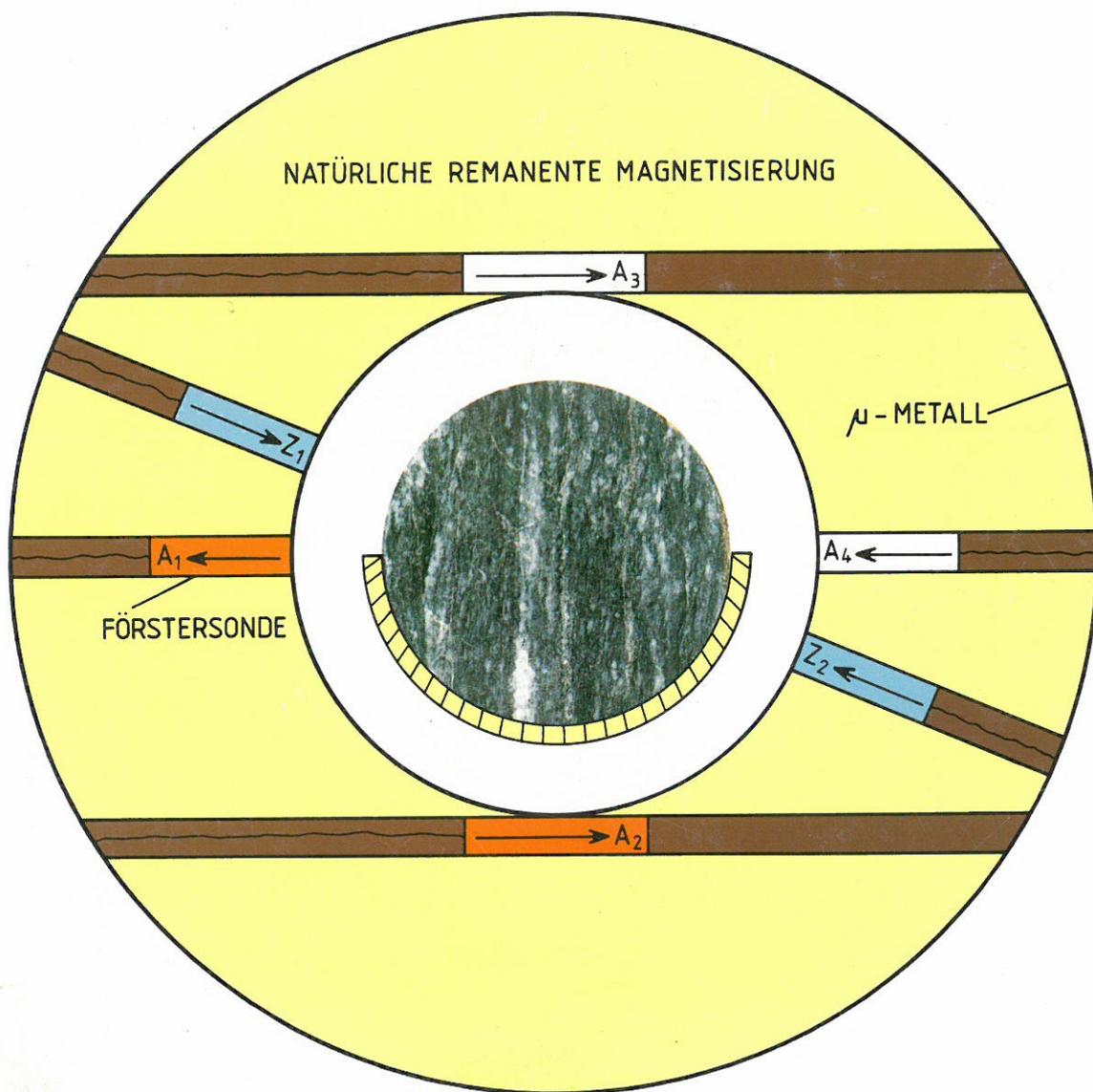


# KTB REPORT 88-6

## Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB

Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung  
im KTB-Feldlabor

Teufenbereich von 992–1530 m



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

R. Emmermann, H.-G. Dietrich, M. Heinisch, Th. Wöhr

Redaktion: Prof. Dr. R. Emmermann, Dr. H.-G. Dietrich,  
Dr. M. Heinisch und Dipl.-Geophys. Th. Wöhrle

Druck: A. Bernecker, 3508 Melsungen

Titelbild: Anordnung der sechs Förstersonden zur Messung der drei Raumkomponenten  $M_x$ ,  $M_y$  und  $M_z$  der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM)  $M_R^z$  eines Bohrkerns. Zur Abschirmung gegen das Erdmagnetfeld ist die gesamte Meßanordnung in einer  $\mu$ -Metall-Röhre untergebracht.  
(C. Bücken, S. Keyssner)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Forschungskennzeichen: RG 8604) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung  
Hannover 1988.

Nachdrucke, Vervielfältigungen und Übersetzungen, Verwendung in Funk und Fernsehen, Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und Speicherung in DV-Anlagen sind - auch auszugsweise - genehmigungspflichtig.

Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Anschrift des Herausgebers: Projektleitung KTB im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Postfach 51 03 53, D-3000 Hannover 51. Telefon: (05 11) 6 43-26 70.

## VORWORT

Das Feldlabor ist konzipiert als eine Gemeinschaftseinrichtung aller am KTB beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlergruppen. Es soll sicherstellen, daß kontinuierliche Untersuchungen an Kernmaterial, Bohrklein, Zentrifugenmaterial, Bohrspülung und Gesteinsfluiden durchgeführt und dabei alle Größen und Eigenschaften gemessen und dokumentiert werden, die

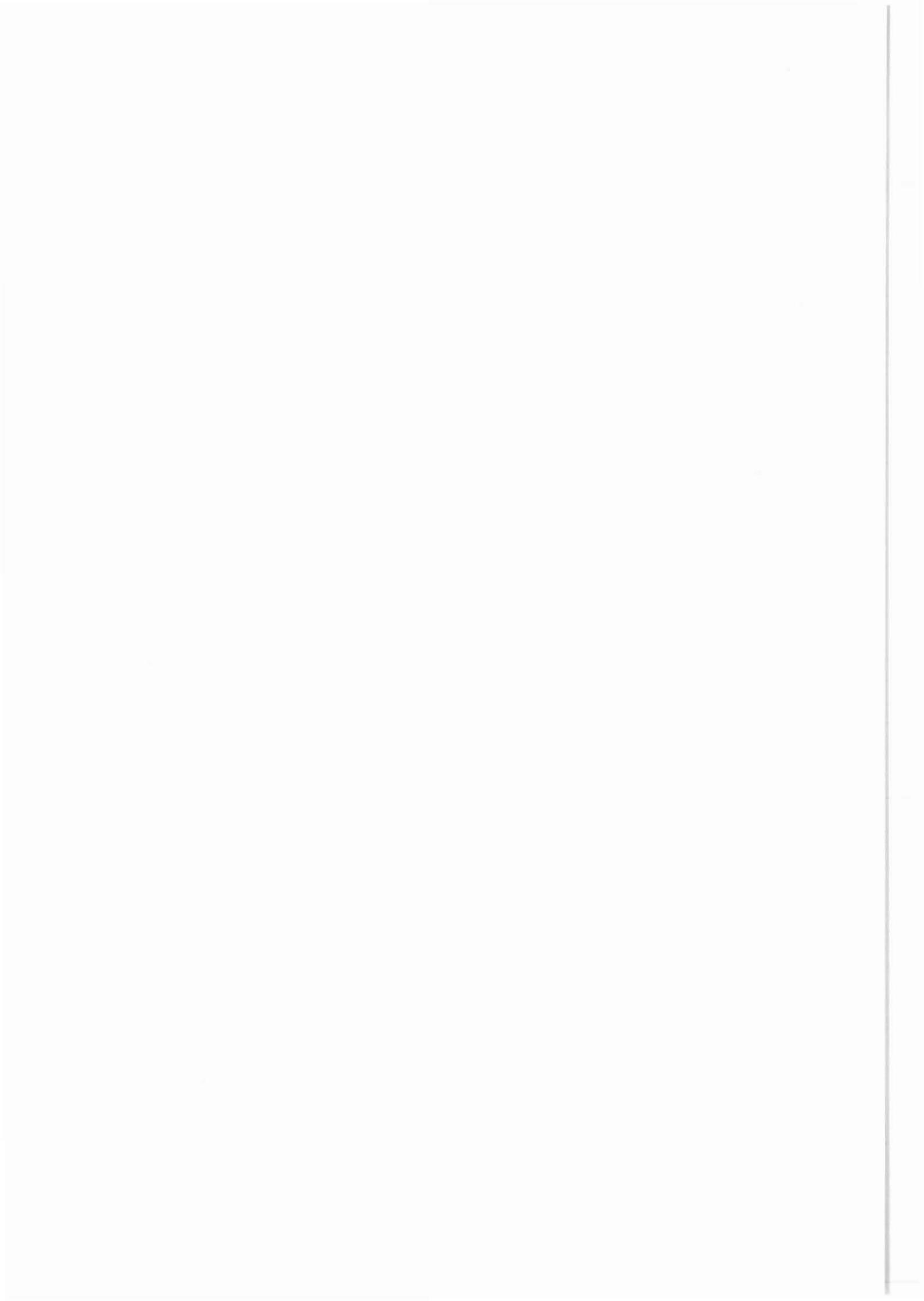
- für kurzfristige Entscheidungen über die Art des Bohrens, die Durchführung von Messungen und Tests im Bohrloch sowie die Probennahme erforderlich sind,
- zeitlichen Veränderungen unterliegen,
- in regelmäßigen Intervallen und als Funktion der Tiefe erfaßt werden müssen,
- für Korrelation mit anderen Untersuchungsergebnissen benötigt werden und
- die Grundlage für alle nachgeschalteten Forschungsprojekte darstellen.

Es untersteht organisatorisch dem Fachbereich "Operative Geologie" der KTB-Projektleitung. Mit der Leitung vor Ort ist Dr. H.-G. Dietrich beauftragt; seine Stellvertreter sind Dipl.-Geophys. T. Wöhrl und Dr. M. Heinisch. Das wissenschaftliche und technische Personal wird im Rahmen des DFG-Projektes "Personelle Ausstattung KTB-Feldlabor" finanziert und ist über Privat-Dienstverträge mit Prof. Dr. R. Emmermann an der Universität Gießen angestellt. Antragsteller dieses DFG-Projektes sind Prof. Dr. R. Emmermann, Universität Gießen; Prof. Dr. H. Berckhemer, Universität Frankfurt; Prof. Dr. G. Friedrich, RWTH Aachen; Prof. Dr. K. von Gehlen, Universität Frankfurt; Prof. Dr. H. Soffel, Universität München; Prof. Dr. K. Weber und Prof. Dr. K. H. Wedepohl, Universität Göttingen.

Derzeit sind im Feldlabor neben den drei festangestellten Mitarbeitern der Projektleitung 19 Wissenschaftler, 14 technische Angestellte und 2 Praktikanten tätig. Diese verteilen sich wie folgt auf die vier Arbeitsbereiche:

(1) Geologie / Petrographie	7 Wissenschaftler, 6 Techniker
(2) Geochemie / Mineralogie	4 Wissenschaftler, 4 Techniker
(3) Geophysik	5 Wissenschaftler, 4 Techniker
(4) Datenverarbeitung	2 Wissenschaftler

Zum Arbeitsbereich Geologie / Petrographie gehören auch die gesamte Probenverwaltung vor Ort, die Durchführung der Probenparties, sowie die Präparation und die Verteilung der ausgewählten Proben an die am KTB-Projekt beteiligten Geowissenschaftler außerhalb des Feldlabors.



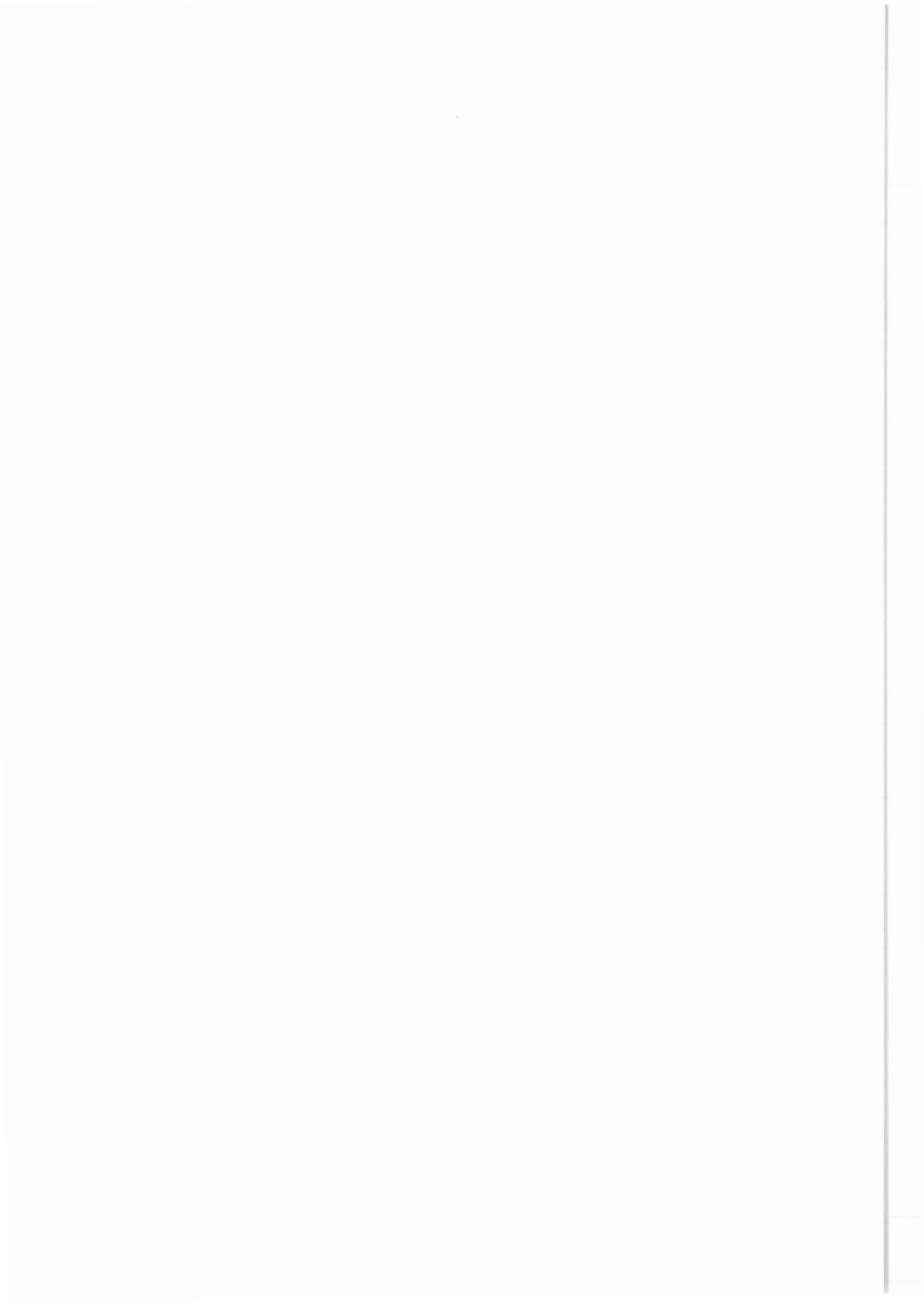
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB  
Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung  
im KTB-Feldlabor

Teufenbereich von 992 - 1530 m

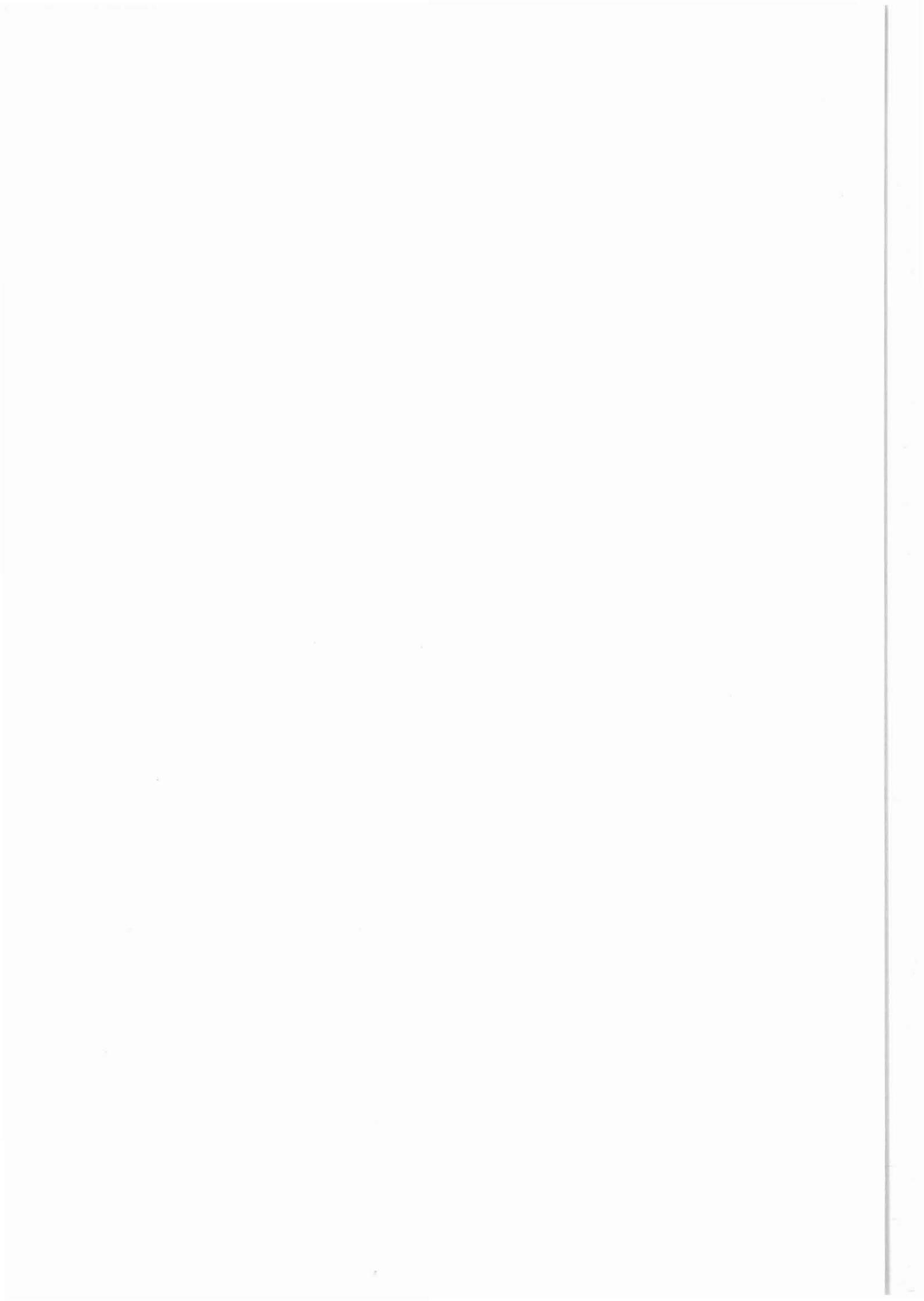
INHALTSVERZEICHNIS	SEITE
Vorwort	
A. Einleitung	A 1
Anhang	A 3
B. Geologie	
Zusammenfassung	B 2
abstract	B 3
B.1 Einleitung	B 5
B.2 Petrographie	B 7
B.2.1 Paragneise	B 7
B.2.2 Lamprophyre	B 11
B.2.3 Metabasitserie	B 14
B.2.3.1 Amphibolite (ohne Metagabbros)	B 16
B.2.3.2 Metagabbros	B 22
B.2.3.3 Leukokrate Biotit-Plagioklas-Gneise im Amphibolit	B 33
B.2.3.4 Meta-Ultramafitite	B 35
B.2.4 Diskussion	B 42
B.2.5 Nachträge zu vorherigen Berichten	B 49
B.3 Strukturgeologie	B 52
B.3.1 Einleitung	B 52
B.3.2 Makrogefüge	B 52
B.3.2.1 Foliation	B 52
B.3.2.2 Katakklase	B 55
B.3.3 Mikrogefüge	B 58
B.3.4 Interpretation	B 59
B.4 Anmerkungen zum Lithoprofil	B 62
B.4.1 Arbeitsmethodik	B 62

B.4.2	Korrelation von Logs mit Gesteinstypen und Mineralbeständen	B 62
B.4.3	Störungen	B 63
B.5	Literaturverzeichnis	B 65
B.6	Anhang	B 66
C.1	Einleitung	C 2
C.2	Probennahme und Probenaufbereitung	C 3
C.3	Röntgenanalytik	C 3
C.3.1	RDA/RFA-Ergebnisse an Bohrmehl und Kern- stücken des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 3
C.3.2	Vergleich der Ergebnisse von Bohrmehl und Bohrklein während der Richtbohrphase 992 - 1228 m	C 15
C.4	Spülungsanalytik	C 23
C.4.1	Funktionsprinzip der ICP-AES	C 23
C.4.1.1	Geräteparameter und verwendete Meßpro- gramme	C 26
C.4.2	Ergebnisse der Kationen- und Anionenana- lyse	C 27
C.4.3	Dekrepitationsanalytik	C 37
C.5	Gasanalytik	C 42
C.5.1	Funktionsprinzip des Prozeßgas-Massen- spektrometers	C 43
C.5.2	Ergebnisse des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 44
C.5.3	Festlegung von Störungzonen anhand chemischer Parameter	C 52
C.6	Zusammenfassung	C 54
C.7	Schriftenverzeichnis	C 56
C.8	Danksagung	C 57
C.9	Anhang	C 58
D.1	Einleitung	D 2
D.2	Dichte	D 3
D.2.1	Allgemeines	D 3
D.2.2	Dichte der Cuttings	D 3
D.2.3	Dichte der Bohrkern	D 5
D.3.	Ultraschallseismik	D 6

D.3.1	Allgemeines	D 6
D.3.2	Ergebnisse	D 6
D.4	Elektrische Leitfähigkeit	D 11
D.4.1	Allgemeines	D 11
D.4.2	Meßmethode	D 11
D.4.3	Ergebnisse	D 13
D.4.4	Bemerkungen zu den Meßergebnissen	D 14
D.5	Wärmeleitfähigkeit	D 19
D.5.1	Allgemeines	D 19
D.5.2	Meßmethode	D 19
D.5.2.1	Probenvorbereitung	D 19
D.5.2.2	Aufnahme der Temperatur-Zeit-Kurven	D 22
D.5.2.3	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	D 25
D.5.2.4	Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Proben	D 27
D.6	Natürliche remanente Magnetisierung (NRM)	D 32
D.6.1	Allgemeines	D 32
D.6.2	Beschreibung der Ergebnisse	D 32
D.6.3	Königsberger Q-Faktor	D 35
D.7	Suszeptibilität	D 38
D.7.1	Allgemeines	D 38
D.7.2	Suszeptibilität der Cuttings	D 38
D.7.3	Suszeptibilität der Bohrkerne	D 38
D.7.4	Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkerne und Cuttings	D 39
D.7.5	Korrelation Suszeptibilität-Dichte	D 40
D.8	Danksagung	D 44
D.9	Schriftenverzeichnis	D 45
D.10	Spannungs-Nachwirkungsmessungen	D 47
E.1	Einleitung	E 1
E.1.1	Harnischflächen als Anzeiger bruchhafter Deformation und ihre Verwendung als Schersinnindikatoren	E 1
E.1.2	Meßverfahren	E 2
E.1.3	Entwicklung eines Meßinstrumentes	E 2
E.2	Ergebnisse der Messungen	E 4
E.2.1	Charakteristik der Verschiebungsflächen	E 4
E.2.2	Mineralisationen auf den Harnischflächen	E 9
E.2.3	Altersabfolgen verschiedener Bewegungssysteme	E 15
E.3	Schlußfolgerung	E 17
E.4	Literaturverzeichnis	E 19



## A. Einleitung



## A. Einleitung

### A.1 Einleitung

Der nachfolgende Bericht stellt die Ergebnisse der Untersuchungen im KTB-Feldlabor für den Teufenbereich von 992 - 1530 m vor. Diese Untersuchungen wurden z. T. noch im Rahmen des Überbrückungsprogramms (siehe KTB-Report 88-1 und 88-2) durchgeführt. Der Umzug vom provisorischen Feldlabor in der Volksschule Windischeschenbach in das KTB-Zentralgebäude erfolgte Mitte Februar 1988. Erst von diesem Zeitpunkt an war es beispielsweise möglich, Dünnschliffe vor Ort selbst herzustellen. Die Einrichtung der Labors, der Präparations- und Arbeitsräume ist im Laufe des ersten Halbjahres 1988 weitgehend abgeschlossen worden (Abb. A 1.1 und A 1.2). Die Arbeiten an der Bohrung KTB OBERPFALZ VB wurden nach einer vorübergehenden Stilllegung der Bohranlage zum Jahreswechsel 1987 / 1988 am 04.01.88 mit der Durchführung eines Testprogrammes wieder aufgenommen. Der Bohrbetrieb selbst wurde am 11.01.88 fortgeführt. Das GEO-LOG mit einer Übersicht über das gesamte bis 1500 m durchteufte geologische Profil und eine Zusammenstellung geowissenschaftlich relevanter Daten finden sich in den Blättern am Ende dieses Reports.

### A.2 Bohrtechnik

Wegen des bis 992 m festgestellten Neigungsaufbaus auf ca. 10° mußte zunächst eine Richtbohrphase ohne Kerngewinn durchgeführt werden. Bei einer Teufe von 1228,8 m wurde erneut mit 6"-Diamantbohrkronen (Abb. A 2.1 und A.2.3) im Seilkernverfahren weitergebohrt. Bei 1529,4 m wurden die Bohrarbeiten für ein umfangreiches Meßprogramm unterbrochen.

### A.3 Probennahme

Wegen des Einsatzes von Rollenmeißeln im Teufenabschnitt von 992.0 - 1228.8 m konnten mit Ausnahme eines Referenzkerns (1177.0 - 1183.0 m) keine Bohrkernkerne genommen werden. Im anschließenden Teufenbereich von 1228.8 - 1530 m wurden insgesamt 66 Kernmärsche gezogen. Der Kerngewinn betrug annähernd 100%. Eine Aufstellung aller Meißeltypen, der jeweiligen Kerngewinne und -verluste können auf Anfrage beim KTB-Feldlabor angefordert werden.

Bohrklein (Cuttings) wurde während der Richtbohrphase von 992.0 m - 1228.8 m und auch während der nachfolgenden Seilkernarbeiten im Abstand von 0.5 m beprobt. Es muß jedoch davon ausgegangen werden, daß zumindest ein Teil des während des Einsatzes des Seilkernstranges mit Diamantbohrkronen am Schüttelsieb gewonnenen Probenmaterials aus Nachfall (Cavings) besteht.

Zentrifugenmaterial (Bohrmehl) wurde während beider Bohrphasen im Abstand von 1.0 m beprobt.

Bohrspülung wurde ebenfalls während des gesamten Berichtszeitraumes im Abstand von 1.0 m beprobt.

Gase wurden im gesamten Teufenbereich "quasi-on line" (unterbrochen vom Analysezyklus) in der Mud Logging Unit (C1 - C5, H<sub>2</sub>S) und mit dem Prozeßgasmassenspektrometer im Feldlabor (siehe Kap. C.5, Gasanalytik) analysiert.

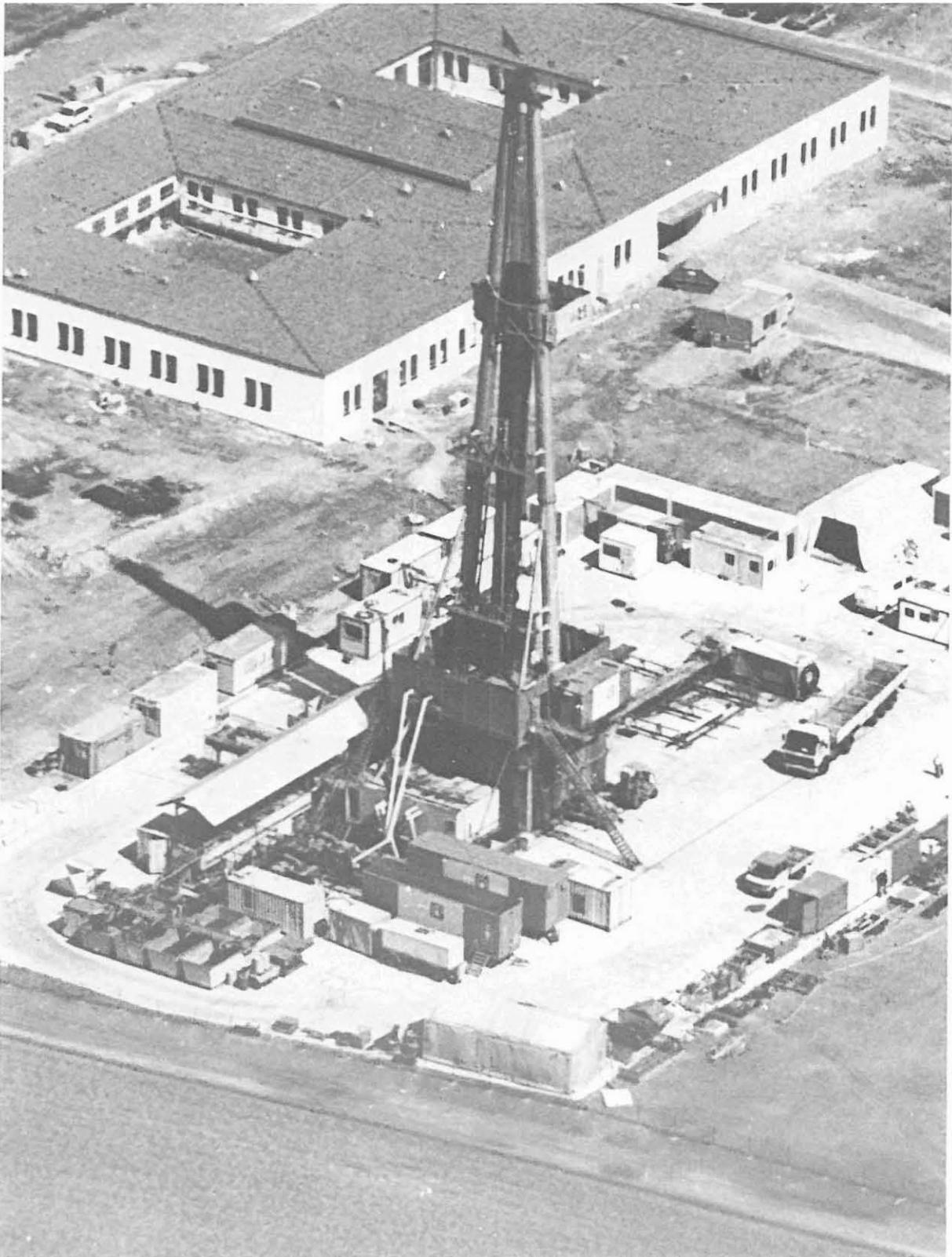


Abb. A.1.1: Luftbild der Bohrlokation vom April 1988; Aufnahme Hoffmannsbeck, freigegeben unter 992508 / 2170 vom Luftamt Nordbayern.



Abb. A.1.2 und A.1.3:  
Blick in das geolo-  
gische Zentrallager  
des KTB-Feldlabors -  
Auswahl von Proben  
während einer Proben-  
party.

Abb. A.1.2



Abb. A.1.3

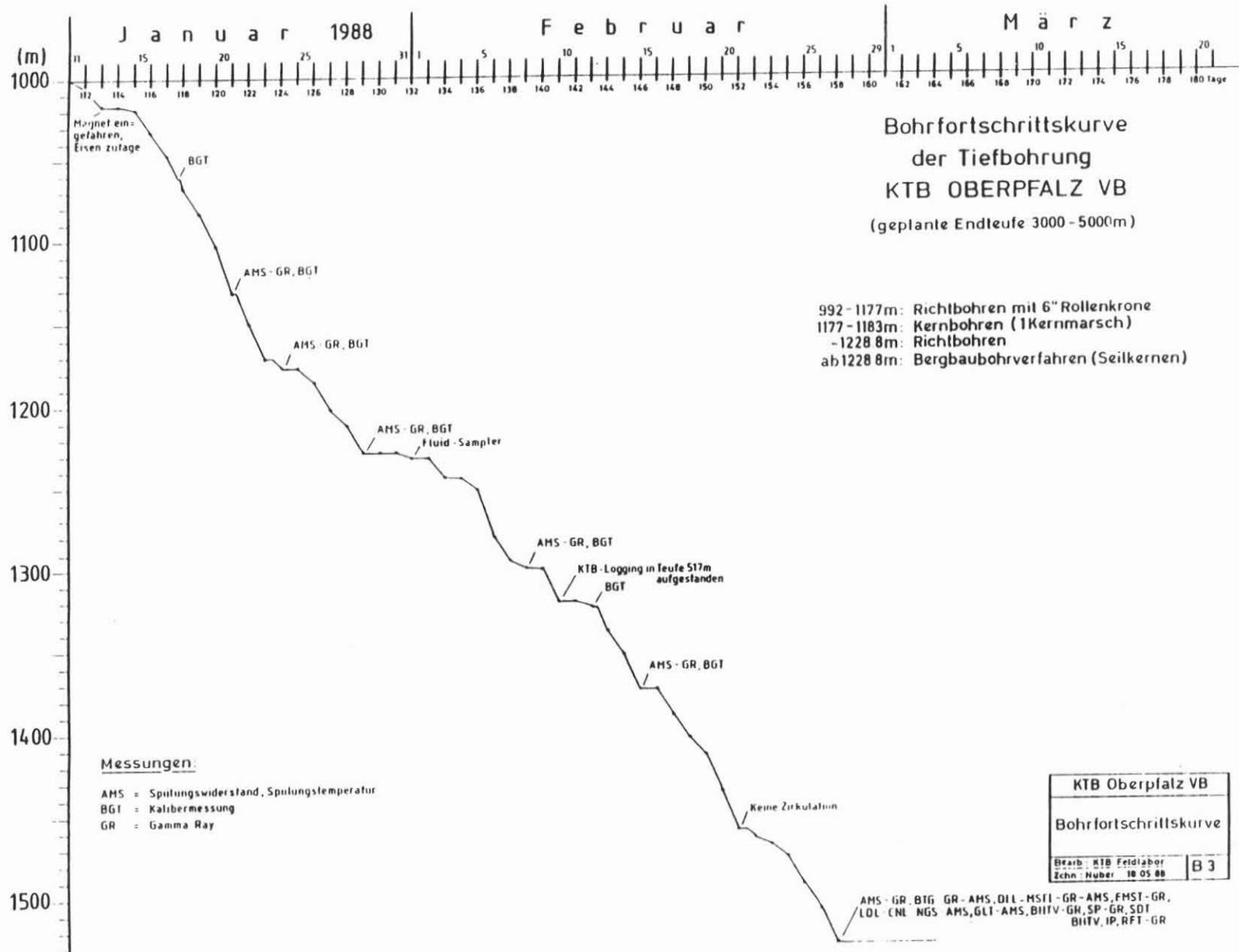
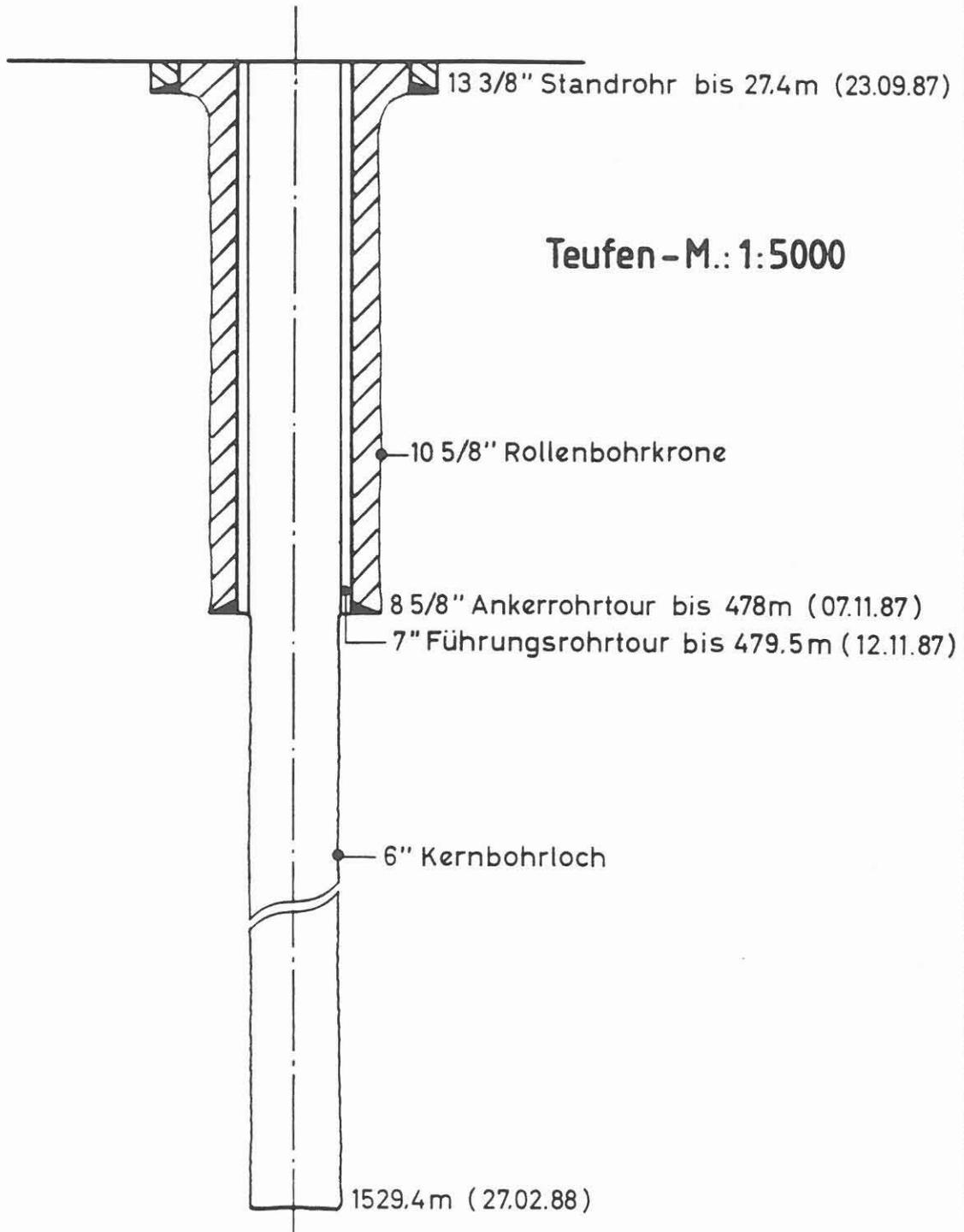


Abb. A.2.1

# KTB-Oberpfalz VB



Bohr- und Verrohrungsschema

**KTB**

Zchn.: Nuber 7.6.88 | A5

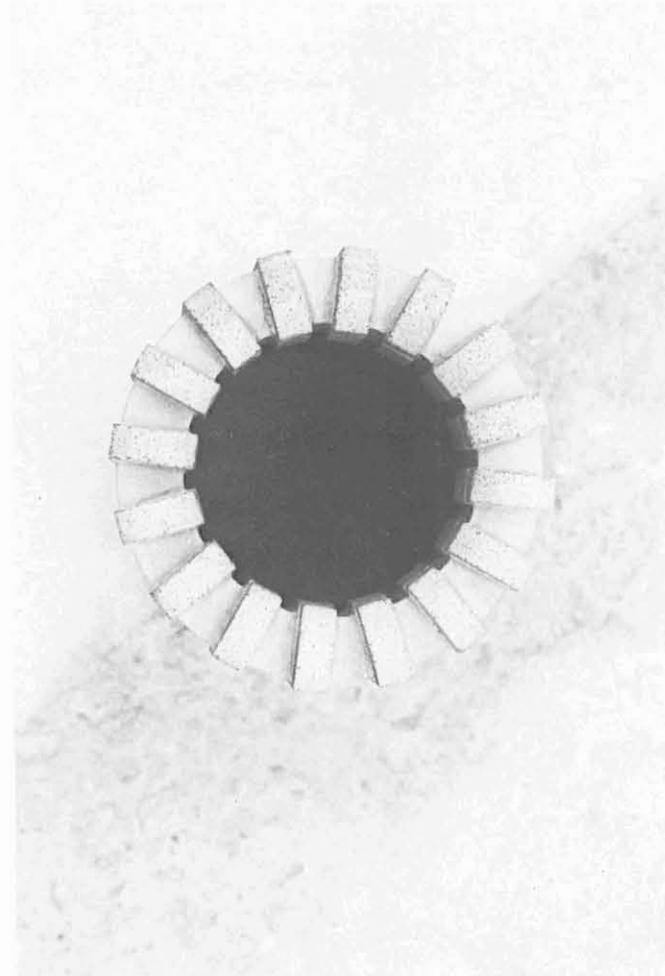
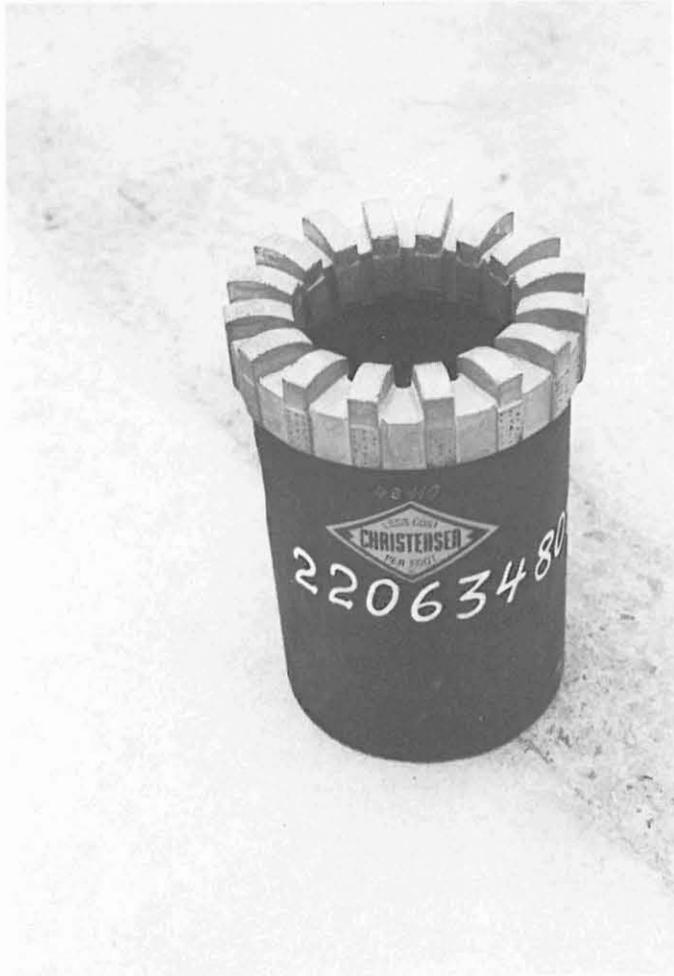
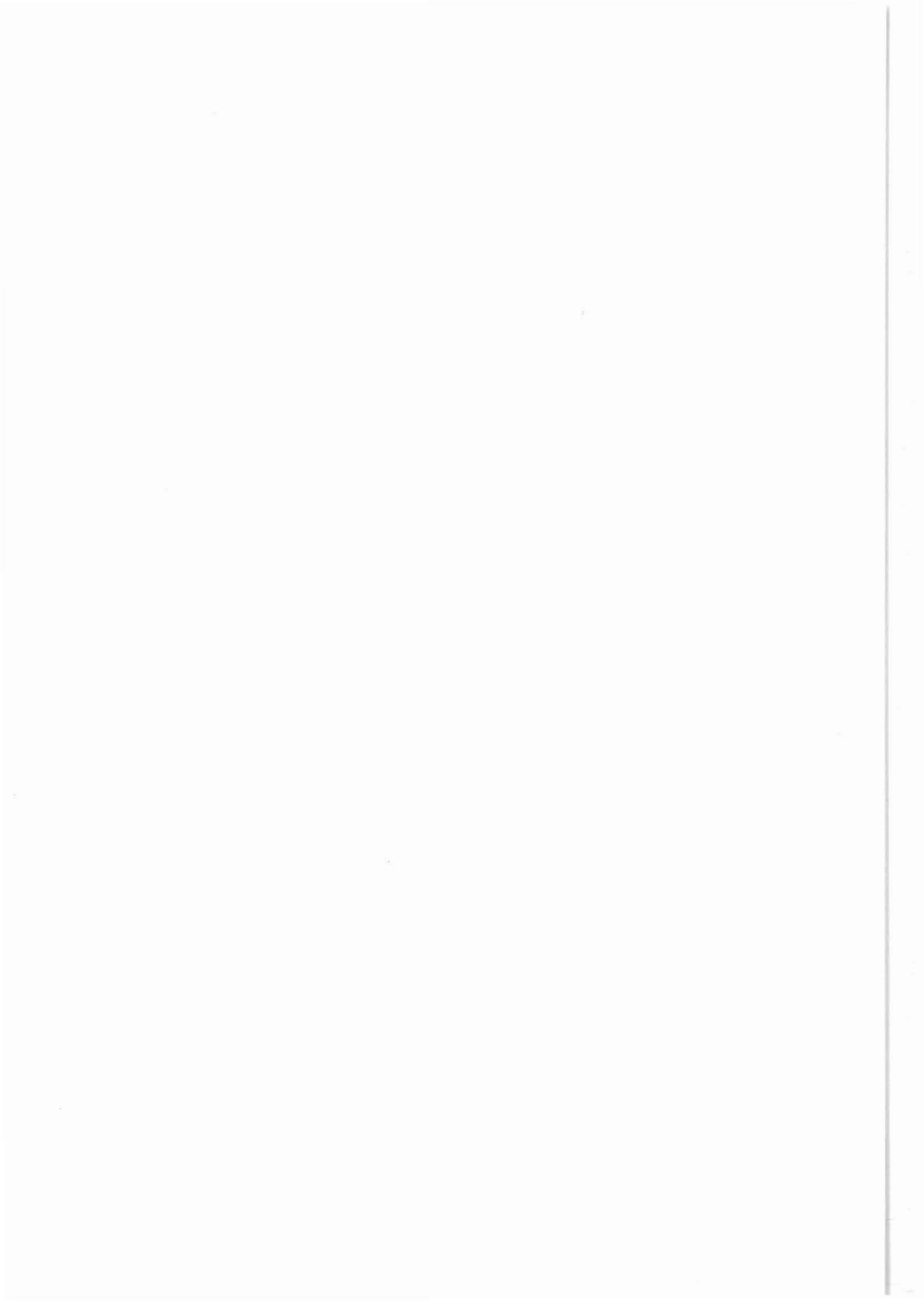


