Reibungsverminderung..... | 79 |
| 2.4.4.2 | Geowissenschaftliche Anforderungen..... | 79 |
| 2.4.4.3 | Spülungssysteme - Hauptbohrung..... | 80 |
| 2.4.4.3.1 | Teufenbereich bis ca. 5 000 m..... | 80 |
| 2.4.4.3.2 | Hochtemperaturstabile Spülungen..... | 81 |
| 2.4.5 | Entwicklungsschwerpunkte..... | 82 |
| 2.4.6 | Schlußbetrachtung..... | 82 |
| 2.4.7 | Literatur..... | 83 |

| | | |
|---------|--|----------|
| 2.5 | CHUR, C., EICKELBERG, H.D., LIEHMANN, U.: Bohranlagenkonzept für die Hauptbohrung..... | 84 |
| 2.5.1 | Besondere Anforderungen an die KTB-Tiefbohranlage | |
| 2.5.2 | Konzepte der Arbeitsgemeinschaften für die KTB-Tiefbohranlage..... | 84 |
| 2.5.3 | Auslegungsdaten für Turm, Hebewerk, Spülungspumpen und Tankanlage..... | 84 85 |
| 2.5.4 | Das automatische Pipehandling-System..... | 89 |
| 2.5.5 | Zusammenfassung..... | 91 |
| 2.5.6 | Literatur..... | 91 |
| 2.6 | SPERBER, A., SCHRÖDER, U.: Bohrplatz, landschaftspflegerischer Begleitplan und Sicherheitsstudie für das KTB..... | 92 |
| 2.6.1 | Einleitung..... | 92 |
| 2.6.2 | Bohrplatzkonzept..... | 92 |
| 2.6.2.1 | Geschichtliche Entwicklung des Bohrplatzbaues..... | 92 |
| 2.6.2.2 | Gesetzliche Bestimmungen und beteiligte Behörden..... | 93 |
| 2.6.2.3 | Prinzip einer Sicherheitsstudie..... | 97 |
| 2.6.2.4 | Lösungsvorschlag Bohrplatzkonzept..... | 98 |
| 2.6.3 | Schlußbetrachtung..... | 101 |
| 2.6.4 | Literatur..... | 102 |
| 3 | FACHBEREICH OPERATIVE GEOLOGIE..... | 104 |
| 3.1 | KEHRER, P.: Konzept einer optimalen Datenanalyse an Vor- und Hauptbohrung..... | 104 |
| 3.1.1 | Zusammenfassung..... | 104 |
| 3.1.2 | Einführung..... | 105 |
| 3.1.3 | Organisation..... | 105 |
| 3.1.4 | Untertage-Datengewinnung (Logging)..... | 106 |
| 3.1.4.1 | Möglichkeiten..... | 106 |
| 3.1.4.2 | Probennahme..... | 106 |
| 3.1.4.3 | Bohrlochmessungen..... | 108 |
| 3.1.4.4 | Dauermeßstation (Logging Unit)..... | 110 |
| 3.1.4.5 | Teste und Experimente..... | 111 |
| 3.1.5 | Übertage-Datengewinnung..... | 111 |
| 3.1.5.1 | Methodik..... | 111 |
| 3.1.5.2 | Bohrungsbearbeitung..... | 111 |
| 3.1.5.3 | Feldlabor..... | 112 |
| 3.1.6 | Data Unit (Zentrale Computer-Einheit)..... | 113 |
| 3.1.7 | Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben..... | 113 |
| 3.1.8 | Technische Limitation..... | 114 |
| 3.1.9 | Konzept..... | 114 |
| 3.1.10 | Literatur..... | 116 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.2 | HÄNEL, R.: Logging Strategie für das KTB..... | 117 |
| 3.2.1 | Zusammenfassung..... | 117 |
| 3.2.2 | Einleitung..... | 117 |
| 3.2.3 | Definition..... | 117 |
| 3.2.4 | Gesamtstrategie..... | 119 |
| 3.2.5 | Detailschritte..... | 121 |
| 3.2.6 | Literatur..... | 129 |
| 3.3 | DRAxLER, J.K.: Erfahrungen mit Bohrlochmessungen im Kristallin..... | 130 |
| 3.3.1 | Einleitung..... | 130 |
| 3.3.2 | Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse..... | 133 |
| 3.3.2.1 | Bestimmung der Lithologie und Mineralzusammensetzung..... | 133 |
| 3.3.2.2 | Klufterkennung..... | 137 |
| 3.3.2.3 | Bohrlochstabilität..... | 143 |
| 3.3.2.4 | Messprogramm für die KTB-Vorbohrung..... | 144 |
| 3.3.3 | Zusammenfassung..... | 145 |
| 3.3.4 | Literatur..... | 145 |
| 3.4 | DIETRICH, H.G., HEINISCH, M.: Die geowissenschaftliche Bohrungsbearbeitung vor Ort unter Einbeziehung des Feldlabors..... | 146 |
| 3.4.1 | Einleitung..... | 146 |
| 3.4.2 | Hauptaufgabenbereiche..... | 146 |
| 3.4.3 | Arbeitsrichtungen und Ziele..... | 146 |
| 3.4.4 | Dimension des KTB-Feldlabors..... | 149 |
| 3.4.5 | Art und Untersuchungen des Probenmaterials..... | 151 |
| 3.4.5.1 | Untersuchung fester Proben..... | 152 |
| 3.4.5.2 | Untersuchung flüssiger Proben..... | 158 |
| 3.4.5.3 | Untersuchung gasförmiger Proben..... | 160 |
| 3.4.5.4 | Überwachung der Bohrspülung..... | 160 |
| 3.4.6 | Zusammenfassung..... | 161 |
| 3.4.7 | Literaturverzeichnis..... | 163 |



1 FACHBEREICH GEOWISSENSCHAFTEN

1.1 BEHR, H.J.: KTB und kontinentale Krustenforschung - warum ein wissenschaftliches Tiefbohrprogramm?

Das KTB ist für die deutsche Geowissenschaft und Geotechnik eine ungewöhnliche Herausforderung. Ungewöhnlich in der Dimension einer Grundlagenforschung in dieser Fachrichtung, ungewöhnlich in den dafür notwendigen Strukturen der Zusammenarbeit zwischen den in Deutschland traditionell stärker spezialisierten geowissenschaftlichen Disziplinen, ungewöhnlich im Zusammenspiel und den Abhängigkeiten zwischen Instituten, Ämtern, Ministerien, DFG und Behörden, zwischen Wissenschaft und Technik und ungewöhnlich im Management. Obwohl es nicht das Ziel ist, einen Bohrrekord aufzustellen, werden als wissenschaftliche Vorgaben eine Tiefe zwischen 10 - 15 km und Temperaturen zwischen +250° - 300 °C angestrebt. Das vom BMFT geförderte und bewilligte Projekt soll möglichst 14 km erreichen. Die Tiefe ist allein wissenschaftlich begründet, da sie aber neben den bereits erzielten 12 066 m der Bohrung Kola SG-3 und den vorgesehenen 15 km des Appalachen-Projektes in den USA steht, übt sie natürlich auch einen starken Anreiz auf die beteiligten Ingenieurwissenschaften und die Geoindustrie aus.

Das KTB ist Teil eines langjährigen internationalen Großprogrammes zur Erforschung der kontinentalen Erdkruste, an dem sich viele Länder beteiligen. Die gemeinsame wissenschaftsorganisatorische Basis und das Forum für die Formulierung entscheidender Schlüsselexperimente in den Geowissenschaften ist das internationale Lithosphärenprogramm der Inter-Union Commission on the Lithosphere mit dem derzeitigen Präsidenten Prof. Dr. K. FUCHS (Karlsruhe), einer Kommission des International Council of Scientific Unions.

Dieses erste Heft einer KTB-Publikationsreihe enthält technische Beiträge, die den Stand der Planung und Überlegungen von 1986 präsentieren. Es richtet sich in erster Linie an den technischen Partner aus Industrie und Forschungseinrichtungen. Der einleitende Beitrag soll vor allem diesem Kreis den Hintergrund des Projektes, die Ziele und Zusammenhänge näherbringen und darstellen, warum sich das KTB im Gegensatz zu vielen anderen internationalen Programmen zunächst auf ein einziges, besonders tiefes Experiment konzentriert. Der Beitrag soll andererseits die Tatsache vermitteln, daß das Projekt nicht nur Teil eines globalen Programmes ist, sondern daß es auch in ein integriertes System nationaler Projekte eingebunden wurde mit dem Ziel, ein Fenster durch die kontinentale Kruste zu schaffen.

Zwischen den ersten Überlegungen für ein solches Unternehmen 1977, angeregt und gefördert durch die Geokommission der DFG, der Reduzierung von 40 Lokationen auf 4 im Jahre 1980 (Hohenzollerngraben, Hohes Venn, Schwarzwald, Oberpfalz) auf 2 im Jahre 1984 (Schwarzwald, Oberpfalz) und der abschließenden Bewilligung des Projektes durch das Bundesministerium

für Forschung und Technologie mit einer Bohrung in der Oberpfalz im Jahre 1986 und dem Beginn der Vorbohrung im September 1987, liegen 10 Jahre mit einem bedeutenden Kenntniszuwachs über die mitteleuropäische paläozoisch geformte Kruste. Bereits vor dem ersten Bohrmeter wurde nicht nur eine große Datenfülle angehäuft, sondern auch neue Denkansätze gefunden, und es können erste Modellvorstellungen zur Diskussion gebracht werden. Diese Ergebnisse sind zum Teil in den bereits erschienen zwei Bänden der Buchreihe "Observation of the Continental Crust through Drilling" (I, II) veröffentlicht (siehe Referenzliste) bzw. werden in den künftigen Heften dieser Reihe publiziert. Der Autor will mit diesem Beitrag keine umfassende geowissenschaftliche Darstellung und Diskussion des in vielen Projekten erarbeiteten Kenntnisstandes und der daraus formulierten Zielvorstellungen der beteiligten Fachgruppen und der in einem DFG-Schwerpunktprogramm zusammengefaßten Wissenschaftler geben. Es soll vielmehr eine allgemeine Orientierung über die Ziele des KTB vor dem Hintergrund der internationalen Krustenforschung, einiger bereits erkennbarer Zwischenergebnisse und der sich mit dem Wissenszuwachs kontinuierlich wandelnden Arbeitshypothesen gegeben werden.

1.1.2 Die ozeanische Kruste, der Schlüssel zur Plattentektonik - vom DSDP/ODP zum KTB

Die geowissenschaftliche Erforschung der Erde hat mit der kartierenden, systematisch-analytischen Beschreibung der kontinentalen Geologie begonnen. Notwendigkeiten der Rohstoffprospektion und des mittelalterlichen Bergbaus standen dabei Pate. Trotz einer außerordentlichen Fülle an erdgeschichtlichen, strukturellen, mineralogisch/geochemisch/petrologischen und geophysikalischen Daten, die in etwa 200 Jahren aufgezeichnet wurden, gelang es nicht, das geodynamische Prinzip zu finden, das der Erdkrustenentwicklung zugrunde liegt. Mit einer Flut an widersprüchlichen geotektonischen Hypothesen und Theorien endete dieser erste Abschnitt der kontinentalen Geologie schließlich vor etwa 30 Jahren. Die nur schwer auflösbare Entwicklung der komplex gebauten, aus einem Mosaik polystrukturell und polymetamorph überprägter, z.T. aus bis über 3 Milliarden Jahre alten Bausteinen zusammengefügt Kontinente, die Begrenzung der Kenntnisse auf die an der Erdoberfläche angeschnittenen Niveaus bei fehlendem Einblick in die Tiefendimension, vor allem aber der bis dahin unbekannte und nur spekulative Zusammenhang mit der ozeanischen Kruste verschleierte die Zusammenhänge und machten es unmöglich, ein umfassendes Modell zu entwickeln. Mehrere Zwischenschritte waren erforderlich, bevor mit völlig neuen Arbeitsansätzen und Methoden begonnen werden konnte, die kontinentale Evolution und Dynamik aufzulösen.

Begünstigt durch die off-shore-Aktivitäten der Erdölindustrie kamen marine Bohrtechniken zur Entwicklung, die den Weg zur wissenschaftlichen Erforschung der ozeanischen Kruste öffneten und schließlich zum Deep Sea Drilling Project (DSDP) mit dem Bohrschiff "Glomar Challenger" und dem anschließenden Ocean Drilling Project (ODP) mit der "Joides Resolution" führten. Wieder hatten die praktischen Belange der Rohstoffsuche für die

Erschließung des zweiten, flächenmäßig größeren, aber bis dahin unbekanntes Krustentypes der Erde den Geburtshelfer gespielt und die marine Geologie begründet. Seit 1968 konnten 1 400 Bohrungen mit etwa 160 km Kern aus der ozeanischen Kruste gewonnen werden. Die größten erreichten Bohrtiefen liegen mit 1 740 m auf der Galicia-Bank und mit 1 500 m im Panama-Becken, alle anderen sind meist auf wenige Dutzend oder Hunderte Meter begrenzt. Besondere technische Schwierigkeiten bereitet das Bohren in Festgestein, das bisher nur in Verbindung mit einer sedimentären Bedeckung gelang, die dem Bohrwerkzeug den nötigen Halt bot. Im ODP wird mit der Technologie eines "hard rock guide base" versucht, auch junge ozeanische Krustensituationen ohne Sedimentdecke zu erbohren. Als eines der wichtigsten Ergebnisse des DSDP war, in Ergänzung zu den Ergebnissen der marinen Geophysik durch die direkte Beprobung der Ozeankruste, das "missing link" für das Verständnis der irdischen Geodynamik gefunden und das plattentektonische Prinzip mit all seinen Konsequenzen bestätigt worden. In wenigen Jahren war der Durchbruch zu einem geschlossenen Modell der Dynamik der Erde gelungen.

Die Kontinentalränder sind die Klammer zwischen kontinentaler und mariner Geologie, da hier die Beziehungen zwischen beiden Krustentypen am klarsten zu studieren sind. Während sich das DSDP vor allem auf eine möglichst flächendeckende Probennahme in den Ozeanen konzentrierte, soll das ODP die Einbeziehung subsedimentärer Kruste, der ozeanischen Rücken, Fracture Zonen, ozeanischer Terrains u.a. Strukturen gewährleisten sowie den Bau passiver Kontinentalränder und die sedimentär-tektonischen Akkretionskeile an den aktiven Kontinentalrändern weiter aufklären. Gleichzeitig wuchs das Interesse der ozeanischen Krustenforschung an fossilen Kontinentalrändern, die in den Kontinenten konserviert sind. Deshalb ist eine zukünftige Verflechtung beider Programme bereits vorgezeichnet. Das kontinentale Bohrprogramm Kanadas prüft z.Zt. ein Tiefbohrexperiment bei Vancouver mit dem Ziel, eine aktive Subduktionszone anzustechen.

Die relativ einfach gebaute, geringmächtige und nur bis 250 Millionen Jahre alte ozeanische Kruste erlaubt wegen ihrer Herkunft aus dem Erdmantel außerdem den unmittelbaren Zugriff zur Analyse der geochemischen Mantelevolution. Die direkt beobachtbaren, sehr aktiven aktuogeologischen Vorgänge in und auf der Ozeankruste, die mit dem hohen Wärmefluß, magmatischen Prozessen, der Kruste-Meerwasser-Interaktion, hoher tektonischer Mobilität und jungen Sedimentationsprozessen zusammenhängen, eröffneten neue methodische Wege zum Studium dynamischer Abläufe.

1.1.3 Von der Krusten- und Lithosphärenforschung

Nachdem die globale Gültigkeit der Plattentektonik erkannt war, wurde die entscheidende Rolle der Lithosphäre deutlich, die als ca. 100-120 km dicke, rigide Schale auf der duktilen Asthenosphäre gleitet. Aktive geologische Krustenprozesse setzen eine aktive Mantelkonvektion voraus und eine Lithosphäre, die beweglich darauf reagieren kann, die mit dem Mantel und den Sphären außerhalb der festen Erde durch Austausch- und Kreislaufprozesse verbunden ist. Obwohl der Begriff "Lithosphäre" bereits von SUESS (1875)

eingeführt wurde und von BARELL (1914) zwischen einer "rigiden" Lithosphäre und "weichen" Asthenosphäre unterschieden wurde, war die Geologie bis vor kurzem im wesentlichen Oberflächenforschung und bezog höchstens den Raum bis zur 30-60 km tiefen "Moho" als der Krusten/Mantel-Grenze in die dynamische Analyse ein. Heute ist Geologie stets auch Lithosphärenforschung, da alle endogenen Prozesse in den Lithosphäre/Mantel-Beziehungen ihre Ursachen haben. Das bis dahin bereits dreidimensional orientierte Gedankengebäude der Geologie, das neben den zweidimensional kartierbaren paläogeographischen Prozeßabläufen auf der Erdoberfläche stets die zeitorientierten Prozeßüberlappungen von bis zu 3 Milliarden Jahren schräg durch die stratigraphische Ereignisfolge zu berücksichtigen hatte, war nun um eine vierte Dimension quer durch die Lithosphäre zu erweitern.

Diese "vierdimensionale" Rekonstruktion ist in der polystrukturellen kontinentalen Kruste besonders kompliziert und bedurfte weiterer Werkzeuge zur zeitlichen Ereignisordnung, da die Lithosphäre etwa zu 90 % aus "stratigraphisch" schwer zu gliedernden kristallinen Gesteinen besteht. Entscheidende methodische Schritte dafür sind in den letzten Jahren durch die Isotopengeochemie geleistet worden, die neue Methoden und Wege zur Altersdatierung und zum Nachweis der stofflichen Differenzierungsprozesse in Mantel und Kruste entwickelte.

Die Übertragung der für die letzten 250 Millionen Jahre gut rekonstruierbaren plattentektonischen Ereignisse auf 3 Milliarden Jahre Erdgeschichte fällt allein der kontinentalen Geologie zu. Nur in den Kontinenten sind davon Zeugnisse bewahrt. Dies erforderte ein rasches Umdenken von vorzugsweise statischen, fixistischen Modellen klassischer Kontinentalgeologie in ungewohnte mobilistische Konzeptionen. Alfred Wegeners Kontinentalverschiebung war zwar der Plattentektonik in manchen Elementen weit voraus, berührte die Lithosphärendynamik und die intrakontinentale Krustenforschung aber kaum. Als "fünfte Dimension" ist zu berücksichtigen, daß die plattentektonische Dynamik ebenfalls einer Entwicklung unterlegen war, z.B. beeinflusst durch die Abnahme der Wärmeproduktion, Änderungen der Lithosphärendicke und einer Evolution des Erdmantels.

Das Inventar der kontinentalen tektonischen Bautypen mußte revidiert, neu interpretiert und wesentlich erweitert werden. Zwischen kontinental eingeschweißten ehemaligen Plattenrand- und echten Intraplattenereignissen war zu unterscheiden. Das vorher gültige Bild von Krustendehnung und -einengung, Geosynklinalen und Orogenen war völlig neu zu definieren und durch bis dahin wenig bis unbekannte Grundprinzipien aus der Tensions-, Konvergenz- und Transpress-Tektonik mit Graben-, Rift- und Wrench-Elementen zu ergänzen. Mehr und mehr löst sich die kontinentale Kruste in weite Felder mit Puzzlestruktur und einem Netzwerk von Suturen auf, an denen Platten kontinentaler Größe, aber auch kleine Mikrokontinente, schollenartige Terrains und Inselbögen aneinandergekoppelt und an größere kontinentale Einheiten im Verlaufe von Subduktionsvorgängen angedockt wurden.

1.1.4 Satellitengeologie, der Weg zur vergleichenden Geodynamik

Einen weiteren wesentlichen Schritt in der Erkenntnis über die Dynamik der Erde brachte die Weltraumforschung mit den Satellitenmissionen zu den Planeten und Monden des Sonnensystems bis hin zu den Uranusmonden. Jetzt war es möglich, die Geologie der anderen Himmelskörper und deren Lithosphäre/Mantel-Relationen vergleichend zu analysieren. Die einzigartige Stellung der Erde als dem geologisch aktivsten planetaren Körper mit dem mobilsten Lithosphäre/Mantel-System wurde anerkannt. Da die Häufigkeit radioaktiver Elemente als Wärmequelle proportional zum Volumen planetarer Körper ist, die Wärmeabstrahlung aber proportional zur Oberfläche, besitzt die Erde das günstigste Verhältnis für eine lange geologische Aktivität.

1.1.5 Wasser, das Blut der Lithosphäre

Ein entscheidender Faktor für die Reaktion der irdischen Lithosphäre auf den Antrieb durch die Mantelkonvektion ist die Existenz großer Mengen an flüssigem H_2O . Die riesigen Zirkulationssysteme von Wasser in der ozeanischen Kruste, besonders an den Flanken der mittelozeanischen Rücken, wurden eindrucksvoll durch die "black smokers" sichtbar. Etwa $1\ 000\ km^3$ Wasser werden jährlich durch die mittelozeanischen Rückensysteme gepumpt, wobei die ozeanischen Krustengesteine abgekühlt, hydratisiert und gelaugt werden. Die gelösten, transportierten und an Meerwasser wieder ausgefallenen Stoffe lagern sich in verschiedener Form, z.B. auch als Manganknollen und Erzschlämme, und oft angereichert auf dem Meeresboden wieder ab. Im Verlauf der Erdgeschichte ist der Inhalt der Weltmeere mehrfach durch das ozeanische Krustensystem gepumpt worden.

Für den "reibunglosen" Ablauf der Subduktionsprozesse und für den Vulkanismus an den kontinentalen Rändern spielt das aus der hydratisierten Kruste im Verlauf der Subduktion wieder freigesetzte Wasser durch den Aufbau von Porenüberdrücken als Schmiermittel und für die Anatexis und Magmenbildung durch Schmelzpunkterniedrigung eine entscheidende Rolle. Aber auch in den subduzierten Sedimenten am Kontinentalrand, den Akkretionskeilen, werden riesige Mengen an H_2O -, CH_4 -, höhere Kohlenwasserstoffe, CO_2 -, S- und N-Verbindungen flüssig, gasförmig oder als Hydrate gespeichert oder durch Kompaktion freigesetzt. Als "tektonische Brines" übernehmen sie eine entscheidende dynamische Funktion für den Stapelmechanismus und die Strukturentwicklung in den mächtigsten Sedimenttrögen der Erde. Vergleichbares hat sich auch im Netzwerk der Paläosuturen in Paläosubduktionszonen an den Rändern der kontinentalen Terrainakkretion abgespielt. Wassergesättigte Sedimente werden versenkt, Porenraum durch Kompaktion reduziert, die gesteinsbildenden Minerale bei Diagenese und Metamorphose dehydratisiert, die Gesteine stufenweise abgetrocknet von $> 20\ Gew. \%$ H_2O in der Oberkruste bis auf weniger als $0,5\ Gew. \%$ in der Unterkruste. Aus einer $30\ km$ akkumulierten Sedimentmächtigkeit, der durchschnittlichen Krustenmächtigkeit, wird so rein rechnerisch eine etwa $5\ km$ mächtige Wassersäule wieder freigesetzt. Deshalb steht nicht nur die ozeanische, sondern auch die kontinentale Kruste der

Erde, im Gegensatz zu anderen planetaren Körpern, in ständigem Austausch mit flüssigen und gasförmigen Phasen, vor allem mit H_2O . Dies ist für die mechanische Scherentfestigung von Mineralen bei duktiler Deformation, für die Bildung von Riß- und Spaltenpermeabilität, Überschiebungs- und Deckentektonik, hydraulische Bruchprozesse, für den Wärmefluß der Kruste, den Abbau von Spannungsspeicherung und Begrenzung der Erdbebenaktivität, für die Wechselbeziehung Gestein-Fluidsysteme mit Alternations-Laugungs-Transport- und Mineralisationsprozessen, aber auch für die Schmelzbildungen und die magmatische Aktivität von entscheidender Bedeutung. Das Wasser als wichtigste fluide Komponente spielt deshalb als "Blut der Lithosphäre" für den Stoffwechselprozeß mit Hydro-, Atmo- und Biosphäre auf der einen und dem Erdmantel auf der anderen Seite und für die Mechanik der Lithosphäre eine noch vor kurzem nicht erkannte große Rolle.

In diesen Kreislaufprozeß ist aber auch die kontinuierliche Entgasung der Erde einzubeziehen, die vom Mantel durch die Kruste erfolgt und sich besonders auf CO_2 , N_2 , H_2 , He und andere Edelgase bezieht. Spekulativ und kontrovers diskutiert sind dabei eine postulierte CO_2 -Metamorphose in den Gesteinen der Unterkruste, die Synthese von anorganischen Kohlenwasserstoffen an der Mantel/Kruste-Grenze, von CO_2 aus dem Mantel, die krytovulkanische Ereignisse auslösen und eventuell Impaktstrukturen vortäuschen konnten. Krustenfluide und ihre geologische Aktivität stellen sich immer mehr als eine neue Forschungsthematik dar, zwingen zum Überdenken der Krustenpermeabilität und sind ein Steuerungsfaktor der Lithosphärendynamik.

1.1.6 Tiefenseismik, elektrische Leiter, 3-D-Seismik - der Weg zur Tomographie von Lithosphäre und Erdmantel, zum Verständnis und zur Rekonstruktion von 3 Milliarden Jahren Krustenentwicklung

Unmittelbarer Auslöser für eine explosive Neubelebung der kontinentalen Krustenforschung, die rasch zur Formulierung zahlreicher internationaler Großprojekte führte, waren die ersten tiefenreflexionsseismischen Profile durch die Appalachen. Der Nachweis in Profil und Fläche unerwartet ausgedehnter flacher Reflektoren und deren Interpretation als tektonische Detachments mit Überschiebungsweiten der Externzone des Orogens einschließlich Kristallin und Granitintrusionen bis mehr als 200 km über Vorlandsedimente führte zur Erkenntnis der "thin-skinned tectonics".

In der östlichen Verlängerung der Appalachenfront wurden im Bereich der nördlichen Front des Variscikums in Südengland, Nordfrankreich, Belgien und 1987 in einem Profil durch den Stavelot-Venn-Sattel flache Reflektoren entdeckt, die als Anzeichen großer Deckenüberschiebungen von 30 - 50 km gewertet wurden (MEISSNER et al. 1980; MEISSNER, WEVER & DÜRBAUM 1986). Die daraufhin geforderte Überprüfung der interpretierten thin-skinned-Tektonik mit Bohrungen war ein wesentlicher Stimulator für das US- und das deutsche Tiefbohrprogramm. In Belgien wurde daraufhin versucht, mit der Bohrung Havelange die Faille du Midi zu durchbohren (BOUCKAERT 1985). Die Überschiebungssituation wurde mit diesem Projekt grundsätzlich bewiesen. Die Elemente und Mechanismen der Thrust-Tektonik waren durch die Erdölgeologie in

den Externzonen-Strukturen von Orogenfronten bereits bekannt, aus der Moine-Thrust-Zone Schottlands, aus den Alpen und anderen Regionen (MCCLAY & PRICE 1981; BOYER & ELLIOTT 1982). Für die Vorbereitung des KTB wurde auf die Situation im Stavelot-Venn-Massiv vorerkundet und die 400 m-Bohrung Konzen abgeteuft (WALTER & WOHLBERG 1985). Von der deutschen Erdölindustrie wurde 1985/86 am Nordrand der Alpen eine ähnliche Situation mit Überschiebungen des Molassetroges durch die Bohrung Hindelang erkundet. Sie fand das komplizierte Thrust-tektonische Inventar der Externzone vor und mußte aufgrund der daran gekoppelten Überdruckverhältnisse des Fluidregimes aufgegeben werden.

Aus den ersten Ansätzen der Tiefenseismik in den Externzonen entwickelte sich in den USA das COCORP-Programm, dem sich in Deutschland DEKORP, in England BIRPS, in Frankreich ECORS, in Kanada LITHOPROBE sowie weitere Projekte in anderen Ländern anschlossen. Ein weltweites Profilnetz für wissenschaftliche Tiefenreflexionsseismik wurde konzipiert. Dabei zeigt sich immer deutlicher eine reiche Strukturierung auch der kristallinen kontinentalen Kruste, die vorher nicht erwartet worden war.

Die zunächst auf sedimentäre Strukturen fixierten seismischen Verfahren hatten wegen des mangelnden Interesses am Basement, wegen der Filtereigenschaft bestimmter Sedimentkörper und vor Entwicklung der hochauflösenden Datenerhebung sowie vor Einsatz der neuen Processing-Verfahren die Feinstruktur des kristallinen Untergrundes nicht erkennen können.

Für die Vorentscheidung des KTB mit Einengung der Lokationen auf Schwarzwald und Oberpfalz spielte eine entscheidende Rolle, daß inzwischen über den Bau der Externzonen wesentliche Erkenntnisse gewonnen worden waren, die kristallinen Interzonen dagegen bisher nicht erkundet wurden. Deshalb sollten die nach petrologischen Befunden tief eingeschnittenen Regionen des Schwarzwaldes und der Oberpfalz auf ihre mögliche Eignung für eine Bohrung näher untersucht werden.

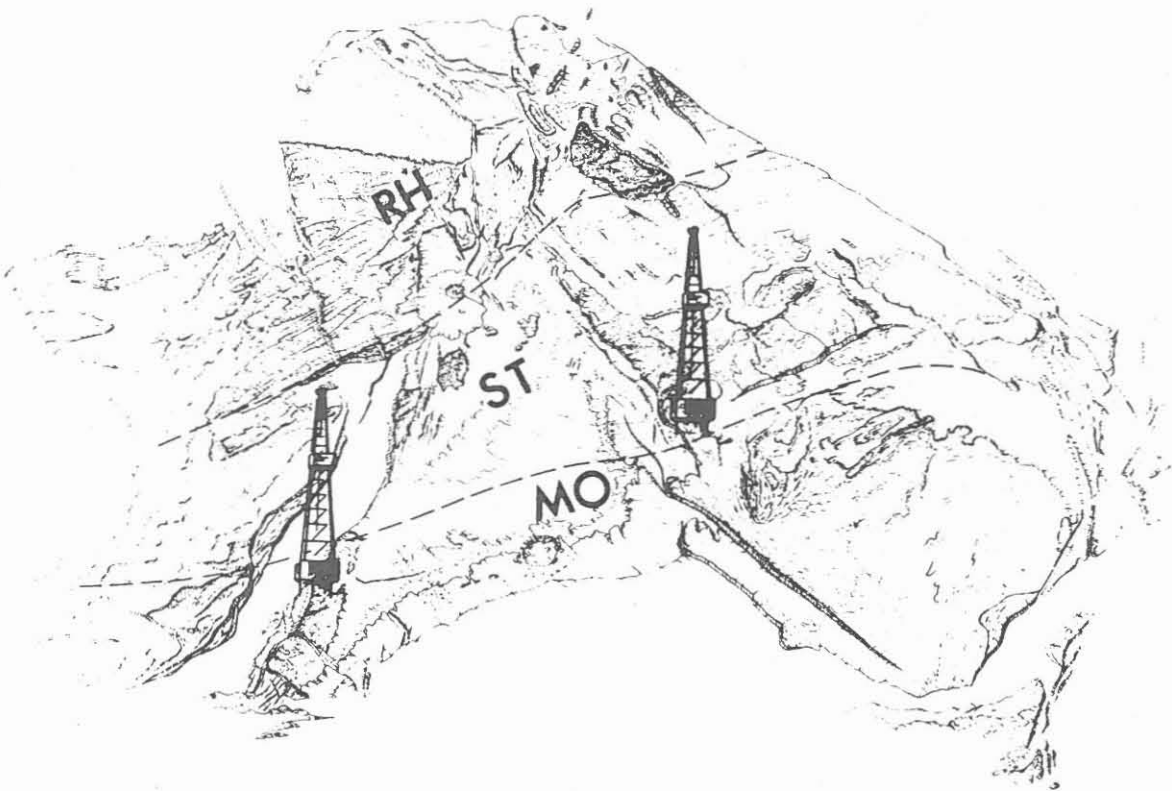


Abb. 1: Lage der Bohrlokation Oberpfalz (rechts) und Schwarzwald (links) im Blockbild nach H. CLOOS
MO - Moldanubikum
ST - Saxothuringikum
RH - Renohercynikum

Im Rahmen des DEKORP wurde deshalb ein erstes Profil zwischen den beiden Lokationen vom Nördlinger Ries bis Friedberg aufgenommen, um die beiden wichtigsten Strukturlinien der Internzone, die Grenzen zwischen Moldanubikum und Saxothuringikum sowie zwischen Saxothuringikum und Renohercynikum auf ihre Tiefenstruktur zu prüfen (DEKORP Research Group 1985). Beide Strukturlinien erwiesen sich als tektonische Leitelemente von regionaler Bedeutung, die sich im Profil als südfallende Elemente mit erhöhter Reflektivität zu erkennen geben. Die Strukturlinien sind gleichzeitig Positionen mit ungewöhnlicher Anreicherung von Diffraktionen, und sie stellen Grenzen zwischen Krustenblöcken mit unterschiedlichem Reflektionsverhalten und -dichte dar. Als die bedeutendere Linie erwies sich in diesem Profil die Grenze Renohercynikum-Saxothuringikum mit größeren Strukturelementen, die nach Süden unter den Spessart abtauchen. Nach Norden bildet sich ein flaches Detachment im Paläozoikum heraus, das in dem 1986 aufgenommenen Fortsetzungsprofil von Friedberg zur Bohrung Münsterland und einem Abzweig zur Bohrung Vermoldt noch deutlicher in Erscheinung tritt. Obwohl bei diesem ersten Profil die in der Folgezeit stark weiterentwickelten Verfahren der

Datenerhebung und des Processing noch nicht voll zur Anwendung kamen, war damit bereits bewiesen, daß der kristalline Unterbau nicht transparent ist, keine einfache Großgliederung in Ober- und Unterkruste mit einer flachen Conrad-Diskontinuität vorliegt, sondern komplizierte tektonische Strukturen abgebildet werden, die eine Fortsetzung der Vorerkundung im KTB und der seismischen Profile im Kristallin rechtfertigen.

In einem ersten Interpretationsversuch wurden bei strenger Berücksichtigung aller Kenntnisse aus der Oberflächengeologie und unter Anwendung Thrust-tektonischer Konzeptionen die seismischen Strukturen im Sinne spätvariskischer Kompressionstektonik dargestellt und vergleichend zu Alpen und Himalaya diskutiert (BEHR & HEINRICHS 1987). Für eine stärkere Einbeziehung von Elementen der spät- und postherzynen Transpress-Tektonik in die Interpretation fehlen noch weitergehende Zusatzexperimente, an denen z.Zt. gearbeitet wird. Das Grundprinzip einer Ramp-Tektonik mit Elementen oberkrustaler und mittelkrustaler Detachments, mit Duplex-Strukturen, antiformal stacks, Kulminationszonen etc. dürfte danach auch für die kristalline Kruste prinzipiell anwendbar sein.

Nach diesem positiv verlaufenen Eingangsexperiment wurden mit wesentlich höherem Aufwand für Reflexions- und Refraktionsseismik der Schwarzwald und die Oberpfalz untersucht. In beiden Regionen bestätigte sich die reiche seismische Strukturierung der Gesamtkruste, gleichzeitig wurden aber zwei sehr unterschiedliche Strukturmuster gefunden, die verschiedene dynamische Situationen abbilden (BEHR & EMMERMANN 1987).

Im Schwarzwald (Abb. 2) zeigt sich im Unterschied zu allen anderen bisher aufgenommenen Profilen eine seismisch sehr stark lamellierte Unterkruste unter einer relativ reflexionsarmen, aber nicht reflexionsfreien Oberkruste (LÜSCHEN et al. 1985). Die Ursache der seismischen Unterkrustenlamellierung ist von größtem Interesse. Diskutiert werden dafür u. a.: die Intrusion magmatischer Lagergänge aus der Unterkruste, Aufschmelzung und Differentiation von Unterkrustenmaterial, subduzierte Komplexe mit unterschiedlicher Lithologie, Scherprozesse in der Unterkruste, durch die z. B. magmatische Dykes rotiert werden.

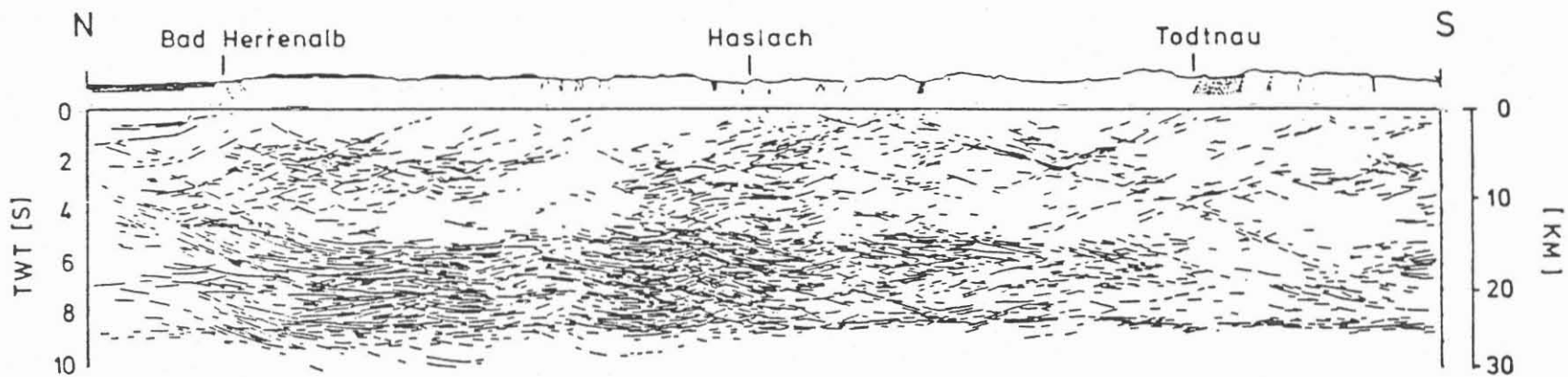


Abb. 2: Reflexionsseismische Daten im N-S-Profil des Schwarzwaldes.
 (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB.
 Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

Aus der geologischen Situation geht jedoch hervor, daß ein genetischer Zusammenhang der Lamellierung mit dem Oberrheintalgraben bestehen sollte. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die lamellierte Kruste von den Rheingrabenstörungen noch versetzt wurde. Die Unterkrustenlamination tritt auch noch an anderen Stellen mit herzynischer Krustenbildung auf und wird z. T. sogar als spezifisch dafür angesehen. Sie ist m. E. aber an postherzyne Krustendehnung gebunden und nicht ursächlich mit den herzynen Orogenprozessen verknüpft.

In der Oberkruste des Schwarzwaldes sind zwei gegenfallende Reflexionsrichtungen zu unterscheiden.

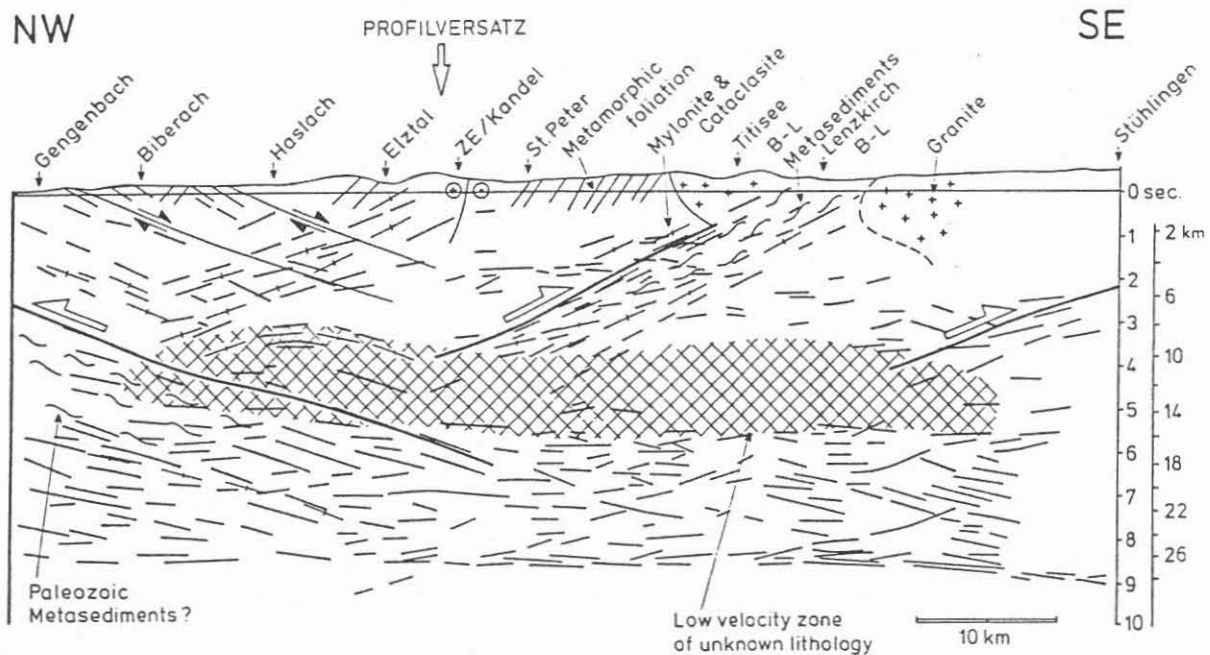


Abb. 3: Tektonische Interpretation der seismischen Tiefensondierung im Schwarzwald; das Profil liegt quer zum variskischen Streichen und setzt sich aus den Reflexionsprofilen 8402 und 8514 (Strichzeichnungen) zusammen (Versatz im Elztal). An zwei Großstrukturen, der Baden-Baden-Zone im NW und der Badenweiler-Lenzkirch-Zone im SE, scheint der Zentralschwarzwälder Gneiskomplex über paläozoische Gesteine überschoben zu sein. In der Umgebung von Haslach deuten zahlreiche Kataklasten auf flache Abschiebungen. In der Nähe des Elztals und der Zinken-Elme-Zone deuten Mylonite bzw. Kataklasten auf schräge dextrale Überschiebungen nach SE. Die Lithologie der Zone erniedrigter seismischer Wellengeschwindigkeit ist aus geologisch-tektonischen Daten nicht erschließbar. (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

Nach Süden fallen Strukturen von der Grenze Saxothuringikum-Moldanubikum am Nordschwarzwald (Zone von Baden-Baden) ein, in nördliche Richtungen setzt sich dagegen die Zone von Badenweiler-Lenzkirch in die Tiefe fort. Unter Berücksichtigung der Oberflächengeologie, Petrologie und der Altersdaten lassen sich mehrere Entwicklungsschritte für den Schwarzwald unterscheiden, die gegenwärtig etwa folgende Aussagen erlauben:

- Im mittleren Schwarzwald ist durch eine konvergente Thrust-Tektonik präkambrische Unterkruste mit Hochdruck- und Mitteldruckmetamorphiten (Eklogiten und Granuliten) in höhere Niveaus geschoben werden.
- Dieser Prozeß endete mit einer kaledonischen Anatexis, die von weiterem Thrusting und von Mylonitisierung begleitet wird und mit einer Fibrolitisierung endet. Nach den vorliegenden Altersdaten müßte dies bei etwa 410 Mio. Jahren abgeschlossen sein.
- Spätherzynisch erfolgt an der Badenweiler-Lenzkirch-Zone eine starke Konvergenz in Verbindung mit Subduktion. Möglicherweise erfolgt ein gleiches Ereignis auch in entgegengesetzter Richtung im Nordschwarzwald. Die zugehörigen seismischen Strukturen lassen sich trotz der Unterkrustenlamellierung noch bis in die Unterkruste verfolgen. Diese Konvergenzzonen wurden von EISBACHER & KROHE (1986) herausgearbeitet.
- Durch die Konvergenz wird eine kräftige Krustenhebung verursacht, die durch Abschiebung gravitativ ausgeglichen wird. Diese Abschiebungstektonik ist besonders nördlich der Badenweiler-Lenzkirch-Zone zu beobachten, die Abschiebungen selbst sollen in listrische Flächen einmünden, die in der Mittelkruste verebnet (KROHE 1985).
- Permisch bis postvariskisch wird besonders der mittlere und nördliche Schwarzwald von Transpress-Tektonik betroffen mit steilstehenden strike-slip-Zonen in Ost-West- und Nord-Süd-Richtung bei vorwiegend flachfallenden Bewegungsrichtungen. Die dabei erzeugte Mylonitisierung ist besonders gut in den postvariskischen Graniten und permischen Porphyrgängen zu erkennen. Diese jungen Strukturen gehören zu dem Wrench-System, das auch in den Vogesen und im Basement des mittel- und norddeutschen Raumes kräftig entwickelt ist und in der mesozoischen Sedimentbedeckung immer wieder durchgepaust wird.

Besonders eindrucksvoll ist das refraktionsseismische Profil durch den Schwarzwald (Abb. 4), das über der lamellierten Unterkruste zwischen etwa 8 - 15 km eine durchgängige low-velocity-Zone (LVZ) mit V_p -Erniedrigungen bis auf $5,4 \text{ km s}^{-1}$ zeigt. Der an der Oberfläche gemessene höchste Wärmefluß liegt über dem zentralen Bereich mit den niedrigsten V_p -Werten. Ein guter elektrischer Leiter in 11-14 km fällt mit dem unteren Teil der LVZ zusammen (Abb. 5). Alles weist deshalb darauf hin, daß es sich auch hierbei wie bei der lamellierten Unterkruste um ein junges Element in Zusammenhang mit dem Rheingraben-Rifting handelt, das nicht mit paläozoischen Ereignissen in Zusammenhang steht.

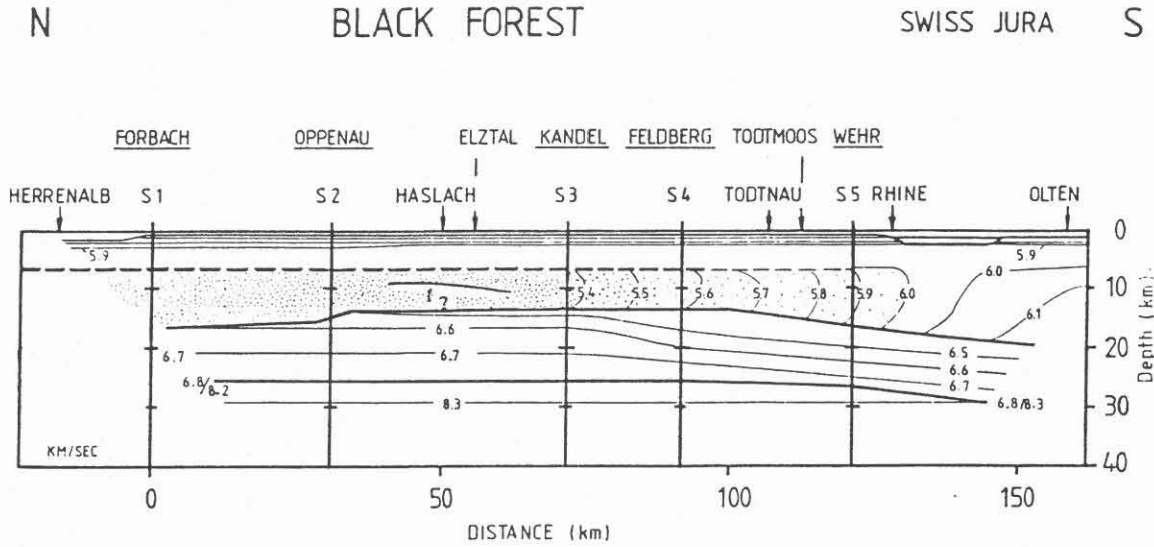


Abb. 4: Refraktionsseismisches Modell des Schwarzwaldes parallel dem reflexionsseismischen Profil. (Aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald 1986)

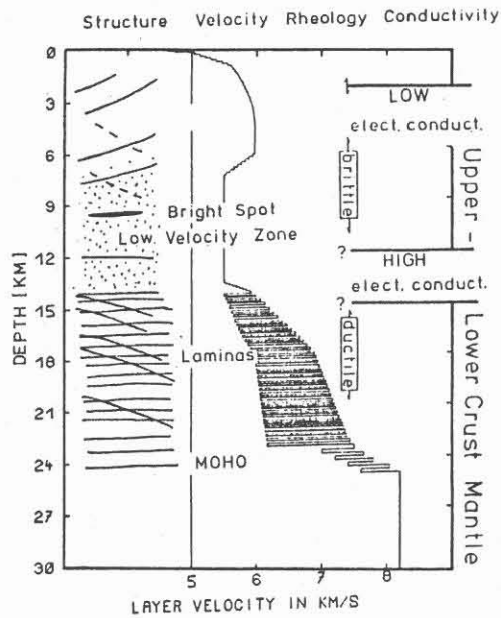


Abb. 5: Geophysikalische Eigenschaften der Schwarzwald-Kruste im Lokationsgebiet; zusammengestellt aus Ergebnissen der Vorerkundungen (LÜSCHEN, pers. Mitteilung).

Die Situation in der Oberpfalz stellt sich dagegen wesentlich anders dar. Hier ist die Oberkruste ungewöhnlich reich an seismischen Signalen mit mehreren sehr deutlichen Reflektoren und reflexionsreichen Bändern, die von der Oberkruste bis an die Moho nach Süden absteigen (Abb. 6). Die Unterkruste besitzt keine mit dem Schwarzwald vergleichbare Lamination, sie ist wesentlich transparenter, obwohl auch hier einzelne Bereiche stärker strukturiert sind.

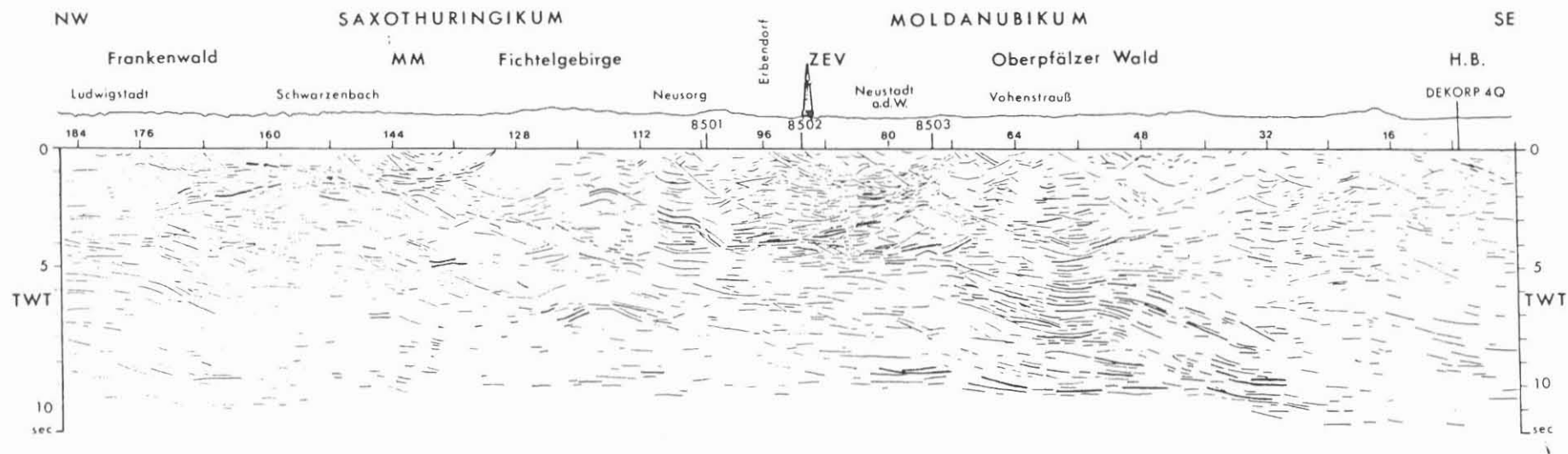


Abb. 6: Reflexionsseismisches Profil DEKORP 4, 1 sec doppelter Laufzeit (TWT) ~ 3 km.
 Strichzeichnung (SCHMOLL, unveröff.; aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB.
 Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

Die Oberflächengeologie läßt sich sehr gut mit den seismischen Strukturen korrelieren. Die kristallinen Deckenkomplexe der Münchberger Masse, der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß und des Hohen Bogens sind als schüsselförmige Gebilde zu erkennen, während das Fichtelgebirge als "antiformal stack" in Erscheinung tritt. Unter dem Paläozoikum der saxothuringischen Zone ist ein Reflektor entwickelt, der als Detachment zwischen paläozoischem Deckgebirge und Kristallin anzusprechen ist, das sich nach Süden bis an die Kruste-Mantel-Grenze absenkt. Die Geschwindigkeit-Tiefen-Struktur zeigt als prominenteste Heterogenität Hochgeschwindigkeitskörper in Tiefen ab 8 km, die ebenfalls nach Süden einfallen. Der größte dieser Körper wird als "Erbdorf-Körper" bezeichnet mit V_p bis etwa $7 - 8 \text{ kms}^{-1}$. Als Interpretation können sowohl obduziertes Mantelmaterial als auch gut texturierte Unterkrustengesteine, z. B. mit hohen Sillimanitgehalten, in Frage kommen. Im Hangenden und Liegenden des Hochgeschwindigkeitskörpers befinden sich Bereiche mit V_p -Geschwindigkeitserniedrigungen bis $5,8 \text{ kms}^{-1}$ (neben Zonen erhöhter integrierter elektrischer Leitfähigkeit in Oberflächennähe wurde eine derartige Zone auch in einer Tiefe von 10 km nachgewiesen). In der Oberkruste sind im Bereich des Moldanubikums auch einige antivergente, nach Norden fallende Elemente enthalten. Die geologischen Modellvorstellungen sind daher leicht differenziert. Das zentrale südfallende Strukturelement markiert wohl ohne Zweifel die Grenze zwischen Moldanubikum und Saxothuringikum und läßt sie als eine bedeutende Verschweißung zweier Krustenblöcke erkennen. Beide Krusteneinheiten wurden durch eine Niederdruck-Hochtemperatur-Metamorphose im Oberkarbon mit einem Höhepunkt vor etwa 320 Mio. Jahren verschweißt (Abb. 7).

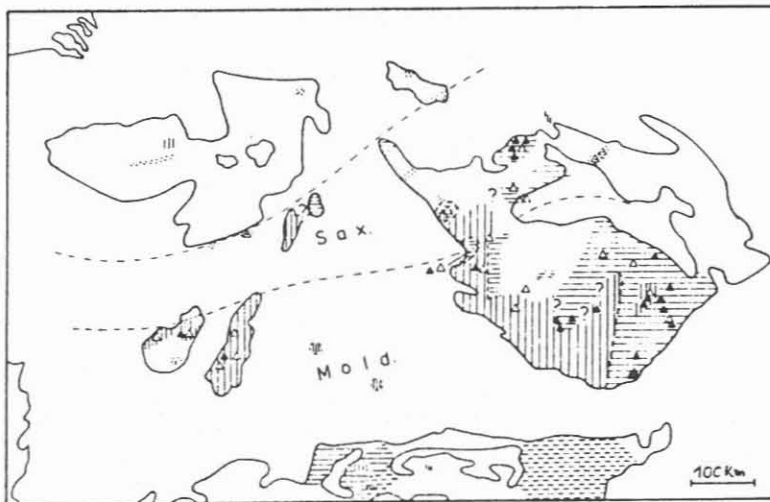


Abb. 7: Verteilung der Niederdruckeinheit (vertikale Striche) und der Mitteldruckeinheit (horizontale Striche; wenn mit alpiner Überprägung: gestrichelte horizontale Linien) in den mitteleuropäischen Varisziden. Bereiche mit polymetamorphen Gesteinsverbänden (schwarze Dreiecke; Granulit, weiße Dreiecke: Eklogit), isolierte HP-Gesteine (Dreieck mit Punkt), niedrig- oder sehr niedriggradige Zonen (gepunktete Flächen) und einige Bohrlöcher in das LP-Baseament (Kreise) sind außerdem dargestellt. Die Kontakte zwischen den beiden metamorphen Einheiten sind entweder tektonisch (gestrichelte Linien) oder unbekannter Natur (?). (Aus: BLÜMEL 1986)

Während das Saxothuringikum monometamorph ist, werden die moldanubischen Einheiten vor allem von einer vor etwa 380 Mio. Jahren stattgefundenen Mittel- bis Hochdruck-Metamorphose betroffen. Relikte älterer Metamorphosen bis etwa 560 Mio. Jahren sind zu erkennen (BLÜMEL 1986).

Der deutliche Unterschied zum Schwarzwald besteht darin,

- daß in der Oberpfalz die herzynischen Strukturen auch in der Oberkruste sehr klar erkennbar erhalten geblieben sind,
- daß die Metamorphoseereignisse gut gliederbar sind und mit den herzynischen tektonischen Ereignissen in Zusammenhang stehen,
- daß spätvariskische Abschiebungen und postvariskische Transpress-Tektonik nicht dominierend in den Vordergrund treten und
- daß postvariskische thermische Ereignisse mit Löschung der alten Strukturen in Unter- und Mittelkruste durch neu angelegte Lamination und Aufbau einer LVZ nicht stattgefunden haben.

Zusammenfassend kann man zur Tiefenreflexionsseismik sagen, daß in vielen Krustenprofilen auch außerhalb des DEKORP, z. B. bei ECORS und BIRPS, flach einfallende Reflektoren oder breite Bänder erhöhter Reflektivität gefunden wurden, die z. T. bis in die mittlere Kruste, nicht selten bis an die Moho und vereinzelt sogar bis in den Mantel abtauchen.

Insgesamt ergibt sich damit ein Strukturmuster, das, tektonisch interpretiert, der plattentektonischen Dynamik gut entspricht. Man kann die Entdeckungen des Inventars der Tiefenreflexionen in der kontinentalen Kruste mit der Entdeckung des Magnetstreifenmusters in der ozeanischen Kruste vergleichen, das mit dem sea-floor spreading die Plattentektonik einleitete. Die Auswirkungen und Anregungen für ein sehr rasches Umdenken in ozeanischer bzw. kontinentaler Geodynamik sind gleich.

Die neuen seismischen Strukturmuster von Kruste und Lithosphäre gaben endlich den Weg frei, Oberflächengeologie in die Tiefe bis hin zum auslösenden Motor der Mantelkonvektion zu verfolgen und zu rekonstruieren. Magnetstreifenmuster und seismische Tiefenstrukturen zwangen zum Umdenken von statischen auf mobilistische Konzeptionen.

Vor dieser Erkenntnis waren die geophysikalischen/geologischen Vorstellungen zur Gliederung der kontinentalen Kruste von relativ einfachen statischen Schichtmodellen beherrscht, die den Schalenbau der Erde bis in die Kruste fortsetzten. Eine Oberkruste wird in etwa 12 - 20 km Tiefe durch eine mehr oder weniger deutliche Conrad-Diskontinuität von einer Unterkruste abgelöst. Die Natur der Unterkruste wurde zunächst als basaltisch interpretiert, später mit getrockneten, granulitartigen Gesteinen erklärt. Noch am Beginn des

russischen Tiefbohrprojektes Ende der sechziger Jahre war eines der formulierten Ziele, die basaltische Unterkruste zu erreichen. Relativ häufig in der Oberkruste auftretende Niedergeschwindigkeitskanäle wurden meist als quarzreiche Granithorizonte der Bereiche der Anatexis angesehen.

Aber auch die neuen seismischen Strukturen und Daten bringen allein zunächst noch keine Information über die stofflichen oder mechanischen Krusteneigenschaften, die ihnen zugrunde liegen. Refraktionsseismik und Scherwellenanalyse mit Ermittlung der Poisson'schen Verhältnisse sowie Laborexperimente an natürlichen Gesteinen unter den P/T-Bedingungen der tiefen Kruste sind erforderlich, um die indirekt gemessenen physikalischen Eigenschaften interpretierbar zu machen und auf definierte geologische Körper schließen zu können (HOLBROOK et al. 1987; KERN 1982). Es ist daher offensichtlich, daß eine der Hauptaufgaben wissenschaftlichen Tiefbohrens in der Schaffung von Musterprofilen durch geophysikalische Leitstrukturen der kontinentalen Kruste bestehen muß, um diese in ihren Eigenschaften zu testen und damit interpretationsfähig zu machen.

Die genaue Analyse von Geschwindigkeitsanomalien verschiedener seismischer Wellengruppen hat es bereits möglich gemacht, Großstrukturen im tiefgelegenen Erdmantel zu erkennen und über tomographische Schnitte räumliche Vorstellungen über die konvektiven Massenverlagerungen zu gewinnen. Die tomographische Auflösung der Feinstruktur in der Kruste bedarf neben der Weiterentwicklung des Daten-Processing vor allem der Ausschaltung von oberflächennahen Störeffekten durch Sedimentbedeckung und die strukturelle Auflockerung in den oberen Kilometern. Deshalb bieten tiefe Bohrlöcher mit den Möglichkeiten des VSP (Vertical Seismic Profiling) durch Empfang von Signalen unterhalb dieser Filter verbesserte Chancen zur strukturellen Erforschung von Kruste und Mantel unterhalb der Bohrlochsohle.

Neben den elastischen Eigenschaften des Krustenmaterials hat sich die elektrische Leitfähigkeit der Kruste als ein Parameter erwiesen, von dem neue Aussagen zur Krustenstruktur erwartet werden. Elektrische Leiter treten häufiger und flächenhaft ausgedehnter in der Kruste auf als bisher angenommen, und sie liegen nicht selten schrägeinfallenden seismischen Strukturen parallel. In einem N-S-Schnitt durch Deutschland kommt die Koinzidenz der Leitfähigkeitsstrukturen mit den seismischen Großstrukturen bereits gut zum Ausdruck (Abb. 8, HAAK et al. 1986). Stellen sie Bereiche mit größerer Permeabilität dar, in denen Krustenfluide erhöhter Salinität gespeichert sind? Wenn ja, hat diese offene Porosität intrakrustale tektonische Ursachen oder sind es hydraulische Mikrobrüche, von Schmelz- und Fluidaktivität erzeugt, die durch subkrustale Wärmequellen angeregt wurden? Sind starke lineare Textureffekte entscheidend und welche Rollen spielen feste Phasen wie Sulfide oder Kohlenstoffverbindungen für die Leitfähigkeit? Breite Zonen erhöhter Leitfähigkeit über aktiven Kontinentalrändern verweisen auf subduzierte Fluide. Was aber ist die Ursache für die zahlreichen intrakontinentalen Heterogenitäten, die sich an der Oberkante der Unterkruste häufen? Durch eine Kombination von seismischen und elektrischen Methoden und durch die Anordnung geeigneter Profilnetze wird eine räumliche Auflösung der Krustenstrukturen zu erzielen sein (3-D-Geophysik), und die Konstruktion beliebiger Schnitte durch diese Strukturen wird möglich.