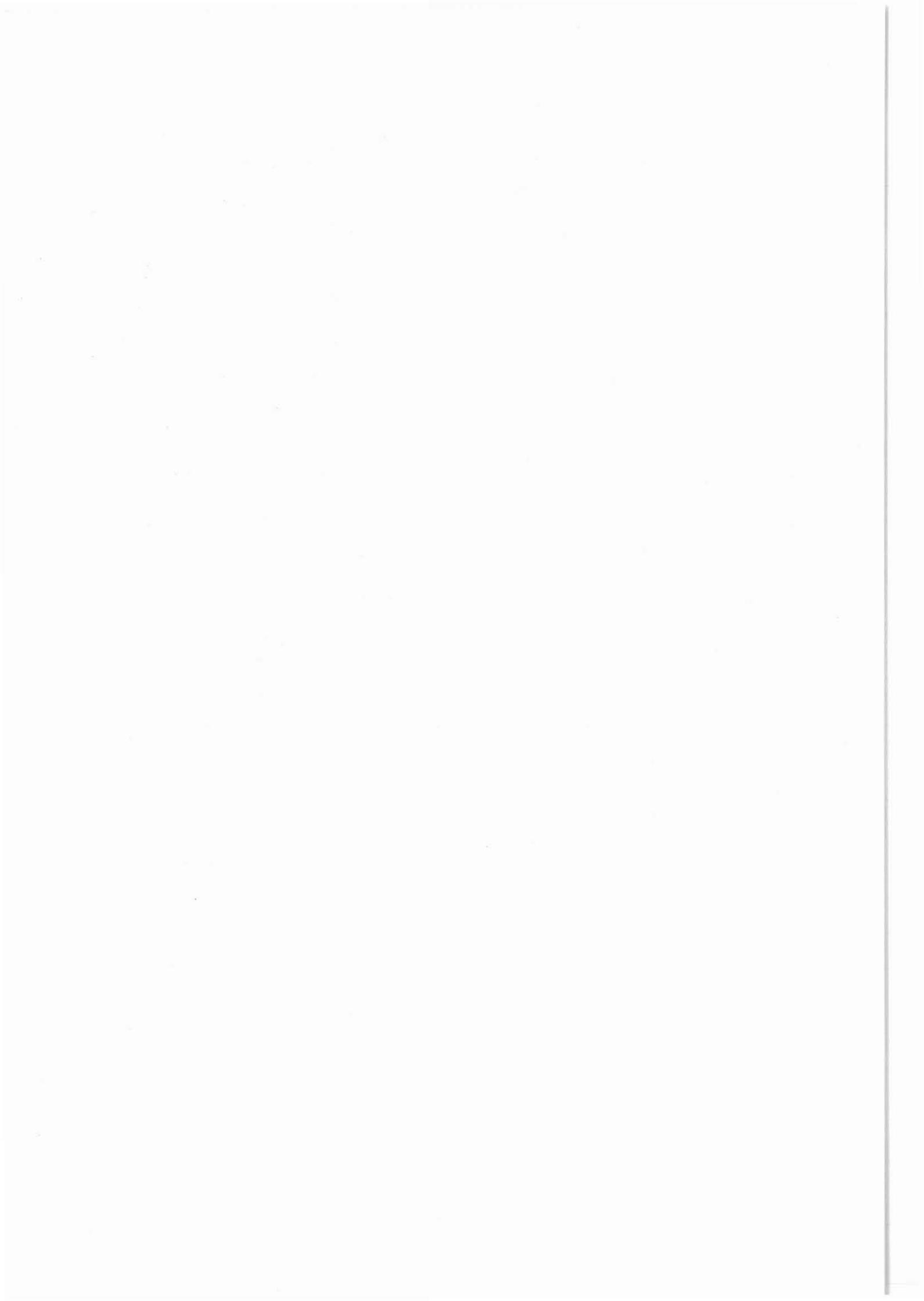
Abb. A.2.3: Weiterentwickelte Typen von 6"-Diamantbohrkronen für das Seilkernbohrverfahren



## B. Geologie

KTB Oberpfalz VB –  
erste Ergebnisse der geologischen Aufnahme  
bis 1530 m

S. Keyssner  
T. Massalsky  
H. Müller  
C. Röhr  
G. Graup  
W. Hacker



KTB Report	88-6	B1-B88	Abb.	Hannover 1988
------------	------	--------	------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m:

## B. Geologie

S. Keyssner, T. Massalsky, H. Müller, C. Röhr, G. Graup & W. Hacker \*)

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>		Seite
	Zusammenfassung	B 2
	abstract	B 3
B.1	Einleitung	B 5
B.2	Petrographie	B 7
B.2.1	Paragneise	B 7
B.2.2	Lamprophyre	B 11
B.2.3	Metabasitserie	B 14
B.2.3.1	Amphibolite (ohne Metagabbros)	B 16
B.2.3.2	Metagabbros	B 22
B.2.3.3	Leukokrate Biotit-Plagioklas-Gneise im Amphibolit	B 33
B.2.3.4	Meta-Ultramafitite	B 35
B.2.4	Diskussion	B 42
B.2.5	Nachträge zu vorherigen Berichten	B 49
B.3	Strukturgeologie	B 52
B.3.1	Einleitung	B 52
B.3.2	Makrogefüge	B 52
B.3.2.1	Foliation	B 52
B.3.2.2	Kataklase	B 55
B.3.3	Mikrogefüge	B 58
B.3.4	Interpretation	B 59
B.4	Anmerkungen zum Lithoprofil	B 62
B.4.1	Arbeitsmethodik	B 62
B.4.2	Korrelation von Logs mit Gesteinstypen und Mineralbeständen	B 62
B.4.3	Störungen	B 63
B.5	Literaturverzeichnis	B 65
B.6	Anhang	B 66

\*) Anschrift der Verfasser: KTB Feldlabor  
8486 Windischeschenbach

### Zusammenfassung

Der 3. Arbeitsbericht umfaßt die vorläufigen Ergebnisse der petrographischen und struktureologischen Bearbeitung des Bohrabschnittes 992 - 1530 m der Tiefbohrung "KTB Oberpfalz VB". Von 992 bis 1229 m standen zur Untersuchung fast ausschließlich Cuttings, ab 1229 m Bohrkerne zur Verfügung.

Bis 1160 m hat die Bohrung monotone granatführende Sillimanit-Biotit-Paragneise mit einzelnen Einschaltungen von Lamprophyr- und Quarzgängen durchteuft. Darunter tritt eine abwechslungsreiche Folge von Amphiboliten, Metagabbros und Meta-Ultramafititen auf.

Die nur durch Cuttings belegten Paragneise sind durchgehend stark alteriert und weisen ein granoblastisches Gefüge mit lokaler Tendenz zu duktiler Kornverkleinerung von Quarzen auf. Granat tritt gegenüber dem Abschnitt 460 - 992 m nur untergeordnet auf. Sillimanit ist in Form von Fibrolith eng mit Biotit verwachsen. An Opakmineralen dominieren Sulfide: Pyrit, Magnetkies, Kupferkies, Markasit, Arsenkies, Molybdänglanz neben Ilmenit, Rutil, Anatas und Graphit. Zwei größere kataklastische Störungszonen machen sich durch verstärkte Alteration und erhöhte Pyrit- und Graphitführung bemerkbar.

Die häufig granatreichen, z.T. biotitführenden Amphibolite zeigen sehr variable Gefüge von massigen über schwach foliierte/flaserige bis zu straff foliierten Typen und sind häufig von schlierig-migmatitischen Mobilisaten durchzogen. Lokal treten leukokrate, feldspatreiche Hornblende-Gneise auf.

In den Metagabbros dominiert ein reliktsches Ophitgefüge aus Klinopyroxen und Plagioklas(1) mit ausgeprägter Coronabildung von Granat um Klinopyroxen. Dieses Gefüge ist durch eine vorwiegend statische Metamorphose unter Bildung eines xenomorph-körnigen Grundgewebes aus Plagioklas(2), Granat und Hornblende überprägt worden. Plagioklas(1) wird von Granat verdrängt, Klinopyroxen von Hornblende. Die metamorphe Überprägung kann bis zur völligen Auslöschung des magmatischen Gefüges gehen.

In den Metabasiten überwiegen die oxidischen Erzmineralphasen (Ilmenit, Magnetit, Rutil) über die sulfidischen (Magnetkies, Pyrit, Kupferkies).

Ob eine genetische Beziehung zwischen Amphiboliten und Metagabbros besteht, ist unklar, da sowohl kontinuierliche Übergänge als auch Mobilisationserscheinungen oder auch von einer intensiven duktilen oder kataklastischen Deformation erfaßte Grenzen zu beobachten sind. Die Metagabbros sind deutlich basischer als die Amphibolite mit Anreicherung kompatibler und Abreicherung inkompatibler Elemente.

Die sowohl in Amphiboliten als auch in Metagabbros, vor allem in feldspat- und/oder quarzreicheren Lagen weit verbreitete, das magmatische Gefüge überprägende Foliation ist Ausdruck einer duktilen Deformation mit Streckungskomponente, die die Gesteine nach der Platznahme ergriffen hat. In quarz- und plagioklasärmeren Bereichen geht diese duktile Deformation in eine vorherrschend bruchhafte Deformation über. Diskordante Scherbahnen dokumentieren ein jüngeres kataklastisches Deformationsstadium. Die primär magmatischen (intrusiven?) Kontakte zwischen verschiedenen Metabasiten sind häufig von solchen jüngeren, kataklastischen Scherzonen überprägt worden, deren Anlage durch das unterschiedliche rheologische Verhalten der verschiedenen Gesteinstypen begünstigt wird.

Meta-Ultramafitite treten als kleine Xenolithe oder größere Körper (maximal auf 6 m Kernlänge aufgeschlossen) vorwiegend in Metagabbros auf und werden als Kumulate des gabbroiden Magmas gedeutet. Hauptgemengteile sind Klinopyroxen und Talk-/Serpentinaggregate (Olivinpseudomorphosen) oder Hornblende. Zusätzlich zu den bei den Metabasiten erwähnten Erzmineralen treten Kobaltglanz und Pentlandit auf. Diese Gesteine sind ausschließlich massig ausgeprägt.

#### Abstract

This third KTB field laboratory report presents preliminary petrographic and structural results of the section from 992 m to 1530 m of the scientific well 'KTB Oberpfalz VB'. Due to directional drilling only cuttings were available from 992 m to 1229 m whereas from 1229 m onwards cores were recovered.

Down to 1160 m the well intersected a monotonous suite of garnet-bearing sillimanite-biotite-paragneisses with a few intercalations of lamprophyric dikes and quartz veins. Then followed a variable sequence of amphibolites, metagabbros and meta-ultramafic rocks.

The paragneisses, which are only documented by cuttings, are mostly severely altered and have a granoblastic structure with quartz showing a local tendency to ductile decrease in grain size. Garnet is rare compared to the section from 460 m to 992 m. Sillimanite appears as fibrolitic aggregates in close intergrowth with biotite. Accessory graphite is ubiquitous. Ore minerals are dominantly sulfides: pyrite, pyrrotite, chalcopyrite, markasite, arsenopyrite, molybdenite, and subordinate ilmenite, rutile, and anatase. Two major cataclastic fault zones can be recognized by their intense alteration and increase in pyrite and graphite content.

The amphibolites, mostly rich in garnet, are partly biotite-bearing. They show variable structures (massive through weak-

ly foliated to intensely foliated) and are frequently penetrated by schlieren-like migmatitic mobilisates. Locally leucocratic hornblende-gneisses rich in plagioclase are present.

The metagabbros are characterized by a relictic ophite texture of clinopyroxene and plagioclase(1) with development of garnet coronas around clinopyroxene. This ophitic texture is overprinted by a predominantly static metamorphism which leads to isosize xenomorph growth of plagioclase(2), garnet and amphibole. Garnet partly replaces plagioclase(1) and clinopyroxene is pseudomorphosed by amphibole. This metamorphic overprint can proceed until total extinction of the primary magmatic textures is reached.

Ore minerals in the metabasites are predominantly oxides (ilmenite, magnetite, rutile) and subordinate sulfides (pyrrhotine, pyrite, chalcopyrite).

It is not yet clear whether amphibolites and metagabbros are cogenetic because the contacts are very diversely developed. Transitions have been observed to be continuous or soaked by migmatitic schlieren or influenced by intense ductile or cataclastic deformation. Geochemically the metagabbros are more basic than the amphibolites with an enrichment of compatible elements and decrease in incompatible ones.

Feldspar-enriched and/or quartz-enriched layers in amphibolites and metagabbros in large parts show a foliation which overprints the primary magmatic texture by a ductile deformation with an elongational component. In quartz-poorer and/or plagioclase-poorer parts this ductile deformation is replaced by a predominantly brittle deformation. Discordant shear zones represent a younger cataclastic stage of deformation. These younger cataclastic shear zones frequently overprint primary magmatic contacts between different metabasites and meta-ultramafitites because of their different rheological characteristics.

Meta-ultramafitites occur as small xenolites or larger bodies (up to 6 m core length) predominantly in metagabbros and are interpreted as cumulates of a gabbroic magma. Main components are clinopyroxene and talc/serpentine-aggregates (pseudomorph after olivine) or amphibole. Cobaltite and pentlandite are observed in addition to the ore minerals mentioned above with the metabasites. These rocks do not show any foliation.

## B.1 Einleitung

Während der Richtbohrphase (992.0 - 1228.8 m) wurde mit Ausnahme eines einzelnen Kernes (Kernmarsch 253, 1177.0 - 1183.0 m) ausschließlich Bohrklein (Cuttings) und Bohrmehl gewonnen. Im Anschluß an diese Richtbohrstrecke wurden von 1228.8 bis 1529.4 m (Kernmarsch 253 - 319) wieder Kerne erbohrt (siehe Abschnitt A).

Die Cuttings werden zunächst makroskopisch mit Hilfe des Binokulars angesprochen und später von ausgesuchten, z.T. vorkonzentrierten Proben Dünnschliffe hergestellt. Die makroskopische Bohrkernansprache wird im Klartext in der sogenannten Bohrkernkurzbeschreibung dokumentiert und erfolgt unmittelbar nach der Kernentnahme, während die detaillierte, EDV-gerechte Kernaufnahme später nachgearbeitet wird. Zur Erstellung des geologischen Profils werden die Ergebnisse der Arbeitsgruppen Geophysik und Geochemie sowie die geophysikalischen Bohrlochmessungen hinzugezogen. Dies ist vor allem in den kernlosen Bohrphasen unbedingt erforderlich.

Nach Einrichtung des Schlifflabors im KTB-Feldlabor werden nun auch die Dünnschliffe (z.T. als polierte Dünnschliffe) im Hause hergestellt, während Erzanschliffe weiterhin am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen angefertigt werden.

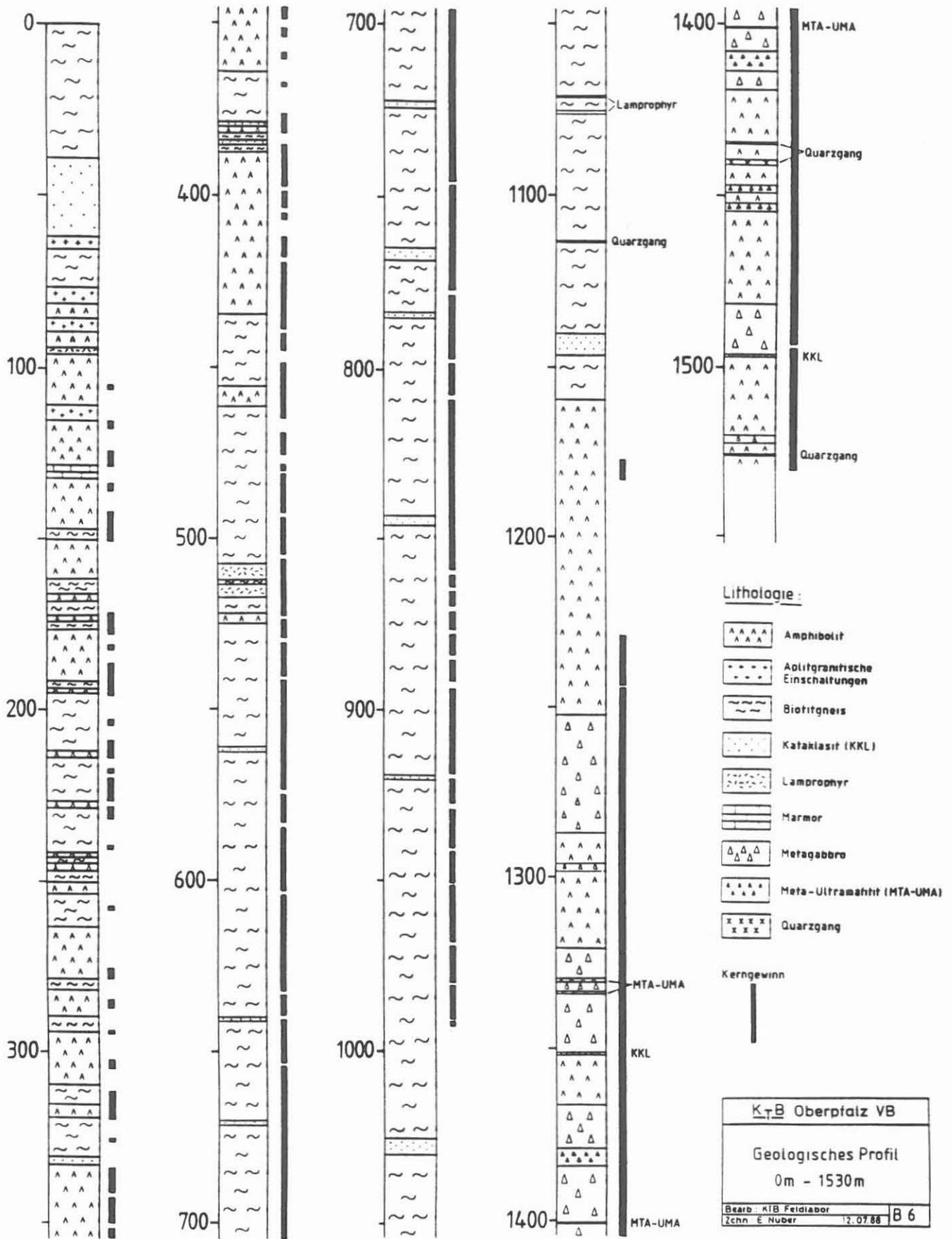


Abb. B.2.1: Geologisches Übersichtsprofil von 0 bis 1530 m

## B.2 Petrographie

Der Teufenbereich 992 - 1530 m gliedert sich in:

992 - 1160 m alterierter Sillimanit-Biotit-Paragneis

1160 - 1530 m Metabasitserie aus Amphibolit, Metagabbro  
und Meta-Ultramafitit mit wenigen Quarzgängen.

Abbildung B.2.1 zeigt das geologische Übersichtsprofil des Teufenabschnitts 0 - 1530 m; das detaillierte Profil im Maßstab 1:200 befindet sich im Anhang zu Abschnitt B.

### B.2.1 Paragneise

(Dünnschliffe CUT998m, CUT1006m, CUT1025m, CUT1034m I+II, CUT1047m I+II, CUT1059m I+II, CUT1060 I+II, CUT1067m, CUT1070m A+B+C, CUT 1102m, CUT1177 A+B (wohl Nachfall?); Ansliffe: Cut1030, CUT1030ERZ, CUT1034, CUT1034ERZ, CUT1103, CUT1103ERZ, CUT1145, CUT1145ERZ, 992 - 1160 m)

Die Charakterisierung der während der Richtbohrphase durchteuften Paragneise beruht ausschließlich auf der Bearbeitung von Bohrklein, so daß eine exakte Teufenzuordnung nur bedingt möglich ist. Mit einer Vermischung des Bohrkleins durch Nachfall aus geringeren Teufen ist immer zu rechnen.

Die ab 460 m angetroffenen Paragneise setzen sich kontinuierlich bis 1160 m fort. Insgesamt wurde damit über eine Strecke von ca. 600 m eine monotone Paragneisserie mit nur geringmächtigen anderen lithologischen Einschaltungen durchteuft. Es handelt sich um feinkörnige (0.2 - 1 mm), nach dem Dünnschliffbefund häufig straff foliierte Sillimanit-Biotit-Gneise mit geringem bis fehlendem Granatgehalt, die meist stark diaphthoritisch überprägt sind. Sillimanit-Biotit-Verwachsungen zusammen mit Quarz und Plagioklas bilden die primäre Paragenese. Die ebenfalls stets im Bohrklein auftretenden Quarz-Plagioklas-Aggregate werden als helle Mobilisate (Leukosome) gedeutet, die in den Strecken, die durch Bohrkörner belegt sind, dem Paragneis oft eine migmatitische Textur geben. In Analogie zu den Befunden im hangenden Teil der Paragneisserie (vgl. HACKER et al. 1988) wird für den häufig auftretenden Muskovit überwiegend eine retrograde Bildung angenommen (s. Kap. B.2.5).

Die folgende mikroskopische Beschreibung stützt sich auf 15 Dünnschliffe und 8 Ansliffe, die von dem Bohrklein angefertigt wurden.

Quarz tritt je nach tektonischer Beanspruchung des Gesteins mit einfachen, geraden oder suturierten Korngrenzen oder

feinkörnig rekristallisiert, meist undulös auslöschend und mit Subkornbildung auf. Plagioklas ist frisch, schwach sericitisiert oder von staubfeinen, opak erscheinenden Einschlüssen getrübt. Stellenweise sind die Zwillingslamellen verbogen. Wohl in Leukosom-Bruchstücken wurde Plagioklas hypidiomorph gefunden. Biotit findet sich in allen Cutting-Proben in verschiedenen Alterationsgraden. Die Entmischung von Ilmenit in noch schwach braunen Biotiten wurde oberhalb 992 m nicht in dem hier beobachteten Ausmaß angetroffen. Eine retrograde Umwandlung von Biotit zu Chlorit und Muskovit ist allgegenwärtig. In solchen Chloriten finden sich idiomorphe Epidot/Klinozoisit-Kristalle und Leukoxen (Abb. B.2.2). Sillimanit erscheint vorwiegend in langgestreckten Fibrolithstrahlen mit Biotit verwachsen oder als Fibrolithwirbel in Quarz, untergeordnet auch als individualisierte kurze Nadeln. Sillimanit ist fast vollständig durch Hellglimmer ersetzt. Manche in Plagioklas eingewachsene Sillimanitnadeln waren vor der Alteration geschützt, obwohl gleich daneben Fibrolithstrahlen völlig sericitisiert sein können. Aus solchen Sericitaggregaten nach Fibrolith sprossen Muskovitkristalle. In anderen Muskoviten finden sich Sillimanitform- und -stoffrelikte (Abb. B.2.3). Granat tritt im Gegensatz zu den Paragneisen oberhalb der Berichtsteufe nur noch untergeordnet auf. Meist handelt es sich um kleine, korrodierte Körnchen, die von Fibrolith-Biotit-Aggregaten umflasert werden. Stellenweise sproßt Chlorit auf einem dichtständigen Bruchsystem im Granat oder hat diesen schon völlig verdrängt (Abb. B.2.4). In zwei Cutting-Stücken wurden wahrscheinlich kleine, nicht sicher bestimmbare Disthenrelikte gefunden. Sie unterstreichen die immer wieder beobachtete Tendenz, daß mit zunehmender Tiefe der Disthen zunehmend von Sillimanit abgelöst wird. Diese Entwicklung kann durch Temperaturerhöhung oder Drucksenkung bedingt sein.

Als Akzessorien werden Zirkon, Apatit, Opakminerale und Titanit beobachtet. Hin und wieder durchschlägt ein Karbonat- oder Zeolithgächchen den Gneis. In einem Cutting-Stück von 1059 m wurde eine "crack and seal"-Struktur beobachtet (siehe auch Kap. B.3.3): in einem foliationsparallelen Quarzgächchen treten schmale, langgestreckte Gneisbruchstücke auf, die wohl durch wiederholtes Aufreißen, Mitabreißen des Gangnebengesteins und Verheilen mit Quarz entstanden sind (Abb. B.2.5). Die völlig von Quarz eingeschlossenen Gneisbruchstücke sind genauso stark alteriert wie das Nebengestein.

Als Opakanteil der Paragneise wurden nach makroskopischen Befunden und Auflichtuntersuchungen Pyrit, Magnetkies, Kupferkies, Markasit, Arsenkies, Pentlandit, Molybdänglanz, Rutil, Anatas, Ilmenit und Graphit bestimmt.

Pyrit bildet oft hypidiomorphe Einzelkörner, sowie größere, unregelmäßige, hohlraumreiche Aggregate und wird als dominierendes Erzmineral nur selten von Magnetkies abgelöst (z. B. 1034 m). Das Mineral zeigt häufig eine kataklastische Überprägung. Risse und Hohlräume in diesen Aggregaten weisen

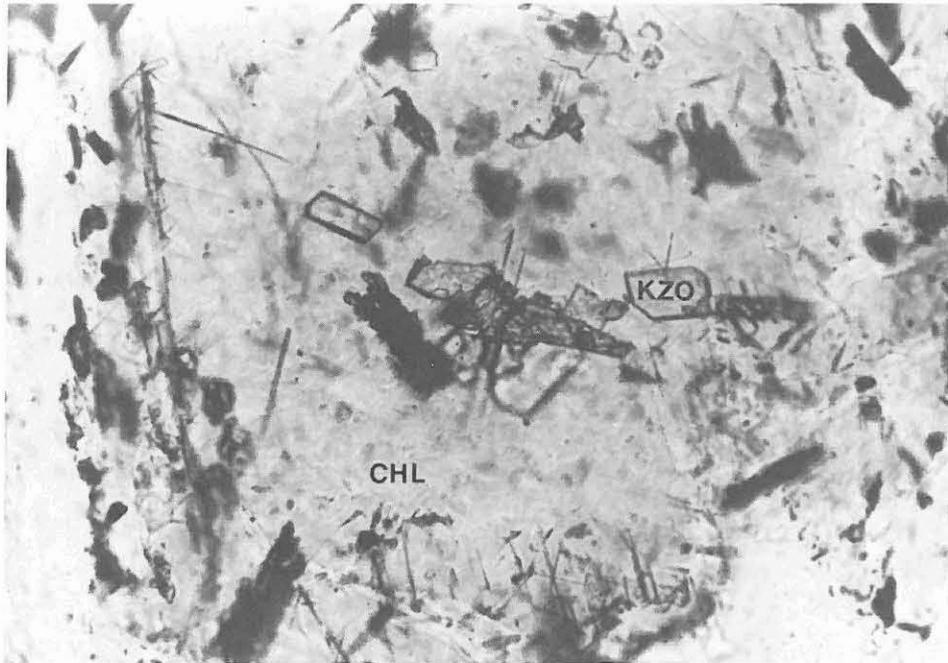


Abb. B.2.2: Idiomorphe Klinozoisit-Kristalle (KZO) und Sagenit-Nadeln in chloritisiertem Biotit (CHL) - (Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, Cutting)  
(Schliff CUT1060II, 1060 m, 1 Nicol, 300-fach).

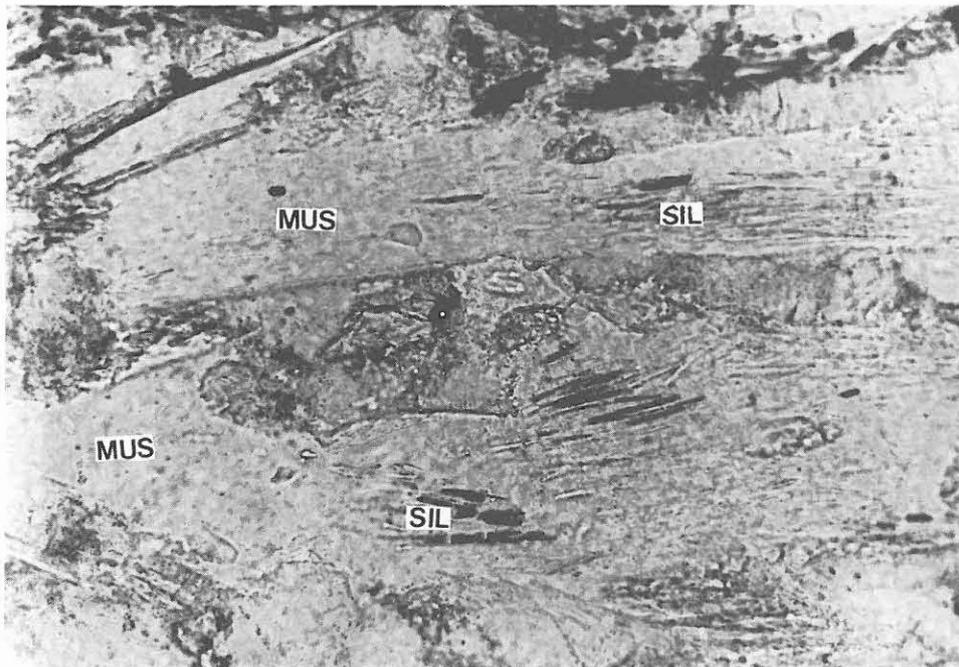


Abb. B.2.3: Sillimanit-Relikte (SIL) in Muskovit (MUS) - (Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, Cutting)  
(Schliff CUT1006, 1006 m, 1 Nicol, 150-fach).

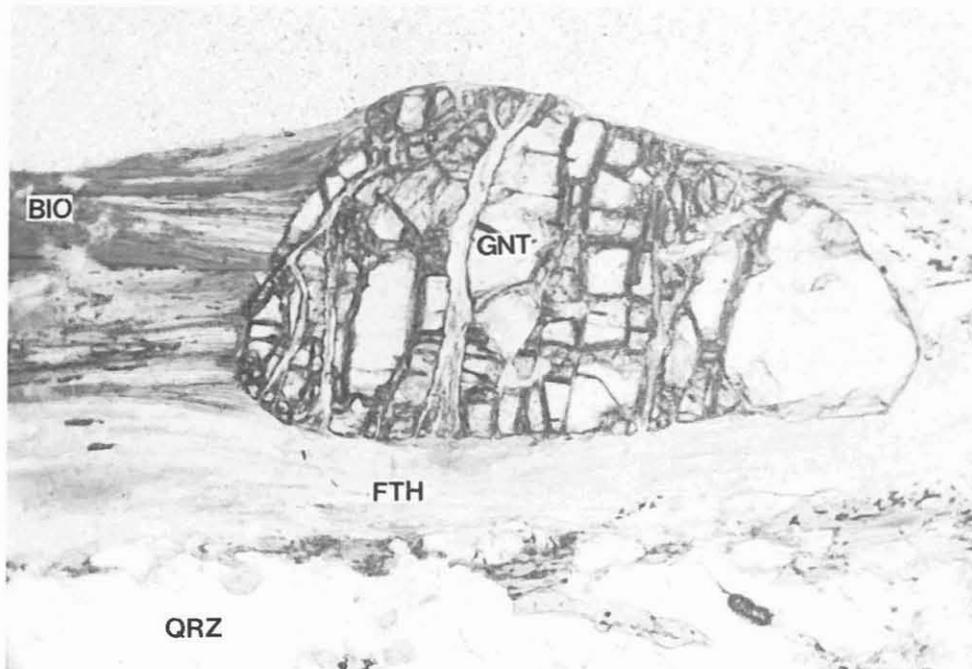


Abb. B.2.4: Von Rissen aus chloritisierter Granat (GNT), von Fibrolith-Biotit-Flasern (hellverglimmert - FTH) umflossen (Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, Cutting) (Schliff CUT1006, 1006 m, 1 Nicol, 70-fach).

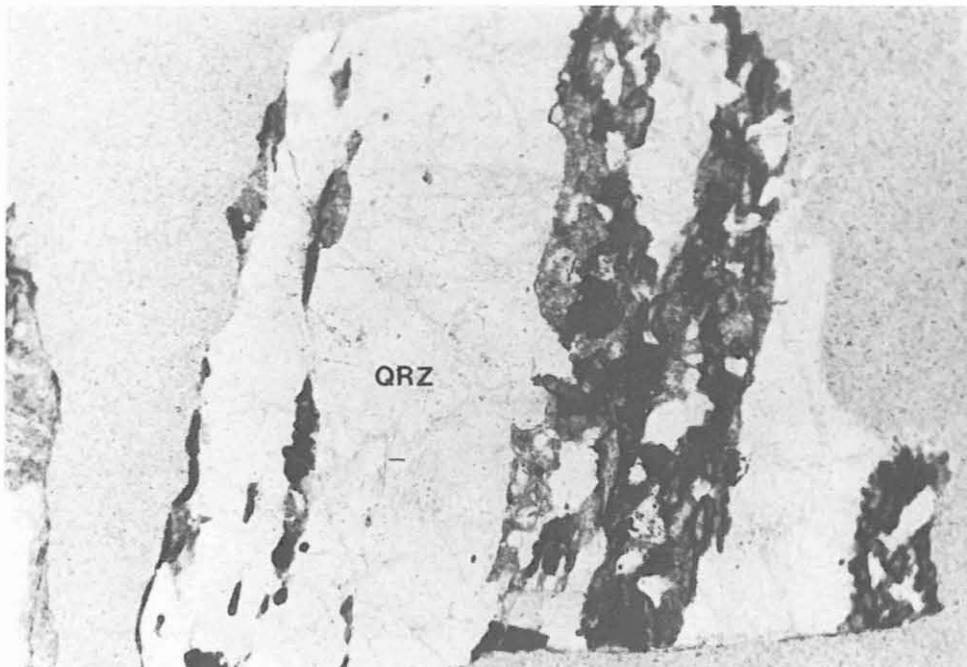


Abb. B.2.5: Crack-and-seal-Struktur (Quarz-Gängchen in alteriertem Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, Cutting) (Schliff CUT1059, 1059 m, 1 Nicol, 25-fach).

stellenweise eine bevorzugte Orientierung auf (Abb. B.2.6). In Form von Einschlüssen und jüngeren Rißfüllungen im Pyrit tritt Kupferkies (Abb. B.2.7) auf, als Anlagerung und Hohlraumfüllung Graphit. Manchmal zeigt Pyrit bereits in Luft leichte Anisotropieerscheinungen. Magnetkies bildet xenomorphe, hohlraumreiche, buchtige Einzelkörner (Abb. B.2.8) mit sowohl blockartiger als auch schlierenförmiger Anisotropie. Einschlüsse von Pyrit und Anlagerungen von Kupferkies wurden identifiziert. Kleine, meist randliche, flammenförmige Einschlüsse bestehen aus Pentlandit (isotrop) und Markasit (anisotrop, bläulich). Kupferkies stellt eine untergeordnete Opakmineralphase dar. Er tritt zusammen mit Pyrit und Magnetkies auf, findet sich aber meist als kleine, xenomorphe Einzelkörner in hellen Mobilisaten. In dem Anschliff (CUT1103) wurde ein sehr kleiner, leistenförmiger Molybdänglanz mit Pyritaufwachsungen und -einschlüssen identifiziert. In gleicher Teufe wurde Arsenkies als untergeordnete, sehr helle, auffällige Anisotropiefarben zeigende, idiomorphe Phase mit Hilfe von Mikrosondenanalysen (vom Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen durch Herrn S. van Delden durchgeführt) bestimmt.

Rutil findet sich in fast jeder untersuchten Probe. Er bildet rundlich-ovale bis unregelmäßige Kornformen aus (Abb. B.2.8). Die Farbe der Innenreflexe wechselt von hellgrau-weiß bis zu gelb-braun, seltener zu rot (1145 m). Untergeordnet tritt Ilmenit auf, der sowohl nadelige als auch unregelmäßige, meist nur kleine Kornformen ausbildet.

Der Graphitanteil in den Paragneisen wechselt. Das Mineral tritt in Form gebogener und aufgefiederter Leisten (Abb. B.2.6 und B.2.8) und haufenförmiger Aggregate auf. Stellenweise ist Graphit in sulfidische Erzminerale eingelagert.

## B.2.2 Lamprophyre

(Dünnschliffe: CUT1070A, CUT1077)

Im Teufenbereich 1067 - 1077 m treten mehrfach Bruchstücke von dunklen Ganggesteinen auf, die vermutlich der Lamprophyrfamilie zugerechnet werden können. Es handelt sich um sehr feinkörnige, teils gleichkörnige, teils porphyrische Gesteine mit sperrigen Feldspatleisten in einer feinnadeligen oder feinfilzigen Grundmasse aus sericitisiertem Feldspat, Chlorit und wenig Quarz in Zwickeln, sowie zahlreichen, kleinen Leukoxen-Klümpchen und Chlorit (Abb. B.2.9). Dunkelbrauner Spinell, Apatit, fast völlig chloritisierte Biotit und vereinzelte Relikte einer braunen Hornblende gehören zum primären Mineralbestand. Daneben treten z.T. rechteckige, meist aber unregelmäßig begrenzte, bis 400 µm große Einsprenglingspseudomorphosen auf, die aus Chlorit oder Karbonat bestehen. Karbonat ist stellenweise reichlich in Form rundlicher Aggre-



Abb. B.2.6: Hypidiomorphes Pyritaggregat; Risse und Hohlräume zeigen eine bevorzugte Orientierung; Graphitleisten als An- und Einlagerung (Anschliff CUT1034ERZ, 1034 m, Körnerpräparat, 1 Nicol, 125-fach, Luft).

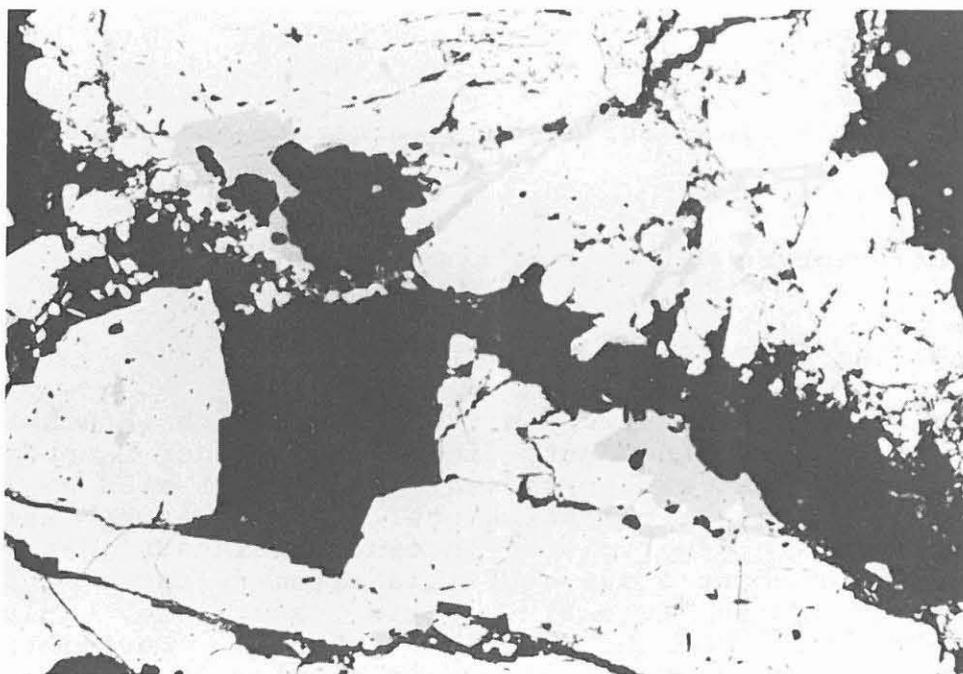


Abb. B.2.7: Kupferkies (grau) verdrängt Pyrit (hellgrau) von Rissen und Hohlräumen aus (Anschliff CUT1034ERZ, 1034 m, Körnerpräparat, 1 Nicol, 140-fach, Luft).

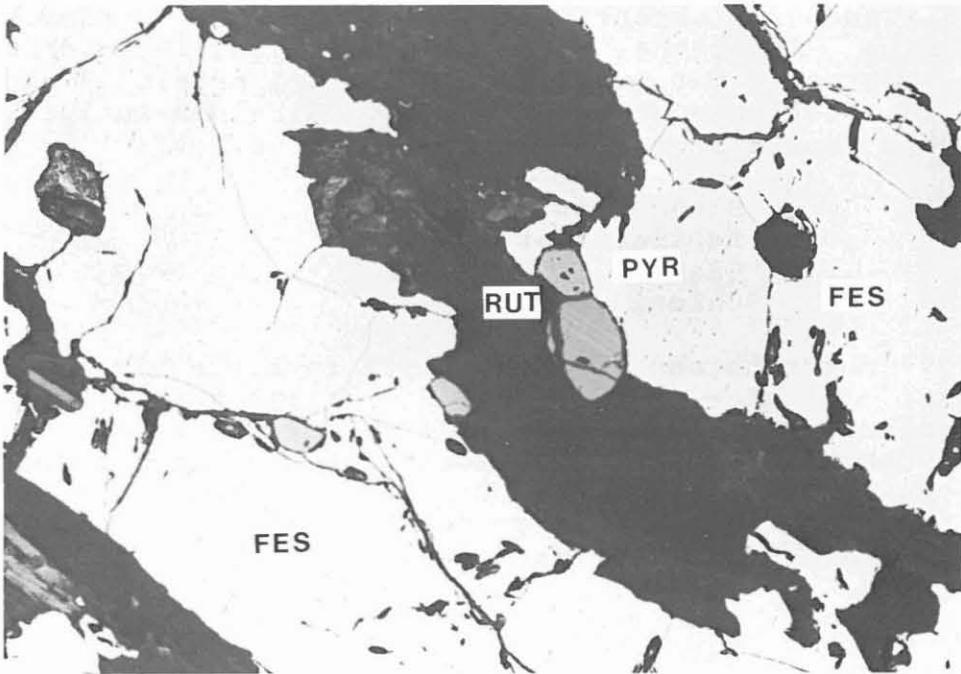


Abb. B.2.8: Magnetkiesaggregate (FES) mit Pyritaufwachsungen (PYR) und angelagertertem Rutil (RUT) mit deutlicher Zwillingsstreifung; am linken Bildrand einzelne Graphitleisten; zentral haufenförmige Graphitaggregate (Anschliff CUT1034ERZ, 1034 m, Körnerpräparat, 1 Nicol, 125-fach, Luft).

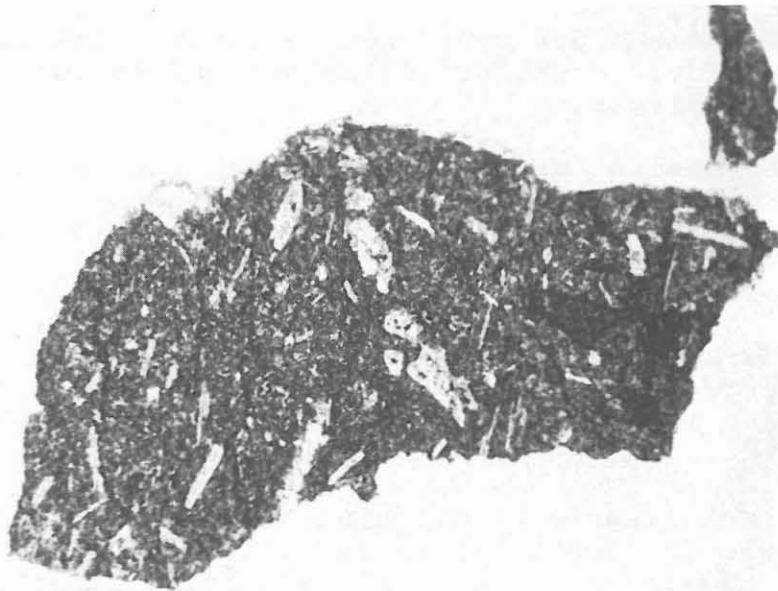


Abb. B.2.9: Porphyrischer Lamprophyr mit Feldspatleisten (Cutting) (Schliff CUT1070A, 1070 m, 1 Nicol, 30-fach).

gate (Blasenausfüllungen), feinverteilt in der Grundmasse, in alterierten Einsprenglingen und auf Gängchen vorhanden. Manche Aggregate mit Quarz und Sillimanitnadeln(?) könnten als Gneiseinschlüsse gedeutet werden. Eine RDA-Analyse eines Lamprophyr-Separats von 1070 m ergab (in Gew.-%):

Plagioklas	44
Kalifeldspat	30
Quarz	22
Chlorit	4

Bei 1077 m erscheinen im Dünnschliff farblose bis hellgrüne Cuttings: In einer Matrix aus Chlorit mit normalen, grauen Interferenzfarben schwimmen bis 1 mm große Einsprenglings-Pseudomorphosen aus reinem Chlorit mit braunen, blauen und violetten Interferenzfarben. Dazu kommen noch Biotit-Pseudomorphosen und bis 400 µm großer Titanit. Die RDA-Analyse eines Separats dieser Cuttings von 1077 m ergab (in Gew.-%):

Chlorit	90
Albit.	10

### B.2.3 Metabasitserie

Von 1160 - 1610 m (in diesem Bericht bis 1530 m beschrieben) steht eine Metabasitserie an, die nahezu frei von Biotit-gneis-Einlagerungen ist. Nach der Amphibolit-Paragneis-Folge bis 460 m und der monotonen Paragneisfolge bis 1160 m ist dies der dritte größere lithologische Abschnitt des durchteuften Gebirges.

Die Paragneise oberhalb der Grenze zur Metabasitserie bei 1160 m sind stark alteriert, was sich vor allem in der Chloritisierung und Hellverglimmerung der Biotite dokumentiert (vgl. Abb. B.2.10, Chlorit/(Chlorit+Biotit)-Verhältnis). Die Amphibolite unterhalb dieser Grenze sind prehnitisiert. Die untere Grenze der Metabasitserie zu Paragneisen bei 1610 m ist stark kataklastisch überprägt und ebenfalls intensiv alteriert. Es ist daher zu vermuten, daß auch der Hangendkontakt der Metabasitserie mit Biotit-Gneisen tektonisch überprägt ist.

Die Metabasitserie bildet eine Assoziation von vielen, unterschiedlichen Amphiboliten im weitesten Sinn: neben wenigen Hornblende-Gneisen treten mittelkörnige, massige Amphibolite sowie Metagabbros mit reliktmischem Ophitgefüge, migmatitische Amphibolite und Meta-Ultramafitite auf. Die gesamte Abfolge wird von zahlreichen, verheilten Scherbahnen durchzogen.

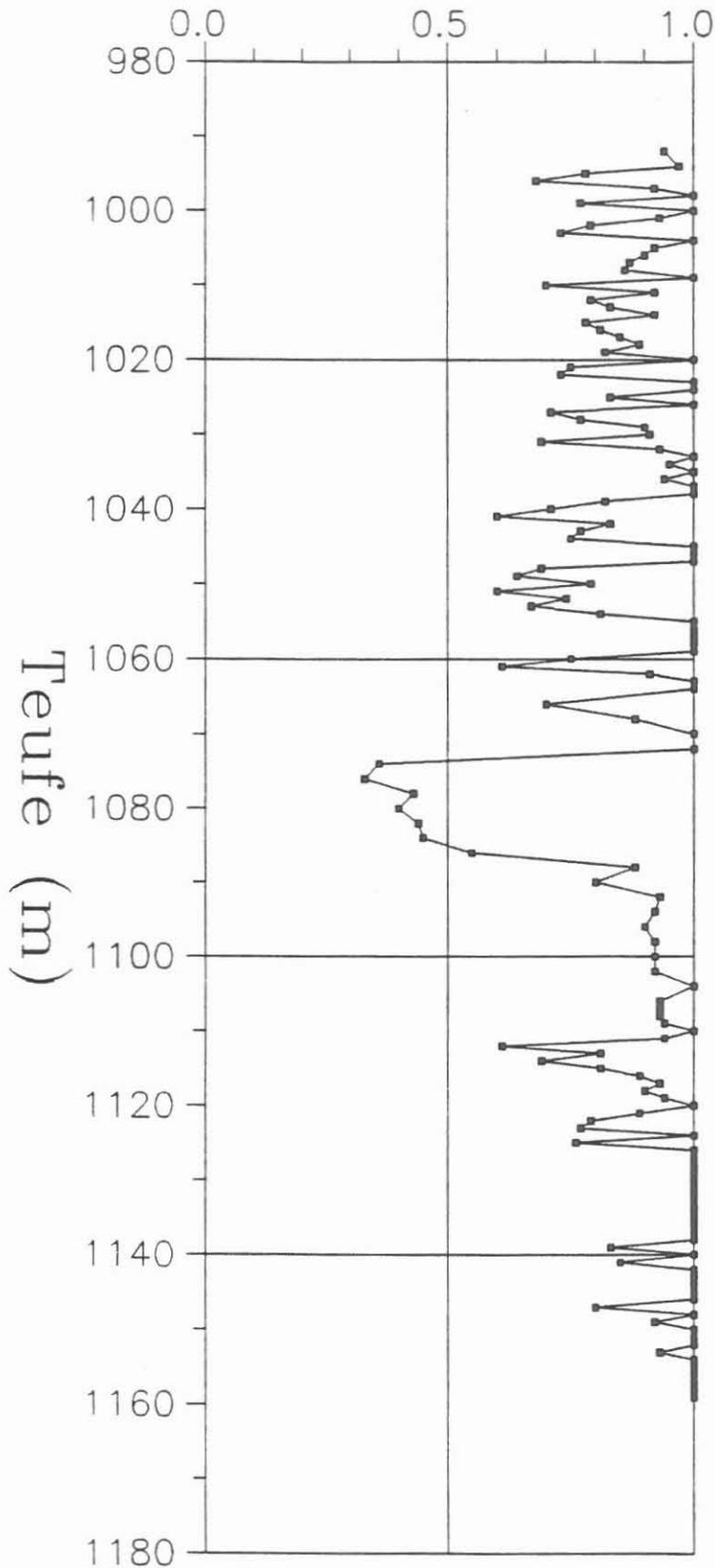


Abb. B.2.10: Chlorit/(Chlorit+Biotit)-Verhältnis aus RDA-Zentrifugen-Analysen als Maß für die Alteration der Granat-Sillimanit-Biotit-Gneise: besonders starke Alteration zwischen 1125 und 1160 m, d.h. oberhalb der Grenze zum Amphibolit bei 1160 m.

### B.2.3.1 Amphibolite (ohne Metagabbros)

(Dünnschliffe (z.T. poliert) CUT1177A, CUT1204, CUT1216, 253C1jI+II, 255A1dT, 256A1RI, 256C2lTI+II, 257B4h, 260B1e, 262A5b, 267B1d, 267G1u, 270A3R, 270C4e, 270C4d, 273A1e, 273H1s, 274J1zT, 275E1j, 275F1u, 284C1e, 284J1uI+II, 295H1w, 297A1a, 299G7T, 301E1f, 305A1a, 307B1d, 309G2n, 311F2T, 312E1h, 315E1e, und 316B1b; Anschliff CUT1195)

Die makroskopisch dunkelgraugrünen Gesteine sind durchweg fein- bis mittelkörnig. Das Gefüge wechselt zwischen massig, leicht foliiert und flaserig bis schlierig migmatitisch. Neben den Hauptbestandteilen grüne Hornblende und Plagioklas tritt Granat in stark wechselnden Gehalten sowie gelegentlich Biotit auf (Abb. B.2.11, Analysen s. Tab. B.2.1 in Kap. B.2.4 oder Abschnitt C). Zwischen 1230 und 1250 m kommen auch biotit- und plagioklasreiche Hornblende-Gneise vor. Schlierige, linsige oder lagige, helle Mobilisate aus Quarz + Plagioklas + Muskovit + Hornblende + Granat sind weit verbreitet (Abb. B.2.12). Im Bereich zwischen 1430 und 1530 m wird der Amphibolit mehrfach von jüngeren, diskordanten Quarzgängen mit einer Mächtigkeit von einigen Zentimetern bis zu mehreren Dezimetern durchschlagen.

Unter dem Mikroskop tritt Hornblende (Pleochroismus hellgelblich - bräunlich grün - olivgrün, selten blaugrün) zusammen mit Plagioklas als Hauptgemengteil auf. Oft ist sie geregelt, teilweise wird Plagioklas poikiloblastisch von ihr umwachsen. Plagioklas ist teils frisch und zoniert, teils von bräunlich opakem Staub getrübt (Abb. B.2.13). Im Dünnschliff 256C2lTI schließen 2 mm große, lappige Plagioklase 200 µm große Granatkörner poikilitisch ein. Im Schliff 260B1e werden Quarzkörner mit wasserklarem Albitsaum von getrübttem Plagioklas eingeschlossen. Granat schließt oft Rutilstäbchen ein. Die Reliktnatur des Granats wird häufig durch einen Plagioklassaum belegt. Im Schliff 315E1e ist Granat von einem Gemenge aus Hornblende, Plagioklas und Klinozoisit pseudomorph ersetzt. Die Plagioklassäume um Granat scheinen teilweise nicht Produkt einer unmittelbaren Reaktion mit benachbarter Hornblende zu sein, da Plagioklassäume um Granat auch gegenüber Biotit und Titanit beobachtet wurden (CUT1216m, 270A3R, 256C2lT, vgl. Abb. B.2.14). In Schliff 273H1s tritt Granat als 5 mm große Poikiloblasten mit Hornblende-Einschlüssen auf. Biotit ist ein häufig anzutreffender, oft chloritisierter und gut eingeregelter Nebengemengteil. Quarz fehlt selten und tritt gelegentlich (256C2lTI, 262A5b) zusammen mit Biotit in solch hohen Gehalten (bis 15 Gew.-%) auf, daß die Gesteine als Hornblende-Gneise (Sektionen 255D, 258A-260B, 260G-262B; 1232, 1244-1247 und 1249-1253 m) oder migmatitische Amphibolite angesprochen werden. Der Quarz aus Schliff 295H1w zeigt Deformationslamellen und eine leicht zweiachsige Optik. Rutil-Körner in der Amphibolitmatrix sind in etwa der Hälfte der Amphibolit-Schliffe anzutreffen. Im Kernmarsch 270 ist Rutil mit Opakmineralen und Titanit verwachsen. Als Entmischung in Rutil treten hier auch durchscheinende Ilmenit-

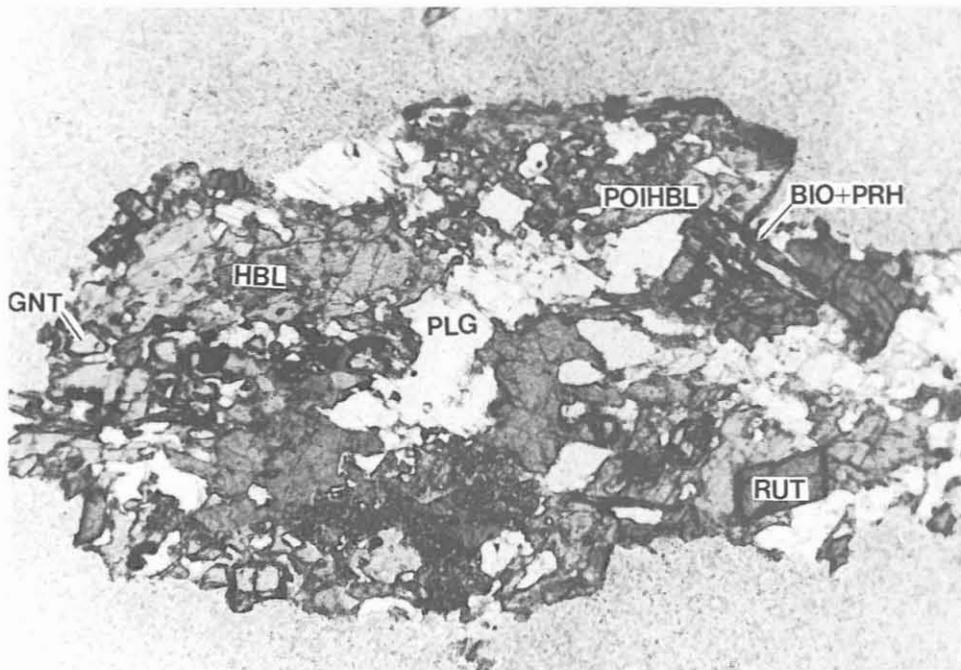


Abb. B.2.11: Typische xenoblastische Verwachsung von Hornblende (HBL, teilweise poikiloblastisch: POIHBL), Plagioklas (PLG), Granat (GNT) mit Plagioklas-Saum, Biotit (BIO) mit Prehnit (PRH) auf Spaltflächen und Rutil (RUT) - (Granat-Biotit-Amphibolit, Cutting)  
(Schliff CUT1216, 1216 m, 1 Nicol, 70-fach).

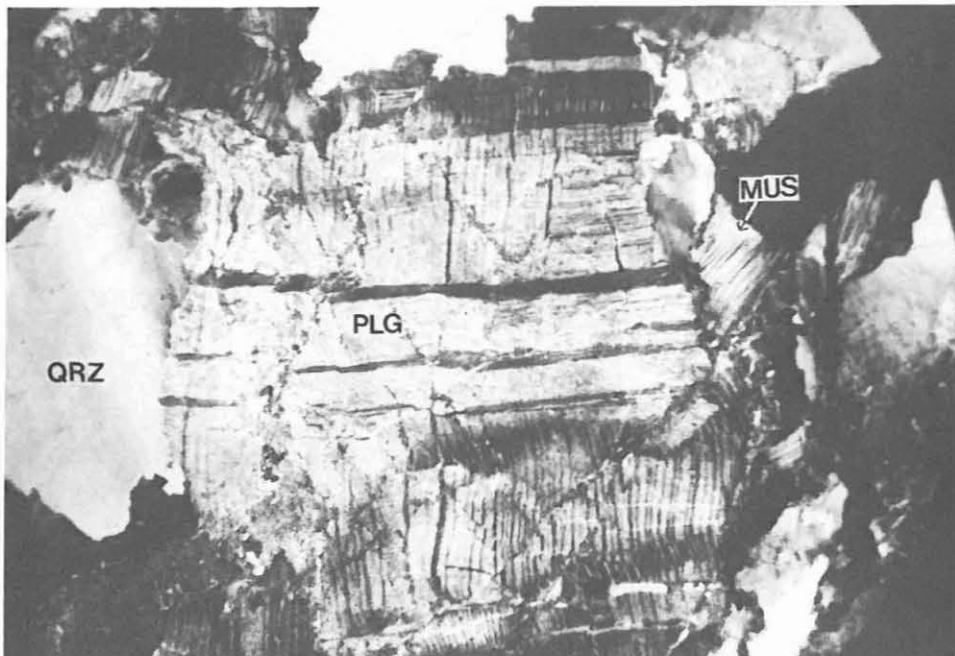


Abb. B.2.12: Kataklastisch deformierter Plagioklas (PLG) + Muskovit (MUS) in Muskovit-Quarz-Plagioklas-Mobilisat Schliff  
(Schliff 256A1RI, 1232 m, + Nicols, 70-fach).

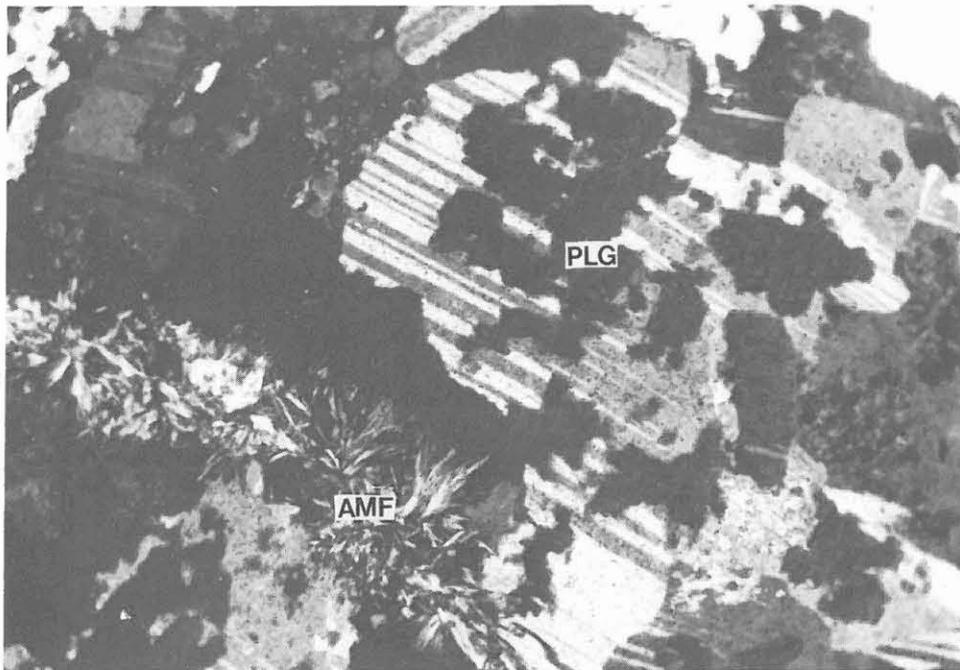


Abb. B.2.13: Fleckig getrübt Plagioklase (PLG) in alteriertem Granat-Amphibolit, linke untere Ecke: Sprossung strahliger Amphibol-Garben (AMF) von einer Kluft aus (Schliff 253C1j, 1178.8 m, + Nicols, 100-fach).

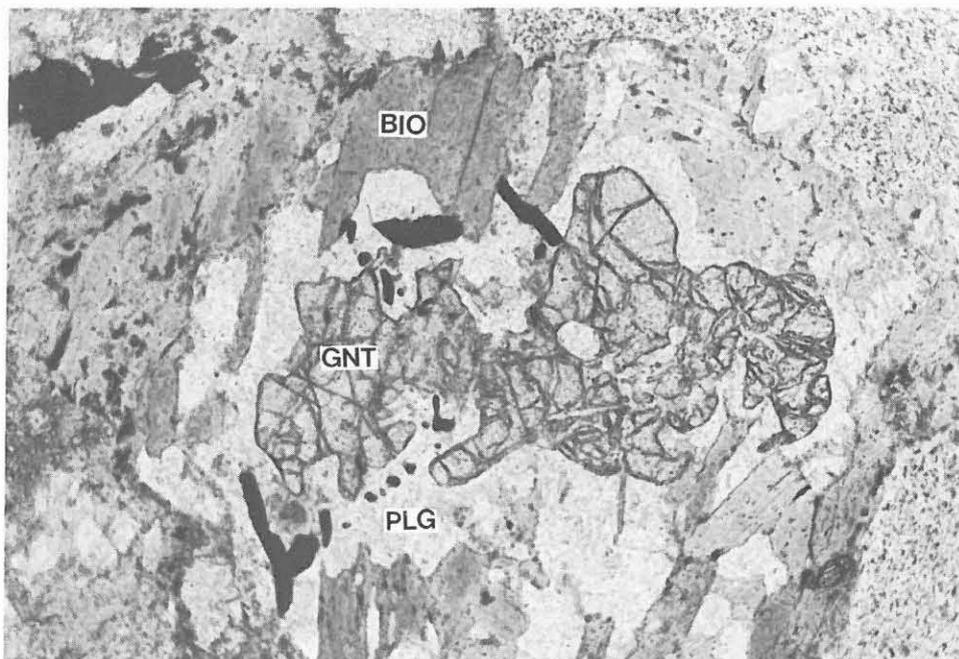


Abb. B.2.14: Granat (GNT) mit Plagioklas-Saum (PLG) im Kontakt zu Biotit (BIO) (Granat-Amphibolit, Cutting) (Schliff CUT1216, 1216 m, 1 Nicol, 70-fach).

täfelchen auf. Titanit ist in den Kernmärschen 265-273 und 309-315 besonders häufig und ist stellenweise symplektitartig mit Ilmenit verwachsen (siehe unten) oder bildet Säume um Ilmenit. Im Schliff 273H1s werden 3 mm große, idiomorphe Titanitkristalle von Opakmineralen pseudomorphisiert. Ilmenit ist in Schliff 284J1uI durch einen Plagioklassaum von Hornblende getrennt. Zirkon und Apatit sind meist anzutreffende Akzessorien. In Kernmarsch 257 wurde Laumontit als Kluftbelag mit RDA identifiziert. Nach der makroskopischen Ansprache ist Laumontit in feinkörnig weißen Aggregaten oder als farbloser Kristallrasen ein durchgehend anzutreffendes Kluftmineral. Der häufige Klinozoisit (z.B. reichlich im Schliff 275F1u zusammen mit 1 cm großer Hornblende und Plagioklas), die Chloritisierung des Biotits, das Prehnitwachstum auf Biotit-Spaltflächen, fleckig sprossende Prehnitkristalle in getrübten Plagioklasen (Abb. B.2.15) und die häufigen Prehnit+Karbonat-Gängchen (Abb. B.2.16) machen die retrograde Alteration deutlich. Insbesondere ist der oberste Abschnitt nahe der Grenze zum überlagernden Paragneis stark prehnitisiert (1160-1175 m; bis 20% Prehnit in Bohrmehl-RDA-Analysen). Die Anteile der gesteinsbildenden Minerale schwanken innerhalb folgender Grenzen (RDA-Analysen in Gew.-%):

Hornblende	35 - 45
Plagioklas	40 - 50
Granat	0 - 5
Chlorit + Biotit	5 - 10
Quarz	0 - 15

In den Amphiboliten überwiegen oxidische Opakmineralphasen mit Ilmenit und Rutil gegenüber den Sulfiden Pyrit, Magnetkies, Kupferkies und Markasit. Der im Anschliff CUT1195 (Cuttingprobe aus 1195 m) auftretende Graphit wird als Nachfall aus der hangenden Gneisserie eingestuft.

Ilmenit stellt die dominierende Erzmineralphase dar. Er bildet tafelige bis feinnadelige Aggregate, die in vielen Fällen eng mit Rutil (Abb. B.2.17), stellenweise mit Leukoxen, verknüpft sind. Randliche, symplektitartige Verwachsungen von Ilmenit mit Titanit zeigt Abb. B.2.18. Rutil bildet sowohl unregelmäßige, buchtige als auch rundliche, ovale Kornformen aus. Rutil verdrängt von Hohlräumen und Buchten aus Ilmenit und umgibt diesen saumartig. Eine Zwillingsstreifung ist bei Einzelkörnern im Auflicht oft schon in Luft deutlich. Die Farben der punkthaufenförmigen und wolkigen Innenreflexe variieren von weißlich-grau bis gelb-dunkelbraun.

Magnetkies und Pyrit sind die wesentlichen sulfidischen Phasen. Die wechselnden Gehalte an Magnetkies werden durch die Werte der natürlichen magnetischen Remanenz (Abschnitt D) dokumentiert. Magnetkies bildet in den Amphiboliten meist größere, xenomorphe, buchtige und hohlraumreiche Einzelkörner. Ferner finden sich Anwachsungen und Einschlüsse von Magnetkies in Ilmenit. Die Anisotropieeffekte sind bei gekreuzten Polarisatoren unterschiedlich stark ausgeprägt.

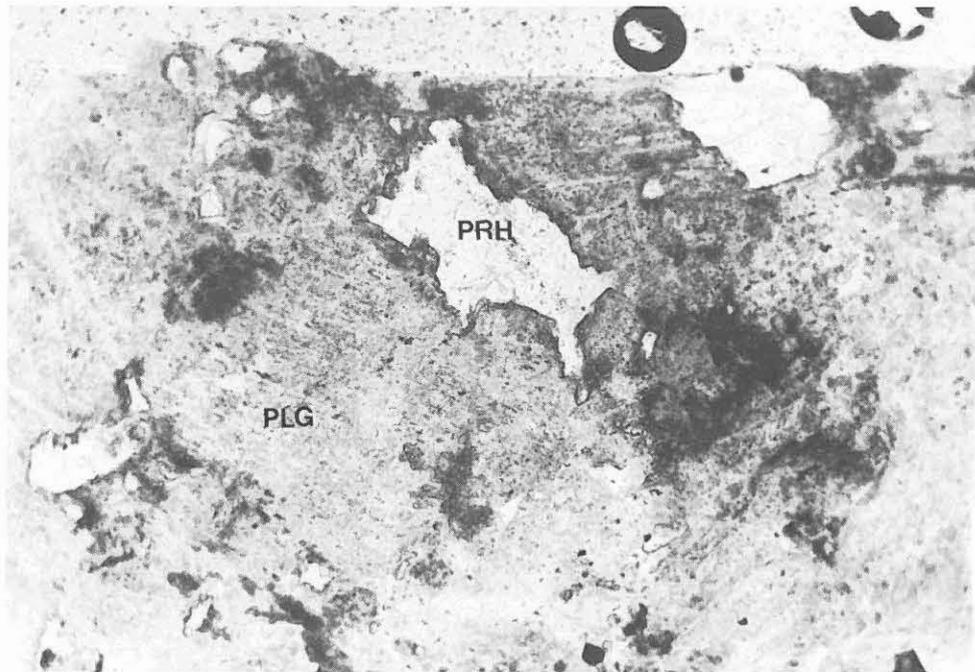


Abb. B.2.15: Klare Prehnit-Aggregate (PRH) in getrüübtem Plagioklas (PLG) - (Granat-Amphibolit, Cutting)  
(Schliff CUT1177A, 1177 m, 1 Nicol, 70-fach).

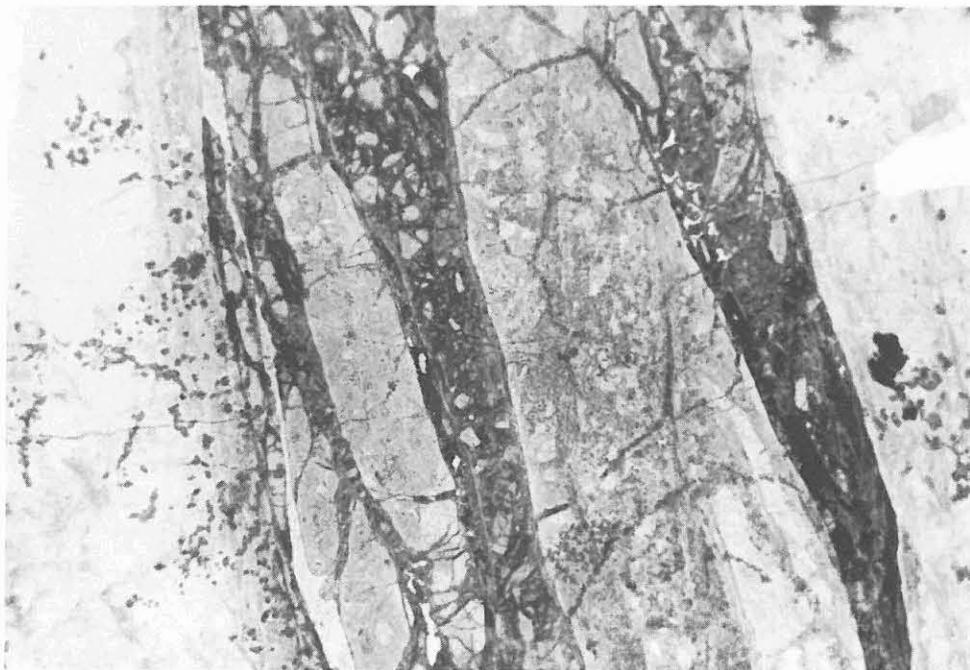


Abb. B.2.16: 5 mm mächtiges, kataklastisches Prehnit-Gängchen in alteriertem Granat-Amphibolit. Das gesamte Bild besteht nur aus Prehnit  
(Schliff 253C1j, 1178.8 m, 1 Nicol, 15-fach).

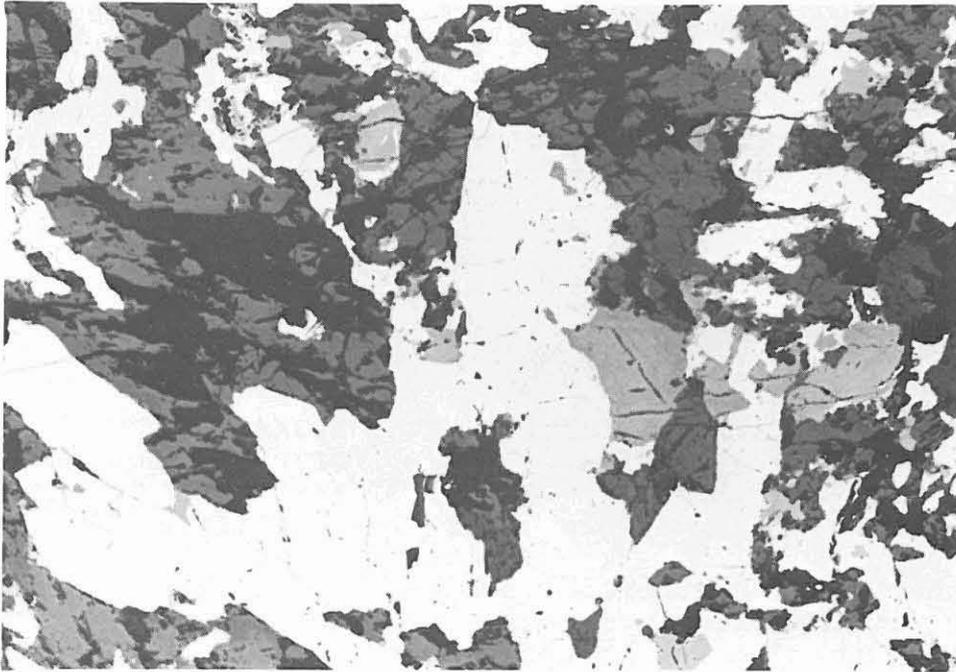


Abb. B.2.17: Rutil (mittelgrau) verdrängt Ilmenit (hellgrau in Amphibolit (Dünnschliff pol., 273H1s, 1306.5 m, 1 Nicol, 160-fach, Luft).

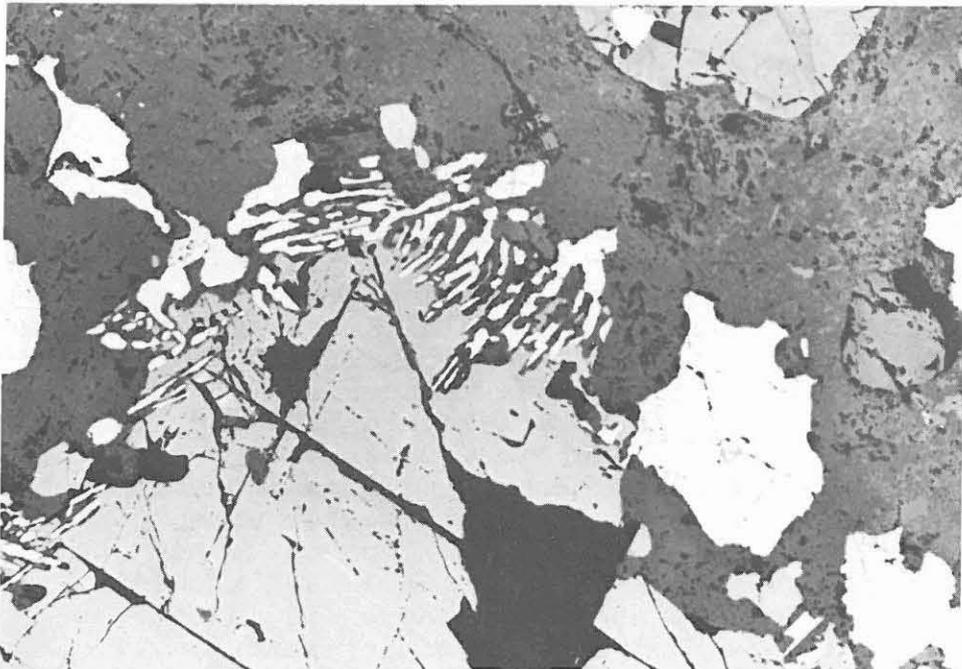


Abb. B.2.18: Symplektitartige Verwachsung von Ilmenit (hellgrau) und Titanit (grau) in Amphibolit; auch einige größere, unregelmäßige Ilmenitkörner (Dünnschliff pol., 273H1s, 1306.5m, 1 Nicol, 160-fach, Luft).

Manchmal bildet Markasit randliche, helle, kleine, flammenförmige, deutlich anisotrope Entmischungen. Pyrit tritt hinter Magnetkies deutlich zurück und fehlt streckenweise. Er ist inhomogen, löcherig, mit idio- bis hypidiomorphen Kornformen. Kupferkies ist in kleinen, unregelmäßigen Aggregaten meist in hellen Mobilisaten vertreten und ist häufig mit Magnetkies verwachsen.

### B.2.3.2 Metagabbros

(Dünnschliffe, z.T. poliert: 262D7j, 263A6d, 264H4nT, 271B1b, 282E2m, 285H1p, 286H1aa, 287E2k, 287F2nT, 288B1g, 288B1h, 292D24, 293A1c, 295 A1a, 310B4a, 310F4r, 317B1d, feinkörnige Varietäten: 312E1h, 315E1e, 321E1u; Anschliff 287F2nT)

Es handelt sich hierbei um massige, meist grobkörnige Amphibolite mit charakteristischen, zentimetergroßen gelbgrünlichen Flecken, die aus (hornblendisiertem) leicht schillerndem Klinopyroxen bestehen, in dem weiße Plagioklasleisten erkennbar sind (Abb. B.2.19, B.2.20). Die rundlich oder annähernd rechteckig begrenzten Klinopyroxen-Aggregate werden von einer feinerkörnigen, dunkelblaugrünen Matrix umgeben, in der man Hornblende, Plagioklas und Granat identifizieren kann. Von 1451-1453 m sowie unterhalb 1535 m tritt ein etwas anderer Gabbrotyp auf, bei dem weißer Plagioklas Kränze um hellgrüne, hornblendisierte Klinopyroxenkristalle bildet (Abb. B.2.21). Mehrfach ist zu beobachten, daß das ursprünglich richtungslos-körnige Gefüge mehr oder weniger deutlich von einer Foliation überprägt wird. Der zwischen 1282.0 und 1284.2 m in zwei Kernabschnitten zu beobachtende grobkörnige, plagioklasreiche "Leukogabbro" ist von 1283 bis 1284 m stark foliiert.

Es bestehen alle texturellen Übergänge zu normalen Amphiboliten ohne Gabbrorelikte. So gehört z.B. Kernstück 267G1u zu einem feinkörnigen Bereich innerhalb einer Metagabbro-Einheit und zeigt im Dünnschliff keinerlei Reliktstrukturen, ist aber chemisch identisch mit Kernstück 271B1b, das ausgeprägte Corona-Strukturen zeigt (Analysen vgl. Tab. B.2.2 in Kap. B.2.4 oder Abschnitt C). Zwischen 1340 und 1347 m treten mehrfach schlierige Anreicherungen von grobblastischer, dunkelgrün-schillernder Hornblende (pseudomorph nach Klinopyroxen?) auf, die nicht wie die weiter unten beschriebenen Xenolithe von Reaktionssäumen umgeben sind. Bei 1377.5, 1379.7, 1411.0, 1417-1423, 1489.7-1492 und 1498.1-1498.5 m treten pegmatoide Linsen oder Gänge mit idiomorphen, 1-2 cm großen Hornblendens und/oder Feldspatleisten, z.T. auch mit Quarz auf.

Mikroskopisch erkennt man in den Metagabbros meist ein relikthches, ophitisches Gefüge, d.h. hypidiomorphe Plagioklasleisten stecken sperrig in großen Klinopyroxen-Kristallen (Abb. B.2.22). Dieses Ophitgefüge ist durch eine Metamor-

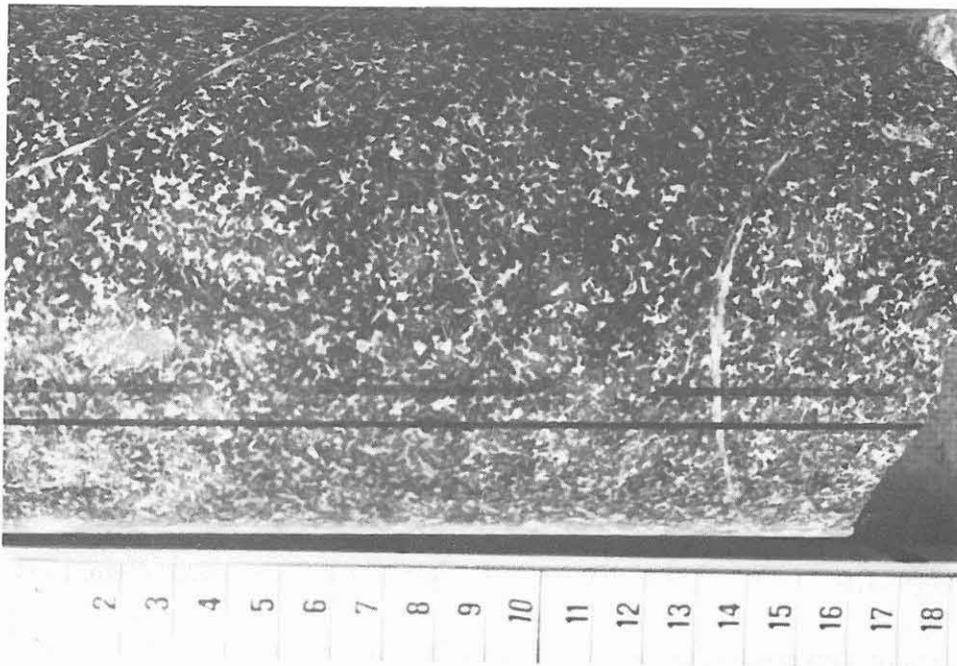


Abb. B.2.19: Fleckiger Metagabbro: hellere Flecken bestehen vorwiegend aus ophitischen Klinopyroxenen mit Plagioklas-Leisten  
(Kernstück 263C10a, 1259.30 m).

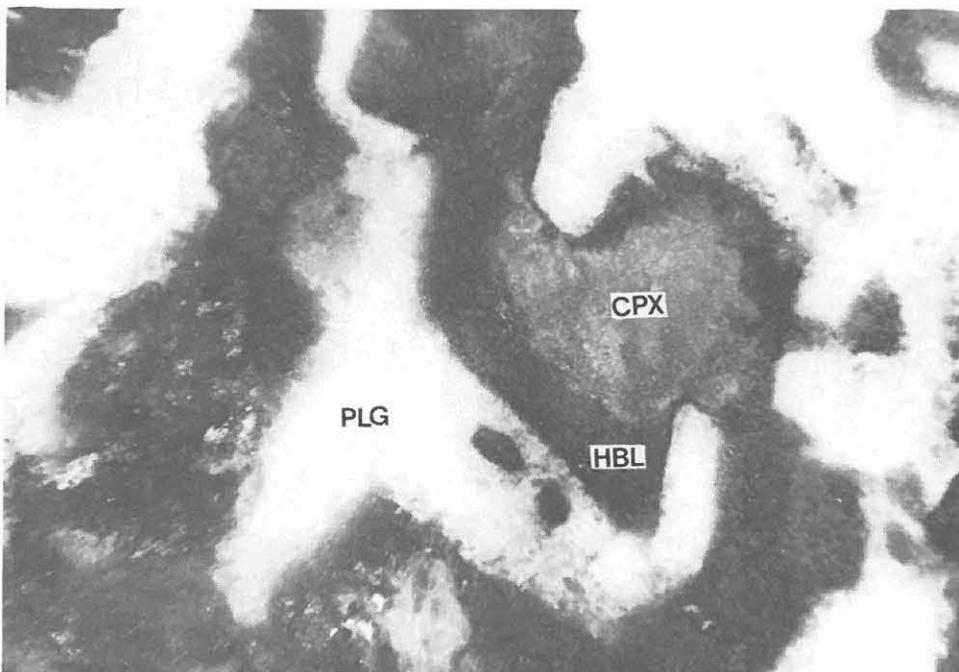


Abb. B.2.20: Metagabbro mit Ophitgefüge (Makrofoto); Plagioklas-Leisten (PLG), reliktischer Klinopyroxen (CPX) mit Hornblende-Saum (HBL)  
(Schliff 271B1b, 1297.2 m, 40-fach).