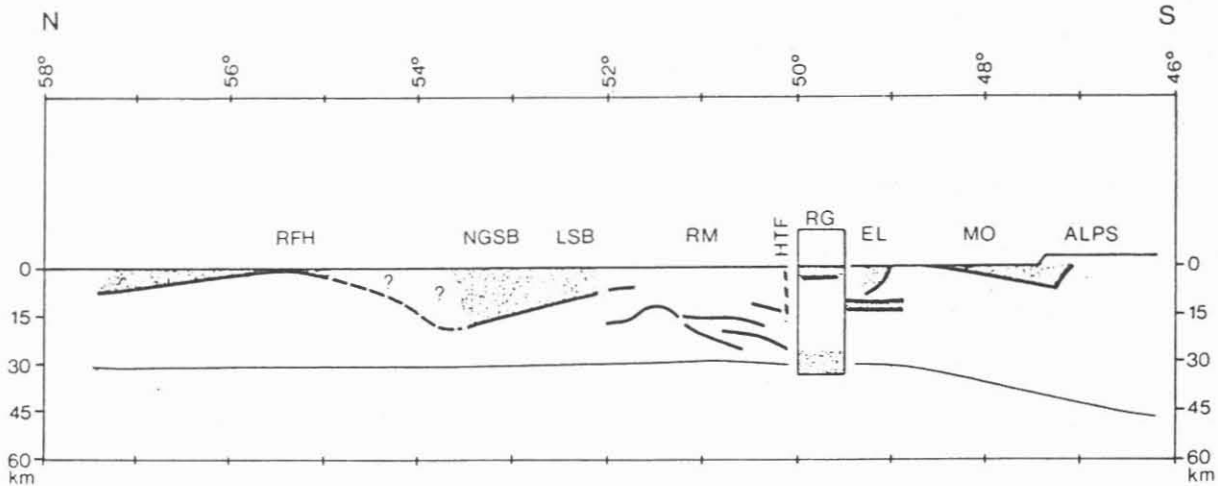


Abb. 8: Zusammenfassende Darstellung der Strukturen hoher Leitfähigkeit entlang dem mittleren Teil der EGT mit den Abkürzungen: RFH = Ringkøping-Fynen-Schwelle, NGSB = Norddeutsches Sedimentbecken, LSB = Niedersächsisches Becken, RM = Rheinisches Schiefergebirge, HTF = Hunsrück-Taunus-Störung, RG = Rheingraben, EL = Erben-dorf-Linie, MO = Molasse. Die dünne Linie in ca. 30 km Tiefe soll die Tiefe der Moho markieren. (Aus: HAAK et al. 1986)

1.1.7 Extensionsorogen und Transpress-Tektonik versus Konvergenzorogen

Die geologische Deutung der Strichzeichnungen seismischer Sektionen aus dem Grundgebirge lassen z. Zt. sehr viel Spielraum, da noch jede Erfahrung fehlt. Im Gegensatz zum kontrastreichen, durch Schichtung gut gegliederten sedimentären Deckgebirge sind die Reflektoren aus dem gefalteten, unregelmäßig zerscherten, von Graniten und Magmatiten durchsetzten, duktil verformten, stark durch Metamorphose homogenisierten Schiefergebirge und Kristallin von geringer Intensität, durch kurze Ausdehnung, Ausfall durch fehlende Energieübertragung bei ungünstigen Deckgebirgsverhältnissen und langen Diffraktoren charakterisiert. Erfahrungen aus den wenigen laufenden Bohrprojekten in das Grundgebirge (Basement), die z. Zt. in Schweden und Frankreich durchgeführt werden, zeigen, daß jüngste postkristalline Kataklassen-, Alterations- und Scherzonen, magmatische Sills und "brittle deformation" unterschiedlicher Genese meist größere Signale erzeugen und dabei den duktilen Großbau überlagern und verschleiern. Die Interpretation muß daher von Modellvorstellungen ausgehen und möglichst alternative Lösungen prüfen. Die abgeleiteten Krustenprofile sind dementsprechend modellhaft zu bewerten. Deshalb ist es dringend erforderlich, über Tiefbohrungen Erfahrungen mit seismischen Strukturen im Kristallin zu sammeln.

Flaches, "low-angle faulting" mit länger aushaltenden listrischen Reflektoren bei "ductile brittle deformation" tritt häufiger in Krustensituationen mit Extension auf, z. B. an passiven Kontinentalrändern, an Riftzonen oder verbunden mit anderen Ereignissen der Krustendünnung. Da Extensionsprozesse jüngere Ereignisse nach der Krustenkonsolidierung darstellen, können sie auch in Kompressionsorogenen während des isostatischen Uplifts auftreten. In diesem Fall dehnen sie das Orogen und erzeugen weite Abschiebungen des Hangenden, so daß die tiefkrustalen Metamorphite aus dem Orogenkern relativ rasch in das Erosionsniveau gebracht werden (metamorphic core complex tectonics). Man ist daher leicht geneigt, größere seismische Strukturen im Basement späten Extensionsereignissen zuzuschreiben. Die Bedeutung der Extension und Krustendünnung und die Definition von "Extensionsorogenen" (KLIGFIELD et al. 1984) versus den lang bekannten Kompressionsorogenen ist in jüngster Zeit erst voll erkannt worden. Verschiedene Grundmodelle dazu zeigt die Abb. 9 aus einer Arbeit von R. W. ALLMENDINGER et al. (1987) am Beispiel der Basin and Range-Provinz in Deutung von COCORP-Profilen (Abb. 9). Neben low-angle-Scherzonen, die zur Moho abtauchen und asymmetrische Halbgräben bilden, ist mittelkrustale Delamination mit flachen Detachments im Verlaufe einer Entkoppelung von Ober- und Unterkruste ein wahrscheinlicher Fall.

Wendet man diese Modelle auf Schwarzwald und Oberpfalz an, so können die Strukturen des Schwarzwaldes im Sinne eines metamorphic core-Komplexes gedeutet werden, zumal dafür Hinweise aus den Gesteinsstrukturen gegeben sind. Das DEKORP-Profil Nördlingen-Friedberg wird von BEHR & HEINRICHS (1987) als Kompressionsorogen interpretiert (Abb. 10, 11), und das genetische Prinzip wird auch auf das benachbarte Oberpfalzprofil übertragen (Abb. 12). Als Argumente dafür werden u. a. suprakrustale Decken von MP-Metamorphiten, linsenartige Einschaltungen von Hochgeschwindigkeitskörpern in den low-angle-Reflektoren und fehlende Hinweise auf Tensionsstrukturen an der Oberfläche gewertet.

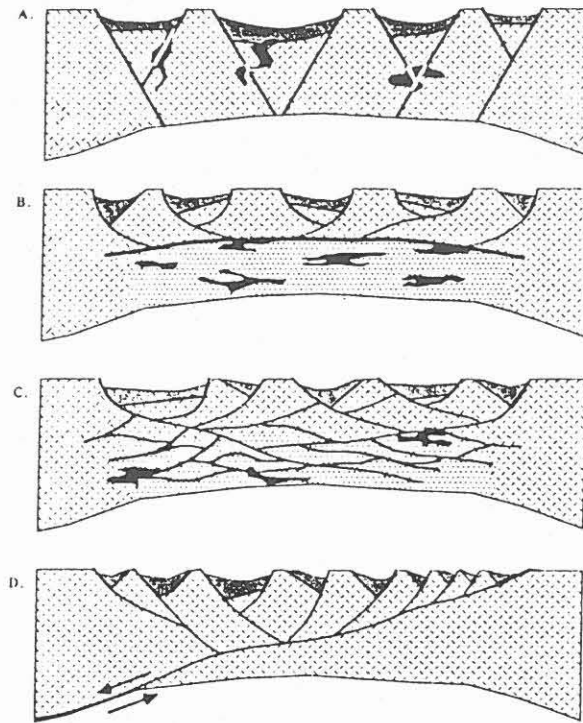
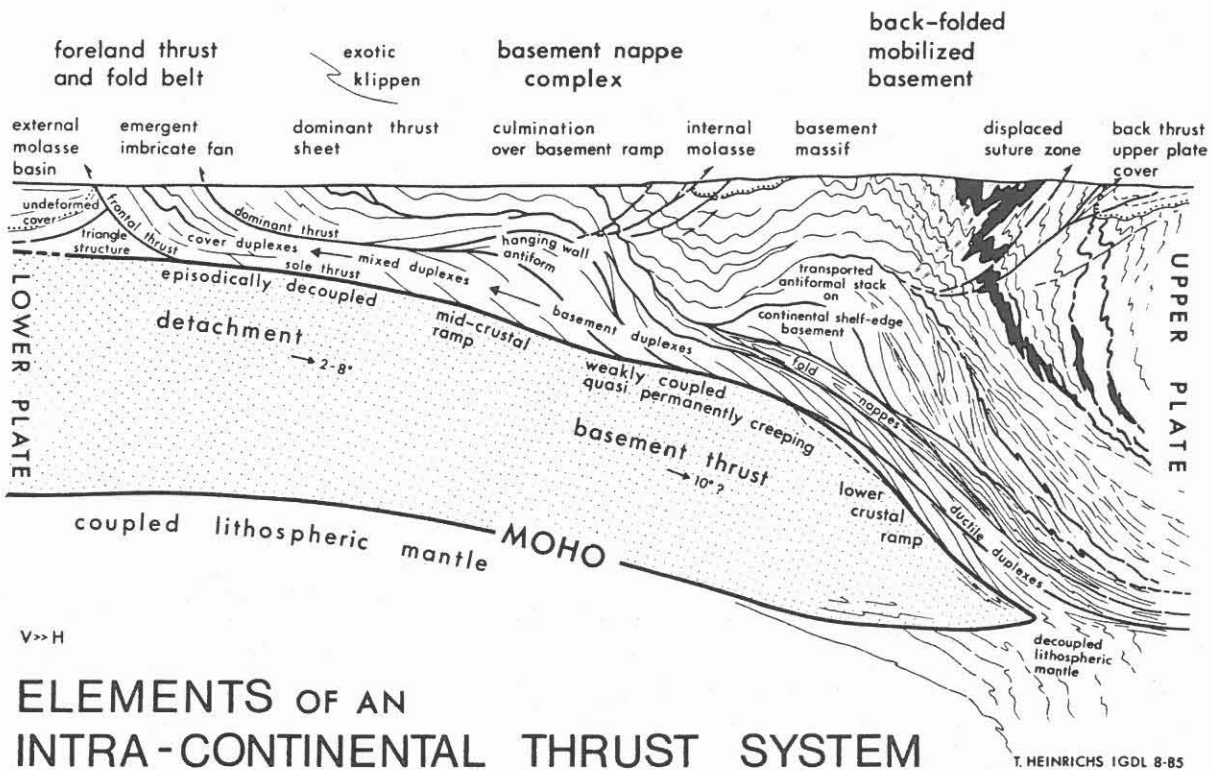


Abb. 9: Simplified models of intracontinental extension. (A) Classic horst and graben model, (B) subhorizontal-decoupling-zone model. (C) anastomosing shear-zone or lenses model, and (D) crustal-penetrating shear-zone model. (Aus: ALLMENDINGER et al. 1987)



ELEMENTS OF AN
INTRA - CONTINENTAL THRUST SYSTEM

Abb 10: Strukturelemente eines intrakontinentalen Überschiebungssystems, nicht maßstäblich. (Aus: BEHR & HEINRICHS 1987)

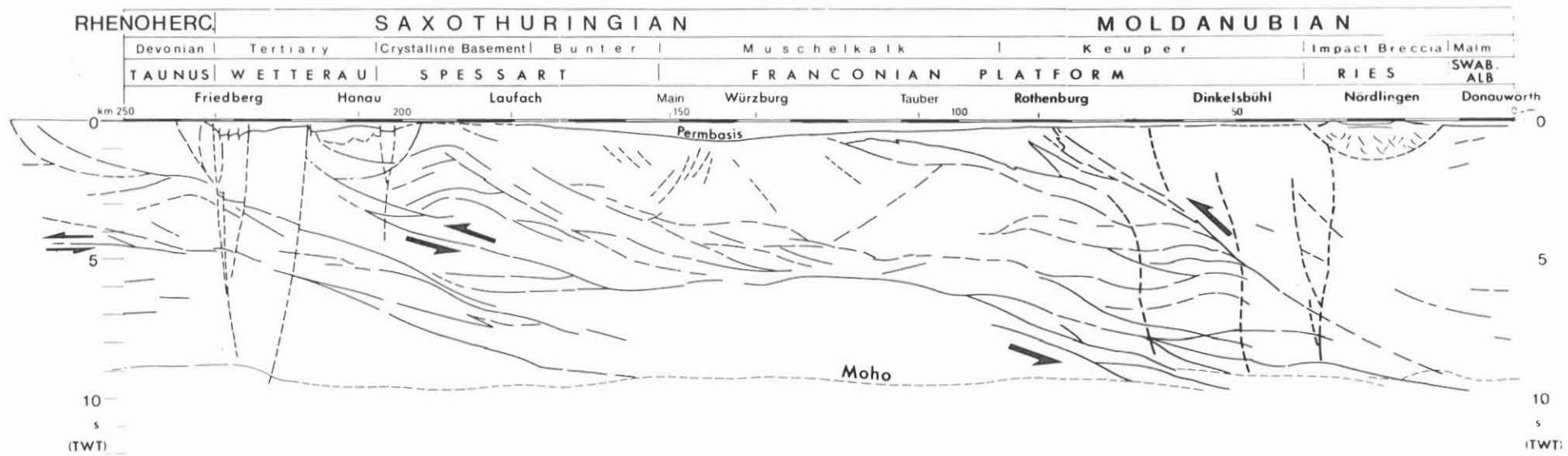


Abb. 11: Strukturelle Interpretation des reflexionsseismischen Profils DEKORP 2-Süd.
(Aus: BEHR & HEINRICHS 1987)

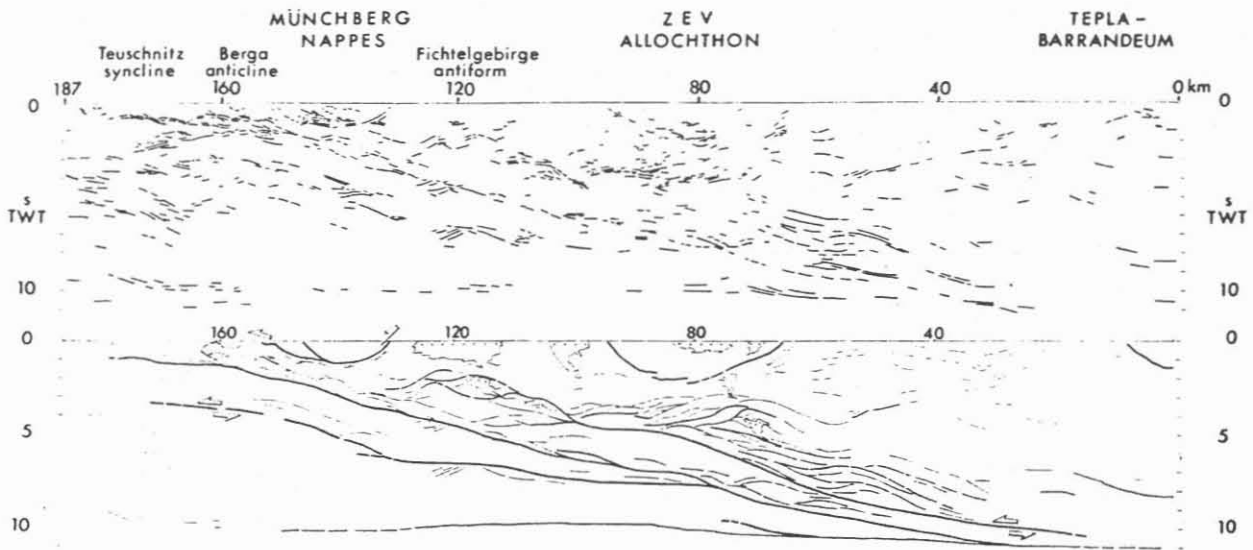


Abb. 12: Strichzeichnung und strukturelle Interpretation des reflexionsseismischen Profils DEKORP 4 (Interpretation: T. HEINRICHS, aus: BEHR & EMMERMANN 1987).

Das von WEBER et al. (1986) dargestellte Modell bezieht "Wedge-Tektonik" ein (Abb. 13). Dabei soll eine moldanubische Gesteinseinheit als Wedge die saxothuringische Kruste im mittleren Bereich delaminieren haben. Andererseits sind in diesem Profil auch Elemente anastomisierender Extensionstektonik und ein mittelkrustales Detachment mit spatorogener Dehnungstektonik eingebaut. Beide Modelle sind nur grobe Vorstellungen, um eine Diskussionsbasis zu haben.

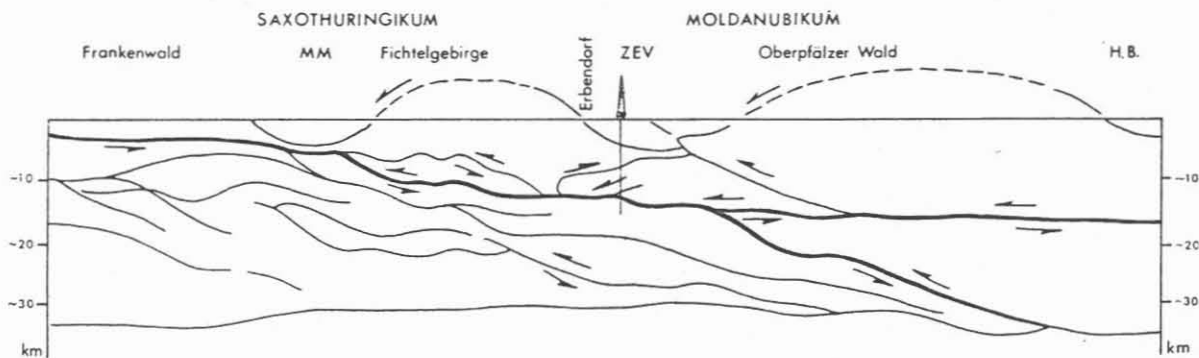


Abb. 13: Vereinfachtes Strukturmodell (Weber, unveröff.: aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

Das Problem der Krustendünnung hat jedoch vor der herzynischen Kompression eine große, bisher nicht verstandene Rolle im mitteleuropäischen Raum gespielt. Vereinzelt Altersdaten verweisen auch über 2 Milliarden Jahre alte, stark ausgedehnte präkambrische Kontinentalkruste, auf der sich die oberproterozoisch/paläozoischen Ereignisse abgespielt haben. Vielleicht gelingt es, Relikte dieser Kruste und ihrer Dynamik im Bohrprofil anzutreffen.

Die Lokation Oberpfalz liegt nahe dem W-Rand der Böhmisches Masse, der im Zuge von Transpress-Tektonik von Wrench-Faults gebildet wird. Teil dieses Systems ist auch die Linie des Bayerischen Pfahls mit breiten Mylonitzonen in einem mehr als 150 km langen Quarzgang. Es ist damit zu rechnen, daß Mylonit- und Kataklastitbahnen sich durch das Lokationsgebiet ziehen.

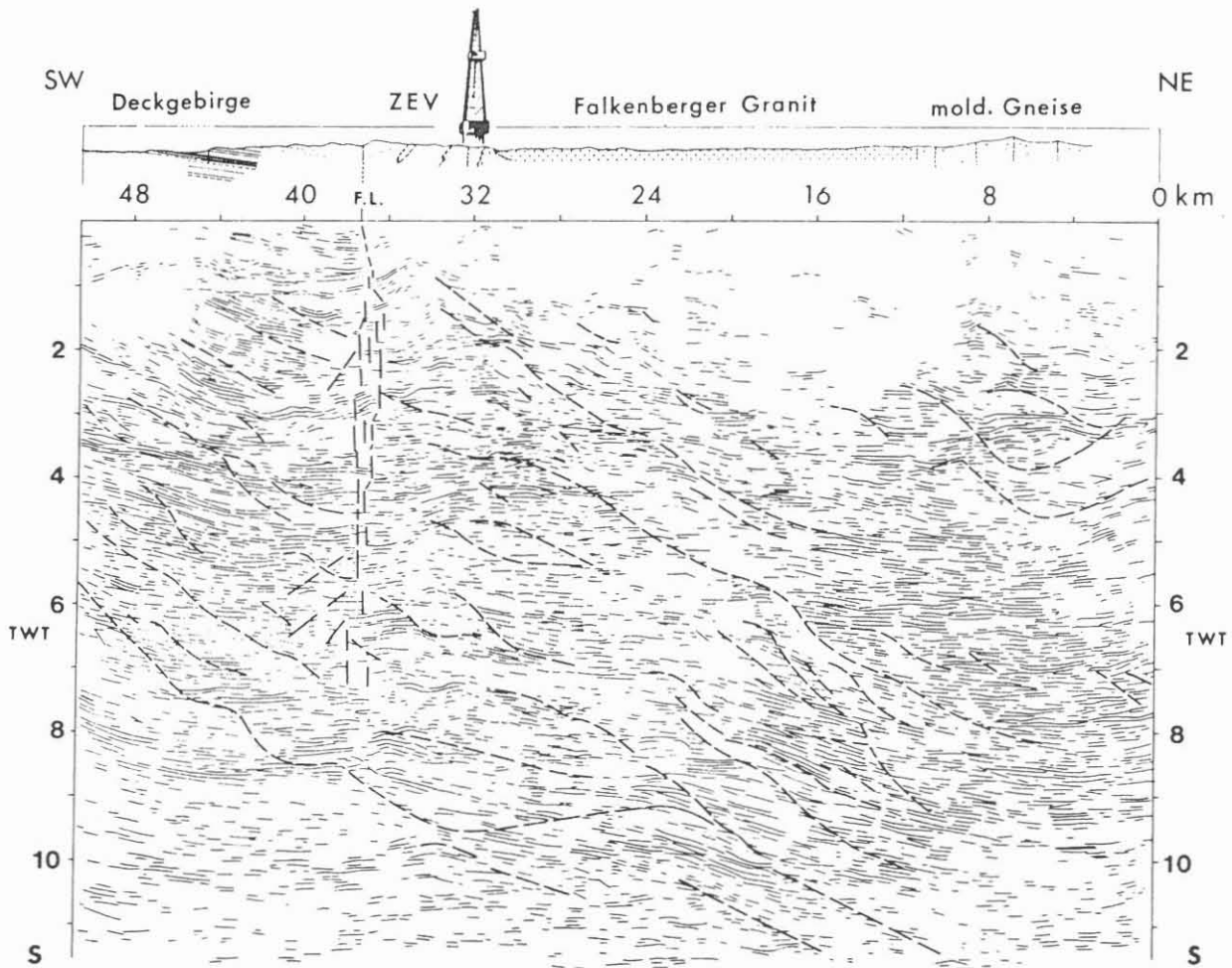


Abb. 14: Mögliche Anordnung von Kataklastitbahnen. FL = Fränkische Linie. Strichzeichnung nach K. WEBER (unveröff., aus: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland, KTB. Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz 1986)

1.1.8 Haben low-velocity-Zonen die Funktion einer intrakrustalen Asthenosphäre?

Low-velocity-Zonen wie im Schwarzwald und z. T. in der Oberpfalz sind im mittleren Teil junger, gedehnter Krustenbereiche mit erhöhtem Wärmefluß häufiger zu beobachten. Gleichzeitig können sie auch Zonen erhöhter elektrischer Leitfähigkeit sein.

Von der Kola SG-3 Bohrung wurde eine solche LVZ zwischen 4 500 - 7 500 m in einer basischen Gesteinsserie durchbohrt, wobei die Abnahme von V_p mit einer Zunahme der Porosität gekoppelt war, ohne daß eine Wechsel in der Gesteinszusammensetzung stattgefunden hat (KREMENETSKY & OVCHINNIKOV 1986, KOZLOVSKY 1984). In dieser Zone hat eine Dehydration des Gesteins zu einer Absenkung des gebundenen H_2O von 4,0 auf 2,1 Gew. % stattgefunden. Das Gesamtvolumen des freigesetzten Wassers plus dem dehydratisierten Festkörper ist größer als das Ausgangsvolumen und hat Porenüberdruck und mikrohydraulische Bruchprozesse im Gesteinsgefüge zur Folge. Eine starke Erhöhung der Permeabilität mit Fluidmigration, Absenkung der Dichte und der V_p - Geschwindigkeit haben sich eingestellt.

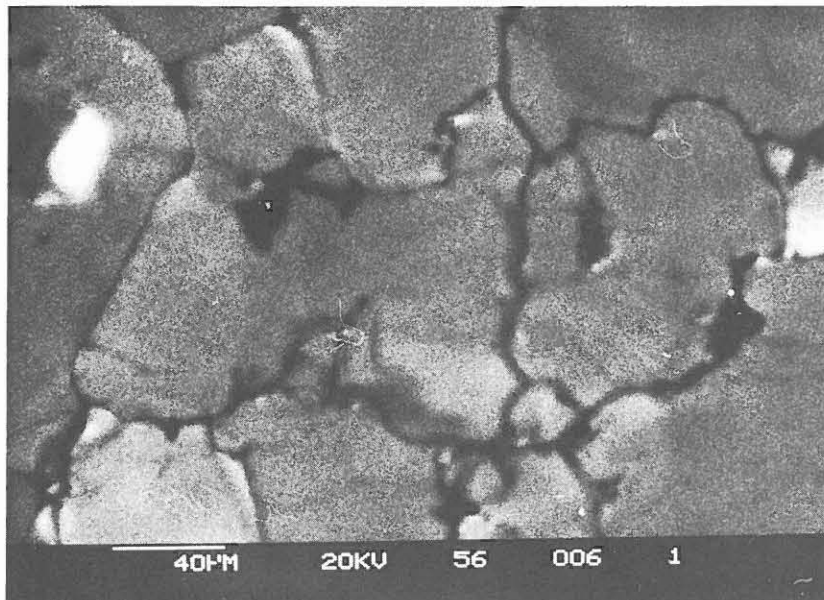


Abb. 15: REM - Kathodolumineszenz Orthogneis Schwarzwald. Mit Quarz (schwarz) verheilte pervasive Paläopermeabilität entlang Korngrenzen von Quarz. Postanatektische Fluidmigration. (Foto FRENTZEL-BEYME)

Von ETHERIDGE et al. (1983, 1984) ist das Problem der Krustenpermeabilität bei prograder und retrograder Metamorphose mit dem Ergebnis dramatischer pervasiver oder channelway-Fluidmigration beantwortet worden. Er gibt Beispiele für rechnerische Verhältnisse Fluid-/Gesteinsvolumen von 10^2 bis 10^3 .

Transmissions-Elektronenmikroskop-Studien an Korngrenzgefügen zum Nachweis der Wanderwege von Fluiden brachten bisher aber noch keine überzeugenden Beweise für einen solchen pervasiven Migrationsmechanismus (z. B. WHITE & WHITE 1981). Die Laborbestimmungen der Permeabilitäten in kristallinen Gesteinen liegen meist im Bereich $10^{-16} - 10^{-21} \text{ m}^2$ ($10^{-4} - 10^{-9}$ Darcy) (BRACE 1980). Über die wahren Permeabilitäten unter tiefkrustalen Deformationsverhältnissen und Temperaturbedingungen gibt es auch nur Spekulationen, z. B. $10^{-15} - 10^{-18} \text{ m}^2$ ($10^{-3} - 10^{-6}$ Darcy nach ETHERIDGE et al. 1983).

An den Gesteinen der Schwarzwaldbohrungen, die während der Lokationserkundungen für geothermische Messungen niedergebracht wurden, ist es mit der Kathodolumineszenztechnik gelungen, die durch SiO_2 verheilten Paläopermeabilitäten und Paläoporositäten sichtbar zu machen und systematisch zu studieren. Derartige Strukturen sind bisher mit keinem anderen methodischen Mittel zu erkennen. Dabei zeigt es sich, daß alle im Mittelschwarzwald an der Oberfläche angeschnittenen Gneise eine extrem hohe Gesamtpermeabilität haben (Abb. 15) mit z. T. noch heute geschlossener Restporosität von 1 - 3 Vol %. Diese Permeabilität wurde beim Durchwandern der Kruste zwischen 12 - 8 km erworben. Diese Untersuchungen bestätigen die Annahme von ETHERIDGE et al. über eine pervasive Fluiddurchtränkung der Kruste mit sealing-Prozessen durch SiO_2 bei Temperaturabnahme bzw. Druckentlastung in eindrucksvoller Weise. Bei der Fluiddurchflutung ist der gesamte Altbestand an Gesteinsfluiden ausgewaschen worden. CO_2 , CH_4 , N_2 und andere Gase sind fast quantitativ aus dem Gestein ausgetragen. Aus der Untersuchung von Flüssigkeitseinschlüssen in diesen Permeabilitätsgefügen läßt sich zeigen, daß dieser Prozeß zwischen 12 - 8 km im Anschluß an die Anatexis stattgefunden hat. Beim weiteren Uplift haben diese Gesteine in Verbindung mit retrograder Metamorphose channelway-Strukturen (Abb. 16) erworben mit erneuter Fluiddurchtränkung und bei niedrigen Temperaturen gekoppelt mit kräftigen hydrothermalen Alterationsreaktionen im Gestein.

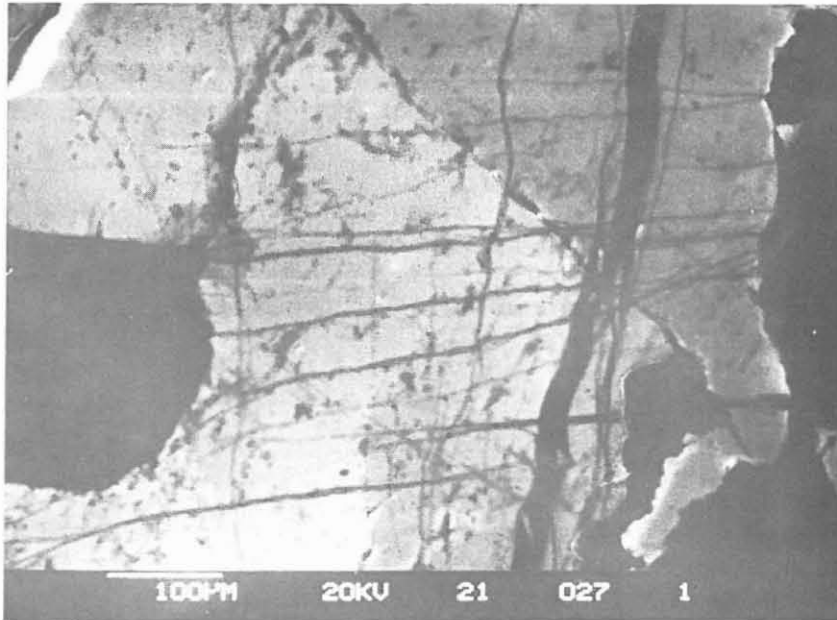


Abb. 16: REM-Kathodolumineszenz Orthogneis Schwarzwald. Mit Feldspat verheilte channelway-Paläopermeabilität durch Feldspat (Uplift-Phase mit retrograder Alteration). (Foto FRENTZEL-BEYME)

In der Oberpfalz fehlt das pervasive Fluidereignis. Die Paläopermeabilitäten haben nicht den Grad des Schwarzwaldes erreicht, alte Fluidsysteme mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen sind erhalten geblieben und weisen PT-Bedingungen verschiedener Metamorphosestadien nach. In der Oberpfalz sind jedoch genau wie im Schwarzwald channelway-Fluiddurchtränkungen während des Upliftes, mit hydrothermalen Alteration gekoppelt, reichlich entwickelt.

Diese Ergebnisse führen zur Annahme, daß heute im Schwarzwald eine kaledonische LVZ an der Oberfläche angeschnitten vorliegt, ähnlich wie sie von der Kola SG-3 durchbohrt wurde. In einer aktiven LVZ mit hydraulischem Microfracturing, Massentransport von SiO_2 im Fluid, kontinuierlicher Neuschaffung von Porosität und Permeabilität ist auch die Krustenrheologie betroffen und völlig verschieden vom Normalfall. Sollte sich diese Theorie der LVZ, die sich als ein vorläufiges Zwischenergebnis der KTB-Vorerkundungsarbeiten abzeichnet, durch weitere Beobachtungen beweisen lassen, können viele Erscheinungen eine bessere Erklärung finden. LVZ spielen dann als mittelkrustale "Astenosphäre" eine wichtige Rolle bei der Steuerung struktureller Prozesse. Porenüberdruck und Volumenzunahme in der LVZ und in deren Fluidkissen wirken destabilisierend auf die Rheologie der Kruste. Bei Vorhandensein einer aktiven Extension können sich die bereits erwähnten listrischen Abschiebungsbahnen entwickeln. Kippt das Tensionsregime in Kompression um, z. B. in back-arc-Situationen, könnte die LVZ die Funktion des "mid-crustal-flat" übernehmen, an dessen Enden die Ober- und Unterkrustenrampen auf- bzw. absteigen.

Wenn die kontinentale Kruste ein derart lebendiger geologischer Körper ist, kann die Untersuchung "toter Krustenprofile", wie sie gelegentlich an der Erdoberfläche angeschnitten sind und die aus der Reaktionszone entfernt wurden, nur einen unvollkommenen Einblick in die in-situ-Verhältnisse unter in-vivo-Bedingungen geben. Das Studium physikalisch-chemischer Prozesse der "lebendigen Kruste" unter aktiv einwirkenden Temperaturen bis +300 °C unter den spezifischen Spannungs-Deformations-Bedingungen, Porendrücken und Fluid-Gestein-Interaktionen muß grundlegende Daten liefern, mit denen dann wiederum auch laborativ und experimentell weitergearbeitet werden kann. Die Beobachtung zusammenhängender langer Gradientenprofile mindestens bis 10 - 15 km in der Mittelkruste ist daher erforderlich und kann nur über die Bohrung gewonnen werden.

1.1.9 Transects - Großprofile durch die Kontinente

Global Geoscience Transects projects (GGT) nennt sich ein weiteres Großprojekt des Lithosphärenprogrammes. In Profilschnitten bis zur Moho mit Anschluß über die Kontinentalränder an die ozeanische Kruste sollen alle erreichbaren geophysikalischen und geologischen Informationen zusammengeführt, dargestellt und interpretiert werden. Die Transect-Vorschläge beziehen alle Kontinente ein. Bis zum nächsten internationalen Geologenkongreß in Washington 1989 erhofft man sich bereits erste vergleichende globale Ergebnisse über die Grundstrukturen der Kontinente nach dem heutigen Kenntnisstand der Geodynamik. Die Europäische Geotraverse (EGT), administrativ betreut durch die European Science Foundation (ESF), ist ein solches 4 000 km langes Transect, das vom nördlichen Teil Skandinaviens bis zur Sahara-Plattform Nordafrikas reicht. Das zentrale Segment quert in N-S-Richtung Deutschland. Ein erstes Zwischenergebnis wurde bereits 1986 veröffentlicht (FREEMAN, MUELLER & GIESE 1986).

1.1.10 Tiefbohrprojekte - Sonden der inneren Raumfahrt

Tiefbohrungen in die Kruste sind die konsequente Fortsetzung der Krustenforschung, nachdem auf indirektem Wege so zahlreiche neue Aspekte gefunden wurden, die weitergehenden Modellen, Berechnungen und globalen Interpretationen zugrunde gelegt werden. Die Philosophie der nationalen Programme ist jedoch verschieden. Drei Wege werden dabei beschritten:

- Untersuchung von aktiven Krustenprozessen durch Bohrungen geringer oder mittlerer Tiefe. Dieser Weg wird z. B. im US-Programm von DOSECC verfolgt, die bisher die Geothermalbohrung Salton Sea und die Bohrung am Cajon-Paß zur Überprüfung von Spannungsaufbau, Seismizität und Wärmefluß in der St. Andreas Fault betreut hat. Weitere Vorhaben beschäftigen sich mit Problemen des Vulkanismus (Katmai-Nationalpark) und mit epithermaler Lagerstättenbildung in Verbindung mit Hydrothermalsystemen (Creed mining district). Diese Pro-

jekte bewegen sich in Tiefenbereichen um 5 km. Mit dem Projekt CICSCO (Continental Interior Crustal Studies Consortium) soll mit mehreren Bohrungen geringerer Tiefe die obere Kruste an verschiedenen Stellen, insbesondere proterozoischer Gebiete, untersucht werden, von der Plattformsedimentation bis in das Basement.

Das schwedische Deep Gas Project Siljan Ring mit der Bohrung Gravberg untersucht eine Impaktstruktur mit dem Ziel, anorganisch gebildetes Methan nachzuweisen. Dieses Projekt steht kurz vor dem Abschluß.

- Überprüfung und Studium sehr unterschiedlicher geologischer Strukturen durch flache und mitteltiefe Bohrungen, zusammengefaßt zu großen geologischen Studienprogrammen. Dieser Weg wird von den Franzosen mit dem Programm Géologie Profonde de la France beschritten. Elf Projekte stehen auf dem Programm, von Sedimentbecken bis zu Kristallineinheiten. Bisher wurden die Bohrungen Cezallier zum Studium eines Geothermalsystems, die Bohrung Echassières zum Studium der Geochemie und der Metallogenese eines Granitkörpers sowie z. Zt. die Bohrung Sancerre zum Studium des kristallinen Sockels und der Magnetanomalie im Pariser Becken niedergebracht.

Das Canadian Continental Drilling Program und das englische Bohrprogramm sind z. Zt. in Vorbereitung.

- Tiefstbohrungen über 10 km zum Studium von grundsätzlichen geophysikalischen und geochemischen Gradientenprofilen und zur Überprüfung tiefkrustaler geophysikalischer Strukturen. Dieser Weg wurde von dem russischen Projekt Kola SG-3 beschritten, es ist Ziel des KTB und des Appalachen-Projektes der USA.

1.1.11 "Unternehmen Krustenfenster" - das KTB und seine Begleitprogramme

Das KTB bildet das zentrale Experiment eines konzertierten Programmes für ein Fenster durch die kontinentale Kruste. In der Abb. 17 ist das Gesamtvorhaben mit seinen Teilprojekten schematisch dargestellt.

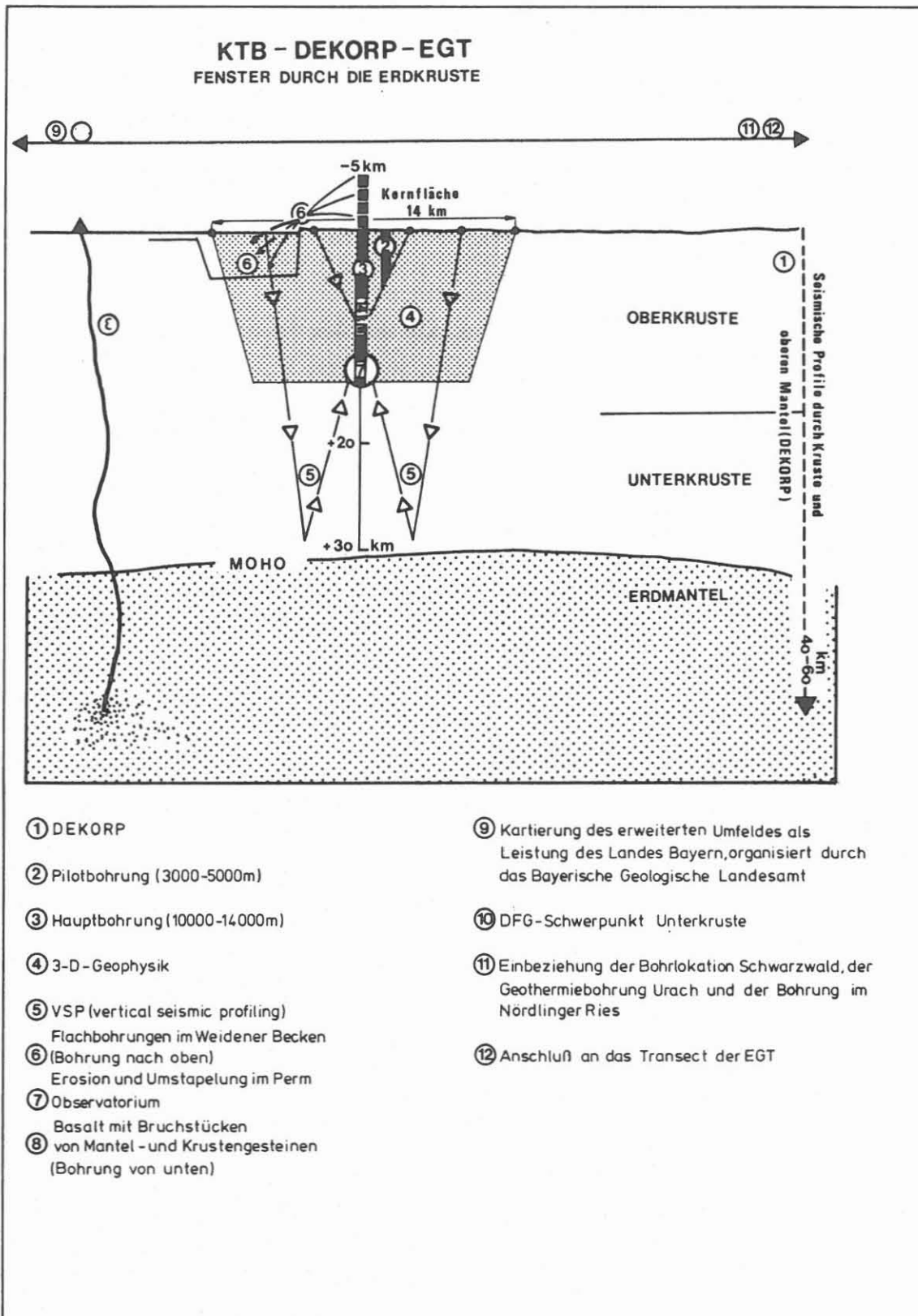


Abb. 17: KTB-DEKORP-EGT: Fenster durch die Erdkruste.

1. Das Projekt begann mit seismischen Messungen innerhalb des DEKORP-Programmes. Schlüsselprofil ist die DEKORP-4-Linie, die vom Hohen Bogen im Südosten über Vohenstrauß, Erbdorf, Fichtelgebirge und Frankenwald verläuft. Im engeren Zielgebiet wurde zusätzlich ein Netz von 6 Profilen vermessen mit insgesamt 303 Profilkilometern. Hauptexperiment war Steilwinkelreflexionsseismik mit Vibroseisanregung, ausgeführt von der Prakla Seismos AG. Weitwinkelmessungen und Geschwindigkeitsbestimmungen mit expanding-spread-Methodik wurden zusätzlich durch Hochschulgruppen vorgenommen. Die Datenverarbeitung erfolgte im wesentlichen im DEKORP-Rechenzentrum der Universität Clausthal.
2. Durchführung einer 3 000 - 5 000 m tiefen Vorbohrung mit Vollkernung für geophysikalische Begleitexperimente in Korrespondenz zur Hauptbohrung.
3. Hauptbohrung von 10 - 14 km mit 30 % Kernstrecke, Möglichkeiten zur Seitenkernentnahme, umfangreiches geophysikalisches Meßprogramm.

Hauptziele:

- Aufnahme eines geschlossenen Vertikalprofils, Vermessung grundsätzlicher geophysikalischer und geochemischer Parameter, z. B. Wärmefluß und Wärmeproduktion, stress-strain-Entwicklung zwischen Oberkruste und Unterkruste, Mikroseismizität, Krustenpermeabilität, An- bzw. Abreicherung von Elementen, Metamorphoseprofile etc. (s. hierzu die Lokationsberichte Schwarzwald und Oberpfalz 1986 sowie BEHR und EMMERMANN 1987, BERCKHEMER et al., Geophysikalische Schlüsselexperimente im KTB, 1986, FUCHS & GIESE 1987).
 - Prüfung der Natur geophysikalischer Heterogenitäten, wie seismische Reflektoren, Hoch- und Niedergeschwindigkeitskanäle, elektrische Leiter, magnetische Anomalien
 - Rekonstruktion der Krustenevolution in der Internzone des variskischen Orogens, Anteile von Kompression, Tension, Transpress-Strukturen
 - Durchführung allgemeiner physikalischer Experimente, z. B. der Überprüfung der Gravitationskonstante
4. Durchführung eines geophysikalischen 3-D-Programmes (Seismik, Magnetotellurik, Gravimetrie, Magnetik) in einem Raum mit der Tiefe und dem Durchmesser der Hauptbohrung. Dieses Projekt muß die dreidimensionale Auflösung der gewonnenen geophysikalischen, geologischen, petrologischen, tektonischen und geochemischen Strukturen gewährleisten, da ein eindimensionales Profil für eine Aussage zu begrenzt ist. Die Oberfläche des 3-D-Raumes wird als "Kernfläche" bezeichnet. Diese Fläche wird besonders genau aufgenommen, um eine Korrelation aller Daten der Tiefensondierung mit der Oberflächengeologie zu gewährleisten.

5. Vertical seismic profiling (VSP) mit verschiedenen Verfahren der Bohrlochseismik, um die Struktur unterhalb der Bohrlochsohle mit hoher Auflösung analysieren zu können. Dies bedeutet eine indirekte Vertiefung des Bohrloches mit einer deutlichen Fokussierung auf die rezente Unterkruste, da der Filtereffekt der aufgelockerten Oberkruste entfällt.
6. Wenige Kilometer westlich des Bohrplatzes befindet sich neben der Fränkischen Linie der Randtrog von Weiden mit wahrscheinlich 5 km-mächtiger Füllung von Perm und Mesozoikum. In Sedimentbohrungen der Industrie sind u. a. Anreicherungen von Disthen gefunden worden. Durch eine genaue Analyse der Leicht- und Schwermineralfraktionen ist die Bohrung um etwa 5 km (permisch-mesozoische Erosionen) "nach oben" zu verlängern. Die Schüttung von Disthen deutet an, daß im Abtragungskomplex MP-Metamorphite enthalten waren, die auf eine stärkere Verbreitung der Thrust-Tektonik mit overstacking von tiefkrustalen Komplexen hinweist. Es wird erhofft, daß im Verlauf des Unternehmens Krustenfenster, auch zusätzliche wissenschaftliche Bohrungen in diesem Sedimentbecken niedergebracht werden können.
7. Nach Beendigung der Hauptbohrung wird angestrebt, an der Bohrlochsohle ein Observatorium einzurichten für Langzeitmessungen zur Beobachtung von zeitabhängigen magnetischen, gravimetrischen, elektrischen Feldänderungen, Überwachung der Mikroseismizität, Detektierung von Entgasungsprozessen, etc. Für dieses Observatorium sind z. Zt. kombinierte Bohrlochmeßsonden in Planung. Auch dies ist ein Zusatzprojekt, dessen Durchführung noch nicht sichergestellt ist.
8. Im Umfeld der Bohrung tritt ein tertiärer Basaltvulkanismus auf mit Krusten- und Mantelxenolithen. Die Analyse der Xenolithe wird weiteren Aufschluß über die Beschaffenheit des Erdmantels geben. Die Bohrlokation wird von der Verlängerung des Egerrifts in Nordost-Südwest-Richtung gestreift, deshalb tritt auch eine schwache Mantelaufwölbung auf, und eine stärkere Schüttung von Quellen mit erhöhten CO₂- und Radongehalten, erhöhten ³He/ ⁴He - Verhältnissen und basaltischer Vulkanismus sind zu beobachten. Die Ergebnisse der Xenolithforschung in Kombination mit hydrochemischen Untersuchungen sowie der Isotopengeochemie von Edelgasen und CO₂ sollen Hinweise auf junge Riftprozesse liefern.
- 9./ 10. Das weitere Umfeld der Bohrung entlang der Böhmisches Masse zwischen schen Frankenwald und Hohem Bogen wird mit Unterstützung der Bayerischen Landesregierung im Maßstab 1:25 000 neu kartiert sowie tektonisch, petrologisch, stratigraphisch neu bearbeitet. Unterkrustengesteine, die in diesem Raum an der Erdoberfläche angetroffen werden, werden neben anderen europäischen und außereuropäischen Beispielen zusätzlich im Rahmen eines DFG-Schwerpunktes "Unterkruste" bearbeitet und im Kontext mit allgemeinen geochemisch-geophysikalischen Problemen der Unterkruste diskutiert.

11. Die Vorerkundung der Lokation im Schwarzwald hat - wie oben dargestellt - erstaunliche Unterschiede zur Oberpfalz gezeigt. Dieses Ergebnis besitzt erhebliches Gewicht für die Interpretation der paläozoischen Krustendynamik in Mitteleuropa. Die weitere Untersuchung der ca. 1 600 m Bohrkerne, die im Rahmen der geothermischen Untersuchungen gewonnen wurden, verspricht im Gegensatz zur herzynischen Kompressionstektonik die Analyse eines metamorphic core complex und durch die Einbeziehung in DEKORP und EUROLITH weitere Zusammenhänge des Rheingraben-Rifting. Durch die Einbeziehung des Materials der Geothermiebohrung Urach und des Kristallins der Bohrung Nördlicher Ries, beide zwischen der Schwarzwald- und der Oberpfalzlokation gelegen, haben sich zusätzliche Aspekte zur Krustenentwicklung, insbesondere der low-velocity-Zonen und postvariskischen Dynamik, ergeben.
12. Das Transect der EGT bindet alle diese Daten in ein breites Profil zwischen Nordkap und Marokko ein.

Alle diese Aktivitäten beginnen, sich zu einem umfassenden Programm mitteleuropäischer Geodynamik zu entwickeln mit Anschluß an die französischen Projekte im Rheintalgraben, den Vogesen und des Zentralmassivs im Westen, der CSSR im Osten, der Schweiz im Süden und gemeinsamer deutsch-österreichischer Projekte im Südosten.

1.1.12 **Ausblick**

Der Entschluß des BMFT, die feste Erde mit dem KTB in seine kritische Förderung aufzunehmen, hat den deutschen Geowissenschaften eine einmalige Chance gegeben, verlorenes Terrain in der Krustenforschung aufzuholen, mit neuen Methoden wissenschaftlicher Kooperation die vorhandenen Ressourcen an geistiger Kapazität zu erschließen und mit neuen experimentellen Möglichkeiten zu versehen. Mit den beiden Instrumenten DFG-Schwerpunkt, in dem sich z. Zt. über 200 Wissenschaftler mit Projekten oder als Diskussionspartner zusammengefunden haben, und mit der KTB-Projektleitung am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung ist es gelungen, die ungewohnten und z. T. schwierigen Probleme eines solchen Vorhabens zu strukturieren, Geowissenschaft, Geotechnologie, Geoindustrie erstmals auf breiter Basis in einem gemeinsamen Forschungsunternehmen zusammenzuführen. Die von manchem Kritiker zunächst als bedenklich angesehene Konzentration auf ein einziges tiefes Loch beginnt sich zu einem breiten "Unternehmen Krustenfenster" zu entwickeln, als deutschem Beitrag zur internationalen Lithosphärenforschung.

1.1.13 Referenzliste

- ALLMENDINGER, R.W., HAUGE, T.A., HAUSER, E.C., POTTER, C.J., KLEMBERER, S.L., NELSON, K.D., KNUEPFER, P. & OLIVER J. (1987): Overview of the COCORP 40°N Transect, Western United States: The Fabric of an Orogenic Belt. - Geological Society of America Bulletin, Bd. 98, 308-319.
- BARELL, J. (1914): The Strength of the Earth's Crust, pts. 4, 5. - Jour. Geology. Bd. 22, 289-314, 441-468, 655-683.
- BEHR, H.J. & EMMERMANN R. (1987): Scientific Objectives and Site-Selection Studies of the Continental Deep Drilling Program of the Federal Republic of Germany (KTB). - BEHR, H.J. & VIDAL, H. (1987) (Hrsg.). Observation of the Deep Continental Crust II. Exploration of the Deep Continental Crust, Springer-Verlag, Berlin.
- BEHR, H.J. & HEINRICHS, T. (1987): Geological Interpretation of DEKORP 2-S: A Deep Seismic Reflection Profile Across the Saxothuringian and Possible Implications for the Late-Variscan Structural Evolution of Central Europe. - Tectonophysics, 142.
- BLÜMEL, P. (1986): Metamorphic Processes in the Variscan Crust of the Central Segment. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 149-155.
- BOUCKAERT, J. (1985): Deep Drilling Programs in Belgium. - RALEIGH, C.B. (Hrsg.) (1985). Observation of the Continental Crust through Drilling I. Proceedings of the International Symposium held in Tarrytown, May 20-25, 1984. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag, Berlin, 28-38.
- BOYER, St. E. & ELLIOTT, D. (1982): Thrust Systems. - The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V, 66, No. 9, 1196-1230.
- BRACE, W.F. (1980): Permeability of Crystalline and Argillaceous Rocks. - Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 17, 241-251.
- DEKORP Research Group (1985): First Results and Preliminary Interpretation of Deep-Reflection Seismic Recordings Along Profile DEKORP 2-South. - J. Geophys., 57, 137-163.
- EISBACHER, G. & KROHE, A. (1985): The Tectonic Setting of the Variscan Schwarzwald - A Brief synopsis. Introduction to the Schwarzwald Excursion of the "2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust Through Drilling", Seeheim, 32-38.
- ETHERIDGE, M.A., WALL, V.J. & VERNON, R.H. (1983): The Role of the Fluid Phase During Regional Metamorphism and Deformation. - J. Metamorphic Geol., 1, 205-226.

- ETHERIDGE, M.A., WALL, V.J. & COX, S.F. (1984): High Fluid Pressures During Regional Metamorphism and Deformation: Implications for Mass Transport and Deformation Mechanism. - *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B6, 4344-4358.
- FORSCHUNGSKOLLEGIUM PHYSIK DES ERDKÖRPERS e. V. (1986): Geophysikalische Schlüsselexperimente in der Kontinentalen Tiefbohrung der Bundesrepublik Deutschland. Bochum.
- FREEMANN, R., MUELLER, St. & GIESE, P. (1986): Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986.
- FUCHS, K. & GIESE P. (1987): Geophysical Targets of the Continental Deep Drilling Program of the Federal Republic of Germany. Tomography of the Crust and its Permeability. A Window into the Lower Crust and an In-Vivo Deep Laboratory. - BEHR, H.J. & VIDAL, H. (Hrsg.) (1987). Observation of the Continental Crust through Drilling II. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag Berlin.
- HAAK, V., BERKTOLD, A., JÖDICKE, H., KNÖDEL, K. & LOSECKE, W. (1986): The Distribution of Electrical Conductivity Along the Central Segment of the EGT. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 117-126.
- HÄNEL, R. (Hrsg.) (1982): The Urach Geothermal Project (Swabian Alp, Germany). - E. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1982.
- HEINRICH, T. (1986): Structure and Development of the Saxothuringian Zone. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 135-140.
- HOLBROOK, W. St., GAJEWSKI, D. & PRODEHL, C. (1987): Shear-Wave Velocity and Poisson's Ration Structure of the Upper Lithosphere in Southwest Germany. - *Geophysical Research Letters*, Vol. 14, No. 3, 321-234.
- KERN, H. (1982): Elastic-wave Velocity in Crustal and Mantle Rocks at High Pressure and Temperature: The role of the High-Low Quartz Transition and of Dehydration Reactions. - *Phys. Earth Planet. Interiors*, 29, 12-23.
- KLIGFIELD, R., CRESPI, J., NARUK, S. & DAVIS, G.H., (1984): Displacement and Strain Patterns of Extensional Orogens. - *Tectonics*, Vol 3, No. 5, 577-609.

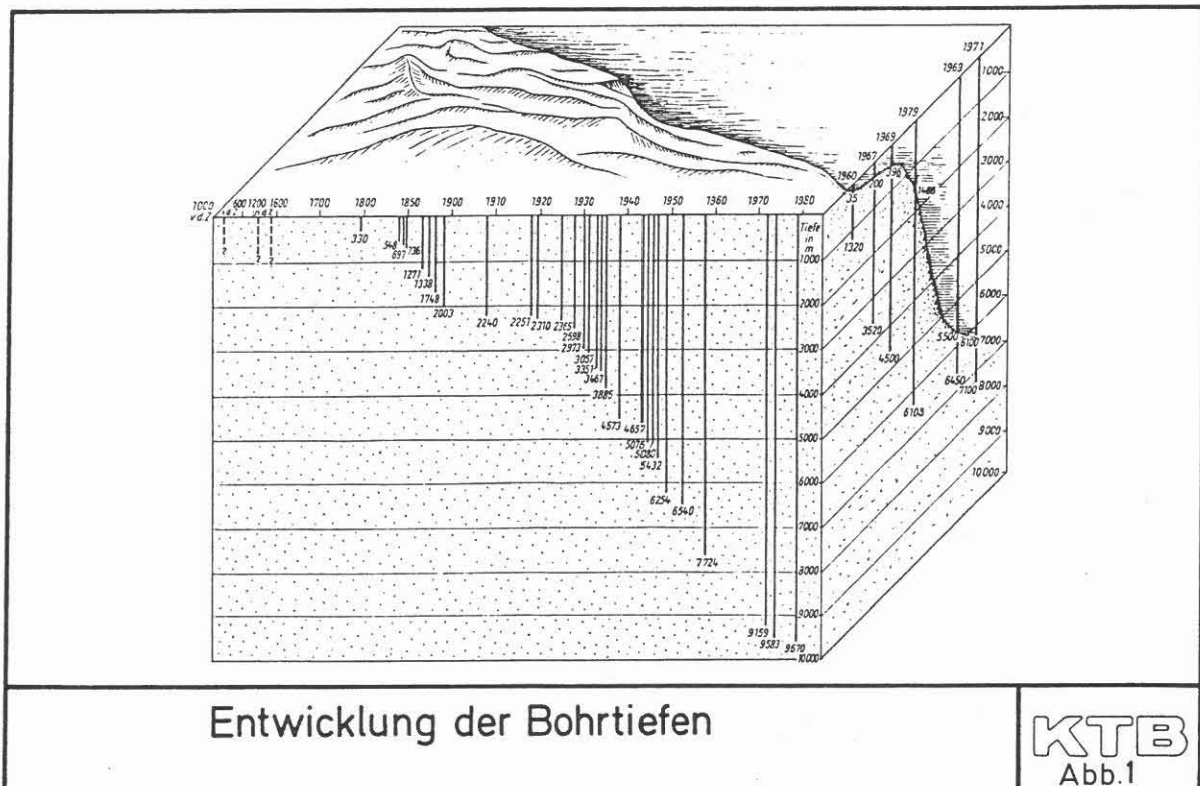
- KONTINENTALES TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (KTB): Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz. 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald, 19.09.-21.09.1986. Zusammengestellt von K. WEBER und A. VOLLBRECHT.
- KONTINENTALES TIEFBOHRPROGRAMM DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (KTB): Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Schwarzwald. 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald, 19.09.-21.09.1986. Zusammengestellt von K. VON GEHLEN, G. KLEINSCHMIDT, R. STENGER, H. WILHELM und W. WIMMENAUER.
- KOZLOVSKY, Y.A. (Hrsg.) (1984): The Superdeep Well of the Kola Peninsula. Exploration of the Deep Continental Crust. - Springer-Verlag, Berlin.
- KREMENETSKY, A.A. & OVCHINNIKOV, L.N. (1986): The Precambrian Continental Crust: Its Structure, Composition and Evolution as Revealed by Deep Drilling in the USSR. - Precambrian Research, 33, 11-43.
- KROHE, A. (1985): The Tectogenesis of Variscan Schwarzwald. - 2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling. Abstracts. October 4-6, 1985, Seeheim/Odenwald. - Alfred-Wegener-Stiftung, Bonn, 64.
- LÜSCHEN, E., MENGES, D., RUEHL, Th., SANDMEIER, K.-J., GOWIN, J., JANOTH, W., KELLER, F., STILLER, A., SÖLLNER, R. and TRAPPE, H. (1985): Presite Seismic Reflection Survey. - 2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust Through Drilling. Abstracts. October 4-6, 1985, Seeheim/Odenwald. - Alfred-Wegener-Stiftung, Bonn, 64.
- MCCLAY, K.R. & PRICE, N.J. (Hrsg.) (1981): Thrust and Nappe Tectonics. - Geological Society Special Publication No 9. Blackwell Scientific Publications Oxford.
- MEISSNER, R., BARTELTSEN, H. & MURAWSKI, H. (1980): Seismic Reflection and Refraction Studies for Investigating Fault Zones Along the Geotraverse Rhenohertzynikum. - Tectonophysics, 64, 59-84.
- MEISSNER, R., WEVER, Th. & DÜRBAUM, H.J. (1986): The Variscan Crust From a Geophysical Point of View: Reflection Seismics. - FREEMAN, R., MÜLLER, St. & GIESE, P. (Hrsg.) (1986). Proceedings of the Third Workshop on the European Geotraverse (EGT) Project. The Central Segment. Bad Honnef, April 14-16, 1986. European Science Foundation, Strasbourg, August 1986, 93-98.
- SUESS, E. (1875): Die Entstehung der Alpen. - Braumüller, Wien, 168.
- WALTER, R. & WOHLLENBERG, J. (1985): Proposal for an Ultra-Deep Research Borehole in the Hohes Venn Area (West Germany). N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 171, 1-16.
- WHITE, J.C. & WHITE, S.H. (1981): On the Structure of Grain Boundaries in Tectonites. - Tectonophysics, 78, 613-628.

2 FACHBEREICH TECHNIK

2.1 RISCHMÜLLER, H.: Das 'Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland', eine technische Herausforderung

2.1.1 Einleitung

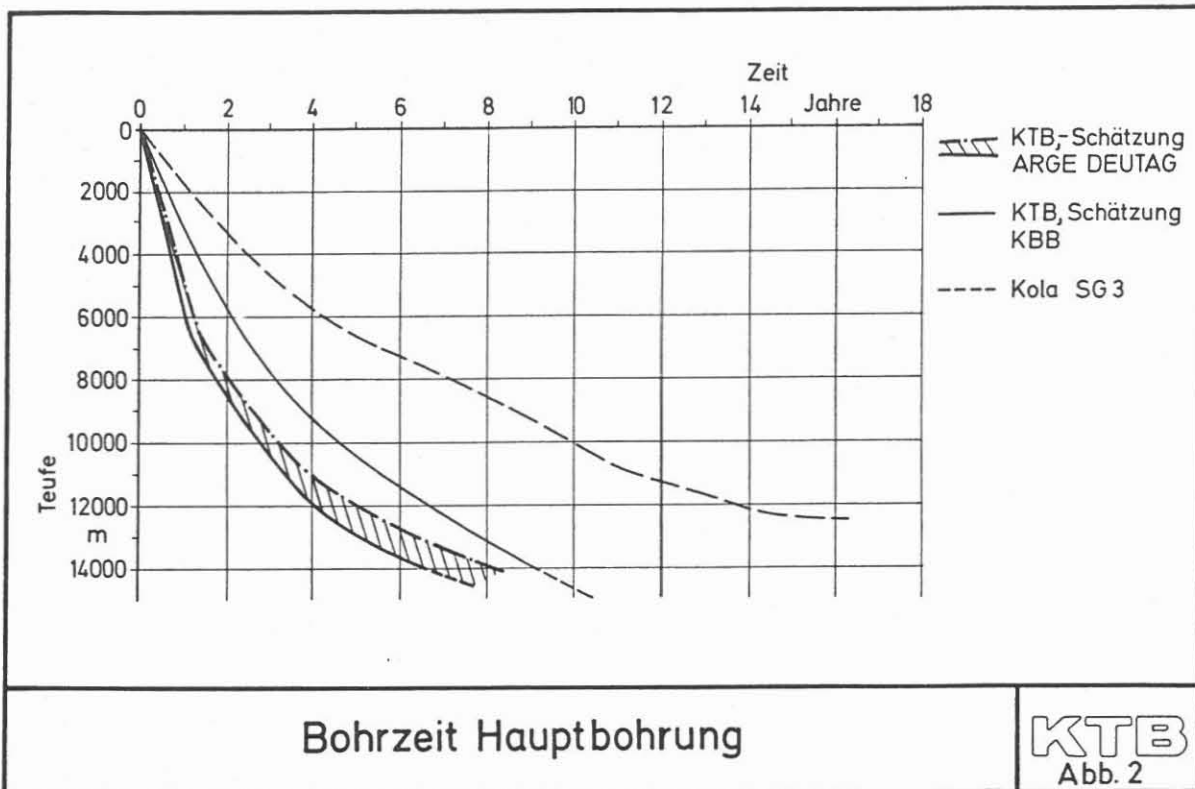
Die Geschichte der Erschließung der Tiefe durch Bohrungen beginnt bereits vor der Zeitrechnung (Abb. 1).