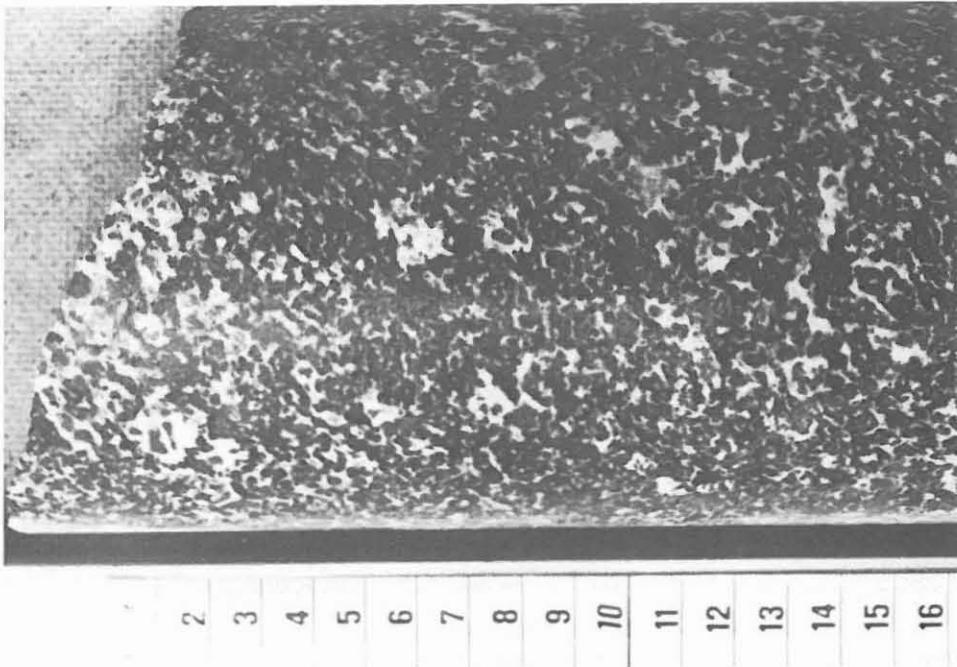


Abb. B.2.21: Metagabbro mit Plagioklaskränzen um Klinopyroxen (Kernstück 325F2x, 1555.60 m).

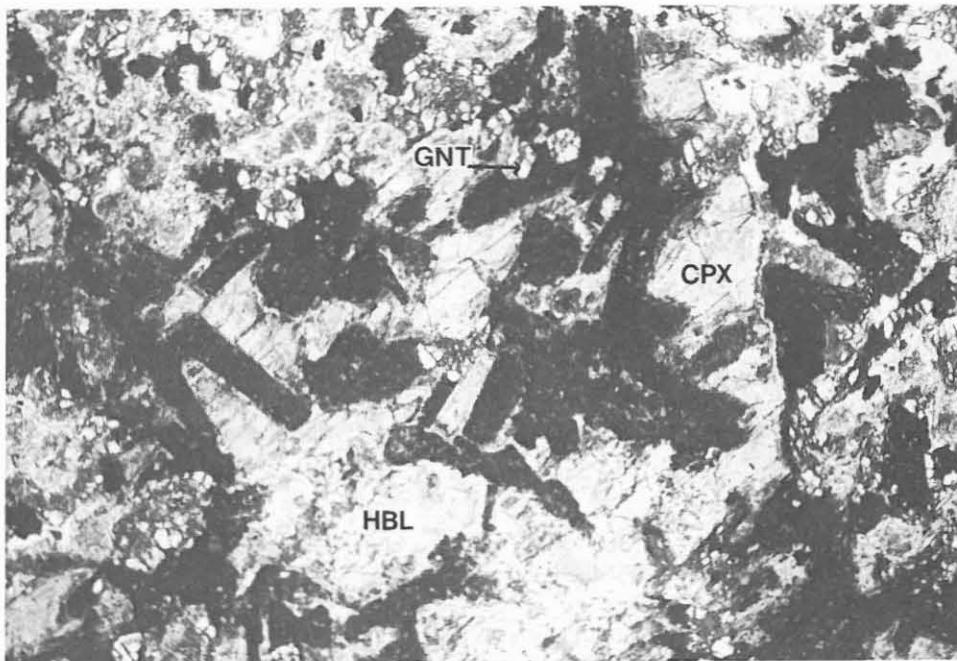


Abb. B.2.22: Ophitisches Gefüge: Klinopyroxen-Großkristall (CPX - Bildmitte) umschließt trübe Plagioklas-Leisten (PLG) mit schmalem Hornblende-Saum (HBL) gegen Klinopyroxen; Granat als Einzelkörner (GNT) und Granat-Coronen um Hornblende (oberer Bildrand) - (Metagabbro) (Schliff 264H4nT, 1269.60 m, 1 Nicol, 13-fach).

phose überprägt und zum größten Teil unter Bildung eines metamorphen Grundgewebes aufgelöst. Die Ophitstruktur ist nur noch in meist rundlichen, mm- bis cm-großen Arealen erhalten. Makroskopisch bilden sie die oben erwähnten gelblichgrünen Flecken (Klinopyroxen), in denen weiße, sperrige, idiomorphe Plagioklasleisten stecken. Das umgebende, metamorphe Grundgewebe ist feinerkörnig und weist amöbenartige Korngrenzen zwischen den einzelnen Mineralen auf.

Der Klinopyroxen ist farblos bis ganz schwach bräunlich und hat bei schwacher Vergrößerung durch massenhaft auftretende, orientiert verwachsene Einschlüsse von stäbchenförmigen Mineralen (häufig Rutil) eine gräuliche Farbe (Abb. B.2.23). Außerdem ist eine feinlamellare polysynthetische Verzwilligung charakteristisch.

Die meist idiomorphen Plagioklas-Leisten sind oft sehr stark getrübt bis fast opak. In manchen Schliffen bildet Plagioklas nur xenomorphe Zwickelfüllungen zwischen Klinopyroxen-Großkristallen (282E2m). In 271B1b spießen, ausgehend von angrenzenden Klinopyroxen-Pseudomorphosen, nadelige Hornblendekristalle uralitartig in die Plagioklase hinein. Klinopyroxen und Plagioklasleisten sind die einzigen sicher magmatischen Mineralrelikte.

Auffälligste Mineralneubildungen des metamorphen Grundgewebes sind verschiedene Hornblenden (farblose, grünliche oder hellbraune, cummingtonitische, d.h. nahezu farblose mit hohen Interferenzfarben). Teilweise verdrängt vorwiegend hellbraune Hornblende Klinopyroxen vom Rand her. Dies führt einerseits zu vollkommenen Pseudomorphosen von Hornblende-Großkristallen nach Klinopyroxen-Großkristallen, andererseits zu feinkörnigen Hornblendeaggregaten, die entweder nur randlich auftreten oder den ganzen Kristall ausfüllen. In einem anderen Schriff (317B1d) wird ein kleinkörniger, garbenförmig-symplektitartiger Zerfall von Klinopyroxen-Großkristallen in Klinopyroxen und vermutlich Plagioklas beobachtet (Abb. B.2.24).

Um diese pseudomorphen Hornblendekristalle bzw. Hornblende-Aggregate sind in einigen Schliffen prächtige Coronen aus einem schmalen inneren Hornblende-Plagioklas- und einem äußeren Granatsaum entwickelt (Abb. B.2.25). Abb. B.2.26 zeigt einen Ausschnitt dieser Corona. Der zwischen Granat und Klinopyroxen liegende Plagioklas- und Hornblendesaum ist retrograd entstanden, so daß ursprünglich ein Granatsaum um Klinopyroxen bestand. Solche Coronen sind bislang aus der ZEV nicht bekannt. Die innere Zone des Granatsaums ist stellenweise reich an Einschlüssen (vermutlich Quarz, Abb. B.2.27), die äußere frei davon. Plagioklas ist offensichtlich ein Reaktionsedukt der Corona, da teilweise Granatkornreihen pseudomorph nach Plagioklasleisten zu beobachten sind. Die magmatischen Gefügerelikte und die statisch-metamorphen Neubildungen sind größtenteils nicht foliiert.

In anderen Schliffen (287E2k, 287E2m) bildet Granat nur hypi-



Abb. B.2.23: Parallel [010] (von untenlinks nach oben rechts) orientierte Rutilstengel in Klinopyroxen entmischt (Meta-gabbro)  
(Schliff 264H4nT, 1269.60 m, 1 Nicol, 630-fach).

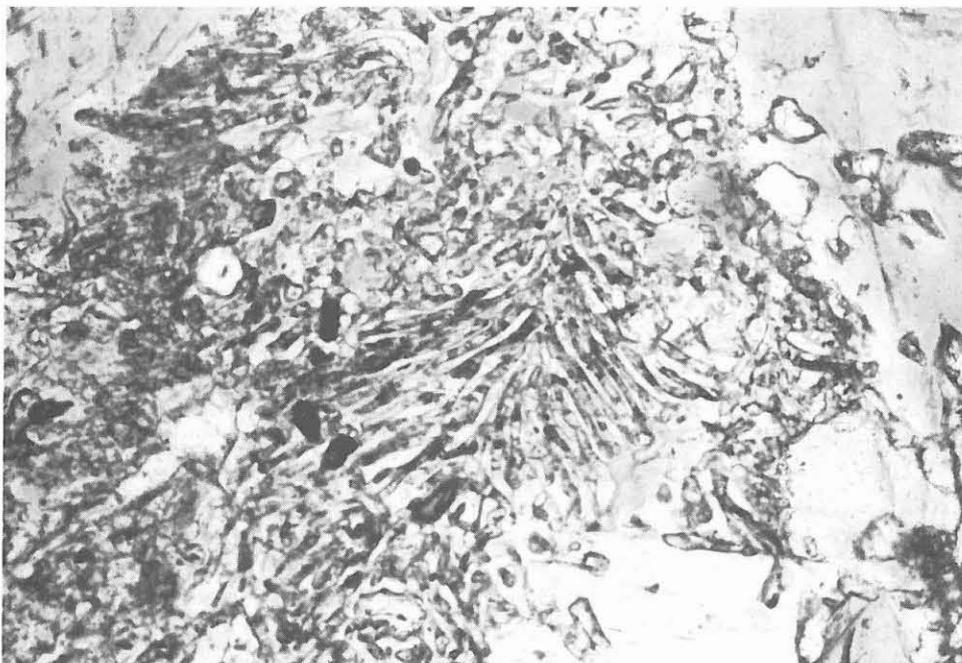


Abb. B.2.24: Symplektitische Verwachsung von Klinopyroxen und Plagioklas(?) - (Meta-gabbro)  
(Schliff 317B1d, 1530.13 m, 1 Nicol, 110-fach).

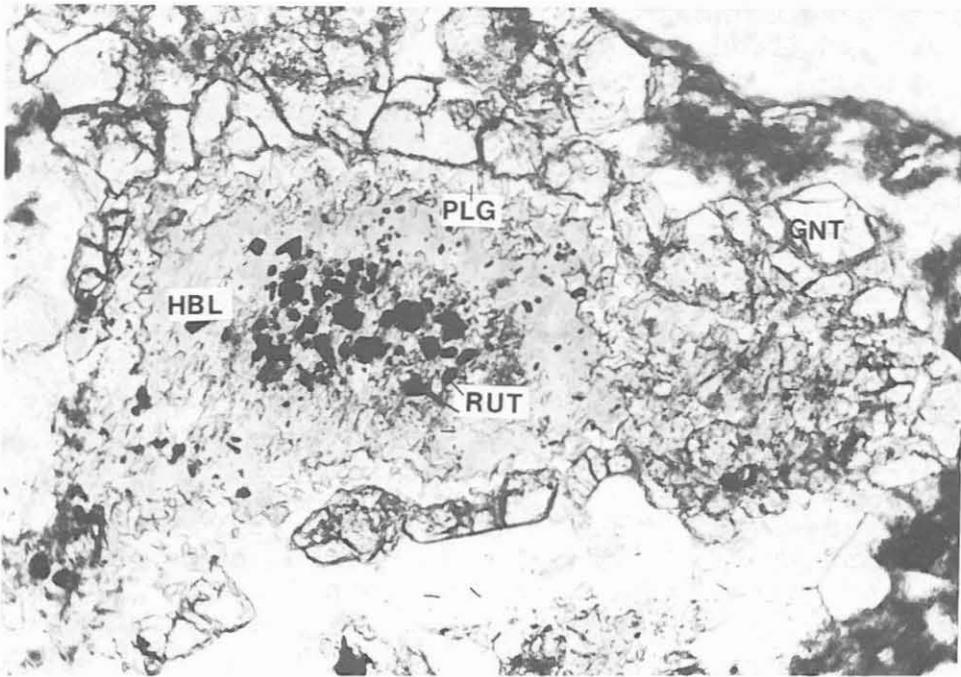


Abb. B.2.25: Braunes Hornblende-Aggregat (HBL) mit Plagioklas (PLG)-Granat (GNT)-Corona und Einschlüssen von violetterm Rutil (RUT) - (Metagabbro)  
(Schliff 264H4nT, 1269.60 m, 1 Nicol, 70-fach).



Abb. B.2.26: Ausschnitt aus einer Corona-Struktur in Metagabbro, Von innen (unten) nach außen (oben): einschlußreicher (Rutil u.a.), farbloser Klinopyroxen (CPX), braune Hornblende (HBL), Plagioklas (PLG), Granat (GNT) und Plagioklas der Matrix  
(Schliff 264H4nT, 1269.60 m, 1 Nicol, 180-fach).

diomorphe, rundliche Körner. Dabei ist Granat selbst nur noch reliktmäßig erhalten und gehört nicht mehr zur letzten, stabilen Paragenese, da er von einem Plagioklassaum umgeben wird und keine gemeinsamen Korngrenzen mit Hornblende bildet. Dies wird in allen Amphiboliten der Bohrung und der näheren Umgebung (SCHÜSSLER 1987) unterschiedlich stark ausgeprägt beobachtet.

Der Plagioklas des metamorphen Grundgewebes ist teils frisch, teils getrübt und weist rundliche oder unregelmäßige Korngrenzen auf. Die Zwillingslamellen erscheinen öfter verbogen. In einigen Schlifften (263A6d, 287E2k) ist ein Pflastergefüge, teilweise zusammen mit Quarz mit Großwinkel-Korngrenzen entwickelt. In hellen Mobilisaten treten auch große Plagioklasblasten auf (281A1a).

Kennzeichnendes Mineral der Metagabbros ist der Rutil (Abb. B.2.25). Ein kräftig violetter Farbstich mancher Rutildeutet auf einen erhöhten Niob-Gehalt (mündl. Mitt. P. BLÜMEL). In den Amphiboliten oberhalb 480 m ist Rutil selten. Statt dessen trat Titanit, oft mit Ilmenit verwachsen, weit verbreitet auf. In den Amphiboliten von 1160 - 1530 m ist Titanit dagegen seltener und nur auf bestimmte, retrograd überprägte Bereiche beschränkt, kommt dort aber in großen, idiomorphen Körnern vor. Vereinzelt wurden Hornblende- und Biotitsäume um Rutil-Ilmenit-Aggregate beobachtet.

Weitere Bestandteile sind säuliger und nadeliger Apatit als Einschluß im Plagioklas, wenig Quarz (z.T. mit Deformationslamellen, 285H1p), rotbrauner Biotit in kleinen Aggregaten (teilweise chloritisiert) und relativ große Zirkone (bis 300 µm). In 281A1a wurden Biotit-Verwachsungen mit Pumpellyit sowie Prehnit als Blasten und auf Klüftchen beobachtet. Die RDA-Modalanalysen der Metagabbros liegen im Bereich (in Gew.-%):

Hornblende	45-50
Plagioklas	35-45
Granat	7-15
Chlorit	5-10

Als opake Phasen dominieren in den Metagabbros Ilmenit und Rutil, die häufig miteinander verwachsen sind und sich wechselseitig saumartig umgeben. Ilmenit bildet unregelmäßige, rundliche bis stark buchtige Kornformen mit typischen Bireflexions- und Anisotropieerscheinungen aus. Rutil ist in fast isometrischen bis ovalen Einzelkörnern in der Grundmasse vorhanden und zeigt meist bräunlich-gelbe Innenreflexe und eine deutliche Zwillingsbildung. In Verwachsung mit Ilmenit sind die Einschlüsse leukoxenähnlicher.

Geringe Anteile an Magnetkies, Pyrit und Kupferkies bilden die sulfidischen Phasen. Die geringe Magnetkiesführung spiegelt sich in lediglich niedrigen Werten der magnetischen

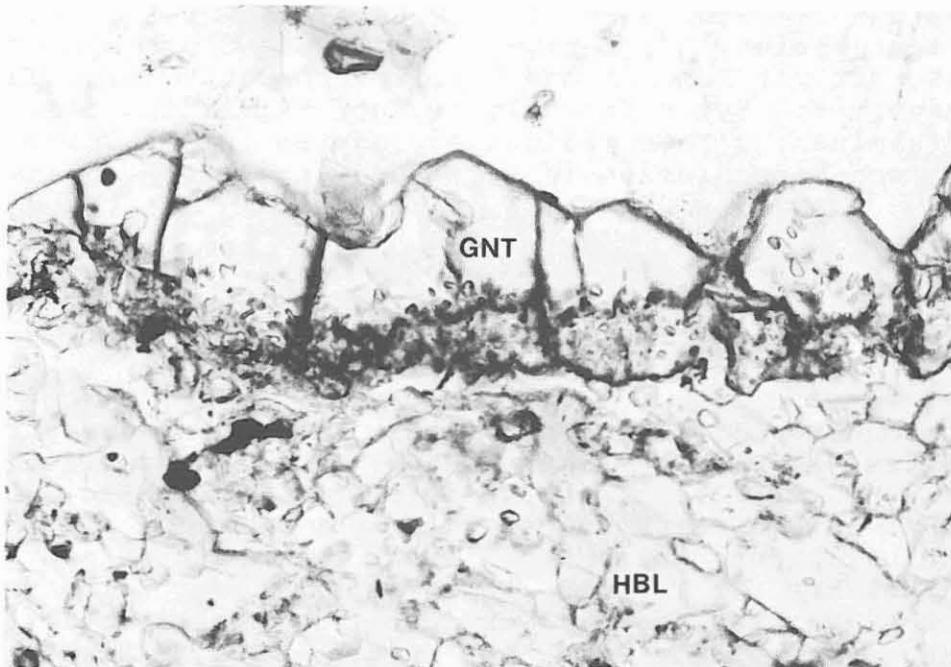


Abb. B.2.27: Ausschnitt aus einem poikilitischen Hornblende-Aggregat (HBL, unten) mit Plagioklaseinschlüssen und Granat-Corona (GNT, oben); nahe der Hornblende ist der Granat einschlußreich (?Quarz) (Metagabbro)  
(Schliff 286H41aa, 1373.90 m, 1 Nicol, 130-fach).

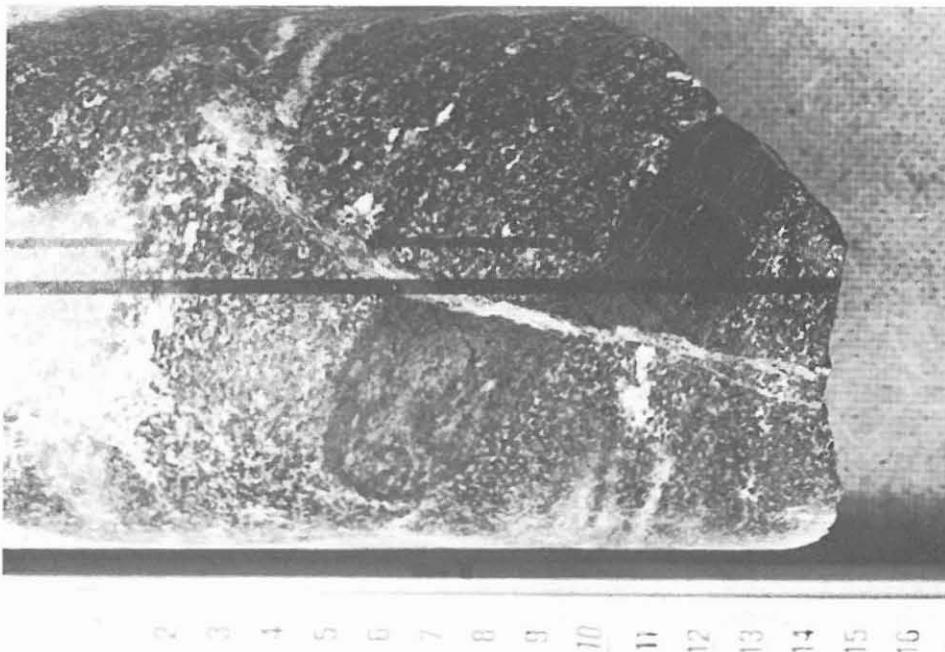


Abb. B.2.28: Dunkelgrüner Hornblendit-Einschluß in Amphibolit, an Scherbahn versetzt  
(Kernstück 296J1ac, 1427.23 m).

Remanenz und der Suszeptibilität wider (Abschnitt D). Magnetkies bildet kleine, löcherige, xenomorphe Einzelkörner aus und ist oft mit Ilmenit und Rutil verknüpft (Einschlüsse, Verwachsungen). Pyrit ist selten. Kupferkies findet sich nur in sehr kleinen, unregelmäßigen Aggregaten in der Grundmasse, in Form von Einschlüssen in Pyrit und angelagert an Magnetkies.

### Granatreiche Metagabbros

Eine besondere Erwähnung verdienen besonders granatreiche (ca. 15 Gew.-% Granat) Varietäten der Metagabbros (1401-1406, 1424-1426 und 1482-1485 m, Schliffe 292D24, 293A1c, 296D1n und 310B4a). Die feinkörnigen, massigen Gesteine sind makroskopisch hellbraun. Unter dem Mikroskop beobachtet man Klinopyroxen-Relikte (z.T. als sehr feinkörnige Klinopyroxen-Plagioklas-Verwachsungen, vereinzelt symplektitartig), die von brauner Hornblende umwachsen werden. Granat bildet auch hier wieder Coronen um Hornblende-Aggregate, zeigt aber zusammen mit Plagioklas auch alle Übergänge zu einem granoblastischen Gefüge. Geringe Gehalte an braunem Biotit, Rutil, Apatit, Opakmineral, Quarz und sekundärem Prehnit und Klinozoisit vervollständigen den Mineralbestand. Kernstück 310B4a ist stärker alteriert und führt zusätzlich chloritisierten Biotit, Karbonat und Titanit statt Rutil. Die RDA-Modalanalyse von Kernstück 293A1c ergab (in Gew.-%):

Hornblende	53
Plagioklas	27
Granat	14
Chlorit	3
Quarz	3

### Meta-Ultramafitit-Einschlüsse

Unmittelbar im Liegenden aller drei granatreichen Metagabbros treten Amphibolite mit wenigen, unregelmäßig verteilten, isoliert liegenden Meta-Ultramafitit-Einschlüssen auf (bei 1406.7 m knapp oberhalb der Grenze zu Meta-Ultramafitit, bei 1427.7 m und 1483.0 -1491.7 m). Weitere solche Einschlüsse wurden bei 1293.1 m, 1294.9 m, 1301.7-1303.8 m und 1505.7 m im Amphibolit sowie bei 1402.8 m und 1434.8 m im Metagabbro beobachtet. Diese ca. 7-10 cm großen, meist unregelmäßig, buchtig begrenzten Xenolithe sind dunkelgrün (hornblende-reich, Abb. B.2.28) oder hellgrün (klinopyroxenreich, Abb. B.2.29) mit 1-2 mm dicken Reaktionssäumen aus dunkelgrüner Hornblende oder makroskopisch braun erscheinendem Granat.

Schliff 296H1x von einem solchen, massigen Xenolith zeigt

vorwiegend 2 mm große, olivfarbene Hornblende, etwas Granat mit einem Plagioklassaum und wenig chloritisierten Biotit. Amöbenförmige Opakminerale werden von Hornblendekristallen eingeschlossen. Das Gestein ist als Hornblendit zu bezeichnen. Der Xenolith aus Kernstück 310F4r ist dagegen ein Klinopyroxenit. 400 µm großer Klinopyroxen ist fein polysynthetisch verzwilligt und wird in geringem Maß von hellbrauner Hornblende in kleinkörnigen (100 µm) Aggregaten verdrängt. In den Zwickeln befinden sich amöbenartige Opakminerale, die an der Grenze zum Wirtsgestein angereichert sind, Apatitsäulchen und etwas Quarz. Da Plagioklas fehlt, konnte Granat nur am Kontakt zum umgebenden Amphibolit gebildet werden. Im Wirtsgestein (Metagabbro) bildet Granat dagegen typische Coronen um Hornblende-Pseudomorphosen nach Klinopyroxen. Ein weiterer Hornblendit-Xenolith (273Ale) besteht aus Hornblende-Pseudomorphosen nach Klinopyroxen (mit Rutil-Einschlüssen), relativ viel Apatit und Opakmineral.

Die Xenolithe werden als magmatische Fremdgesteinseinschlüsse, z.B. nach Art von aufgewirbelten Kumulaten im Amphibolit bzw. im Gabbro angesehen. Dies ist für die Vorkommen im Gabbro leicht vorstellbar, da dort ja auch größere Kumulatkörper auftreten (vgl. Kap. B.2.3.4), von denen solche Xenolithe noch während der Intrusivphase losgerissen worden sein könnten. Die xenolithführenden Amphibolite können als tektono-metamorph überprägte Metagabbros aufgefaßt werden.

Das dreimalige Auftreten von granatreichem Metagabbro im Hangenden und xenolithführendem Amphibolit im Liegenden ist möglicherweise durch tektonische Vervielfachung bedingt. Die Begrenzung der Schuppen konnte aber noch nicht gefaßt werden.

#### **Makroskopische Beschreibung der Kontakte zwischen Amphibolit und Metagabbro**

Die Kontakte zwischen Amphiboliten und Metagabbros sind unterschiedlich ausgebildet. Am häufigsten ist ein (unterschiedlich mächtiger) Bereich von schlierigen, fein- und grobkörnigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten (je 1 - 30 cm mächtig) durchsetzt (bei 1253, 1367, 1419 und 1482 m). Verschiedene Amphibolittypen (fein-, mittel- oder grobkörnig, massig oder foliiert) wechseln teilweise an abrupten Grenzen miteinander ab (bei 1296 m). Oft ist es makroskopisch aber auch nicht möglich, im einzelnen die Gesteine zweifelsfrei als Amphibolit oder Metagabbro anzusprechen.

Ein zweiter Typ zeigt einen unmittelbaren Kontakt zwischen leicht foliiertem Amphibolit und massigem Metagabbro. Die Grenze wird durch ein helles, schlieriges ?Reaktions-Mobilisat (1 cm mächtig) akzentuiert (bei 1508 m). Dieser Typ erinnert an einen Intrusivkontakt.

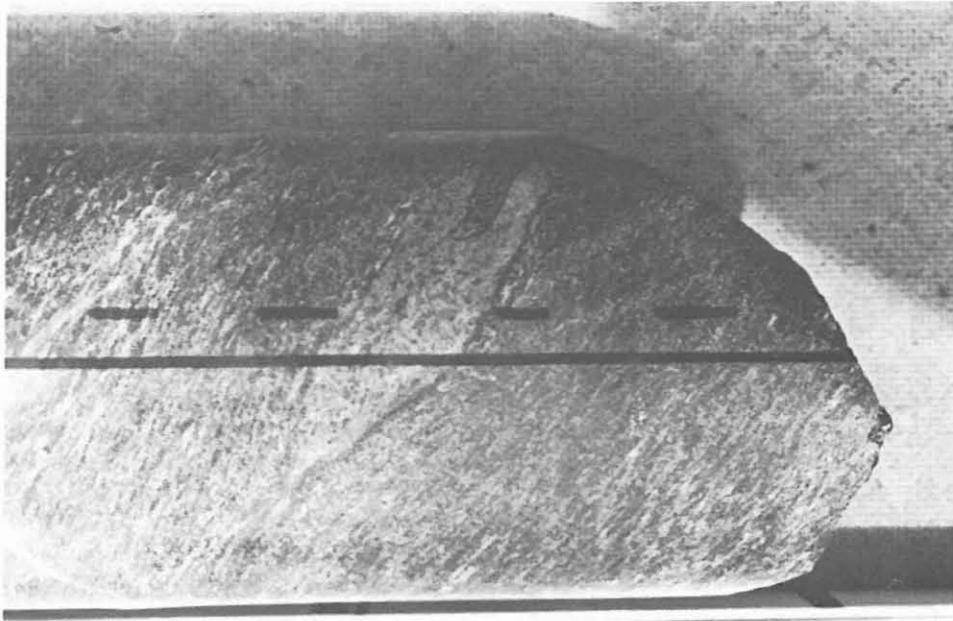


Abb. B.2.29: Hellgrüner Klinopyroxenit-Einschluß mit dunklem Hornblende-Saum; im äußeren Saum Granat-Anreicherung in foliiertem Metagabbro (Kernstück 293C1g, 1406.19 m).

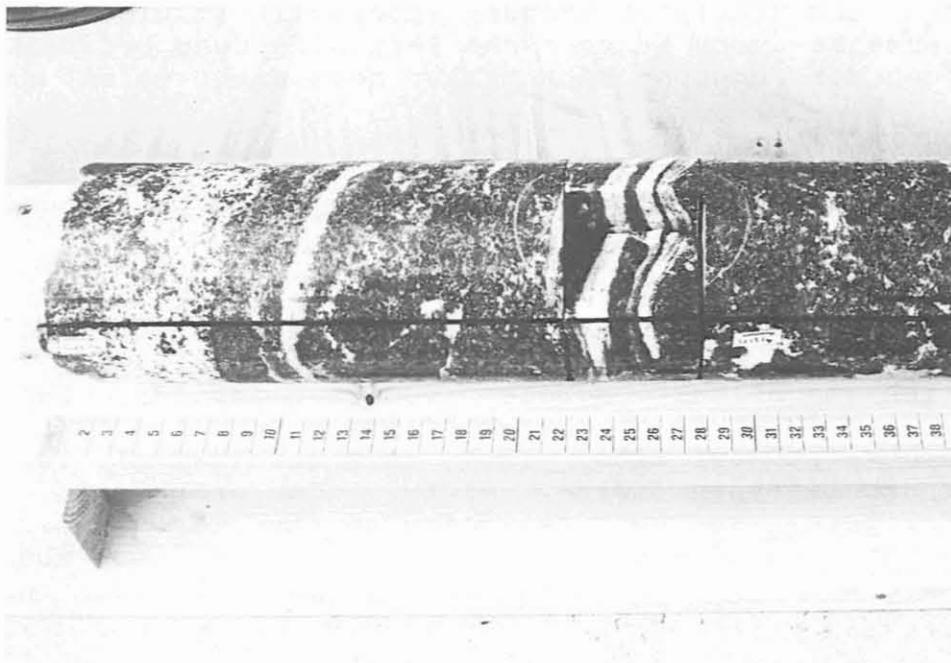


Abb. B.2.30: Helle Biotit-Plagioklas- und dunkle Biotit-Hornblende-Plagioklas-Gneiss-Bänder in grobkörnigem, migmatitischem Amphibolit (Bildmitte, ein Segment ist herausgesägt) (Kernstück 301F1g, 1454.5 m).

Daneben werden auch kontinuierliche Übergänge von Amphibolit in Metagabbro beobachtet (1323, 1298.7, 1520 m). Das Gestein ist dort teilweise feinkörnig und straff foliiert. Bei 1350 m trennt ein Kataklastit die beiden Einheiten.

### B.2.3.3 Leukokrate Biotit-Plagioklas-Gneise im Amphibolit

(Schliffe 301E1f, 301F1g, 315F1g)

Im Teufenbereich 1453.0 - 1455.0 m (Sektionen 301D - F), 1512.0 - 1512.4 (315E - F) und 1529.1- 1529.8 (320A) sind 5 - 30 cm mächtige, meist straff foliierte, selten massige Lagen von hellen Gneisen in vorwiegend massigen Amphibolit eingeschaltet. Teilweise ist eine straffe Bänderung im cm-Abstand zwischen biotitarmen und biotit- und teilweise hornblendereichen Lagen entwickelt (Abb. B.2.30). Die Kontaktflächen zum Amphibolit sind meist eben, in Sektion 301D bis F dringt solch eine helle Lage aber auch schlierig in den Amphibolit ein. In Sektion 315F wird ein massiger Amphibolit-Einschluß (Boudin?, 10 cm Durchmesser) allseitig von diesen hellen Gneislagen umflossen. Abbildung B.2.31 zeigt deutlich das sehr unterschiedliche Deformationsverhalten von massig bleibendem Amphibolit, während der ihn umgebende leukokrate Gneis straff foliiert ist. Unter dem Mikroskop zeigt sich in den hellen Lagen zonierter, randlich oft getrüübter Oligoklas (0.5 mm groß). Stellenweise bildet er 2 mm große Blasten mit rundlichen Quarzeinschlüssen. Hinzu kommt Quarz, leicht alterierter Biotit (Prehnit wächst auf Spaltflächen) und wenige, 50 µm große Granatkörner (gelegentlich von Zirkon umlagert) und Apatit. Diese Komponenten bilden ein massiges isogranular-xenomorphes Gefüge mit Korngrößen um 0.5 mm. Im Schliff 301F1g wechsellagern diese hellen Streifen mit biotit- und hornblendereichereren; Biotit ist gut geregelt. Die grüne Hornblende umwächst Plagioklas poikiloblastisch (Abb. B.2.32). Hinzu kommen reichlich Quarz und Plagioklas und etwas chloritisierter Granat, der von Plagioklas verdrängt wird. Hier kommt in den hellen Lagen winzige, würmchenartige, reliktsche ?Hornblende vor. In 301E1f wird das Gestein von Prehnit-Karbonat-Gängchen durchschlagen. Schliff 315F1g wird von mikroskopischen Kataklastenbahnen durchzogen. Die RDA-Analyse einer hellen Lage von 301E1f ergab (in Gew.-%):

Plagioklas	58
Quarz	35
Prehnit	7

Die sehr kaliumarme, chemische Analyse lautet (in Gew.-%):

SiO <sub>2</sub>	74.5	MgO	0.73	MnO	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.24	CaO	2.91	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.2	Na <sub>2</sub> O	5.20		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1.44	K <sub>2</sub> O	0.42		

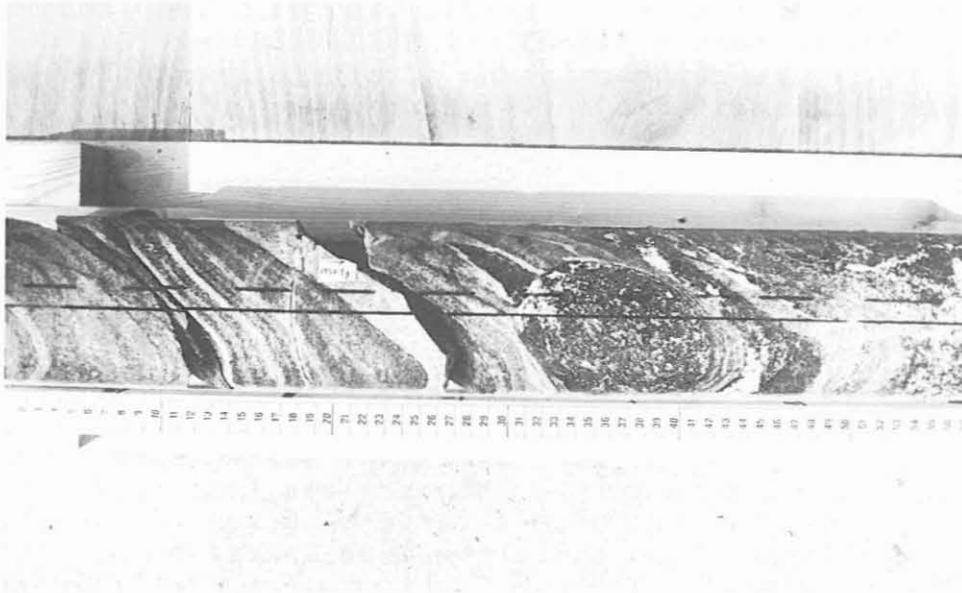


Abb. B.2.31: Streifige, helle Biotit-Plagioklas-Gneis-Bänder umfließen einen rundlichen Amphibolit-Einschluß (Kernstück 315F1g, 1512 m).

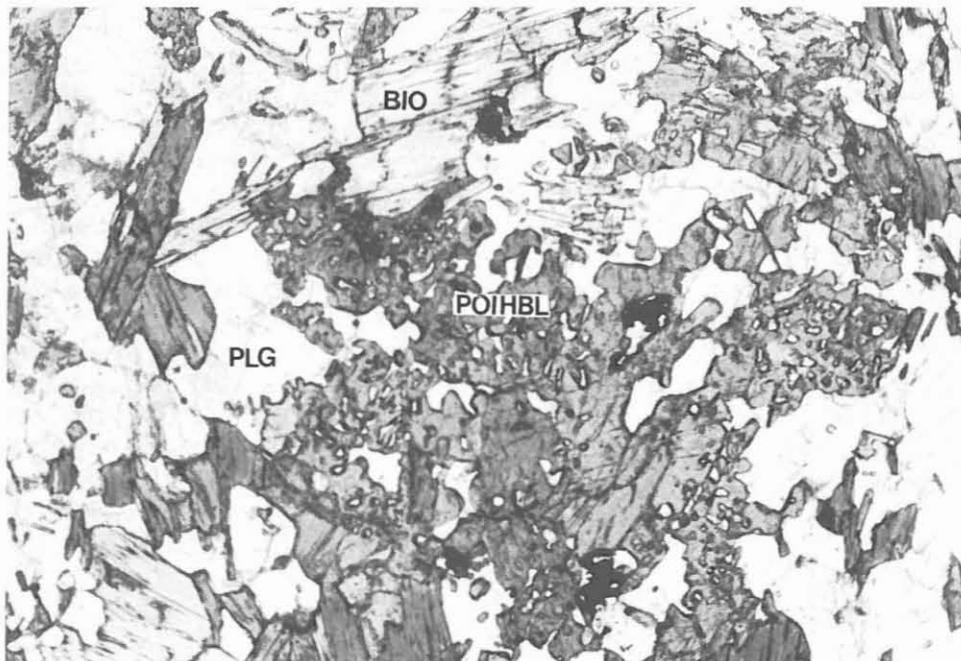


Abb. B.2.32: Poikiloblastische Hornblende (POIHBL), große Biotit-Scheiter (BIO) und Plagioklas (PLG) in xenomorphen Körnern und als Einschluß in Hornblende in dunklen, biotit- und hornblendereichen Bändern in leukokratem Gneis (vgl. Makroaufnahme B.2.30) (Schliff 301F1g, 1455.0 m, 1 Nicol, 30-fach).

Als Edukt dieser sauren Gesteine kommt ein trondhjemitisches Mobilisat in Frage. Durch die straffe Foliation und Lagigkeit sind sie nicht mit den unfoliierten Mobilisaten im migmatitischen Amphibolit zu verwechseln.

#### B.2.3.4 Meta-Ultramafitite

Unter diesem Oberbegriff werden mehrere 0.2 - 6 m mächtige Vorkommen von besonders basischen und mafitreichen Gesteinen zusammengefaßt, obwohl nicht in jedem Einzelfall der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt unter 45 % und der Gehalt an mafischen Mineralen über 90 % liegt (Analysen in Tab. B.2.3 in Kap. B.2.4 oder Abschnitt C). Die Meta-Ultramafitite bilden meist kontinuierliche Übergänge zu Metagabbros (1330, 13331, 1380, 1401 m); daneben treten aber auch abrupte, buchtige und schlierige Kontakte auf (1385, 1408, 1414, 1448, 1454 m); stellenweise trennt ein 2 cm mächtiges, helles Mobilisat Metagabbro und Meta-Ultramafitit (1334, 1400.7 m). Kleinere, isolierte Meta-Ultramafitit-Xenolithe wurden schon im Kap. B.2.3.2 als Einschlüsse in Metagabbros und Amphiboliten beschrieben.

Die massigen, bläulich-grünen Meta-Ultramafitite im Teufenbereich 1330 - 1414 m (KM 278-293) ähneln sich makroskopisch: In einer grünen, feinkörnigen Matrix schwimmen schwarze, unregelmäßig begrenzte, 3-5 mm große Hornblende-Flecken.

Die unregelmäßig in der Gesteinsgrundmasse eingesprengten, oxidischen und sulfidischen opaken Mineralphasen setzen sich aus Magnetit, Ilmenit, Magnetkies, Pyrit, Kupferkies, Pentlandit und Kobaltglanz zusammen. Ferner tritt bei 1381.3 m Graphit auf. Der hohe Anteil an magnetischen bzw. magnetisierbaren Mineralphasen wird durch hohe Werte der magnetischen Remanenz und der Suszeptibilität (Abschnitt D) reflektiert (1381.5 m, 1409.5 m, 1449.5 m).

#### Melanokrater Amphibolit

(Schliffe 278J1k, 279F1h, 280A1e; 1330 - 1331 + 1333.0 - 1333.7 m)

Durch einen deutlichen Plagioklasgehalt stehen diese Gesteine zwischen den Meta-Ultramafititen und den Amphiboliten. Reichlich Hornblende (teilweise opak durch Erzentmischung), Klinopyroxen-Relikte mit vielen kleinen, orientiert verwachsenen Rutil- und Opakmineraleinschlüssen und sperrige Chlorit-schuppen (Hornblende verdrängend) sind die Hauptbestandteile. Während die Hornblende meist eher prismatisch-stengelig ausgebildet ist, tritt sie in 279F1h nadelig-spießig in Klinopyroxen-Pseudomorphosen auf. Opakminerale zeigen teilweise

einen Titanitsaum. Die Übergänge zum benachbarten Metagabbro sind teils fließend, teils tektonischer Natur. Die RDA-Modalanalyse von Kernstück 279F1h ergab (in Gew.-%):

Hornblende	54
Chlorit	26
Plagioklas	20

#### Talk-Hornblendit

(Dünnschliffe, z.T. poliert: 288C1qT, 288D1v, 288E1y, 288F4; Anschliff 288D1v; 1379.8 - 1385.0 m)

Große braune Hornblenden mit buchtigen, korrodierten und poikilitischen Kornformen liegen in einer überwiegend aus Talk bestehenden, feinfilzigen Grundmasse und umschließen kleine, rundliche Talk-Aggregate (Olivin-Pseudomorphosen, Abb. B.2.33). Farbloser Klinopyroxen mit Ilmenitentmischung ist reliktmäßig erhalten (Abb. B.2.34). Die braune Hornblende ist durch die Übernahme der feinen Erzentmischung (makroskopisch als schwarze Flecken) häufig als Pseudomorphose nach Klinopyroxen zu erkennen. Untergeordnet finden sich auch noch farblose und hellgrüne Hornblenden. Die makroskopisch hellgrüne Matrix wird von rundlichen Talk-Aggregaten (Olivin-Pseudomorphosen) mit radialstrahligen, blaßgrünlichen Amphibol-Coronen, Chlorit und etwas Serpentin aufgebaut (Abb. B.2.35). In den rundlichen, ehemaligen Olivineinschlüssen der Klinopyroxene ist durch senkrecht zu Magnetitschnüren gesprossenen Faserseerpentin andeutungsweise eine Maschenstruktur ausgebildet (Abb. B.2.36). Der wenige Biotit (3 mm groß) ist teilweise zu Chlorit und Hellglimmer alteriert. Chlorit-schuppen mit grauen, normalen Interferenzfarben liegen sperrig in der Matrix (Abb. B.2.37). Anthophyllit bildet spießige Stengel. Neben Apatit tritt noch Karbonat in Zwickeln und in Olivin-Pseudomorphosen auf. Die RDA-Analyse von Kernstück 288F4 ergab (in Gew.-%):

Hornblende	40
Chlorit	29
Talk	27
Magnetit	4

Magnetit fällt durch eine girlandenartige Anordnung der zumeist kleinen Aggregate auf. Er bildet Aufwachsungen (Verdrängungen) an Ilmenit und auch saumartige Anlagerungen an Pyrit und Magnetkies (Abb. B.2.38). Ilmenit zeigt kleine, nadelige oder langstengelige, aber auch größere, unregelmäßige, rundliche Formen (Abb. B.2.39). Magnetkies ist die dominierende sulfidische Phase und ist fast stets mit Kupferkies verwachsen. Sulfide liegen überwiegend als kleine Körner oder Verwachsungen vor. In dieser Gesteinseinheit findet sich weiterhin in einem untergeordneten, aber deutlichen Anteil

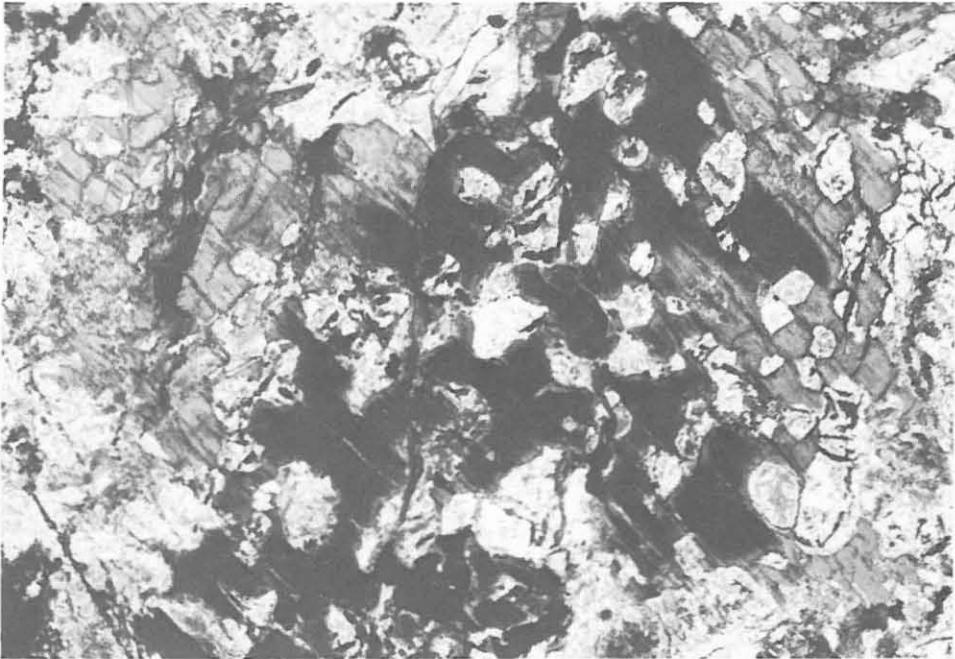


Abb. B.2.33: Poikilitische, z.T. stark getrüübte Hornblende (HBL) mit Talkeinschlüssen (TAL) mit rundlichen oder verzerrt sechseckigen Querschnitten (Olivinpseudomorphosen in Talk-Hornblendit (Schliff 288D1v, 1381.33 m, + Nicols, 20-fach).