T 1050/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Das überwiegende Ziel dieser Bohrungen war die Aufsuchung von Rohstoffvorkommen und die Erschließung von Lagerstätten. So nehmen im Zeitalter der beginnenden Industrialisierung etwa seit 1850 die Bohrtiefen von um 500 m rapide auf ca. 2 000 m um die Jahrhundertwende zu – das ist die Zeit der Prospektion auf Kohle und Salz im Gebiet des damaligen deutschen Reiches – stagnieren bis etwa 1925, um dann wieder steil mit der Erschließung immer tieferer Stockwerke zur Kohlenwasserstoff-Suche bis in unsere Zeit anzusteigen. Die kommerziellen Bohrungen haben fast die 10 000 m Marke erreicht. Der wissenschaftlichen kontinentalen Forschungsbohrung Kola SG-3 blieb es vorbehalten, diese Marke zu überschreiten. Sie ist in 15 Jahren Bohrzeit bis 12 060 m Tiefe vorgestoßen (Abb. 2).



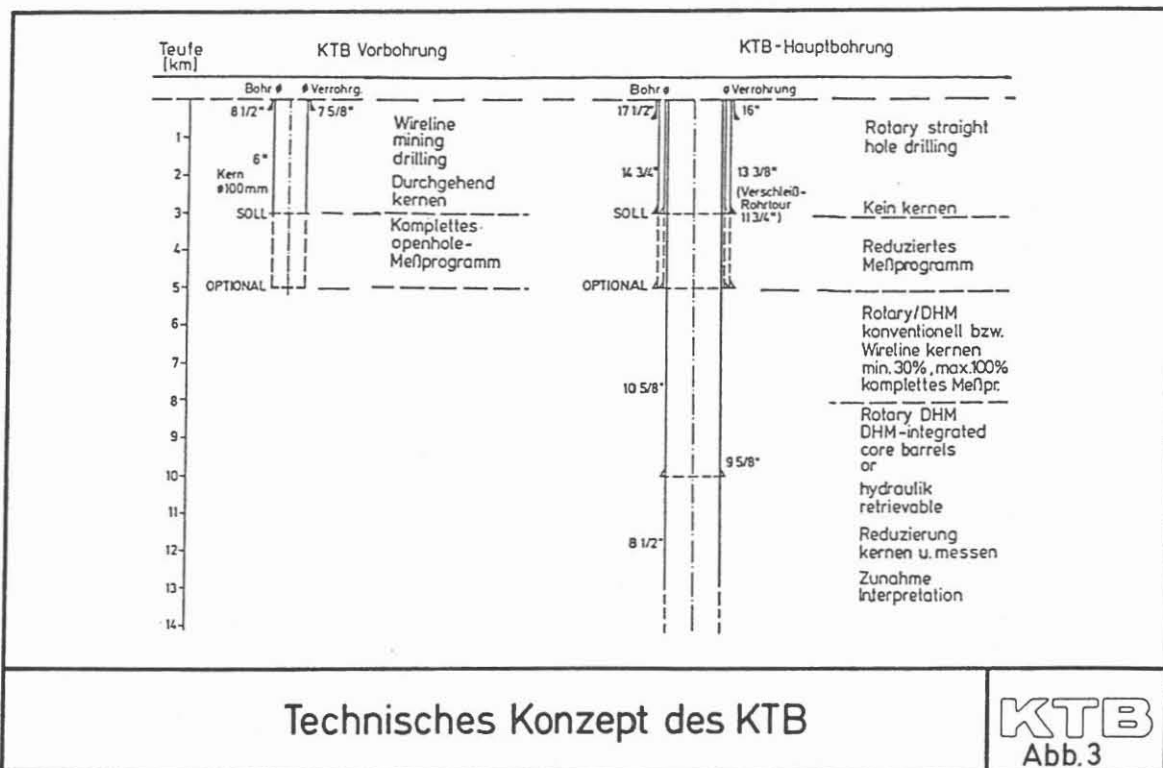
T 1029/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Aufgabenstellung und Schwierigkeitsgrad einer übertiefen wissenschaftlichen Forschungsbohrung unterscheiden sich erheblich von jeder Art Bohrung auf Rohstoffvorkommen und Lagerstätten. Kommerzielle Bohrungen sollen bekanntlich Lagerstätten aufsuchen und erschließen. Nur in dem Bereich der für die Lagerstätte interessierenden Schichten erfolgen deshalb Kernbohren, umfassende Bohrlochmessungen, Zuflußteste und Laboruntersuchungen. Bei der wissenschaftlichen Forschungsbohrung der kontinentalen Kruste jedoch sind von Anfang an über die ganze Bohrstrecke hinweg Gesteinsproben, Flüssigkeits- und Gasproben, die Feststellung der physikalischen Bedingungen und die geophysikalische Vermessung möglichst langer offener Bohrlochabschnitte erforderlich, um die geowissenschaftlichen Forschungsziele zu erreichen. Gerade im Grenzbereich heutiger technologischer Möglichkeiten und darüber hinaus, d.h. im Temperaturbereich über 150 °C, soll noch eine ausreichende Informationsdichte gewährleistet sein. Immerhin hat die russische Bohrung die grundsätzliche Durchführbarkeit einer übertiefen Bohrung unter Beweis gestellt, wenn sie auch sehr lange gedauert hat und sicherlich unseren Vorstellungen vom Zeit- und Kostenrahmen einer übertiefen Forschungsbohrung nicht entspricht.

2.1.2 Das Gesamtkonzept - ein Synergismus von Vorbohrung, Hauptbohrung, wissenschaftlichem und Bohrlochmeßprogramm

Das technische Konzept des KTB sieht zwei Bohrungen vor: Eine Vorbohrung bis mindestens 3 000, möglichst aber 5 000 m, und die Tiefbohrung mit einer Endteufe von 12 000 bis 14 000 m. Das Konzept ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.



T 1082/12.86

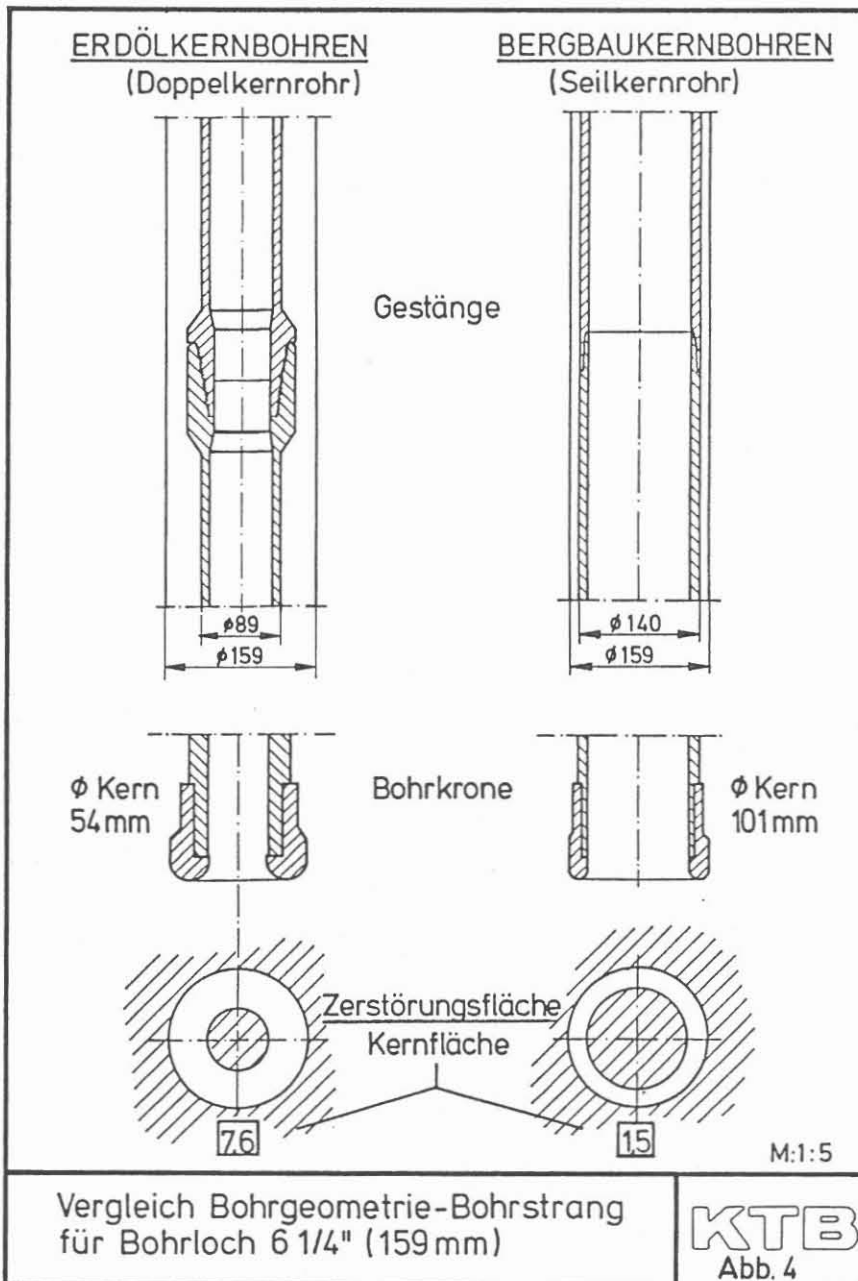
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

2.1.2.1 Vorbohrung

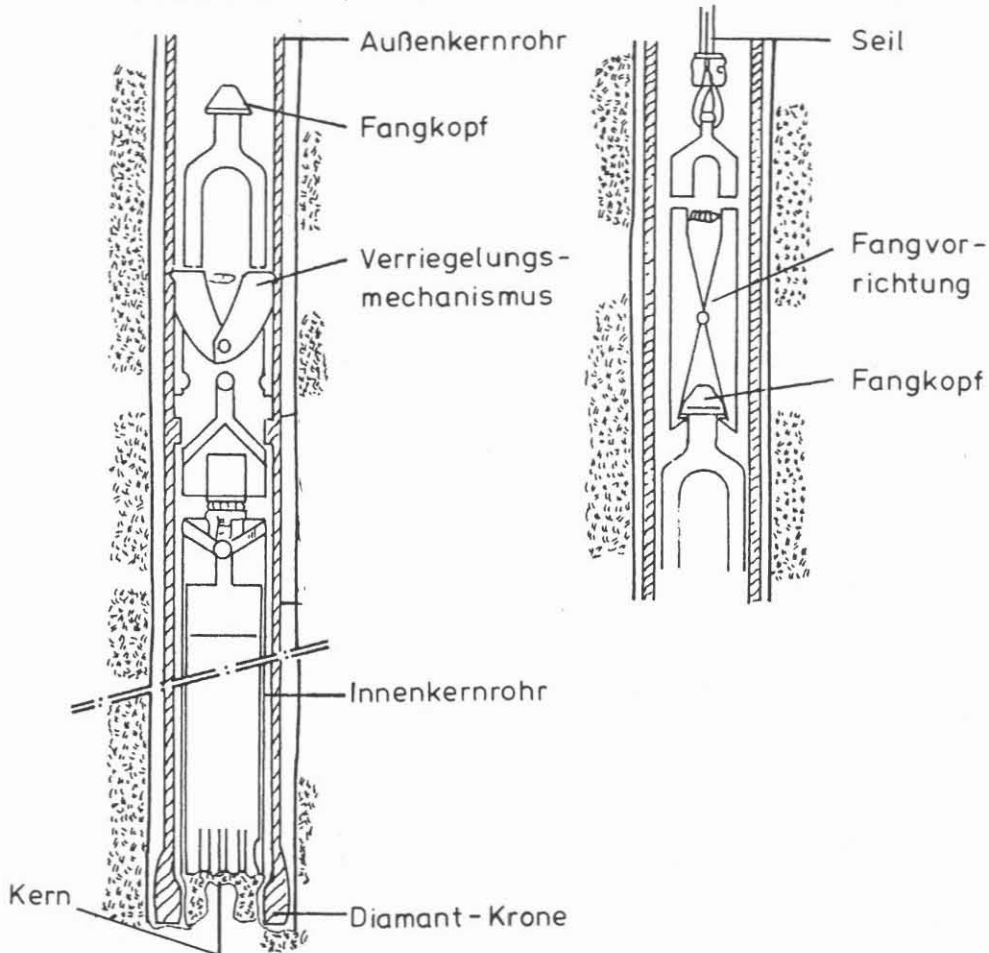
Die Aufgaben der Vorbohrung sind wie folgt:

- Sammlung geowissenschaftlicher Daten
- Entlastung der KTB-Hauptbohrung von Bohrlochmessungen
- Befreiung der KTB-Hauptbohrung von Kernbohrarbeiten (Richtungsstabilität)
- Überprüfung des Temperaturprofils
- Aussage über bohrtechnische Problemhorizonte wie Zuflüsse, Verluste, etc. im Bereich der Ankerrohrtour der KTB-Hauptbohrung
- Erprobung von Bohrwerkzeugen und Meßgeräten
- Kostenersparnis bei der KTB-Hauptbohrung
- Einarbeitung des Arbeitsteams

Nach unserer derzeitigen Überzeugung kann die Bohrung, mit einer Kombination aus Rotary- und bergbaulichem Bohrverfahren durchgeführt, mit etwa zwei Dritteln des Aufwandes im Vergleich zur Anwendung der Rotary-Bohrtechnik hergestellt werden. Beim Bergbau-Bohrverfahren handelt es sich um schnell drehendes Bohren mit dünnlippigen Diamantkronen und Doppelkernrohr bei Verwendung von außen glattem, fast den ganzen Bohrlochquerschnitt ausfüllenden Bohrgestänge. Das innere Kernrohr wird nach Abbohren des Kerns am Seil gezogen (Wire Line Coring), so daß das Werkzeug bis zum Verschleißzeitpunkt auf Sohle bleiben kann (Abb. 4, 5).



1. Konstruktionsprinzip der Seilkernausrüstung



2. Arbeitsabläufe der Kerngewinnung beim Seilkernverfahren

- 1
↓
Einbau der kompletten Ausrüstung bis zur Bohrlochsohle
Innenkernrohr im Außenkernrohr verriegelt
- 2
↓
Bohrprozeß mit Kerngewinnung
Bohrkern wird vom Innenkernrohr aufgenommen
- 3
↓
Einbau der Fangvorrichtung für das Innenkernrohr
Fangen des Innenkernrohres
Lösung des Verriegelungsmechanismus
Außenrohr-Innenrohr
- 4
↑
Ausbau der Fangvorrichtung + Innenkernrohr mittels Seil
- 5
↓
Einlassen des 2. Innenkernrohres
Fortsetzung des Bohrprozesses nach Verriegelung im Außenrohr

Kerngewinnung mit einer Seilkernausrüstung

KTB
Abb. 5

Gerade die dünnlippige Bohrkronen und die damit im Vergleich zur Rotary-Bohrtechnik deutlich kleinere zu zerstörende Gesteinsfläche ermöglicht den höheren Bohrfortschritt. Demgegenüber erlaubt das Rotary-Gestänge durch die Verstärkung im Bereich der Gestängeverbinder das Bohren in größeren Teufen. Die breite Lippe der Bohrkronen ist hier notwendig, um den für die Gestängeverbinder erforderlichen Querschnitt freizuschneiden.

Die folgende Abb. 6 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung über die Bohrfortschritte und Standzeiten der Kronen von Kernbohrungen im Hartgestein. Die wesentlich kleineren Zerstörungsflächen und günstigeren Schnittgeschwindigkeiten beim Bergbaukernbohren ermöglichen eine Verdoppelung der Bohrfortschritte im Vergleich zum Rotarybohren. Mit der Kombination beider Verfahren läßt sich also im Vergleich zur Rotary-Bohrtechnik bei vollem Kerngewinn der Bohrfortschritt verdoppeln, durch Verwendung der Wireline-Technik die Zahl der Roundtrips und durch Einsatz einer Rotary-Bohranlage die Zeit für die Roundtrips reduzieren und so im Bereich mittlerer Teufen eine bemerkenswerte Kosteneinsparung erzielen.

| | Bohrung | Bohrfortschritt [m/h] | Standlänge [m] | Zerstörungsfläche [cm ²] |
|---|---|--------------------------|-------------------|---|
| Erdölbohren | Böttstein | 0,52 | 14,2 | 134 |
| | Weiach | 0,48 | 13,2 | 134 |
| | Urach | 0,58 | 11,1 | 282 |
| Bergbaukernbohren | Kaisten | 1,11 | 15,1 | 84 |
| | Leuggern | 1,25 | 12,7 | 97 |
| | KTB-Vorerkundg. Schwarzwald / Oberpfalz | 0,98 | 34,5 | 66 |
| Bohrergebnisse Hartgestein (Kernbohren) | | | | KTB Abb. 6 |

T 1015/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Die Vorbohrung soll also eine Endteufe von mindestens 3 000 m erreichen und nach Möglichkeit einen weiteren Teufenbereich bis max. 5 000 m erschließen. Der Endteufenbereich der Vorbohrung korrespondiert mit der Absetzteufe der Ankerrohrtour in der Hauptbohrung. Damit soll erreicht werden, daß bis zu

dieser Teufe in der Hauptbohrung keine Kernbohrarbeiten und wissenschaftlichen Bohrlochmessungen ausgeführt werden müssen, so daß die Hauptbohrung in diesem Abschnitt schneller und dabei noch senkrecht abgeteuft werden kann (siehe auch 2.2).

2.1.2.2 Hauptbohrung

Das Konzept für die Hauptbohrung wurde nach folgenden Kriterien entwickelt:

- Verwendung von international üblichen und bewährten Dimensionen für Bohrwerkzeuge und Untertageequipment wie z. B. Bohrmotoren, Kernrohre, Stofsdämpfer, etc.
- Bohrlochdurchmesser so groß wie nötig, aber so klein wie möglich
- Enddurchmesser bei normalem Verlauf der Bohrarbeiten 8 1/2"

Vergleich der zu zerstörenden Gesteinsvolumina für die verschiedenen Bohr- und Verrohrungsschemata

| a) bei üblicher Clearance | von Teufe | bis Teufe | b) bei slimline Clearance | Anteil (a) = 100% |
|-----------------------------|----------------------|-----------|------------------------------|----------------------|
| 28" = 199m ³ | 0 m | - 500m | 17 1/2" = 78 m ³ | = 39% |
| 23" = 938m ³ | 500 m | - 4000m | 14 3/4" = 386 m ³ | = 41% |
| 12 1/4" = 456m ³ | 4000 m | - 10000m | 10 5/8" = 343 m ³ | 75% |
| 8 1/2" = 146m ³ | 10000 m | - 14000m | 8 1/2" = 146 m ³ | 100% |
| <u>1739m³</u> | <u>Gesamtvolumen</u> | | <u>953m³</u> | <u>= 55%</u> |
| 1593m ³ | davon bis 10000m | | 807m ³ | = 51% |

**KTB-Hauptbohrung
Bohr- und Verrohrungsprogramm**

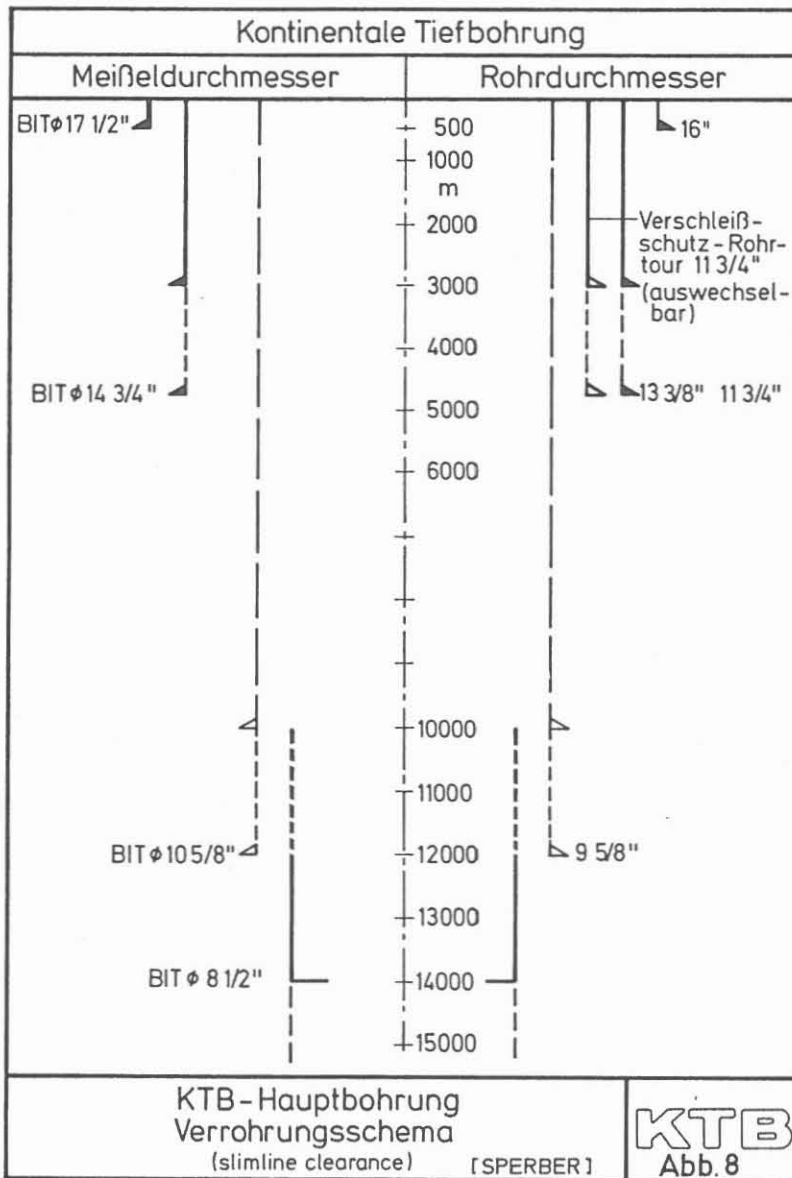
[SPERBER]

**KTB
Abb. 7**

Ein Vergleich (Abb 7) mit dem heute üblichen Verrohrungsschema bei Bohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen zeigt, daß durch Verringerung der Clearance-Verhältnisse zwischen Bohrlochdurchmesser und

Außendurchmesser der Rohrtouren eine drastische Reduzierung des zu zerstörenden Gesteinsvolumens erreicht werden kann (Slim-Line-Prinzip), die bei dem z.Zt. favorisierten Verrohrungsschema für die Hauptbohrung etwa 50 % beträgt. Hiermit sind natürlich günstigere Bohrfortschritte verknüpft. Weiterhin galt es, so weit wie möglich, bei allen Bohrwerkzeugen - insbesondere aber bei Rollenmeißeln und Bohrkronen - weltweit eingesetzte Standardgrößen auszuwählen, da mit diesen Werkzeugen erfahrungsgemäß die höchste Zuverlässigkeit und beste Leistung erzielt werden kann, Nachschub und Vorhaltung sichergestellt sind und für diese Standarddurchmesser auch eine breite Palette von Hilfswerkzeugen, wie zum Beispiel Fanggeräte, zur Verfügung stehen. Demgegenüber ist die Anfertigung von "maßgeschneiderten" Futterrohren bzw. Futterrohrverbindern relativ problemlos möglich.

Die Berücksichtigung dieser Vorgaben führte zu dem im nächsten Bild dargestellten Bohr- und Verrohrungsschema.



Die Hauptbohrung wird bis 3 000 m bzw. 5 000 m mit 17 1/2" bzw. 14 3/4" Bohrlochdurchmesser gebohrt. Kerne können in diesen Dimensionen nicht erbohrt werden. Dies hätte zur Folge, daß das Bohrloch auf einen kleineren Durchmesser, beispielsweise 8 1/2", abgesetzt werden müßte. Damit ergeben sich aber Stabilisierungsprobleme des Bohrstranges, die in der Praxis zu einer Änderung des Bohrlochverlaufes führen. Gerade der obere Bohrlochabschnitt muß aber so senkrecht wie möglich abgeteuft werden, soll das Ziel einer 12 km bis 14 km tiefen Forschungsbohrung nicht durch unzulässig hohen Verschleiß und Energieverlust im oberen Bohrlochabschnitt infrage gestellt werden.

Das hier vorgeschlagene Bohr- und Verrohrungsschema erfüllt weitgehend die Forderung nach größtmöglicher Flexibilität für evtl. auftretende technische Schwierigkeiten und geologische Unvorhersehbarkeiten, unterscheidet sich jedoch in einem Punkt von der sogenannten "Advanced Open Bore Hole Method" wie sie z.B. für die Bohrung Kola SG-3 vorgeschlagen und bislang durchgeführt worden ist, ohne jedoch deren wesentliche Vorzüge zu verlieren.

Die "Advanced Open Bore Hole Method" sieht vor, aus einer Rohrtour heraus mit einem kleineren als maximal möglichen Durchmesser zu bohren und lediglich bei bohrtechnischen oder geologischen Schwierigkeiten, die einen Rohreinbau erforderlich machen, das Bohrloch bis zu dieser Teufe auf den notwendigen Durchmesser zu erweitern.

Die Vorzüge dieses Konzeptes sind:

- vereinfachtes Verrohrungsschema
- Bohrwerkzeuge und Bohrstrangteile können auf wenige Größen standardisiert werden
- Schutzmöglichkeit der Ankerrohrtour durch wiedergewinnbare Verschleißrohrfahrten
- jederzeit Zirkulationsmöglichkeit bis Rohrschuhteufe über Casing-Ringraum

Die Bohrung Kola SG-3 wurde diesem Prinzip entsprechend abgeteuft, dabei wurde bei 2 000 m eine Ankerrohrtour mit 325 mm Outer Diameter (OD) abgesetzt und zementiert, in diese Rohrtour ein weiterer Rohrstrang mit 245 mm OD eingehängt und aus dieser heraus mit Bohrwerkzeugen von 214 mm OD weitergebohrt.

Nachteilig bei dieser Bohrmethode ist jedoch, daß bei erforderlich werdendem Rohreinbau das Bohrloch in einem zeit- und kostenaufwendigen separaten Arbeitsgang erweitert werden muß. Da Bohrlochwandausbrüche und Nachfall häufig zum Festwerden des Bohrstranges führen, stellt dies eine Gefahr für das Bohrloch dar, die in der Regel nur durch Einbau von Rohren beseitigt werden kann. Bezogen auf die Kontinentale Tiefbohrung bedeutet das, daß mit dem Einbau der 9 5/8" Rohrtour gerechnet werden muß.

Diese Überlegungen führten dazu, das Prinzip der "Advanced Open Bore Hole Method" zu modifizieren und eine Bohrdurchmesserkombination zu wählen, die einen sofortigen Rohreinbau zuläßt, wenn die Situation es erfordert.

Wie bereits dargelegt, kann bis zur Ankerrohrteufe auf Kernbohrarbeiten in der Hauptbohrung verzichtet werden, so daß darunter lediglich in den Durchmesserbereichen 10 5/8" und 8 1/2" gekernt werden muß.

Für beide Durchmesserbereiche stehen bereits erprobte, robuste und wirtschaftliche Diamant- und Rollenkerndrillwerkzeuge zur Verfügung, die bereits bei Hartgesteinsbohrungen in England, Italien und den USA eingesetzt wurden.

Die Tiefbohrung wird mit einer überschweren, eigens zu entwickelnden Bohranlage im Rotary-Bohrverfahren, im Tiefenbereich ab 5 000 m allerdings zunehmend unter Verwendung von Untertage-Bohrmotoren (z.B. Bohrturbine) abgeteuft. Bei einer übertiefen Bohrung verteilt sich die verfügbare Zeit zu etwa einem Drittel auf das Bohren, zu einem weiteren Drittel auf die Roundtrip-Zeit, d.h. die Zeit für den Werkzeugwechsel, und ein Drittel wird für das Messen benötigt. Es ist deshalb wichtig, den Vorgang des Werkzeugwechsels auf ein Minimum zu reduzieren. Nach den Vorarbeiten der mit diesem Problem befaßten Arbeitsgemeinschaften der deutschen Bohrindustrie läßt sich das in erheblichem Umfang realisieren. Wir kommen so beim Kontinentalen Tiefbohrprogramm mit großer Wahrscheinlichkeit zur ersten vollautomatischen Bohranlage (Abb. 9).

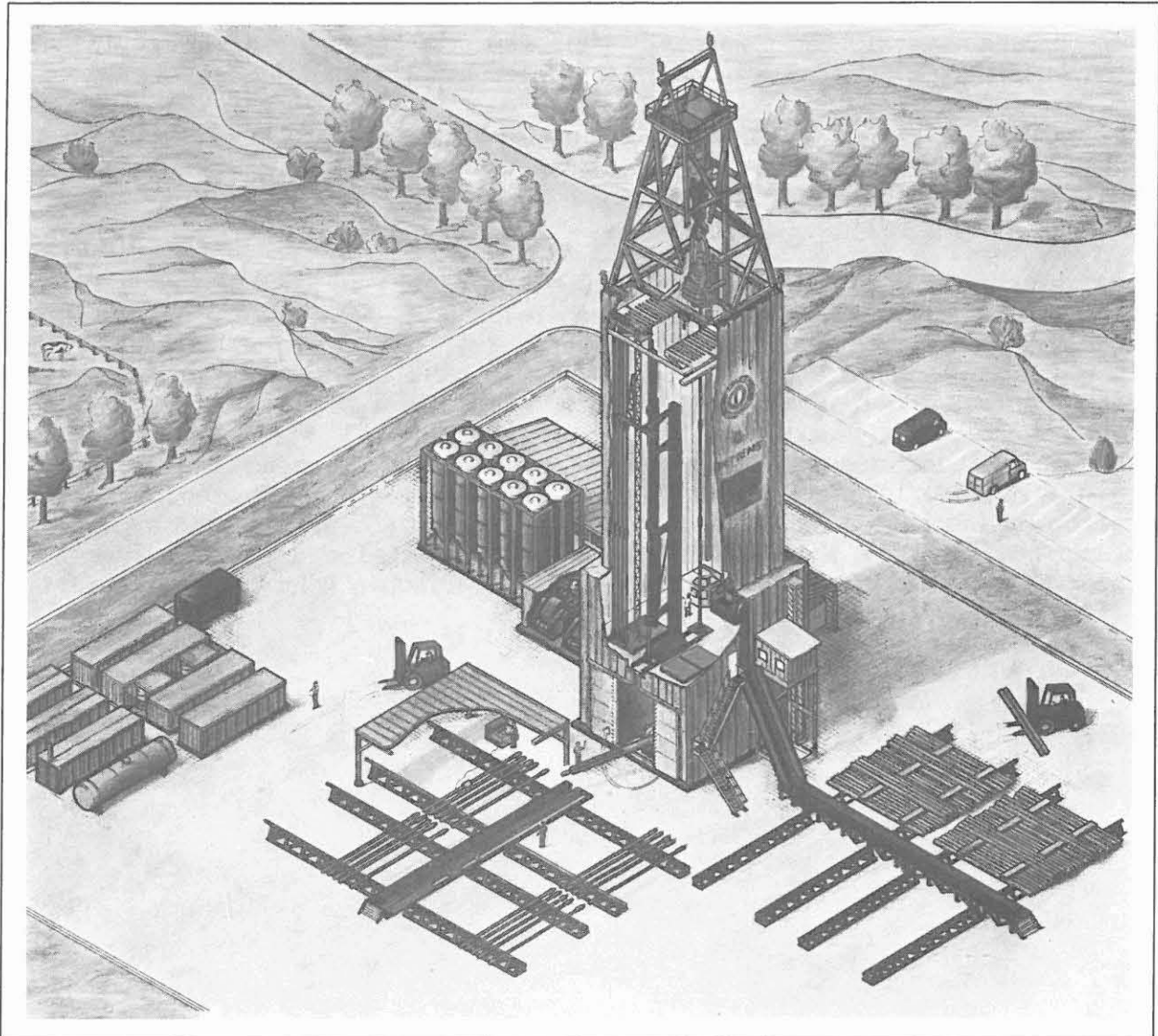
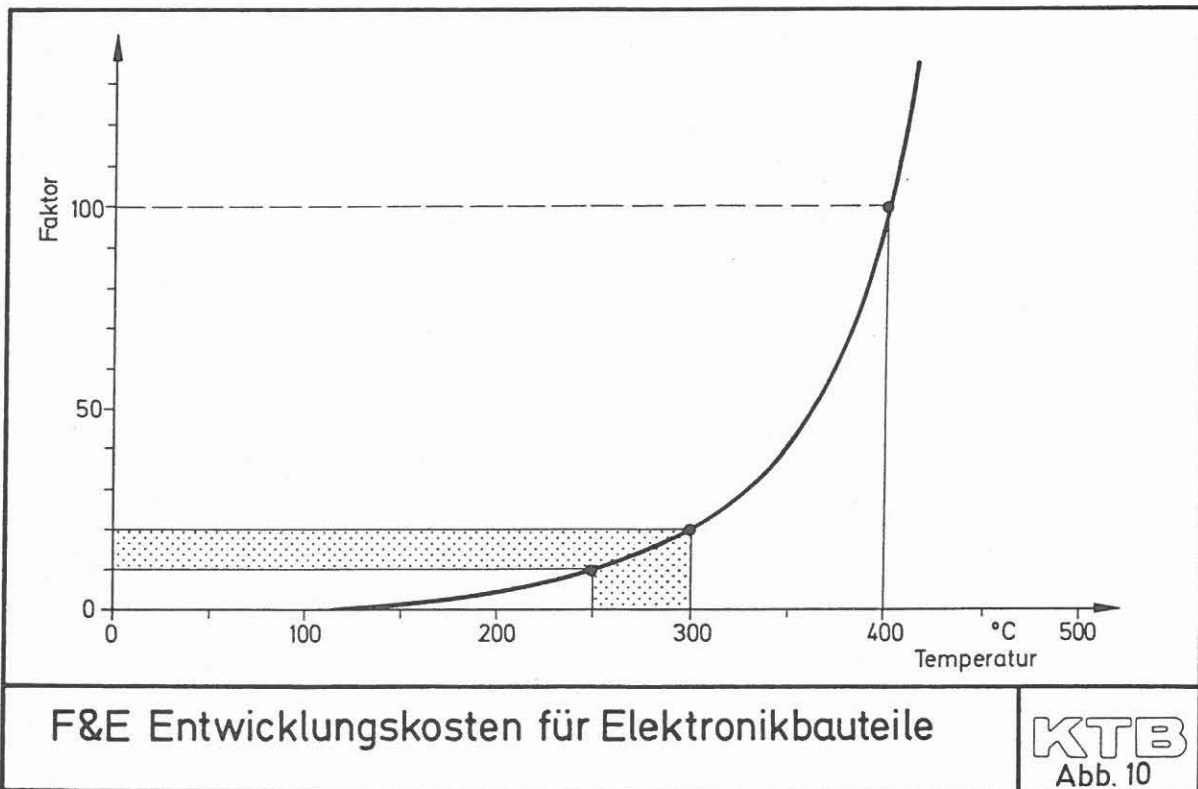


Abb. 9: Die optimierte Bohranlage für über 14 000 m Teufe (nach ARGE Deutag, Preussag, Siemens, Wintershall) mit vollautomatischem Pipehandler, halbautomatischer Gestängeaufnahme und -ablage und einer Setback-Kapazität von zwei vollständigen Bohrsträngen.

2.1.3 Das F- und E-Konzept

Selbstverständlich gilt für die Projektleitung der Grundsatz, wo immer möglich, bewährte Geräte, Technologien und Verfahren einzusetzen und nur dort Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu initiieren, wo das zum Erreichen der geowissenschaftlichen Projektziele unerlässlich ist. Die dominierende technologische Begrenzung ist die Temperatur, und zwar für einen großen Teil der bohrtechnischen Geräte und die Bohrspülung und insbesondere auch für die Meßtechnik im Bohrloch. Die verfügbare Ausrüstung ist bis 150 °C, in wenigen Fällen bis 200 °C ausgelegt. Wie die graphische Darstellung in Abb. 10 zumindest qualitativ aussagt, ist zur Entwicklung elektronischer Bauteile und Geräte für das Temperaturfenster von 250 - 300 °C der 10- bis 20-fache Aufwand, verglichen mit dem konventionellen Temperaturbereich erforderlich. Für 400 °C steigt dieser Entwicklungsaufwand bereits auf das 90- bis 100-fache. Es muß deutlich herausgestellt werden, daß das Budget des Projektes für den Temperaturbereich über 250 - 300 °C weder vorgesehen ist noch dafür im entferntesten ausreicht. Die Frage der Abschätzung des Verlaufes und der Größe der Temperatur ist deshalb von wesentlicher Bedeutung.



Für die Projektleitung ergeben sich eine große Zahl geowissenschaftlicher und technischer F- und E-Projekte mit einem Gesamtvolumen von ca. 60 Mio. DM. Dieser Betrag entspricht den für die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) zur Forschung an den Universitäten vorgesehenen Mitteln.

2.1.4 Zeitplan

Das Bohrkonzept der Vorbohrung soll Anfang 1987 ausgearbeitet sein, um bis zum Ende des Frühjahrs 1987 die Bohrplatzplanung und die Ausschreibung der Bohrung durchzuführen. Daran schließt dann die Herstellung des Bohrplatzes an. Dann folgen die Durchführung der Vorbohrung einschließlich des Meßprogramms. Die 3 000 m-Bohrung wird bis Ende 1988 dauern. Sollte bis 5 000 m gebohrt werden, wird die Vorbohrung Ende 1989 beendet sein. Parallel läuft die Vorbereitung der Hauptbohrung, und zwar die Ausarbeitung des Bohrkonzeptes, des Bohranlagenkonzeptes, die Bohrungsplanung, die Planung der Bohrspülung und ihrer Entsorgung und die Bohrplatzplanung. Diese Aktivitäten dauern bis zum Frühjahr 1988 an und gehen zum Teil darüber hinaus. Noch 1987 ist die Ausschreibung der Bohrkonztraktorleistungen, der Operatorleistungen und der wesentlichen Serviceleistungen und -lieferungen vorgesehen. Die Hauptbohrung kann dann im Sommer 1989 begonnen werden.

Die Schätzung der Bohrzeit der Hauptbohrung ist zum heutigen Zeitpunkt nach wie vor schwierig und noch ungenau. In Abb. 2 sind die Bohrzeit von Kola SG-3, die Schätzung der KBB aus dem Jahre 1963 und eine neuere Schätzung der ARGE Deutag, Preussag, Wintershall und Siemens eingetragen. Es ist durchaus realistisch, davon auszugehen, daß die 14 km tiefe Forschungsbohrung in 8 bis 10 Jahren durchgeführt werden kann. Wichtig in diesem Zusammenhang sind aber auch die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen Kernbohrtechnik und eine gute Organisation und Abstimmung der geowissenschaftlichen Messungen und Arbeiten mit den Bohrarbeiten.

2.1.5 Schluß und Ausblick

Zusammengefaßt ist festzustellen, daß es sich beim Bohrkonzept des KTB um eine interdisziplinär anzugehende geowissenschaftlich-technische und ökonomische Optimierungsaufgabe handelt und daß dieses Bohrkonzept einen wesentlichen Beitrag zur wirtschaftlichen Verwendung der verfügbaren Mittel, zur Risikominderung und zur Ausrichtung der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf die wirklich wichtigen Problembereiche zu leisten hat. Durch die tiefere, voll gekernte und weitgehend vermessene Vorbohrung wird die Tiefbohrung in diesem Bereich von Kernbohrarbeiten und Bohrlochmessungen entlastet und kann so wirtschaftlicher mit großem Durchmesser und mit größerer Richtungsstabilität durchgeführt werden, was zur Verschleißminderung beim Bohren in den größeren Teufenabschnitten unerlässlich ist. Die Planungsdaten für die Tiefbohrung, insbesondere die Temperatur- und Druckwerte, werden

verbessert, die bohrtechnischen und geowissenschaftlichen Erfahrungen und die Einarbeitung der Arbeitsteams werden zur wirtschaftlichen Durchführung und Risikominderung der Tiefbohrung beitragen.

Der durch die Vorbohrung erkundete und in der Hauptbohrung durch die Ankerrohrtour größtenteils abgedeckte obere Bohrlochabschnitt stellt eine weitere beträchtliche Minderung des Risikos dar. Die Chancen für das erfolgreiche Durchteufen des mittleren Abschnittes und damit für das Erreichen des übertiefen Bereiches über 10 km sind deutlich verbessert. Um den übertiefen Bereich zu erreichen und dabei noch den geowissenschaftlichen Zielen einer hinreichenden Probengewinnung und Bohrlochvermessung zu entsprechen, müssen die in der Tiefbohrung eingesetzten Ausrüstungen für Temperaturen über 200 °C und Drücke über 1 000 bar bei extremen Zug- und Drehbeanspruchungen zum Teil im Dauerwechselfbereich weiterentwickelt werden. Der Schwerpunkt der dafür notwendigen Forschung liegt bei den Untertageantrieben, Kernbohrsystemen, Bohrwerkzeugen und einer geeigneten Bohrspülung. Das Volumen der technischen Forschung ist mit 40 - 50 Mio. DM erheblich und bedeutet einen kräftigen Impuls für die deutsche Tiefbohrtechnik und für die Bohrlochmeßtechnik [auch Bergbau: Zielbohrstange (BF) und Bore Hole Televiewer (WBK)].

2.2 CHUR, C., JÜRGENS, R., OPPELT, J., WOHLGEMUTH, L.: Konzept für das Abteufen der Vorbohrung - Eine Synthese von Rotary- und Bergbautechnik

2.2.1 Aufgaben der Vorbohrung

Das Abteufen der KTB-Vorbohrung dient sowohl der Vorbereitung der KTB-Hauptbohrung, als auch der Beantwortung von Fragestellungen im Gesamtkonzept des Kontinentalen Tiefbohrprogramms. Die Hauptaufgabe besteht somit in der Lieferung einer möglichst großen Zahl bohrtechnischer und geowissenschaftlicher Informationen.

Die Aufgaben der Vorbohrung sind im einzelnen wie folgt:

- Sammlung geowissenschaftlicher Daten:
Bislang wurden in den Großbereichen beider Lokationspunkte jeweils sechs beziehungsweise acht Bohrungen bis maximal 300 m Teufe abgeteuft und geophysikalische Messungen durchgeführt. Die Vorbohrung soll nun an der ausgewählten Lokation in einem deutlich größeren Teufenbereich geowissenschaftliche Daten für die wissenschaftliche Auswertung und eine detailliertere technische Planung der Hauptbohrung liefern.
- Überprüfung des Temperaturprofils:
Eine Bestätigung bzw. Anpassung des bislang angenommenen Temperaturprofils ist für Bohr- und Meßtechnik von ausschlaggebender Bedeutung. Die Vorbohrung soll hierzu durch Messung der Gebirgstemperaturen, auch in größeren Teufen, beitragen.
- Entlastung der Hauptbohrung von Bohrlochmessungen:
Das technische Konzept der Vorbohrung soll die Durchführung des gesamten geplanten Programmes "Bohrlochmessungen und Tests" ermöglichen. Dies führt zu wesentlichen Zeit- und damit Kosteneinsparungen beim Abteufen der Hauptbohrung in diesem Teufenbereich.
- Befreiung der Hauptbohrung von Kernbohrarbeiten:
Die geplante Endteufe der Vorbohrung korrespondiert mit der geplanten Einbauteufe der Ankerrohrtour der Hauptbohrung. Dieser Teufenabschnitt wird in der Hauptbohrung mit einem Bohrlochdurchmesser von 17 1/2" bzw. 14 3/4" gebohrt. Kernbohrarbeiten in diesen großen Durchmessern sind äußerst kostspielig und bringen die Gefahr einer Bohrlochabweichung mit sich. Ein möglichst lotrechtes Bohrloch, vor allem im oberen Bereich, ist für das Gelingen der Hauptbohrung aber von entscheidender Bedeutung.
- Aussagen über die Problemhorizonte im Teufenbereich der Ankerrohrtour der Hauptbohrung:
Für diesen Teufenabschnitt werden von der Vorbohrung Aussagen über mögliche Zuflüsse bzw. Verluste und deren Druckgradienten erwartet. Darüber hinaus können wertvolle Hinweise über das natürliche Richtungsverhalten der Hauptbohrung gewonnen werden.

- Erprobung von Bohrwerkzeugen und Meßgeräten:

In der Vorbohrung können wichtige Erfahrungen hinsichtlich der Bohrbarkeit des anstehenden Gesteins gewonnen werden. Darüberhinaus kann die Eignung von Bohrwerkzeugen in Bezug auf Typ, Besatz, Matrix, etc. erprobt werden. Neue Meßgeräte und Verfahren können getestet und die Auswertbarkeit ihrer Meßergebnisse geprüft werden.

2.2.2 Anforderungen an die Vorbohrung

Zur Erfüllung der genannten Aufgaben leiten sich für die KTB-Vorbohrung folgende Anforderungen ab:

- Die Endteufe soll mindestens 3 000 m betragen:
Dieser Teufenbereich entspricht der geplanten Einbauteufe der Ankerrohrtour in der Hauptbohrung. Das Abteufen der Vorbohrung über die 3 000 m hinaus ist abhängig vom Verlauf der bohrtechnischen Arbeiten und den ausrüstungstechnischen Reserven.
- Der Bohrlochdurchmesser soll nach Möglichkeit 6" (152,4 mm) nicht unterschreiten:
Dieser Durchmesser resultiert aus den Anforderungen zur Durchführung des Bohrlochmeßprogrammes und ist in den Außendurchmessern einiger unverzichtbarer Meßsonden begründet.
- Das auszuwählende Bohrverfahren muß die durchgehende Kerngewinnung bis zur Endteufe ermöglichen.
- Die Durchführung der Vorbohrung muß innerhalb eines vertretbaren Zeit- und Kostenrahmens erfolgen.

2.2.3 Bohrverfahren zum Abteufen der Vorbohrung

Für das Abteufen der KTB-Vorbohrung bestehen zwei alternative Bohrverfahren:

Kernbohren mittels Rotarybohrverfahren oder
Kernbohren mittels Bergbauboehrverfahren.

2.2.3.1 Rotarybohrverfahren

Das Rotaryverfahren wurde entwickelt zum wirtschaftlichen und damit schnellen Abteufen von Bohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen. Zum Einsatz kommen hauptsächlich Vollbohrwerkzeuge. Die Kerngewinnung beschränkt sich auf kohlenwasserstoffhöffige Speichergesteine und stellt beim

Niederbringen der Bohrung einen Sonderfall dar. Der übliche Durchmesserbereich liegt zwischen 24 1/2" und 5 7/8". Die Bohrteufen betragen bis zu 6 000 m. Einzelne Explorationsvorhaben in Österreich, USA, aber auch in der Bundesrepublik Deutschland haben diese Grenzen überschritten.

2.2.3.2 Bergbaubohrverfahren

Die Bergbaubohrverfahren wurden entwickelt für die Exploration nach Erzen und Kohle. Das Bohren von Kernen ist hierbei die Regel.

Dabei kann man unterscheiden:

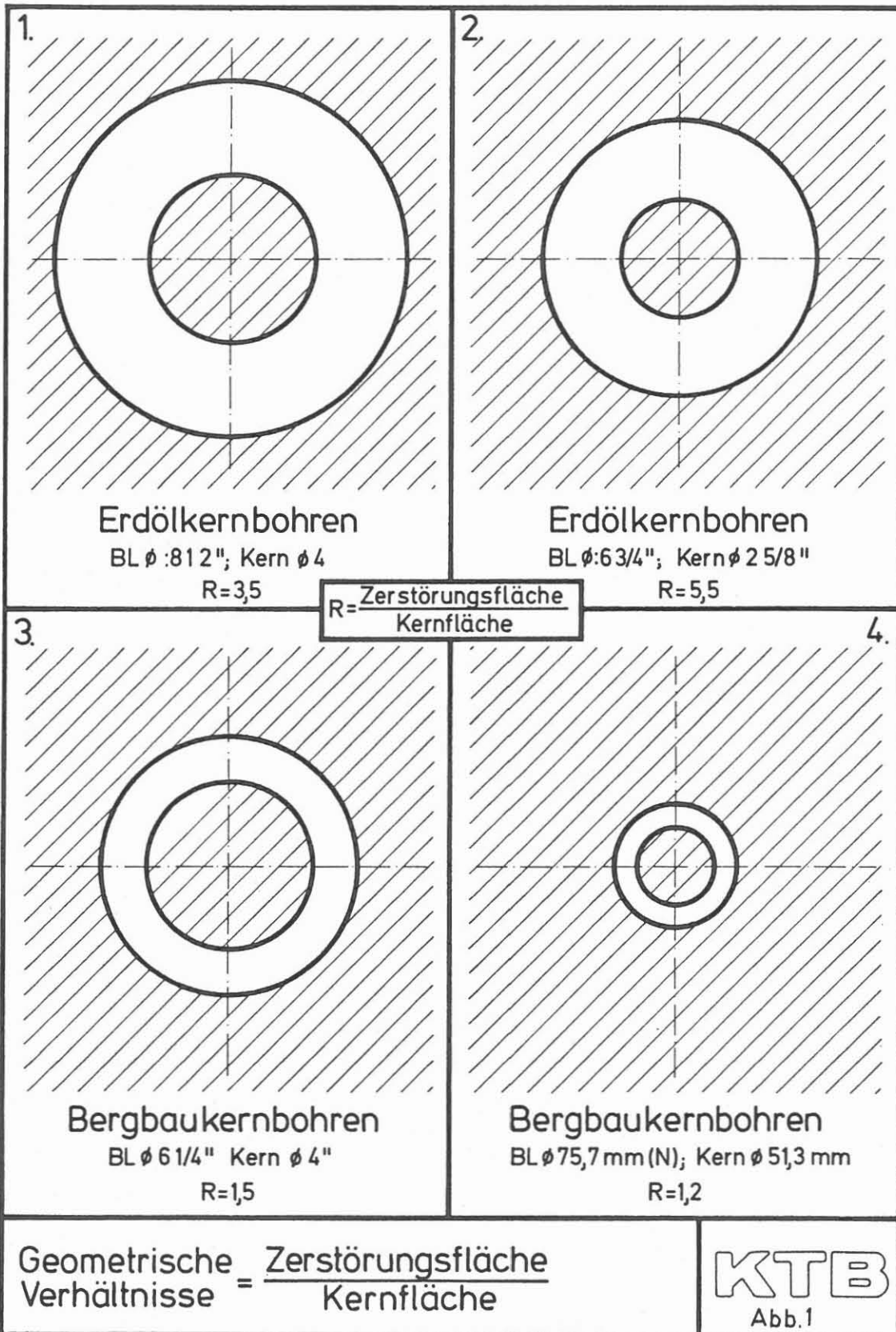
- die Kerngewinnung mit Doppelkernrohr und dünnlippiger Krone (Bohrlochdurchmesser zwischen 30 mm - 140 mm (1,18" - 5,5"); Teufenbereich bis ca. 1 500 m),
- die Kerngewinnung mittels Seilkernausrüstungen (Bohrlochdurchmesser zwischen 48 mm - 159 mm (1,89" - 6,26"); Teufenbereich bis ca. 3 000 m).

Insbesondere in der Seilkernbohrtechnik wurden in jüngster Vergangenheit bemerkenswerte Leistungen (Südafrika: maximale Endteufe 5 422,7 m, Bohrlochdurchmesser 76 mm mit speziellem Bohrgestänge) erzielt.

2.2.3.3 Vergleich der Bohrverfahren

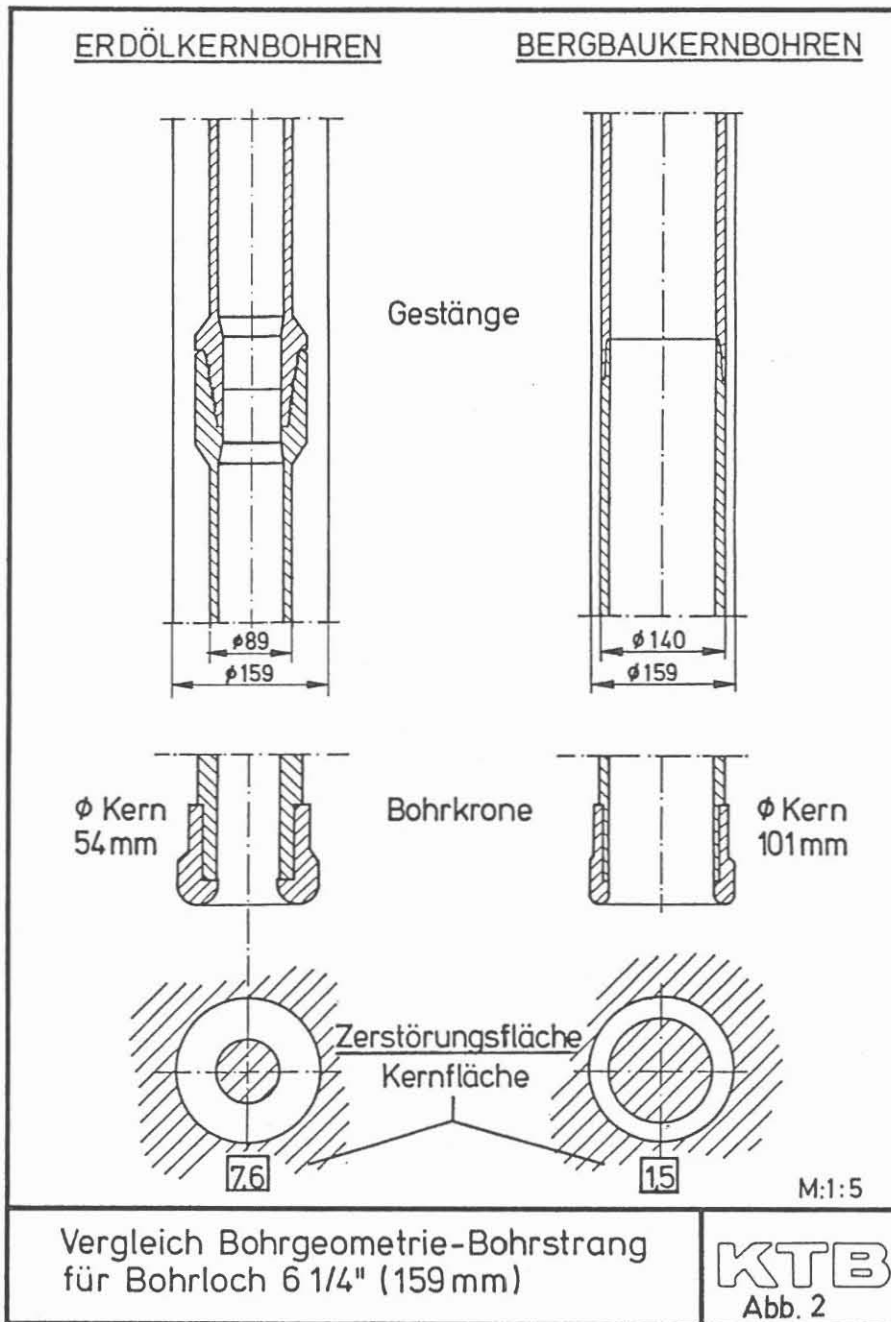
Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Kernbohren der Rotarybohrtechnik und den Bergbaukernbohrverfahren liegen in der Bohrkronengeometrie und im Bohrstrang.

In der Abb. 1 sind die Verhältnisse beim Rotarybohren denen beim Bergbaukernbohren gegenübergestellt.



Bedingt durch die konstruktiven Besonderheiten des Gesamtsystems ist die Gesteinszerstörungsfläche der Bohrkronen bei den Bergbaukernverfahren wesentlich geringer als beim Rotarybohren (Faktor R). Bei vergleichbarem Kerndurchmesser werden deshalb beim Bergbaukernbohren wesentlich bessere Bohrfortschritte erzielt.

Die Abb. 2 zeigt eine schematische Gegenüberstellung des Bohrstranges bei einem Bohrdurchmesser von 6 1/4".



Neben der bereits angesprochenen Kronengeometrie sind die geometrischen Unterschiede des Bohrstranges erkennbar. Der außen glatte Bohrstrang mit geringem Ringraumspiel (rechte Darstellung) ist charakteristisch für eine Seilkernausrüstung. Er besitzt die Fähigkeit zur Eigenstabilisierung bei hohen Drehzahlen (Bohrlochverlauf) und gestattet den Ein- und Ausbau des Kernrohres durch das Innere des Gestänges beim Verbleiben der Gesamtgarnitur auf der Bohrlochsohle. Eine Gegenüberstellung charakteristischer bohrtechnischer Parameter beim Rotarybohren bzw. Bergbaukernbohren zeigt Tab. 1.


Tabelle 1: Bohrtechnische Parameter:

| | Kronenbelastung kN (t) | Umdrehung min ⁻¹ | Spülrate l/min |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Rotarybohren (Ø Bohrloch 8 1/2") | 30 ... 120 (3 ... 12) | 90 ... 270 | 800 ... 1 000 |
| Bergbaukernbohren (Ø Bohrloch 4") | 5 ... 25 (0,5 ... 2,5) | 350 ... 750 | 50 ... 80 |

Während beim Rotarybohren die Kronenbelastung ein wesentliches Element für den Bohrfortschritt darstellt, kommt bei den Bergbaukernverfahren der Umdrehungszahl aufgrund der notwendigen Schnittgeschwindigkeiten für das Bohrwerkzeug die größere Bedeutung zu.

2.2.3.4 Bohrergergebnisse im kristallinen Grundgebirge

In der Abb. 3 sind einige Bohrergergebnisse bei Kernbohrungen im Hartgestein zusammengestellt. Die Daten stammen von den Erkundungsbohrungen der NAGRA, der Bohrung URACH und den Bohrungen im Schwarzwald bzw. der Oberpfalz im Rahmen der KTB-Vorerkundung.

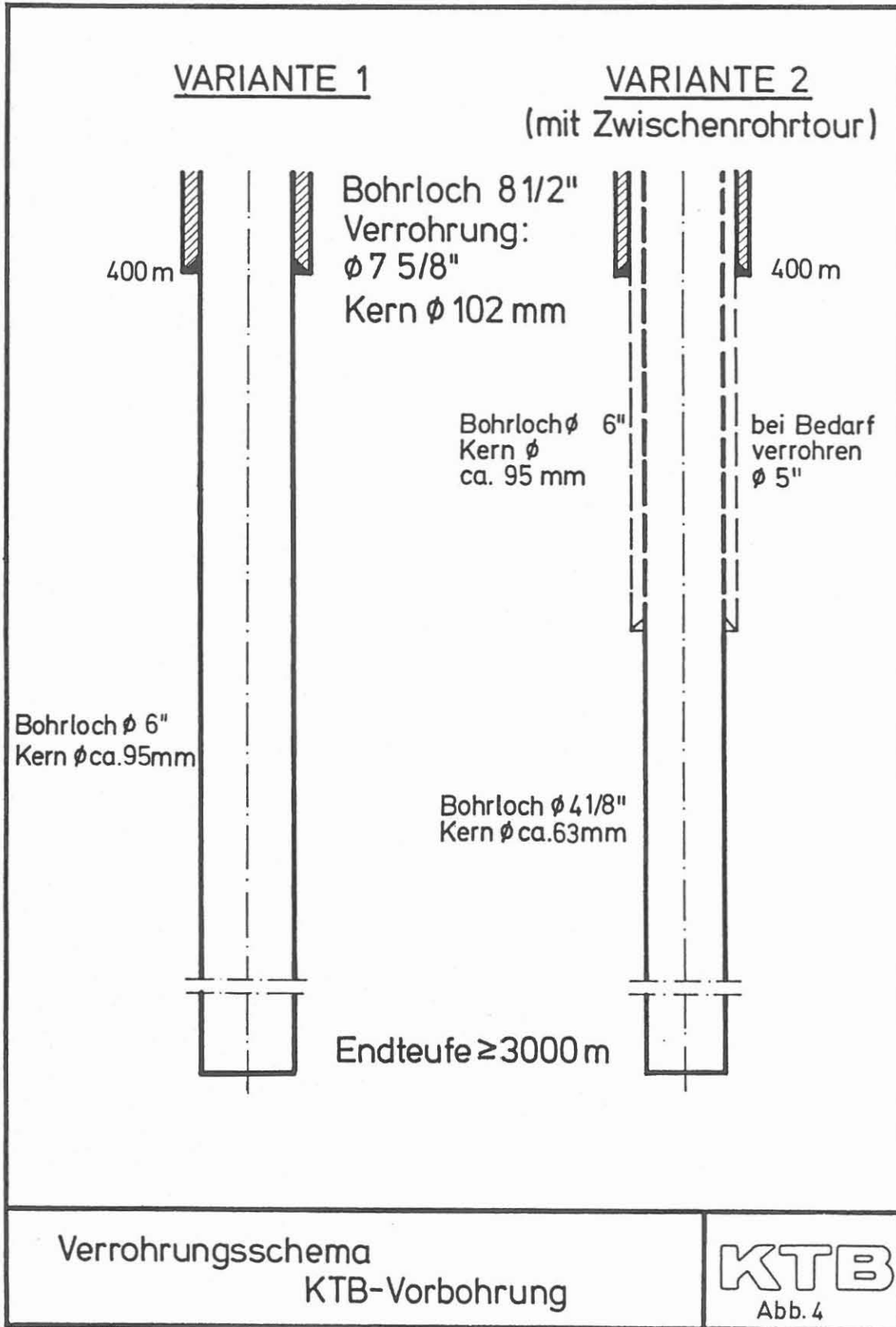
| | Bohrung | Bohrfortschritt [m/h] | Standlänge [m] | Zerstörungsfläche [cm ²] |
|---|---|--------------------------|-------------------|---|
| Erdölbohren | Böttstein | 0,52 | 14,2 | 134 |
| | Weiach | 0,48 | 13,2 | 134 |
| | Urach | 0,58 | 11,1 | 282 |
| Bergbaubohren | Kaisten | 1,11 | 15,1 | 84 |
| | Leuggern | 1,25 | 12,7 | 97 |
| | KTB-Vorerkundg. Schwarzwald / Oberpfalz | 0,98 | 34,5 | 66 |
| Bohrergebnisse Hartgestein (Kernbohren) | | | |  Abb. 3 |

T1015/9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

2.2.4 Technisches Konzept der Vorbohrung

Unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Aufgaben und Anforderungen wurde das Konzept für die Vorbohrung entwickelt (Abb. 4). Die Vorbohrung soll bis ca. 250 m Teufe im Rotarybohrverfahren gekernt werden (Bohr \varnothing 8 1/2") und nach dem Einbau einer Verrohrung (\varnothing 7 5/8") im Seilkernverfahren (Bohr \varnothing möglichst 6") bis Endteufe abgeteuft werden. Der Einbau einer zusätzlichen Rohrtour ist nur vorgesehen, falls unüberwindliche bohrtechnische Schwierigkeiten auftreten. Das technische Konzept der Vorbohrung stellt somit eine Kombination von Rotarytechnik und Bergbaubohrtechnik dar. Wegen der angestrebten Teufe ist es unter Beibehaltung einer notwendigen Zugreserve erforderlich, eine Rotarybohranlage einzusetzen.



Aufgrund der beschriebenen Vorteile beim Kernen und den damit verbundenen Kosteneinsparungen ist es sinnvoll, die Bergbaubohrtechnik anzuwenden und das hierzu benötigte Antriebs- und Handlingequipment in die Rotaryanlage zu integrieren. Auf diese Weise können die geowissenschaftlichen und technischen Ziele kostengünstig erreicht werden.

2.2.5 Literatur

EASTMAN CHRISTENSEN GmbH (1986): Forschungsbericht AAK 11 2 - 609267
(Zwischenbericht).

2.3 SPERBER, A., CHUR, C.: Konzept der Hauptbohrung - 'Bohrprogramm und Verrohrungsschema'

2.3.1 Einleitung

Trotz weltweit hoher Bohrleistungen liegen nur wenige Erfahrungswerte über das Abteufen von Bohrungen im Kristallin mit größeren Bohrlochdurchmessern bis in größere Teufen vor. Ausnahmen hierzu bilden lediglich die in der nachfolgenden Tabelle (Abb. 1) genannten Bohrungen, während ansonsten im Kristallin vorwiegend mit Hilfe der Schürfbohrtechnik in entsprechend kleinen Durchmesserbereichen gearbeitet wird, so z. B. in Südafrika oder Kanada zur Tiefenerzprospektion. Demgegenüber werden Bohrungen auf Kohlenwasserstoffe in der Regel im Sedimentgestein niedergebracht und aus wirtschaftlichen Gründen größtenteils mit Vollbohrwerkzeugen geteuft; lediglich in Trägerbereichen werden Kerne erbohrt.

Gänzlich anders ist hingegen bekanntlich die Zielsetzung des geplanten Tiefbohrprojektes. Aus diesen unterschiedlichen Zielsetzungen (Kohlenwasserstoffsuche einerseits, geowissenschaftliche Erkundung der nichtsedimentären Erdkruste andererseits) ergeben sich zwangsläufig andere Anforderungen an die Planung und Durchführung dieser Tiefstbohrung, denen insbesondere auch durch die Auswahl eines entsprechenden Bohr- und Verrohrungsprogramms Rechnung getragen werden muß.

| LAND | BOHRUNG / FELD | ENDTEUFE (m) | ERBOHRTES KRISTALLIN (m) |
|--------------------|------------------------|--------------|--------------------------|
| CHINA | LIAOHE | 2 600 | 500 |
| DEUTSCHLAND | URACH 3 | 3 488 | 1 880 |
| ENGLAND | CORNWALL (3) | 2 500 v. T. | 2 500 v. T. |
| FRANKREICH | GPF (2) | 1 400 | 1 400 |
| ITALIEN | LARDERELLO FELD | 3 970 | 150 |
| LIBYEN | AMAL | 2 900 | 200 |
| SOWJETUNION | KOLA SG 3 | 12 600 | 12 600 |
| SCHWEDEN | SILJAN RING (GRAVBERG) | (5 000) | (4 900) |
| SCHWEIZ | NAGRA (5) | 2 480 | max. 1 400 |
| VEREINIGTE STAATEN | LOS ALAMOS (4) | 3 400 v. T. | 2 300 v. T. |
| | SALTON SEA (SSSDP) | 3 200 | ? |

Erbohrtes Kristallin

[SPERBER]

KTB
Abb. 1

2.3.2 Bohr- und Verrohrungsprogramm

2.3.2.1 Bohr- und Verrohrungsschema bei KW-Explorationsbohrungen

Das etappenweise Einbringen von Verrohrungen dient in der Regel dazu,

- die Bohrlochabsperrung installieren zu können
- bereits erbohrte Bohrlochabschnitte gegen Nachfall, Zufluß und Verluste zu sichern
- Schichten unterschiedlicher Porendruckgradienten voneinander zu trennen
- und den Steigrohrproduktionsstrang aufzunehmen.

Die Ringräume zwischen Bohrlochwand und Rohr bzw. zwischen zwei Rohrtouren werden zwecks Abdichtung über die gesamte Länge oder nur über einen Teilabschnitt zementiert. Da beim Durchteufen von Sedimentprofilen sowohl drückende Formationen wie quellfähige Tonschichten oder Salinarstrecken als auch poröse, permeable Horizonte, wie Sandsteine, durchteuft werden, muß ein ausreichender Zwischenraum zwischen Bohrlochwand und Verrohrung gewährleistet sein, um mit Hilfe der Zementation eine gute Abdichtung zu erzielen. Dies bedingt, daß zum Beispiel für einen mit 9 5/8" Casing zu verrohrenden Bohrlochabschnitt mit 12 1/4"-Werkzeug vorgebohrt wird. Damit wird bei kaliberhaltigem Bohrloch ein Ringraumpalt zwischen Bohrlochwand und Verrohrung von ca. 33 mm erreicht.

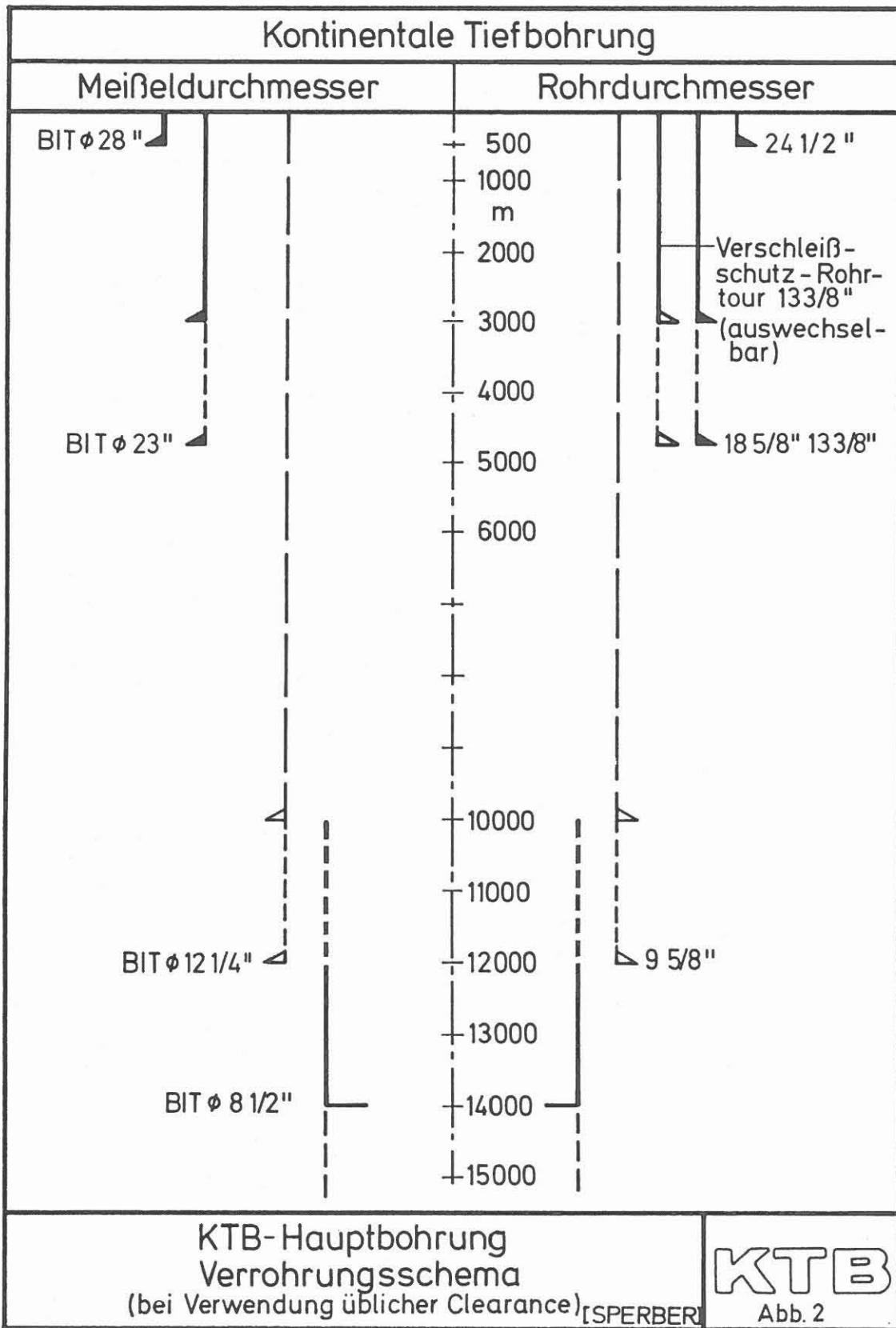
Bei durchgehender Verwendung der in der Kohlenwasserstoff-Exploration üblichen Werkzeug- und Rohrdurchmesserkombinationen würde sich für die Kontinentale Tiefbohrung ein Bohr- und Verrohrungsprogramm ergeben wie es Abb. 2 wiedergibt.

Man sieht, daß in dem gezeigten Fall mit 28" Bohrdurchmesser begonnen werden muß, um die Endteufe mit einem Bohrlochdurchmesser von ca. 8 1/2" zu erreichen.

Dieser Enddurchmesser wird von uns deshalb angestrebt, weil in diesem Durchmesserbereich

- eine große Palette bewährter Vollbohrwerkzeuge zur Verfügung steht,
- gute Bohrfortschritte bei guten Werkzeugstandzeiten erreichbar sind,
- mit gleichem Außendurchmesser gekernt werden kann und
- ausreichend Reserven zur Behebung eventueller Probleme, die möglicherweise das Einbringen einer weiteren Verrohrung erfordern,

geboten sind.

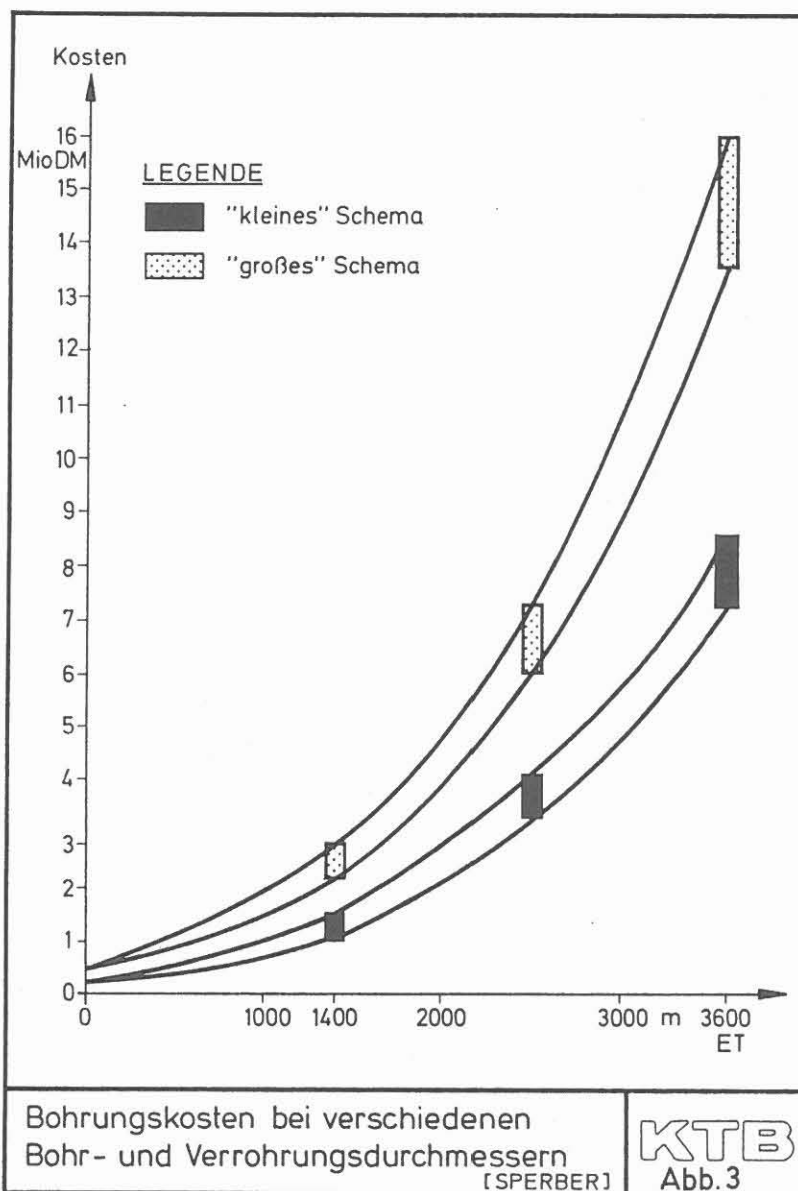


2.3.2.2 Einfluß des Bohrdurchmessers auf die Bohrungskosten

Wie leicht einzusehen ist, steigen die Bohrungskosten mit wachsendem Bohr- und Verrohrungsdurchmesser. Dies ergibt sich aus den höheren Kosten für

- die erforderliche Energie für das größere, zu zerstörende Gesteinsvolumen
- Bohrwerkzeuge,
- Spülung und Entsorgung,
- Verrohrung und Zementation.

Außerdem steigt in der Regel der Bohrfortschritt, je kleiner der Werkzeugdurchmesser ist. Daraus resultiert die in Abb. 3 gezeigte Entwicklung der Bohrungskosten in Abhängigkeit von Durchmesser und Teufe.



Andererseits muß auch beachtet werden, daß allgemein die Standzeit der Bohrwerkzeuge mit kleinerem Durchmesser geringer ist.

Dies gilt insbesondere für Rollenmeißel, bei denen die Lager der Meißelrollen, insbesondere bei kleinen Bohrwerkzeugen, die Standzeiten begrenzen. Der Bohrdurchmesser kann, abgesehen von den geowissenschaftlichen Anforderungen, allein schon deshalb nicht beliebig klein gewählt werden; außerdem sind auch die Verfügbarkeit von Bohrwerkzeugen, Untertageantrieben, usw., als auch evtl. technische Probleme bei zu geringen Bohrlochdurchmessern zu berücksichtigen.

So gilt es, diese zum Teil konträren Aspekte zu einem für die Kontinentale Tiefbohrung technisch und wirtschaftlich optimierten Bohr- und Verrohrungsprogramm zu verknüpfen.

2.3.2.3 Bohr- und Verrohrungsschema der Kontinentalen Tiefbohrung

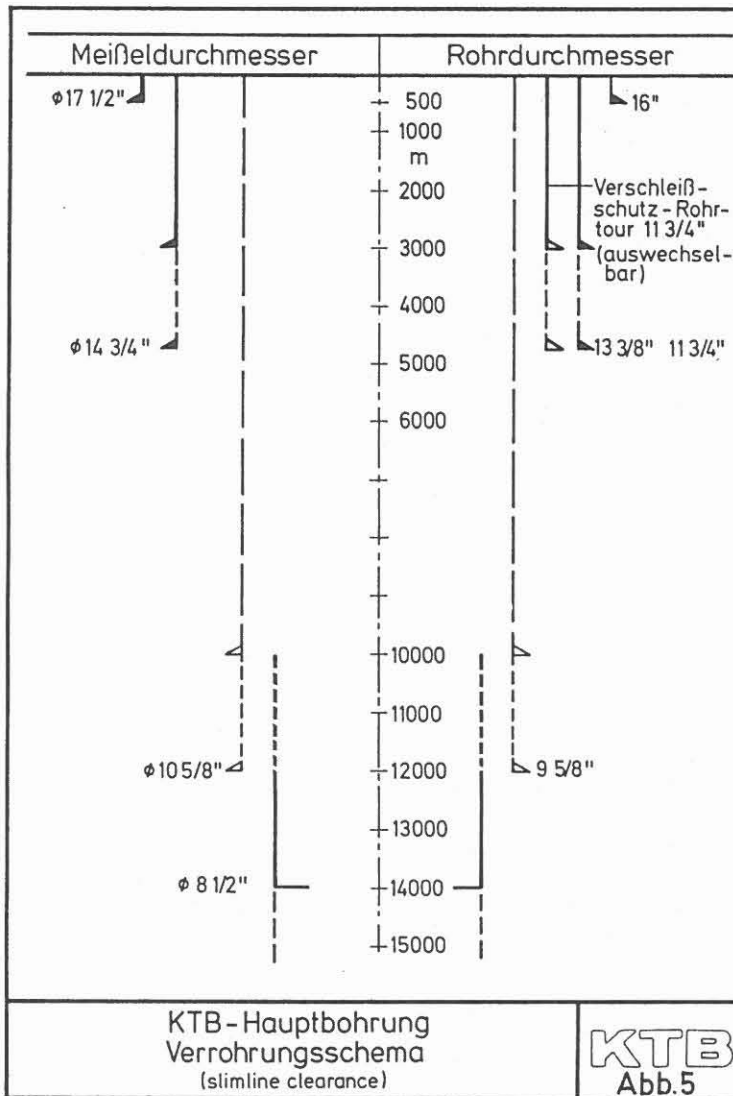
Neben den eben genannten Aspekten, sind auch die Unterschiede zwischen einer auf Kohlenwasserstofferschließung gerichteten Sedimentbohrung und der ausschließlich auf wissenschaftliche Ziele ausgerichteten Tiefbohrung im kristallinen Gebirge zu berücksichtigen. Die wichtigsten Unterschiede sind nachfolgend tabellarisch (Abb. 4) zusammen mit den daraus für das KTB-Projekt zu ziehenden Schlußfolgerungen aufgelistet.

| UNTERSCHIEDE | SCHLUSSFOLGERUNGEN |
|--|--|
| - GESTEINSBEDINGT GERINGE BOHRFORTSCHRITTE UND KURZE WERKZEUGSTANDZEITEN | - VIELE ROUNDTRIPS, DAMIT STARKER CASING-VERSCHLEISS ZU ERWARTEN, DESHALB SCHUTZ-ROHRTOUR ERFORDERLICH |
| - SEHR NIEDRIGE POROSITÄT UND PERMEABILITÄT, KEIN FILTERKUCHENAUFBAU, KEINE GASFÜHRUNG | - ENGERE CLEARANCE MÖGLICH, DADURCH BEI GLEICHEM ENDDURCHMESSER KLEINERER STARTDURCHMESSER |
| - KEINE PLASTISCHEN FORMATIONEN, KEIN „ZUWACHSEN“ DES BOHRLOCHES | |
| - HÖHERER FORMATIONSBRECHDRUCKGRADIENT | - WENIGER VERROHRUNGEN NOTWENDIG, GERINGERE ABSETZTEUFE AUSREICHEND |

UNTERSCHIEDE KRISTALLINBOHRUNG - SEDIMENTBOHRUNG
[SPERBER]

KTB
Abb.4

Weiterhin galt es zu versuchen, so weit wie möglich bei allen Bohrwerkzeugen - insbesondere aber beim Rollenmeißel - weltweit eingesetzte Standardgrößen auszuwählen, da bei diesen Werkzeugen erfahrungsgemäß die höchste Zuverlässigkeit und beste Performance erzielt werden kann, der Nachschub problemlos ist und für diese Standarddurchmesser auch eine breite Palette von Hilfswerkzeugen wie zum Beispiel Fanggeräte usw. zur Verfügung steht. Demgegenüber ist die Anfertigung von "maßgeschneiderten" Futterrohren bzw. Futterrohrverbindern relativ problemlos möglich. Allerdings sollte auch schon aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus hier ebenfalls versucht werden, zumindest möglichst nahe am international üblichen Standard zu bleiben. Die Berücksichtigung dieser Vorgaben führte zu dem in Abbildung 5 dargestellten Bohr- und Verrohrungsschema für das Kontinentale Tiefbohrprojekt.



Der Vergleich mit dem bereits vorher gezeigten Schema unter Verwendung üblicher Clearance-Verhältnisse zeigt, daß durch Reduzieren der Clearance-Verhältnisse mit einem deutlich geringeren Bohrlochdurchmesser begonnen werden kann. So kann dadurch z. B. das zu zerstörende Gesteinsvolumen nahezu halbiert werden, wie aus Abb. 6 ersichtlich ist, in der die einzelnen Teufenabschnitte gegenübergestellt wurden.

| Vergleich der zu zerstörenden Gesteinsvolumina für die verschiedenen Bohr- und Verrohrungsschemata | | | | |
|---|----------------------|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| a) bei üblicher Clearance | von Teufe | bis Teufe | b) bei slimline Clearance | Anteil (a) = 100% |
| 28" = 199m ³ | 0 m | - 500 m | 17 1/2" = 78 m ³ | = 39% |
| 23" = 938 m ³ | 500 m | - 4000 m | 14 3/4" = 386 m ³ | = 41% |
| 12 1/4" = 456 m ³ | 4000 m | - 10000 m | 10 5/8" = 343 m ³ | 75% |
| <u>8 1/2" = 146 m³</u> | 10000 m | - 14000 m | <u>8 1/2" = 146 m³</u> | <u>100%</u> |
| <u>1739 m³</u> | <u>Gesamtvolumen</u> | | <u>953 m³</u> | = <u>55%</u> |
| 1593 m ³ | davon bis 10000 m | | 807 m ³ | = 51% |

**KTB-Hauptbohrung
Bohr- und Verrohrungsprogramm**

[SPERBER]

KTB
Abb. 6

T 1065/10.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Nachfolgend einige Bemerkungen zu der vorgesehenen Verschleißrohrfahrt:

Neben dem Schutz der Ankerrohrtour vor mechanischem Abrieb durch das Bohrgestänge bei Bohrarbeiten und Roundtrips bietet die unzementierte Verschleißrohrfahrt noch die Möglichkeit, auch bei ausgebautem Bohrstrang bis zur Rohrschuhteufe zu zirkulieren. Dies erhöht die Bohrlochsicherheit sowohl bei Roundtrips als auch während der zu erwartenden langen Meßphasen, in denen sich kein Gestänge im Bohrloch befindet.

Neben dem geringen Bohrdurchmesser zu Beginn erfüllt dieses Verrohrungsschema die Forderung nach größtmöglicher Flexibilität für evtl. auftretende technische Schwierigkeiten und geologische Unvorhersehbarkeiten. Die verfügbaren Reserven, sowie die dazugehörigen maximalen Bohrlochdurchmesser sind in Abb. 7 dargestellt.

Prinzipiell stehen noch weitere Möglichkeiten zur Verfügung, allerdings unter Verzicht auf die auswechselbare Verschleißrohrtour. So könnte z. B. mit 12 1/4" Werkzeugen aus der 13 3/8" Ankerrohrtour herausgebohrt werden, bis die Wandstärkenminderung durch Verschleiß den festen Einbau der 11 3/4" Rohrtour erfordert. Dieses Vorgehen könnte entsprechend weiter fortgesetzt werden, hätte aber den Nachteil, daß wegen des zur Zeit kaum abschätzbaren Rohrtourverschleißverhaltens ein Erreichen des angestrebten Endteufenbereiches von ca. 12 bis 14 km mit möglichst großem Durchmesser fraglich erscheint.

| <u>bei zusätzlichem</u> <u>Verrohren mit</u> <u>(Rohr-OD)</u> | <u>ist Erreichen der ET</u> <u>möglich mit</u> <u>(Meißel-OD)</u> |
|---|---|
| 9 5/8" - 53,5 lb/ft | ca. 8 1/2" |
| 7 5/8" - 39,0 lb/ft | ca. 6 1/2" |
| 5 1/2" - 26,0 lb/ft | ca. 4 1/2" |

Reservedimensionen des KTB-Verrohrungsschemas

[SPERBER]

KTB
Abb.7

Das hier vorgeschlagene Bohr- und Verrohrungsschema unterscheidet sich in einem Punkt von der sogenannten "Advanced Open Borehole Method" wie sie z. B. für die Bohrung Kola SG 3 vorgeschlagen und bislang durchgeführt worden ist, ohne jedoch deren wesentliche Vorzüge zu verlieren:

Die "Advanced Open Borehole Method" sieht vor, aus einer Rohrtour heraus mit einem kleineren als maximal möglichen Durchmesser zu bohren und lediglich bei bohrtechnischen oder geologischen Schwierigkeiten, die einen Rohreinbau erforderlich machen, das Bohrloch bis zu dieser Teufe auf den notwendigen Durchmesser zu erweitern.

Die Vorzüge dieser Bohrmethode sind:

- vereinfachtes Bohrlochdesign,
- Bohrwerkzeuge und Bohrstrangteile können auf wenige Größen standardisiert werden,
- Schutzmöglichkeit der Ankerrohrtour durch wiedergewinnbare Verschleißrohrfahrten,
- jederzeit Zirkulationsmöglichkeit bis Rohrschuhteufe über Casing-Ringraum.

Die Bohrung Kola SG-3 wurde diesem Prinzip entsprechend abgeteuft, dabei wurde bei 2 000 m eine Ankerrohrtour mit 325 mm Außendurchmesser (OD) abgesetzt und zementiert, in diese Rohrtour ein weiterer Rohrstrang mit 245 mm OD eingehängt und aus dieser heraus mit Bohrwerkzeugen von 214 mm OD weitergebohrt.

Nachteil bei dieser Bohrmethode ist jedoch, daß bei erforderlich werdendem Rohreinbau das Bohrloch in einem zeit- und kostenaufwendigen separaten Arbeitsgang erweitert werden muß, abgesehen von den technischen Problemen, die auftreten können, wenn z. B. das Bohrloch durch Nachfall mit der Zeit eine ovale Form annimmt. So ergaben Kalibermessungen der Bohrung Kola SG-3 in einigen Bereichen einachsige Auskesselungen bis nahezu dem Dreifachen des Bohrdurchmessers.

Da Nachfall häufig zum Festwerden des Bohrstrangs führt, stellt dies eine Gefahr für das Bohrloch dar, die in der Regel nur durch Einbau von Rohren beseitigt werden kann. Bezogen auf die Kontinentale Tiefbohrung bedeutet das, daß mit dem Einbau der 9 5/8" Rohrtour gerechnet werden muß.

Diese Überlegungen führten dazu, das Prinzip der "Advanced Open Borehole Method" etwas zu modifizieren und eine Durchmesserkombination zu wählen, die jeweils einen sofortigen Rohreinbau zuläßt.

Als weiterer Aspekt für die Kontinentale Tiefbohrung ist der angestrebte Anteil an Kernmärschen zu berücksichtigen. Aus den bereits erwähnten Gründen sollte auf ein Kern mit kleinerem Durchmesser und anschließendem Erweitern der Kernstrecke verzichtet werden, andererseits aber soll mit einem wirtschaftlich vertretbaren Kernbohrwerkzeugdurchmesser gearbeitet werden können.

Unter Berücksichtigung des KTB-Gesamtkonzeptes (durchgehend gekernte Vorbohrung), kann voraussichtlich bis zur Ankerrohrteufe auf Kernbohrarbeiten in der Hauptbohrung verzichtet werden, so daß lediglich in den Durchmesserbereichen 10 5/8" und 8 1/2" gekernt werden muß. Für beide Durchmesserbereiche stehen bereits erprobte, robuste und wirtschaftliche Diamant- und Rollenkerndrillwerkzeuge zur Verfügung, die bereits bei Hartgesteinsbohrungen in England, Italien und USA eingesetzt wurden.

2.3.3 Schlußbetrachtung

Das hier vorgestellte Bohr- und Verrohrungskonzept basiert zur Zeit naturgemäß noch auf vielen Annahmen, die durch die Vorbohrung bestätigt oder korrigiert werden müssen.

Inwieweit dieses Konzept exakt in die Praxis umgesetzt werden kann, ist daher zur Zeit auch noch nicht vorhersehbar. Das Verrohrungsschema bietet jedoch auch für den Fall, daß Anpassungen erforderlich werden sollten, genügend Flexibilität und Reserven, um das gesteckte Ziel der Kontinentalen Tiefbohrung erreichen zu können.

2.3.4 Literatur

KOSLOWSKI, E. A. (1984): Kola übertief. - Welt der Wissenschaft, März 1984.

2.4 **ENGESER, B., UJMA, K.H. : Spülungssysteme in der Vor- und Hauptbohrung**

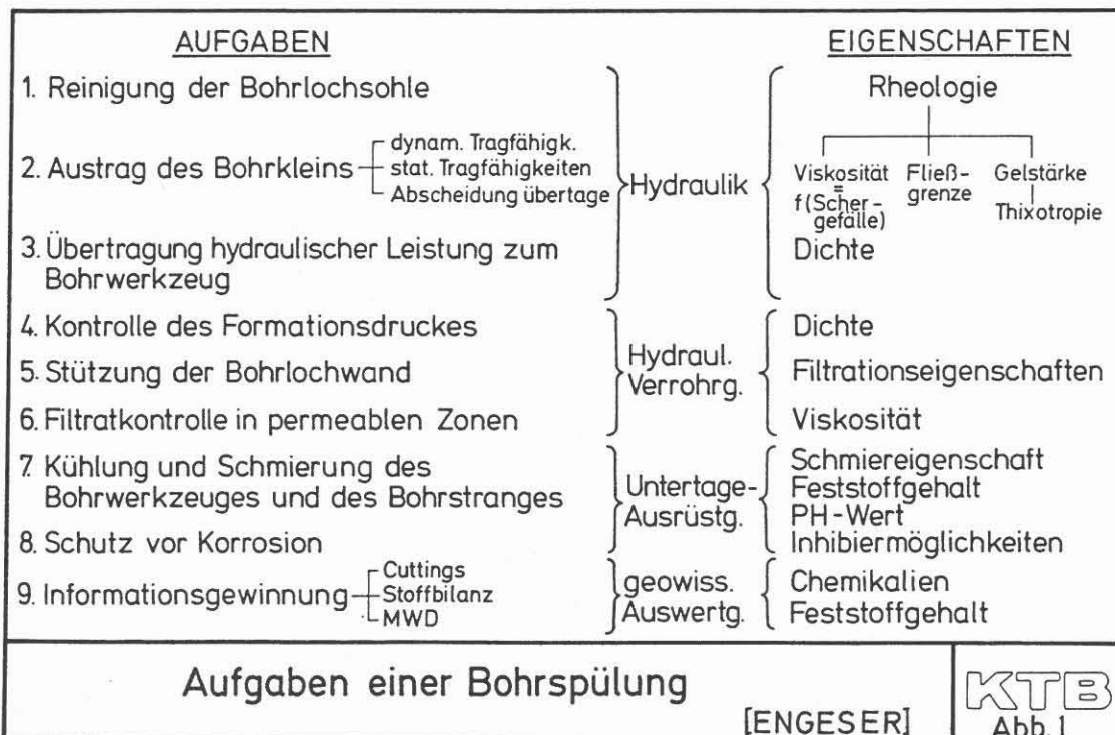
2.4.1 **Einleitung**

Während Bohrungen zum Erschließen von Erdöl- und Erdgaslagerstätten durch die Zielsetzung, den Trägerhorizont möglichst sicher und kostengünstig zu erreichen, charakterisiert sind, steht bei wissenschaftlichen Forschungsbohrungen die umfassende Informationsgewinnung über das durchteufte Gebirge im Vordergrund. Die Spülung als Austragsmedium des erbohrten Gesteinsmaterials sowie der ins Bohrloch eintretenden Fluide und Gase ist neben Bohrlochmessungen, Kernentnahmen und Zuflußtesten ein wichtiger Informationsträger. Die Auswertung dieser Informationen und der Vorstoß in extreme Teufenbereiche hat besondere Anforderungen an die Spülungskonzeption zur Folge.

Ausgehend von den besonderen bohrtechnischen und geologischen Bedingungen sollen Spülungssysteme für Vor- und Hauptbohrung vorgestellt und Entwicklungsschwerpunkte aufgezeigt werden.

2.4.2 **Aufgaben einer Bohrspülung**

Unabhängig von der eingesetzten Technik muß eine Bohrspülung eine Reihe von grundlegenden Funktionen erfüllen, um das bohrtechnische Ziel sicher zu erreichen. Je nach geologischen Bedingungen, Zielsetzung und angewandter Technik haben die einzelnen Funktionen unterschiedliche Priorität (Abb. 1).



Prinzipielle Aufgabe einer Bohrspülung ist der effiziente Austrag des Bohrkleins, der hauptsächlich von den rheologischen Eigenschaften abhängt. Nicht weniger wichtig sind auch die unter dem Begriff "hydraulische Verrohrung" zusammengefaßten Aufgaben, wie die Kontrolle des Formationsdruckes und die Stützung der Bohrlochwand. Mit zunehmender Teufe gewinnen die Fragen der Kühlung und Schmierung sowie des Korrosionsschutzes immer mehr an Bedeutung. Nicht zuletzt nimmt die Spülung als Informationsträger, wie bereits einleitend angesprochen, in einer Forschungsbohrung eine zentrale Rolle ein.

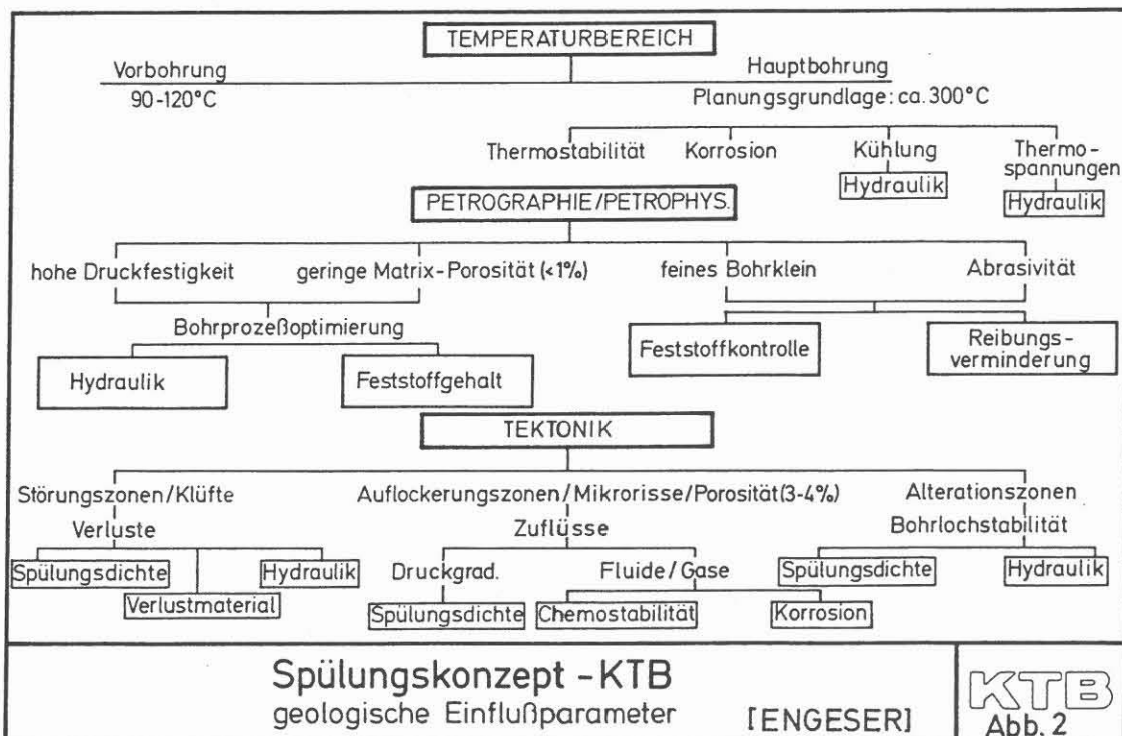
Die Stabilität eines Spülungssystems bei den im Bohrloch vorherrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen ist eine wichtige Voraussetzung für die Erfüllung dieser Aufgaben. Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen ist bei der Planung einer Spülungskonzeption auch auf Umweltverträglichkeit und Kostengünstigkeit zu achten.

Die angemessene Berücksichtigung der teilweise gegensätzlichen Anforderungen stellt ein Optimierungsproblem dar, das für jede Bohrung individuell gelöst werden muß und unterschiedliche Spülungskonzepte für Vor- und Hauptbohrung zur Folge hat.

2.4.3 Spülungskonzept - Vorbohrung

2.4.3.1 Spezielle Anforderungen

Zielsetzung und Bohrtechnik der Vorbohrung wurden bereits im technischen Konzept des KTB erläutert. Besondere Planungskriterien aufgrund der geologischen Einflußparameter ergeben sich durch (Abb. 2):



- Die petrophysikalischen Eigenschaften der kristallinen Gesteine mit besonderen Anforderungen an die:
 - Bohrprozeßoptimierung (Hydraulik),
 - Feststoffkontrolle (feines Bohrklein),
 - Reibungsverminderung (hohe Abrasivität).

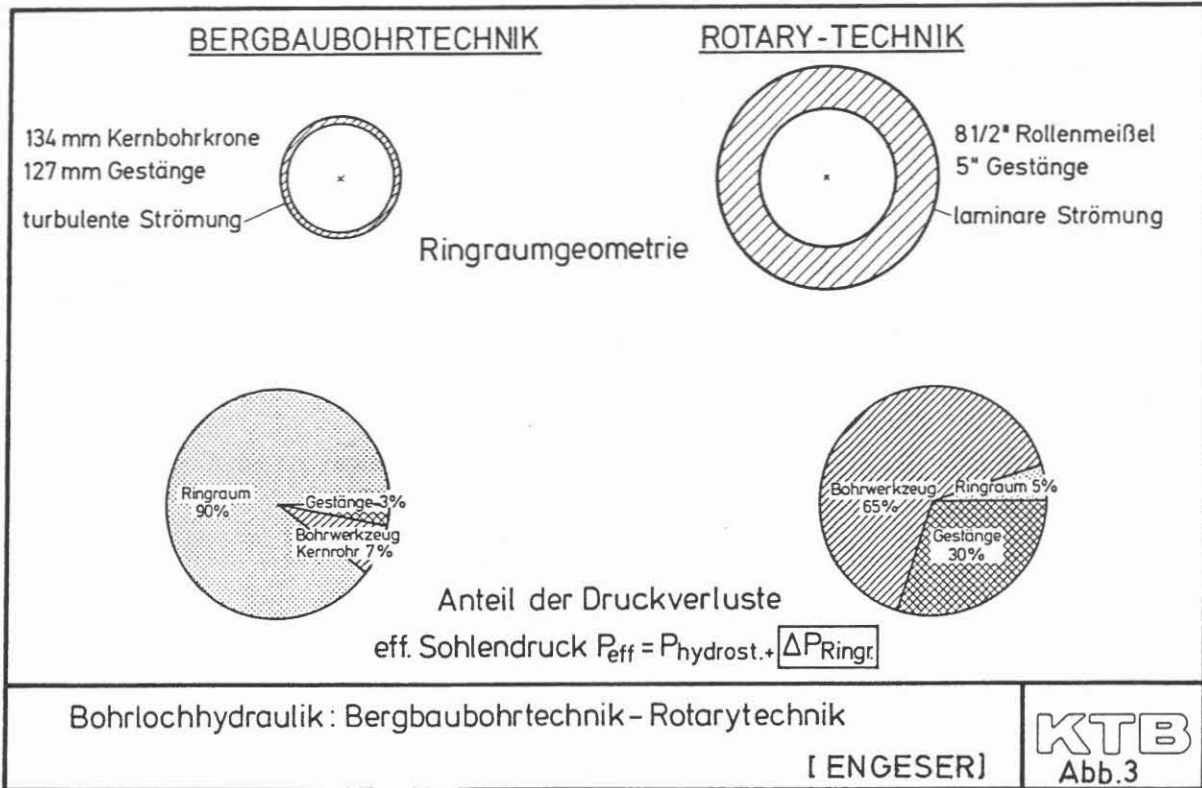
- Kluft oder Störungszonen als potentielle Verlustzonen. Von Bedeutung sind:
 - Spüldichte,
 - Bohrlochhydraulik.

- Alterationszonen oder mylonitisierte Bereiche als Problemzonen für die Bohrlochstabilität mit Auswirkungen auf Spüldichte und Hydraulik.

Neben den geologischen Einflußparametern sind die spezifischen Anforderungen durch den voraussichtlichen Einsatz der Bergbaubohrtechnik zu berücksichtigen. Besonders betroffen sind hierbei die Fragen der Bohrlochhydraulik und der Reibungsverminderung.

2.4.3.2 Bohrlochhydraulik

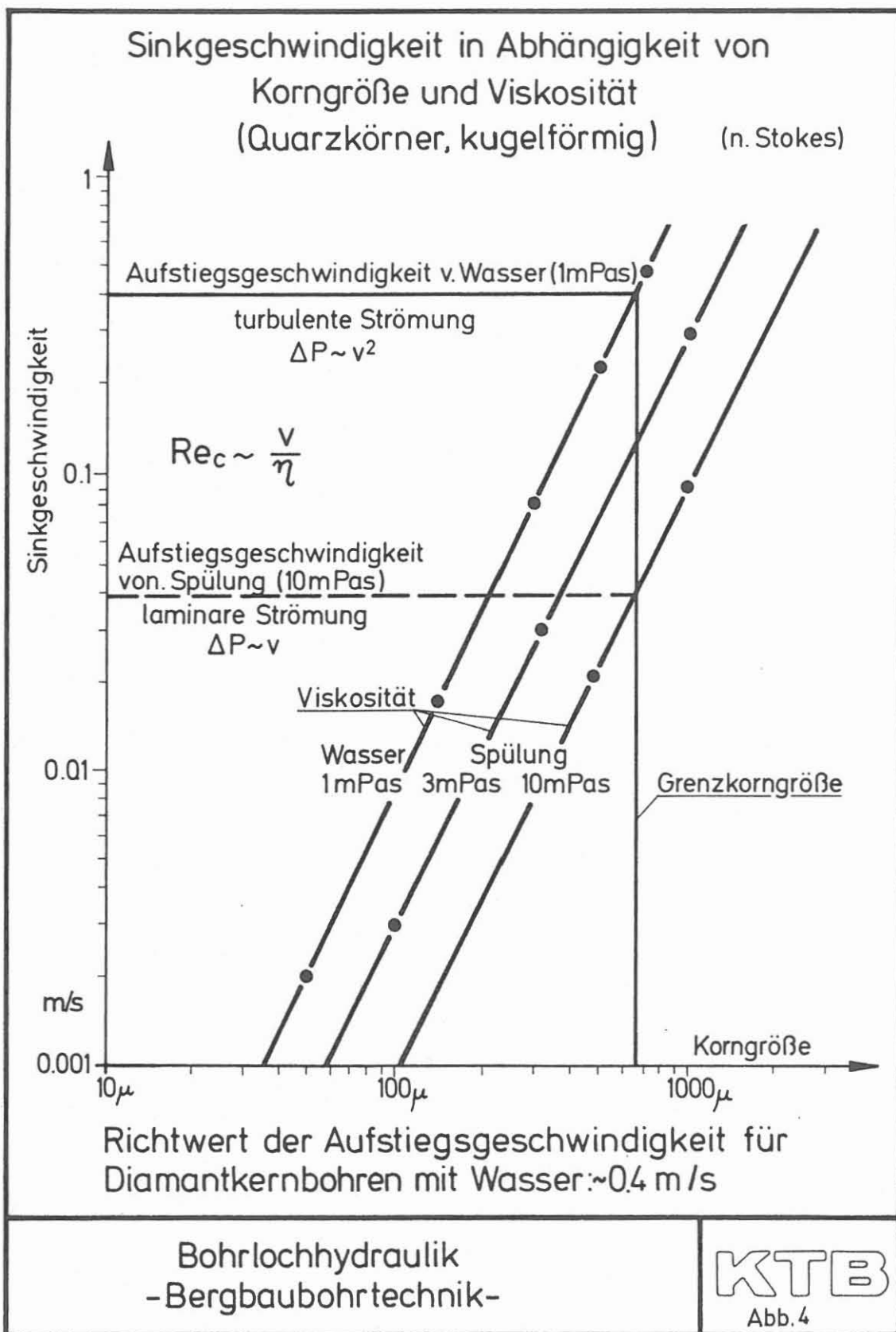
Durch die engen Ringraum-Querschnitte beträgt der Anteil der Ringraumdruckverluste am Gesamtdruckverlust in der Bergbaubohrtechnik 90 % und mehr, während es beim Rotarybohren kaum mehr als 5 % sind. Die Ringraumdruckverluste machen sich als zusätzlicher Differenzdruck auf der Bohrlochsohle bemerkbar. Dies kann in permeablem oder klüftigem Gebirge zu Spüldichteverlusten führen und beim Überschreiten des Fracgradienten sogar ein hydraulisches Aufbrechen des Gebirges hervorrufen (Abb. 3).



T1034 / 9.86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Für einen effektiven Bohrkleinaustrag ist, abhängig von der Sinkgeschwindigkeit des Bohrkleins, eine Mindestaufstiegsgeschwindigkeit der Spülung im Ringraum notwendig, die bei gegebenem Ringraumquerschnitt die Mindestzirkulationsrate bestimmt (Abb. 4). Besonderen Einfluß auf die Sinkgeschwindigkeit hat neben der Korngröße und der Dichte des Bohrkleins die Viskosität der Spülung. Bei Einsatz eines viskosen Spülmediums ist bei gleicher Korngröße eine deutlich verringerte Aufstiegsgeschwindigkeit im Vergleich zu Wasser notwendig. Die geringere Mindestzirkulationsrate und die Änderung der Strömungsverhältnisse von turbulent auf laminar macht letztlich auch eine Verringerung der Ringraumdruckverluste möglich.



2.4.3.3 Spülungssysteme

2.4.3.3.1 Wasser

Unter den entsprechenden Voraussetzungen ist Wasser in der Bergbaubohrtechnik ein häufig eingesetztes Spülmedium mit geringer Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Auswertung.

Hauptnachteil von reinem Wasser sind die schlechten Austragsfähigkeiten, die, wie aufgezeigt, höhere Zirkulationsraten erforderlich machen. Die daraus resultierenden überproportionalen Ringraumdruckverluste können in Verbindung mit der fehlenden Filtratkontrolle bereits in gering permeablem Gebirge Spülungsverlustprobleme verursachen.

Besonders deutlich zeigen sich diese Probleme in den Erfahrungen der mit Bergbaubohrtechnik und reinem Wasser als Spülmedium abgeteufte Bohrungen der NAGRA (Abb. 5). In der Bohrung Kaisten kam es sofort nach der Umstellung des Spülungssystems auf deionisiertes Wasser zu schleichenden Spülungsverlusten, die sich bis zum Erreichen der Endteufe auf kumulativ fast $4\ 000\ \text{m}^3$ summierten. Zwei Fangarbeiten und ständige Hydraulik-Probleme waren die Folge. Die hohen Verluste lassen auch aus geowissenschaftlicher Sicht die Zweckmäßigkeit von reinem Wasser fraglich erscheinen, da sehr große zusätzliche Fördervolumen zur Bohrlochreinigung notwendig werden, um repräsentative Proben von Formationsflüssigkeiten zu gewinnen. Nach den Empfehlungen der NAGRA würde das zur Bohrlochreinigung zusätzlich notwendige Fördervolumen, setzt man die durchschnittlichen Verluste der Bohrung Kaisten ein, mindestens $16\ \text{m}^3/\text{m}$ Teststrecke betragen.

Reines Wasser ist daher nur bei nicht geklüftetem impermeablem Gebirge im oberen Teufenbereich eine sinnvolle Alternative. In größeren Tiefen müssen allein schon aus Gründen der Reibungsverluste und des Verschleißes reibungsvermindernde Additive zugesetzt werden.

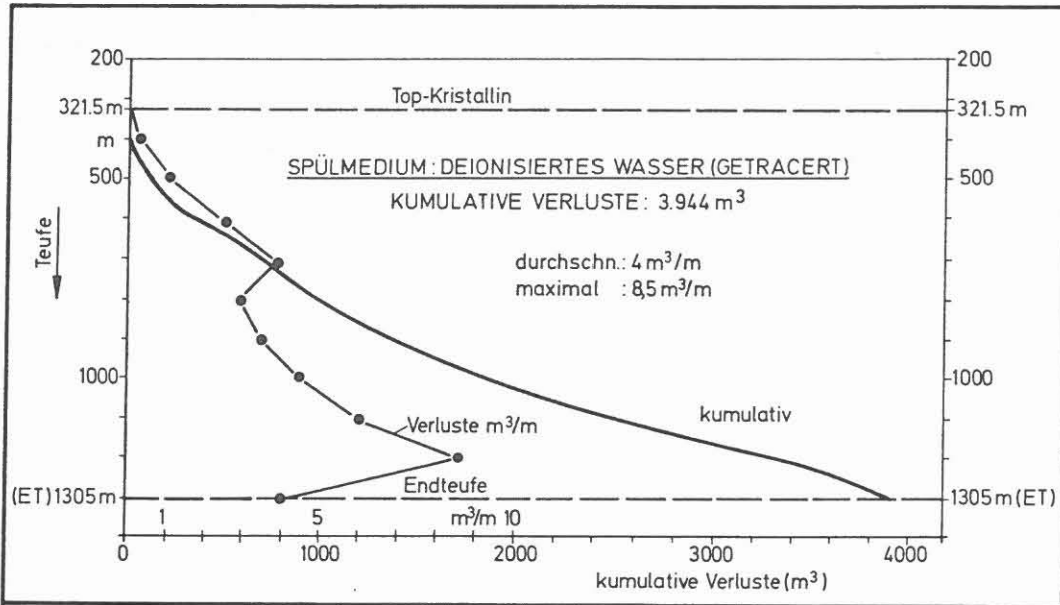
2.4.3.3.2 Wasserbasierte Polymerspülungen

Wie bereits erwähnt, kann die Austragsfähigkeit von Wasser durch Erhöhung der Viskosität verbessert werden. Konventionell werden zu diesem Zweck ton-wasser-basierte Spülungen eingesetzt, die zusätzlich in permeablem Gebirge auch noch eine gute Filtratkontrolle gewährleisten.

Der Einsatz solcher Spülungssysteme sollte aber wegen der starken Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Untersuchungen vermieden werden. Eine Alternative bildet der Einsatz von feststofffreien Polymer-Lösungen, die sich bereits seit vielen Jahren als trägerschonende Workover-Flüssigkeiten in Erdöl- und Erdgasbohrungen bewährt haben. Hervorzuheben sind hier die Biopolymere, die durch das ausgeprägt pseudoplastische Fließverhalten den

bohrtechnischen Anforderungen besonders entgegenkommen.

Da einige Produkte auch gute Schmiereigenschaften zeigen, scheint bei gezielter Auswahl für die Vorbohrung ein Einkomponentensystem möglich, das auch aus geowissenschaftlicher Sicht einen vernünftigen Kompromiß darstellen könnte.



Spülungsverluste im Kristallin der Bohrung Kaisten
 -Bergbaubohrtechnik: Seilkernsystem CHD 134 - [Nagra NTB 86-09] **KTB Abb.5**
 T1025/9.86 Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

| SPÜLMEDIUM | Notwendiges Fördervolumen zur Bohrlochreinigung (1% Kontamination) ohne Verluste | | Zusätzliches Fördervolumen bei Spülungsverlusten | |
|-----------------------------------|--|---------------------------|--|-------------------------|
| | Teststrecken Volumina | 6"-Bohrloch m³/m Teststr. | Reinigungsfak. R x verl. Vol. | Reinigungs-Volumen m³/m |
| Deionisiertes Wasser ^x | 5-10 | 0.1-0.2 | 3-4 | 16 |
| Grundwasser | 10-20 | 0.2-0.4 | 4-8 | |
| Polymer Spülung ^o | ? | ? | 10 ? | 4 |
| Ton-Süßwasser | 30-70 | 0.6-1.4 | 5-10 | |

^xVerluste in der Bohrung Kaisten: durchschnittl: 4 m³/m
 maximal : 8,5 m³/m
^oVerluste für Polymerspülung angenommen: 0.4 m³/m (Viskosität: 10 mPas)

Zur Gewinnung repräsentativer Proben notwendiges Fördervolumen in Abhängigkeit von Spülmedium und Verlusten
 [n.Nagra NTB 85/07] **KTB Abb.6**
 T1049/9.86 Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

2.4.4 Spülungskonzept - Hauptbohrung

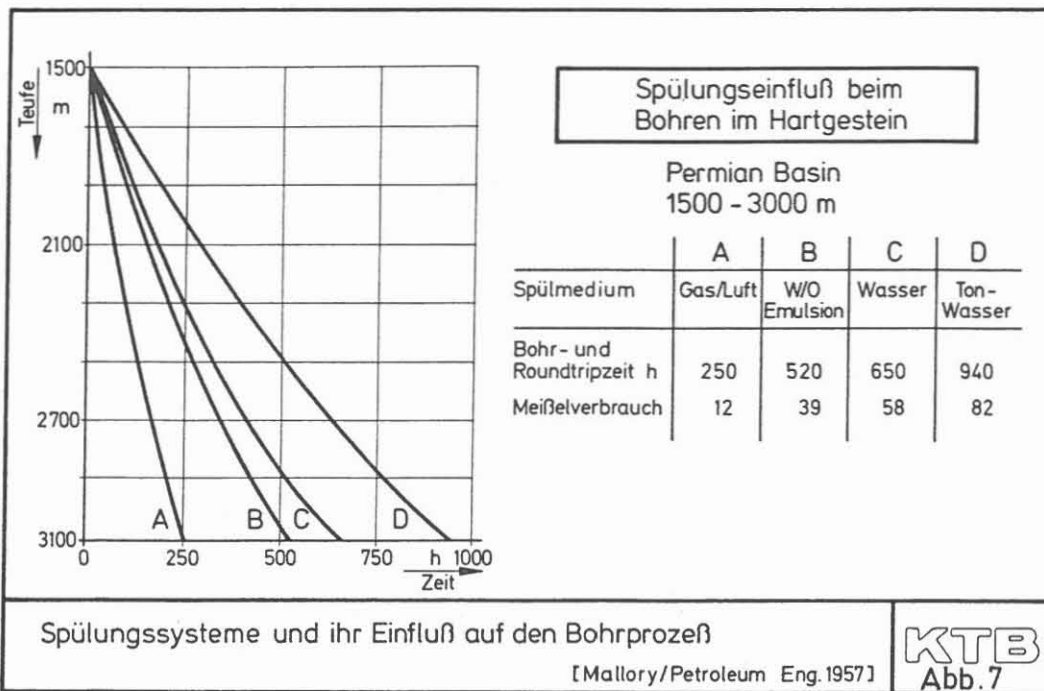
2.4.4.1 Bohrtechnische Überlegungen

Limitierender Faktor für das Spülungskonzept der Hauptbohrung ist eindeutig die in Zielteufe zu erwartende Temperatur und die damit verknüpften Probleme der Thermostabilität von Spülungssystemen (s. Abb. 2).

Daneben ist die Möglichkeit von Zuflüssen überhydrostatischer Fluide und Gase in der als Auflockerungszone interpretierten Niedergeschwindigkeitszone in der Planung eines Spülungskonzeptes zu beachten. Durch die vielfach größere zu zerstörende Gesteinsfläche beim Vollbohren in Verbindung mit den hohen Gesteinsdruckfestigkeiten haben die spülungstechnischen Möglichkeiten der Bohrprozeßoptimierung hohe Priorität.

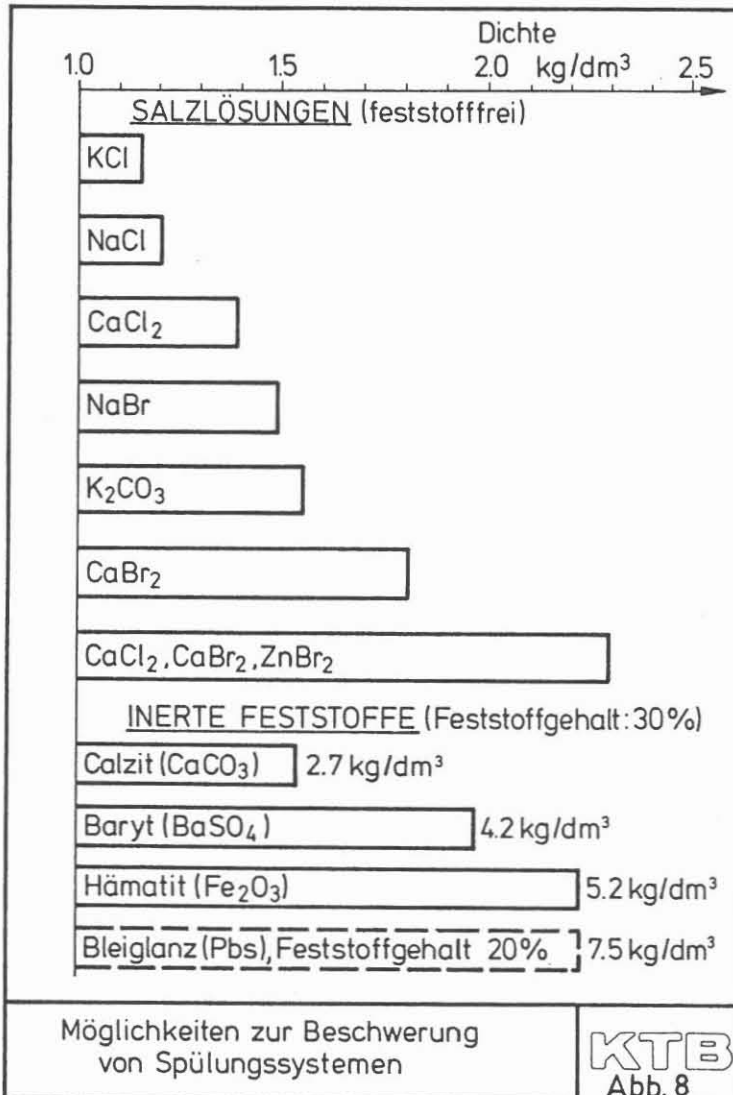
2.4.4.1.1 Feststoffgehalt/Dichte

Seit langem ist bekannt, daß die Effizienz des Bohrprozesses gerade beim Bohren im Hartgestein durch den Einsatz einer geeigneten Spülung ganz entscheidend gesteigert werden kann. Die Spülung hat dabei nicht nur auf den reinen Bohrprozeß, sondern auch auf die Standzeit der Werkzeuge großen Einfluß (Abb. 7).



Das Bohren mit Luft brachte im dargestellten Beispiel eine Reduktion der gesamten Bohr- und Roundtripzeit um fast 75 % im Vergleich zur tonwasserbasierten Spülung.

Wie bereits für die Vorbohrung aufgezeigt, sind allerdings reines Wasser ebenso wie gasförmige Spülmedien oder Schaumspülungen in ihren Einsatzmöglichkeiten beschränkt. Alternativ sind daher möglichst leichte, feststofffreie oder feststoffarme Spülungen anzustreben. Dies macht voraussichtlich unkonventionelle Maßnahmen zur Feststoffkontrolle notwendig, um auch noch Feinstfeststoffe im γ -Bereich wirksam abtrennen zu können. Das Auftreten von überhydrostatischen Druckgradienten macht möglicherweise höhere Spüldichten erforderlich. Im Interesse eines möglichst niedrigen Feststoffgehaltes sollten zunächst die Möglichkeiten der Beschwerung durch Salzlösungen ausgeschöpft werden (Abb. 8).



Zu prüfen sind:

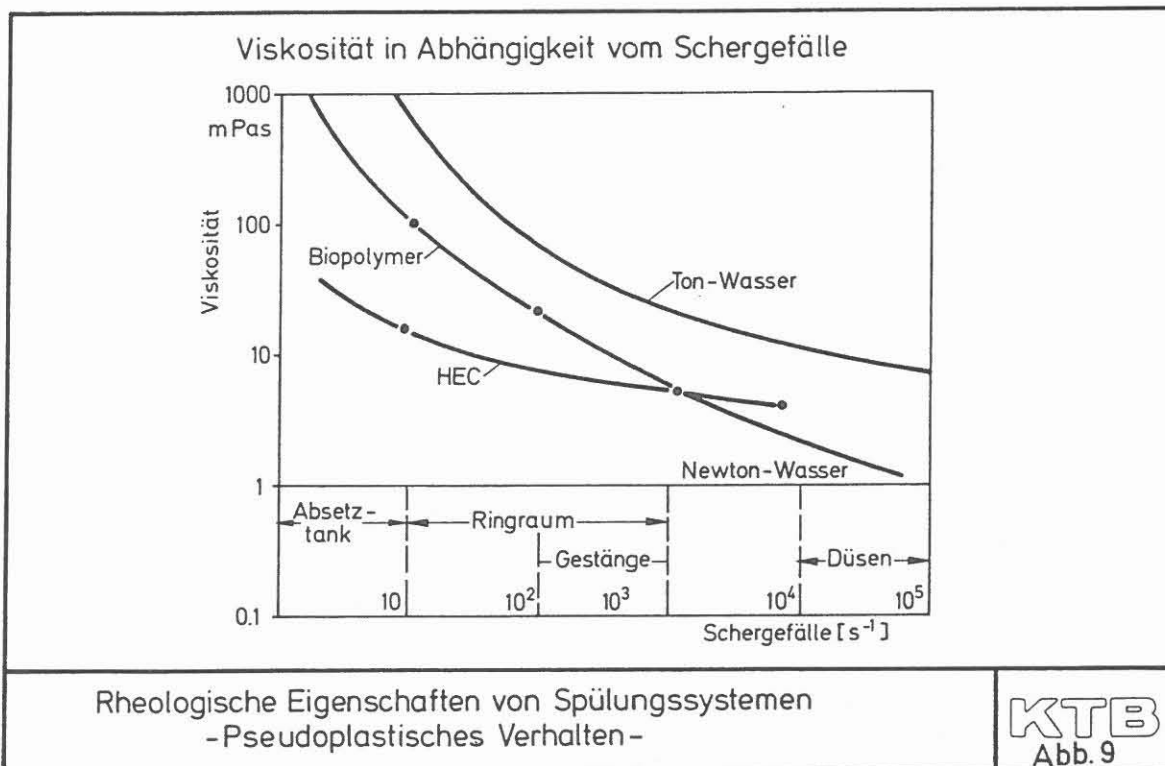
- Toxizität/Umweltverträglichkeit,
- Korrosion,
- Scaling,
- Beeinträchtigung des geowissenschaftlichen Meßprogrammes,
- Kosten.

Sind inerte Feststoffe zur Beschwerung erforderlich, ist die entsprechende Tragfähigkeit der Spülung zu gewährleisten, um ein Absedimentieren zu verhindern.

2.4.4.1.2 Hydraulik

Seit langem ist bekannt, daß ohne eine sofortige und ausreichende Reinigung der Bohrlochsohle durch die Spülung die Arbeit des Bohrwerkzeuges höchst unwirksam bleibt. Die Optimierung der Bohrlochhydraulik ist daher ein wichtiges Instrument zur Effizienzsteigerung des Bohrprozesses.

Wichtiger Einflußfaktor ist das Fließverhalten der Spülung in den bohrtechnisch interessanten Schergefällebereichen (Abb. 9). Während reines Wasser als Newton'sche Flüssigkeit durch die geringe Viskosität in den Meißeldüsen gute Sohlenreinigung bringt, ergeben sich durch die konstant geringe Viskosität im Ringraum schlechte Austragseigenschaften.



Ton-Wasserspülungen besitzen gute Austrageigenschaften, haben aber durch den Feststoffgehalt auch im höchsten Schergefällebereich in den Meißeldüsen eine nicht unterschreitbare Grenzviskosität. Feststofffreie Biopolymerlösungen besitzen die Vorteile beider Systeme: Gute Austrageigenschaften bei geringer Viskosität in den Meißeldüsen.

Für übertiefe und heiße Bohrungen muß die Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften von Temperatur und Druck in die Berechnung der Bohrlochhydraulik mit einbezogen werden. Ebenso ist der Einfluß der in der Abkühlungszone induzierten Zugspannungen auf die Bohrlochstabilität sowie die Fragen der gezielten Kühlung des Bohrloches durch die Spülungszirkulation vor oder während Bohrlochmessungen in einem Gesamtkonzept der Hydraulik-Optimierung zu berücksichtigen.

2.4.4.1.3 Korrosion/Reibungsverminderung

Wie die Erfahrungen aus Geothermie-Bohrungen zeigen, muß bei Zuflüssen von korrosiven Fluiden oder Gasen unter hohen Temperaturen mit extremen Korrosionsraten gerechnet werden.

Mögliche spülungstechnische Schutzmaßnahmen sind:

- Einsatz von Öl oder Emulsionsspülungen,
- Einsatz von O₂-Scavengern,
- pH-Wert-Erhöhung,
- "schutzfilmbildende" Additive.