Abb. B.2.34: Braun durchschimmernde Ilmenit-Täfelchen (ILM) in farblosem, feinstlamelliertem Klinopyroxen (CPX) in Meta-Ultramafitit (Schliff 288C1qTI, 1380.71 m, 1 Nicol, 70-fach).

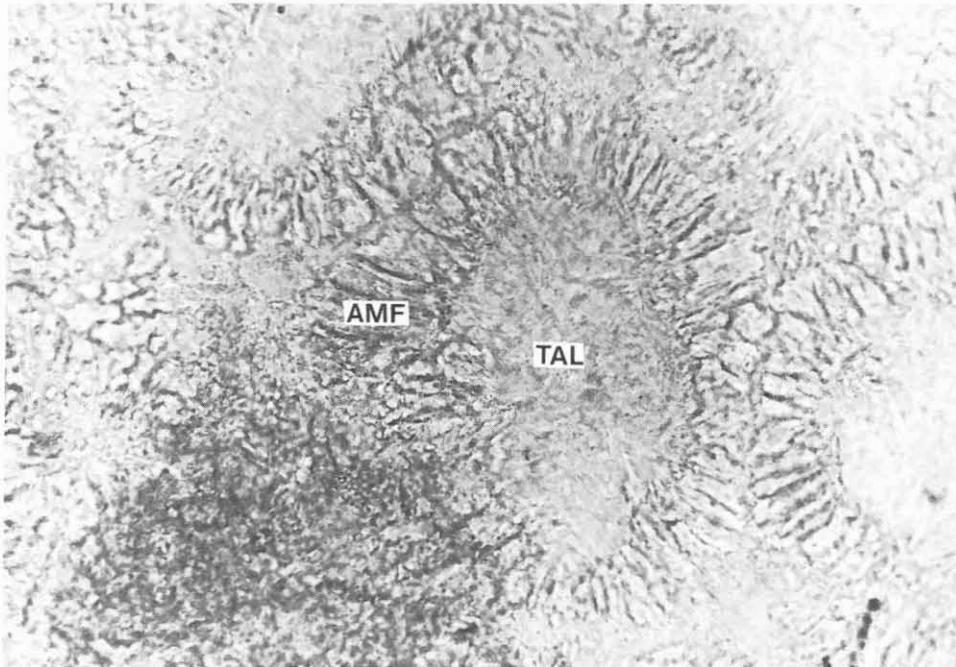


Abb. B.2.35: Radialstrahlige, blaßgrüne Amphibol-Corona (AMF) um Olivinpseudomorphosen aus Talk (TAL) in Meta-Ultramafitit (Schliff 288D1v, 1381.33 m, 1 Nicol, 110-fach).

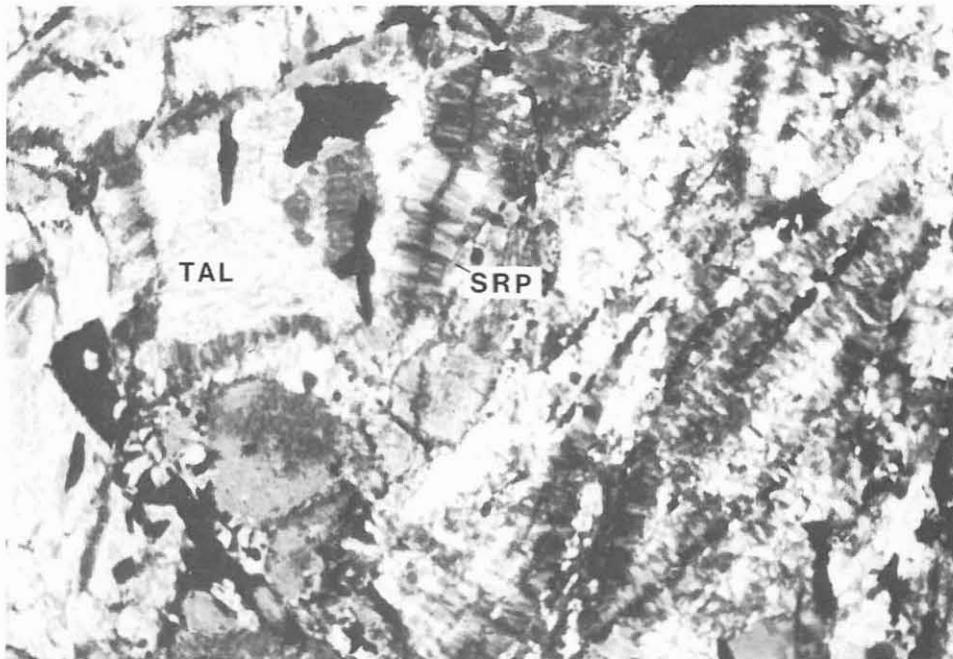


Abb. B.2.36: Angedeutete Maschenstruktur in Olivin-Pseudomorphosen; Faserserpentin (SRP) wächst senkrecht zu Magnetit-Schnüren, Talk-Kern (TAL) - (Talk-Hornblendit) (Schliff 288D1v, 1381.33 m, + Nicols, 100-fach).



Abb. B.2.37: Sperrige Chlorite (CHL) in Meta-Ultramafitit  
(Schliff 288F4, 1382.57 m, 1 Nicol, 30-fach).

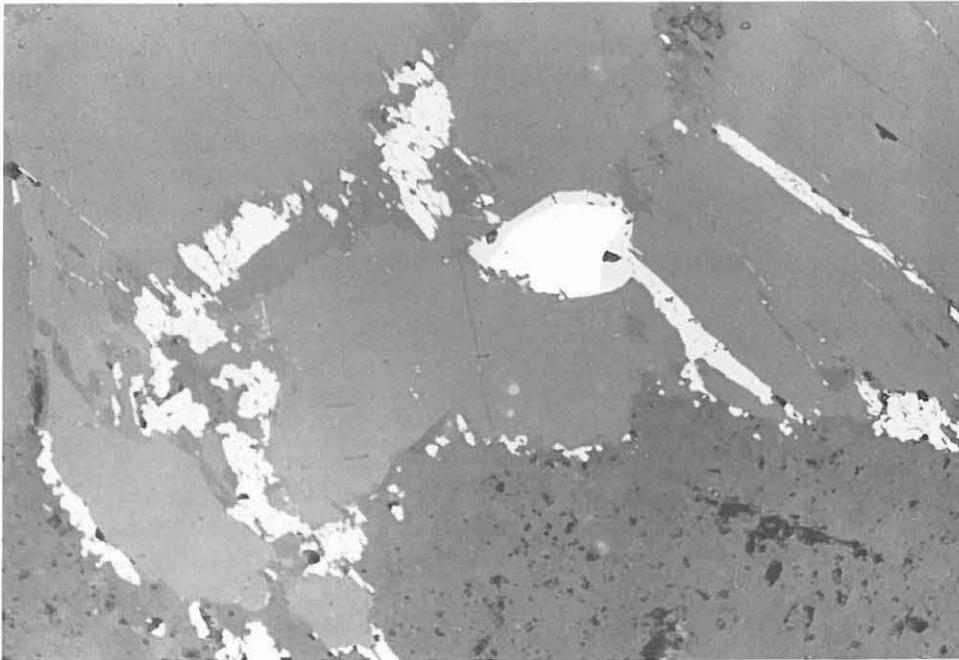


Abb. B.2.38: Girlandenartiger Magnetit (grau) und Magnetit-  
Saum um Sulfidaggregat aus Magnetkies (hellgrau) und Pyrit  
(weiß) in Talk-Hornblendit  
(Anschliff 288D1v, 1381.33 m, 1 Nicol, 140-fach, Luft).

Graphit (Abb. B.2.39). Das Mineral tritt weniger leistenförmig als vielmehr in kugelförmigen Haufen auf und ist eng an Ilmenit und Magnetit gebunden.

### Chlorit-Hornblendit

(Dünnschliff 291G1o; 1400.6 - 1401.0 m)

Schliff 291G1o zeigt Hornblende-Pseudomorphosen nach Klinopyroxen mit staubfeinen, opaken Einschlüssen (randlich konzentriert). Chlorit verdrängt die Hornblende. Opakminerale sind zu Titanit und Leukoxen alteriert. Die RDA-Modalanalyse (291G1n) ergab (in Gew.-%):

Hornblende	54
Chlorit	46

### Hornblendit

(Dünnschliffe 293H2rT, 293H5; Anschliff 293H5; 1408.0 - 1414.2 m)

Grüne Hornblende ist in diesem Gestein das ganz überwiegende Mineral. Neben etwas Anthophyllit kommt weiterhin noch wenig chloritisierter Biotit hinzu. In Zwickeln findet sich etwas Talk (Abb. B.2.40). Talk und Calcit wurden in Kernmarsch 294 als Kluftbelag mit RDA identifiziert. Die RDA-Gesamtgesteinsanalyse in diesem Bereich ergab (in Gew.-%):

Kernstück 293H5:

Hornblende	66
Chlorit	28
Calcit	6

Kernstück 293H2rT:

Hornblende	78
Chlorit	22
Talk	Spur.

Der Anschliff 293H5 aus diesem Abschnitt weist lediglich eine geringe Erzmineralführung (und auch nur geringe Remanenz- und Suszeptibilitätswerte - siehe Abschnitt D) auf. Als Oxide treten Ilmenit und Rutil (Zwillingsstreifen, gelb-bräunliche Innenreflexe) neben sehr kleinen Pyrit-Einzelaggregaten auf.

### Chlorit-Hornblende-Serpentinit

(Dünnschliffe, z.T. poliert: 300G1j I+II, 300H2T1, 301B1b; Anschliff 300G1j; 1449.5 - 1450.0, 1450.8 - 1451.2, 1451.8 -

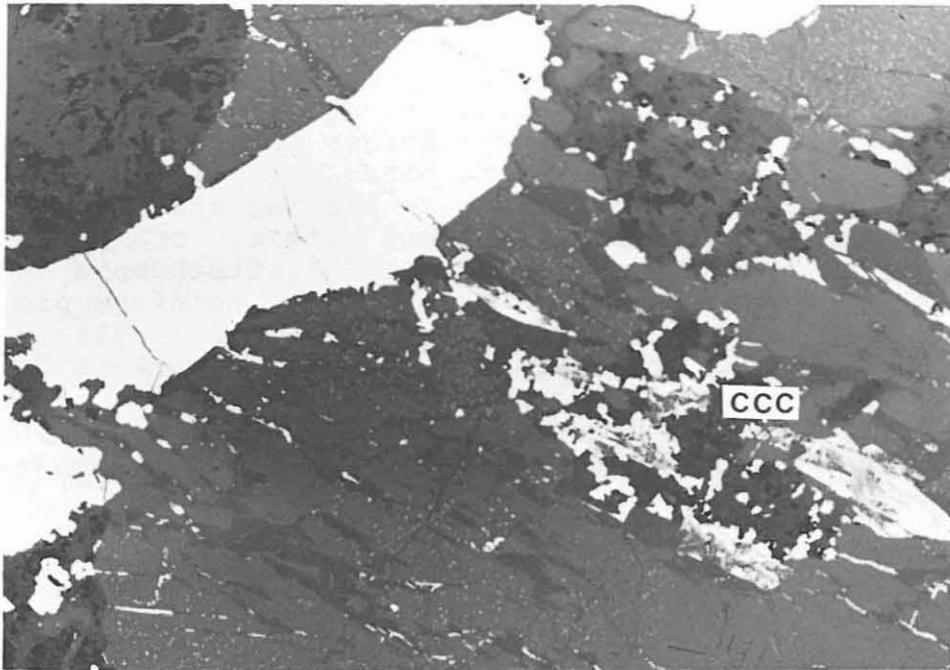


Abb. B.2.39: Ilmenit in größeren, unregelmäßigen Körnern mit undeutlichem Magnetit-Saum und -Rißfüllungen; ausgelängte, aufgefiederte Graphit-Leisten und -Haufen (CCC) in Talk-Hornblendit  
(Anschliff 288D1v, 1381.33 m, 1 Nicol, 160-fach, Luft).

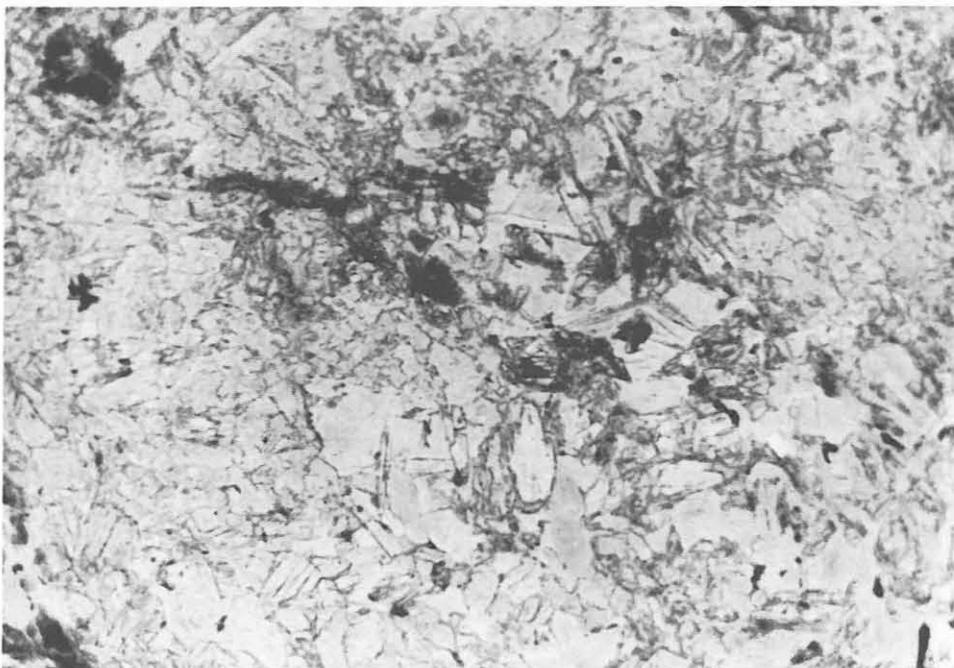


Abb. B.2.40: Anthophyllit, Biotit, Chlorit und Hornblende in Meta-Ultramafitit  
(Schliff 293H5, 1410.40 m, 1 Nicol, 30-fach).

1452.7, 1455.7 - 1456.2 m)

Der Meta-Ultramafitit im Kernmarsch 300 und 301 ist makroskopisch massig und homogen mit mittelgrün-schillernden Hornblendegroßkristallen und etwas heller grünem Zwischenmittel. In den Schliffen 300G1j sind farblose Hornblenden (teilweise mit parallel orientierten Ilmenit- und Magnetit-Einschlüssen, Klinopyroxen-Pseudomorphosen?) und viele, oft deformierte (Knickbänder), teilweise geregelte Chloritschuppen (normale, graue Interferenzfarben) zu beobachten. Feinschuppiger Serpentin bildet gefelderte Pseudomorphosen und füllt Zwickel aus. Opake Nadeln liegen parallel der Spaltbarkeit der Chlorite. Xenomorphe, opake Körner liegen regellos verteilt in der Matrix. Gröber kristalliner Talk verdrängt Hornblende. Karbonat und Apatit treten akzessorisch auf. Die RDA-Analyse von diesem Stück lautet (in Gew.-%):

Serpentin	43
Amphibol	39
Chlorit	17
Talk, Klinopyroxen und Prehnit	Spuren.

Einen halben Meter tiefer (300H2T1) fehlt Serpentin. Das Gestein besteht nur noch aus Hornblende und Chlorit-Aggregaten neben etwas Opakmineral, ebenso 301B1b (in Gew.-%): 76 % Hornblende, pseudomorph nach Klinopyroxen und 24 % Chlorit-Scheiter (RDA).

Im Anschliff 300G1j (1449.3 m) wurden die Erzminerale Magnetit, Ilmenit, Magnetkies, Kupferkies und mit Hilfe von Mikrosondenanalysen (am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen von Herrn S. van Delden durchgeführt) Pentlandit und Kobaltglanz identifiziert.

Magnetit und Magnetkies dominieren. Magnetit bildet meist nadelige oder entlang Spaltbarkeiten von Wirtsmineralen orientierte, unregelmäßige Aggregate und ist saumartig um oder als Gangfüllung in Ilmenit anzutreffen. Auch auf Sulfidaggregaten ist Magnetit als jüngere Phase saumartig aufgewachsen (Abb. B.2.41). Magnetkies, Kupferkies, Pentlandit und Kobaltglanz (Zusammensetzung in Atom-%: Co 26, As 33, S 33, Ni 5, Fe<sup>2+</sup> 3) sind fast stets miteinander verwachsen; selten liegen sie als monomineralische Körner vor. Anlagerungen von Magnetit und Ilmenit sind häufig.

#### B.2.4 Diskussion

##### Metagabbros

Ophitgefüge sind für viele Diabase typisch, gelegentlich aber

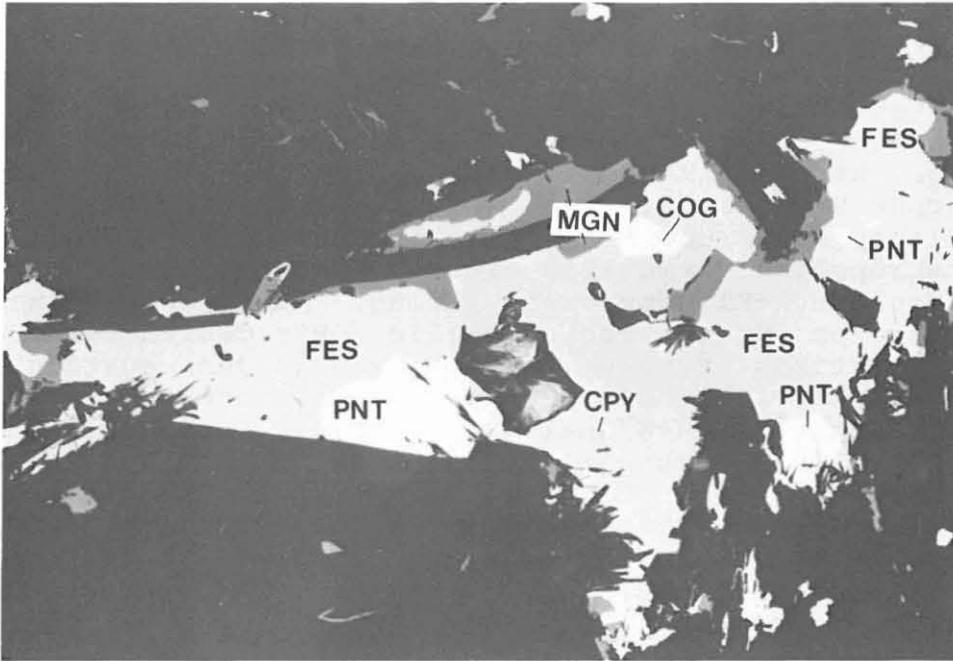


Abb. B.2.41: Magnetit (MGN) umgibt saumartig ein Sulfidaggregat aus Magnetkies (FES), Pentlandit (PNT) und Kobaltglanz (COG) in Chlorit-Hornblende-Serpentinit; stellenweise findet sich in diesem Anschliff auch Ilmenit an Magnetit angelagert (Anschliff 300G1j, 1449.30 m, 1 Nicol, 140-fach, Luft).

auch in manchen Gabbros entwickelt. Ähnlich grobkörnig (bis 1 cm große Klinopyroxene) können auch Diabase sein. Für die Ansprache als Metagabbro gaben letztlich die als Kumulate gedeuteten Meta-Ultramafitite den Ausschlag. Die Ausbildung von Granat-Coronen ist sowohl als spätmagmatische Subsolidus-Reaktion am Kontakt Klinopyroxen-Plagioklas als auch als metamorphe Reaktion denkbar. Die symplektitische Verwachsung von Klinopyroxen und Plagioklas in Dünnschliff 317B1d zeigt, daß ursprünglich vermutlich ein Na-, Al-reicher, omphacitischer Hochdruck-Klinopyroxen vorlag. Hornblende-Plagioklas-Kelyphite um Granat fehlen völlig. Wir deuten die Granat-Corona-Reaktionstextur um Klinopyroxen in dem quarzführenden Metagabbro bei fehlendem Orthopyroxen als ursprüngliche Paragenese Klinopyroxen+Granat+Quarz. Dies würde nach GREEN & RINGWOOD (1967) Granulitfazies unter Drucken von ca. 8-10 kbar bedeuten. Die Entmischung von Rutil im Klinopyroxen zeigt einen ehemals  $TiO_2$ -reichen Hochtemperatur-Klinopyroxen an. Die an der Corona beteiligte Hornblende und der Plagioklas müßten demnach bei einer späteren, retrograden Überprägung entstanden sein.

#### **Meta-Ultramafitite**

Die erbohrten Meta-Ultramafitite ähneln denen, die SCHÜSSLER (1987, S. 192 ff.) aus der ZEV beschreibt. Allerdings führen die Meta-Ultramafitite der Bohrung keinen grünen Spinell. Kontinuierliche Übergänge zu Metagabbro und das Auftreten innerhalb der Gabbro-Einheiten (z.T. als Xenolithe mit Reaktionssaum) lassen den Schluß zu, daß die Meta-Ultramafitite kumulatartige Abkömmlinge des Gabbro-Magmas sind. Hierauf deuten auch die noch recht hohen Al- und nur mäßig hohen Mg- und Cr-Gehalte hin (Tab. B.2.3, s. auch Abschnitt C).

#### **Genetische Beziehungen zwischen Amphiboliten, Metagabbros und Meta-Ultramafititen**

Typische Metagabbros der Bohrung unterscheiden sich von den Amphiboliten durch:

- reliktsches Ophitgefüge
- Klinopyroxen-Relikte
- Granat-Coronen
- massige, homogene, mittel- bis grobkörnige Textur
- Gesteinschemismus (siehe unten).

Durch tektono-metamorphe Überprägung gehen die Texturmerkmale nach und nach verloren, so daß ein Teil der Amphibolite völlig umkristallisierte (Meta-)Gabbros sind.

Typische Amphibolite sind:

- mittelkörnig und meist foliiert oder gebändert
- durch Quarz-Plagioklas-Schlieren inhomogen
- frei von Klinopyroxen-Relikten und Granat-Coronen.

Der Vergleich chemischer Analysen (Tab. B.2.1 und B.2.2) von zweifelsfrei den Amphiboliten oder Metagabbros zuzuordnenden Gesteinen zeigt deutliche Unterschiede. Die Metagabbros sind reicher an Cr und Ni und ärmer an Zr und  $P_2O_5$  als die Amphibolite. Im Alk-F-M-Dreieck (Abb.B.2.42) zeigen die Amphibolite einen höheren Alkalien-Anteil im Verhältnis zu FeO und MgO. Ein Teil der Amphibolite sind also völlig überprägte Metagabbros, der andere Teil ist von den Metagabbros stofflich und texturell verschieden. Aus den beobachteten Kontakten zwischen Amphibolit und Metagabbro kann bisher keine eindeutige Altersabfolge abgeleitet werden.

Bis jetzt liegen folgende Analysen (siehe Abschnitt C) von Kernstücken vor:

Amphibolite: 256C21, 257B4d, 262A2 (aus einem migmatitischen Bereich), 267G1n (nach Schliffbefund feinkörniger Amphibolit, liegt aber innerhalb einer größeren Metagabbro-Einheit und ist chemisch identisch mit 271B1b), 270B4a, 274J1z (aus einer kataklastischen Scherzone), 295H1s, 306A2b, 316B1b.

Metagabbros: 263A6a, 271B1b, 278F1g, 281A1a (aus einem migmatitischen Bereich), 287E2k, 288B1g, 293A1c, 301B1-oben (zeigt kontinuierlichen Übergang zur Meta-Ultrabasis-Probe 301B1b-unten).

Meta-Ultramafitite: 279F1h, 288C1qT, 288F4, 291G1uT, 293H2rT, 293H5, 301B1b-unten (kontinuierlicher Übergang zur Metagabbro-Probe 301B1b-oben).

Im Alk-F-M-Dreieck (Abb. B.2.42) weisen die Meta-Ultramafitite erwartungsgemäß die höchsten MgO/FeO-Verhältnisse bei gleichzeitig niedrigsten Alkali-Gehalten auf. Die Metagabbros zeigen demgegenüber eine geringfügige Fe- und deutliche Alkalien-Anreicherung. Die Metagabbro-Probe mit dem höchsten Alkalien-Gehalt ist migmatitisch überprägt (281A1a). Die Amphibolite überlappen z.T. mit den Metagabbros und zeigen einen deutlichen Trend zu erhöhten Fe- und Alkalien-Gehalten. Auch hier ist die Probe mit dem höchsten Alkalien-Gehalt migmatitisch (262A2). Zwei Amphibolite (274J1z, 295H1s) fallen infolge ihrer hohen Fe- (und Ti-)Gehalte, die sich in einer erhöhten Ilmenit-Führung dokumentieren, aus dem generellen Trend heraus. Diese Befunde sprechen vorbehaltlich weitergehender Untersuchungen, besonders hinsichtlich der Spurenelementmuster, ebenfalls für eine genetische Beziehung zwischen den drei Gesteinstypen.

Der Mineralbestand der Amphibolite entspricht dem fortgeschrittenen, retrograden Trend (Klinopyroxen -> Hornblende;

Tab. B.2.1: Amphibolite

	256C21T	257B4d	262A2	270B4a	295H1s	306A2bT	316B1b
SiO <sub>2</sub>	52.00	48.60	61.50	52.00	50.90	48.20	47.87
TiO <sub>2</sub>	1.67	1.18	0.71	1.54	2.10	1.66	1.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.90	18.00	17.40	17.10	16.80	16.30	16.66
FeO	8.75	8.51	4.95	9.09	11.70	9.72	9.57
MnO	0.16	0.16	0.10	0.20	0.30	0.17	0.18
MgO	4.70	6.51	2.05	5.51	4.46	7.04	7.81
CaO	6.90	8.67	5.41	8.11	5.83	8.73	9.69
Na <sub>2</sub> O	4.62	3.79	5.13	3.83	2.84	3.22	2.97
K <sub>2</sub> O	0.94	0.71	0.64	0.53	0.83	0.87	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	0.28	0.27	0.49	0.33	0.22	0.20
Summe	96.94	96.41	98.16	98.40	96.09	96.13	97.29
Cr	130	168	29		146	202	
Co	41	44	36		51	51	
Ni	25	36	12	53	33	64	
Cu	30	38	< 5		44	31	
Zn	93	92	81	103	91	98	
Ga	20	19	20		19	20	
Rb	19	16	15	6	20	15	
Sr	307	390	357	328	263	286	
Y	36	38	22	42	35	30	
Zr	288	200	247	193	209	166	
Nb	9	7	6		16	10	

Tab. B.2.2: Metagabbros

	263A6a	278F1g	281A1a	287E2k	288B1g	293A1c	301B1 oben
SiO <sub>2</sub>	47.60	47.40	52.70	47.53	46.76	50.70	45.80
TiO <sub>2</sub>	1.47	1.80	0.96	1.00	1.15	1.60	1.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.90	15.40	16.90	19.49	17.48	16.30	16.20
FeO	8.98	10.89	7.28	7.72	8.43	9.37	8.53
MnO	0.17	0.19	0.12	0.13	0.14	0.15	0.13
MgO	8.20	8.92	6.59	8.46	10.28	7.61	12.40
CaO	9.53	9.16	7.94	9.64	8.70	7.83	8.23
Na <sub>2</sub> O	3.01	2.93	4.51	2.85	2.85	3.01	2.66
K <sub>2</sub> O	0.43	0.47	0.79	0.60	0.94	0.66	0.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.16	0.08	0.19	0.18	0.19	0.20
Summe	96.45	97.32	97.87	97.61	96.91	97.42	96.32
Cr	225	315	215	208		218	586
Co	52	54	27	40		43	61
Ni	57	155	41	159	233	102	334
Cu	24	40	14	33		37	119
Zn	76	91	81	65	76	79	62
Ga	18	18	22	17		16	17
Rb	11	10	13	14	28	13	17
Sr	307	182	257	349	428	102	337
Y	27	36	20	19	20	25	26
Zr	106	129	109	96	107	102	145
Nb	6	< 5	6	7		6	8

Tab. B.2.3: Meta-Ultramafitite

	279F1h	288C1qT	288F4	291G1nT	293H2rT	293H5	301B1b unten
SiO <sub>2</sub>	45.70	43.80	42.35	41.50	46.80	47.41	43.70
TiO <sub>2</sub>	1.48	1.04	0.92	0.99	0.78	0.88	1.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.30	10.20	8.89	11.30	8.10	9.36	12.80
FeO	10.89	12.16	12.66	12.33	13.23	13.10	10.53
MnO	0.16	0.18	0.18	0.19	0.24	0.26	0.16
MgO	13.30	19.70	21.98	19.10	18.70	16.78	17.00
CaO	7.41	6.39	5.14	7.84	7.46	7.06	8.57
Na <sub>2</sub> O	2.33	1.20	0.92	0.44	0.71	1.15	1.33
K <sub>2</sub> O	0.25	0.19	0.24	0.11	0.12	0.22	0.30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.19	0.18	0.19	0.12	0.14	0.14
Summe	95.96	95.05	93.46	93.99	96.26	96.36	95.71
Cr	538	655		692	579		870
Co	73			96	83		85
Ni	345	618	627	515	406	374	496
Cu	163			8	12		141
Zn	89	102	89	237	114	120	76
Ga	15			17	13		14
Rb	< 5	< 5	5	< 5	< 5	7	5
Sr	179	105	107	28	40	106	86
Y	29	22	19	20	21	18	23
Zr	119	105	92	107	75	61	113
Nb	< 5			7	< 5		7

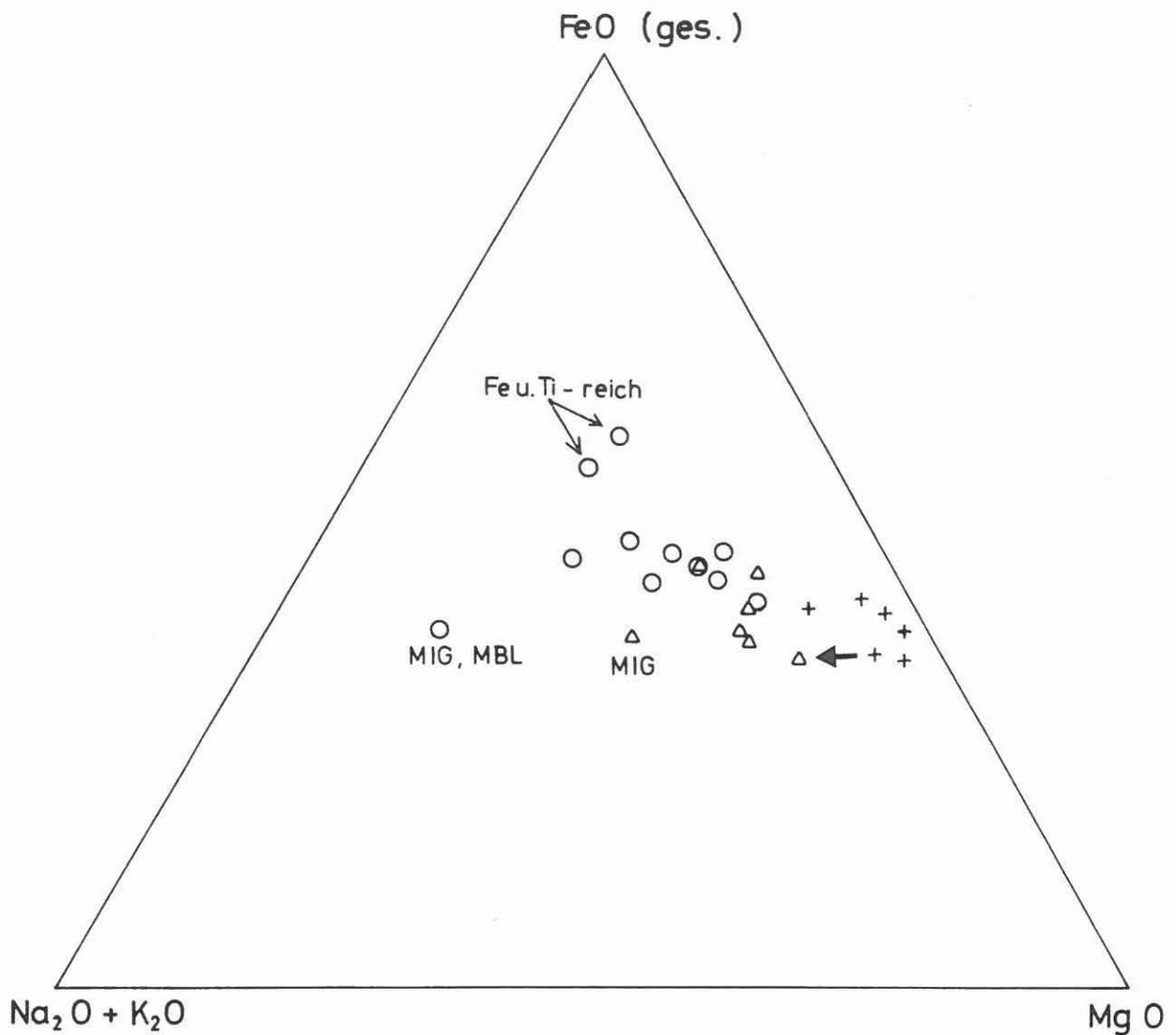


Abb. B.2.42: Amphibolite (o), Metagabbros (Δ) und Meta-Ultramafitite (+) im AFM-Dreieck; der Pfeil verbindet 2 Analysen aus Meta-Ultrabasisit und Metagabbro, die einen kontinuierlichen Übergang zeigen.

Granat -> Hornblende+Plagioklas; Rutil -> Titanit), der schon im Metagabbro angedeutet ist.

#### B.2.5 Nachträge zu vorherigen Berichten

Das in HACKER et al. (1988, Abb. B.3.9, S. B 16) gezeigte Dünnschliff-Foto aus einem hornblende- und biotitreichen Gneisband zeigt nicht wie beschrieben gekrümmte, mit Biotit verwachsene Klinozoisit/Epidot-Kristalle. P. BLÜMEL machte uns darauf aufmerksam, daß es sich hierbei um das Mineral Pumpellyit handelt, das somit erstmalig in Ostbayern gefunden worden sei. Die inzwischen erfolgte Detailaufnahme der Kerne ergab, daß hornblende- und biotitreiche Gneisbänder recht häufig sind. Alle Schliffe von diesen Gesteinen führen Pumpellyit. Neben Laumontit und Prehnit ist Pumpellyit nun das dritte für niedriggradige Metamorphose charakteristische Mineral in der Bohrung. Die entsprechenden Paragenesen müssen allerdings noch näher untersucht werden, um genauere Aussagen über die niedriggradige Überprägung der Gesteine zu erlangen.

Die Detailaufnahme der Kernstrecke 480-992 m ergab, daß dunkelbrauner Turmalin in den Paragneisen in geringen Gehalten (<1%) weit verbreitet ist. Meistens tritt er 1-5 mm groß am Rand von hellen Quarz-Feldspat-Mobilisaten auf, kommt aber auch in der dunklen, biotitreichen Matrix vor. Im Körnerpräparat wurde unter dem Mikroskop auch graublauer Turmalin beobachtet. Die Quarz-Feldspat-Mobilisate führen häufig winzige Graphitschüppchen. Der in HACKER et al. (1988, S. B 24) vermutete Wolframit konnte nicht bestätigt werden.

Zur faziellen Einordnung der Granat-Sillimanit-Biotit-Gneise kann folgendes ergänzt werden: Nach den bisherigen Beobachtungen ist Muskovit ganz überwiegend retrograd aus Biotit und Sillimanit oder Disthen gebildet worden und hat nicht zur primären, metamorphen Paragenese gehört. Vereinzelt wurde allerdings auch wenig straff eingeregelter Muskovit beobachtet. Kalifeldspat tritt nur in wenigen Quarz-Feldspat-Mobilisaten auf. Weder kann die stabile Paragenese Sillimanit-Kalifeldspat noch Sillimanit-Muskovit beobachtet werden. Die Schwierigkeiten bei der Zuordnung entweder zur Sillimanit-Muskovit oder zur Sillimanit-Kalifeldspat-Zone ist durch die Kaliumarmut der erbohrten Paragneise im Verhältnis zu  $Al_2O_3$ , FeO und MgO bedingt. Zur Verdeutlichung wurden eine Reihe von Paragneis-Analysen in ein A'KF-Diagramm eingetragen (Abb. B.2.43 und Tab. B.2.4). Hierbei wurde das  $Fe_2O_3/FeO$ -Verhältnis der RFA-Analysen generell als 0.15 angenommen. Alle betrachteten Analysen liegen sehr nahe, oft sogar rechts der Konode Biotit-Sillimanit/Disthen, können also aufgrund ihres Chemismus in den in Frage kommenden, metamorphen Zonen nur sehr wenig bis keinen Muskovit oder Kalifeldspat bilden, so daß zur endgültigen mineralfaziellen Einstufung der bisher

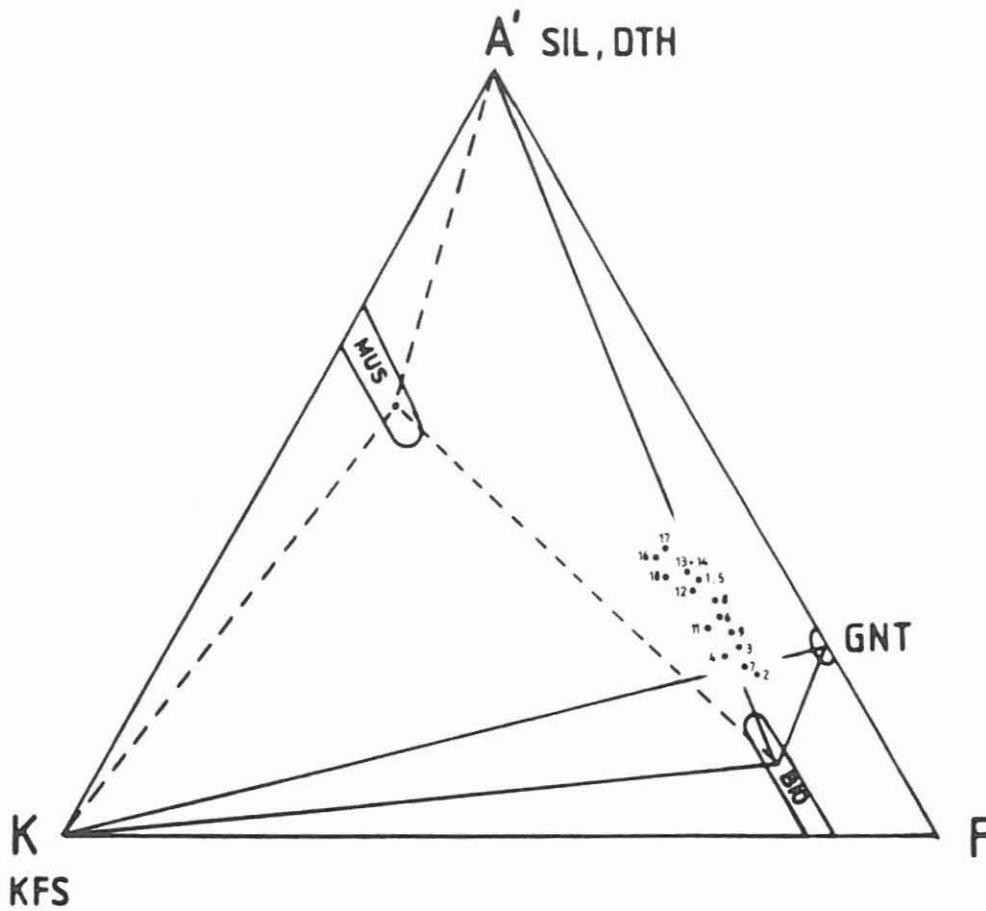


Abb. B.2.43: A'KF-Diagramm mit schematischem Konodenverlauf für die Sillimanit-Muskovit- (gestrichelt) und die Sillimanit-Kalifeldspat-Zone.

1 = 53B7T	2 = 55A6T	3 = 67H20T
4 = 71A4T	5 = 72C10T	6 = 73B6T
7 = 74B4T	8 = 75C8T	9 = 77E19
11 = 70B9T	12 = 97D3h	13 = 100B2d
14 = 102A1aT	16 = 212B5aT	17 = 215C1yT
18 = 225B4T		

angetroffenen Paragneise noch weitergehende Untersuchungen erforderlich sind.

Wie der Vergleich mit einem Lesestein-Dünnschliff aus dem Autobahn-Einschnitt S Scherreuth (4 km S Windischeschenbach) zeigt, könnte es sich bei den in HACKER et al. (1988, Abb.B.3.2 und B.3.5) erwähnten serizitischen Aggregaten in den Paragneisen um Pseudomorphosen nach Disthen oder Stauroolith handeln. Beide werden S Scherreuth zu einer feinschuppigen, niedrig doppelbrechenden Substanz umgewandelt.