Schmierfähigkeit und Reibungsverminderung zwischen Gebirge und Bohrstrang sind in tiefen Bohrungen im kristallinen Gebirge eine wichtige Spülungseigenschaft. Durch die temperaturbedingten Einsatzgrenzen der meisten Untertageantriebe ist die Minderung der Reibungsverlustrate gerade im ultratiefen Bereich von hoher Priorität. Möglichkeiten zur Reibungsverminderung sind:

- organische Additive wie Fettsäuregemische,
- Einsatz von Ölspülungen.

Für den Einsatz unter Hochtemperaturbedingungen ist die Wirksamkeit von alternativen, mechanischen Reibungsverminderern wie Glas- oder Keramikugeln zu prüfen.

2.4.4.2 Geowissenschaftliche Anforderungen

Wie bereits einleitend erwähnt, hat die geowissenschaftliche Zielsetzung einer Forschungsbohrung bedeutenden Einfluß auf die Planung der Spülungskonzeption. Vor allem im unteren Teufenbereich hat die Nutzung der in der Spülung enthaltenen Information besondere Priorität, da Bohrlochmessungen,

Kerngewinnung oder Zuflußteste durch die hohen Temperaturen zunehmend limitiert sind.

Wichtige Planungskriterien sind daher:

- Sorgfältige Auswahl der Spülungschemikalien und Beschränkung auf die technisch unbedingt notwendigen Additive,
- Einsatz einer möglichst feststofffreien Spülung um Mehrfachumläufe von Bohrklein zu verhindern und die teufengerechte Zuordnung des Bohrkleins zu erleichtern,
- Bilanzierung des ein- und auslaufenden Spülungsstroms, um Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften zu erkennen.

Besonders wichtig ist auch die teufengerechte Zuordnung der ausgewerteten Informationen, die eine mathematische Modellierung des Austragsprozesses von Bohrklein sowie Fluiden und Gasen erforderlich macht.

2.4.4.3 Spülungssysteme - Hauptbohrung

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Thermostabilität machen eine Zerteilung des Spülungskonzeptes in der Hauptbohrung notwendig.

2.4.4.3.1 Teufenbereich bis ca. 5 000 m

In diesem Teufenbereich können die bereits für die Vorbohrung vorgestellten tonfreien Polymer-Spülungen zum Einsatz kommen. Alternativ könnten hier auch gasförmige Spülmedien (Luft) angewendet werden.

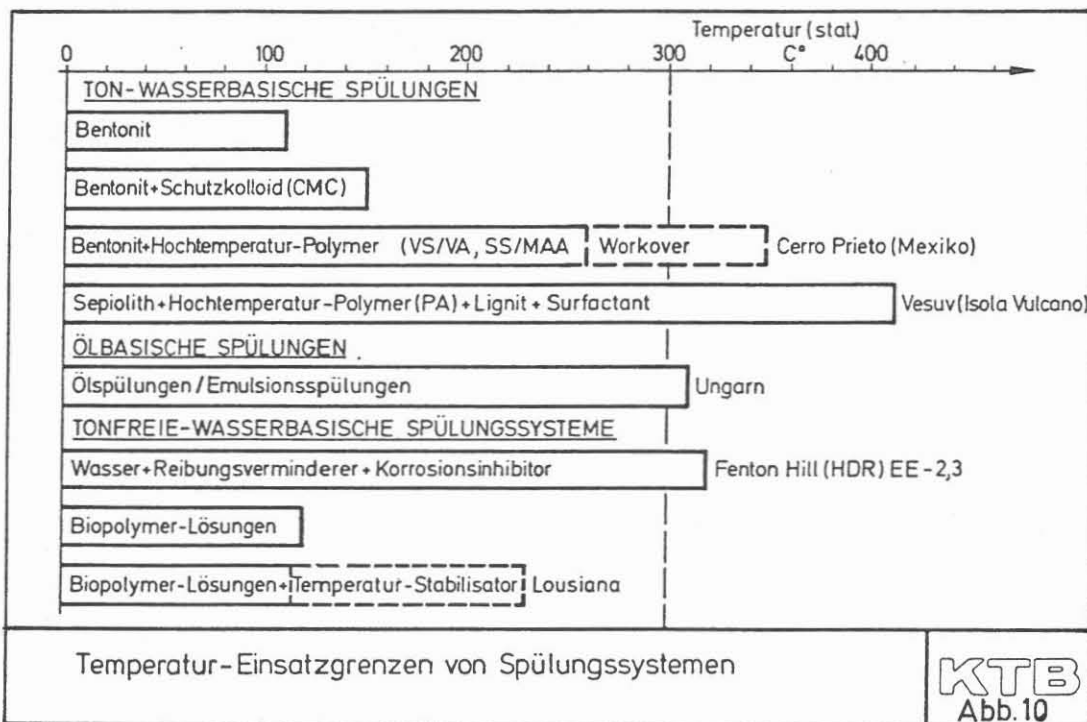
Allerdings ist der mögliche Einsatz durch eine Reihe von Einschränkungen limitiert:

- Teufenbegrenzung bis 5 000 m,
- sehr feines Bohrklein,
- anspruchsvolle Feststoffkontrolle,
- Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Auswertung durch das äußerst feine Bohrklein,
- schwierige Bohrlochkontrolle bei überhydrostatischen Druckgradienten,
- starker Verschleiß und bei Einsatz von Luft hohe Korrosion (Alternative: N₂)
- schwierige Beherrschung von Wasserzuflüssen.

2.4.4.3.2 Hochtemperaturstabile Spülungen

Wichtigste Anforderung an ein Spülungssystem für den tiefen Teil der Hauptbohrung ist die Thermostabilität in Verbindung mit Elektrolytbeständigkeit. Entscheidend ist hierbei die Stabilität der rheologischen Eigenschaften, während die Begrenzung des Filtratverlustes durch das überwiegend impermeable kristalline Gebirge nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Während konventionelle Bentonit-Spülungen durch die Anwendung von markt-gängigen Hochtemperatur-Polymeren bis max. 250 °C einsetzbar sind, wurden speziell für den Geothermie-Einsatz entwickelte Hochtemperatur-Spülungen mit dem temperaturstabileren Sepiolith-Ton bereits bis Temperaturen von 300 °C eingesetzt (Abb. 10).



1001/986

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

KTB
Abb.10

Ton-bedingte Nachteile dieser Spülungen sind:

- schwierige Feststoffkontrolle,
- Schutzkolloide und Verflüssiger notwendig,
- geowissenschaftliche Beeinträchtigung,
- geringerer Bohrfortschritt.

Konventionelle Ölspülungen bieten zwar neben guter Temperaturstabilität auch ausgezeichnete Schmiereigenschaften und guten Korrosionsschutz; die Einsatzmöglichkeiten sind allerdings beschränkt durch:

- Beeinträchtigung der geowissenschaftlichen Interpretation,
- schwierige Feststoffkontrolle und Entsorgung,
- beträchtliche Löslichkeit von Gasen unter hohem Druck,
- Umweltbeeinträchtigung.

2.4.5 Entwicklungsschwerpunkte

Für die Entwicklung eines hochtemperaturstabilen Spülungssystems, das den bohrtechnischen und geowissenschaftlichen Anforderungen weitgehend entgegenkommt, zeichnen sich daher folgende Möglichkeiten ab:

- Anhebung der Temperatureinsatzgrenzen von Biopolymeren,
- gezielte Modifikation bekannter Hochtemperaturpolymere in Richtung auf zufriedenstellende rheologische Eigenschaften für den Einsatz in tonfreien Systemen,
- Entwicklung von ölbasischen Spülungen mit geowissenschaftlich verträglichem sowie umweltfreundlichem Trägeröl.

Weitere spülungstechnische Entwicklungsschwerpunkte sind:

- Untersuchung von industriellen Trenn- und Aufbereitungsverfahren zur vollständigen Abtrennung des Feststoffgehaltes,
- Mathematische Modellierung der Bohrlochhydraulik und des Bohrklein-Austrages unter Einbeziehung von Temperatur-Simulations-Modellen.

2.4.6 Schlußbetrachtung

Die Erforschung der kontinentalen Kruste mit einer ultratiefen Bohrung stellt ein ehrgeiziges bohrtechnisches und geowissenschaftliches Ziel dar, dessen Erfolg nicht unwesentlich vom eingesetzten Spülungssystem abhängt.

Die besondere spülungstechnische Herausforderung ist durch die Notwendigkeit der Bohrprozeßoptimierung unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der geowissenschaftlichen Anforderungen gegeben.

Während für die Vorbohrung ein vernünftiger Kompromiß zwischen geowissenschaftlichen und bohrtechnischen Anforderungen möglich erscheint, ist für das Spülungskonzept der Hauptbohrung noch beträchtliche Entwicklungsarbeit zu leisten. Für die erfolgreiche Bewältigung dieser Aufgaben ist die verstärkte interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaftlern und Bohrtechnikern von besonderer Bedeutung.

2.4.7 Literatur

- AKSTINAT, M. (1978): Viskose Fluidmedien für die Tertiäre Erdölgewinnung in hochsalinaren Systemen - Auswahlverfahren, Testmethoden und Versuchsergebnisse - Dissertation TU Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hütten- und Maschinenwesen.
- MOORE, P.L. (1986) : Drilling Practices Manual, Second Edition. - Tulsa (Oklahoma/USA).
- NAGRA NTB 86-09 (1986): Sondierbohrung Kaisten Bau und Umweltaspekte, Bohrtechnik. - Baden (Schweiz).
- NALL, A.E. (1982) : How to Filter Workover and Completion Fluids, Petroleum Engineer International, July 1982, August 1982 Part 1 and 2.
- STARK, C.L., POLK, S.E. (1986) : Scientific Drilling Project in the Southern Appalachians - Drilling Fluids Program, Engineering Foundation Conference. - Dillard (Georgia/USA).
- WALTER, F. (1986) : Abschlußbericht 03E-4408-A Beteiligung am Fenton Hill Projekt in Los Alamos. - Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrergesellschaft, Lingen.

2.5 CHUR, C., EICKELBERG, H.D., LIEHMANN, U. : Bohranlagenkonzept für die Hauptbohrung

2.5.1 Besondere Anforderungen an die KTB-Tiefbohranlage

Tiefbohranlagen, wie sie heute weltweit zum Abteufen von Aufsuchungs- und Gewinnungsbohrungen von Kohlenwasserstoffen im Einsatz sind, wurden speziell für diese Zwecke entwickelt und gebaut. Bohrungen, die mit diesen Anlagen abgeteuft werden, sind, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nicht tiefer als 6 000 m, und die Bohrdauer beträgt in der Regel weniger als 1 Jahr. Demzufolge wird bei der Konstruktion dieser Bohranlagen berücksichtigt, daß sie nach Bohrungsende schnell in Transporteinheiten zerlegt, auf die neue Lokation transportiert und dort wieder zusammengebaut werden können. Bohrlochmessungen sind auf das Notwendigste beschränkt, Kernbohr- und Testarbeiten werden ausschließlich in potentiellen Trägerhorizonten durchgeführt.

Das Kontinentale Tiefbohrprogramm stellt demgegenüber andere Anforderungen an die Bohranlage:

Die Teufenkapazität der Anlage muß 14 000 m betragen. Der Einsatz der Bohranlage auf der Lokation beträgt, einschließlich aller Meß- und Testarbeiten, ca. acht Jahre.

Zweck der Kontinentalen Tiefbohrung ist die Sammlung wissenschaftlicher Daten durch die Gewinnung von Kernen, Durchführung von Bohrlochmessungen und Testen, Analyse von Bohrklein und der Spülung. Alle hierzu im Bereich der Bohranlage befindlichen Einrichtungen müssen so angelegt sein, daß diese Daten möglichst sicher und schnell gewonnen werden können.

Dem Umweltschutz und der Akzeptanz der Bohranlage durch die Bevölkerung kommt bei einem Projekt von so langer Dauer besondere Bedeutung zu. Besondere Sorgfalt ist auf eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Landschaft, den Lärmschutz, die Luftreinhaltung und die Vermeidung von Bodenverschmutzungen zu legen. Schließlich soll die Anlage so konzipiert sein, daß ihre Einrichtungen bei geänderten Anforderungen im Verlauf der Bohrung erweitert oder ergänzt werden können.

2.5.2 Konzepte der Arbeitsgemeinschaften für die KTB-Tiefbohranlage

Um diese Anforderungen an das Bohranlagenkonzept optimal verwirklichen zu können, hat die Projektleitung des KTB zwei Studien vergeben, deren Ergebnisse als Grundlage für die Konzeption der Bohranlage dienen. Für die Bearbeitung dieser Studien haben sich zwei Arbeitsgemeinschaften gebildet.

Die eine Arbeitsgemeinschaft besteht aus:

- DST (Deutsche Schachtbau- und Tiefbohrgesellschaft mbH), Lingen.
- ITAG (Internationale Tiefbohr-GmbH & Co KG), Celle,
- SMAG (Salzgitter Maschinen und Anlagen AG), Salzgitter-Bad,
- WIRTH (Maschinen- und Bohrgeräte-Fabrik GmbH), Erkelenz

und die andere aus:

- Deutag (Deutsche Tiefbohr AG), Bad Bentheim,
- Preussag AG, Hannover,
- Siemens AG, Erlangen,
- Wintershall AG, Kassel.

Die erstgenannte Arbeitsgemeinschaft hat im Rahmen ihrer Studie vor allem den Neubau einer Bohranlage verfolgt, die letztgenannte den Umbau einer bereits bestehenden Bohranlage. Eine Entscheidung über das endgültige Bohranlagenkonzept wird 1987 getroffen.

2.5.3 Auslegungsdaten für Turm, Hebewerk, Spülpumpen und Tankanlage

Die im folgenden dargestellten Überlegungen basieren auf Zwischenberichten der beiden Studien und sollen die jeweiligen Anlagenteile beispielhaft darstellen. Als Ausgangsdaten für die Auslegung der Bohranlage wurden eine Hakenregellast von 5 500 kN und eine Hakenausnahmelast von 8 000 kN zugrunde gelegt. Dabei entsprechen eine Hakenregellast von 5 500 kN und eine Hakenausnahmelast von 8 000 kN einem kombinierten 5 1/2" - 5" Gestängestrang aus Stahl bis Endteufe einschließlich Zugreserve, beziehungsweise dem maximal zu erwartenden Gewicht der einzubauenden Rohrfahrten.

Die Höhe des Turms ist so bemessen, daß der Ein- und Ausbau von Gestängezügen bis 40 m Länge möglich ist. Die Gesamthöhe der Bohranlage wird ca. 80 m betragen. Zur Aufnahme der Bohrlochabsperrungen beträgt die freie Höhe des Unterbaus 9 m. Unterbau und Fingerbühne sind so ausgelegt, daß im Normalfall ein kompletter 5" Bohrstrang von 14 000 m, im Ausnahmefall sogar zwei Bohrstränge, in dieser Abmessung abgestellt werden können.

Die Arbeitsbühne ist so aufgeteilt, daß eine räumliche Trennung von Technik und Wissenschaft, für die ein separater Arbeitsraum vorhanden ist, erreicht wird. Auch für die zu erwartenden Besucher wird ein eigener Besucherbereich geschaffen, um den Arbeitsablauf nicht zu stören und die Sicherheit der Besucher zu gewährleisten.

Der Drehtisch hat einen freien Durchgang von 27 1/2" und eine statische Tragkraft von 5 500 kN. Seine Antriebsleistung beträgt ca. 740 kW, womit Drehzahlen bis 300 min⁻¹ und ein maximales Drehmoment von ca. 40 000 Nm erreicht werden können. Der Einsatz eines Top Drive wird derzeit noch diskutiert.

Aus Gründen des Wetterschutzes und des Lärmschutzes wird die Bohranlage im Bereich des Bohrturms, der Tankanlage und der Motore weitgehend verkleidet bzw. überdacht.

Für das Hebewerk bieten sich zwei Alternativen:

- Die Verwendung eines handelsüblichen, heute bereits vielfach eingesetzten Hebewerks mit einer Eingangsleistung von 2 206 kW
- oder der Neubau eines Hebewerks mit einer Eingangsleistung von 2 941 kW

Die Tankanlage besitzt ein aktives System von 150 m³ und ein Reservesystem von 270 m³. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, 700 m³ einer speziellen Flüssigkeit, die für Meß- und Testarbeiten ins Bohrloch gepumpt werden kann, zu lagern.

Die Notwendigkeit, die austretende Spülung vor ihrem Zurückpumpen in das Bohrloch abzukühlen, wird derzeit noch untersucht. Vor allem die durch die Auskühlung des Bohrlochs zu erwartenden Auswirkungen auf die Bohrlochstabilität sind noch nicht hinreichend geklärt. Sollte ein Herunterkühlen der Spülung sinnvoll werden, ist daran gedacht, die dabei freiwerdende Energie im Bereich der Gesamtanlage beispielsweise zu Heizzwecken zu nutzen.

Es sind drei Spülpumpen mit einer Eingangsleistung von je 1 200 kW und 350 bar Arbeitsdruck vorgesehen. Bei zunehmender Teufe können die Wasserteile für 350 bar gegen Hochdruckkörper mit einem maximalen Arbeitsdruck von 500 bar ausgetauscht werden.

Aus Gründen des Umweltschutzes und der Wirtschaftlichkeit wird die Energieversorgung aus dem öffentlichen Stromnetz erfolgen. Der Antrieb der Hauptantriebe für Hebewerk, Drehtisch und Spülpumpen erfolgt über Gleichstrommotoren, die über Thyristorstromrichter an das Drehstromnetz angeschlossen sind. Als Energiebedarf für Haupt- und Nebenantriebe werden ca. 10 MW benötigt. Für das Auftreten eines Ausfalles der Versorgung aus dem öffentlichen Netz ist eine Notstromversorgung durch Dieselgeneratoren vorgesehen.

Es wird ein Instrumentierungssystem installiert, welches die Datenerfassung, -analyse und -verarbeitung sämtlicher bohrtechnisch relevanter Parameter ermöglicht. Zusätzliche notwendige wissenschaftliche Messungen werden in das System integriert.

Die Abb. 1 und 2 zeigen jeweils den geplanten Aufbau der Bohranlage.

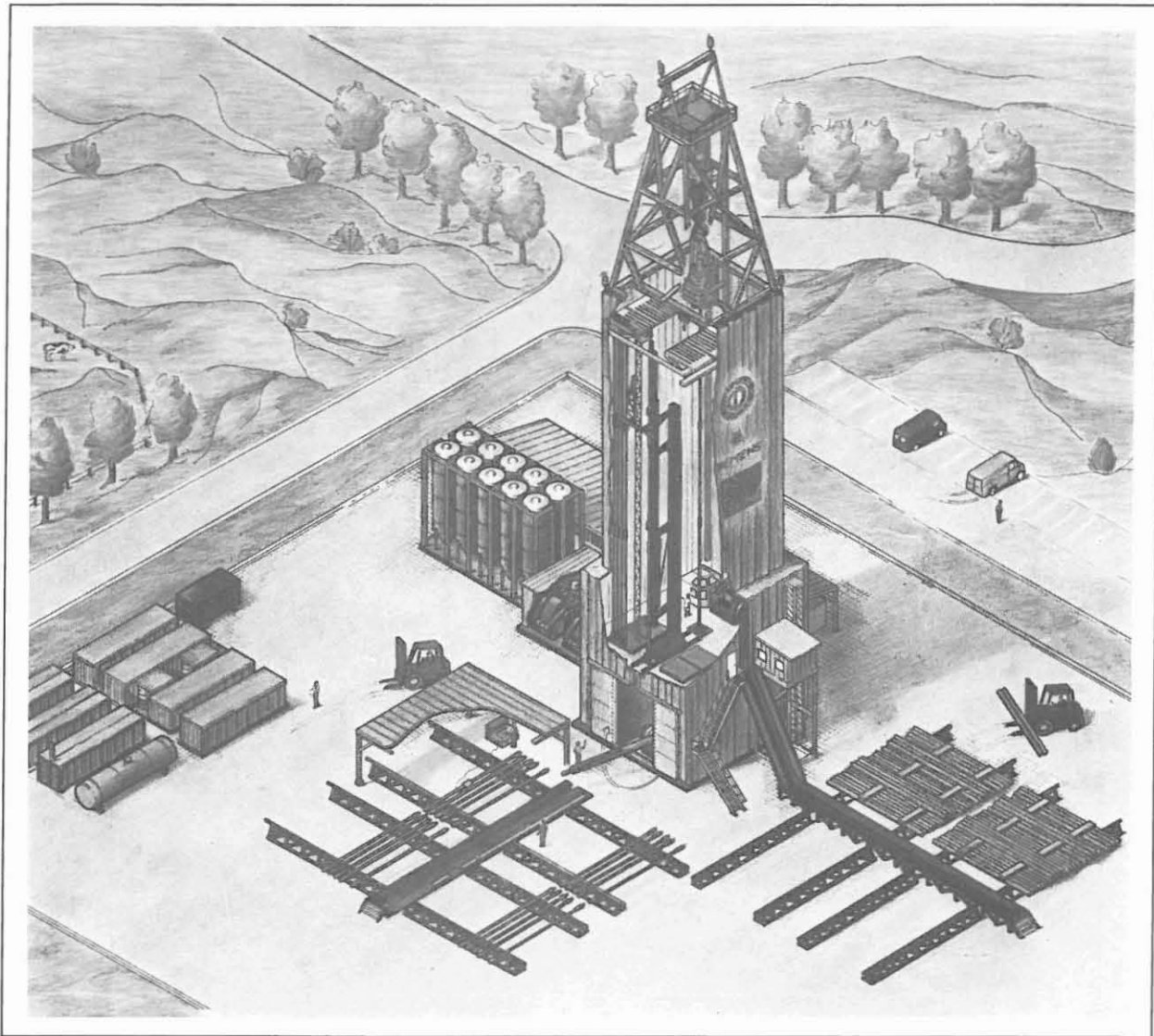


Abb. 1: Darstellung der Bohranlage
Arbeitsgemeinschaft Deutag, Preussag, Wintershall

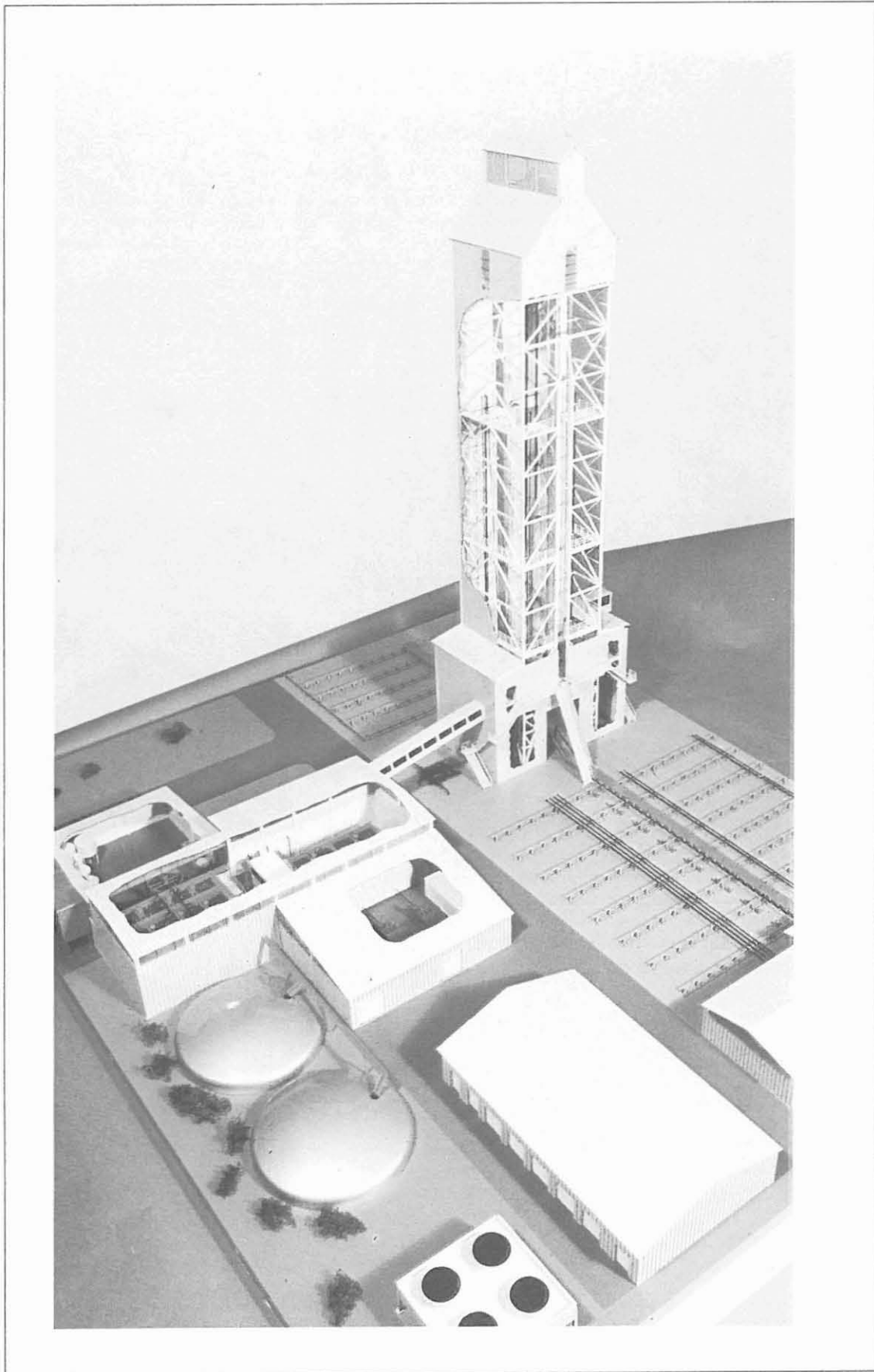


Abb. 2: Darstellung der Bohranlage
Arbeitsgemeinschaft DST, ITAG, SMAG, Wirth

2.5.4 Das automatische Pipehandling-System

Ein zentraler Bereich für das Bohranlagenkonzept ist das Ein- und Ausbauen des Bohrgestänges. Bei einer möglichen Endteufe von 14 000 m und einer Anlagenzeit auf Lokation von ca. acht Jahren kommt diesem Zeitaufwand, der sogenannten Roundtripzeit, eine besondere Bedeutung zu. Bei dem heute allgemein üblichen Verfahren werden 27 m lange Gestängezüge im Bohrturm abgestellt. Das Abstellen bzw. das Hereinnehmen eines Zuges wird dabei von einem Bühnenmann oben im Turm auf der Fingerbühne ausgeführt.

Es bieten sich nun zwei Möglichkeiten, dieses Vorgehen hinsichtlich des Zeitbedarfes zu verbessern:

- Einsatz von längeren Gestängezügen und/oder
- Einsatz eines kombinierten Pipehandling-/Hakenretraktor-Systems.

Für eine 14 000 m tiefe Bohrung beträgt der Zeitbedarf einer Bohranlage mit konventionellem Equipment, d. h. mit 27 m langen Gestängezügen und ohne Pipehandling-System, allein für Roundtrips ca. 400 Tage. Dieser Wert wird natürlich stark durch die Standlänge der Bohrwerkzeuge beeinflusst, besitzt aber in seiner Größenordnung Gültigkeit. Durch das Verlängern der Gestängezüge auf 40 m wird dieser Zeitaufwand auf 330 Tage oder um 17 % reduziert. Ein weiteres Verlängern der Gestängezüge bringt zwar eine nochmalige Einsparung mit sich, dabei auftretende Probleme bei der Handhabung sprechen jedoch dagegen. Es wird angestrebt, die Zuglänge von 40 m mit jeweils 3 Stangen à 13,3 m zu erreichen. Dies hat den Vorteil einer geringeren Anzahl von Gestängeverbindern und einer Gewichtsreduzierung des Bohrstranges.

Der Einsatz eines Pipehandling-Systems in Kombination mit einem Hakenretraktorsystem wird aus folgenden Gründen vorgesehen:

- zusätzliche Zeitersparnis,
- kontrolliertes Ver- und Entschrauben der Gestängeverbinder, und damit eine Reduzierung von Fangarbeiten,
- Verminderung der Unfallgefahr gerade bei langen Roundtripzeiten,
- Einsparung eines Bühnenmannes und eines Lochmannes.

Aus allen genannten Gründen ergibt sich auch eine Einsparung der Kosten. Bei der angesprochenen Zeitersparnis ist eine Verminderung von den vorher genannten 330 Tagen auf 250 Tage zu erwarten. Damit ergibt sich bei einer Kombination von verlängerten Gestängezügen - 40 m statt 27 m - und dem Einsatz des Hakenretraktorsystems eine Reduzierung der gesamten Roundtripzeit um 150 Tage oder 37 %.

Abb. 3 dient zur Veranschaulichung des kombinierten Pipehandling- und Hakenretraktorsystems.

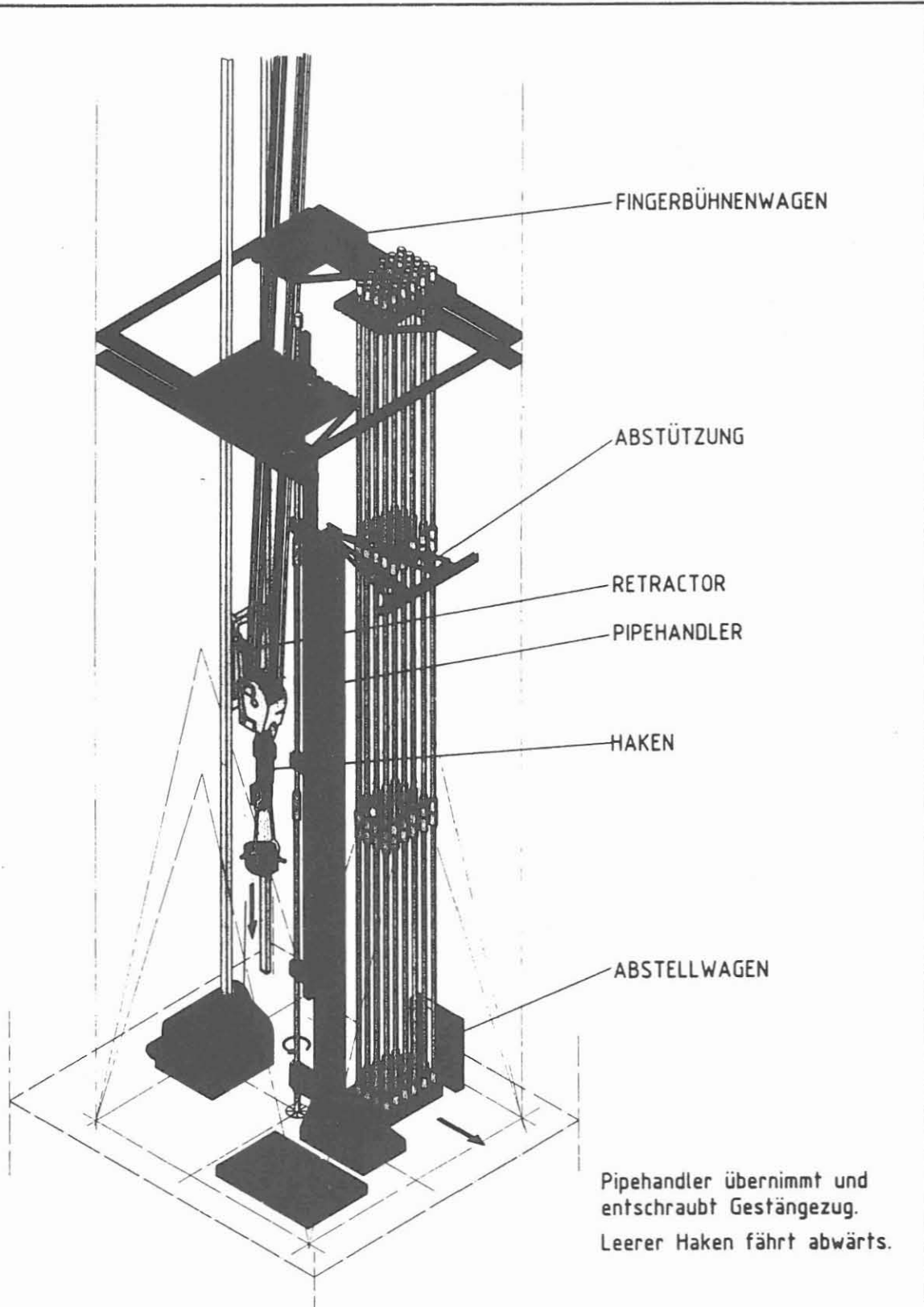


Abb.3: AUTOMATISCHES PIPEHANDLINGSYSTEM (APS)

ARGE TIEFBOHRTECHNIK

KTB DEUTAG
PROJEKT PREUSSAG
SIEMENS
WINTERSHALL

2.5.5 Zusammenfassung

Aus den Ausführungen wird deutlich, daß es sich bei dem Konzept für die Bohranlage zum Abteufen der Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland um eine technische Herausforderung an Bohrgerätehersteller und beteiligter Zulieferindustrie handelt. Die Bemühungen beschränken sich nicht allein auf die technische Durchführbarkeit, sondern haben vor allem eine Optimierung aller Arbeitsabläufe im Hinblick auf eine wirtschaftliche Lösung zur Aufgabe.

Die bisher erfolgten Arbeiten zeigen, daß beide Ziele verwirklicht werden können.

2.5.6 Literatur

DEUTSCHE SCHACHTBAU- UND TIEFBOHRGESELLSCHAFT mbH (DST), Lingen,
INTERNATIONALE TIEFBOHR-GmbH und CO.KG (ITAG), Celle,
SALZGITTER MASCHINEN UND ANLAGEN AG (SMAG), Salzgitter-Bad,
WIRTH MASCHINEN- UND BOHRGERÄTE FABRIK mbH, Erkelenz: Forschungsbericht AZK 12
RG 86040.

DEUTSCHE TIEFBOHR AG (DEUTAG), Bad Bentheim,
PREUSSAG AG, Hannover,
SIEMENS AG, Erlangen,
WINTERSHALL AG, Kassel: Forschungsbericht AZK 13 RG 86040.

2.6 SPERBER, A., SCHRÖDER, U.: Bohrplatz, landschaftspflegerischer Begleitplan und Sicherheitsstudie für das KTB

2.6.1 Einleitung

Zweifellos stellt jede bauliche Maßnahme einen Eingriff in die - teils natürliche, teils bereits durch Menschenhand veränderte - Umwelt dar. Da in den letzten Jahren das Verantwortungsbewußtsein der Allgemeinheit gegenüber unserer Umwelt erheblich gestiegen ist, wurde diese Tatsache in zunehmendem Maße erkannt und die hieraus notwendigen Schlußfolgerungen getroffen, d. h. es werden heute Maßnahmen ergriffen, etwaige Gefahren zu beseitigen oder zu minimieren und eventuelle Schäden auf ein Mindestmaß zu beschränken. Dies gilt natürlich auch für den im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogrammes zu erstellenden Bohrplatz.

2.6.2 Bohrplatzkonzept

2.6.2.1 Geschichtliche Entwicklung des Bohrplatzbaues

Parallel zu dem steigenden Umweltbewußtsein stiegen auch die Anforderungen, die an die Beschaffenheit der Bohrplätze gestellt wurden. Zwar waren und sind Bohrplätze lediglich Mittel zum Zweck, jedoch hat sich das Aussehen von Bohrplätzen insbesondere in den letzten Jahren erheblich geändert.

War früher der Bohrplatz lediglich eine mehr oder weniger planierte, eventuell teilweise mit Holzfahrbahnmatten ausgelegte Fläche, auf der der Turm aufgestellt wurde, mit angrenzenden Stellflächen für "Buden", wie z. B. Bohrschmiede, Bohrmeisterwagen, Waschwagen usw., so ist heute der Bohrplatz in seiner gesamten Auslegung bis hin zu seiner inneren Konstruktion ein voll integrierter Bestandteil der Bohranlage mit einer Vielzahl von Anschlüssen und Leitungen, die zum Teil unter Flur verlegt sind, für die Ver- und Entsorgung des zum Einsatz kommenden Bohrgerätes.

Letztendlich ist dieser Wandel in erster Linie auf das stete Bemühen des Betreibers der Bohranlage zurückzuführen, Bohrplätze so zu errichten und zu betreiben, daß

- schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind bzw.
- die nach dem Stand der Technik unvermeidbaren schädlichen Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

2.6.2.1 Gesetzliche Bestimmungen und beteiligte Behörden

Neben den freiwilligen Bemühungen des Betreibers gibt es hierfür natürlich auch gesetzliche Grundlagen. Dies sind in der Regel die hier in Abb. 1 aufgelisteten Bestimmungen und Vorschriften.

Der Verfasser möchte kurz auf das Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz) und - auch wenn die Verordnung nicht für Tiefbohranlagen direkt Anwendung findet - auf die 12. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes, kurz Störfallverordnung genannt, eingehen, da hier die im Prinzip wesentlichen Aspekte sehr kurz und prägnant aufgeführt worden sind und als Basis für eine Vielzahl anderer Gesetze und Bestimmungen angesehen werden können.

Der § 1 des Bundesnaturschutzgesetzes nennt die Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege.

Gemäß Abs. 1 sind

"Natur und Landschaft im besiedelten und unbesiedelten Bereich so zu schützen, zu pflegen und zu entwickeln, daß

- (1). die Leistungsfähigkeit des Naturhaushalts,
- (2). die Nutzungsfähigkeit der Naturgüter,
- (3). die Pflanzen- und Tierwelt sowie
- (4). die Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft

als Lebensgrundlage des Menschen und als Voraussetzung für seine Erholung in Natur und Landschaft nachhaltig gesichert sind."

Abs. 2 fordert, daß

"die sich aus Abs. 1 ergebenden Anforderungen untereinander und gegen die sonstigen Anforderungen der Allgemeinheit an Natur und Landschaft abzuwägen sind."

In der Störfallverordnung wird unterschieden zwischen

- dem bestimmungsgemäßen Betrieb einer Anlage und
- einer Störung.

Nach § 2, Abs. 1, ist ein

"Störfall im Sinne dieser Verordnung eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs, durch die ein Stoff ... frei wird, entsteht, in Brand gerät oder explodiert und eine Gemeingefahr hervorgerufen wird."

§ 3 der Störfallverordnung nennt die Sicherheitspflichten eines Anlagenbetreibers.

Demnach hat

"der Betreiber einer Anlage, die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern ... und darüber hinaus Vorsorge zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten."

Diese hier nur kurz umrissenen Schutzmaßnahmen werden sowohl in der bayerischen Bergbautiefbohrverordnung (BergTbV) als auch in der Baden-Württembergischen Tiefbohr- und Gasspeicher- Bergpolizeiverordnung (TGBPVO) in den Teilen

- Arbeits- und Umweltschutz
- Explosionsschutz
- Brandschutz
- Gasschutzwesen

explizit behandelt und besitzen für den Fall einer Tiefbohrung Geltung.

Naturgemäß sind durch die Vielzahl der geltenden Bestimmungen und Vorschriften, wie sie in Abb. 1 gezeigt wurden, auch eine entsprechende Anzahl von Behörden im Rahmen der Bohrplatzherrichtung und des Abteufens einer Bohrung involviert. Diese werden in der Regel von dem als zuständige Aufsichtsbehörde agierenden Bergamt eingeschaltet.

Als Beispiel hierfür möge die in Abb. 2 gezeigte Auflistung der im Rahmen eines Bohrplatzherrichtungsgenehmigungsantrages eingeschalteten Behörden eines realen Falles dienen.

Bei näherer Betrachtung der Bestimmungen und Verordnungen zeigt sich, daß häufig der Sicherheitsaspekt und der Umweltschutzaspekt als eine Einheit angesehen werden müssen, da eine Beeinträchtigung der Sicherheit auch eine Beeinträchtigung der Umwelt nach sich ziehen kann.

Es sollte deshalb prinzipiell bei Sicherheitsüberlegungen auch die Sicherheit im Hinblick auf die Umwelt Berücksichtigung finden.

- **Bundesberggesetz**
- **Bergbau und Tiefbohrverordnungen**
- **Bundesnaturschutzgesetz**
- **Arbeitszeitordnung**
- **Arbeitsstättenverordnung**
- **DIN-Vorschriften**
(z. B. DIN 18300, Lagerung des Mutterbodens)
- **Altölgesetz**
- **Wasserhaushaltsgesetz**
- **Unfallverhütungsvorschriften**
- **TA Lärm**
- **TA Luft**
- **USW**

Gesetzliche Bestimmungen

KTB
Abb. 1

- **Bergamt**
- **Oberbergamt**
- **Geologisches Landesamt**
- **Wasserwirtschaftsamt**
- **Zuständiger Landkreis**
mit den nachgeordneten Ämtern und Fachabteilungen wie z. B.:
 - **Kämmerei**
 - **Ordnungsamt**
 - **Straßenverkehrsamt**
 - **Bauamt**
(als untere Behörde f. den Natur- u. Baudenkmalschutz)
 - **Amt für Regionalplanung**
 - **Planungsamt (ggf. Stadtplanungsamt)**
 - **Amt für Wasserwirtschaft und Abfallbeseitigung**
 - **Amt für Naturschutz und Landschaftspflege**

Beteiligte Behörden

KTbB
Abb. 2

2.6.2.3 Prinzip einer Sicherheitsstudie

Auch wenn die Störfallverordnung für Tiefbohrungen keine gesetzliche Geltung besitzt, ist natürlich trotzdem zu prüfen, welche Sicherheitsrisiken beim Abteufen einer Bohrung zu berücksichtigen sind.

Prinzipiell kann eine sicherheits- und umweltrelevante Untersuchung - nennen wir es Sicherheitsstudie - nach folgendem Fragenschema aufgebaut werden:

- Was kann passieren?
- Wo kann dies passieren?
- Wie kann ein Störfall vermieden werden?
- Was kann im Störfall zur Begrenzung der Auswirkungen getan werden?

Zur Beantwortung der ersten Frage "was kann passieren?" kann man sich wiederum des § 2 der Störfallverordnung bedienen und daraus die Antwort ableiten.

"Es kann ein Stoff frei werden, entstehen, in Brand geraten oder explodieren."

Zur Beantwortung der zweiten Frage "wo kann dies passieren?" ist es sinnvoll, das zu betrachtende Objekt in separate Bereiche zu unterteilen und diese getrennt zu betrachten; eine Aufteilung könnte z. B. erfolgen in:

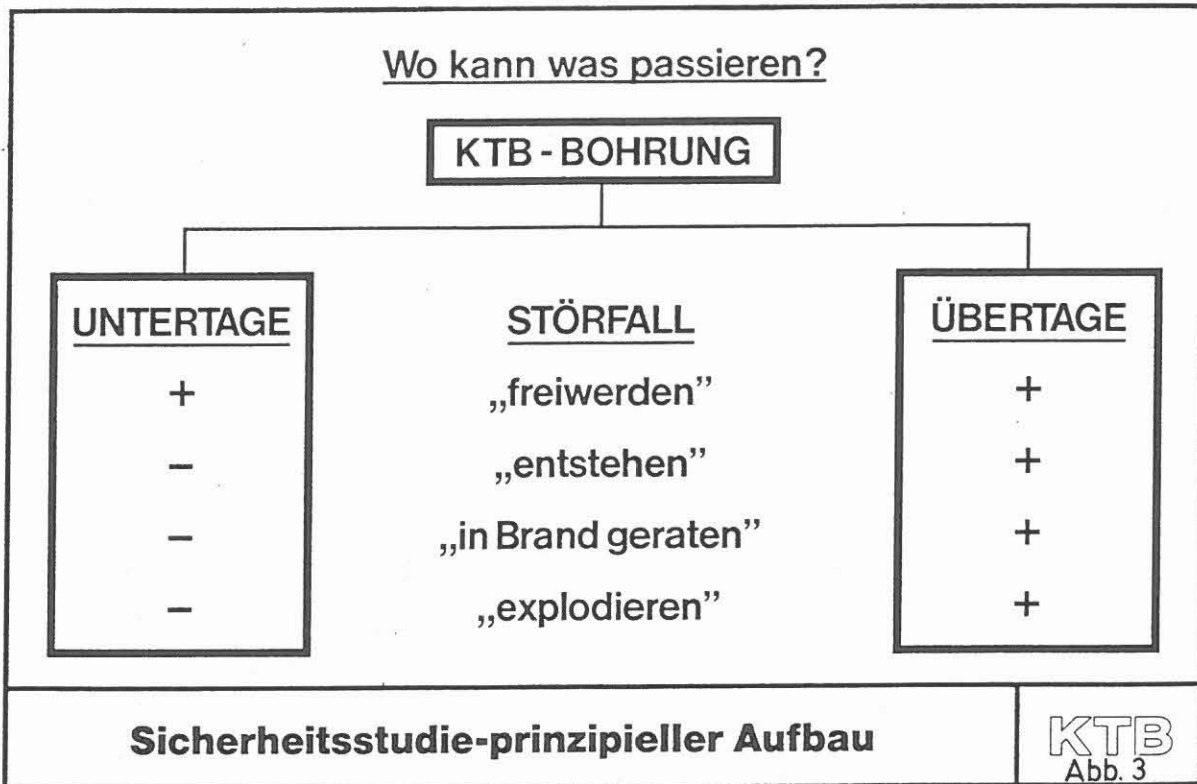
- untertage und
- übertage.

Die einzelnen Bereiche können nach verschiedenen Kriterien im Bedarfsfall weiter unterteilt werden.

Erwähnt seien hier als Beispiel für den übertage-Bereich nur die Unterteilung in verschiedene Ex-Schutzzonen oder eine Aufteilung des gesamten Bohrplatzbereiches in einen durch Umsturz des Turmes gefährdeten Bereich und einen hiervon nicht gefährdeten Bereich.

Im Hinblick auf das Bohrplatzkonzept werden die weiteren Betrachtungen auf den Bereich übertage beschränkt, da ohnehin lediglich in diesem Bereich alle vier Störfallkategorien auftreten können, wie Abb. 3 zeigt, während untertage im Normalfall lediglich die Störfallkategorie "frei werden" auftreten kann, sofern hierfür die Begriffsbestimmung aus der 2. Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Störfallverordnung genutzt wird.

(Danach ist unter dem Begriff "frei werden" das "Verlassen des Stoffes seines zu seiner Aufnahme bestimmten Behältnisses [Behälter, Rohrleitungen, sonstige Einschlüsse]" zu verstehen).



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

So gut auch die Störfallverordnung zur prinzipiellen Darstellung einer Sicherheitsstudie geeignet ist, zeigt sich doch sehr bald, daß die dort vorgesehenen Störfalldefinitionen für Tiefbohranlagen die möglichen Gefahren nur unvollständig erfassen. Dieser Tatsache ist bereits beim Bohrplatzentwurf Rechnung zu tragen.

2.6.2.4 Lösungsvorschlag Bohrplatzkonzept

Das Ziel bei der Konzeption des Bohrplatzes für die Kontinentale Tiefbohrung war demzufolge, alle potentiellen Gefährdungen und die hieraus möglichen Auswirkungen in Betracht zu ziehen, alle infrage kommenden Auflagen zu erfüllen, die spezifischen Belange des Bohrbetriebes für Vor- und Hauptbohrung zu berücksichtigen, eine weitestmögliche Einbindung in die vorhandene Landschaft zu erreichen und optimale Bedingungen für die wissenschaftlichen Arbeiten zu schaffen.

Neben diesen Zielen dürfen natürlich auch die ökonomischen Gesichtspunkte nicht vergessen werden, da auch hier gilt, daß der Bohrplatz letztendlich Mittel zum Zweck ist.

Das in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 4) gezeigte Bohrplatzkonzept trägt diesen Forderungen Rechnung, was anhand einiger Beispiele nachfolgend kurz dargelegt wird.

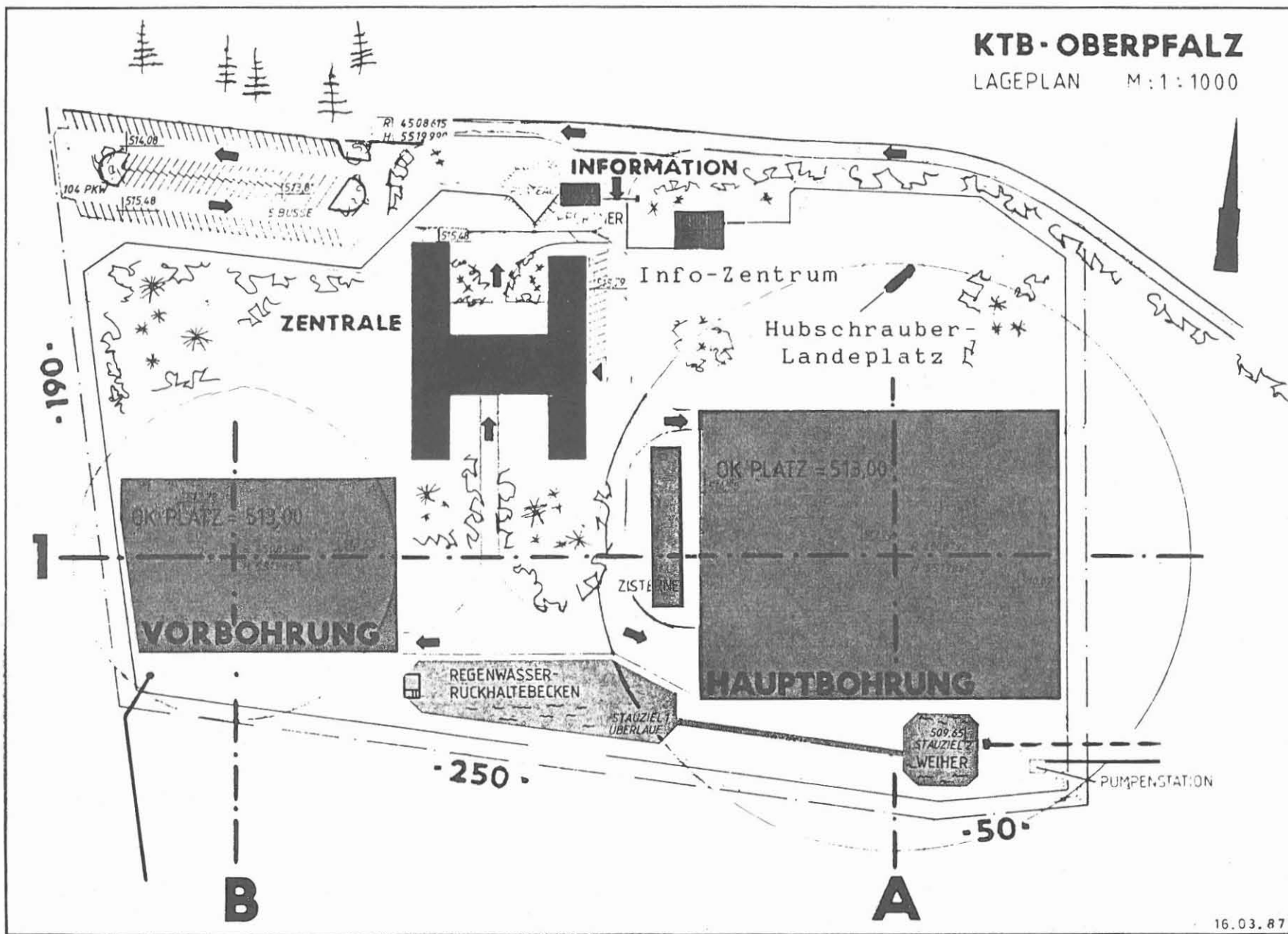


Abb. 4: Bohrplatzkonzept

Maßgebend für die minimalen Abstände der Bohrungen untereinander sind die jeweiligen Turmhöhen der Bohranlagen. Innerhalb eines Schlagkreises von Turmhöhe plus 10 % um den Bohransatzpunkt dürfen keine bewohnten Gebäude und öffentlichen Verkehrsflächen liegen.

Damit ist abhängig von den Bohrgerüsten, die zum Einsatz kommen, der Mindestabstand der Ansatzpunkte gegeben. Eine Vergrößerung des Abstandes ist möglich, bedingt aber höhere Kosten bei der Bohrplatzherstellung, sofern nicht der zusätzliche Zwischenraum anders genutzt werden kann. Unter Berücksichtigung der beiden Bohrplätze für Vor- und Hauptbohrung, der Anordnung der einzelnen Gebäude, Wasserbecken, Straßen, Mutterbodenlager und Parkplätze ergibt sich ein Mindestplatzbedarf von 5,7 ha bei einer Abmessung von ca. 210 x 275 m und einem Bohrungsabstand von ca. 200 m, wie er aus geowissenschaftlicher Sicht wünschenswert ist.

Diese "Kompaktlösung" mit beiden Bohransatzpunkten auf einem gemeinsamen Bohrplatz läßt sich in fast jedem Gelände erstellen und bietet optimale Arbeitsbedingungen für die wissenschaftliche Auswertung.

Die beiden Bohrplätze werden aus wasserfestem Beton in unterschiedlichen Stärken erstellt. Alle Fugen und Bauteilanschlüsse werden mit für alle vorkommenden Flüssigkeiten resistenten Fugenbändern doppelt gesichert. Ein Eindringen von Schadstoffen in den Untergrund wird somit ausgeschlossen.

Beide Bohrplätze werden in einen inneren und einen äußeren Bereich aufgegliedert. Der innere Bereich beinhaltet die gesamte Maschinenstellfläche, Cutting-Gruben sowie die jeweilige Umfahrt. Ausreichendes Gefälle und ein umlaufendes, leicht zu reinigendes, offenes Rinnensystem sorgen für eine schnelle Entwässerung.

Bei der Größenordnung des gesamten Bohrplatzes ist die Erfassung und Ableitung des Regenwassers als besonders wichtig einzustufen. Hierzu möge als Beispiel der Bohrplatz Hindelang (Allgäu) dienen, auf den 1985 rund 1 800 mm Niederschlag pro m² fielen. Bei einer befestigten Bohrplatzfläche von 20 700 m² entspricht dies immerhin 37 260 m³ Niederschlagswasser pro Jahr. Bei einer angenommenen Bohrzeit von 7 Jahren für die Hauptbohrung und somit rund 261 000 m³ Niederschlagswasser ergeben sich unter Zugrundelegung einer Abfuhr- und Einlagerungsgebühr von rund 75,00 DM pro m³ - ein Preis der heute durchaus im Rahmen des üblichen liegt - bei Nicht-Aufteilung der Bohrplätze in innere und äußere Bereiche allein hierfür Kosten von rund 19,5 Mio. DM, wenn eine Kontamination des Niederschlagswassers mit Spülung oder Schmierstoffen eine Abgabe in Vorfluter oder Kanalisation unmöglich macht.

Durch eine Aufteilung in innere und äußere Bereiche wird erreicht, daß lediglich im inneren Bereich das Niederschlagswasser kontaminiert werden kann.

Doch selbst die Abfuhr und Einlagerung des auf diese reduzierte Fläche (ca. 4 500 m²) fallenden Niederschlagswassers würde über die Laufzeit der Hauptbohrung noch zu Kosten von ca. 4,25 Mio. DM führen.

Eine Überdachung der vorgenannten Flächen mit einem seitlich offenen Maschinenzelt oder einer geschlossenen Maschinenhalle ist daher durchaus denk-

bar. Neben der Verhinderung der Kontamination des Regenwassers ermöglicht diese Lösung noch das Auffangen des Wassers und Zwischenlagerung über eine Zisterne für Brauchwasser zum Ansetzen der Spülung oder dergleichen.

Durch den Bau einer geschlossenen Halle über die gesamte Maschinenstellfläche könnten zudem Geräuschemissionen auf ein Minimum reduziert werden. Für eventuelle Störfälle an den Maschinen müssen in der Dachfläche natürlich ausreichende Lüftungs- und Rauchöffnungen vorgesehen werden.

Anfallende Niederschläge der äußeren Bohrplatz- und Verkehrsflächen werden nach Vorreinigung in ein Verdunstungsbecken geführt, sofern das Wasser nicht anderweitig gebraucht werden kann.

Die Integration einer Schilfkläranlage in das gesamte Konzept vermeidet eine zusätzliche Belastung der Kapazität kommunaler Kläranlagen, die erfahrungsgemäß ohnehin bereits häufig voll ausgelastet oder sogar überlastet sind. Anfallende Abwässer gelangen nach Klärung ebenfalls in das Verdunstungsbecken.

Der abgeschobene Mutterboden wird entsprechend den gesetzlichen Vorschriften umlaufend um die Gesamtanlage in einer Miete angeordnet. Grasflächen, Bepflanzungen und standortgerechte Einzelbäume sorgen für eine schonende Einbindung des gesamten Areals in Natur und Landschaft.

Die Beheizung der gesamten Gebäude sowie die Heizwasserbereitung kann bivalent erfolgen, indem mit Wärmepumpen und - tauschern den verschiedenen Medien - Spülung, Luft und Abwasser - jahreszeitlich unabhängig Wärme zum Betreiben einer Heizanlage entzogen wird. Darüberhinaus erforderlicher Wärmebedarf kann z. B. durch Gas abgedeckt werden.

Die Bohranlage und alle anderen Betriebsmittel und Gebäude werden durch Fremdstrom betrieben, lediglich für eventuelle Netzausfälle oder extremen Spitzenbedarf werden dieselbetriebene Generatoren in Reserve vorgehalten. Mit diesem Prinzip können schädliche oder störende Emissionen - und damit auch Immissionen - vermieden bzw. auf ein Minimum reduziert werden.

Selbstverständlich wird die ökologische Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems über die gesamte Laufzeit überwacht werden. Zu diesem Zweck wird zunächst als "Beweissicherung" der geodätische und ökologische Zustand des Bohrplatzgeländes einschließlich Umgebung durch Nivellements, Waldzustandsaufnahmen usw. registriert. Durch Vergleich dieser "Urzustandswerte" mit späteren Wiederholungsmessungen können evtl. umweltrelevante Veränderungen exakt erfaßt und auf die Ursache hin analysiert werden.

2.6.3 **Schlußbetrachtung**

Ausgehend von den geltenden rechtlichen Grundlagen und Sicherheitsanforderungen sowohl für die auf dem Gelände arbeitenden Menschen als auch für die Umwelt wurde ein generelles Bohrplatzkonzept erarbeitet, das den

verschiedensten Anforderungen genügt. Darüberhinaus kann nur durch die konsequente Einbeziehung des Bohrplatzes selbst als voll integrierter Bestandteil des Gesamtprojektes, wie auch einleitend kurz erwähnt, ein weitgehendes "Recycling" von Wasser und Energie unter Minimierung der Verluste erreicht werden.

Selbstverständlich muß dieses generelle Konzept an die lokationsspezifischen Gegebenheiten angepaßt werden, was jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach keine prinzipielle Änderung erfordern dürfte. Damit kann bereits jetzt davon ausgegangen werden, daß bei der Realisierung des Bohrplatzkonzeptes in hier vorgestellter oder ähnlicher Form eine Symbiose zwischen Sicherheit, Ökologie und Ökonomie erzielbar ist.

2.6.4 Literatur

1. ALLGEMEINE VERWALTUNGSVORSCHRIFT ZUM BUNDESIMMISSIONSSCHUTZGESETZ
(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft)
vom 28.08.1974.
 2. ALLGEMEINE VERWALTUNGSVORSCHRIFT ZUR STÖRFALLVERORDNUNG
vom 27.04.1982.
- BERGBAU-TIEFBOHR-VERORDNUNG (Berg TbV)
vom 14.05.1981.
- BUNDESBERGGESETZ
vom 13.08.1980.
- BUNDESGESETZBLATT Teil I:
Erstes Gesetz zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes vom 10.12.1986.
- GESETZ ÜBER DIE VERMEIDUNG UND ENTSORGUNG VON ABFÄLLEN
(Abfallgesetz) vom 27.08.1986.
- GESETZ ÜBER NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE
(Bundesnaturschutzgesetz) vom 20.12.1976.
1. GESETZ ZUM SCHUTZ VON SCHÄDLICHEN UMWELTEINWIRKUNGEN DURCH LUFTVERUNREI-
NIGUNGEN, GERÄUSCHEN, ERSCHÜTTERUNGEN UND ÄHNLICHEN VORGÄNGEN
(Bundes-Immissionsschutzgesetz) vom 15.03.1974.
- GESETZ ZUR ORDNUNG DES WASSERHAUSHALTS (Wasserhaushaltsgesetz)
vom 23.09.1986.
- TECHNISCHE ANLEITUNG ZUM SCHUTZ GEGEN LÄRM (TA Lärm)
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung
vom 16.07.1968.

TIEFBOHR- UND GASSPEICHER-BERGPOLIZEIVERORDNUNG (TGBPVO)
vom 27.10.1981.

12. VERORDNUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZES
(Störfallverordnung) vom 27.06.1980.

3 FACHBEREICH OPERATIVE GEOLOGIE

3.1 KEHRER, P.: Konzept einer optimalen Datenanalyse an Vor- und Hauptbohrung

3.1.1 Zusammenfassung

Eine optimale "Datengewinnung" aus Vor- und Hauptbohrung ist Voraussetzung für den Erfolg des Kontinentalen Tiefbohrprojektes der Bundesrepublik Deutschland. Das entsprechende Konzept muß berücksichtigen, daß einerseits die wissenschaftlichen Ziele erreicht werden, andererseits sind den technischen Möglichkeiten wie Bohrtechnik (Risiko) und Meßtechnik Rechnung zu tragen, sowie Aspekte des Programm-Budgets und Zeitaufwandes zu beachten. Die Organisation dieser Datengewinnung erfordert die Koordination und Mitarbeit aller Beteiligten sowie eine straffe Leitung durch die Projektgruppe KTB.

Zur **Untertage-Datengewinnung** (Logging) sind insbesondere Messungen während des Bohrens (Measurement While Drilling), Bohrlochmessungen, Entnahme von Gesteinsproben (Kerne, Seitenkerne, Bohrklein) und Fluidproben (Flüssigkeiten und Gase) sowie diverse Tests und Experimente im Bohrloch (z. B. Spannungsmessungen), zwischen Bohrloch und Oberfläche (z. B. seismische Geschwindigkeiten) sowie zwischen der Vor- und Hauptbohrung (z. B. elektrische Leitfähigkeiten) geplant.

Die **Übertage-Datengewinnung** der festen, flüssigen und gasförmigen Proben beginnt mit der fachgerechten Probennahme und Probenbehandlung in der "Mud Logging-Unit" unmittelbar am Bohrturm, einer anschließenden intensiven ersten Bearbeitung im Feldlabor auf dem Bohrplatz in den Fachbereichen Geophysik, Geochemie/Mineralogie/Petrologie sowie Geologie/Tektonik und einer anschließenden weiteren detaillierten Bearbeitung der Proben in den Laboratorien der am Projekt mitarbeitenden Hochschulen. Im Feldlabor sollen insbesondere die Parameter gemessen und analysiert werden, die zeitlichen Veränderungen unterliegen, routinemäßig kontinuierlich bzw. diskontinuierlich erfaßt werden müssen bzw. die Basis für schnelle Entscheidungen bilden.

Zu dem für das KTB erarbeiteten "Konzept Datengewinnung" ist zu bemerken, daß zunächst die auf dem Markt vorhandenen bewährten Strategien, insbesondere die Erfahrung der Erdöl- und Service-Industrie, genutzt werden. Kommerzielle Anbieter aus dem Bereich der Bohrlochmessungen sollen die Aufgaben abdecken, die optimal von ihnen durchgeführt werden können. Andererseits trägt das Konzept den Besonderheiten dieser Forschungsbohrung Rechnung, die darin begründet sind, daß es sich hier um kristallines Gebirge im Gegensatz zu sedimentären Schichten wie im Bereich der Erdöl-/Erdgas-Exploration handelt: Umfang und Genauigkeit der benötigten Daten liegen über den Ansprüchen kommerzieller Bohrungen. Es müssen Langzeit-Messungen und -Tests durchgeführt werden, und wegen der großen Teufe ergeben sich Probleme hinsichtlich Temperatur und Druck. Außerdem arbeitet eine größere Zahl von Arbeitsgruppen diverser Disziplinen an diesem Projekt mit.