Tab. B.2.4: Paragneise

	53B7T	55A6T	67H20T	71A4T	72C10T	73B6T	74B4bT
SiO <sub>2</sub>	58.55	61.51	61.06	59.99	60.47	63.46	61.0
TiO <sub>2</sub>	1.07	0.92	1.02	1.36	0.98	1.01	1.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.63	15.58	16.40	16.43	18.66	16.00	16.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	8.86	7.77	8.65	7.86	8.02	8.39	8.14
MnO	0.13	0.52	0.69	0.22	0.26	0.28	0.21
MgO	3.21	2.66	2.82	3.56	2.94	3.06	3.24
CaO	1.27	2.14	1.35	1.36	1.30	1.08	1.51
Na <sub>2</sub> O	2.48	3.38	3.18	3.07	2.76	2.42	2.72
K <sub>2</sub> O	2.99	1.99	2.68	3.08	2.70	2.61	2.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.09
Summe	98.19	96.47	97.95	97.03	98.19	98.41	97.38

	70B9T	97D3h	100B2d	102A1aT	212B5aT	215C1yT	225B4T
SiO <sub>2</sub>	61.35	56.30	63.21	58.30	59.02	61.60	64.90
TiO <sub>2</sub>	1.16	1.18	0.81	1.04	0.98	0.76	0.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.35	19.47	17.20	19.51	19.23	18.92	16.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	7.94	9.11	7.43	9.07	8.12	7.36	6.44
MnO	0.22	0.56	0.14	0.22	0.15	0.18	0.14
MgO	3.68	3.29	3.00	3.04	2.82	2.59	2.36
CaO	1.01	1.00	0.82	0.91	0.73	0.87	1.21
Na <sub>2</sub> O	1.82	2.18	1.88	2.31	1.77	2.08	2.04
K <sub>2</sub> O	3.52	3.60	2.95	3.26	3.92	3.23	3.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.13	0.07	0.08	0.09	0.11	0.15
Summe	97.12	96.82	97.51	97.74	96.83	97.70	98.04

### B.3 Strukturgeologie

#### B.3.1 Einleitung

Die erbohrte Strecke setzt sich aus Sillimanit-Biotit-Gneisen und aus orthogenen Metabasiten/Meta-Ultramafititen mit lagigem, untergeordnet richtungslos-körnigem Gefüge zusammen. Der Übergang vom Sillimanit-Biotit-Gneis zur Metabasitserie bei 1160 m fällt in eine Richtbohrphase, aus der bohrtechnisch bedingt ausschließlich Cuttingsproben vorliegen. Dünnschliffproben von Cuttings erlaubten hier eine Ansprache des Mikrogefüges. Wegen des kleinen Ausschnittes, den die Dünnschliffproben der Cuttings wiedergeben, kann eine Ausgliederung von Gefügedomänen nicht vorgenommen werden. Der Mineralbestand der Cuttings erlaubt unter Zuhilfenahme des Gamma Ray Logs eine Festlegung von Störungszonen (vgl. Kap. B.4.3). Für eine detaillierte strukturgeologische Bearbeitung stehen die Kernstrecken 1177.0 - 1183.0 und 1228.8 - 1530.0 m zur Verfügung.

#### B.3.2 Makrogefüge

##### B.3.2.1 Foliation

Die gekernte Strecke wird fast ausschließlich von Metabasiten mit Einschaltungen von Meta-Ultramafititen aufgebaut. Untergeordnet treten geringmächtige leukokrate Biotit-Gneislagen auf (vgl. Kap. B.2.3.3). Zwischen 1229.3 m und 1252.6 m liegt eine Wechsellagerung aus lagigem Amphibolit und Biotit-Hornblende-Gneisen vor.

Aus Abb. B.3.1 wird deutlich, daß die erbohrten Amphibolite über weite Strecken anstelle des für magmatogene Gesteine charakteristischen, richtungslos-körnigen Gefüges einen stofflichen Lagenbau aufweisen. Diese Foliation ist besonders deutlich in plagioklasreicheren Amphiboliten entwickelt und weist stark unterschiedliche Einfallwinkel zwischen 20° und 80° auf. In der teufenbezogenen Verteilung der Einfallwinkel wird eine zyklische Undulation sichtbar. Vermutlich handelt es sich um eine weitspannige Verfaltung der steilgestellten Foliation durch gravitative Einwirkung im spatorogenen Extensionsstadium. Dieses Phänomen wird schon in der vorangehenden Berichtsstrecke (480 - 992 m) in Biotit-Plagioklas-Gneisen beobachtet (vgl. HACKER et al. 1988, S. B 28).

Strafflagige Biotit-Gneis-Einschaltungen (vgl. Kap. B.2.3.3) mit einem Einfallen von 40 bzw. 60° sind nur geringmächtig entwickelt (5 - 30 cm), so daß sie in Abb. B.3.1 nicht in Erscheinung treten. Die leukokraten Hornblende-Biotit-Plagioklas-Gneis-Einschaltungen im Amphibolit zwischen 1229.3 m und 1252.6 m heben sich mit einem recht einheitlichen Einfallwinkel von etwa 50° - 70° deutlich vom Einfallen

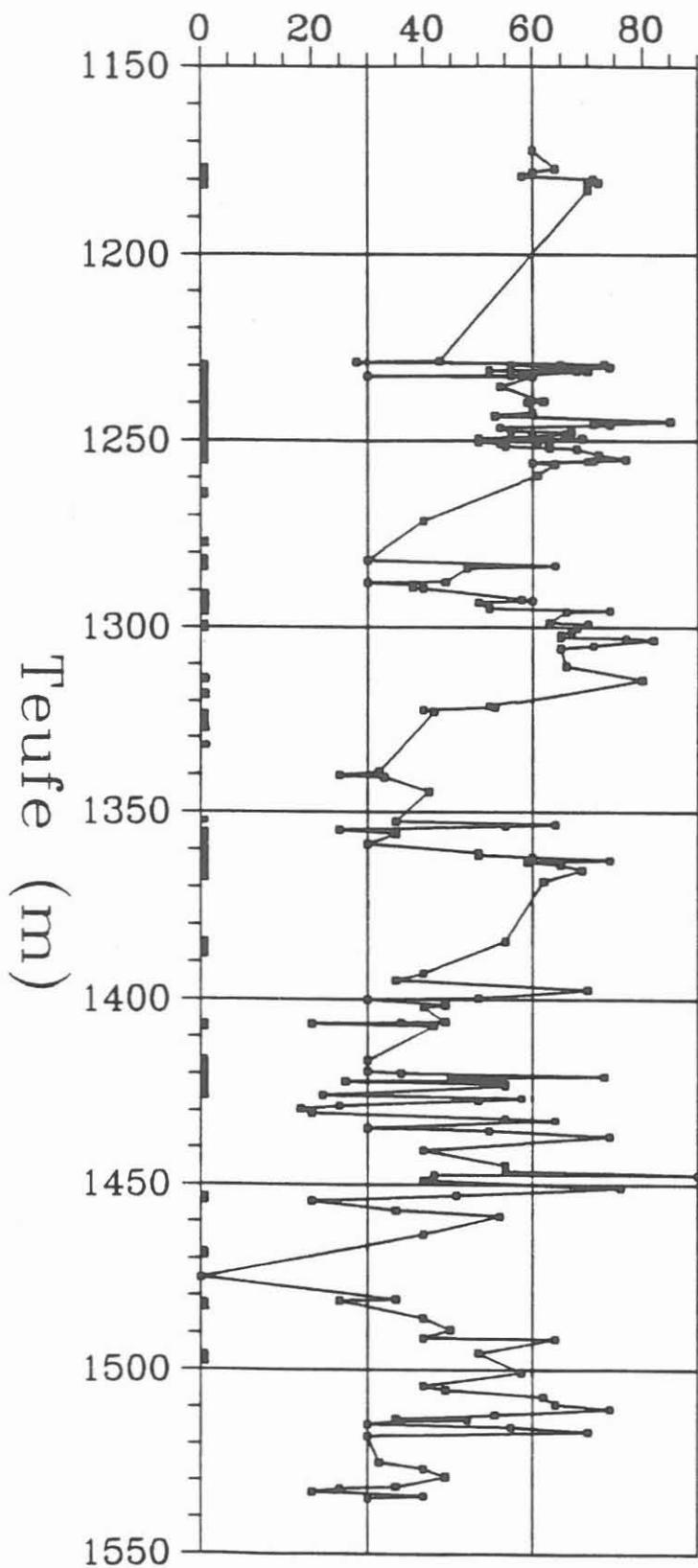


Abb. B.3.1: Fallwinkel der Foliation; dunkle Balken am linken Skalenrand markieren eine deutliche Ausprägung der Foliation.

der angrenzenden Amphibolite ab.

In dem Metagabbro, der ab 1252.6 m an ein solche leukokrate Hornblende-Biotit-Plagioklas-Gneis-Lage anschließt, ist eine ca. 30 cm mächtige Übergangszone aufgeschlossen, in der durch Plagioklasfasern eine deutliche Foliation abgebildet wird. Dieses Flasergefüge steht saiger und geht kontinuierlich in ein richtungslos-körniges, gabbroides Gefüge über. Innerhalb der Metagabbros treten reliktsch erhaltene Ophitgefüge auf.

Der rundliche Amphibolit-Einschluß, der als Boudin(?) im leukokraten Biotit-Plagioklas-Gneis schwimmt (315Flg; 1512.0 m), zeigt ein richtungslos-körniges Gefüge (s. Abb. B.2.19) Ebenso ist in den Amphiboliten am Kontakt zu den Gneiseinschaltungen keine Foliation entwickelt (s. Profil 1:200 im Anhang).

In mehreren Teufenabschnitten (so z.B. von 1287.6 m - 1292.6 m; 1334.0 m - 1338.0 m) wird in feldspatreichen Metabasiten durch mylonitisch-straftige Einregelung der Feldspataggregate eine Vorzugsorientierung abgebildet. Bei Betrachtung der entsprechenden Bohrkernfächer fällt auf, daß diese straffe Einregelung nicht rundum zu beobachten ist, sondern nur in jeweils zwei geeigneten Blickrichtungen, während dazwischen durch den Anschnittseffekt des Kernzylinders entweder ein lagig-flaseriges oder richtungslos-körniges Gefüge vorge-täuscht wird. Es handelt sich demnach bei diesem Gefüge um einen Lagenbau mit Streckungsgefüge, bzw. um ein reines Streckungsgefüge, das nur dort sichtbar wird, wo das Linear tangential zur Rundung des Bohrkerns liegt. Es gibt keine Hinweise dafür, daß diese Streckung das Produkt einer jüngereren mylonitischen Überprägung des gneisigen Lagenbaues ist. Offensichtlich war die Vergneisung abschnittsweise mit einer starken Streckung verbunden.

Die beschriebenen Verbandsverhältnisse deuten auf Folgendes hin:

- Die Platznahme der Amphibolite bzw. Metagabbros erfolgte vor der Vergneisung der ZEV-Gesteine. Das primäre Gefüge der Metabasite ist das richtungslos-körnige bzw. gabbroide Gefüge.
- Im Verlauf der Deformation, die zur Vergneisung der ZEV führte, wurde auch in den Amphiboliten/Metagabbros, begünstigt durch hohe Plagioklasgehalte, die weitverbreitete Foliation angelegt. Das Deformationsregime ist durch duktile Verformung mit einer Streckungskomponente gekennzeichnet.

### B.3.2.2 Kataklastose

Ein duktiles Deformationsregime wird in den Metabasiten durch die weitverbreitete Foliation repräsentiert. Kataklastische Scherbahnen, soweit erkennbar, aufschiebenden Charakters, durchschlagen diskordant die Foliation und belegen ein jüngeres, kataklastisches Deformationsstadium.

Auf Grund ihrer Ausbildung lassen sich drei Scherzonentypen unterscheiden:

- a) Geringmächtige (bis zu 0.5 cm mächtige) Scherbahnen unterschiedlicher Raumlage, die auf der gesamten Kernstrecke beobachtet werden. Die in diesen Bahnen auftretenden Kataklastite sind feinkörnig-dicht.

Im Teufenbereich zwischen 1498.5 und 1503.5 m wird ein migmatischer, mittelkörniger Amphibolit von einer engständigen kataklastischen Scherflächenschar durchschlagen, die mit  $50^{\circ}$ - $70^{\circ}$  einfällt. Diese Scherbahnen versetzen cm-mächtige Quarz-Feldspatgänge und sind ebenfalls mit Quarz-Feldspat mineralisiert. Die versetzten Gänge belegen in allen Fällen aufschiebende Bewegungen auf den Scherbahnen.

- b) Asymmetrisch ausgebildete Scherzonen, die an dem einen Scherzonenrand kontinuierlich in undeformiertes Gestein übergehen, am anderen Rand dagegen scharf abgegrenzt sind. Sie treten relativ häufig auf und erreichen bis zu 40 cm Mächtigkeit (Abb. B.3.2).
- c) Kataklastite, die scharfe Grenzen zum Nebengestein aufweisen, bilden den am seltensten ausgeprägten Typ. Sie erreichen bis zu 60 cm Mächtigkeit.

Im Kernstück 280B2f (1334 m) tritt ein etwa 20 cm mächtiger, feinkörniger, dunkelgrauer und völlig verfestigter Kataklastit auf. Die Grenzflächen fallen flach ein ( $20^{\circ}$  -  $40^{\circ}$ ). Der Kataklastithorizont zeigt ein Interngefüge aus chloritreichen Bahnen, die horizontal eine feinkörnig-dichte Grundmasse mit unterschiedlich großen Feldspatklüften durchziehen. Dieser Kataklastit schaltet sich zwischen einem Ultramafitit (melanokrater Amphibolit) und einem Metabasit (Abb. B.3.3).

Zwischen 1351.2 und 1352.0 m werden die Metabasite von einem völlig verfestigten Breccien-Horizont durchschlagen, dessen untere aufgeschlossene Grenzfläche mit  $60^{\circ}$  einfällt. Die Bruchstücke sind bis zu 4 cm groß und bestehen überwiegend aus feinkörnigen Metabasiten, in der Fraktion bis zu 1 cm Größe auch aus Milchquarzen.

Die Kontakte von Meta-Ultramafititen zu umgebenden Metabasiten sind zum Teil nicht tektonischer Natur (1400.6 m - 1401.6 m /

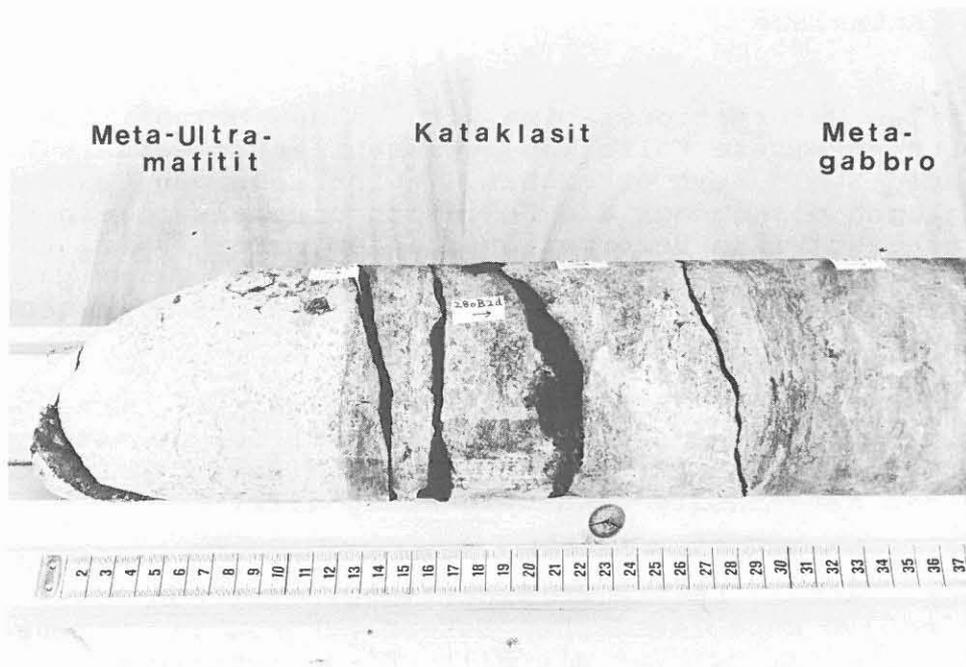


Abb. B.3.2: Kataklastisch ausgebildete Grenze zwischen Meta-Ultramafitit und Metagabbro.  
(Kernstück 280B2a-f, 1333.7 m).

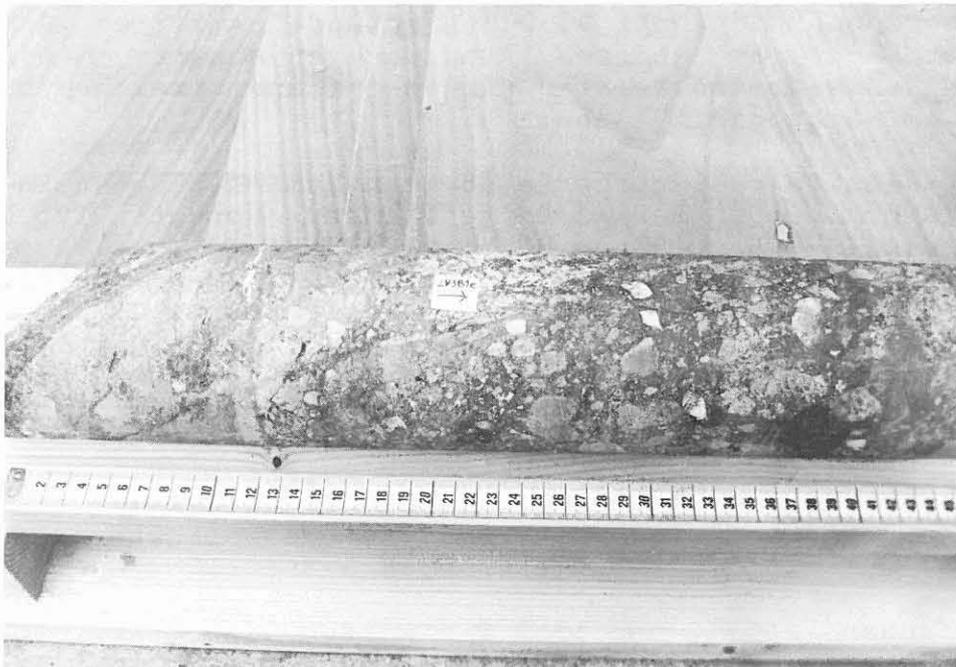


Abb. B.3.3: Verfestigte Störungsbreccie mit Nebengesteinsfragmenten  
(Kernstück 283B1e, 1351.4 m).

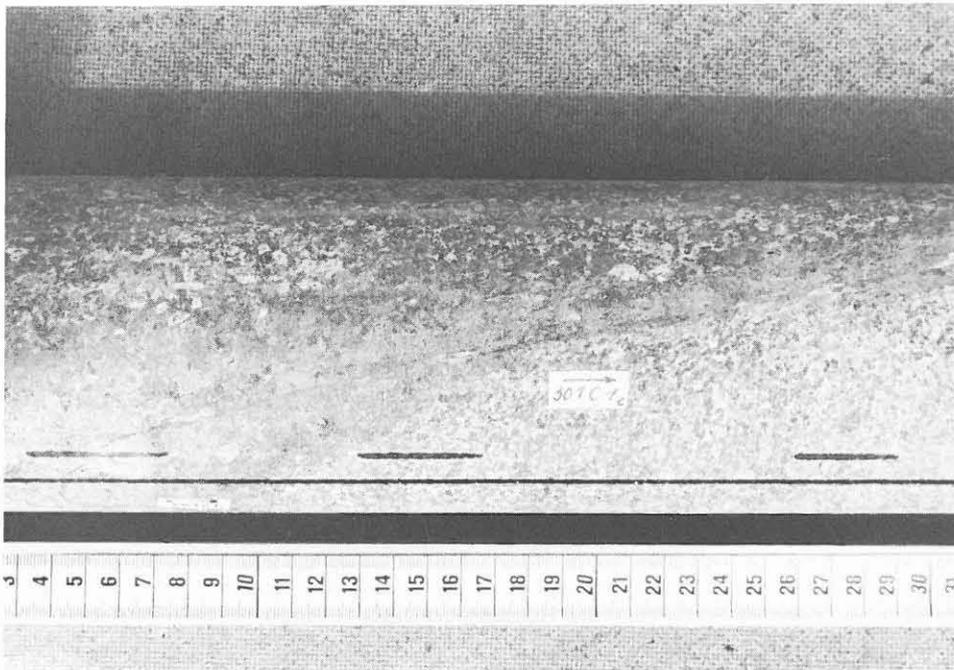


Abb. B.3.4: Kataklastisch überprägter Intrusivkontakt.  
(Kernstück 301C1c, 1452.47 m).

Meta-Ultramafitit im Metagabbro; 1451.8 m - 1452.7 m sowie 1455.7 m - 1456.2 m / Meta-Ultramafitit im Amphibolit). Unregelmäßige Grenzen und leukosomreiche Säume der angrenzenden Amphibolite weisen auf Intrusivkontakte, bzw. auf die Kumulatsnatur der Meta-Ultramafitite hin (Abb. B.3.4).

Häufig bilden jedoch die mächtige, verfestigte Kataklastithorizonte den Übergangsbereich zwischen Amphiboliten und Ultramafititen. In 1453 m Tiefe (301C1c; Meta-Ultramafitit/Metabasit) wird ein Intrusivkontakt streckenweise von einer mm mächtigen Scherzone kataklastisch überprägt. Die Scherzone bildet bereichsweise die Kontaktfläche, um dann voll im Ultramafitit weiterzulaufen. Die Scherzone ist somit offensichtlich jünger und überprägt einen primären Intrusivkontakt.

In 1385.0 m Tiefe (289A2a, Talk-Hornblendit/Amphibolit) ist der Kataklastitkontakt zu den Amphiboliten scharf abgegrenzt, während zum Ultramafitit hin ein kontinuierlicher Übergang in undeformiertes Gestein zu beobachten ist.

Das Vorherrschen bruchhafter Verformung in den Metabasiten hat ihre Ursache mit Sicherheit im Mineralbestand der Gesteine mit einem relativ geringen Anteil duktil deformierbaren Quarzes und dem daraus resultierenden, rigiden mechanischen Verhalten. VERNON & FLOOD (1988) konnten nachweisen, daß die duktile Deformation von basischen Magmatiten an einen kritischen Schwellenwert des Quarzgehaltes gebunden ist. Bei geringeren Gehalten reagiert das Gestein auf die gleiche Beanspruchung durch kataklastisches Zerknüllen. Für einen, z.Z. nicht bestimmbareren Anteil, der Kataklastitgefüge ist deswegen eine zeitgleiche Entstehung mit der Mylonitisierung der Paragneise möglich.

### B.3.3. Mikrogefüge

In Cuttings der Teufe 1025 m zeigt der erbohrte Sillimanit-Biotit-Gneis ein granoblastisches Korngefüge mit interlobaten bis verzahnten Korngrenzen. Das Interngefüge der Quarzkristalle ist durch Deformationsbänderung gekennzeichnet, die in einzelnen Cuttings eine einheitliche Orientierung aufweisen.

In einer Dünnschliff-Cuttingsprobe (1060 m) tritt ein sogenanntes "crack and seal"-Gefüge auf (s. Abb. B.2.5). Solche Strukturen werden von de WALL (1987) und HEIDELBACH et al. (1988) aus Diaphthoriten der Zone von Tirschenreuth-Mähring, bzw. aus der Bohrung Püllersreuth (ZEV) beschrieben. "Crack and seal"-Gefüge werden als Ergebnis einer hydraulischen Bruchbildung längs präexistierender metamorpher s-Flächen und nachfolgender Verheilung durch Quarzausfällung ("Segregationsquarz") aufgefaßt (WEBER & VOLLBRECHT 1986). Möglicherweise ist dieser Prozess auch für die Bildung der Plat-

tenquarze in duktilen Hochtemperaturmyloniten verantwortlich. Gneise mit einem hohen Anteil an Segregationsquarz treten außerhalb der Berichtsstrecke zwischen 1714 und 1721 m auf.

In Gneisen mit stärkerer Parallelorientierung der Biotite und Hellglimmer zeigt sich eine Tendenz zur duktilen Kornverkleinerung des Quarzes. Die Quarz/Quarz-Korngrenzen sind stark verzahnt bis serrat-lobat, was auf straininduzierte Korngrenzenmigration als Deformationsmechanismus (syntektonische Deformation) hinweist. Die eingeregelter Hellglimmer zeigen undulöse Auslöschung und randliche kataklastische Zerfransung.

In Cuttings der Teufe 1034 und 1047 m weist kataklastisch deformierter Gneis eine bruchhafte Kornverkleinerung und Bleichung sowie Zerfransung der Biotite auf. Pflasterartiges, stabiles Rekristallisationsgefüge des Quarzes wird ebenfalls beobachtet.

Die unregelmäßige Sprossung von Muskovit sowie dessen Verwachsung mit Sillimanit in den erbohrten Gneisen wird stets als Hinweis auf dessen sekundäre, postkinematische Natur gedeutet. In einem Cuttings-Dünnschliff der Teufe 1047m (CUT1047mII) ist dagegen eine straffe Einregelung von langscheitigen Muskoviten zu beobachten, die ein offenes Glimmer-Teilgefüge andeuten. Eine Verwachsung der Kristalle mit einer  $Al_2SiO_5$  Phase tritt nicht auf. Diese Cuttings-Probe ist zwar nicht repräsentativ, das Gefüge deutet aber daraufhin, daß zumindest ein Teil der Hellglimmer als primäre, synkinematisch gesproßte Mineralphase vorliegt.

Kataklastische Deformation eines Quarz-Feldspat-Ganges im Amphibolit (1232.0 m; 256A1RI,II) führt zum Zerbrechen der mittelkörnigen Plagioklase, Verbiegung der Zwillingslamellen und zu diskontinuierlicher undulöser Auslöschung. Der Quarz zeigt schachbrettartige, undulöse Auslöschung, die von kontinuierlicher Auslöschung überlagert wird. Vereinzelt sind auch Deformationslamellen ausgebildet. Geöffnete Trennflächen durchziehen den gesamten Kornverband, sind bis zu 0.1 mm breit und sind mit feinkörnigem Quarz verheilt, der keine Anzeichen einer Verformung aufweist. Eine Vorzugsorientierung dieser ruptuellen Gefüge ist nicht erkennbar. Es treten unterschiedliche Generationen auf, jüngere Trennflächen versetzen ältere. Das Gefüge dieses deformierten Ganges deutet auf eine Beanspruchung im Grenzbereich duktil/bruchhaft (bezogen auf das Quarzteilgefüge) hin.

#### B.3.4 Interpretation

Ein straff eingeregelter, offener Hellglimmer-Teilgefüge deutet darauf hin, daß zumindest ein geringer Teil des Muskovites eine (primäre) synkinematisch gesproßte Mineralphase

darstellt.

In der durch Cuttings belegten Strecke ist die Existenz zweier Scherzonen nachweisbar. Kataklastisches Mikrogefüge der Cuttings, erhöhte Graphitanteile im Bohrklein und stärkste Auskesselungen innerhalb der Berichtsstrecke belegen ein bruchhaftes Deformationsregime in diesen Scherzonen.

Duktile Deformation ist in Cutting-Proben nur durch Dünnschliffe nachweisbar. Im Gegensatz zu kataklastischer Deformation ist duktile Deformation durch Kornverkleinerung infolge dynamischer Rekristallisation gekennzeichnet, in Hochtemperaturmyloniten durch das Auftreten von Plattenquarzen in einer granoblastischen Quarz-Feldspatmatrix. Solche Rekristallisationsgefüge treten bevorzugt im Quarz auf und können durch polarisationsoptische Methoden im Dünnschliff nachgewiesen werden. Mylonitisch-straftige Einregelung von Glimmern ist makroskopisch in Cuttings nicht leicht erkennbar und kann durch hohe Biotitgehalte von metapelitischem Bohrklein vorgetäuscht werden. Dünnschliffe auch von Cuttingsproben erlauben dagegen die Ausgliederung von duktilen Scherzonen in Bohrstrecken ohne Bohrkerngewinn. Diese Art der Probenpräparation sollte deswegen während der Hauptbohrung für die Gefügeanalyse verstärkt genutzt werden. In der vorliegenden Berichtsstrecke ist die Existenz duktiler Scherzonen auch für die Cuttingsstrecke wahrscheinlich, am bisher analysierten Probenmaterial jedoch nicht mit Sicherheit nachzuweisen. In der gekernten Strecke werden mylonitische Paragneise ab 930 m Teufe beobachtet.

Die Tatsache, daß in der mächtigen Metabasit-Ultramafitit-Serie kataklastische Deformationsgefüge auftreten, darf nicht zu dem Schluß verleiten, daß alle Kataklastestrukturen gleichalt mit entsprechenden Gefügen der Paragneise sind. Die Ausbildung kataklastischer Deformationsgefüge in den Metabasiten kann im, mineralogisch bedingten, rigiden rheologischen Verhalten der Gesteine liegen. Zu gleicher Zeit könnten die Gneise auf Grund ihres relativ hohen Anteils an duktil verformbaren Quarz auf die gleiche Beanspruchung plastisch reagiert haben. Detailuntersuchungen am Kernmaterial sollten eine Korrelation der entsprechenden Gefüge ermöglichen.

Die Frage nach dem Platznahmemechanismus der ultramafischen Einschaltungen kann nicht eindeutig geklärt werden. So sind zwar lithologische Grenzen zwischen Metabasiten und ultramafischen Einschaltungen an kataklastische Störungen gebunden oder treten in deren Nachbarschaft auf, dies gilt jedoch nicht für alle Gesteinswechsel. Für die Meta-Ultramafitite ist deswegen eine authochthone oder parauthochthone Stellung wahrscheinlich. Das Auftreten dieser Gesteine innerhalb der orthogenen Metabasitserie kann als Kumulatbildung in einem basischen Magma erklärt werden.

Die Anlage kataklastischer Scherzonen zwischen den lithologischen Einheiten kann durch nachfolgende tektonische Bewegun-

gen mit bruchhafter Deformation erklärt werden. Unterschiedliches rheologisches Verhalten der Gesteinseinheiten begünstigte dabei die Anlage tektonischer Grenzflächen. Eine tektonische Einschüpfung, die die unterschiedlichen lithologischen Einheiten erst in Kontakt zueinander brachte, ist aus den vorliegenden Verbandsverhältnissen für die Meta-Ultramafitite nicht ableitbar.

## **B.4 Anmerkungen zum Lithoprofil**

### **B.4.1 Arbeitsmethodik**

Die Anwendung von zwei unterschiedlichen Bohrverfahren (Meisselbohrung und Kernbohrung) gliedert den Teufenbereich von 992.0 bis 1529.4 m in zwei arbeitstechnisch verschiedene Abschnitte.

Von den auf der Richtbohrstrecke (992.0 - 1228.8 m) anfallenden Cuttings-Proben, welche immer Mischproben darstellen, wurden durch Separieren von Hand unter dem Binokular einheitliche, "reine" Gesteinsseparate hergestellt. Von diesen "Präparaten" wurden Dünnschliffe angefertigt, da unter dem Mikroskop eine wesentlich sicherere Gesteinsansprache gegenüber der bloßen Cuttings-Begutachtung unter dem Binokular möglich ist. Für Bestimmungs- und Vergleichszwecke wurde jeweils mehr als die Hälfte der Separatmenge unverarbeitet als Referenzprobe aufbewahrt. Im Hinblick auf die KTB-Hauptbohrung, die zum größten Teil nicht gekernt werden soll, erscheint die Anlage einer solchen Dünnschliff- und Referenzproben-Sammlung von Cuttings aller vorkommenden Gesteinstypen erstrebenswert.

Die Grundlage für die Erstellung des Lithologs bildet die Dünnschliff-Untersuchung, sowohl von Cuttings- als auch von Bohrkernproben (Teufenbereich 1228.8 - 1529.4 m). Sie wird ergänzt durch die makroskopischen Beobachtungen am Bohrkern sowie die petrophysikalischen Messungen und geochemischen Analysen an Bohrkern- und Cuttings-Material. Insgesamt erweisen sich bei hoher Probandichte die Ergebnisse der Geophysik-Arbeitsgruppe im Feldlabor (Dichte, Suszeptibilität, Schallgeschwindigkeit, natürliche remanente Magnetisierung etc.) als sehr hilfreich zur Festlegung von Gesteinsgrenzen. Ein zusätzliches Hilfsmittel stellt die Auswertung der verschiedenen Bohrlochmessungen (Logs) dar (aufgeführt in KTB-Report 88-1). Für den vorliegenden Berichtsabschnitt stand erstmals ein Natural Gamma Ray Spectroscopy Log (NGS) zur Verfügung, das Aufschluß über Verteilung und Gehalt von K, U und Th im Bohrprofil gibt.

### **B.4.2 Korrelation von Logs mit Gesteinstypen und Mineralbeständen**

Die relativ einheitliche und monotone Paragneisserie (Granat-Sillimanit-führender Biotit-Gneis von ca. 842 bis 1160 m) wird nur von vereinzelt und geringmächtigen Einschüben von Lamprophyr (1070 m, 1077 m) und Gangquarz (1081 m, 1115 m) unterbrochen. Im Summen Gamma Ray Log (SGR; s. Profildarstellung 1 : 200 im Anhang) variieren die Paragneise hauptsächlich zwischen Werten von 75 und 120 API-Einheiten. Die häufigen Zwischenminima im SGR sind auf tektonische Störungen und auf quarzreiche Lagen des Gneises und nicht auf Quarzgänge

zurückzuführen. Diese Schlußfolgerung liegt nahe, da die RDA-Analyse der Gneise durchwegs hohe Modalgehalte von 30 bis 50 % Quarz ergibt bei in etwa ähnlichen K- und Th-Gehalten. Demgegenüber nehmen in den beiden Quarzgängen alle drei radioaktiven Elemente K, Th und U deutlich ab (Verdünnungseffekt). Die Zwischenmaxima im SGR der Paragneise wiederum korrelieren gut mit erhöhten Biotit- und Hellglimmer-Gehalten (s. RDA-Log im Abschnitt C.), d. h. erhöhten K- und Th-, z.T. auch U-Gehalten.

Bei 1160.5 m erfolgt ein sehr markanter Wechsel von der hangenden Paragneisserie zur liegenden Metabasitserie. Die Grenze tritt in fast allen Logs deutlich in Erscheinung. Der Granat-Amphibolit weist im Normalfall niedrige SGR-Werte zwischen 15 und 30 API-Einheiten auf, wie z. B. zwischen 1160.5 m und 1170 m. Im Liegenden jedoch sind immer wieder Peaks im SGR auffällig, die bis zu 100 API erreichen können. Die Dünnschliff-Untersuchungen der Cuttings-Separate wie auch die RDA-Analysen zeigen, daß es sich hierbei um biotitreichere Lagen im Granat-Amphibolit handelt. Jedoch wird aus dem Gamma Spektroskopie-Log (NGS) ersichtlich, daß nicht so sehr die K-Konzentrationen als vielmehr stark erhöhte Th- und U-Gehalte die Ausbildung der SGR-Peaks bewirken. Dadurch wird es wahrscheinlich, daß die Schwerminerale Monazit und Zirkon, die bevorzugt im Biotit konzentriert sind, Träger dieser radioaktiven Elemente sind. In Übereinstimmung damit wurden im Cuttings-Dünnschliff von 1216 m große Zirkone bis zu 310 µm Kantenlänge gefunden (bei 1217 m wurde keine Probe vom Schüttelsieb genommen). Besonders deutliche SGR-Peaks treten bei 1217 m, 1221 m und 1226 m auf, wobei Gehalte bis zu 17.5 ppm Th und 3 ppm U erreicht werden (bei 1217 m; nach NGS). Demgegenüber sind im Biotit-freien Amphibolit Gehalte von 1 - 2 ppm Th und 0 - 1 ppm U die Regel.

Die Metagabbros, wie auch die Granat-Amphibolite, sind durch niedrige Gamma-Ray-Werte von 15 bis ca. 30 API-Einheiten (SGR) charakterisiert. Kleinere Zwischenmaxima werden durch Quarz-Feldspat-Mobilisate verursacht.

Eine sehr deutliche Korrelation ergibt sich zwischen dem Auftreten der Meta-Ultramafitite und extrem hohen Werten von Suszeptibilität und natürlicher remanenter Magnetisierung dieser Gesteine. Im Gamma-Ray-Log sind diese Gesteine durch sehr niedrige Werte von ca. 8 - 15 API-Einheiten gekennzeichnet.

#### B.4.3 Störungen

Die im durchteuften Bereich auftretenden, tektonischen Störungen bewirken in ihrer Mehrzahl mehr oder weniger deutliche Minima im Total-Gamma-Ray-Log, die durch eine gleichzeitige Abnahme aller drei radioaktiven Elemente im Störungsbereich bei konstantem Th/K-Verhältnis verursacht sind (SCHLUMBERGER

1982). Vor allem die Abnahme des Kaliums ist dabei ein Maß für die mit den Störungen einhergehende Alteration der Gesteine, insbesondere die Chloritisierung des Biotits (vgl. dazu auch das Chlorit/Biotit-Verhältnis aus den RDA-Analysen, Abb. B.2.10). Diese Störungen sind meistens mit schwachen Auskesselungen des Bohrlochs verbunden (bei 1059 m, 1068 m, 1092 m und 1225 m).

Gelegentlich ist aber auch eine sehr deutlichen Zunahme der Gamma-Ray-Werte an Störungen zu beobachten (bei 1025 - 1029 m, 1033 - 1034 m und 1102 - 1104 m). Diese drei Störungzonen führen beträchtliche Gehalte an Graphit und Pyrit und zeigen die stärksten Bohrlochauskesselungen im Teufenbereich 992 bis 1530 m. Der sehr starke Anstieg der Gamma-Ray-Werte an diesen Störungen ist durch eine Zunahme an Uran bedingt, während gleichzeitig die Kalium und Thorium-Gehalte zurückgehen. Wir vermuten, daß  $U^{6+}$ -haltige Lösungen auf den permeablen Störungzonen migrieren und daß das Uran durch den Graphit zum schlecht löslichen  $U^{4+}$  reduziert wird und ausfällt.

## B.5 Literaturverzeichnis

- HACKER, W., KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C., UHLIG, S. & GRAUP, G. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992m: B. Geologie. - KTB Report, 88-2: B 1 - B 60.
- HEIDELBACH, F., VOLLBRECHT, A., WALL, H. de & WEBER, K. (1988): Lagenparallele Quarzmineralisation in Gneisen der Bohrung Püllersreuth. - In: 1. KTB Schwerpunkt Kolloquium Seeheim/Odenwald, Zusammenfassung der Beiträge, 28.-29. Januar 1988, Gießen.
- GREEN, D.H. & RINGWOOD, A.E. (1967): An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. - Geochim. Cosmochim. Acta, 31: 767 - 833.
- SCHLUMBERGER (1982): Well Evaluation Developments, Continental Europe. - Schlumberger Educational Services, 296 S., Houston.
- SCHÜSSLER, U. (1987): Petrographie, Geochemie und Metamorphosealter von Metabasiten im KTB-Zielgebiet Oberpfalz. - Diss. Würzburg.
- VERNON, R.H. & FLOOD, R.H. (1988): Contrasting deformation of S- and I-type granitoids in the Lachlan Fold Belt, Eastern Australia. - Tectonophysics, 147: 127 - 143.
- WALL, H. de (1987): Mikrostrukturelle Untersuchungen und strukturgeologische Kartierung der Gesteine aus dem Übergangsbereich Moldanubikum/Saxothuringikum W' Mähring, Oberpfalz. - Dipl.-Arb. (unveröff.), Univ. Göttingen.
- WEBER, K. & VOLLBRECHT, A. (1986): Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland. - 2. KTB Schwerpunkt Kolloquium Seeheim/Odenwald, 19.9. - 21. September 1986, Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz.

**B.6 Anhang**

1. Erläuterungen zum geologischen Profil
2. Geologisches Profil im Maßstab 1:200 (Abb. 6.1)
3. Übersichtsdiagramm der Klüftigkeitsziffer (Abb. 6.2)

## Erläuterungen zum geologischen Profil

Detaillierte Hinweise werden im Kapitel B.2 (Anmerkung zum Litholog) gegeben. Folgende Aufstellung dient zur schnellen Information:

Spalte	Erläuterung
CUTTINGS	Die erbohrten Cuttings werden vor Ort naß gesiebt, getrocknet und die Fraktionen volumetrisch ausgewogen. Dargestellt sind die prozentualen Anteile der Fraktionen. Der Graph zeigt: links: grobe Fraktion = größer als 1 mm mitte: feine Fraktion = 0.063 - 1 mm rechts: feinste Fraktion = kleiner als 0.063 mm
GAMMA-RAY	In der Kurve GAMMA-RAY ist die natürliche Gamma-Strahlung der durchbohrten Gesteine in API-Einheiten angegeben. Sie ist ein Maß für den Gehalt an Kalium, Uran und Thorium im Gestein, den einzigen natürlich vorkommenden radioaktiven Elementen.
KALIBER	Die Kurve KALIBER zeigt den Bohrlochdurchmesser an. Der Außendurchmesser der Bohrkronen beträgt 152 mm (6"). GAMMA-RAY und KALIBER sind Bohrlochmessungen.
LITHOLOGIE	Gesteinsname und seine graphische Darstellung
FOLIATION	Das Einfallen der Foliation in Grad ist als Zahl und zur Veranschaulichung als Graph angegeben. Richtungslos-körniges Gefüge ist durch Punktsignatur gekennzeichnet.
ALTERATION/ STÖRUNGEN	Nach der Cutting- und Dünnschliffanalyse wurde ein qualitativer Alterationsgrad nach folgendem Schema festgelegt:  1 = frisches Gestein 2 = schwach alteriertes Gestein 3 = deutlich alteriertes Gestein 4 = völlig alteriertes Gestein  Die Grenze unterschiedlich alterierter Gesteine ist durch einen waagerechten Strich markiert. Über und unter ihr ist der entsprechende Alterationsgrad angegeben. Störungen,

die am Kern beobachtet wurden, sind durch eine gerade Linie dargestellt.

**KERNMARSCH** Ein Kernmarsch ist ein maximal 6 m langer Bohrkern, der in einem Arbeitsgang abgebohrt und dann geborgen wird. Kommt weniger Kernmaterial zu Tage als abgebohrt wurde, wird der fehlende Teil als VERLUST bezeichnet. Die über Tage angekommene Kernstrecke heißt GEWINN. Der Kerngewinn wird schematisch nach oben an den Beginn des Kernmarsches geschoben.

**KLÜFTIGKEITS-ZIFFER** Für die Korrelation mit dem Bohrfortschritt, Auskesselungsbereichen oder sonstigen Bohrparametern wurden am Kern die Anzahl der Klüfte pro Meter (=Klüftigkeitsziffer) bestimmt. Gezählt wurden ebene Trennflächen, an denen der Kern bereits zerbrochen war oder an denen er in Kürze zerbrechen würde (latente Klüfte). Zur besseren Übersicht ist die Klüftigkeitsziffer in Abb. B.6.2 in komprimierter Form dargestellt.

**PROBEN** Hier sind die Beprobungspunkte des Feldlabors aufgelistet. Im Einzelnen bedeutet:

Zentrifuge RDA/RFA: An den markierten Stellen liegen Röntgen-Fluoreszenz-Analysen von Haupt- und Spurenelementen vor. Der modale Mineralbestand wurde durch quantitative Röntgen-Diffraktometer-Analysen ermittelt. Das Analysenmaterial ist eine Bohrmehlprobe. Sie wird durch zentrifugieren der Bohrspülung gewonnen.