3.1.2 Einführung

Zur Erreichung der von den Geowissenschaften im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms der Bundesrepublik Deutschland vorgegebenen Zielsetzung ist es notwendig, einerseits eine übertiefe Forschungsbohrung abzuteufen, wofür der Fachbereich Technik im Rahmen der Projektleitung zuständig ist, andererseits während und nach Beendigung der Bohrung eine optimale Datenakquisition zu gewährleisten, um ein Maximum an Informationen aus dieser Bohrung zu gewinnen. Für diesen Bereich ist der Fachbereich "Operative Programmdurchführung" im Rahmen der Projektleitung zuständig.

Diese Vorgaben stehen im Spannungsfeld zwischen der Bohrtechnik einerseits, die insbesondere ein ungestörtes, kostengünstiges und sicheres Bohren zum Ziele hat und kein Risiko für das Bohrloch eingehen kann, und der Wissenschaft, die verständlicherweise den Wunsch nach einer Vielfalt von Daten höchster Genauigkeit hat sowie eine Reihe von Langzeitbeobachtungen durchführen will.

Der Bereich der Datengewinnung läßt sich zunächst in die beiden Gebiete "Untertage" und "Übertage" unterteilen. Zu den Möglichkeiten der Datengewinnung "Untertage" gehören u. a. die Messungen während des Bohrens, die Gesteinsprobenentnahme, wie z. B. das konventionelle Kernen bzw. das Entnehmen von Seitenkernen nach Beendigung der Bohrung, die Probennahme von Fluiden (Gasen, Flüssigkeiten), der umfangreiche Bereich der Bohrlochmessungen sowie Tests und Experimente. Die Möglichkeiten der Datengewinnung "Übertage" umfassen insbesondere die Probennahme nach Austritt an der Oberfläche und die Aufbereitung der festen und flüssigen bzw. gasförmigen Proben im Rahmen der Bohrungsbearbeitung. Diese erfolgt im Feldlabor an der Bohrung, wo eine größere Zahl von sofort notwendig werdenden Messungen durchgeführt werden kann, sowie für Spezialuntersuchungen in Laboratorien an anderen Orten.

3.1.3 Organisation

Der Fachbereich "Operative Programmdurchführung" in der Projektleitung KTB hat die Aufgabe, die Bohrungsbearbeitung zu konzipieren und zu organisieren mit dem Ziel einer optimalen Datengewinnung in enger Abstimmung mit:

- Fachbereichen Technik und Geowissenschaften der Projektleitung
- Hochschul-Forschungsteams
- Schwerpunkt KTB (DFG)
- Koordinierungsausschuß KTB
- beteiligten Ressorts
- Arbeitsgemeinschaften "Bohrlochmessungen" und "Feldlabor"
- Bohr- und Service-Industrie.

Eine straffe Organisation durch die Projektleitung KTB mit Koordination der am Projekt beteiligten Mitarbeiter ist notwendig. Eine schnelle Datenverarbeitung und erste Interpretation an der Bohrung als Grundlage für laufende Entscheidungen, z. B. Festlegung der zu kernenden Intervalle, sowie als Basis für die nachgeschalteten detaillierten Untersuchungen, muß durch die Organisation sichergestellt werden.

3.1.4 Untertage-Datengewinnung (Logging)

3.1.4.1 Möglichkeiten

Die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Untertage-Datengewinnung sollen für das Projekt intensiv genutzt werden. Dazu gehören u. a. die Entnahme von Gesteinsproben im Bohrloch (Kerne und Seitenkerne). Flüssigkeits- und Gasproben können einerseits aus der Spülung, andererseits durch Teste (Zuflüsse) gewonnen werden.

Einen wichtigen Bestandteil der Untertage-Datengewinnung stellen die sog. Bohrlochmessungen dar ("Wireline-Logging"), bei denen an einem Kabel geführte Sonden diverse physikalische Parameter messen. Experimente, wie z. B. Spannungsmessungen im Bohrloch, oder zwischen beiden Bohrlöchern der Vor- und Hauptbohrung sowie zwischen Oberfläche und Bohrloch, sind ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Datengewinnung. Zu nennen ist noch das Verfahren des "Messens während des Bohrens" ("Measurement While Drilling"), das aber beim heutigen Stand der Technik sehr kostenintensiv ist und nur die Messung einer begrenzten Zahl von Parametern zulässt.

3.1.4.2 Probennahme

Die Probennahmen von Gesteinen (Kernen) und Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) in der Bohrung sind für die Bewertung der durchteuften Schichten von größter Wichtigkeit. Die Gesteinsprobenentnahme ist ganz wesentlich an die zu verwendende Bohrtechnik gebunden (u. a. MARX und RISCHMÜLLER 1986). Beim Kernen lassen sich grundsätzlich unterscheiden:

- Kernen als Teil des Bohrvorgangs zum Vertiefen der Bohrung
- Seitenkernen aus der Bohrlochwand nach Durchteufen des Gebirges.

Für die geologische Bearbeitung sind die "normalen Kerne" von weit größerer Aussagekraft, da sie einen größeren zusammenhängenden Teil des Gebirges der vertikal durchteuften Schichten repräsentieren, während die Seitenkerne nur wenige cm messende kleinere Gesteinsstücke aus der Seitenwand des Bohrlochs darstellen.

Die Seitenkerne haben jedoch den Vorteil, daß sie auch nach Beendigung des Bohrvorgangs in den Bereichen genommen werden können, die während des Durchteufens des Gebirges aus Kostengründen nicht gekernt wurden. Deswegen sind auch Seitenkerne für bestimmte Untersuchungen unverzichtbar. Sie stehen in ihrem wissenschaftlichen Untersuchungswert praktisch zwischen den Vollkernen und dem mit der Spülung ausgetragenen Bohrklein, das aus der Zerstörung des Gesteins mit dem Meißel herrührt.

Die Art des Kernens hängt von der Bohrtechnik ab. In der auf 3 000 m ausgelegten Vorbohrung, die im Falle guter technischer Realisierung auf 5 000 m vertieft werden soll, soll eine Bergbau-Schürfbohrmethode mit Seilkernen angewandt werden. Dabei soll mit schnelldrehenden dünnlippigen Bohrkronen, die nur ein geringes Gesteinsvolumen zu zerstören haben, gebohrt werden, und die Kerne können anschließend mit einem Seil gezogen werden. Dieses aus der Bergbautechnik stammende Bohrverfahren garantiert im allgemeinen in

kristallinen Gesteinen einen guten Bohrfortschritt und einen hohen Kerngewinn mit glattwandigen, zusammenhängenden Kernen. Die Vorbohrung soll mit diesem Verfahren voll gekernt werden, so daß eine Entnahme von Seitenkernen in der Vorbohrung außer zu Testzwecken weitgehend entfallen kann.

Die auf 12 000 bis 14 000 m ausgelegte Hauptbohrung kann aus Kostengründen nicht voll gekernt werden. Für die von der Vorbohrung durchteufte Strecke entfällt ohnehin die Notwendigkeit des Kernens in der Hauptbohrung. Das darunterliegende tiefere Gebirge wird nach wissenschaftlichen Prioritäten und technischen Möglichkeiten in Teilen gekernt. Das Kernens mit der in der Hauptbohrung angewandten Rotarybohrtechnik in hartem Gestein hat oft nur ein begrenztes Potential mit geringen Bohrfortschritten, kurzen Meißel-Standzeiten und geringerem Kerngewinn als im sedimentären Gebirge.

In ausgewählten, nicht gekerntem Bereichen der Hauptbohrung werden Seitenkerne genommen werden müssen. Dabei gibt es prinzipiell mehrere technische Methoden, die im kristallinen Gebirge und wegen der Temperaturen in größeren Teufen z. T. nicht einsatzfähig sind:

- Beim "Horizontalen Seitenkernen" ("Sidewall Horizontal Coring Tool") werden im sedimentären Gebirge eine Reihe von Seitenkernen aus der Bohrlochwand herausgeschossen. Für kristallines Gebirge bietet die Industrie ein an einem Kabel eingeführtes Seitenkerngerät an, das mittels Elektromotoren als Antrieb 12 Kerne (24 x 28 mm) aus der Bohrlochwand herausbohrt. Dieses Gerät ist jedoch nur bis 150 °C einsetzbar und bis zu einem Druck von 1 400 bar. Neben der Temperaturgrenze ist das Gerät zur Tiefe hin weiterhin begrenzt durch die Schwierigkeit, die notwendige elektrische Energie über das Kabel vor Ort zu bringen.
- Das "Schrägwinkel-Seitenkerngerät" ("Sidewall Angle Core Barrel") wurde vom "Institut für Tiefbohrtechnik" (u. a. MARX und RISCHMÜLLER 1986) über ein BMFT-Vorhaben entwickelt mit guten Resultaten im sedimentären Gebirge, muß aber für den Einsatz in kristallinen Gesteinen noch weiterentwickelt werden. Bei diesem Verfahren wird ein ca. 30 cm langer Kern schräg mit einem kleineren Kernrohr aus der Bohrlochwand herausgebohrt, nachdem es mittels eines Keils im Bohrloch entsprechend abgelenkt wurde.
- Die dritte Möglichkeit bietet ein Gerät, das am Kabel ins Bohrloch eingeführt wird und mittels Diamantsägen ein dreieckförmiges ca. 1 m messendes Gesteinsstück vertikal aus der Bohrlochwand herausfräst. Technische Schwierigkeiten bei bisherigen Einsätzen und die Begrenzung zur Tiefe hin wegen des Problems des Vorortbringens der notwendigen elektrischen Energie und der Temperaturen lassen nur einen begrenzten Einsatzbereich erwarten.

Für die Probennahme von Fluiden (das sind Flüssigkeiten und Gase) stehen folgende drei Methoden zur Verfügung:

- Kabelteste (z. B. "Repeat Formation Tester"): Bei den Kabeltesten wird eine Sonde eingefahren, von der aus ein Fühler gegen die Bohrlochwand zur Aufnahme von Gasen und Flüssigkeiten gepreßt wird. Bei den geringen Matrixporositäten in kristallinen Gesteinen und bei dem praktisch nur punktförmig erfaßten Bohrlochabschnitt hat diese Methode wohl kaum Erfolgchancen für das Projekt.

- Gestängeteste ("Drill Stem Test"): Bei den Gestängetesten werden bestimmte vertikale Abschnitte der Bohrung durch an die Bohrlochwand angepreßte "Packer" vom hydrostatischen Druck der Spülungssäule abgedichtet, so daß Flüssigkeiten und Gase aus dem Gebirge in das Gestänge hineinfließen können.
- Fluid Probennahme: Bei der Fluid-Probennahme ("Fluid Sampler") werden an Kabeln eingeführte Sonden in definierte Bereiche des Bohrlochs hinabgelassen, in denen Zuflüsse erwartet werden, und aus der Spülung Proben entnommen. Der Nachteil ist, daß die entnommenen Proben naturgemäß Mischproben von Zuflüssen aus dem Gebirge und Spülung darstellen.

Zusammenfassend zu den Möglichkeiten der Probennahme im Bohrloch läßt sich sagen, daß

- hinsichtlich der Gesteinsprobennahme das volle Kern aus wissenschaftlicher Sicht die meisten Ergebnisse verspricht, wobei insbesondere beim Seilkernen im Rahmen des Schürfbohrrens gute Ergebnisse zu erwarten sind,
- auf Seitenkerne in vorher nicht gekernten Bereichen nicht verzichtet werden kann, die technischen Möglichkeiten aber aus heutiger Sicht durchaus begrenzt sind,
- bei der Probennahme von Fluiden die technisch aufwendigeren Gestängeteste den relativ besten Erfolg versprechen, während die Kabelteste kaum Ergebnisse bringen dürften. Die technisch relativ einfachen Fluid-Sampler werden häufig eingesetzt werden, erbringen aber nur gemischte Proben von Zuflüssen und Spülung.

3.1.4.3 Bohrlochmessungen

Darunter sind die Messungen mit Sondenkörpern am Kabel ("Wireline-Logging") sowie die Experimente im Bohrloch und von Bohrloch zu Bohrloch zu verstehen.

Bohrlochmessungen ("Wireline-Logging") werden insbesondere bei der Erdöl-/Erdgasexploration angewandt. Von speziellen Service-Firmen werden eine größere Zahl von Meßinstrumenten sowie die entsprechende Datenverarbeitung und Interpretationsmethoden angeboten. In geringerem Umfang werden Bohrlochmessungen auch bei der Suche nach anderen Rohstoffen wie Kohle, Erzen, Grundwasser etc. benutzt.

Die Probleme, die sich für die Übernahme der konventionellen Bohrlochmessungen ergeben, sind insbesondere darin bedingt, daß die gängigen Messungen im allgemeinen für Sedimentgesteine und nicht für kristallines Gebirge entwickelt wurden. Außerdem sind sie entsprechend den Anforderungen der heutigen Kohlenwasserstoffexploration für Tiefen bis max. 8 000 m, Drücken bis etwa 1 500 bar, sowie für Temperaturbereiche bis zu 170 - 180 °C ausgelegt, nur in Ausnahmefällen sind bereits Weiterentwicklungen bis in den Bereich von ca. 250 °C erfolgt. Letzteres insbesondere durch eine Weiterentwicklung der kommerziellen Exploration für größere Tiefen und durch die in den letzten Jahren ausgeführten Geothermik-Projekte. Im Rahmen der Bohrlochmessungen kommen eine größere Zahl geophysikalischer Methoden zum Einsatz wie Seismik, Geoelektrik, Magnetotellurik, Geothermik, Gravimetrie, Kernphysik sowie Magnetik.

Das von der Projektleitung KTB in Zusammenarbeit mit dem Schwerpunkt KTB 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 und des Druckes, der Standfestigkeit des Gebirges, die Erkennung der Klüftigkeit als mögliche Bewegungsbahn von Fluiden und die Bewertung der Lithologie und Textur sind Ziel der Untersuchung. Als Vorerkundung für die Hauptbohrung sind seismische Untersuchungen im Bohrloch ("Vertical Seismic Profiling") vorgesehen.

Das Konzept sieht vor, die prioritären Bohrlochmessungen abschnittsweise während des Abteufens der Bohrung durchzuführen, während die weniger prioritären Messungen und Experimente sowie die Langzeitversuche anschließend durchgeführt werden. In dieser ca. 10 Monate umfassenden Langzeit-Testperiode in der Vorbohrung nach Abschluß der Bohrarbeiten sollen Fluidbewegungen, Permeabilität, Wärmeproduktion etc. festgestellt und registriert werden. Die gewonnenen Kenntnisse sollen der Planung für die Hauptbohrung dienen.

Das Meßprogramm in der Vorbohrung hat insbesondere folgende Aufgabe:

- Entlastung der supertiefen Bohrung von Meßarbeiten,
- Übertragbarkeit von Methoden und Sonden auf Kristallin prüfen,
- Erprobung neuer und weiterentwickelter Sonden,
- Korrelation von Bohrlochmessungen und Kernmessungen,
- Experimente von Bohrloch zu Bohrloch,
- Vorbereitungen für geophysikalische Schlüsselexperimente,
- Erfahrungen und Vorbereitungen für die supertiefe Bohrung.

Bei der Tiefbohrung ist die Durchführung der Bohrlochmessungen in der Bohrung während des Abteufens mit einer, aufgrund der in der Pilotbohrung gemachten Erfahrungen verbesserten Prioritätenliste zum Zwecke der Minderung des Risikos für die Bohrung sowie der Kostenreduzierung aufgrund der Stillstandszeiten geplant. Anschließend werden nach Abschluß der Bohrarbeiten die Messungen unter Einsatz aller Methoden einschließlich Langzeitbeobachtungen, die nicht in der Prioritätenliste enthalten sind, durchgeführt. Die Gesamtstrategie für Vor- und Hauptbohrung sieht weiterhin vor, daß die erprobte Ausrüstung der Service-Firmen eingesetzt und das erworbene Know-how dem Projekt nutzbar gemacht werden soll. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden auch KTB-eigene Meßsonden angestrebt, sofern ein häufiger Einsatz vorgesehen ist und diese einfach im Aufbau sind, wie z. B. Temperatursonde, Drucksonde, Fluidsampler, etc. Außerdem ist der Einsatz von Sonden der am Projekt mitarbeitenden Hochschul-Institute geplant.

Soweit kommerziell verfügbar, sollen Routineauswertungen der Meßergebnisse bei den einschlägigen Service-Firmen durchgeführt werden. Für darüber hinausgehende Dateninterpretation wurden in enger Abstimmung zwischen Projektleitung KTB und den am Projekt mitarbeitenden Hochschul-Instituten **Auswertegruppen** auf folgenden Gebieten gebildet:

- Geothermik
- Porosität, Permeabilität

- Geohydraulik
- Lithologie, Struktur, Textur
- Seismik
- Spannungsmessungen
- Elektr. Messungen
- Gravimetrie
- Magnetik, Magnetotellurik.

Noch zu schließende technologische Lücken, die für die Durchführung des KTB-Programms notwendig sind, sollen durch ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm geschlossen werden (siehe unter 3.1.7). Einige Projekte im Bereich der Weiterentwicklungen von Bohrlochmeßsonden wurden bereits in Auftrag gegeben. Weitere Projekte des von der Projektleitung KTB betreuten F- und E-Programms werden z. Zt. definiert und sollen 1987/88 beginnen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß Bohrlochmessungen ein wesentlicher Bestandteil der Untertage-Datenerfassung sind. 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 von neueren Verfahren der Bohrlochmeßtechnik wie "Akustik Televiwer" und "Formation Micro Scanning Tool" die Nachorientierung von Kernen durchgeführt werden kann.

3.1.4.4 Dauermeßstation (Logging Unit)

Die Einrichtung einer KTB-eigenen, permanenten Dauermeßstation ist notwendig, da dadurch jederzeit Bohrlochmessungen für wissenschaftliche Untersuchungen sowie die bohrtechnische Sicherheit möglich sind, die Nutzung eigener KTB-Sonden sowie von Hochschulen entwickelter Meßsonden gewährleistet ist und nach Abschluß der Bohrarbeiten zeitintensive Messungen bzw. Wiederholungsmessungen kostengünstiger durchgeführt werden können.

Eine bis 7 000 m Tiefe einzusetzende modular gebaute, schallgedämmte Dauermeßstation, die nach entsprechender Umrüstung auch auf den Teufenbereich bis 14 000 m ausgebaut werden kann, wird z. Zt. beschafft. Für Tiefen über 7 000 m wird eine Capstan Unit hinzugefügt. Diese bewirkt eine Zugentlastung für das Kabel auf der Speichertrommel.

Im Falle von Kabeln mit > 10 km Länge werden die Zugfestigkeitsgrenzen sehr schnell erreicht; Signalverzerrungen sind ebenfalls zu erwarten. Doch in beiden Fällen bieten sich Lösungen an, um Messungen bis in ca. 14 km Tiefe ausführen zu können. Die Temperatureinsatzgrenze des Kabels liegt bei ca. 300 °C.

Bei der Diskussion um die Anschaffung einer KTB-eigenen Dauermeßstation im Gegensatz zur Vergabe der kompletten Messungen an die einschlägige Service-Industrie spielten auch die Erfahrungen anderer größerer Forschungsprojekte wie das Geothermik-Projekt in Los Alamos, das englische Geothermik-Projekt in Cornwall sowie die russische Forschungsbohrung Kola SG-3 eine entscheidende Rolle. Hinsichtlich der Möglichkeiten des Einsatzes eines Meßwagens bzw. einer auf Kufen gebauten Skid Unit hat sich nach längerer Diskussion ergeben, daß für die Belange des KTB eine Skid Unit die bessere Lösung darstellt.

3.1.4.5 Teste und Experimente

Fluidteste und Probenentnahme stellen einen wichtigen Schwerpunkt im Rahmen des Projektes dar. Zu nennen sind Gestänge-Teste (DST), Kabelteste (z. B. RFT) und Probennahme aus der Spülung mit Fluidsamplern in definierten Teufen (siehe unter 3.1.4.2). Unter geophysikalischen Schlüsselexperimenten sind geophysikalische Untersuchungen zu verstehen, die nur mit Hilfe einer supertiefen Bohrung zu realisieren sind. Diese Experimente wurden vom "FORSCHUNGSKOLLEGIUM PHYSIK DES ERDKÖRPERS" in einer Studie besonders ausgewiesen (FKPE 1986). Die Realisierungsmöglichkeiten dieser Schlüsselexperimente werden z. Zt. in diversen Arbeitsgruppen diskutiert.

3.1.5 Übertage-Datengewinnung

3.1.5.1 Methodik

Unter diesem Begriff soll die Gewinnung aller denkbaren Daten durch Beschreibungen, Messungen und Analysen von festen, flüssigen und gasförmigen Proben nach ihrem Erscheinen übertage zusammengefaßt werden. Erste Untersuchungen erfolgen in der "Sample Unit" unmittelbar am Turm, umfassendere im nachgeschalteten Feldlabor.

Hierzu ist für das Projekt ein detailliertes Fließschema erarbeitet worden, das Probennahme, Beschreibung, Analytik, Verteilung, Dokumentation, Archivierung etc. aufzeigt. Die Probennahme an der Oberfläche von Spülproben (Cuttings, Bohrklein) und Spülung und die erste Bearbeitung der Proben in der sogenannten "Sample Unit" (Mud Logging Unit) ist, abgesehen von der höheren Probendichte, ähnlich wie bei Erdöl- und Erdgasbohrungen, während das Feldlabor hinsichtlich Ausstattung und Personal bzw. Quantität und Qualität seiner Analytik weit über das hinaus geht, was normalerweise bei kommerziellen Bohrungen vor Ort gemacht wird. Insofern trägt das Feldlabor dem Forschungscharakter der Bohrung Rechnung.

3.1.5.2 Bohrungsbearbeitung

Unter "Bohrungsbearbeitung" (Mud Logging, Sampling) soll hier die routinemäßige Entnahme von Bohrklein und Spülung, die kontinuierliche Messung von Gasen in der Spülung und die Behandlung der Proben sowie erste Beschreibungen in der unmittelbar am Bohrturm stehenden "Sample Unit" (Mud Logging Unit) verstanden werden, eine Art kleineres Container-Labor. Diese wird vom Projekt angemietet oder angekauft.

Gewöhnlich erfolgt die kontinuierliche Bohrungsbearbeitung anhand des Bohrkleins (Cuttings), das durch die Bohrspülung ausgetragen wird.

Petrographische Beschreibung und Abschätzung der prozentualen Zusammensetzung erlauben Aussagen über die durchteufte Lithologie. Die geologischen Daten zusammen mit den wichtigsten bohrtechnischen Parametern werden laufend in einem sogenannten Sampler-Log festgehalten und digitalisiert gespeichert.

Die routinemäßige Untersuchung der Bohrspülung auf ihre chemische Zusammensetzung vor und nach einem Spülungsumlauf zur frühzeitigen Erkennung sich ändernder Zustände im Bohrloch ist neben der Kontrolle ihrer physikalischen Eigenschaften (z. B. Dichte, Temperatur, elektrischer Widerstand, Viskosität etc.) eine wichtige Maßnahme der geologischen und technischen Überwachung einer Tiefbohrung. In kristallinen Gesteinen liefern die zu erwartenden geringfügigen Gaszutritte in der Spülung Hinweise auf Einflüsse des erbohrten Gebirges sowie das Vorhandensein von Kluftzonen.

3.1.5.3 Feldlabor

Im Rahmen der Grundlagenforschung soll das KTB-Feldlabor alle Aufgaben übernehmen, die unbedingt vor Ort, d. h. auf der Bohrlokation und ohne Zeitverzögerung durchgeführt werden müssen. Dazu gehören u. a. die Analyse von Fluiden (Gase/Flüssigkeiten) aus Spülung und Testen, die Untersuchung des Bohrkleins (Cuttings) sowie der Bohrkerne, die

- zeitlichen Veränderungen unterliegen,
- routinemäßig kontinuierlich oder diskontinuierlich erfaßt werden müssen,
- eine Basis für nachgeschaltete Spezialuntersuchungen an den Hochschulen darstellen.

Im wesentlichen sind folgende Arbeitsrichtungen im Feldlabor vertreten:

- Geologie/Tektonik (z. B. Aufnahme des Makro- und Mikrogefüges von Bohrkernen)
- Petrologie/Mineralogie (z. B. makro- und mikroskopische Beschreibung)
- Lagerstättenkunde (z. B. makro- und mikroskopische Diagnose von Erz- und Gangmineralien)
- Geochemie (z. B. chemische Analysen von Gasen, Bohrklein und Bohrkernmaterial)
- Geophysik (Bestimmung verschiedener geophysikalischer Eigenschaften)
- Petrophysik (z. B. Relaxationsmessungen an Bohrkernmaterial).

Das Feldlabor wird mit Kernlager eine Fläche von ca. 1 000 m² umfassen. Etwa 30 Wissenschaftler und Techniker werden im Dreischichtbetrieb die Messungen durchführen. Diese Wissenschaftler, die von mehreren Hochschulinstituten kommen, sowie die Techniker, die im wesentlichen vor Ort kontraktiert werden sollen, werden über ein DFG-Projekt im Rahmen des KTB-Schwerpunktes angestellt.

Die Projektleitung KTB errichtet das Gebäude, führt den Ankauf der wissenschaftlichen Geräte durch und stellt die Betriebsmittel zur Verfügung. Ihr obliegt die Leitung des Feldlabors, wozu mehrere Mitarbeiter von Hannover zur Bohrung abgestellt werden.

Das Feldlabor ist ein entscheidendes Element im Rahmen des Forschungsprojektes KTB. Dadurch steht eine große Zahl von Messungen, die vor Ort durchgeführt werden und über die entsprechend laufend berichtet wird, allen Mitarbeitern am Projekt zur Verfügung. Die umfassende Erarbeitung wissenschaftlicher Daten sowie ein schneller Datenfluß soll die Basis für weitergehende Untersuchungen und Entscheidungen darstellen. Das Feldlabor soll mit Beginn der Vorbohrung im 3. Quartal 1987 soweit wie möglich arbeitsfähig sein.

Dem Feldlabor angeschlossen ist ein geologisches Zentralmagazin, in dem Kerne, Bohrklein und Spülungsproben zunächst gelagert werden, um jederzeit für die weitere Bearbeitung zur Verfügung zu stehen.

3.1.6 Data Unit (Zentrale Computer-Einheit)

Die in großer Zahl bei der Durchführung der kontinentalen Tiefbohrung anfallenden Meßdaten müssen erfaßt, archiviert und sowohl mit wissenschaftlicher als auch mit operativer Zielsetzung ausgewertet werden. Nach Empfehlung einer Arbeitsgruppe "Zentrale Datenerfassung", die sich aus Vertretern der Industrie, des Schwerpunktes und der KTB-Projektleitung zusammensetzt, sollte an der Bohrstelle ein zentraler Rechner vorhanden sein, der einen schnellen Zugriff für Entscheidungsfindungen des Bohrbetriebs sowie für wissenschaftliche Experimente gestattet. Er soll den Wissenschaftlern eine Auswertung vor Ort ermöglichen und eine Archivierung der Rohdaten gestatten. Dieser Rechner hat 3 periphere Unterrecheneinheiten zusammenzufassen: Die Bohrtechnik, das Feldlabor und die Bohrlochmeßtechnik. Im Rahmen eines DFG-Projektes wurde bereits 1985 ein umfangreicher Bericht "Untersuchungen zu einer Computereinheit für das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm" vorgelegt (FRIES und HÄNEL 1985).

Realisiert werden soll schon bis zum Beginn der Bohrarbeiten an der Vorbohrung im 3. Quartal 1987 mit PC's die Datenerfassung und -verarbeitung für die technische Durchführung der Vorbohrung, für das Feldlabor und die Dauermeßstation. Die Installation der gesamten Recheneinheit bis zum Beginn der Vorbohrung ist aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Das endgültige Konzept der Data Unit wird z. Zt. noch erarbeitet.

3.1.7 Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben

Im Bereich der Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die von der Projektleitung KTB initiiert und betreut werden, sind eine Reihe von Vorhaben begonnen worden, nachdem die Bewilligung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie erfolgt ist. Hierzu gehören die Entwicklung von Bohrloch-Meßsonden wie Televier und Wärmeleitfähigkeitssonde, Probleme der Kühlung von Sonden bei hohen Temperaturen, die Installation einer Monitor-Station zur Messung von Spannungen in der Vorbohrung, sowie thermomechanische/gebirgsmechanische Berechnungen.

Weitere Projekte befinden sich in der Planung und sollen 1987 begonnen werden. Partner in den KTB F- und E-Vorhaben sind Industriefirmen, Hochschulinstitute und Geologische Landesämter.

3.1.8 Technische Limitationen

Hinsichtlich der technischen Limitationen der Datengewinnung ist anzumerken:

- Temperatur:
Im Normalfall sind die Bohrlochmeßgeräte bis ca. 170 - 180 °C ausgelegt, eine Reihe von Meßsonden ist jedoch bereits bis 250 °C einsetzbar ("Hostile Environment Logging), ganz vereinzelt bis 300 °C verfügbar. Weitere Entwicklungen bis 300 °C laufen bzw. werden noch initiiert, über 300 °C ist jedoch mit extremen meßtechnischen Schwierigkeiten zu rechnen.
- Teufe:
Kerngewinnung und Teste werden mit zunehmender Teufe erschwert, Tragfähigkeit der Kabel bis 11 - 12 km verfügbar, 12 - 14 km sind jedoch mit Modifikationen am Kabel erreichbar.
- Druck:
Bohrlochmeß-Sonden sind als Sonderanfertigung bereits bis 2 100 bar (30 000 psi) ausgelegt und erprobt. Mit höheren Drücken wird bei diesem Projekt nicht gerechnet.
- Spülung:
In größerer Tiefe und bei höheren Temperaturen notwendige komplexere Spülungen erschweren Aussagefähigkeit der Analysen, Erkennen von Zuflüssen und Probennahme.

3.1.9 Konzept

Das von der Projektleitung KTB in Zusammenarbeit mit dem Schwerpunkt KTB und dem Koordinierungsausschuß KTB erarbeitete und im vorherigen kurz skizzierte Konzept der Datengewinnung aus Vor- und Hauptbohrung versucht sowohl der wissenschaftlichen Zielsetzung als auch den technischen Möglichkeiten wie auch dem vorgegebenen Kostenrahmen gerecht zu werden.

Zur **Untertage-Datengewinnung** (Logging) ist in diesem Rahmen zu bemerken:

- Bohrlochmeß-Programm
 - . Während der Bohrphase abschnittsweise Durchführung der prioritären Messungen, auch unter dem Gesichtspunkt der Datensicherung und schnellen Auswertung
 - . Nach der Bohrphase Durchführung der übrigen Messungen und der Langzeit-Versuche
- Kerngewinnung
 - . Kerne über die gesamte Bohrteufe in der Vorbohrung, nur in Teilbereichen der Hauptbohrung nach geowissenschaftlichen Vorgaben und technischen Möglichkeiten
 - . Seitenkerne nach Abteufen beider Bohrungen in ausgewählten Bereichen nach Auswertung der Logs und Teste

- Experimente/Teste im Bohrloch und zwischen beiden Bohrlöchern nach wissenschaftlicher Priorität, Zeitaufwand und Risiko.

Zur **Übertage-Datengewinnung:**

- Im Rahmen der Bohrungsbearbeitung werden in einer "Sample Unit" (Container) unmittelbar am Turm analog kommerzieller Erdöl-/Erdgas-Bohrungen die Spülproben aufbereitet, erste Beschreibungen und Untersuchungen durchgeführt sowie die Gase in der Spülung laufend gemessen.
- In einem Feldlabor auf dem Bohrplatz werden zahlreiche Untersuchungen vor Ort durchgeführt, die
 - . zeitlichen Veränderungen unterliegen
 - . kontinuierlich erfaßt werden müssen
 - . Grundlage nachgeschalteter Untersuchungen sind.

Das Konzept beinhaltet sowohl bewährte Untersuchungsmethoden/Strategien der Tiefbohrindustrie bzw. der Erdöl-/Service-Industrie und nutzt die Erfahrung kommerzieller Anbieter durch Vergabe entsprechender Aufträge, trägt jedoch andererseits den Besonderheiten des KTB-Forschungsprojektes Rechnung, die u. a. darin bestehen:

- Kristalline Gesteine statt sedimentäres Gebirge,
- Hohe Ansprüche an Umfang und Genauigkeit der Daten,
- Langzeit-Messungen bzw. Versuche/Teste,
- Mitarbeit zahlreicher Disziplinen und Arbeitsgruppen,
- Durch übergroße Tiefe bedingte Probleme wie Druck und Temperatur.

Das Konzept "Datengewinnung Vor- und Hauptbohrung" für das KTB-Projekt läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Versuch einer optimalen Datenerfassung untertage und übertage zur Erreichung der wissenschaftlichen Ziele vor dem Hintergrund technischer Möglichkeiten, des Zeitaufwandes und der Kosten.
- Kombination bewährter Strategien (aus der Industrie) und den Besonderheiten des Forschungsprojektes.
- Schließung noch vorhandener technologischer Lücken durch Förderung von F- und E-Vorhaben.
- Schnelle Datenverarbeitung und erste Interpretation an der Bohrung als Grundlage für Entscheidungen und als Basis nachgeschalteter detaillierter Untersuchungen.
- Datensicherung durch abschnittweise Messung prioritärer Parameter.
- Straffe Organisation durch die Projektleitung KTB und Koordination der Arbeiten zusammen mit dem Schwerpunkt KTB.

3.1.10 Literatur

- DIETRICH, H.G. & HEINISCH, M. (1986): Die geowissenschaftliche Bohrungsbe-
arbeitung vor Ort unter Einbeziehung des Feldlabors.
- KTB-Kolloquium; Seeheim.
- DRAXLER, J. (1986): Erfahrungen mit Bohrlochmessungen im Kristallin. - KTB-
Kolloquium; Seeheim.
- FRIES, A.P. & HÄNEL, R. (1985): Untersuchungen zu einer Computereinheit für
das Deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm. - NLFb; Hannover.
- HÄNEL, R. (1986): Logging Strategie für das KTB. - KTB-Kolloquium; Seeheim.
- MARX, C. & RISCHMÜLLER, H. (1986): Drilling and Coring Techniques for Hard
Rock. - Erdöl Erdgas Kohle, 102: 33-337; Hamburg.

3.2 HÄNEL, R.: Logging Strategie für das KTB

3.2.1 Zusammenfassung

Sowohl Bohrlochmessungen als auch das Ziehen von Kernen stellen ein Risiko für die supertiefe Bohrung dar. Die Logging Strategie beinhaltet deshalb als wesentliches Element das Abteufen einer Pilotbohrung mit einem umfangreichen Meßprogramm und einer vollständigen Kernentnahme. Damit wird erreicht:

- Entlastung der supertiefen Bohrung bis zur Teufe der Pilotbohrung.
- Korrelationsmöglichkeit der Bohrlochmeßergebnisse mit den an Bohrkernen erzielten Ergebnissen. Dies erlaubt später in besonderen Situationen Entscheidungen zu treffen, ob den Bohrlochmessungen oder dem Kernen der Vorzug zu geben ist.
- Schaffung eines Test- und Experimentierfeldes zur Überprüfung, inwieweit die für Sedimentgesteine entwickelten Meßmethoden auf kristalline Gesteine übertragen werden können. Zugleich ist die Möglichkeit gegeben, neue und weiterentwickelte Geräte zu testen.

Die Messungen in der Pilotbohrung und der supertiefen Bohrung sollen dabei nach folgendem Schema ablaufen:

- während des Abteufens sind nur unbedingt notwendige Messungen entsprechend der Prioritätenliste auszuführen;
- nach Fertigstellung der Bohrung erfolgt die Durchführung aller übrigen Messungen und Testarbeiten.

Die Realisierung der Gesamtstrategie erfordert mehrere konkrete Detailschritte, wie Erstellung einer Prioritätenliste, Marktstudien, Arbeitsgruppen zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Meßmethoden auf kristalline Gesteine, Arbeitsgruppen zur Neu- und Weiterentwicklung von Meßgeräten und Interpretationsmethoden, Arbeitsgruppen für über das Maß der Service-Firmen hinausgehende Interpretationen, Bereitstellung einer permanenten Logging Unit sowie die Erarbeitung eines Bohrlochmeßprogramms.

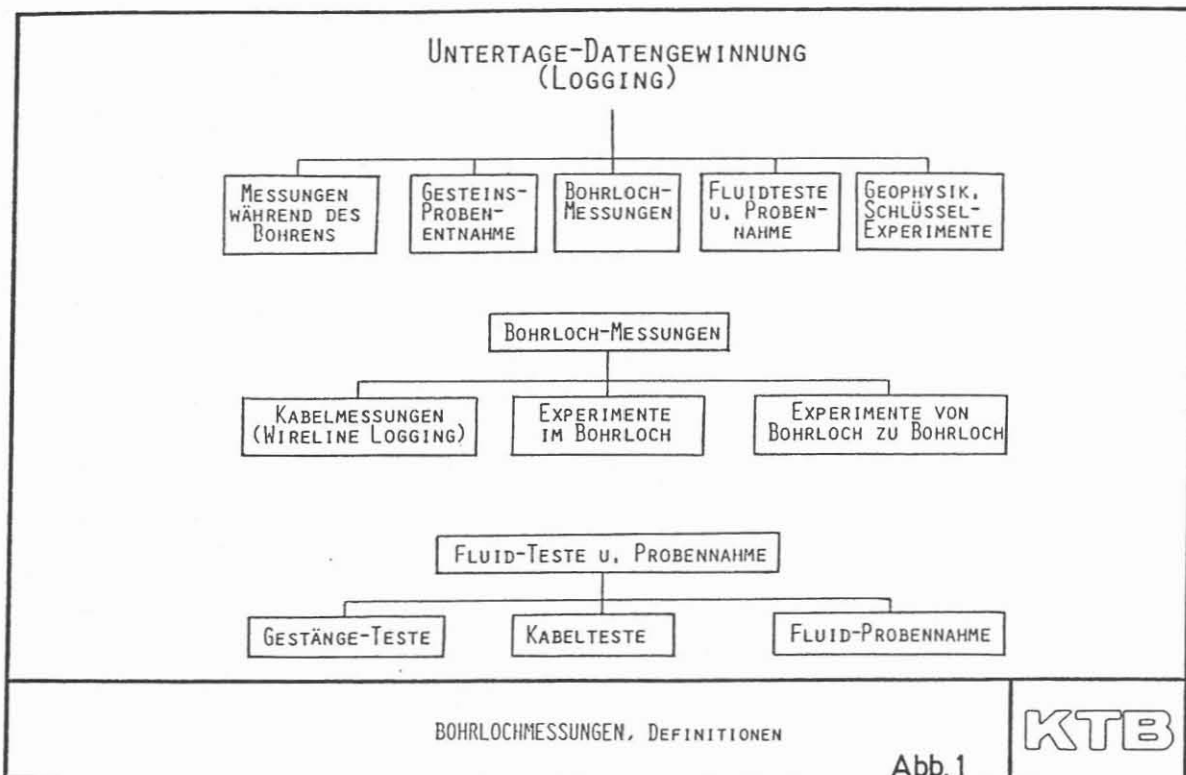
3.2.2 Einleitung

Der für das Projekt ideale Fall, Kernentnahme über die gesamte Bohrlochtiefe sowie Ausführung aller verfügbaren Bohrlochmessungen und Bohrlochexperimente, ist aus Kostengründen nicht möglich. Eine unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Zielvorstellungen sinnvolle Reduzierung des Bohrlochmeßprogramms ist daher unumgänglich. Aufgabe des Arbeitsbereiches Bohrlochmessungen der Projektleitung des KTB muß es deshalb sein, eine Strategie zu entwickeln, die mit geringen Kosten einen optimalen Informationsgewinn aus der Kruste ermöglicht.

3.2.3 Definitionen

Die Gesamtheit der Untertage-Datengewinnung wird im folgenden als Logging bezeichnet, sofern die Datengewinnung in Abhängigkeit von der Tiefe möglich ist. Folglich umfaßt das Logging folgende Disziplinen (Abb. 1):

- Messungen während des Bohrens (MWD - Measurement While Drilling). Dieses Verfahren ist besonders für die Bohrtechnik von Interesse. Es liefert aber auch Aussagen zur Temperatur, zum Druck, zur elektrischen Leitfähigkeit und zur natürlichen Gamma-Strahlung. Da das MWD sehr kostspielig ist (DEVAY et al. 1986), muß die Entscheidung, ob das MWD eingesetzt werden soll oder nicht, im wesentlichen der Bohrtechnik vorbehalten bleiben.
- Gesteinsprobenentnahme. Diese ist ganz wesentlich an die zu verwendende Bohrtechnik gebunden. Die Diskussionen hierzu sind noch nicht abgeschlossen; auf Details soll deshalb nicht näher eingegangen werden.
- Bohrlochmessungen. Darunter sind die Messungen mit Sondenkörpern am Kabel (Wireline Logging), die tiefenabhängigen Experimente im Bohrloch und die Experimente von Bohrloch zu Bohrloch zu verstehen.
- Fluidteste und Probenentnahme. Diese stellen im Sinne der wissenschaftlichen Ziele einen besonderen Schwerpunkt dar, der durch die gesonderte Erwähnung hervorgehoben werden soll.
- Geophysikalische Schlüsselexperimente. Unter Schlüsselexperimenten sind geophysikalische Untersuchungen zu verstehen, die nur mit Hilfe einer super-tiefen Bohrung zu realisieren sind (FKPE 1986). Wegen ihrer geschlossenen Darstellung werden diese ebenfalls gesondert ausgewiesen.

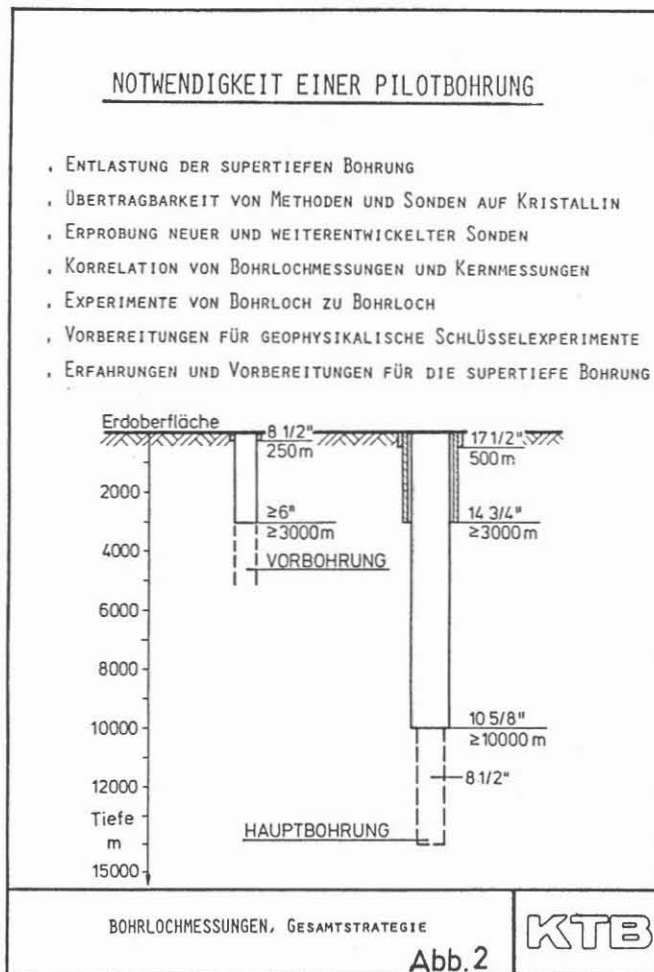


3.2.4 Gesamtstrategie

Die Realisierung der wissenschaftlichen Zielvorstellungen erfordert eine supertiefe Bohrung. Vorrangiges Ziel sollte daher ein möglichst risikofreies und zügiges Abteufen der Bohrung sein. Bei der Entlastung der Bohrung sind mithin folgende Punkte zu bedenken:

- Jede Messung stellt ein Risiko dar.
- Messungen verursachen zusätzliche Bohranlagen-Kosten.
- Eine supertiefe Bohrung muß stets großkalibrig angesetzt werden. Durchmesser von 23" und 14 3/4" im oberen Teil der Bohrung sind für Messungen jedoch meist ungeeignet. Vorbohren, Messen und anschließendes Aufbohren erfordert aber ebenfalls zusätzliche Kosten und erhöht das Risiko durch mögliche Fangarbeiten auf gebrochenes Gestänge.

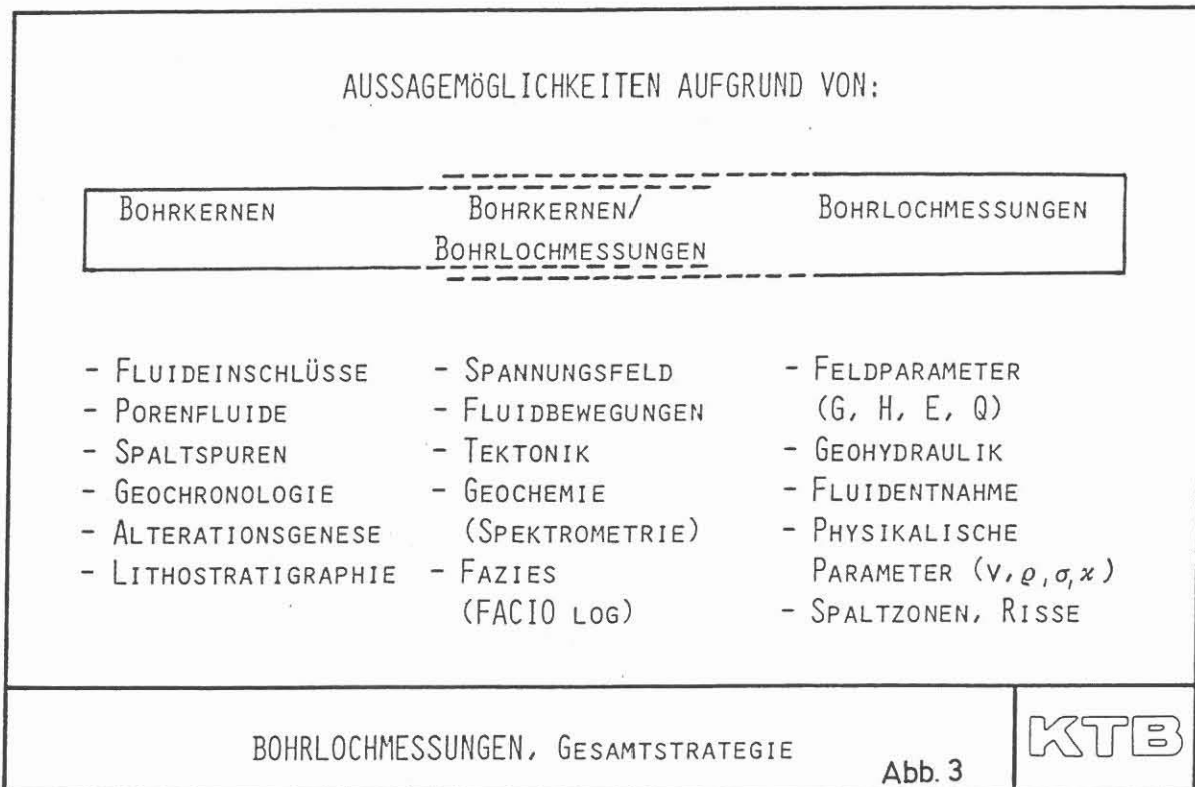
Daraus resultiert die Notwendigkeit einer gesonderten Bohrung (Vorbohrung, Pilotbohrung). Weitere Gründe für eine Pilotbohrung sind in Abb. 2 aufgeführt. Die supertiefe Bohrung könnte alsdann ohne Unterbrechung bis zur Endteufe der Vorbohrung abgeteuft werden, wobei in der Vorbohrung alle geplanten Messungen auszuführen sind.



Die Durchführung der Bohrlochmessungen in der Pilotbohrung und in der Tiefbohrung zur Realisierung der wissenschaftlichen Zielvorstellungen ist in jeweils zwei Schritten vorgesehen.

Pilotbohrung:

- Durchführung der Bohrlochmessungen in der Bohrung während des Abteufens gemäß einer Prioritätenliste. Da diese Bohrung mit geringerem Durchmesser gebohrt werden wird, sind für diesen Teufenabschnitt ideale Meßbedingungen gegeben. Gleichzeitig sollte der Korrelation von Bohrlochmeßergebnissen mit Ergebnissen an Kernen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Dies ermöglicht später in besonderen Situationen Entscheidungen zu treffen, ob den Bohrlochmessungen oder dem Kernen der Vorzug zu geben ist (Abb. 3).
- Durchführung der Bohrlochmessungen in der Bohrung nach Abschluß der Bohrarbeiten unter Einsatz aller Methoden, die nicht in der Prioritätenliste enthalten sind (EARTH LABORATORY).



Tiefbohrung:

- Durchführung der Bohrlochmessungen in der Bohrung während des Abteufens mit einer, aufgrund der in der Pilotbohrung gemachten Erfahrungen, verbesserten Prioritätenliste zum Zwecke der Minderung des Risikos für die Bohrung sowie der Kostenreduzierung aufgrund der Stillstandszeiten.
- Durchführung der Bohrlochmessungen in der Bohrung nach Abschluß der Bohrarbeiten unter Einsatz aller Methoden inkl. Langzeitbeobachtungen, die nicht in der Prioritätenliste enthalten sind (DEEP EARTH LABORATORY).

Die Gesamtstrategie sieht weiterhin vor, daß die erprobte Ausrüstung der Service-Firmen eingesetzt und das erworbene Know-how dem Projekt nutzbar gemacht werden soll. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden auch KTB-eigene Meßsonden angestrebt, sofern ein häufiger Einsatz vorgesehen ist und diese einfach im Aufbau sind, wie z. B. Temperatursonde, Drucksonde, Fluidsampler etc.

3.2.5 Detailschritte

Die Realisierung der Gesamtstrategie erfordert mehrere konkrete Detailschritte.

Die Prioritätenliste stellt eine Liste von unbedingt notwendigen Bohrlochmessungen dar, die während des Abteufens durchgeführt werden müssen. Die Gründe hierfür sind z. B.:

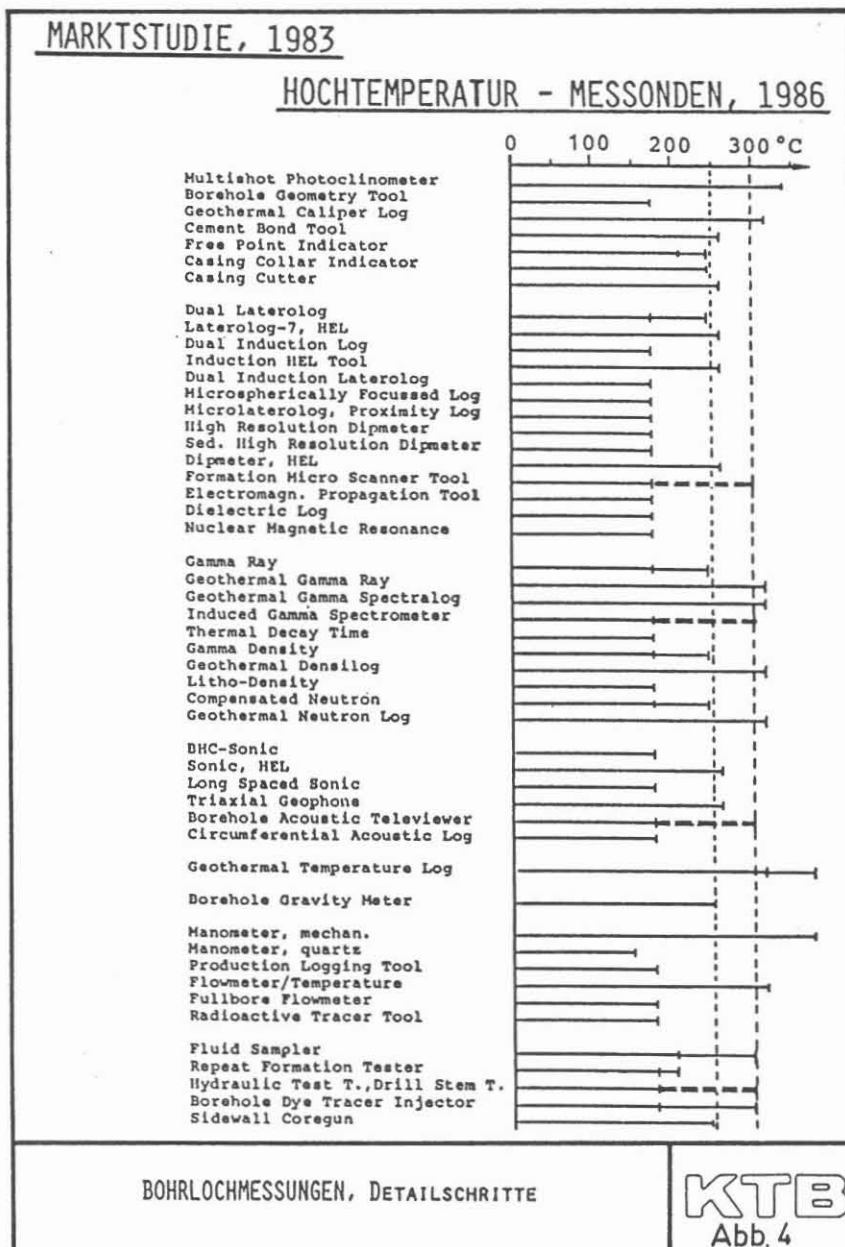
- Schnelle Entscheidungsfindung für den bohrtechnischen Betrieb sowie für das wissenschaftliche Programm (z. B. Kernentnahme, Ausführung eines hydraulischen Tests),
- umgehende Erfassung der in situ-Bedingungen, da diese sonst durch den Bohrbetrieb unwiderruflich verfälscht werden, z. B. durch Eindringen der Spülung in den Porenraum, außerdem leidet die Stabilität des Bohrlochs durch die mechanisch-hydraulische Belastung der Gestängebefahrung (Meißelwechsel).

Im mehreren Arbeitssitzungen wurde eine Liste gemeinsam mit Geowissenschaftlern erarbeitet. Der gegenwärtige Stand, Meßziele und Meßmethoden sind folgende:

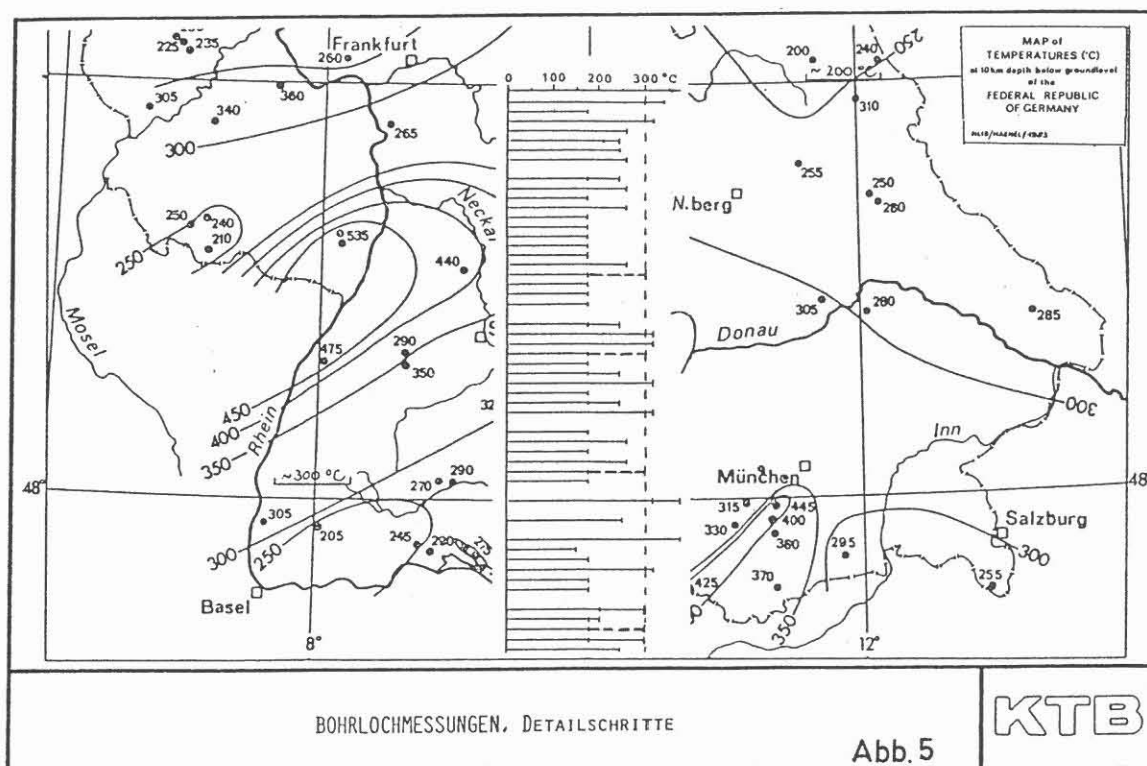
- Beschreibung des thermodynamischen Zustandes:
Temperatur, Druck, Flüssigkeitsproben
Geräte: Temperaturen, Druck, FS, AMS, NGS, WLM
- Ermittlung der Porenfluide und der Fluidbewegungen:
Porosität, Permeabilität
Geräte: HIT, SDT/WF, LDT/CNL/NGS, DLL/MSFL
- Strukturelle und texturale Beschreibung:
Kluftsysteme, Einfallen, Streichen
Geräte: BHTV, FMST, SHDT
- Voraussagen für Bohrtechnik und Wissenschaft:
Reflexionshorizonte, Geschwindigkeiten, Geschwindigkeitsänderungen (VSP)
Geräte: Geophone
- Standfestigkeit der Bohrung:
Spannungsfeld, Break-out Orientierung
Geräte: Hydrofrac Test Tool, BGT

Diese Prioritätenliste ist zugleich Entscheidungsgrundlage dafür, welche Methoden ggf. schwerpunktmäßig weiterentwickelt und gefördert werden sollten, um die gesteckten Projekt-Ziele zu erreichen.

Die im Jahre 1983 durchgeführte Marktstudie über verfügbare Meßinstrumente wurde auf den neuesten Stand gebracht (verlängerte Balken in Abb. 4). Die unterbrochenen Linien geben an, daß im Sinne der Prioritätenliste Entwicklungsarbeit zur Erreichung der 300 °C-Einsatzgrenze unbedingt notwendig ist - entsprechende Maßnahmen wurden bereits eingeleitet. Weiterentwicklung über 300 °C hinaus würde den finanziellen Rahmen des KTB-Projektes sprengen.



In Abb. 5, einem Kartenausschnitt des Temperaturfeldes in 10 km Tiefe, werden die Temperatureinsatzgrenzen der Meßgeräte dem bisher bekannten Temperaturfeld der Oberpfalz und des Schwarzwaldes gegenübergestellt. Damit sollen noch einmal die Grenzen der Geräteeinsatzmöglichkeiten im Falle einer Bohrtiefe von 14 km verdeutlicht werden. Gleichzeitig wird daraus ersichtlich, daß die von drei unterschiedlichen Arbeitsgruppen ermittelten Ergebnisse - auf der Basis des konduktiven Wärmetransports - recht gut übereinstimmen. Für den Schwarzwald ist eine Temperaturerniedrigung aufgrund von Wasserbewegung in größerer Tiefe nicht auszuschließen.



BOHRLOCHMESSUNGEN, DETAILSCHRITTE

Abb. 5

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

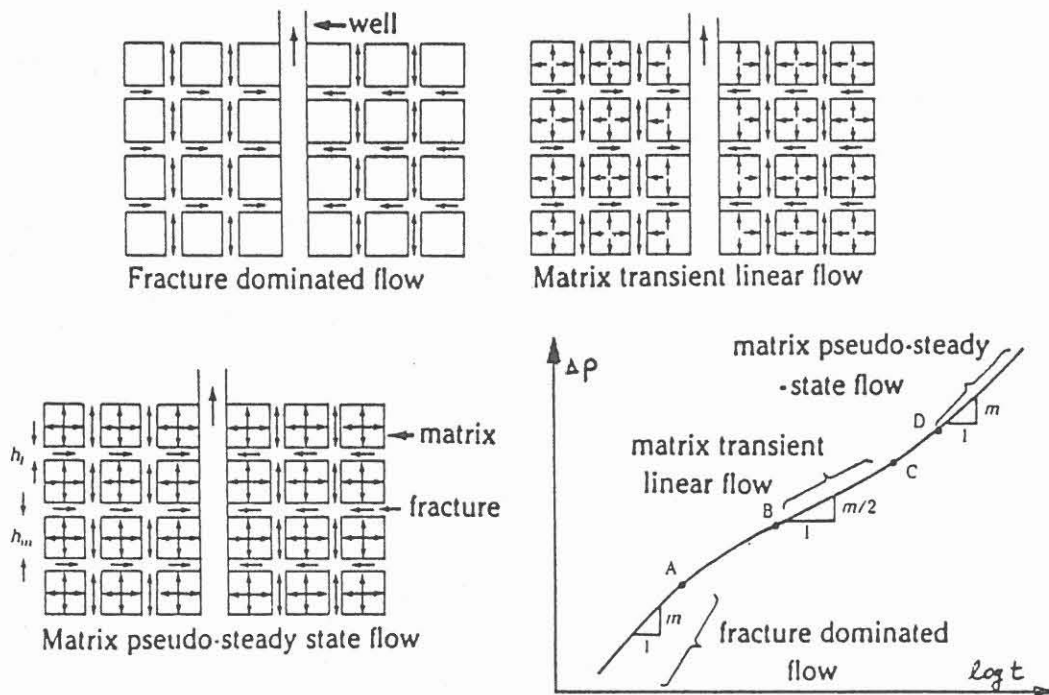
Die zur Verfügung stehenden Bohrlochsonden wurden für den Einsatz in sedimentären Gesteinen entwickelt; ihre Übertragbarkeit ist daher im einzelnen noch zu überprüfen. Einige hierfür zu berücksichtigende Problempunkte sind in Abb. 6 aufgelistet, ebenso die Anzahl der Arbeitsgruppen aus Hochschulen und Ämtern, die auf diesem Gebiet tätig sind. Die beigegefügte Skizze soll auf ein weiteres wesentliches, aber noch nicht eindeutig gelöstes Problem hinweisen; auf die Wegsamkeit von Fluiden. Die hydraulischen Tests werden sicher ein Meßergebnis liefern (unten rechts), doch die Möglichkeit einer sinnvollen Interpretation hängt davon ab, inwieweit das Kristallin durch ein geeignetes Interpretationsmodell approximiert werden kann. Aus der Vielzahl der Modelle wurden drei skizziert.

Notwendige Neu- und Weiterentwicklungen wurden, ausgenommen Packerelemente, gemäß Abb. 7 in Angriff genommen. Weitere Details hierzu können der Arbeit FKPE (1986) entnommen werden. Im unteren Teil ist das Schema einer kombinierten Kühleinheit dargestellt.