Anschliffe: An diesen Stellen liegen polierte Anschliffe für die Erzmikroskopie vor. Teilweise wurden Kernstücke, teilweise Cuttings (Bohrklein) zur Schliffherstellung benutzt.

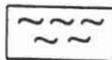
Kernstücke RDA/RFA: Wie Zentrifuge RDA/RFA nur wurden hier Kernstücke analysiert.

Dünnschliffe: An diesen Stellen liegen Gesteinsdünnschliffe für die Durchlicht-Polarisations-Mikroskopie vor. Sie wurden von Kernstücken hergestellt.

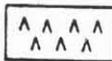
**Abkürzungen:** MTA-UMA = Meta-Ultramafitit  
GNT-AMP = Granat-Amphibolit  
QRZ-PLG-Mobilisat = Quarz-Plagioklas-Mobilisat

Abb. B.6.1 : Profildarstellung der geologischen Ergebnisse im Vergleich mit ausgewählten bohrtechnischen Daten und Bohrlochmessungen im Maßstab 1:200.

Signaturen:



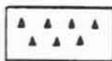
Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis



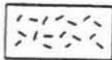
Granat-Amphibolit



Metagabbro



Meta-Ultramafitit



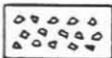
Lamprophyr



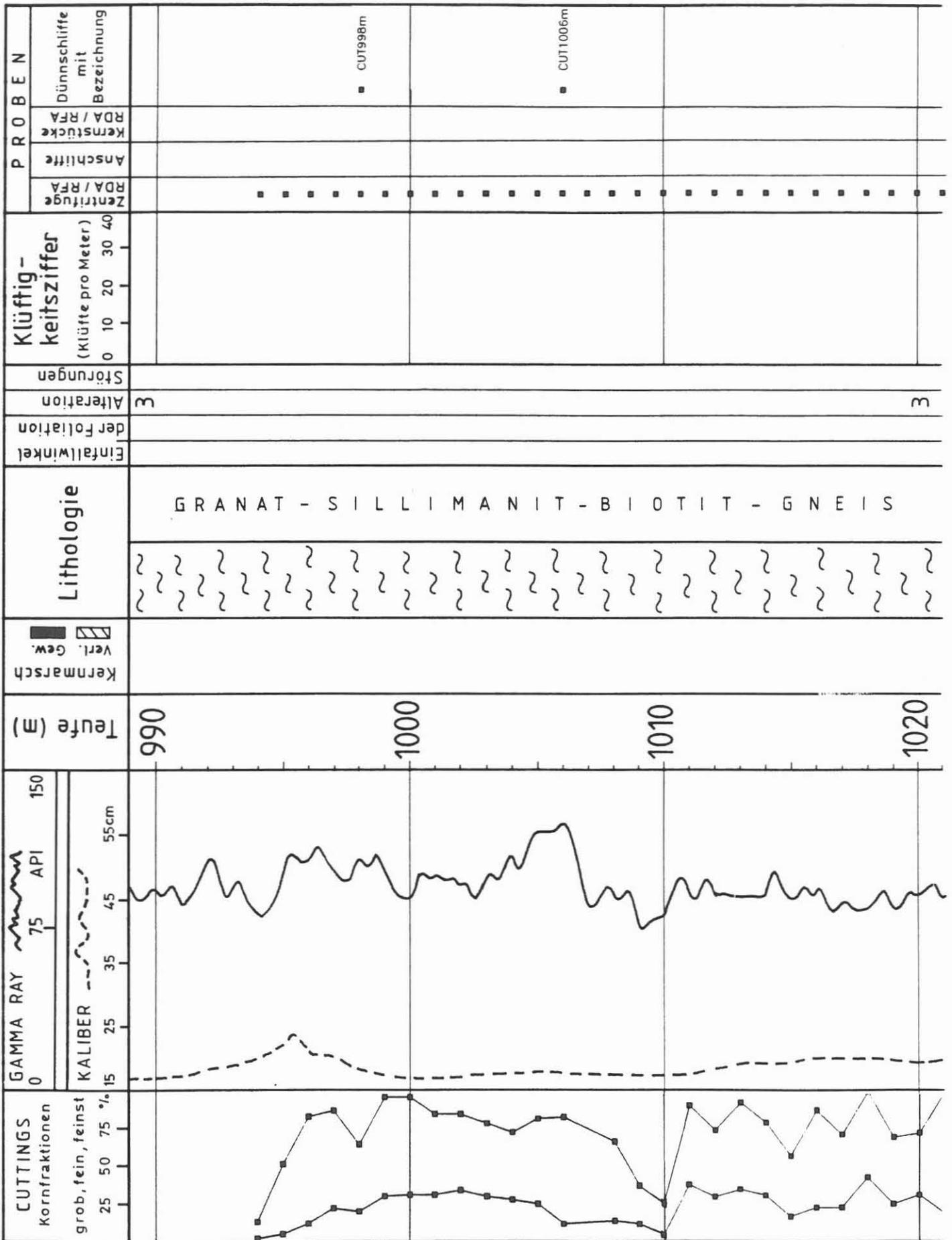
Quarzgang

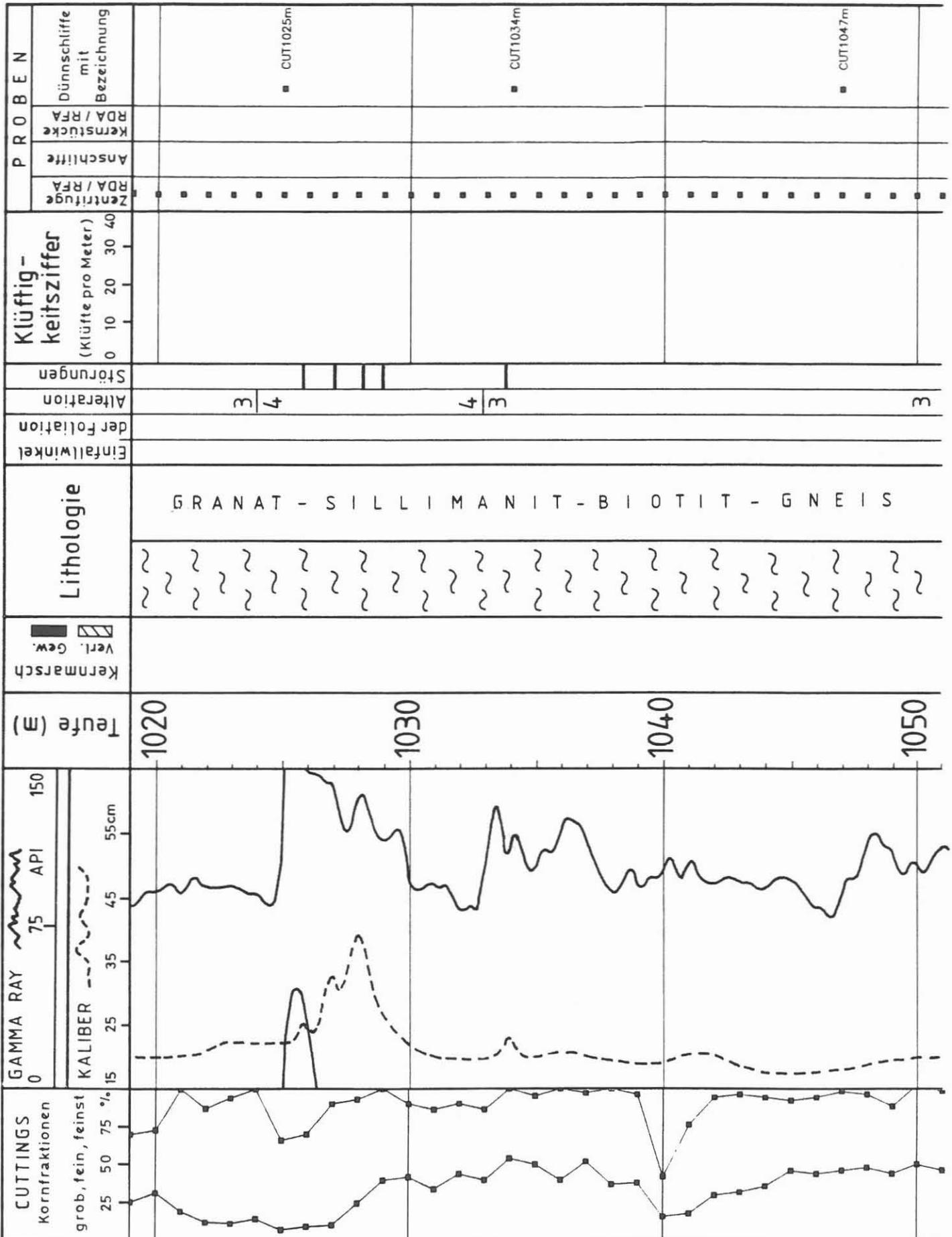


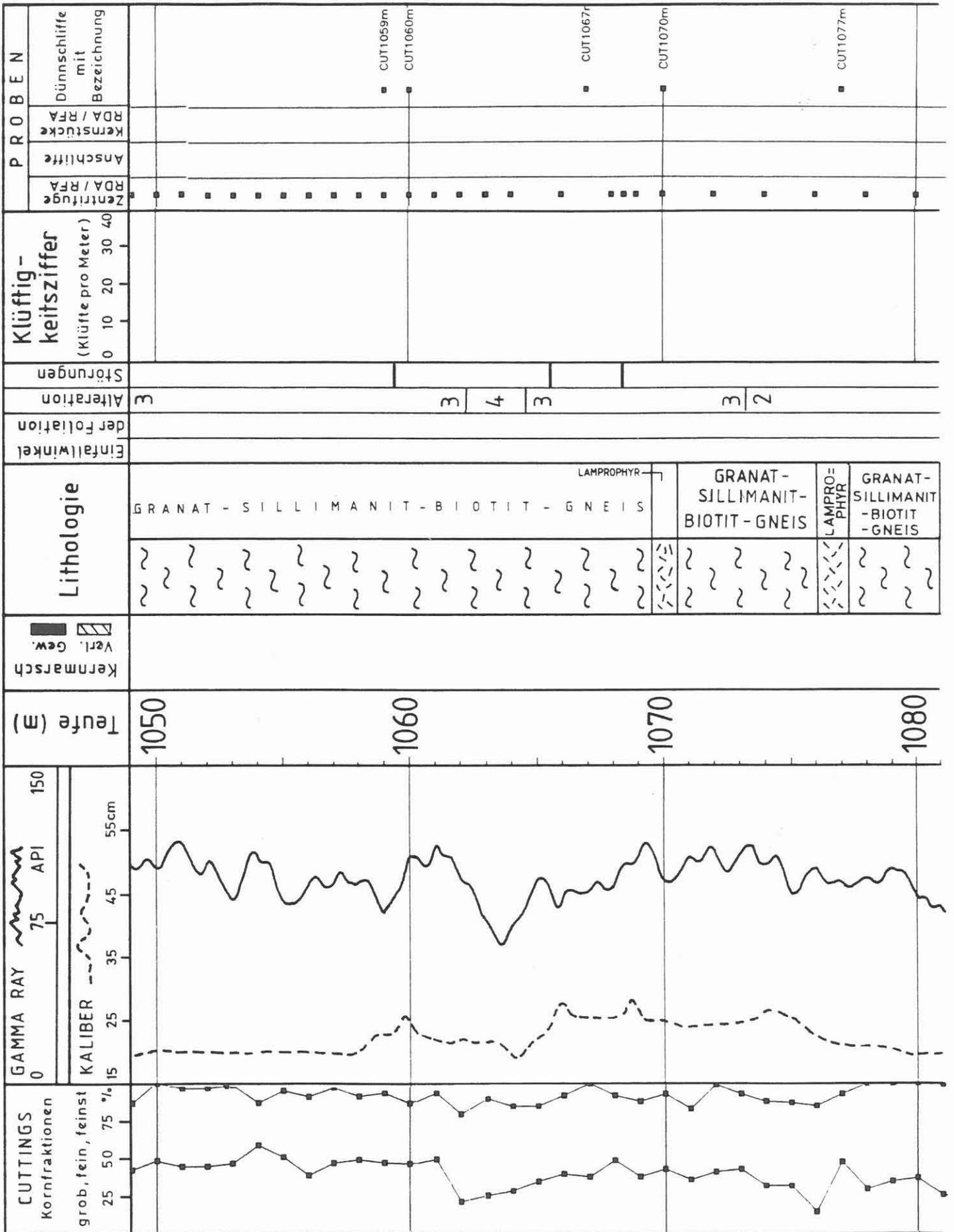
Quarz-Plagioklas-Mobilisat



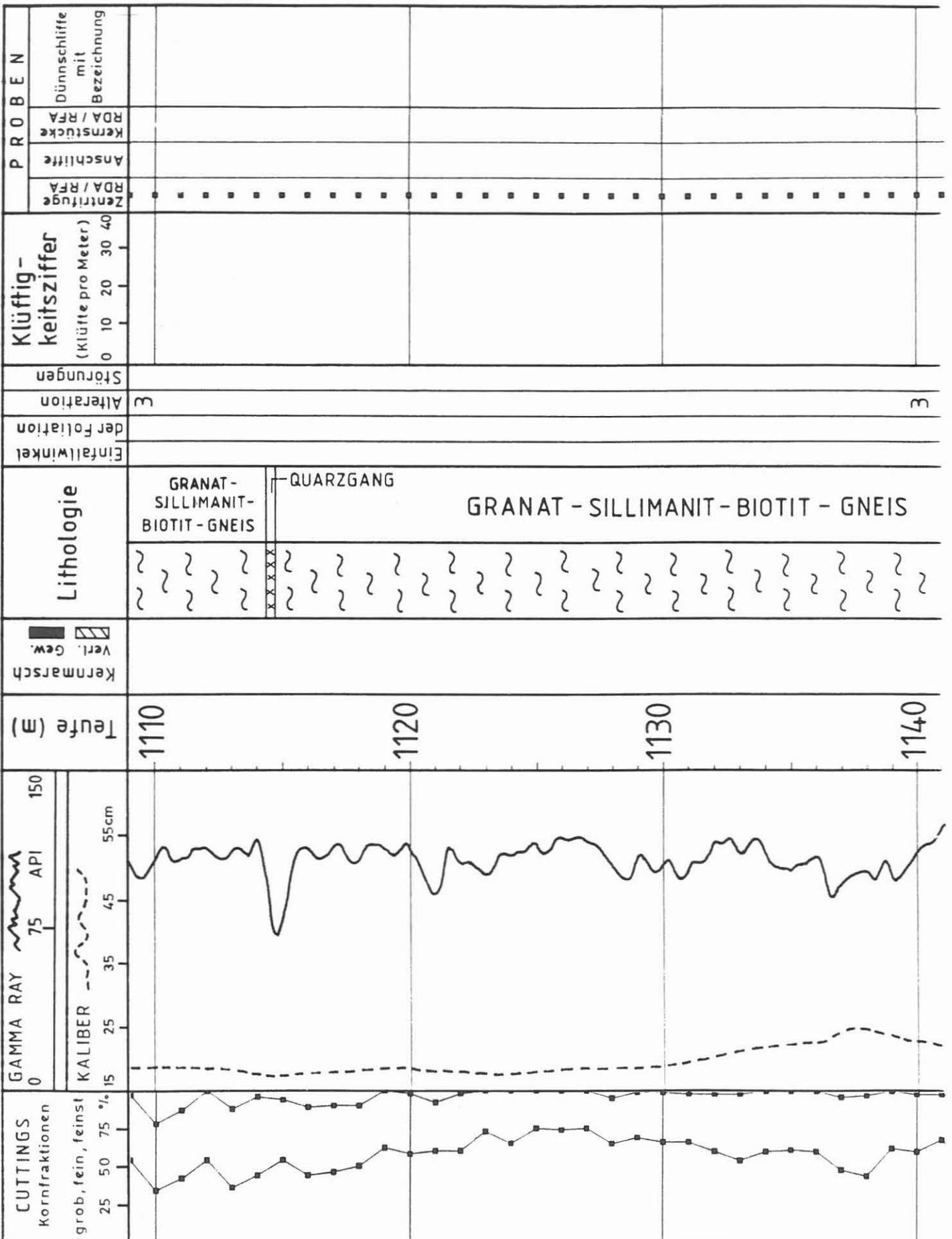
Störungsbreccie

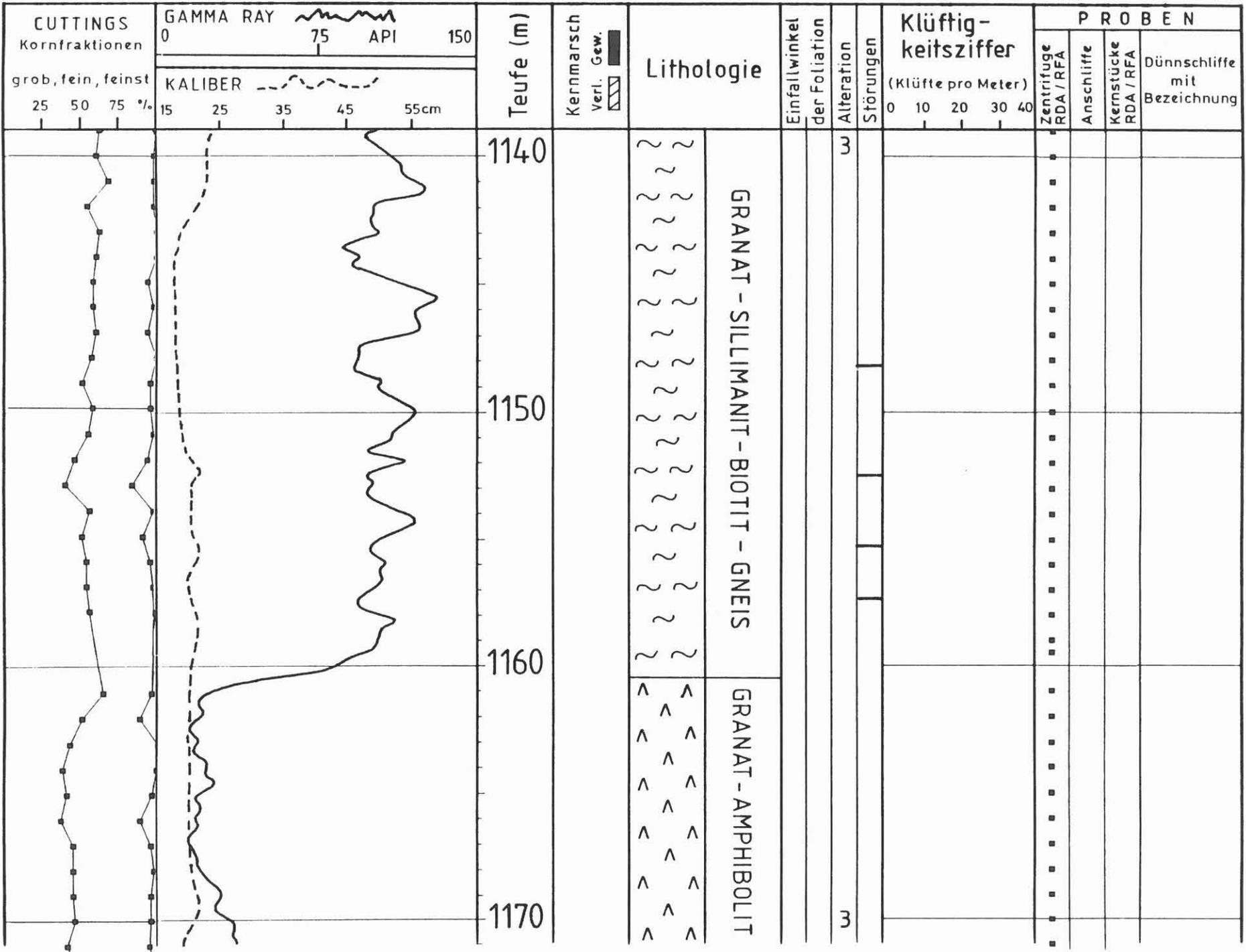


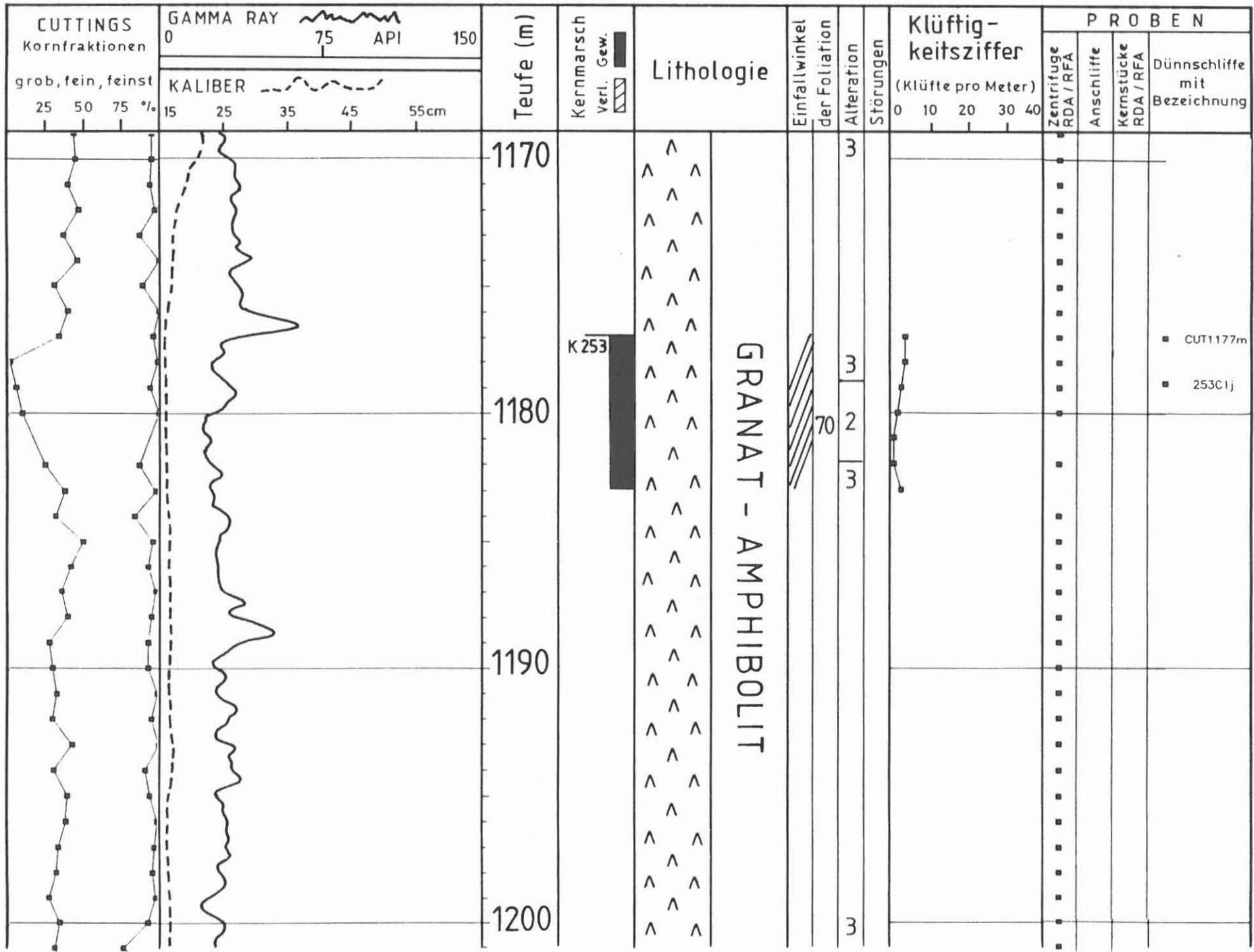


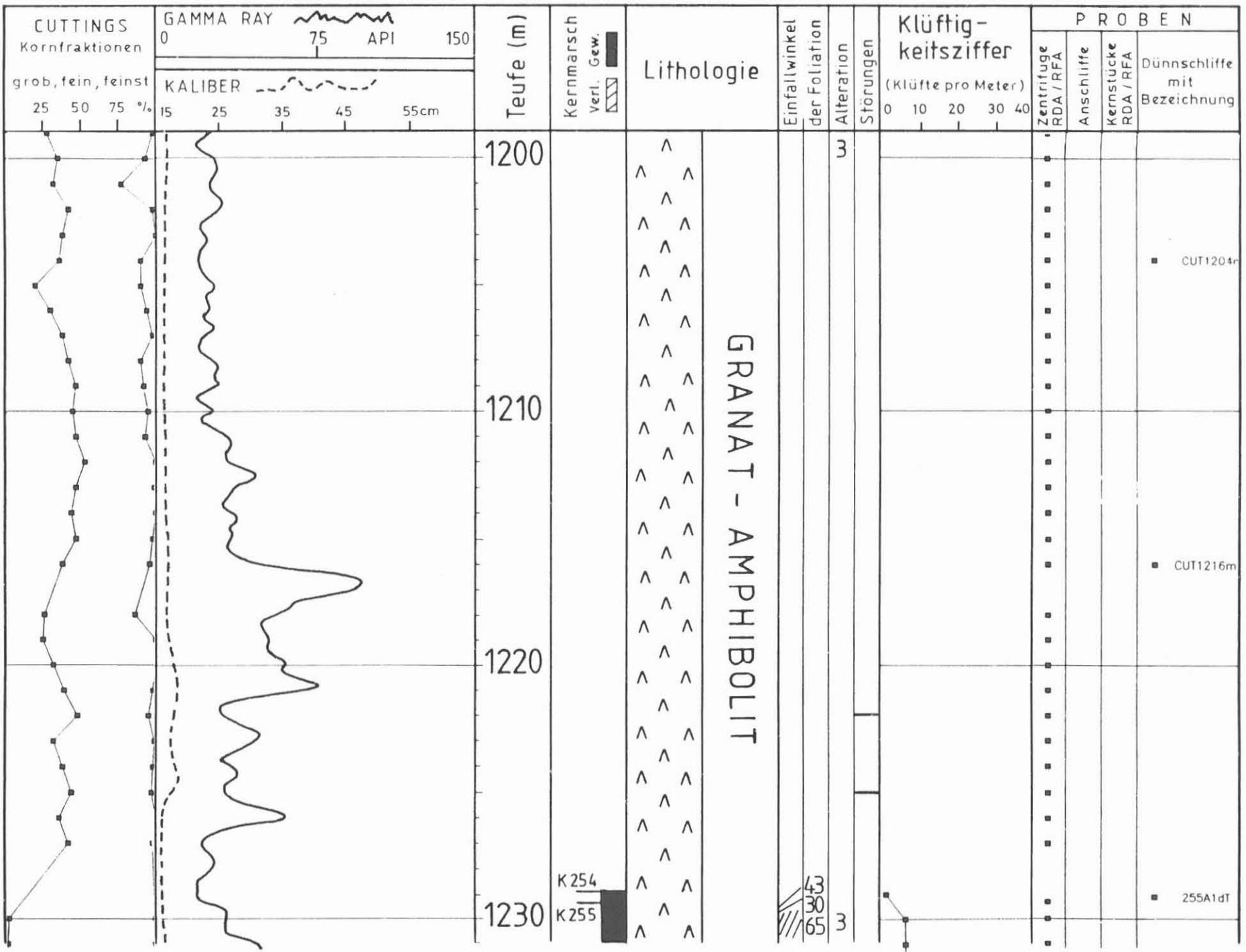


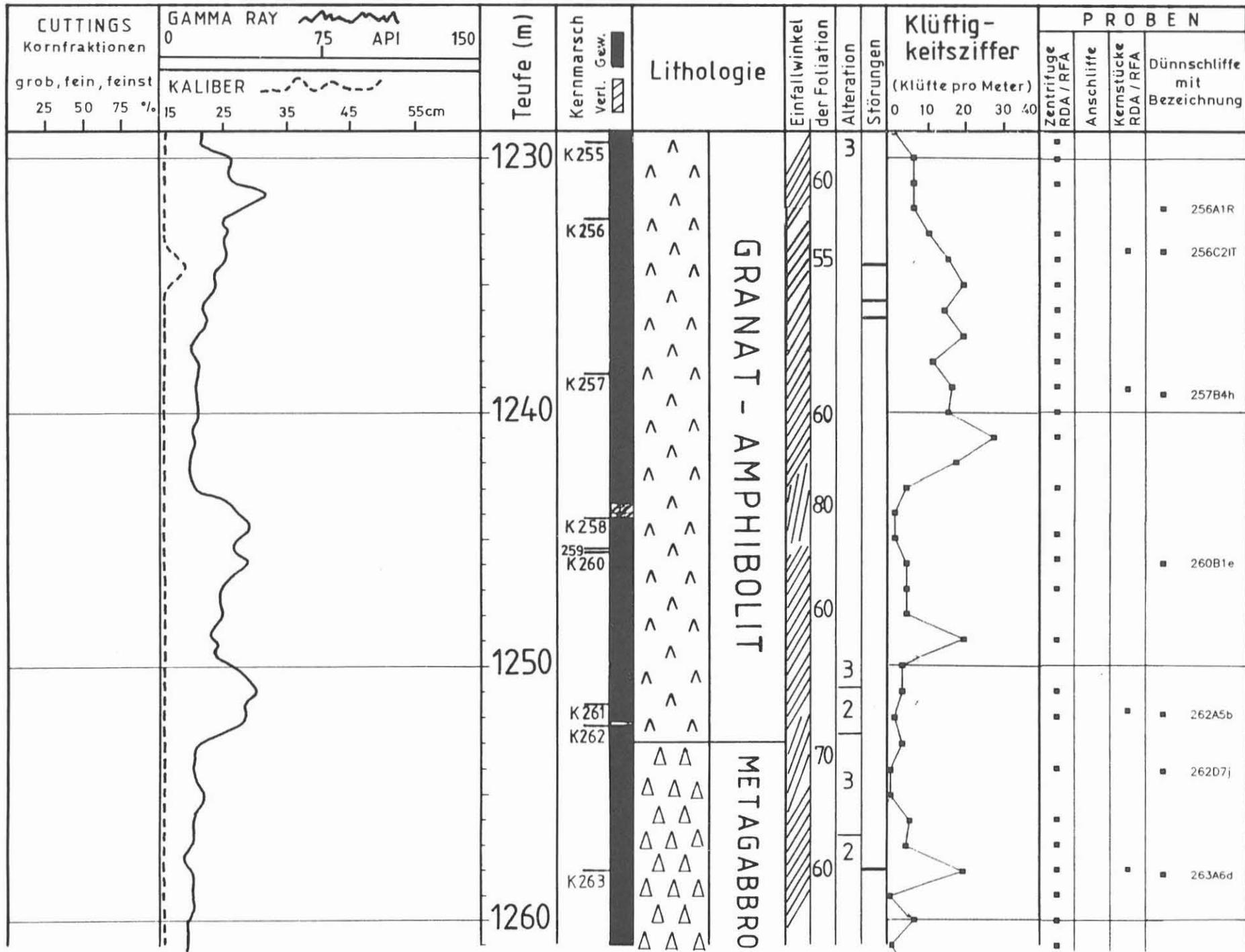


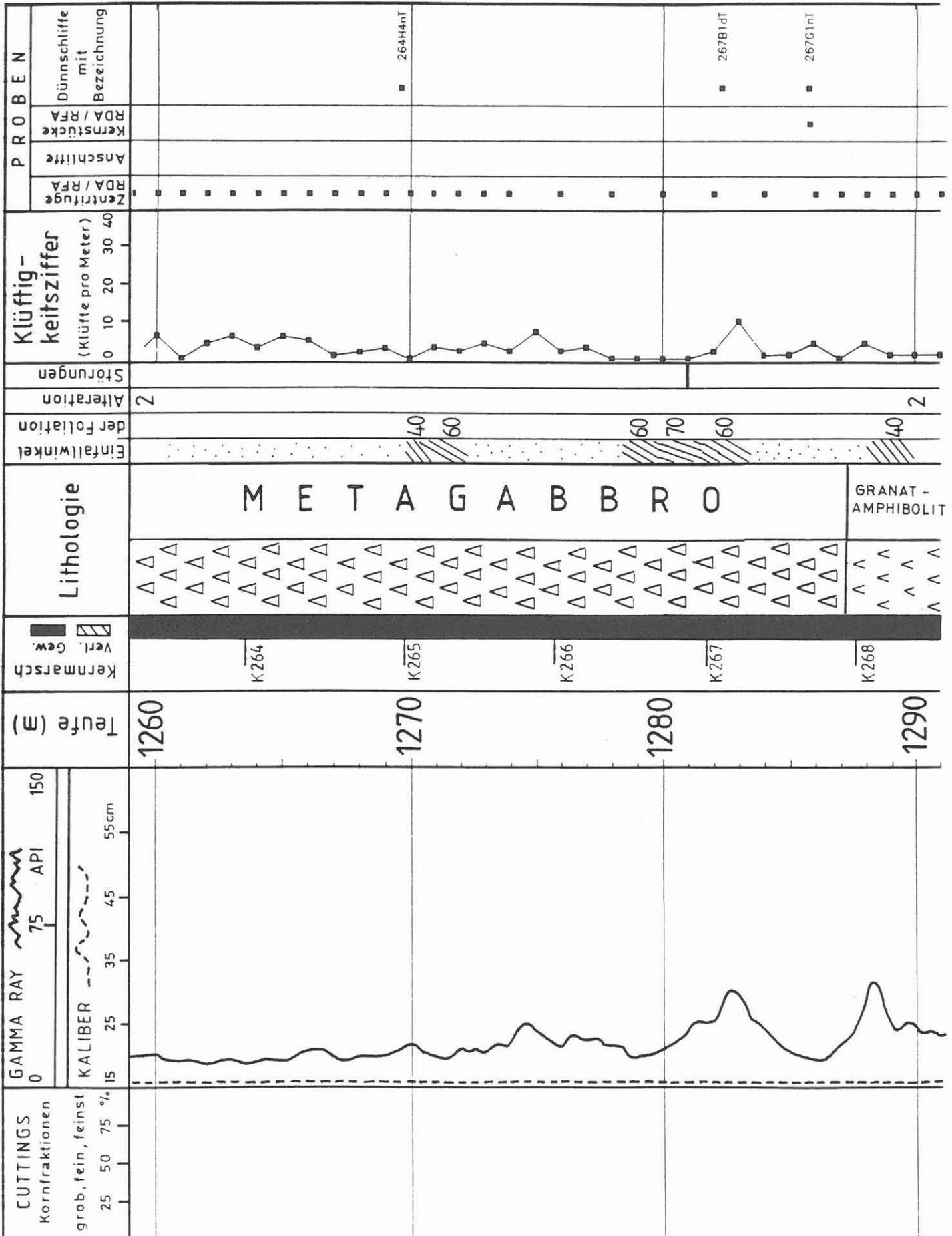




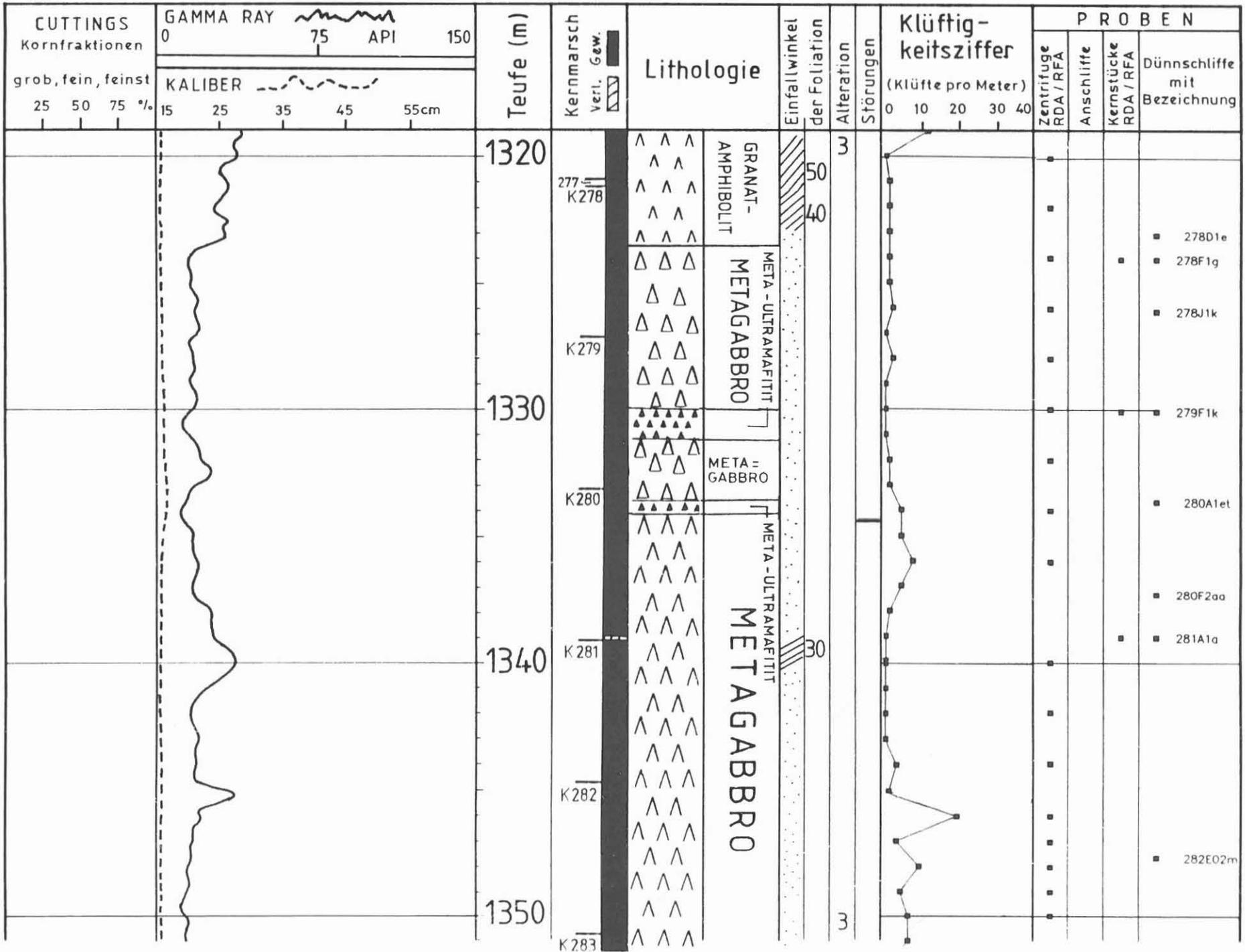


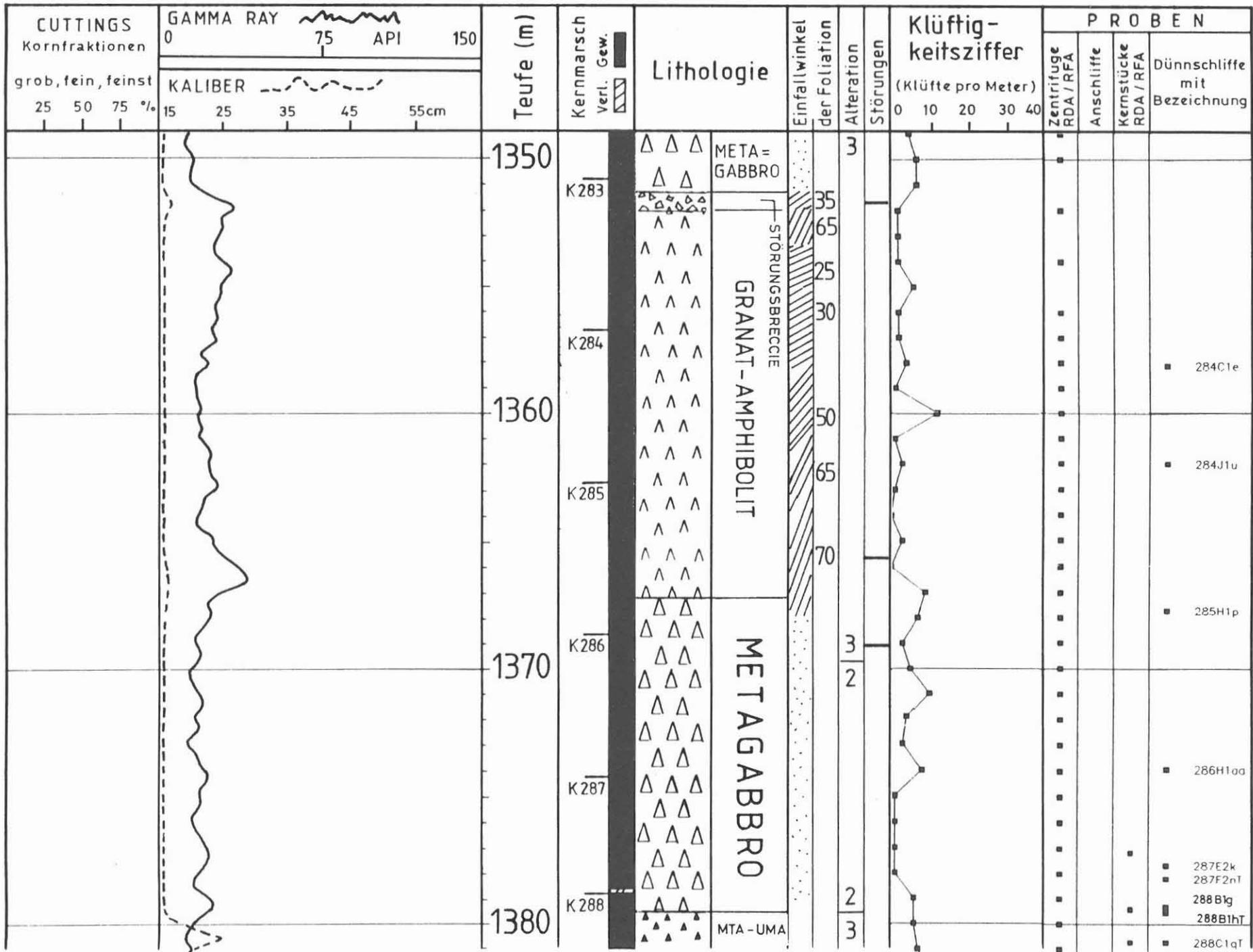


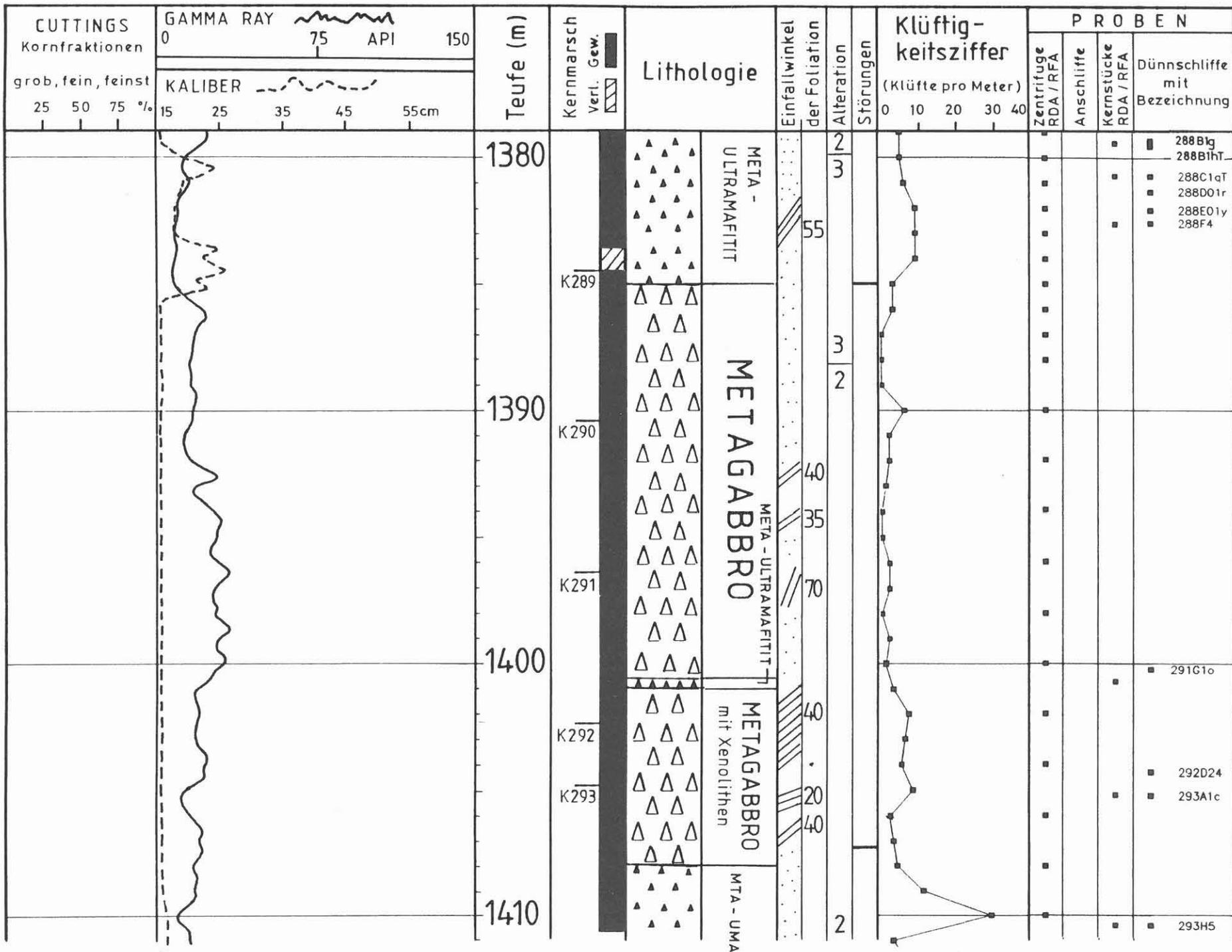


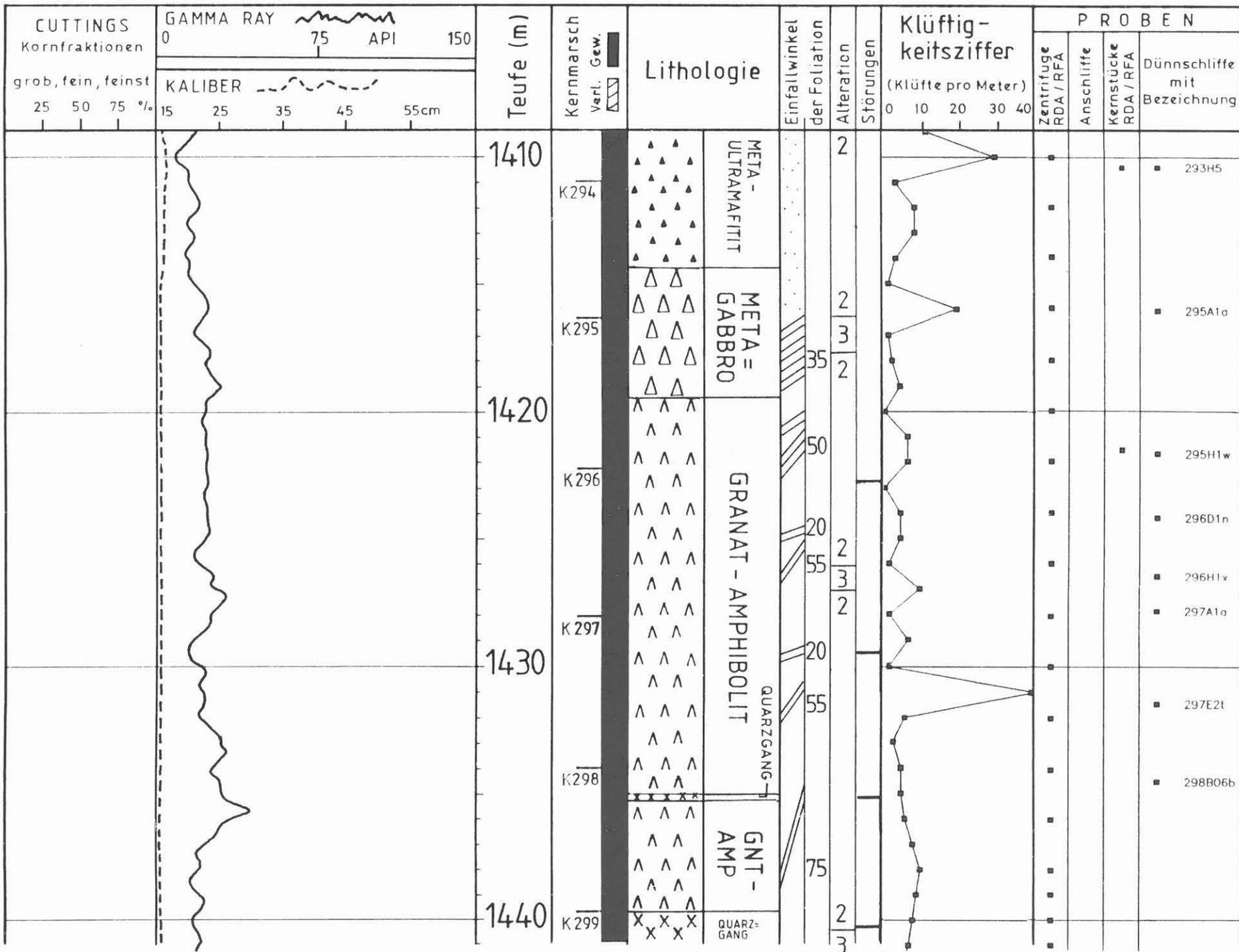


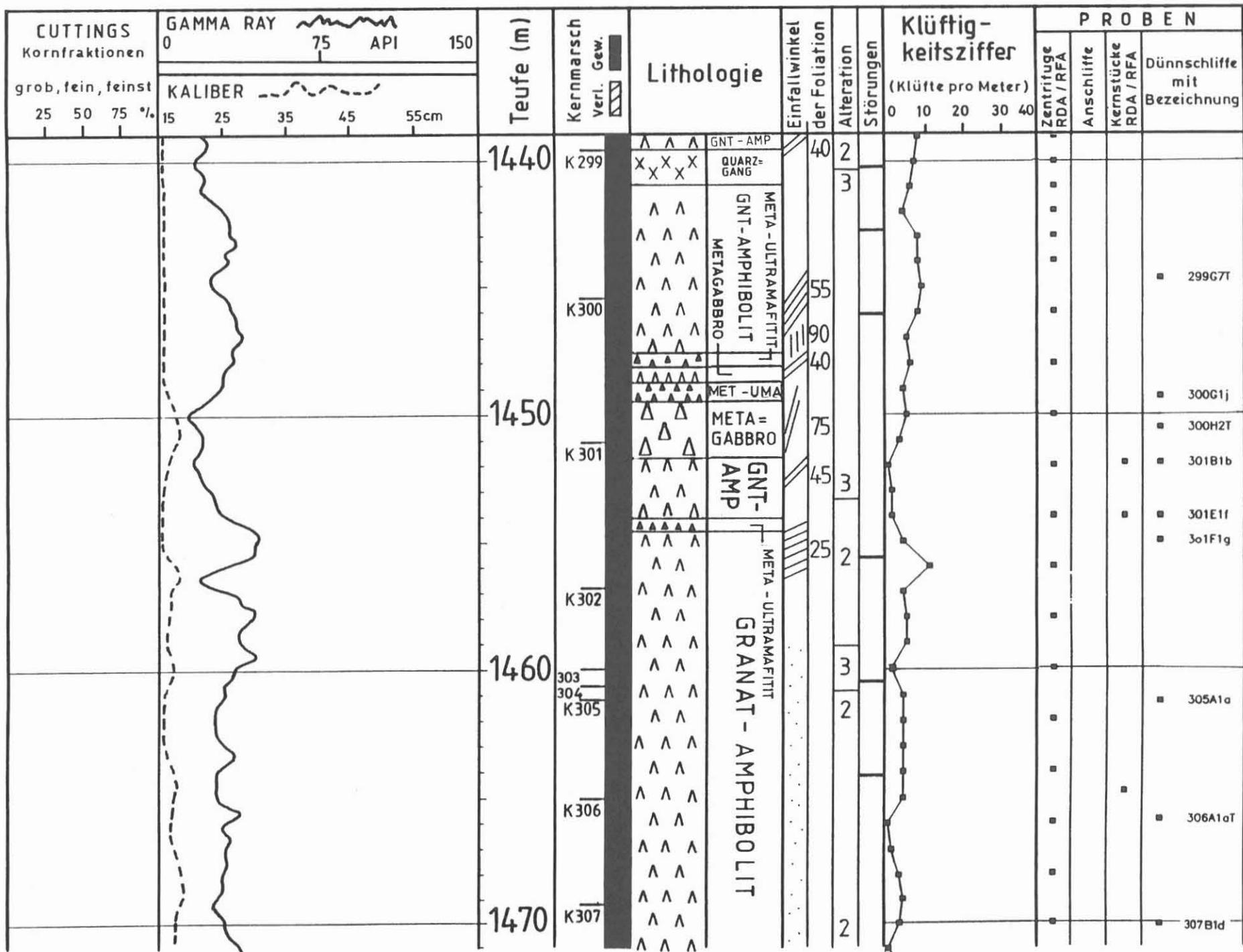
CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 0 75 API 150	Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew.	Lithologie	Einfallswinkel der Foliation	Alteration Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter)	P R O B E N			
	KALIBER 15 25 35 45 55cm							Zentrifuge RDA / RFA	Anschliffe	Kernstücke RDA / RFA	Dünnschliffe mit Bezeichnung
		1290		GRANAT-AMPHIBOLIT	60	2					
			K 269								
			K 270		70	3				270A3R 270B4o	
				META- GABBRO						270C4d 271B1b	
		1300	K 271	GRANAT-AMPHIBOLIT	65						273A1e
			272		80						
			K 273		70						
			K 274								273H1s 274B01b
		1310									
			K 275								274J1zT
			K 276								275F1L
		1320	277			3					

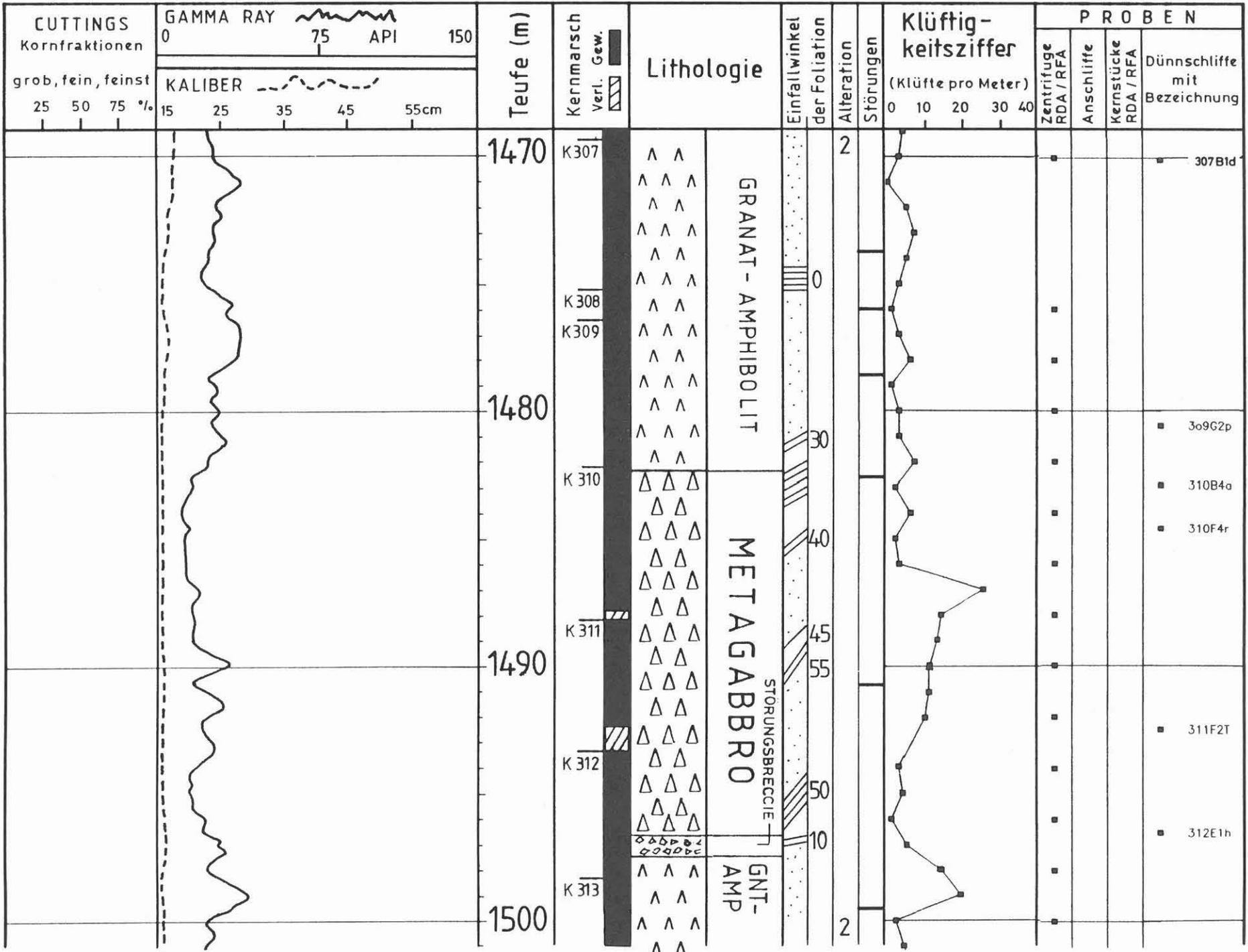


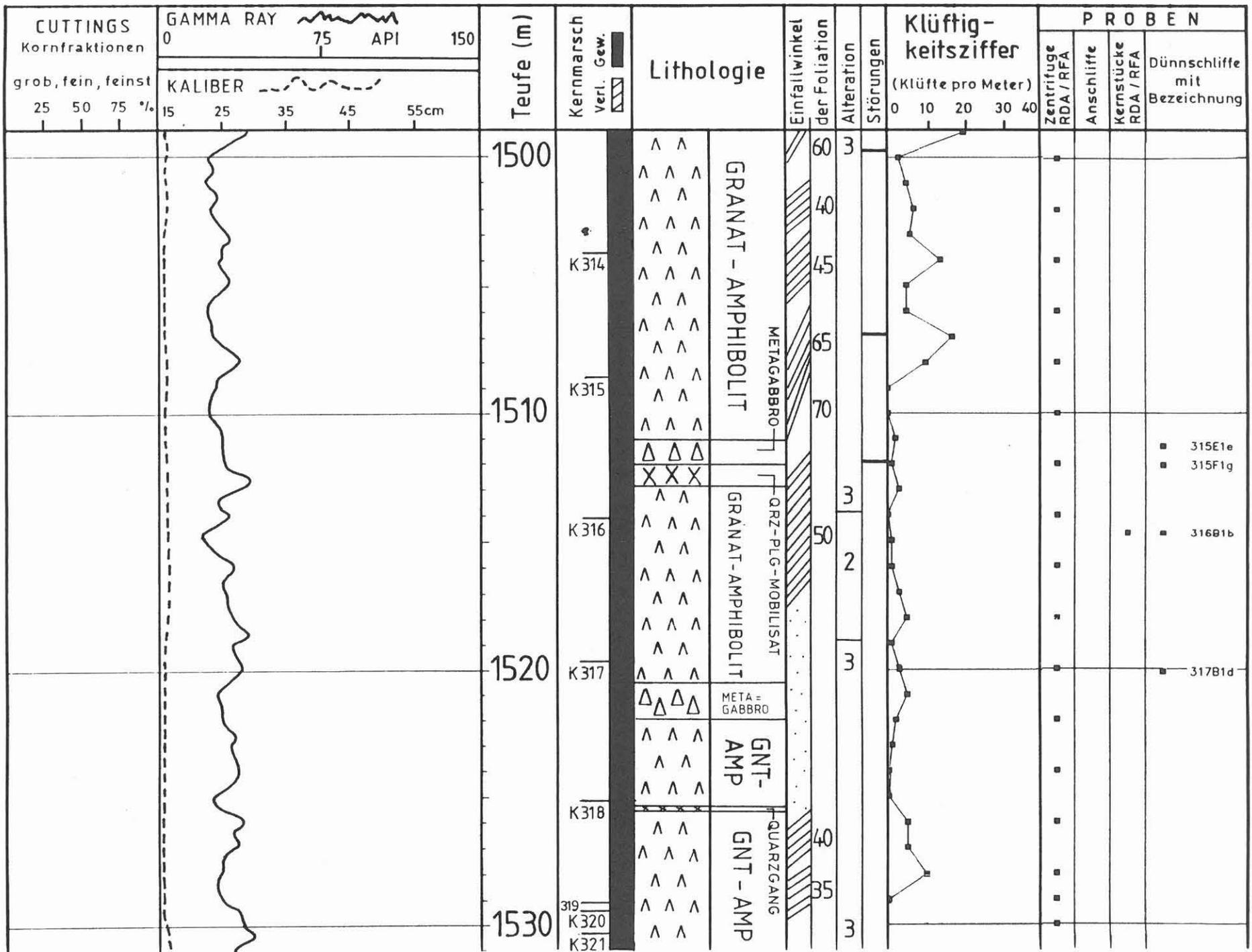












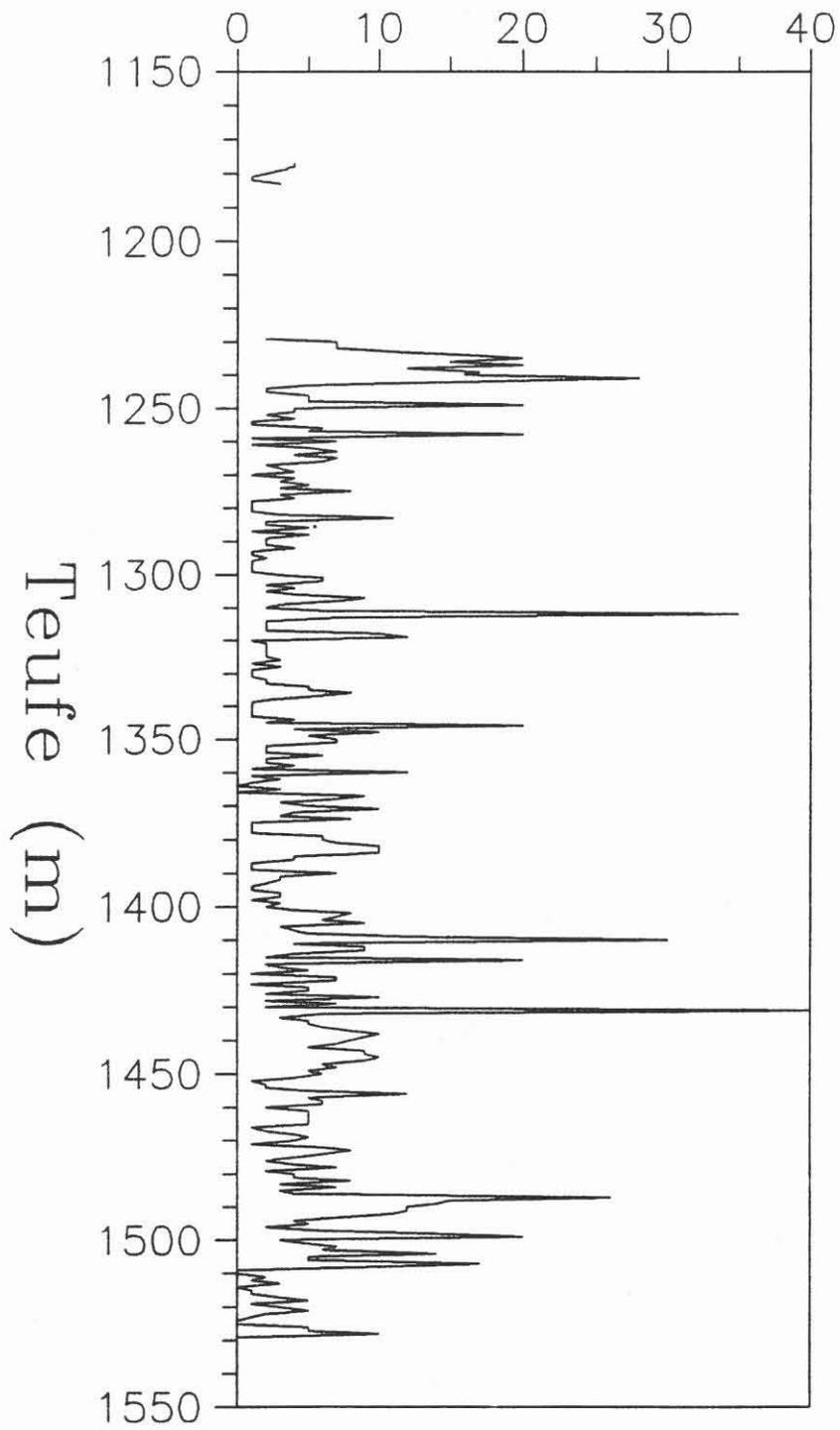
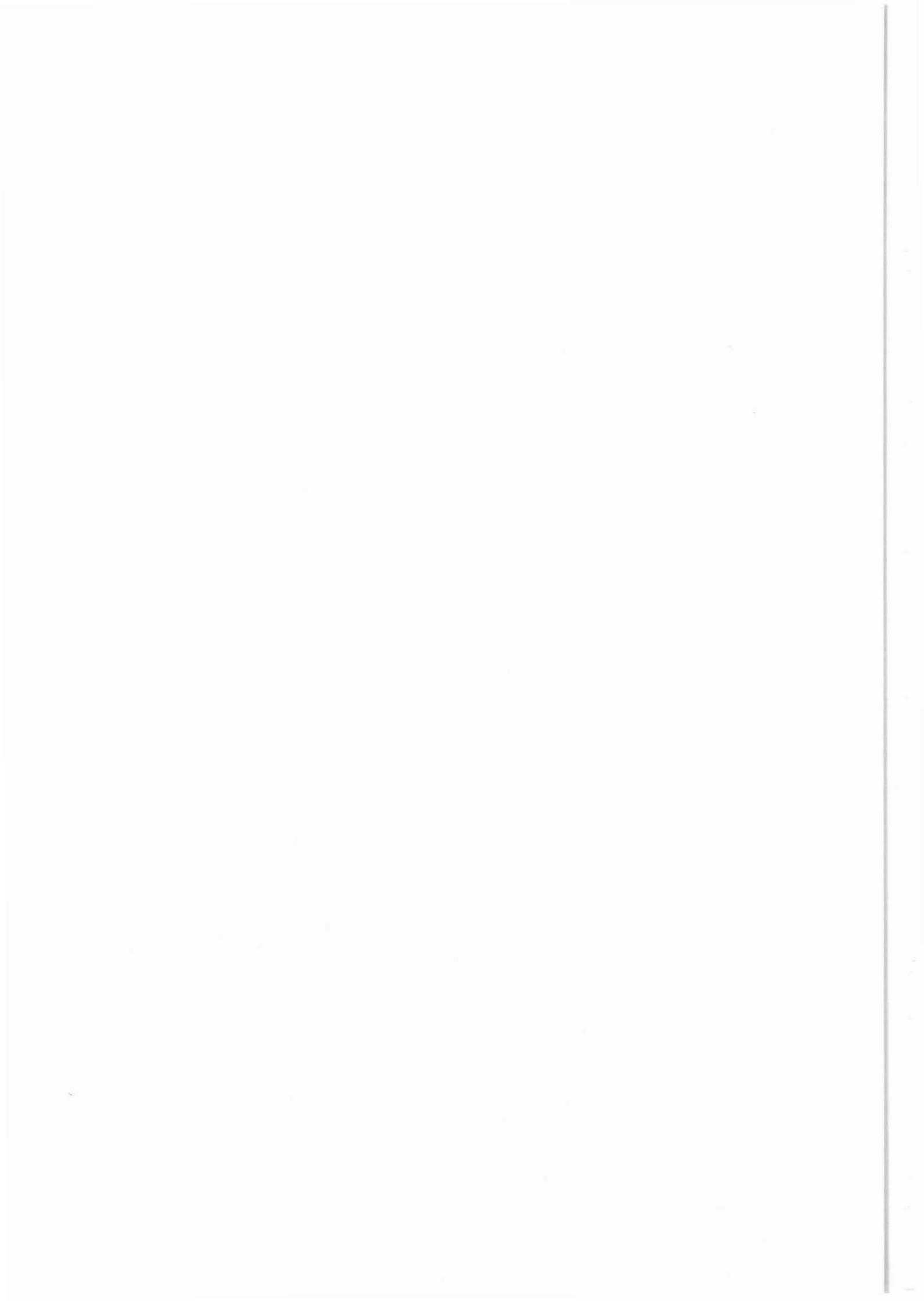


Abb. B.6.2: Klüftigkeitsziffer (Anzahl offene Trennflächen pro Meter) der gekernteten Strecken.

## C. Geochemie

KTB Oberpfalz VB –  
Röntgenanalytik  
Spülnungsanalytik  
Gasanalytik

A. Stroh  
H.-J. Heinschild  
K. D. Homann  
M. Tapfer



KTB Report	88-6	C1-C109	13 Abb.	Hannover 1988
------------	------	---------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m:

## C. Geochemie

A. Stroh, H.-J. Heinschild, K.D. Homann, M. Tapfer \*

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>		Seite
C.1	Einleitung	C 2
C.2	Probennahme und Probenaufbereitung	C 3
C.3	Röntgenanalytik	C 3
C.3.1	RDA/RFA-Ergebnisse an Bohrmehl und Kernstücken des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 3
C.3.2	Vergleich der Ergebnisse von Bohrmehl und Bohrklein während der Richtbohrphase 992-1228 m	C 15
C.4	Spülungsanalytik	C 23
C.4.1	Funktionsprinzip der ICP - AES	C 23
C.4.1.1	Geräteparameter und verwendete Meßprogramme	C 26
C.4.2	Ergebnisse der Kationen- und Anionenanalyse des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 27
C.4.3	Dekrepitationsanalytik	C 37
C.5	Gasanalytik	C 42
C.5.1	Funktionsprinzip des Prozeßgas-Massenspektrometers	C 43
C.5.2	Ergebnisse des Teufenbereichs 992 - 1530 m	C 44
C.5.3	Festlegung von Störungzonen anhand chemischer Parameter	C 52
C.6	Zusammenfassung	C 54
C.7	Schriftenverzeichnis	C 56
C.8	Danksagung	C 57
C.9	Anhang	C 58

\*Anschrift der Autoren:

KTB-Feldlabor, D-8486 Windischeschenbach

## C.1 Einleitung

Während der Bohrphase von 478.5 - 992.0 m wurde eine kontinuierliche Neigung des Bohrlochs aufgebaut. Nach der Beendigung der Logging-Phase vom 04.01.88 - 09.01.88 wurde deshalb ab 992 m mit der Einleitung von Richtbohrarbeiten begonnen. Diese Arbeiten werden mit einem 3½" Rotarybohrstrang und mit Rollenmeißeln durchgeführt. Von 992.0 - 1228.8 m konnte deshalb mit Ausnahme des Referenzkerns Nr. 253 (1177.0 - 1183.0 m) nicht gekernt werden. Nach Abschluß der Richtbohrphase wurde ab 1228.8 m bis 1530.0 m die Seilkerntechnik mit Diamantbohrkronen eingesetzt, so daß in diesem Bereich ein nahezu 100%iger Kerngewinn erzielt werden konnte.

In diese Richtbohrphase fällt ein lithologischer Wechsel von Paragneisen zu Amphiboliten (bei 1160.0 m). Dieser Wechsel sowie die weiter unten eingeschalteten Granat-Amphibolite, Hbl-Gneise und Meta-Ultrabasite können anhand der durchgeführten Untersuchungen der Geochemiegruppe eindeutig identifiziert und belegt werden. Die Einteilung der lithologischen Einheiten erfolgte zunächst nur anhand der Informationen, die die kontinuierliche Untersuchung des Zentrifugenmaterials mit der RDA/RFA liefert. Diese Daten werden durch Untersuchungen an Kernstücken der anderen Arbeitsgruppen gestützt. Die charakteristischen Gesteinstypen werden chemisch und mineralogisch beschrieben.

Während der Richtbohrarbeiten von 992.0 - 1228.8 m wurden bedingt durch die Bohrtechnik neben dem Zentrifugenmaterial auch Cuttings erbohrt und beprobt. Somit konnten erstmals die Ergebnisse der quantitativen Phasenanalyse an beiden Probenarten über einen größeren Bereich miteinander verglichen werden.

Im Berichtszeitraum wurde, neben der kontinuierlichen Durchführung der Feststoff- und Spülungsanalytik, erstmals auch eine regelmäßige Bestimmung der in der Bohrspülung gelösten Gase mit einem Prozeßgasmassenspektrometer durchgeführt.

Außerdem wurde an der ICP-AES eine Dekrepatationsanlage aufgebaut, mit der Flüssigkeitseinschlüsse (fluid-inclusions) in Quarzen untersucht werden.

## C.2 Probennahme und Probenaufbereitung

Die Probennahme und Probenaufarbeitung der Feststoffe und Spülungsproben entspricht dem im KTB Report 88-1 beschriebenen Verfahren. Während der Richtbohrphase von 992.0 - 1228.8 m wurde der Probenabstand der Zentrifugenproben bei den RDA-Untersuchungen bis auf wenige Ausnahmen von 2m auf 1m verdichtet. Für Korrelationstests zwischen Zentrifugenproben und Cuttings wurden von 995.0 bis 1192.0 m, außer den kontinuierlich durchgeführten Messungen an Z-Proben, zusätzlich Cuttings untersucht. Die Cuttings wurden ebenfalls z.T. im 1m- Abstand gemessen. Dadurch ist ein nahezu lückenloser Vergleich der Ergebnisse beider Probenarten über einen Bereich von ca. 200 m mit mehreren Ereignissen (lithologischer Wechsel, Störungszonen) möglich.

Der für eine luftkontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung vorgesehene Entgaser konnte infolge technischer Schwierigkeiten bisher nicht in Betrieb genommen werden. Um überhaupt Gasmessungen durchführen zu können, wurde ab Januar 1988 ein Quirlentgaser der Fa. GEODATA in der Spülungsrinne installiert. Dieser Entgasertyp wird bei konventionellen Explorationsbohrungen eingesetzt.

## C.3 Röntgenanalytik

### C.3.1 RDA/RFA - Ergebnisse an Bohrmehl und Kernstücken 992.0 - 1530.0 m

Die Einteilung der lithologischen Einheiten und die Bezeichnung der Gesteine erfolgte anhand des quantitativen Mineralbestandes und der chemischen Daten. Damit wurde der Versuch unternommen, im Hinblick auf die z.T. kernlose Hauptbohrung, ein lithologisches Profil aus chemischen (Hauptelemente sowie Rb, Sr, Zr, Cr, Ni, S) und mineralogischen Daten zu erstellen. Störungs- oder Vergrünungszonen sind bei den angegebenen Daten (Mittelwerte und Variationsbereich) nicht berücksichtigt. Der Teufenbereich, in dem die größte Störungszone auftritt, wird als Litho-Einheit abgegrenzt und im Text beschrieben; alle anderen Störungszonen sind in Kap. C.5.3 in Tabellenform zusammengestellt und durch chemisch-mineralogische Daten charakterisiert. Die Auflösung des lithologischen Profils ist durch den Abstand der Probennahme gegeben. Da dieser, außer während der Richtbohrphase, in der

Regel 2 m beträgt, versteht sich die Angabe der jeweiligen Teufenbereiche auf  $\pm 2$  m. Bei einem in dieser Art aufgestellten Log können die teilweise im Meterbereich wechselnden unterschiedlichen Amphibolittypen (Kernansprache) nur grob abgegrenzt werden. Die durch Kernansprache oder Dünnschliffe ermittelten lithologischen Grenzen sind im Abschnitt B, Geologie, dieses Berichts genannt. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse der Zentrifugen - Proben in Form eines Teufenlogs (Maßstab 1 : 1000) ist im Anhang gegeben. Auf Wunsch können detailliertere Logs (1 : 400) zur Verfügung gestellt werden. Die mineralogische und chemische Zusammensetzung charakteristischer Gesteine wird für die jeweiligen Teufenbereiche aufgeführt. Bei kernlosen Bohrphasen werden die an Zentrifugenproben erzielten Ergebnisse angegeben.