ÜBERTRAGBARKEIT AUF KRISTALLINE GESTEINE

- WIDERSTANDSMESSUNGEN: HOCHOHMIGES KRISTALLIN
- NEUTRONENSONDEN: OPTIMIERUNG DER ENERGIEFENSTER
- POROSITÄT, PERMEABILITÄT: $P \leq 3 \%$, $k \approx 10^{-9} - 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$
- HYDRAULISCHE TESTE: PACKER (T, t, ΔP)
- INTEGRIERTE INTERPRETATION: OPTIMIERUNG VON KOMBINATIONEN

9 ARBEITSGRUPPEN, INDUSTRIEVERHANDLUNGEN



BOHRLOCHMESSUNGEN, DETAILSCHRITTE

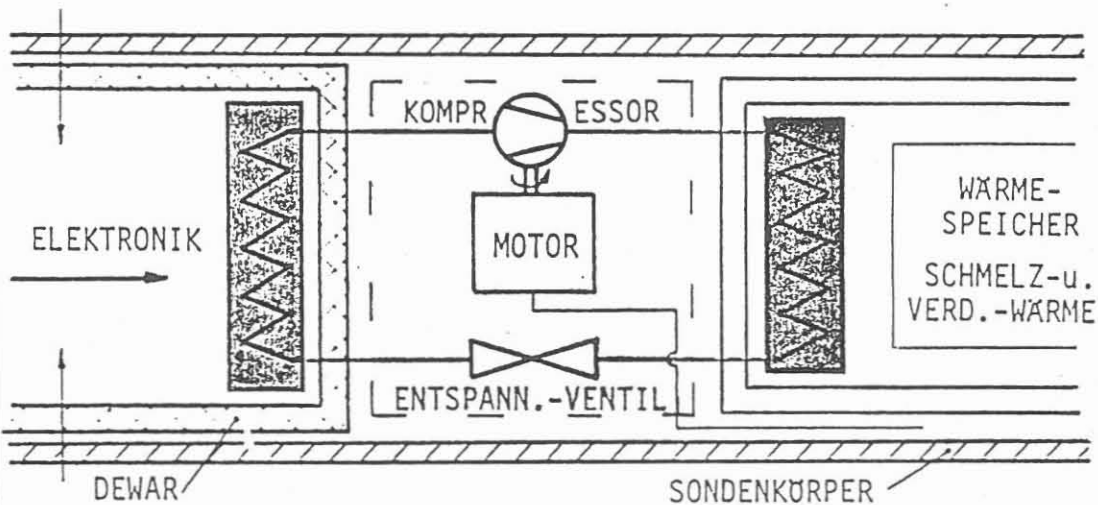
KTB

Abb.6

NEU- UND WEITERENTWICKLUNGEN

- . KÜHLUNG: WÄRMESENKEN, PELTIERELEMENT, MITTELS SPÜLUNG
- . TEMPERATURBEREICHS-ERWEITERUNG: Z.B. WÄRMELEITFÄHIGKEISSONDE, MAGN. SUSZEPTIBILITÄT, SPANNUNGSMESSUNGEN
- . HYDRAULISCHE TEST-TOOLS: PACKER
- . WEITERENTWICKLUNGEN: Z.B. AKUST. TELEVIEWER, TRANSIENTE ELEKTROMAGNETIK
- . NEUENTWICKLUNGEN Z.B. 3-ACHS. FLUXGATE MAGNETOMETER, SPANNUNGSMESSUNGEN

10 ARBEITSGRUPPEN, INDUSTRIEVERHANDLUNGEN



BOHRLOCHMESSUNGEN, DETAILSCHRITTE

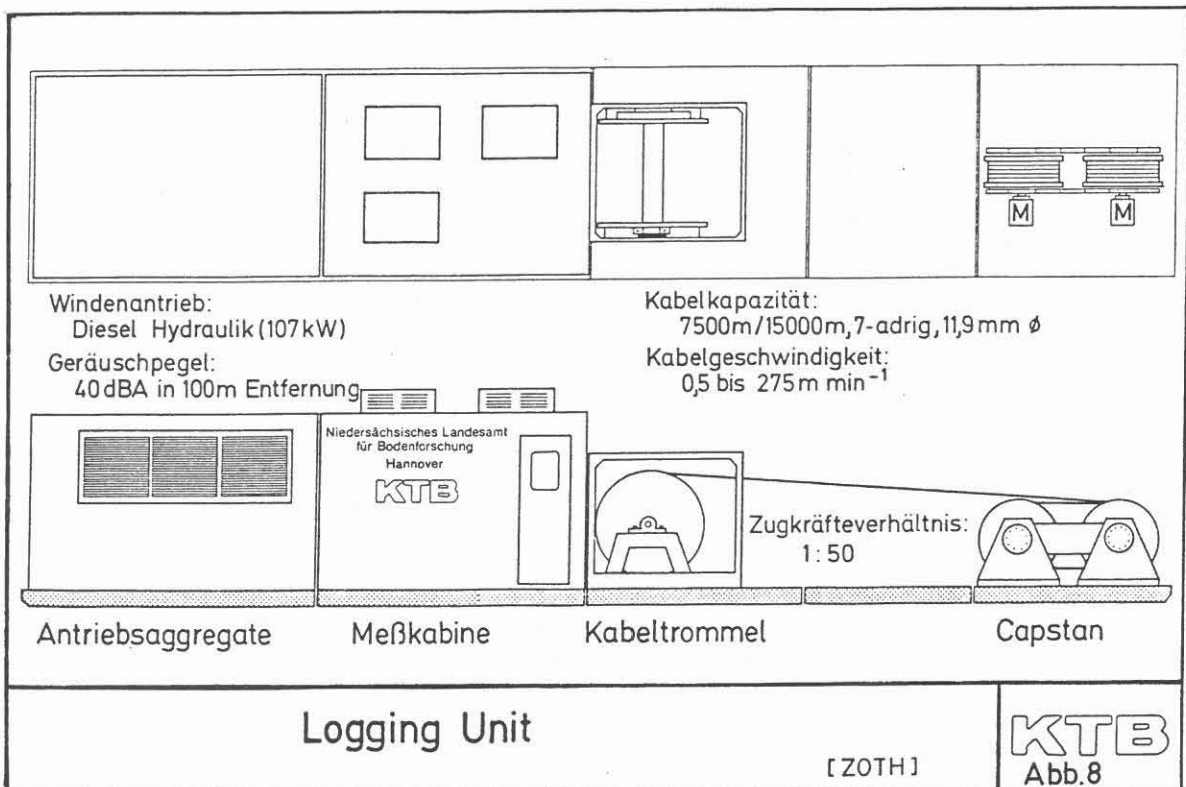
KT B

Abb.7

Schließlich wurden mehrere Auswertegruppen geschaffen mit dem Ziel, Auswertungen sicherzustellen, die über das Maß der von den Service-Firmen angebotenen Auswertungen hinausgehen:

- | | |
|--------------------------------|------------|
| - Geothermik | Burkhardt |
| - Porosität, Permeabilität | Schopper |
| - Geohydraulik | Pusch |
| - Lithologie, Struktur, Textur | Wohlenberg |
| - Seismik | (?) |
| - Spannungsmessungen | Born |
| - Elektr. Messungen | Greinwald |
| - Gravimetrie | Richter |
| - Magnetik, Magnetotellurik | Bosum |

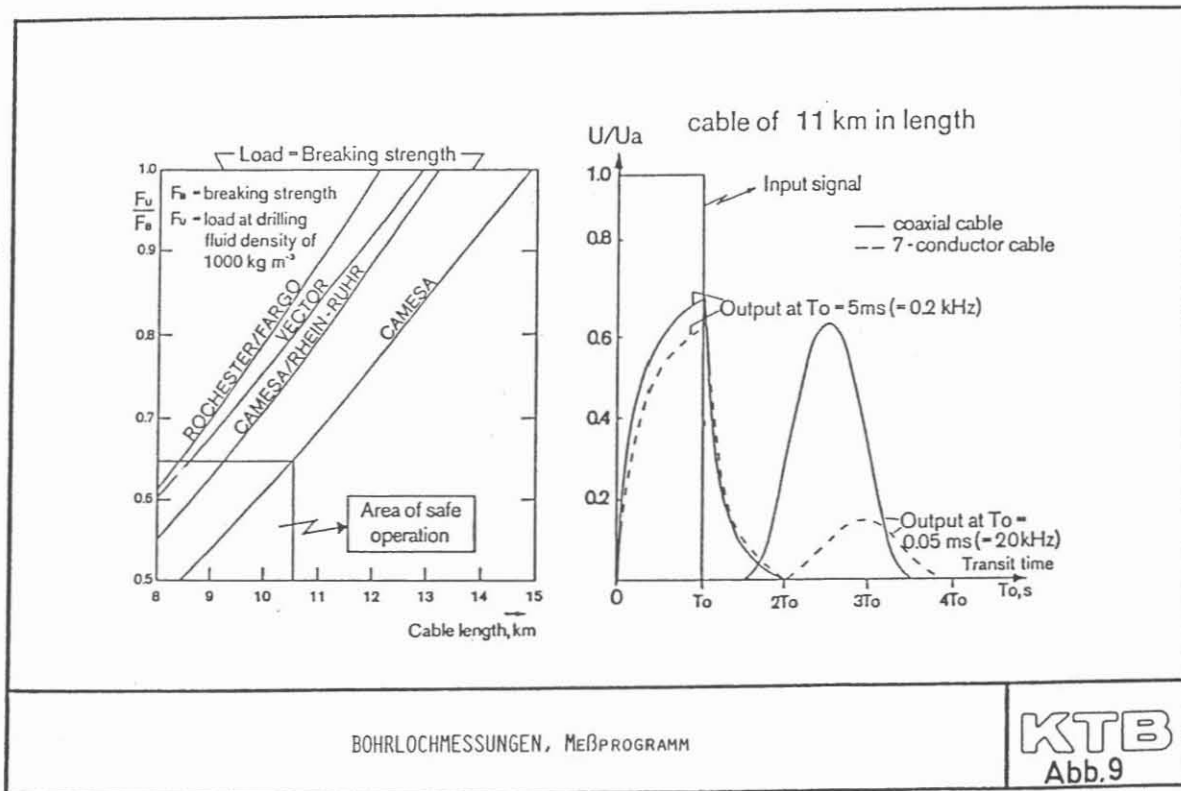
Es ist vorgesehen, daß sowohl für die Pilotbohrung als auch für die supertiefe Bohrung ständig eine Logging Unit zur Verfügung steht. Dabei ist an eine schallgedämmte, ausbaufähige modulare Logging Unit gedacht; Abb. 8. Für Tiefen über 7 km wird eine Capstan Unit hinzugefügt. Diese bewirkt eine Zugentlastung für das Kabel auf der Speichertrommel.



Im Falle von Kabellängen mit > 10 km werden die Zugfestigkeitsgrenzen sehr schnell erreicht; Signalverzerrungen sind ebenfalls zu erwarten (Abb. 9). Doch in beiden Fällen bieten sich Lösungen an, um Messungen bis in ca. 14 km Tiefe ausführen zu können. Die Temperatureinsatzgrenze liegt - analog den Meßgeräten - ebenfalls bei ca. $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 10).

Meßprogramme für die Realisierung der wissenschaftlichen Zielvorstellungen wurden bereits in der KBB-Studie (1983) und von DEVAY et al. (1986) aufgestellt. Ein umfassender Versuch ist in dem Bericht von DEVAY et al. (1986) wiedergegeben, der zugleich als Planungsgrundlage für die Projektleitung des KTB dienen soll.

In Abb. 11 und 12 ist das Meßprogramm schematisch im Sinne der Logging Strategie noch einmal dargestellt. Im Falle der supertiefen Bohrung muß man jedoch davon ausgehen, daß Messungen, die erst nach Fertigstellung der Bohrarbeiten ausgeführt werden sollen, z. T. bereits während des Abteufens notwendig sind. Dies wird durch die "einseitigen" Pfeile wiedergegeben. Im übrigen wird auf den Bericht DEVAY et al. (1986) verwiesen.



BOHRLOCHMESSUNGEN, MEßPROGRAMM

KTB
Abb.9

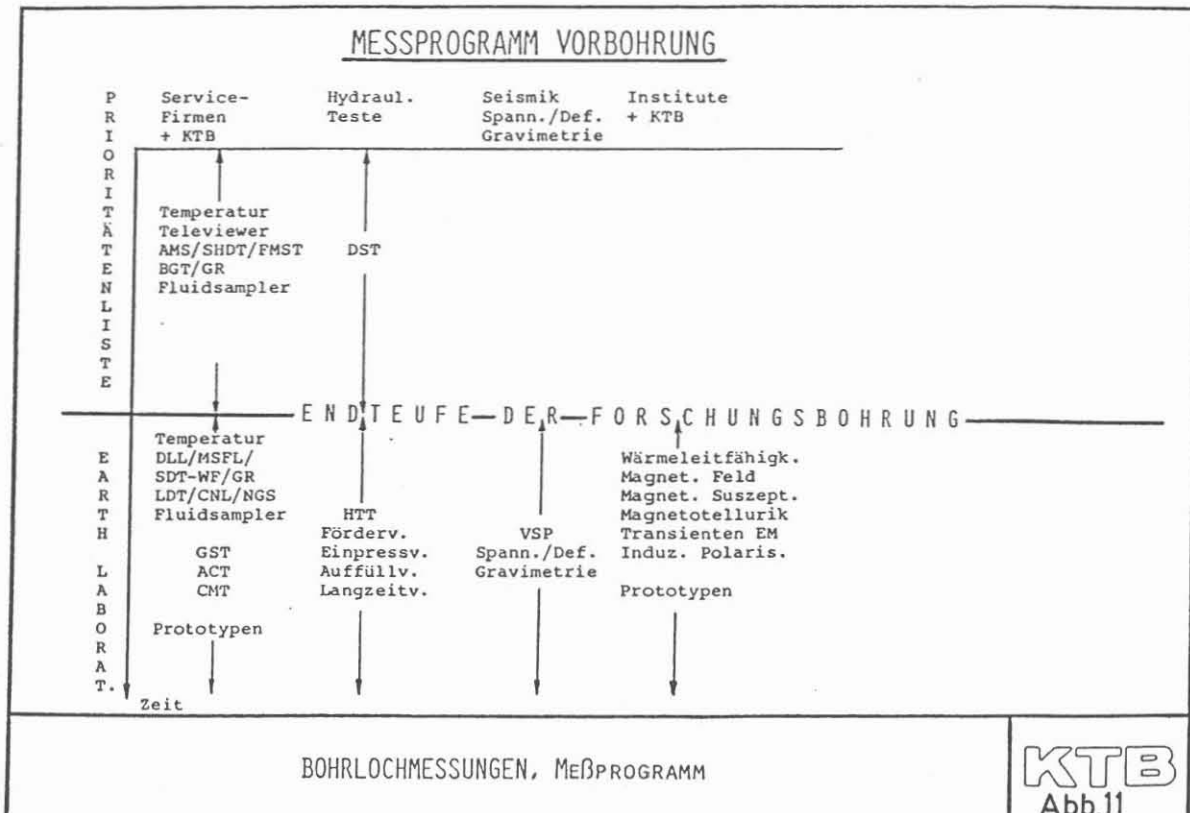
| Manufacture | Camesa/ USA | Rochester/ USA | Vector cable/ USA | US Steel Corp. | Vector cable/ USA | Rochester/ USA |
|-----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| Cable type | 7 J46 TFE 7-cond. | 7-430 7-cond. | 7-46 PFA 7-cond. | 7-cond. | 2-23 Coax coaxial | 2-H-314 C coaxial |
| Max. length available | 12 000 m | 13 000 m | 12 500 m | 13 000 m | 15 000 m | 10 000 m |
| Weight | 509 kg/km | 568 kg/km | 521 kg/km | 536 kg/km | 155 kg/km | 277 kg/km |
| Breaking strength | 8 165 kg | 8 462 kg | 9 723 kg | 9 080 kg | 2 924 kg | 4 140 kg |
| Temp. rating | 315°C | 315°C | 296°C | 288°C | 300°C | 190°C |
| Insulation type | TFE | TFE | PFA | PFA | PFA | Datex |

| | | | | | |
|----------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| D.C. armour resistance | 4 Ohm/km | 4 Ohm/km | ? | 4.1 Ohm/km | |
| D.C. conductor resistance | 34.45 Ohm/km | 34.45 Ohm/km | 23.7 Ohm/km | 36.1 Ohm/km | 1 : 34.1 Ohm/km a : 12.5 Ohm/km |
| Capacitance cond. to serve | 131 nF/km | 131 nF/km | 131 nF/km | 131 nF/km | 131 nF/km |
| Insulation cond. to serve | 2.2 nS/km | 2.2 nS/km | 15 pS/km | 3.3 nS/km | 2.2 nS/km |
| Voltage rating | 1000 VDC | 1000 V DC | 2000 VDC | 1000 V eff. | 760 V eff. |

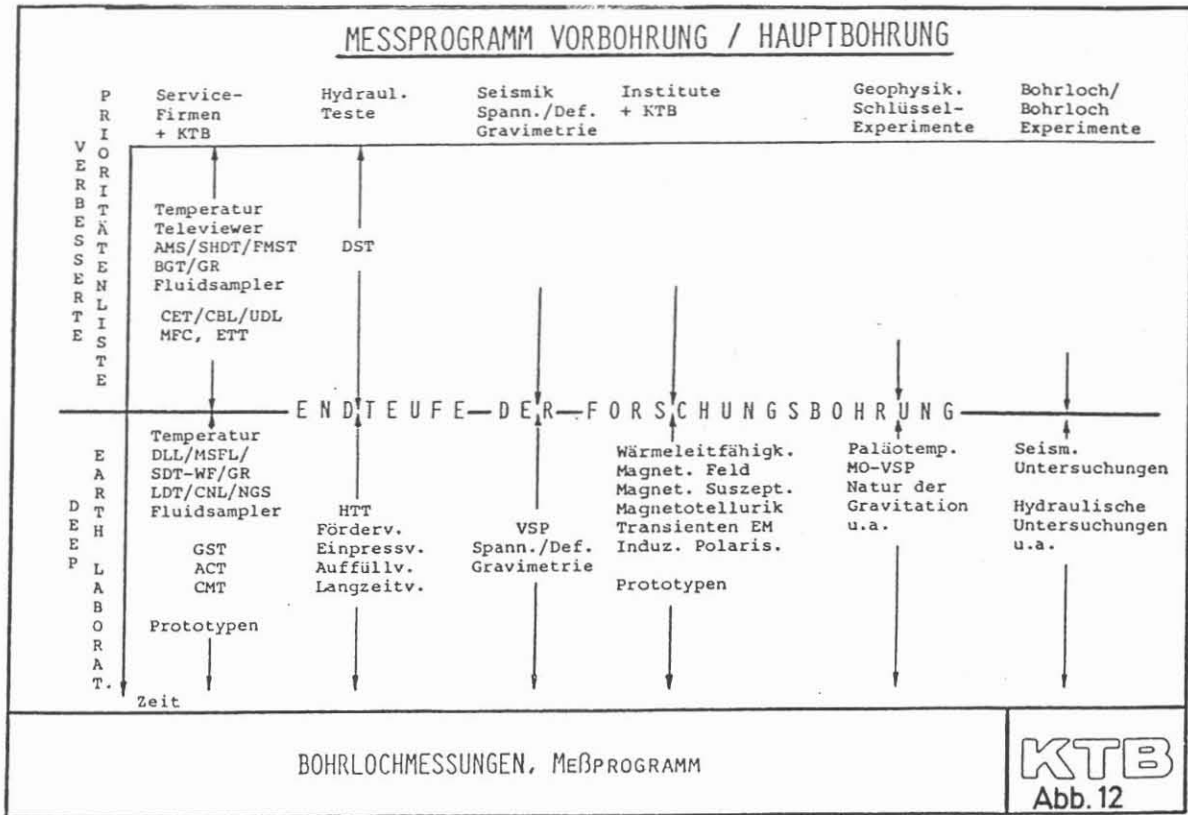
BOHRLOCHMESSUNGEN, MEßPROGRAMM

KTB
Abb.10

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

3.2.6 Literatur

- DEVAY, L., FRIES, A.P. & HÄNEL, R. (1983): Tätigkeitsbericht der Arbeitsgemeinschaft Bohrlochmessungen (ARGE 2); Kontinentales Tiefbohrprogramm. - NLfB, Archiv, Nr. 95173, Hannover.
- DEVAY, L., DRAXLER, J. & HÄNEL, R. (1986): Konzept eines Meß- und Untersuchungsprogrammes für die Vor- und Hauptbohrung des Kontinentalen Tiefbohrprogramms. - NLfB, Archiv, Nr. 99550, Hannover.
- FKPE (1986): Geophysikalische Schlüsselexperimente in der KTB. - Forschungskollegium Physik des Erdkörpers, Bochum.
- KBB (1983): Vorplanung und Untersuchung über die Realisierbarkeit Kontinentaler Tiefbohrungen für wissenschaftliche Zwecke einschließlich einer Kosten- und Risikoabschätzung sowie über eine Organisation für die Planung und Durchführung einer Tiefbohrung. - Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH, Hannover.

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:

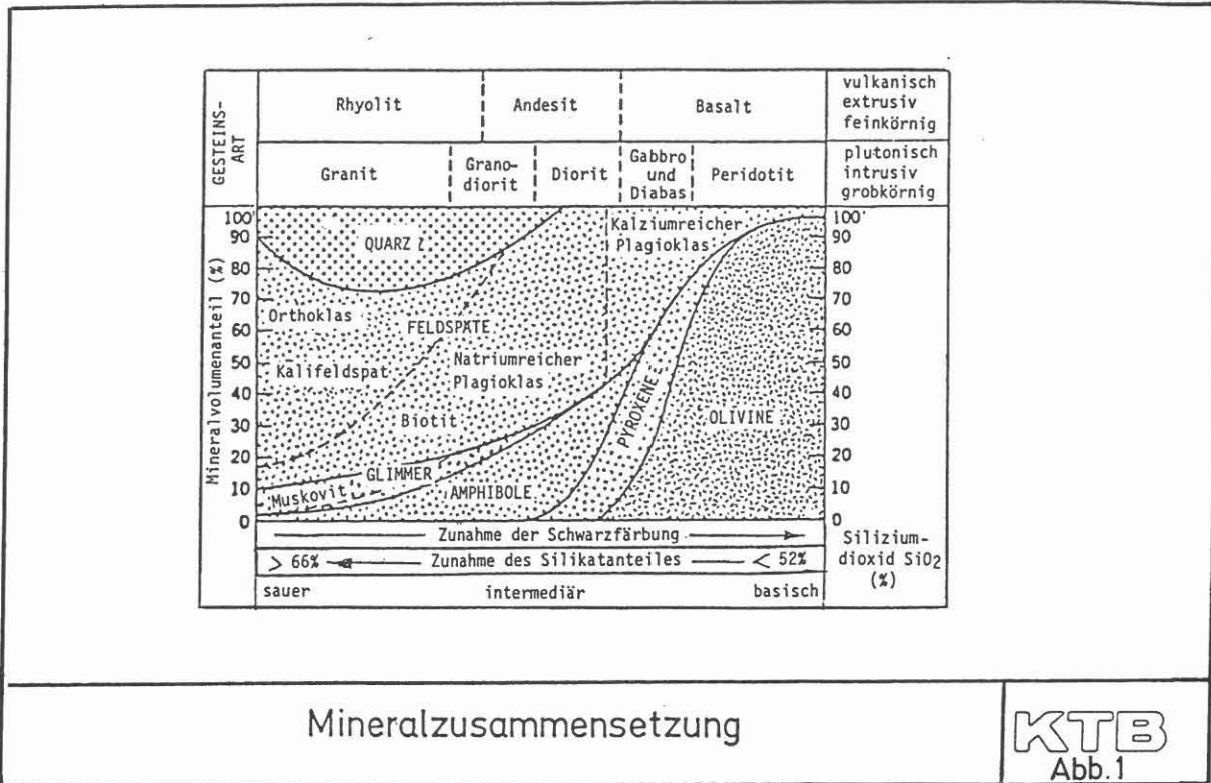
In Venezuela, Libyen, China und Argentinien sind es Bohrungen, die aus verwittertem Granit Erdöl fördern. In Japan und anderen Ländern wird aus kristallinem Gestein Erdgas produziert. Als Resultat der Suche nach alternativen Energien sind ab 1974 Bohrungen zum Studium der Hot Dry Rock Technik und zur 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.

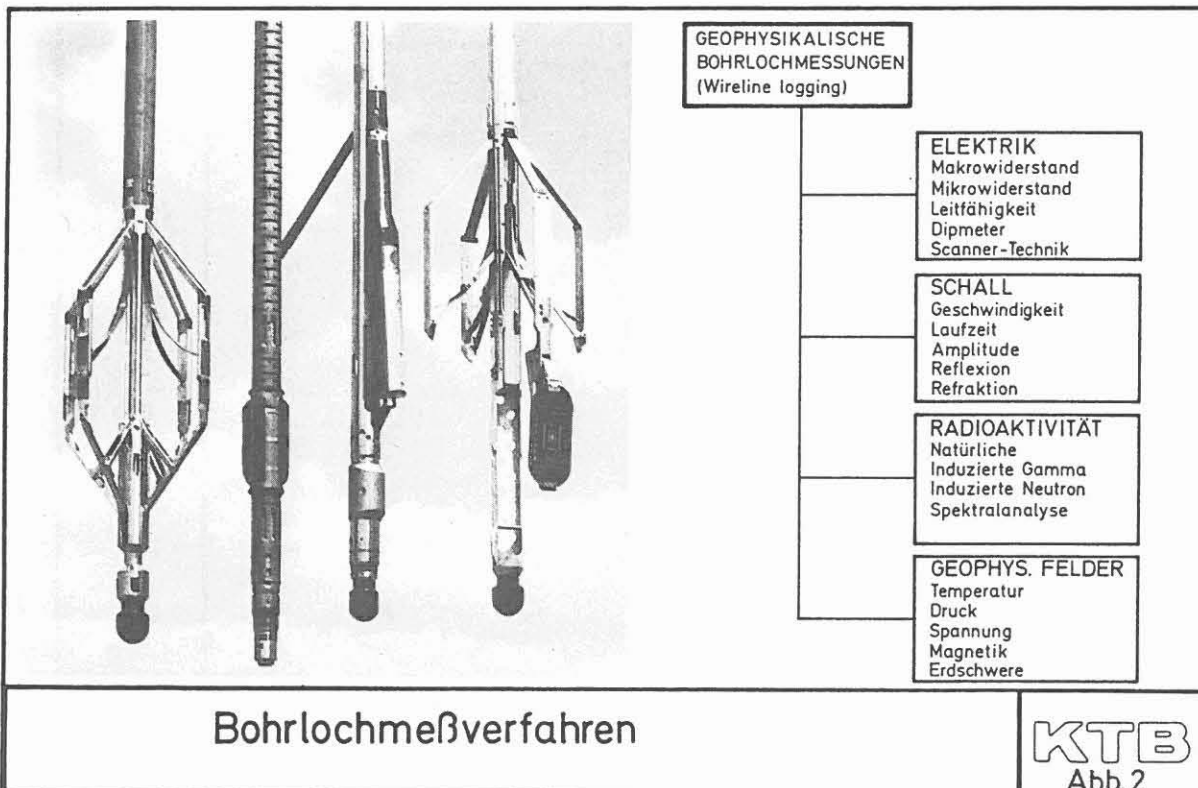
Ähnlich dem KTB-Projekt in Deutschland werden geowissenschaftliche Forschungsvorhaben in den Vereinigten Staaten und für geringere Teufen in Frankreich, Kanada und England geplant. Damit ist die Notwendigkeit gegeben, Methoden zu entwickeln, mit denen kristalline Gebirgsformationen erschlossen, untersucht 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).

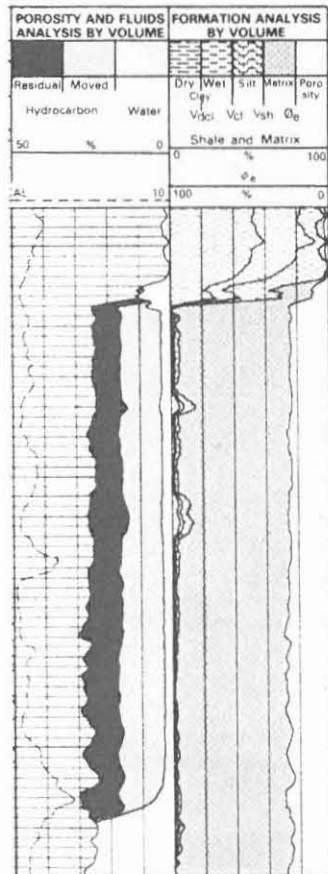
Elektrische Widerstands-, Radioaktivitäts- und akustische Meßgeräte müssen diesen Bedingungen angepaßt werden (Abb. 2). Die Erfassung der Temperatur, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktion, der Porenfluide und ihrer Bewegungen, auch über längere Zeiträume und in kleinsten Mengen, sind Prioritäten, die 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

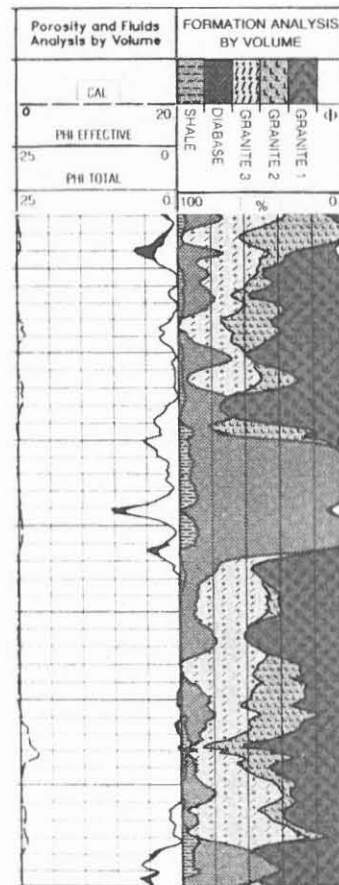


Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



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

KT B

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 Televier (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.

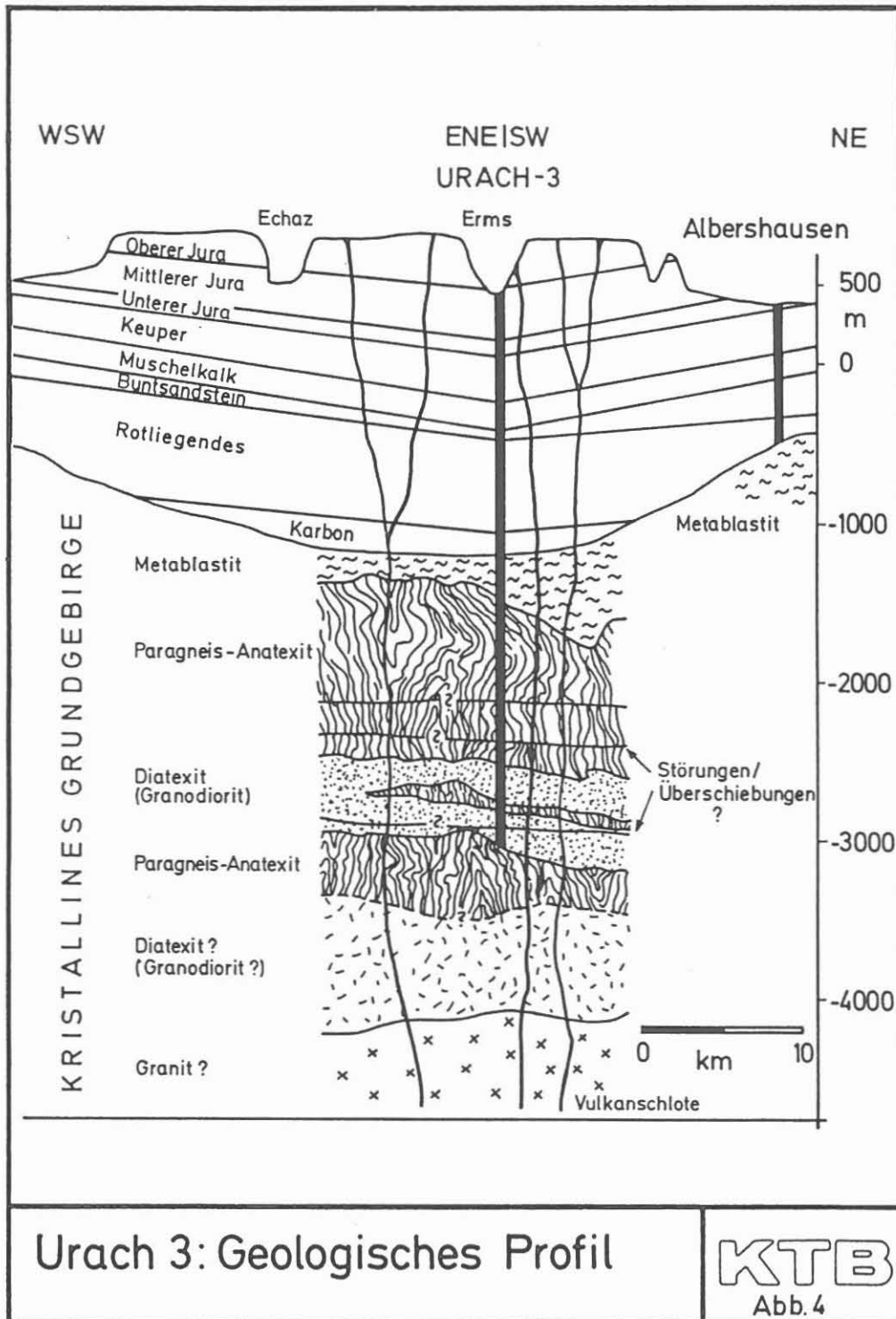
Am Beispiel der deutschen Hot Dry Rock-Bohrung Urach 3 soll das neuentwickelte Sediment-Interpretationsprogramm "ELAN" (Elemental Analysis) der Firma SCHLUMBERGER auf das Kristallin übertragen und vorgestellt werden. Im Abschnitt der Vertiefung dieser Bohrung von 3 320,0 - 3 483,0 m waren im Jahre 1983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

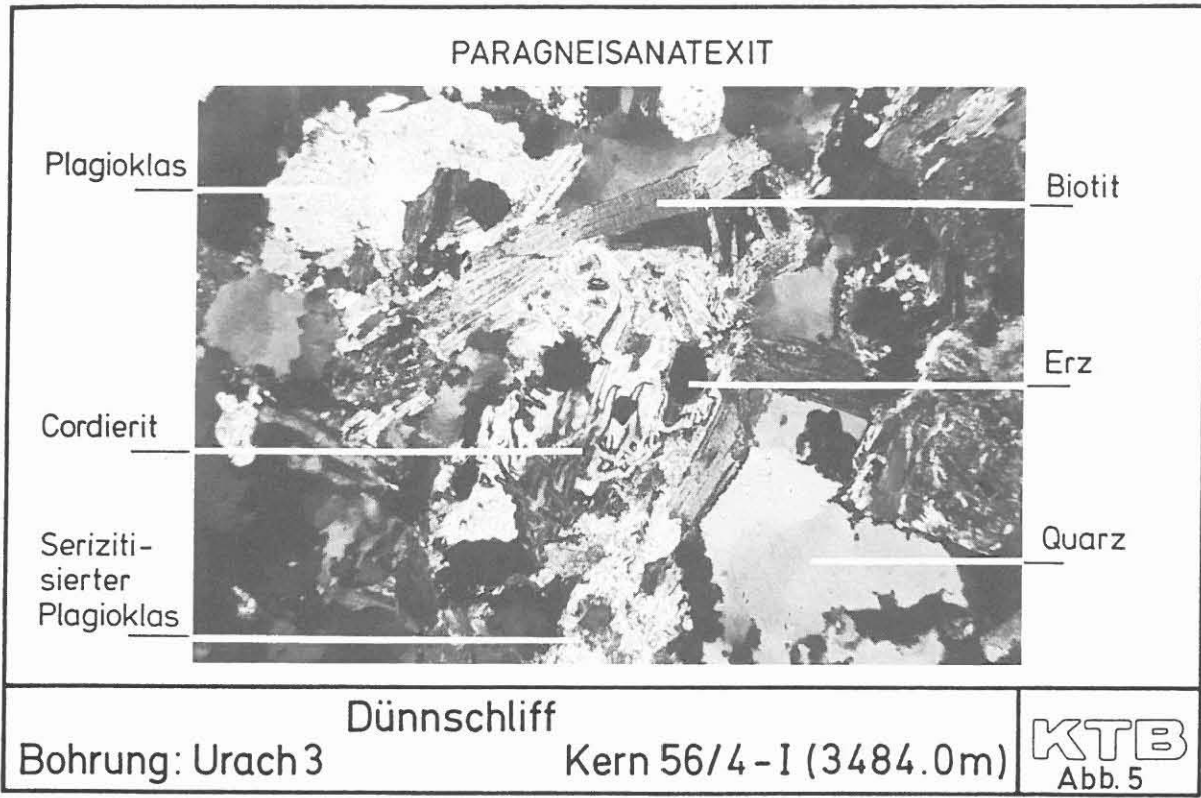
Das geologische Vorprofil zeigt für dieses Intervall bis zu einer Teufe von 3 465,0 m Granodiorit (Diatexit) und bis zur Endteufe Paragneis-Anatexit. Fünf Kerne mit einer Gesamtlänge von 10,8 m wurden erbohrt, jedoch nur eine Länge von 7,0 m gewonnen (Abb. 4).

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

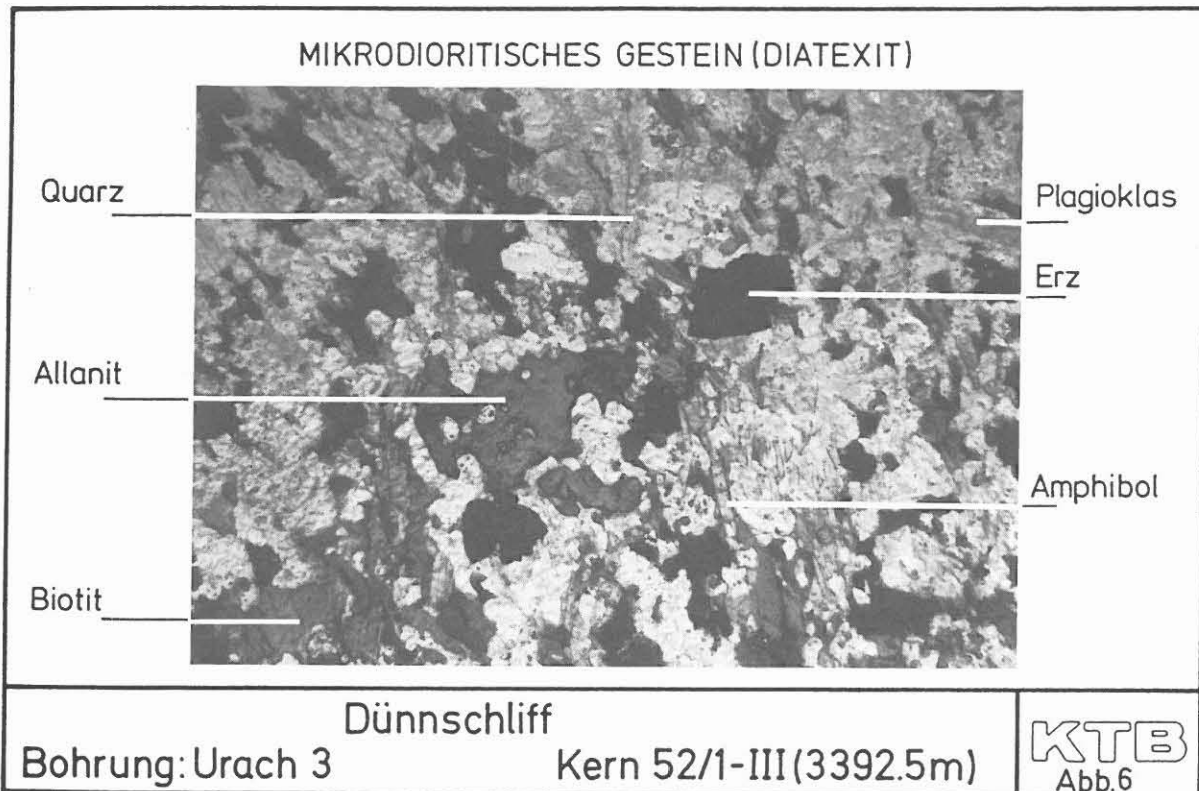
Für die Auswertung der Bohrlochmessungen zur Ermittlung einer volumetrischen Formationsanalyse ist es notwendig, ein mineralogisches Interpretationsmodell vorzugeben. Dies kann sich nur auf die geologisch-mineralogischen Untersuchungen stützen. Die Verbindung zur Meßtechnik wird über die sogenannte

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).



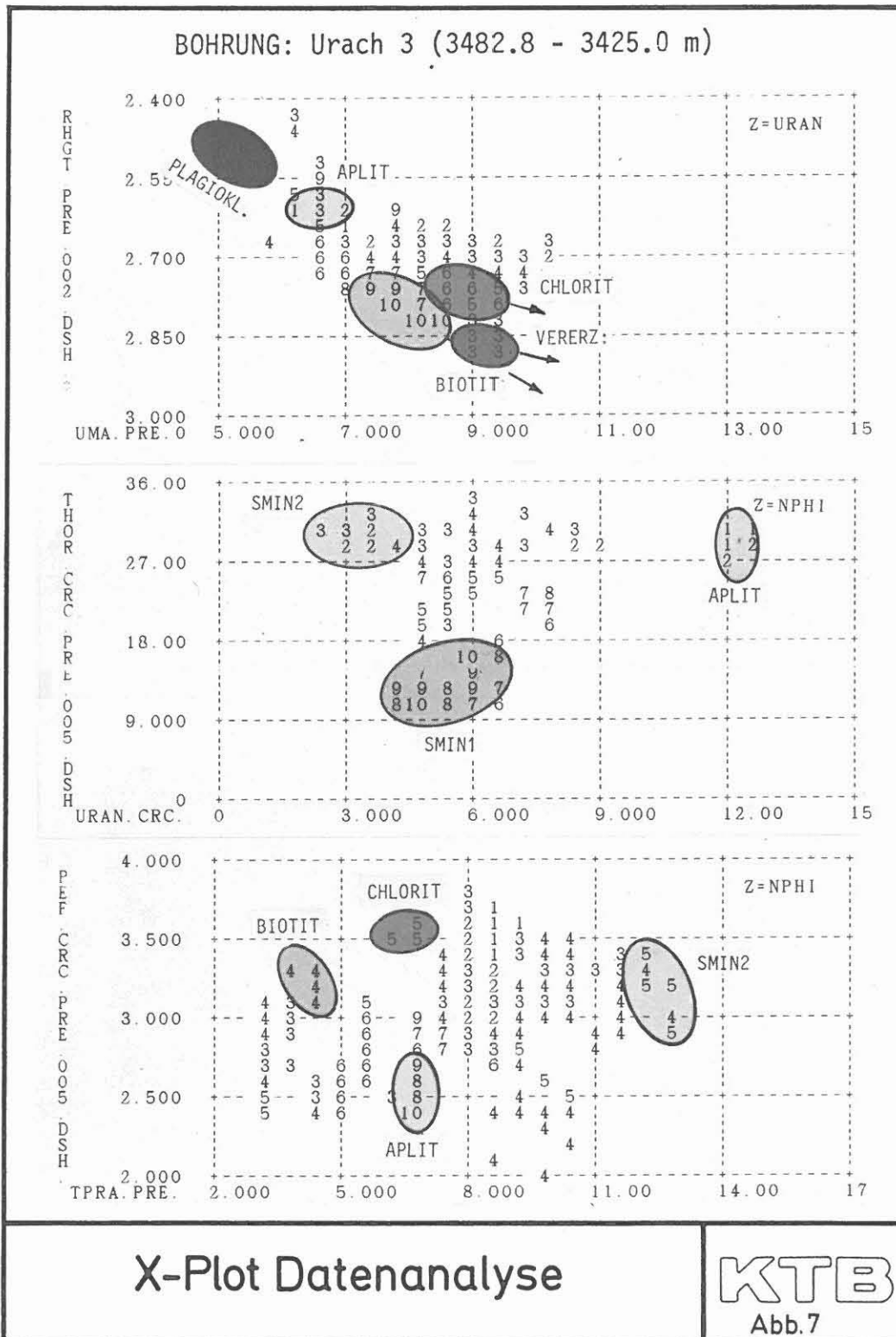


Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

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



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-Mineraeingabewerte 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 Televiwer (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-Televiwer-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 ³) | PHIN (l.p.u.) | DTC (μsec/ft) | DTS (μsec/ft) | Σ (c.u.) | Pe (barn/el) | U (barn/cm ³) | 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 |

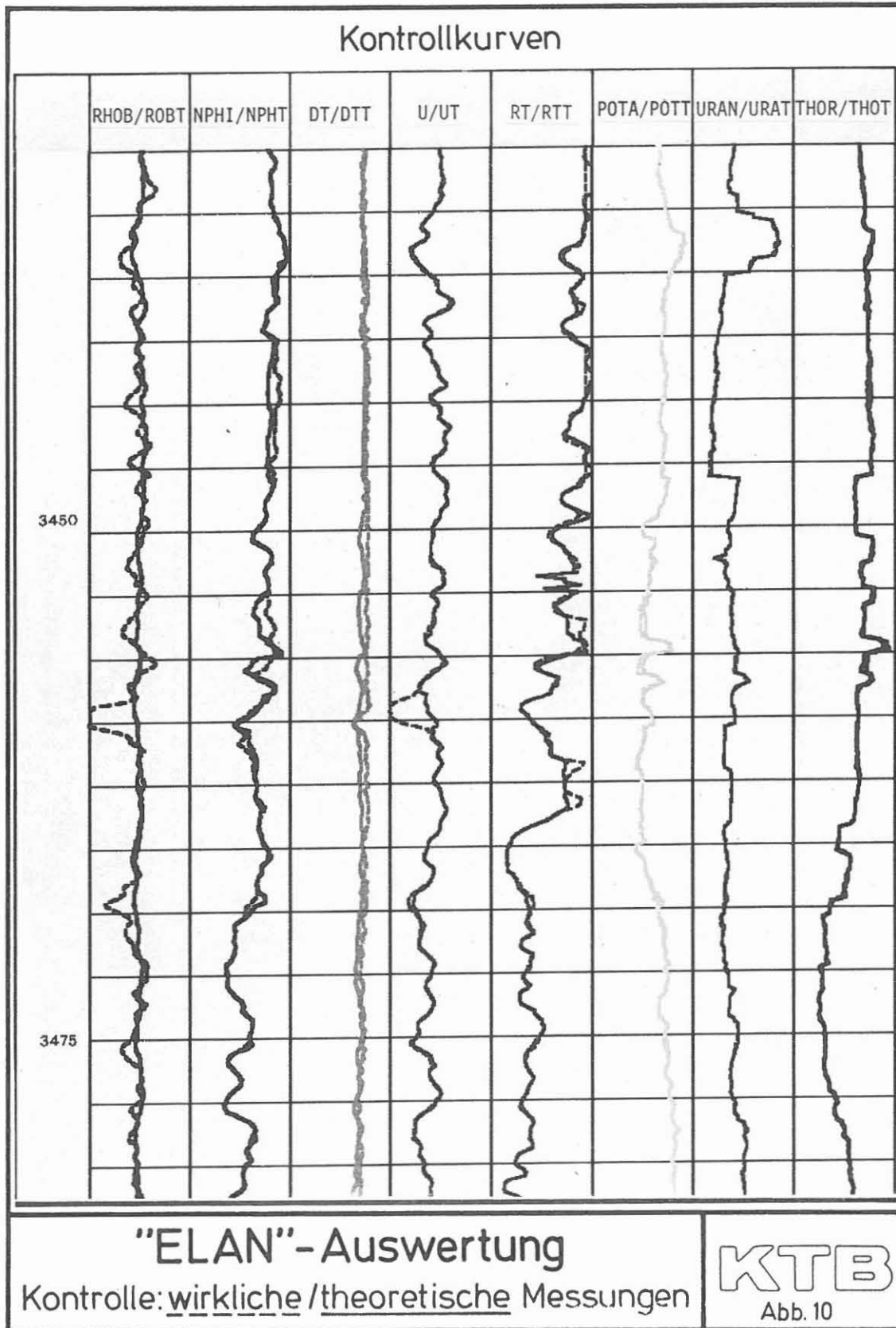
"ELAN"-Auswertung

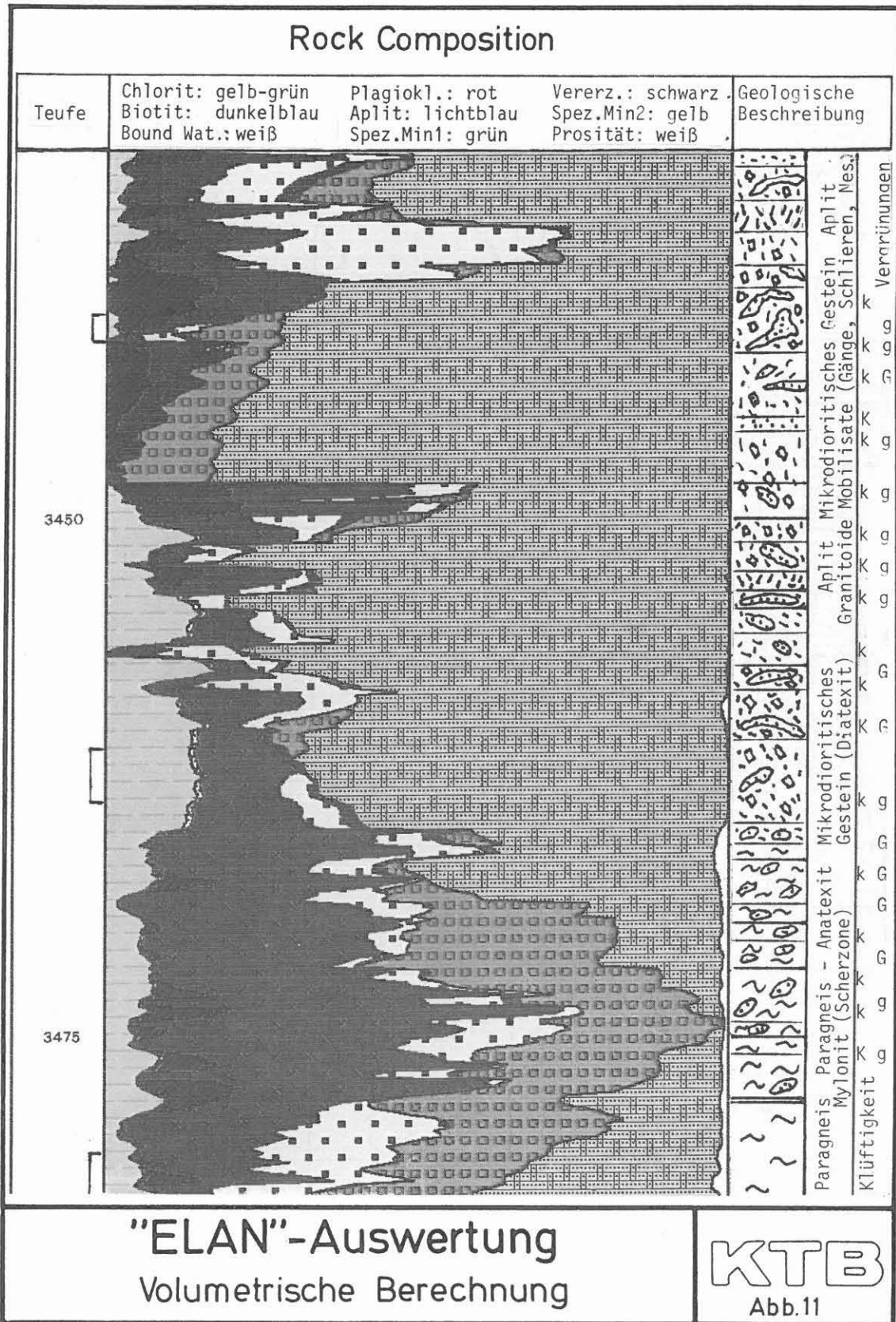
Bohrung: Urach 3

Intervall: (3 482.8-3425.0m)

KTB
Abb.9

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung





SABIS TELEVIEWER

Bohrung : 2 SCHÖNMATT

OFFENE KLUFT

Einfallen: 108°

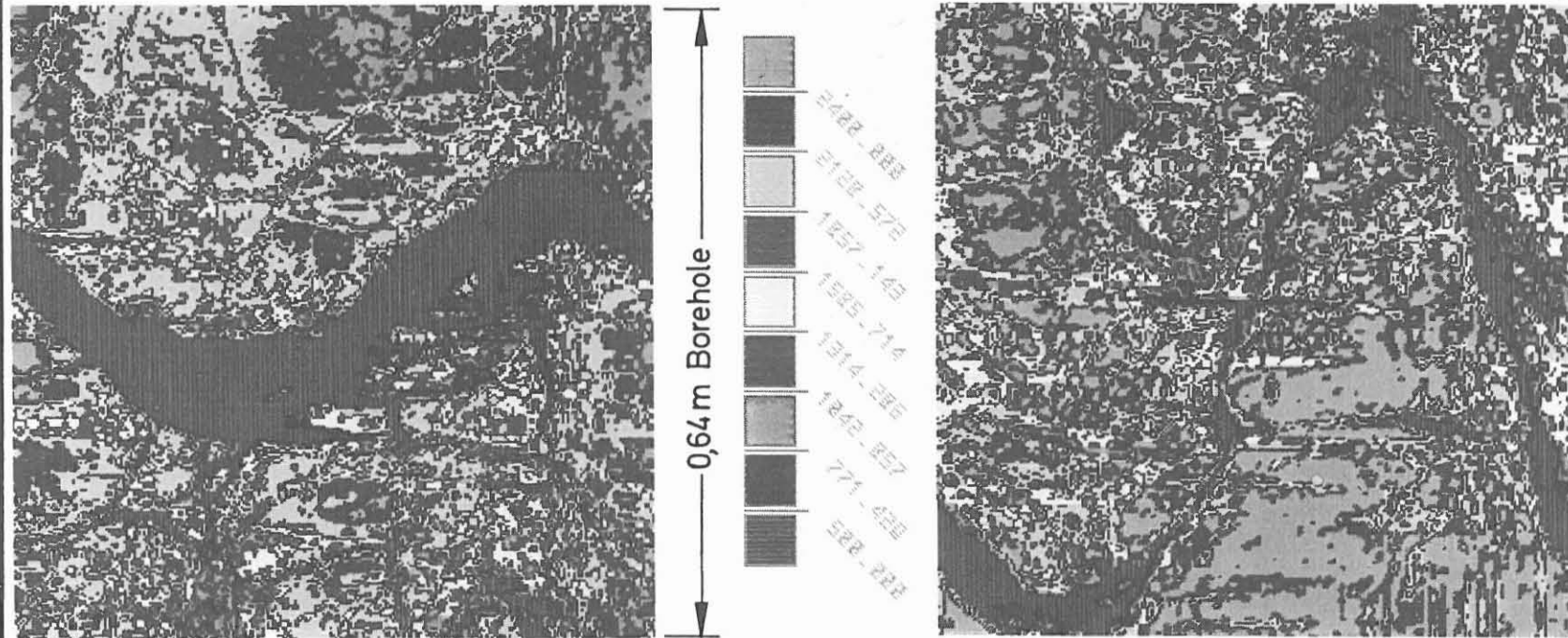
Neigung: ~30°

OFFENE KLUFT

Einfallen: 54°

Neigung: 80°

AMPLITUDENDARSTELLUNG



Kluftekennung

Strukturelle und texturale Erkundung

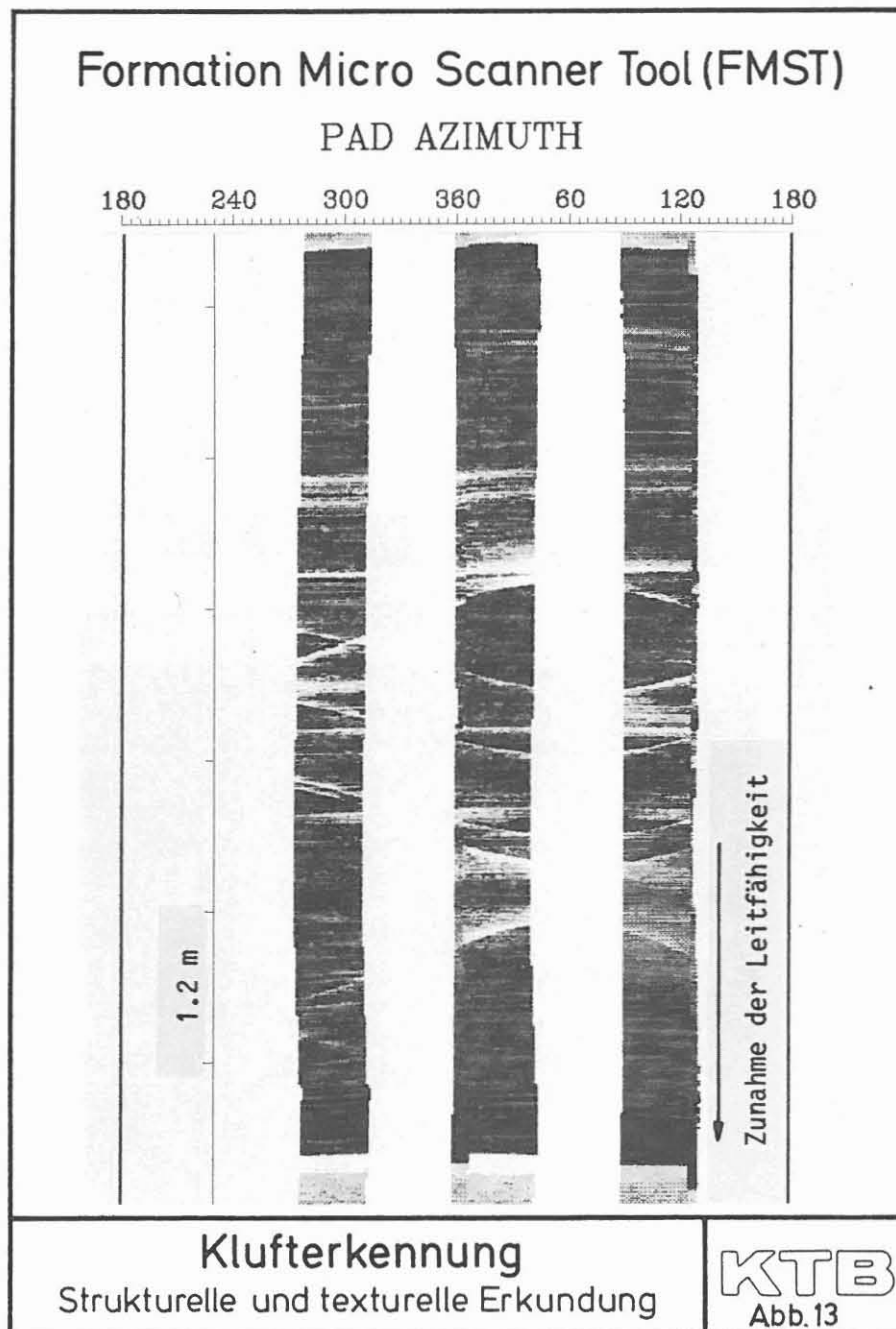
KT B

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).

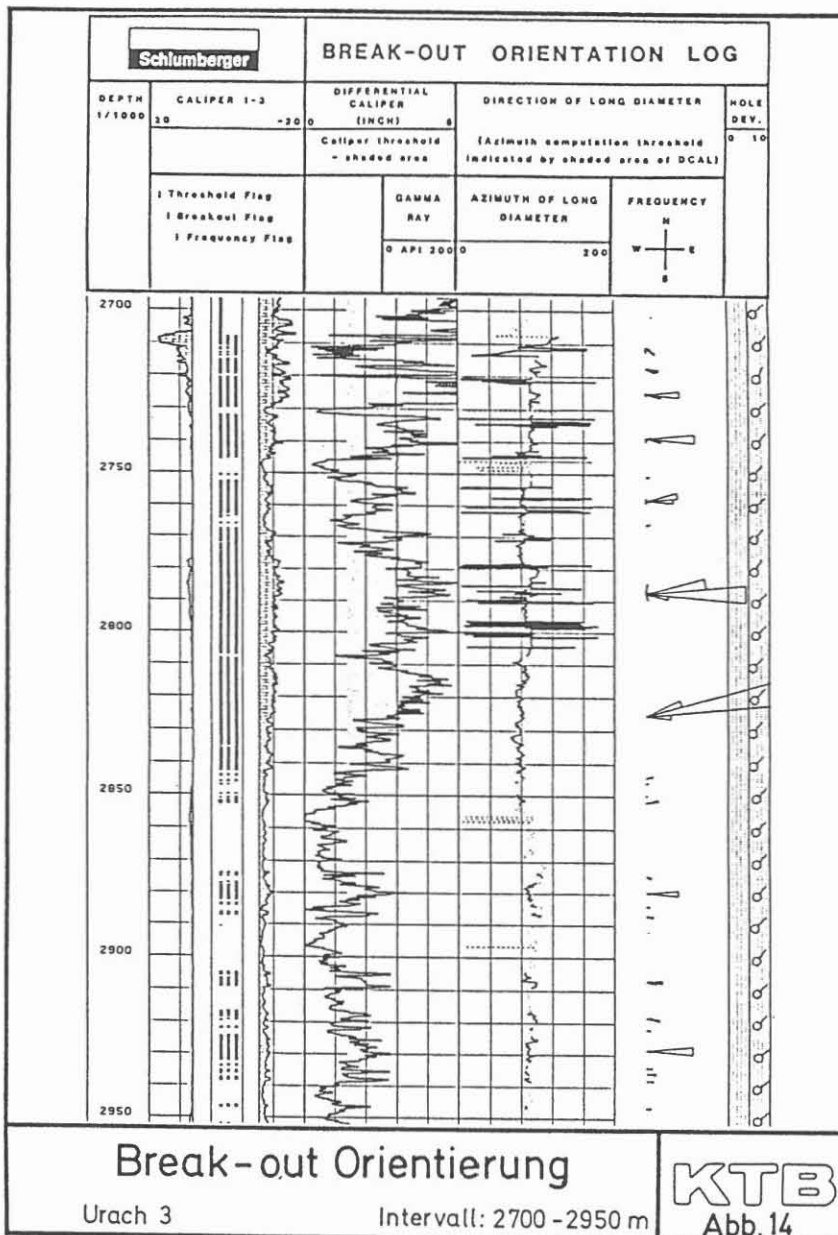
Beide Messungen ergänzen sich in ihrer Aussagekraft und sind schon von der NAGRA als unentbehrlich eingestuft worden.



3.3.2.3 Bohrlochstabilität

In Bohrungen, die in Gebieten mit unausgeglichenen 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.

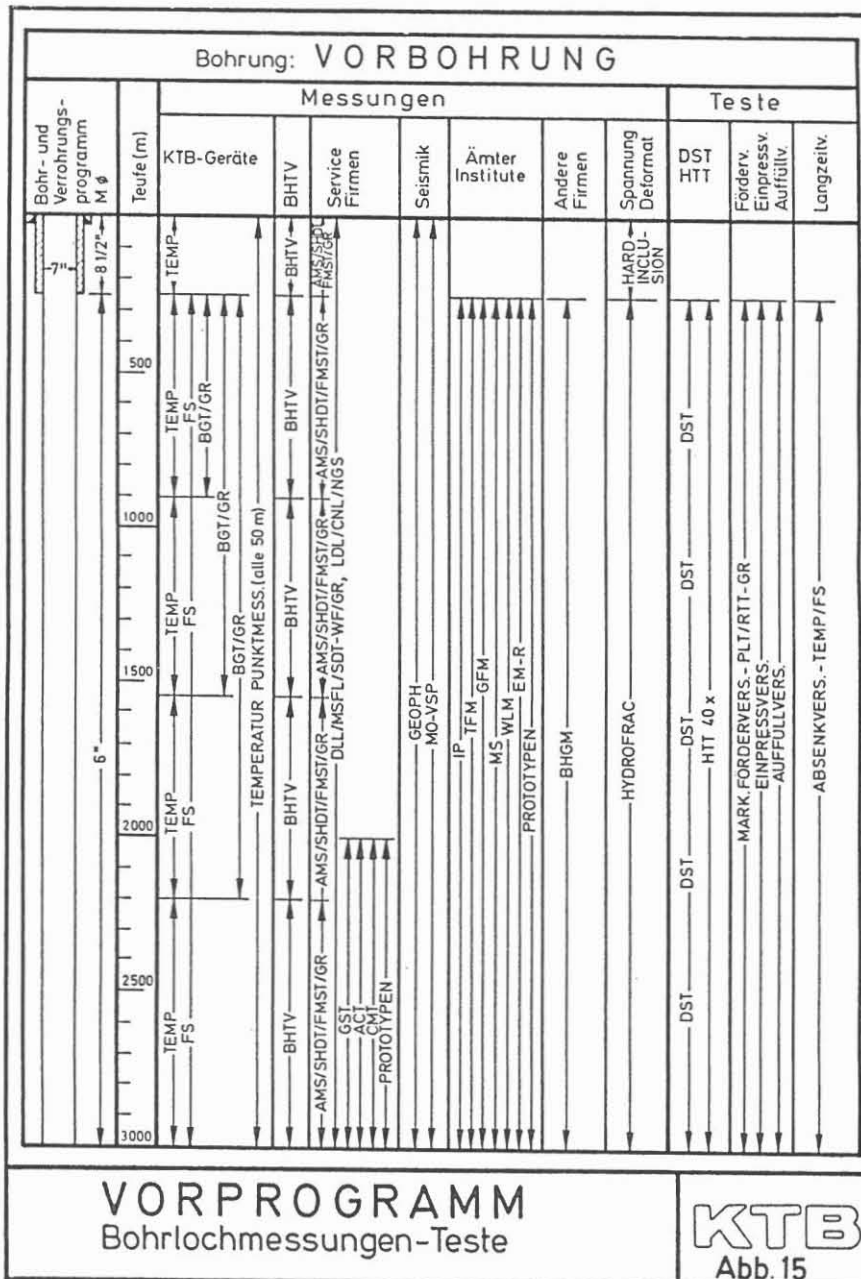
Das gezeigte Beispiel stammt ebenfalls aus der Bohrung Urach 3, jedoch nicht aus dem Abschnitt der Vertiefung (Abb. 14).



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.

3.4 DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M.: Die geowissenschaftliche Bohrungsbearbeitung vor Ort unter Einbeziehung des Feldlabors

3.4.1 Einleitung

Das geplante KTB-Feldlabor ist, basierend auf dem 1983 entwickelten Konzept des KTB-Projektes als eine Gemeinschaftseinrichtung der Arbeitsgruppen der Arbeitsgemeinschaft "Probenauswertung" definiert (KTB-Statusbericht 1984). Aufbauend auf der Organisationsstruktur stellen alle am KTB beteiligten Universitäten und Wissenschaftlergruppen Personal bereit, das für die Funktionsfähigkeit dieses Feldlabors benötigt wird.

3.4.2 Hauptaufgabenbereiche

Aufgabe der Arbeit im KTB-Feldlabor ist die routinemäßige Untersuchung, Ermittlung und Dokumentation aller Proben, Größen und Daten unmittelbar auf der Bohrlokation, die zeitlichen Veränderungen unterliegen, kontinuierlich erfaßt werden müssen und/oder die Basis für nachgeschaltete Spezialuntersuchungen darstellen. Im Rahmen der geowissenschaftlichen Gemeinschaftsforschung ergeben sich folgende Hauptaufgaben:

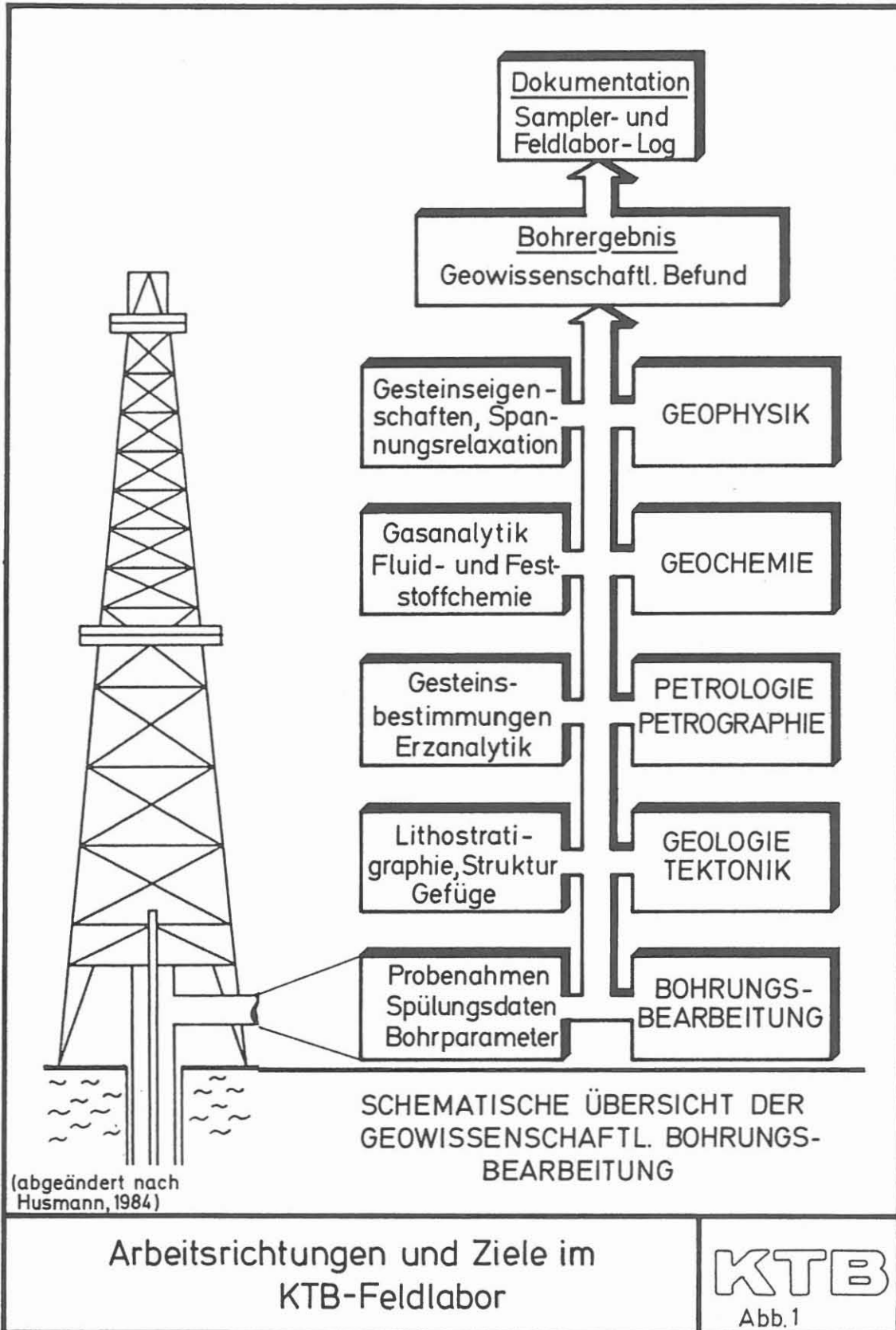
- Beschreibung und erste Untersuchungen der in den geplanten KTB-Bohrungen (Vor- und Hauptbohrung) angetroffenen Gesteine
- Erste Analyse der in diesen Gesteinen vorkommenden flüssigen und gasförmigen Bestandteile (Gesteinsfluide)
- Übernahme aller von den Arbeitsgemeinschaften definierten Untersuchungen vor Ort:
 - Durchführung der Untersuchungen, Messungen und Analysen, die auf der Bohrlokation selbst ohne Zeitverzögerung durchgeführt werden müssen
 - Probenauswertungen, die kurzfristige Entscheidungen über die Art des Bohrens, die Durchführung von Messungen und Tests und der Probennahme im Bohrloch ermöglichen
 - Erstellung erster wissenschaftlicher Berichte, die die Basis für gezielte Probennahmen weiterführender Untersuchungen bilden
 - Probenverwaltung vor Ort (geologisches Zentralmagazin).

3.4.3 Arbeitsrichtungen und Ziele

Entsprechend Abb. 1 sind im geplanten KTB-Feldlabor folgende Arbeitsrichtungen vertreten:

- Bohrungsbearbeitung
- Geologie/Tektonik
- Petrologie/Petrographie
- Geochemie
- Geophysik.

Die zuerst aufgeführte Bohrungsbearbeitung hat u. a. das Ziel, für die verschiedensten Aufgaben Proben zu entnehmen, Spülungsdaten zu ermitteln und Bohrparameter für die geowissenschaftliche Auswertung zu erfassen. Bei der Arbeitsrichtung Geologie/Tektonik stehen auf der Bohrlokation Fragen zur Lithostratigraphie, zur Struktur und

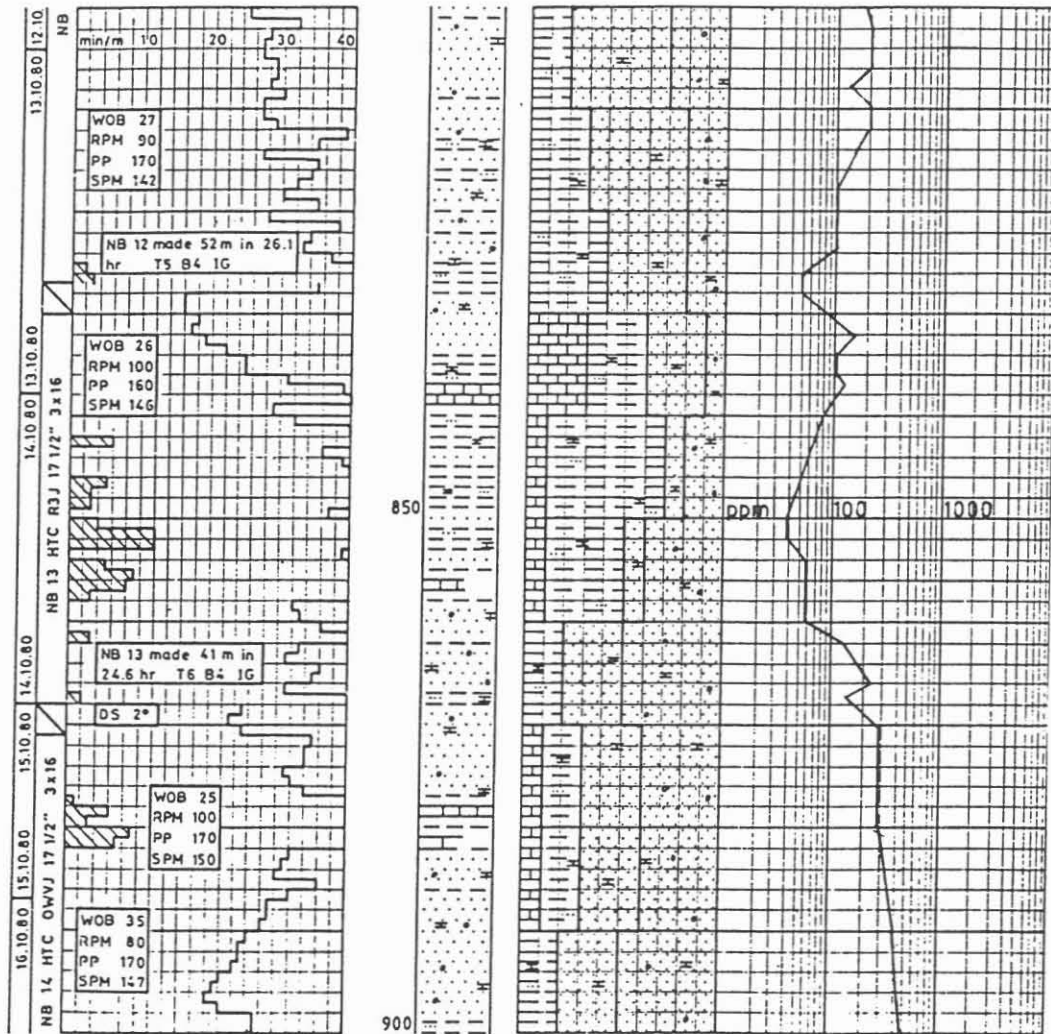


AUSSCHNITT AUS EINEM SAMPLERLOG

Bohrparameter

Lithologie

Gasführung



Darstellung von
Sampler-Ergebnissen

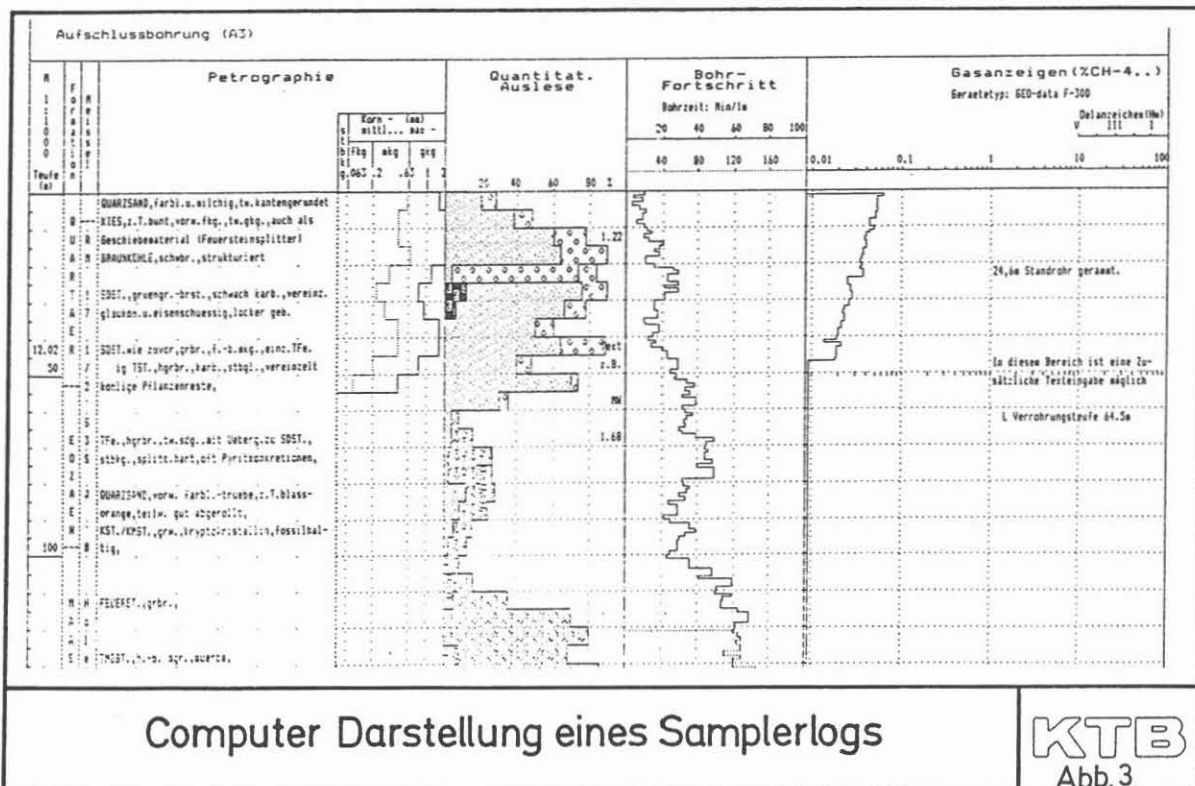
KT B

Abb.2

zum Gefüge im Vordergrund. Im Rahmen der drei anderen geowissenschaftlichen Arbeitsrichtungen werden als Hauptaufgaben Gesteinsbestimmungen, gasanalytische Messungen, Untersuchungen zur Fluid- und Feststoffchemie sowie Untersuchungen der Gesteinseigenschaften und zur Spannungsrelaxation ohne Simulation der P/T-Bedingungen durchgeführt. Die Resultate aller Untersuchungen vor Ort werden als Bohrergebnis zusammengefaßt und sowohl computergestützt gespeichert und verarbeitet als auch analog in Form von Sampler- und Feldlaborlogs aufgezeichnet (Abb. 2 und 3).

3.4.4 Dimension des KTB-Feldlabors

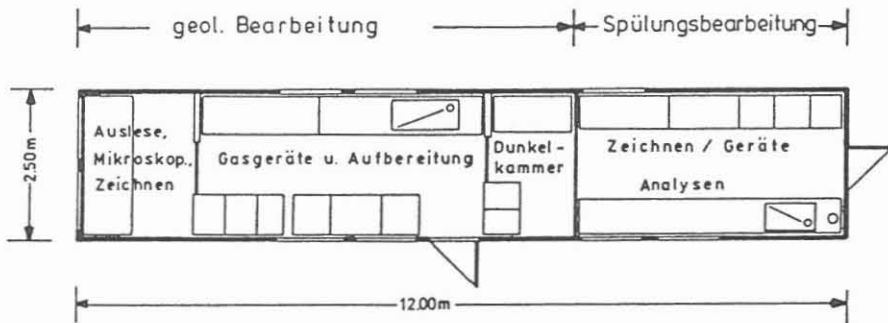
Während bei einer konventionellen Industriebohrung nur wenige Wissenschaftler und/oder Techniker für die Bohrungsverarbeitung vor Ort eingesetzt werden, sind beim KTB-Projekt über 30 Wissenschaftler und Techniker für die Bohrungsbearbeitung und die wissenschaftlichen Routinearbeiten im Feldlabor eingeplant. Dieser Aufwand in der geowissenschaftlichen Analyse unmittelbar auf der Bohrlokation drückt sich auch im Raumbedarf für das KTB-Feldlabor aus. Während bei einer konventionellen Bohrung das Feldlabor nur etwa 30 m² Fläche umfaßt (Abb. 4), gehört zum geplanten KTB-Feldlabor einschließlich aller Labors, Präparations- und Aufbereitungsräume, Arbeitszimmer für ständige Wissenschaftler und Techniker sowie für Gastforscher ein etwa 20facher Raumbedarf (Abb. 5). Hinzu kommt ein weiterer Raumbedarf von mehreren hundert m² Fläche für das geplante geowissenschaftliche Zentralmagazin, in dem etwa 8 - 10 000 m³ Kernmaterial, mehrere tausend Proben der Bohrspülung und etwa 30 000 - 45 000 Spülproben und das gesamte präparierte Probenmaterial (Kalotten, Plugs, An- und Dünnschliffe) aufbewahrt werden sollen.



Computer Darstellung eines Samplerlogs



Feldlabor - Grundriss (schematisch)

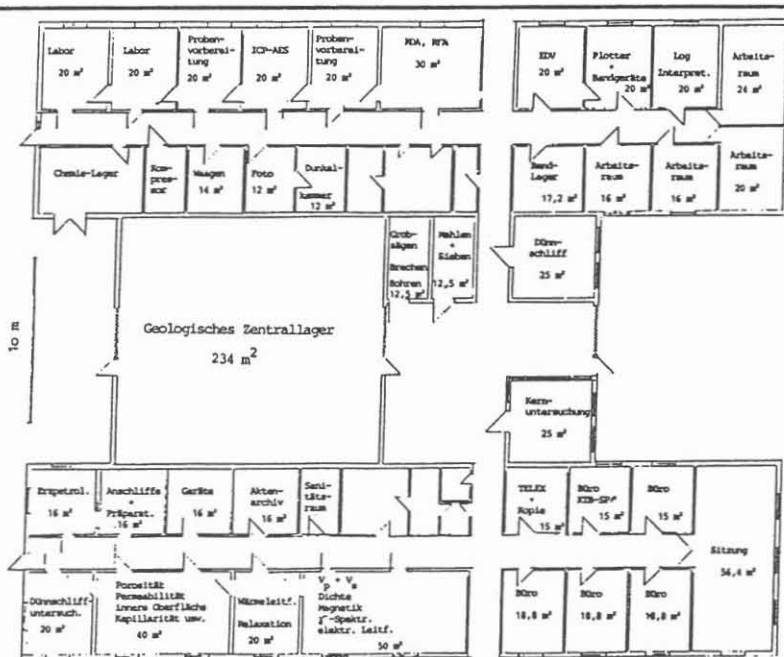


(nach HUSMANN 1984)

FELDLABOR EINER KONVENTIONELLEN INDUSTRIEBOHRUNG

KTB
Abb.4

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

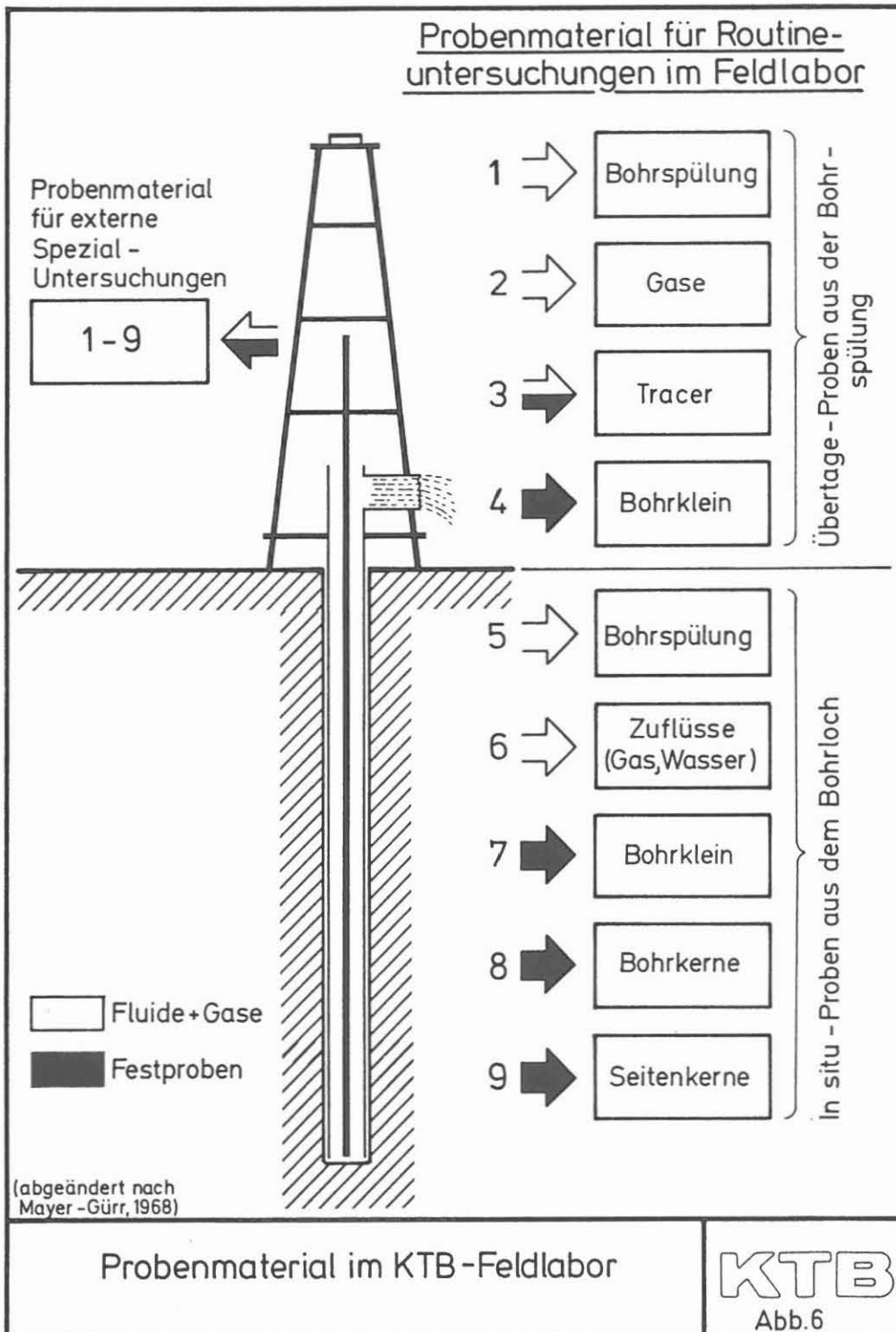


PLANSKIZZE KTB-FELDLABOR (STAND: HERBST 1986)

KTB
Abb.5

3.4.5 Art und Untersuchungen der Proben

Für die Routineuntersuchungen im Feldlabor fallen sowohl Übertage am Bohrlochauslauf als auch direkt im Bohrloch in situ entnommene Proben zur Bearbeitung an (Abb. 6).



Alle Übertage-Proben werden zunächst mit dem im Bohrloch zirkulierenden Spülstrom an die Oberfläche gefördert bevor sie am Spülsaustausch (in der Regel im Bereich der Spülrinne bzw. des Schüttelsiebes) entnommen werden können. Dabei kann die Zeit zwischen der Entstehung des Bohrkleins auf der Bohrlochsohle und dem Austrag desselben Übertage mehrere Stunden betragen, so daß bei den Übertage-Proben stets Teufenkorrekturen durchgeführt werden müssen. Dagegen handelt es sich bei den Untertage-Proben sowohl beim Kern (Bohrkerne, Seitenkerne) als auch beim Testen und bei Zuflußmessungen (Proben von DST-Tests, Autoklavprobennehmern u. a.) um teufengenaue Proben (in situ-Proben).

Für die Veranschaulichung der Arbeiten im geplanten KTB-Feldlabor kann hier nur auf einige Arbeitsbereiche bzw. Untersuchungen näher eingegangen werden.

3.4.5.1 Untersuchungen fester Proben

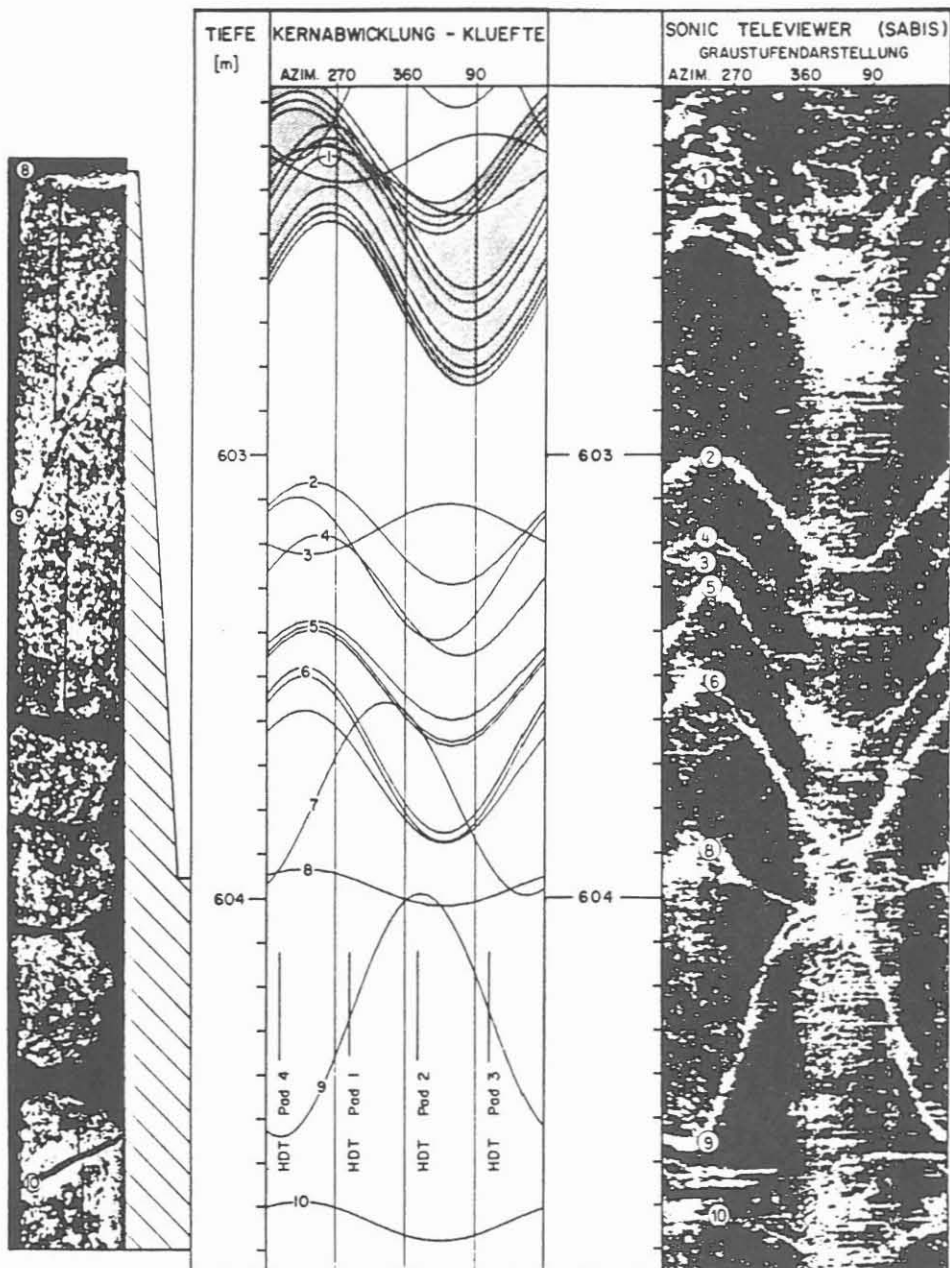
Zu den Kernuntersuchungen gehören u. a. die Kernbeschreibung, die photographische Aufnahme des Materials, die Aufnahme des Makro- und Mikrogefüges, die mineralogische, erzpetrologische und geochemische Gesteinsanalyse sowie geophysikalische Untersuchungen zur Ermittlung verschiedener gesteinsphysikalischer Parameter (magnetische Suszeptibilität, remanente Magnetisierung, elektrische und Wärmeleitfähigkeit, Schallwellengeschwindigkeit, Porosität, Permeabilität, Dichte) und die Messung der natürlichen Radioaktivität des Probenmaterials. Soweit möglich und erforderlich werden die gleichen oder modifizierte Aufnahmen, Bestimmungen, Untersuchungen und Messungen auch am Bohrklein durchgeführt.

Die räumliche Nachorientierung der Bohrkerne, die Voraussetzung für strukturelle Untersuchungen ist, wird durch die Korrelation von Bohrkernabwicklungen mit elektrischen Bohrlochmessungen vorgenommen. Wie Abb. 7 zeigt, können die in der Bohrkernabwicklung festgestellten Klüfte sehr gut mit dem Ergebnis der akustischen Televiever-Messung verglichen werden, so daß anhand dieser orientiert vorgenommenen Bohrlochmessung die Bohrkerne räumlich nachorientiert werden können. Diese Bohrkern-Nachorientierung ist von wesentlicher Bedeutung für gefügekundliche und tektonische Untersuchungen und Interpretationen.

Durch Vergleich von Logs der natürlichen Gammastrahlung von Bohrkernmaterial mit entsprechenden Bohrlochmessungen des gleichen Teufenbereichs ist es im Feldlabor weiterhin möglich, besonders bei großen Bohrlochtiefen auftretende Unterschiede zwischen Kernteufe, Gesteinsteufe und Meßteufe zu erkunden und auszugleichen (Abb. 8).

Im Rahmen der magnetischen Messungen wird das anfallende Bohrkernmaterial bezüglich der magnetischen Suszeptibilität und der remanenten Magnetisierung untersucht. Zu diesem Zweck werden von den am Feldlabor beteiligten Universitäts-Instituten Geräte konstruiert, die eine einfache, rasche und zerstörungsfreie Untersuchung der Proben ermöglichen sollen (Abb. 9).

KORRELATION BOHRKERNABWICKLUNG UND BOHRLOCHMESSUNG

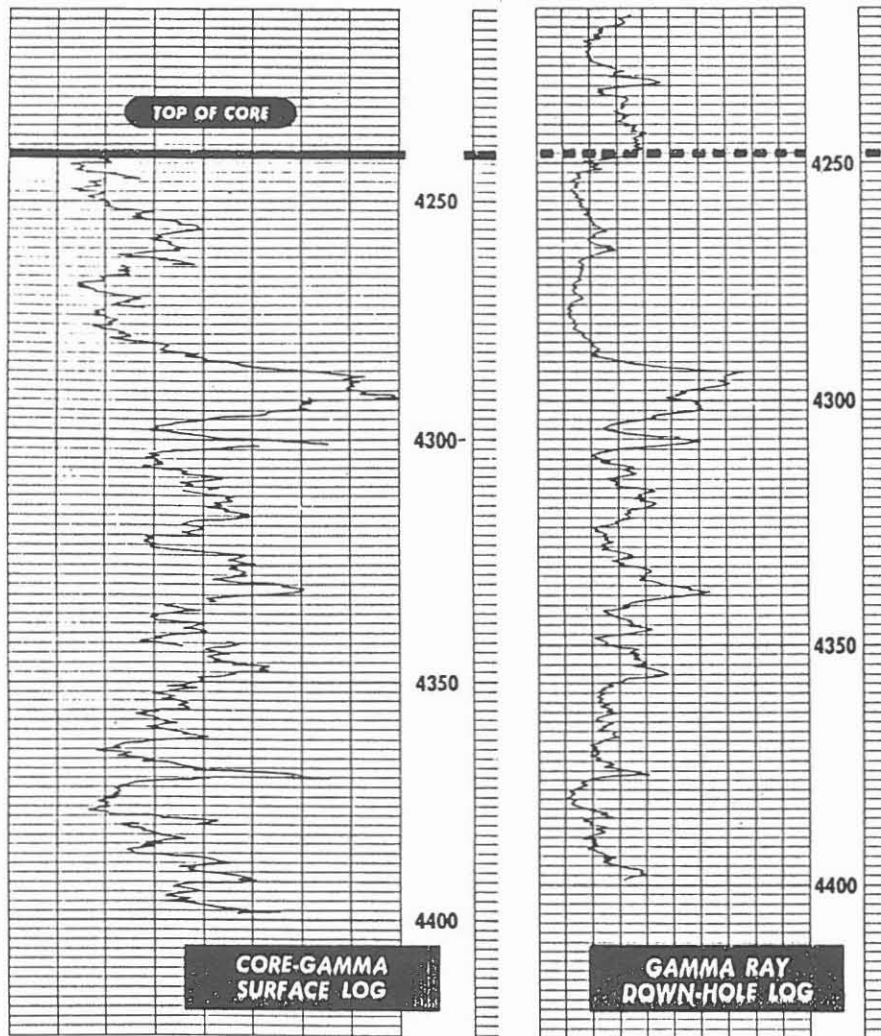


(abgeändert nach NTB 85-01, NAGRA)

NACHORIENTIERUNG VON BOHRKERNEN

KTB
ABB. 7

VERGLEICH DER GAMMASTRAHL-LOGS VON KERN UND BOHRLOCH

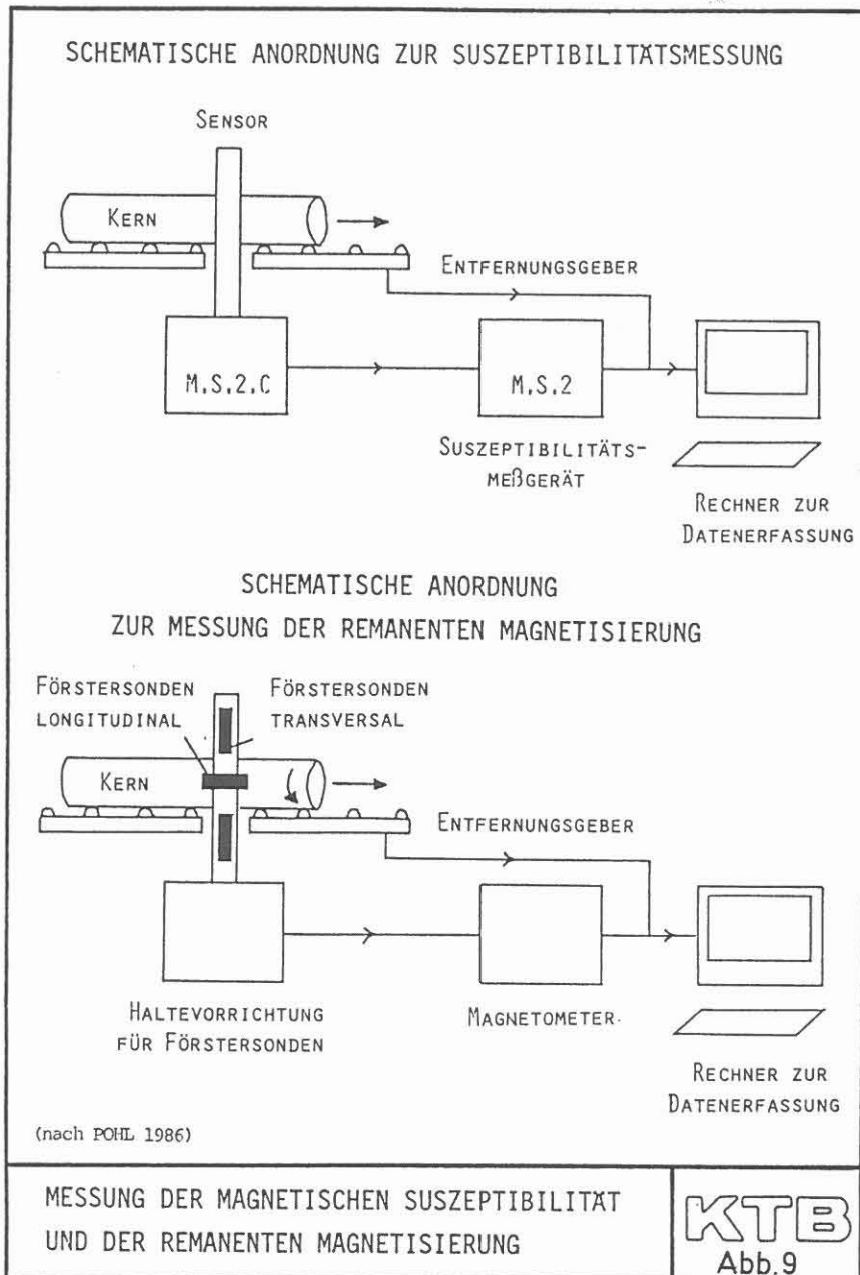


Grayburg-San Andres, Andrews County, Texas

KORRELATION ZWISCHEN KERNTIEFE UND MESSTIEFE

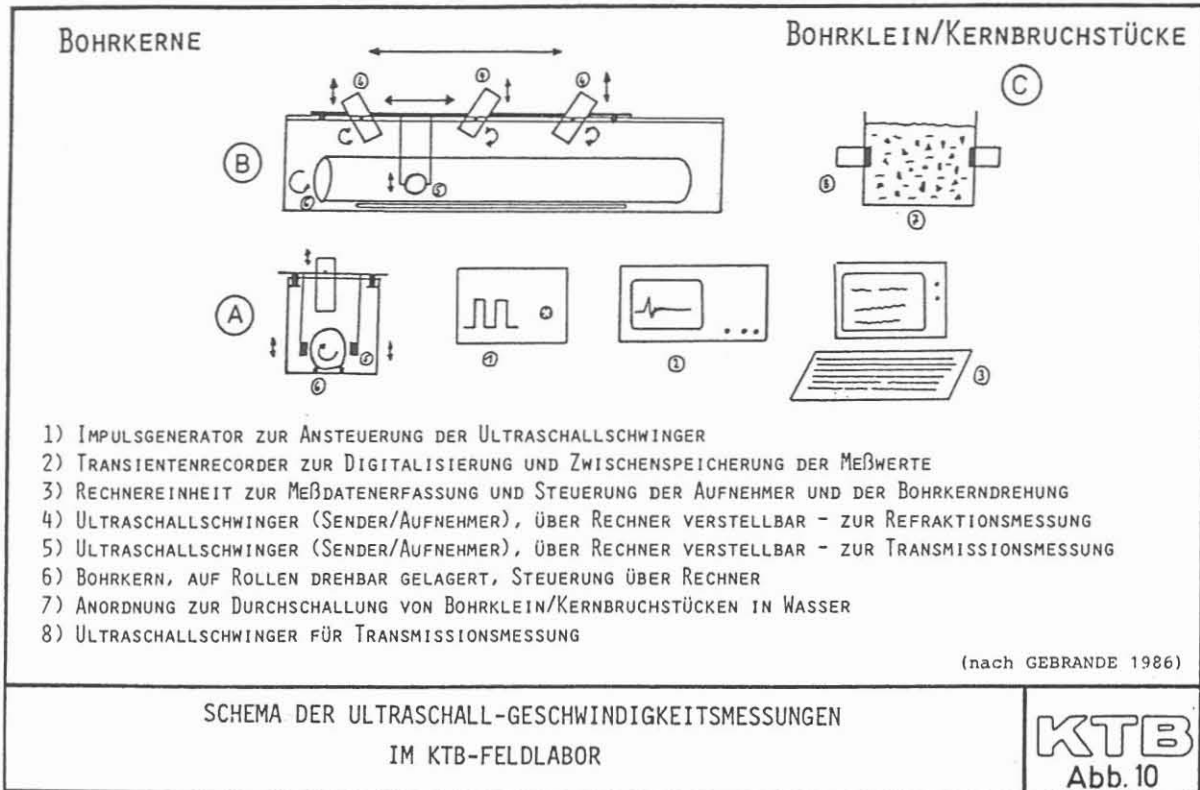
KT B

Abb. 8



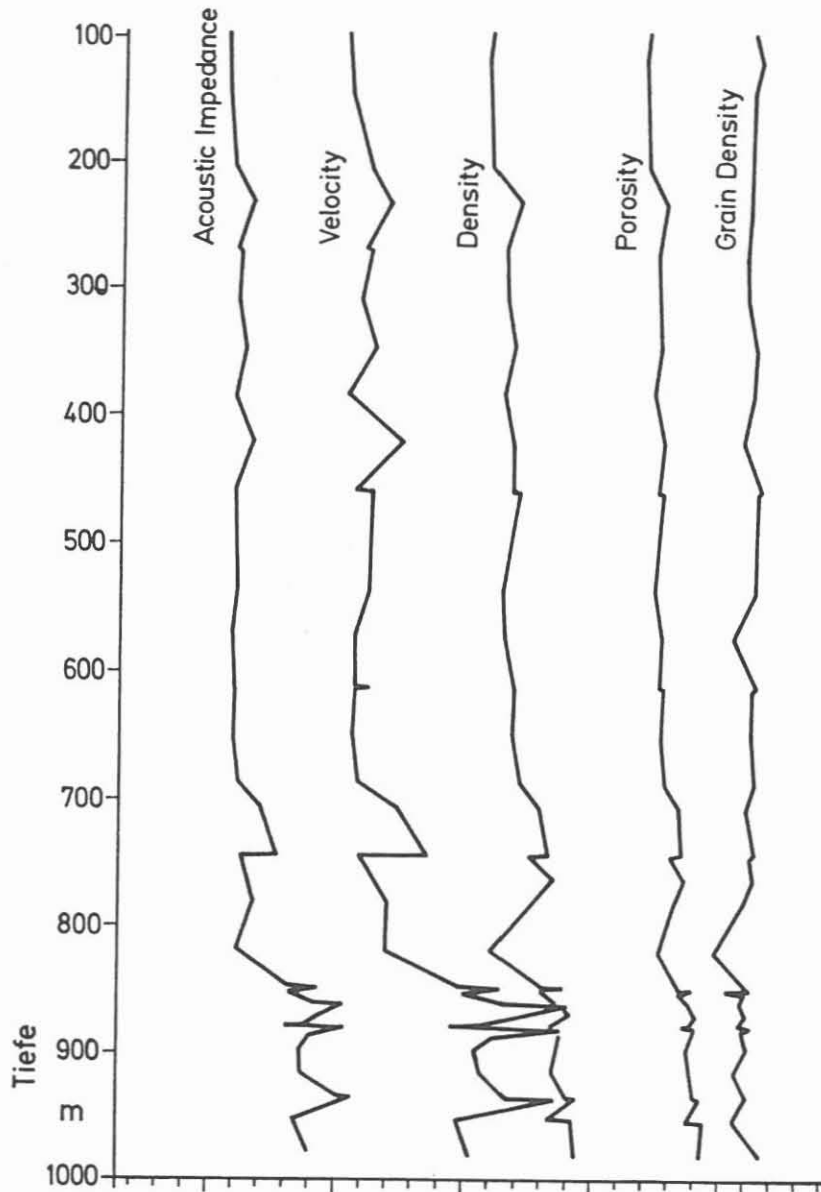
Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Das gleiche gilt für die Messung der Schallwellengeschwindigkeiten an Bohrkern- und Bohrkleinmaterial wie Abb. 10 verdeutlichen soll. Über Rechner verstellbare Ultraschallschwinger zur Refraktionsmessung und Transmissionsmessung an Bohrkernen sowie für die Transmissionsmessung am Bohrklein sollen die Durchschallung dieses Materials ermöglichen, das in Wasser gelagert wird. Zur gesamten Ausrüstung gehören außerdem ein Impulsgenerator zur Ansteuerung der Ultraschallschwinger, ein Transienten-Recorder zur Digitalisierung und Zwischenspeicherung der Meßwerte und eine Rechereinheit zur Meßdatenerfassung und Steuerung der Aufnehmer und der Bohrkern-drehung. Zu diesem Zweck sind die Bohrkern-e auf Rollen drehbar gelagert.



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Alle ermittelten Daten werden im Rahmen der Routineuntersuchung kontinuierlich zusammengestellt und als Log gegen die Tiefe aufgetragen, um Veränderungen im Bohrprofil feststellen zu können (vergl. Abb. 11).



(abgeändert nach ANDREWS et al., 1975)

ZUSAMMENSTELLUNG PHYSIKALISCHER PARAMETER
(DSDP LEG XXX)

KTB
Abb.11

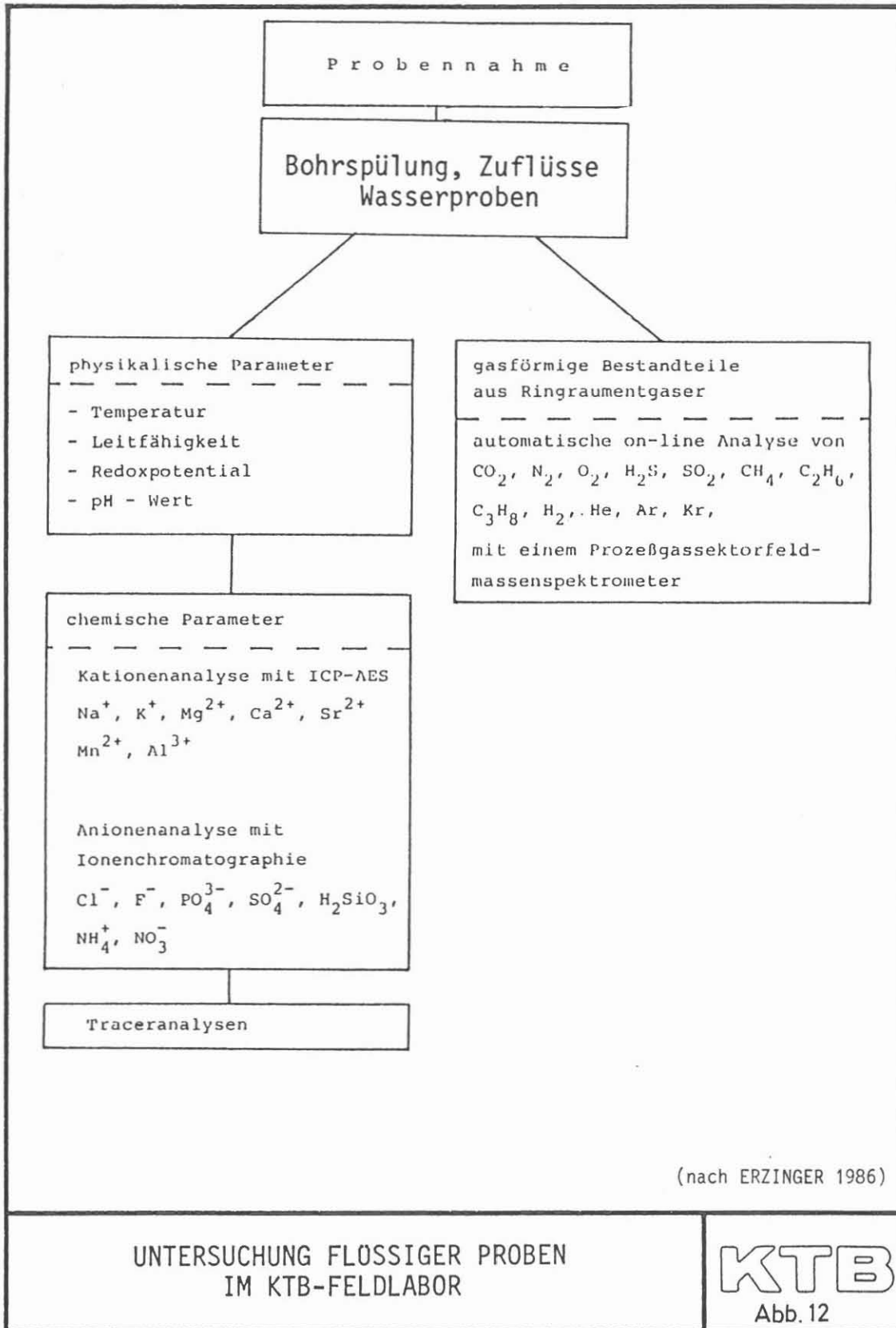
3.4.5.2 Untersuchung flüssiger Proben

Die auf der Bohrlokation anfallenden flüssigen Proben entstammen entweder obertägigen Probennahmen aus der Bohrspülung, aus Zuflüssen und sonstigen Wasserproben (z. B. Abwasser) und/oder, soweit möglich und erforderlich, auch aus Probekammern von DST-Tests oder Autoklavprobennehmern. Zum Arbeitsprogramm gehören folgende Aufgabenbereiche:

- Ermittlung physikalischer Parameter
- Untersuchung chemischer Parameter
- Durchführung von Tracer-Analysen.

Zu den geowissenschaftlich relevanten Parametern gehören vor allem Messungen der Temperatur, der Leitfähigkeit, des Redoxpotentials und der pH-Werte der zirkulierenden Spülung. Für die Spülungsüberwachung und die Erstellung eines Gradienten-Profiles sind diese Parameter sowohl am Einlauf als auch am Auslauf der Bohrung zu erfassen.

Im KTB-Feldlabor werden entsprechend Abb. 12 für die Kationen-Analyse ein ICP-AES und für die Anionen-Analyse ein Ionenchromatograph zur Verfügung stehen. Darüber hinaus können mit den erwähnten Geräten auch Veränderungen in der Konzentration von Tracern ermittelt werden, die der Spülung für Testzwecke, Ermittlung von Zuflußzonen, Kontrolle der Zuflußtests) zugemischt werden.

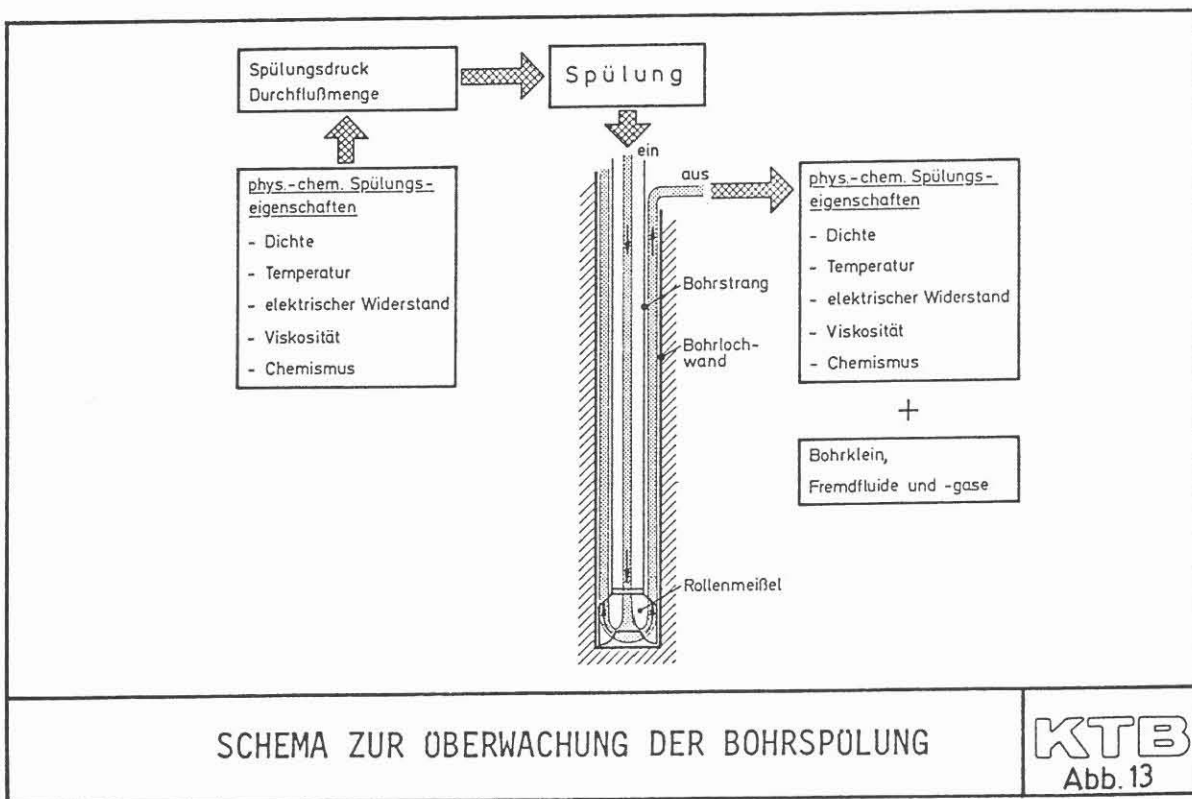


3.4.5.3 Untersuchung gasförmiger Proben

Neben der Kationen- und Anionen-Analyse der Bohrspülung stellt die routinemäßige Analyse der zutage geförderten Gase ein wichtiges Instrument zur Erfassung der durchteuften gasführenden Gebirgsabschnitte und somit wahrscheinlich permeabler Zonen dar, die für die Ermittlung der Wegsamkeiten von Gebirgsfluiden von großem Interesse sind. Es ist vorgesehen, Gaskonzentrationen und gasförmige Bestandteile sowohl aus dem Spülstrom in der Spülrinne als auch in nichtkontaminierten Auslaufsystemen (Bypass, Gasabscheider) zu untersuchen. Beide Analysen erfolgen automatisch online mit einem Gaschromatographen und einem Prozeßgassektorfeld-Massenspektrometer. Die besonders interessierenden Gase sind in Abb. 12 wiedergegeben.

3.4.5.4 Überwachung der Bohrspülung

Die schematische Übersicht zur Überwachung der Bohrspülung (Abb. 13) verdeutlicht, daß alle Parameter stets am Ein- und Auslauf zu ermitteln sind, um Veränderungen der Bohrspülung während des Spülungsurlaubes im Bohrloch bestimmen zu können.



Zusätzlich zur kontinuierlichen Bearbeitung sind bei Bedarf feste Proben, Flüssigkeiten und gasförmige Bestandteile bei entsprechenden diskontinuierlichen Probennahmen im Feldlabor zu bearbeiten. Hierzu gehören z. B. Seitenkerne, Sedimentrohrproben, eingesetzte Markierungsmittel (Tracer) und Proben, die bei Tests im Bohrloch entnommen werden.

Soweit möglich, sollen die hier aufgeführten Untersuchungen während des Abteufens beider Bohrungen, d. h. sowohl der Vor- als auch der Hauptbohrung durchgeführt werden, um beide Bohrungen optimal miteinander korrelieren zu können.

Das Abteufen der mindestens 3 000 m tiefen KTB-Vorbohrung ist für die Bearbeitung der Hauptbohrung von großer Bedeutung, da die im Feldlabor installierten Geräte und angewandten Methoden im Dauerbetrieb getestet und ihre jeweilige Aussagekraft durch Vergleich mit verschiedensten Methoden überprüft werden kann. Hierbei ist u. a. bevorzugt zu erkunden, welche Arbeitsrichtungen und Meßverfahren für rasche Entscheidungen geeignet sind. Dabei handelt es sich um Entscheidungen über die Art des Bohrens, d. h. den Wechsel vom Vollbohren (Meißeln) zum Kernen, die erforderliche Durchführung von Messungen und Tests sowie der in situ-Probennahme im Bohrloch.

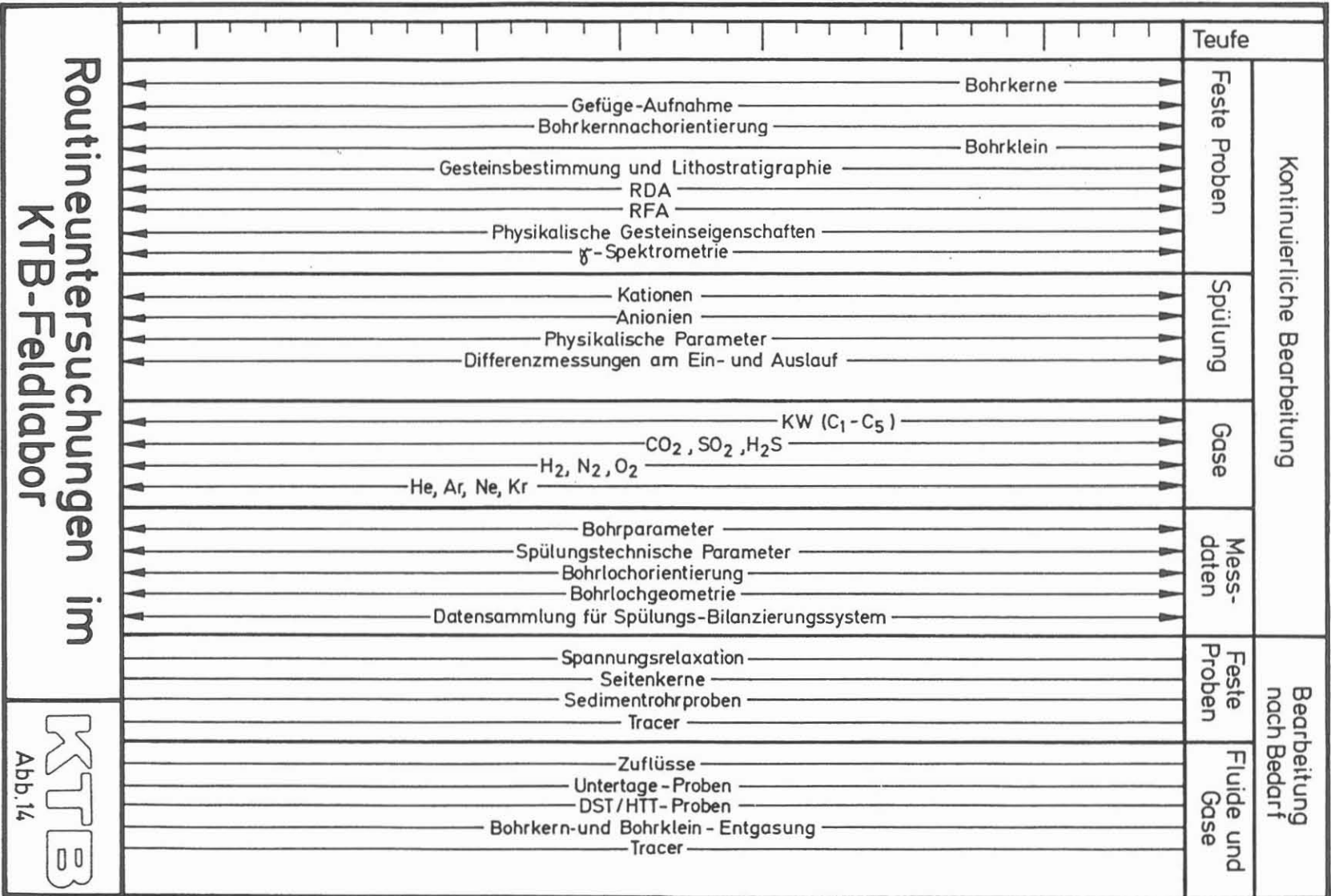
Im Hinblick auf lokationsbezogene Fragestellungen ist das KTB-Feldlabor im wesentlichen lokationsunabhängig. Mittelbar werden die Untersuchungen und Probenauswertungen im Feldlabor jedoch beeinflusst, wenn es sich um ein Bohrloch mit geringer Stabilität handelt. In einem solchen Fall müssen zur Garantie der Bohrlochstabilität komplexere Spülungen eingesetzt werden, die die Aussagekraft insbesondere der Spülungsuntersuchungen beeinträchtigen werden. Zum anderen können instabile Bohrlochverhältnisse verhindern, daß, solange die Schwierigkeiten im Bohrloch nicht eindeutig beherrscht werden, keine Bohrkerne gezogen werden können.

Während komplexere Spülungen die Interpretierbarkeit der Spülungsanalytik beeinträchtigen können, werden in erbohrbaren Bereichen mit höheren Temperaturen stärkere Wechselbeziehungen zwischen Spülung und Gebirge stattfinden, die aufgrund erhöhter Kationen- und Anionengehalte die Aussagekraft der Ergebnisse erhöhen wird.

Im Rahmen der Dokumentation und der Darstellung der bei der Bohrungsbearbeitung und im Feldlabor erzielten Ergebnisse ist in der Regel davon auszugehen, daß die gewonnenen Daten für Entscheidungsprozesse und für die Durchführung weiterführender Spezialuntersuchungen große Bedeutung besitzen.

3.4.6 Zusammenfassung

Die Zusammenstellung aller im KTB-Feldlabor durchzuführenden Routineuntersuchungen (Abb. 14) hebt einen Bereich der kontinuierlichen Bearbeitung der im Feldlabor und bei der Bohrungsbearbeitung anfallenden Proben und Daten hervor. Zu diesem Komplex gehört die Untersuchung fester, flüssiger und gasförmiger Proben unter Einbeziehung bohr- und spülungstechnischer Parameter und Logs verschiedener elektrischer Bohrlochmessungen, soweit sie für die Arbeiten im Feldlabor unmittelbar benötigt werden.



**Routineuntersuchungen im
KTB-Feldlabor**

KTB
Abb. 14

Dietrich 9/86

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

3.4.7 Literaturverzeichnis

- ANDREWS et al. (1975): Init. Repts., Deep Sea Drilling Project. - Leg 30, U.S. Govt. Print off., Washington D.C.
- CORE LAB Information (1973): A Course in the Fundamentals of Core Analysis. - Core Laboratories, Dallas (Texas).
- HUSMANN, H. (1984): Geologische Überwachung. - In: BENDER, F. (Hrsg.): Angewandte Geowissenschaften, Bd. III, F. Enke Verlag, Stuttgart.
- MAYER-GÜRR, A. (1968): Erschließung und Ausbeutung von Erdöl- und Erdgasfeldern. - In: BENIZ, A. & MARTINI, H.J. (Hrsg.): Lehrbuch der angewandten Geologie, Bd. 2, F. Enke Verlag, Stuttgart.
- KTB-STATUSBERICHT (1984): Forschungskonzeption. - Bd. 1 der Zusammenstellung der Alfred-Wegener-Stiftung/ Koordinierungsbüro KTB, Wissenschaftszentrum, Bonn (Januar 1984).
- NAGRA-NIB 85-01 (1985): Sondierbohrung Böttstein - Untersuchungsbericht - NAGRA-Publikation (Technischer Bericht: NIB), Baden-Baden/Schweiz, (Juni 1985).