Die Teufenbereiche von 992.0 - 996.0 m und 1178.0 - 1180.0 m sind wegen des wiederholten Ein- und Ausbaus des Bohrstranges durch Nachfall aus dem Hangenden kontaminiert. Sie werden daher bei der Diskussion der Daten ausgeklammert.

Der Teufenbereich 992.0 - 1159.0 m besteht aus einer monotonen, leicht alterierten Paragneisserie. Als Hauptmineralphasen treten Quarz, Plagioklas, Hellglimmer, Chlorit und Biotit auf. In Tab. C.3.1 sind der Variationsbereich und die Mittelwerte des Mineralbestandes sowie die chemischen Haupt- und Spurenelementdaten einer repräsentativen Zentrifugen - Mischprobe aufgeführt.

Tab. C.3.1: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der Paragneise 992.0 - 1159.0 m

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variationsbereich	Gew.- %
	Z 1159 m	Z 1159 m		Z - Proben	X
SiO <sub>2</sub>	61.7	Cr 97	Quarz	30 - 45	35
TiO <sub>2</sub>	0.95	Ni 56	Plagioklas	15 - 35	25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.5	Cu 45	Biotit	0 - 7	5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	7.00	Zn 157	Muskovit	10 - 30	20
MnO	0.20	Nb 12	Chlorit	5 - 20	15
MgO	2.92	Pb 22			
CaO	1.60	Rb 88			
Na <sub>2</sub> O	2.75	Sr 152			
K <sub>2</sub> O	2.72	Y 36			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	Zr 228			

In den Paragneisen tritt zwischen 1024.0 - 1040.0 m eine Störungszone auf, die weniger durch erhöhte Chloritgehalte als durch eine deutliche Pyritführung (und Schwefelgehalte bis nahe 2 Gew.-%) gekennzeichnet ist.

Ab 1160.0 m werden die bis dahin anstehenden Paragneise von biotit- und granatführenden Amphiboliten abgelöst. Hauptge-

mengteile dieser Gesteine sind Plagioklas und Amphibol, Nebengengteile sind Granat, Quarz und Chlorit, wobei der gemessene Quarz- Anteil überwiegend in Mobilisaten vorkommen dürfte. Lokal wurden hohe Prehnit- Gehalte ( $\approx 15\%$  im oberen Teufenbereich) und untergeordnet Klinopyroxen und Biotit festgestellt. Als Akzessorien konnten stellenweise Ilmenit, Apatit, (Turmalin) und Titanit bestimmt werden. Der Variationsbereich der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung einer für dieses Gestein typischen Probe ist in Tab. C. 3. 2. aufgeführt.

Im Teufenbereich von 1229.0 - 1253.0 m steht ein vererzter biotit- und granatführender Hornblende- Gneis an. Der mittlere Quarz- Anteil dieses Gneises beträgt  $\approx 20\%$ . Die Amphibolgehalte liegen bis auf wenige Ausnahmen deutlich unter 25%. Granat konnte nur im Teufenbereich 1241 - 1243 m nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Amphiboliten sind die Gehalte an  $\text{SiO}_2$  und Zr höher, die an Fe, Ca, Cr und Ni niedriger.

Tab. C.3.2: Mineralogische und chemische Zusammensetzung der biotit- und granatführenden Amphibolite 1160-1228 m.

Gew.-%		ppm		Mineral	Variations- bereich Z - Proben	Gew.- % X
Z 1210 m	Z 1210 m	Z 1210 m	Z 1210 m			
$\text{SiO}_2$	50.2	Cr	239	Quarz	0 - 15	7
$\text{TiO}_2$	1.58	Ni	119	Plagioklas	25 - 54	40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16.9	Cu	61	Biotit	0 - 4	2
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9.72	Zn	142	Muskovit	0 - 8	4
MnO	0.15	Nb	15	Amphibol	20 - 50	35
MgO	6.33	Ba	363	Chlorit	2 - 15	5
CaO	8.08	Pb	12	Granat	0 - 13	6
$\text{Na}_2\text{O}$	3.39	Rb	30	Klinopyroxen	0 - 7	1
$\text{K}_2\text{O}$	1.13	Sr	302			
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.24	Y	42			
		Zr	206			

Auffallend sind sehr hohe Schwefelgehalte 0.2% bis 1.5 Gew.-%). Als Haupterzmineral tritt Pyrit mit bis zu 4 Gew.-% (RDA) auf. Die chemischen und mineralogischen Daten aus diesem Bereich (1229 -1253 m) sind in Tab. C. 3. 3. zusammengestellt.

Tab. C.3.3 Chemische und mineralogische Zusammensetzung des vererzten biotit- und granatführenden Hornblende - Gneises 1229 - 1253 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich Z - Proben	Gew.-%
	262A2 (1271.7 m)	262A2			262A2
SiO <sub>2</sub>	61.5	Cr	29	Quarz	10 - 30
TiO <sub>2</sub>	0.71	Ni	12	Plagioklas	20 - 62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.4	Cu	5	Biotit	0 - 3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	5.50	Zn	81	Muskovit	0 - 20
MnO	0.10	Nb	6	Amphibol	5 - 35
MgO	2.05	Ba	-	Chlorit	5 - 25
CaO	5.41	Pb	5	Granat	0 - 10
Na <sub>2</sub> O	5.13	Rb	15	Pyrit	0 - 4
K <sub>2</sub> O	0.64	Sr	357		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	Y	22		
		Zr	247		

Der Teufenbereich von 1254 - 1439 m wird von einem Granat-Amphibolit mit Quarz-Feldspat-Mobilisaten dominiert, in den ein granatarmer bis granatfreier Amphibolit sowie vier Meta-Ultrabasite und ein Metabasit mit unterschiedlichen Mächtigkeiten eingeschaltet sind.

Eine exakte Festlegung der lithologischen Grenzen dieser Linsen ist durch die Mischnatur der Zentrifugenproben und den Untersuchungsabstand von 1-2 m nicht möglich. Hier wird auf den Bericht der Geologiegruppe in Kap.B verwiesen.

Granatamphibolit tritt in den Teufenbereichen von 1254 - 1296 m, 1337 - 1380 m, 1386 - 1409 m und 1417 - 1439 m auf. Dabei zeigen die Mineralgehalte von Amphibol (12 - 54%), Plagioklas (23 - 62%) und Granat (5 - 28 %) starke Variationen. In einzelnen Bereichen sind diese Gesteine klinopyroxen- und titanitführend. Der gemessene Quarzgehalt (RDA) ist laut Kernansprache überwiegend an Mobilisate gebunden. Hellglimmer tritt vermutlich als Alterationsprodukt von Plagioklas auf. Der SiO<sub>2</sub> - Gehalt reicht von 46 bis 50 Gew.%. Die MgO- und CaO- Gehalte liegen zwischen ≈5 und 10 Gew.%. Der K<sub>2</sub>O- Gehalt schwankt zwischen von 0.4 und 0.7 Gew.%, in glimmerführenden Partien kann er auch 1 Gew.% überschreiten.

Die Variationsbreite des quantitativen Mineralbestandes sowie chemische und mineralogische Einzelergebnisse an ausgesuchten Kernstücken sind für diese vier Teufenbereiche in den nachfolgenden Tab. C. 3. 4. - C. 3. 7. zusammengestellt. Aufgrund der sehr inhomogenen Zusammensetzung dieser Gesteinsserie, geben die Daten nur einen ersten Anhaltspunkt für die stoffliche Vielfalt der einzelnen Gesteinstypen.

Tab. C.3.4: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat - Amphibolits mit Mobilisaten im Teufenbereich 1254 - 1296 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %		
	263A6a	267G1u	263A6a	267G1u		263A6a	267G1u	
	(1257.9 m)	(1285.7m)						
SiO <sub>2</sub>	47.6	46.9	Cr	225	267	Quarz	-	-
TiO <sub>2</sub>	1.47	1.13	Ni	57	29	Plagioklas	33	41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.9	17.6	Cu	24	20	Biotit	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	9.98	9.45	Zn	76	67	Muskovit	-	-
MnO	0.17	0.15	Nb	6	6	Amphibol	49	34
MgO	8.20	9.12	Ba	-	-	Chlorit	8	5
CaO	9.53	9.85	Pb	5	5	Granat	10	13
Na <sub>2</sub> O	3.01	2.62	Rb	11	11	Pyrit	-	-
K <sub>2</sub> O	0.43	0.55	Sr	307	316	Klinopyroxen	-	7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.13	Y	27	22			
			Zr	106	88			

Tab. C.3.5: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat - Amphibolits mit Mobilisaten im Teufenbereich 1337 - 1380 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %	
	281A1a	281A1a	281A1a	281A1a		281A1a	281A1a
	1339.0 m	1339.0 m	1339.0 m	1339.0 m		1339.0 m	1339.0 m
SiO <sub>2</sub>	52.7	Cr	215	Quarz	-		
TiO <sub>2</sub>	0.96	Ni	27	Plagioklas	45		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.7	Cu	14	Biotit	-		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	8.09	Zn	81	Muskovit	3		
MnO	0.12	Nb	6	Amphibol	41		
MgO	6.59	Ba	-	Chlorit	5		
CaO	7.94	Pb	-	Granat	6		
Na <sub>2</sub> O	4.51	Rb	13	Pyrit	-		
K <sub>2</sub> O	0.79	Sr	257	Klinopyroxen	-		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	Y	20	Ilmenit	-		
		Zr	109				

Tab. C.3.5: Fortsetzung

Gew.-%		ppm	Mineral	Gew.- %	
287E2KT 1377.5 m		287E2KT 1377.5 m		287E2KT 1377.5 m	
SiO <sub>2</sub>	47.6	Cr	208	Quarz	-
TiO <sub>2</sub>	0.98	Ni	159	Plagioklas	47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.2	Cu	33	Biotit	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	8.75	Zn	65	Muskovit	-
MnO	0.12	Nb	7	Amphibol	42
MgO	9.01	Ba	-	Chlorit	4
CaO	9.54	Pb	-	Granat	7
Na <sub>2</sub> O	2.92	Rb	14	Pyrit	-
K <sub>2</sub> O	0.57	Sr	349	Klinopyroxen	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	Y	19	Titanit	-
		Zr	96		

Tab. C.3.6: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat- Amphibolits im Teufenbereich 1386 - 1409 m.

Gew.-%		ppm	Mineral	Gew.- %	
293A1c 1405.18 m		293A1c 1405.18 m		293A1c 1405.18 m	
SiO <sub>2</sub>	50.7	Cr	218	Quarz	3
TiO <sub>2</sub>	1.6	Ni	102	Plagioklas	28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.3	Cu	37	Biotit	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	10.3	Zn	79	Muskovit	-
MnO	0.15	Nb	6	Amphibol	52
MgO	7.61	Ba	-	Chlorit	3
CaO	7.83	Pb	-	Granat	14
Na <sub>2</sub> O	3.01	Rb	13	Pyrit	-
K <sub>2</sub> O	0.66	Sr	102	Klinopyroxen	Sp
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	Y	25	Titanit	-
		Zr	102		

Tab. C.3.7: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Granat- Amphibolites im Teufenbereich 1417 - 1439 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Gew.- %
	295H1s (1421.5 m)	295H1s		295H1s
SiO <sub>2</sub>	50.9	Cr 146	Quarz	15
TiO <sub>2</sub>	2.10	Ni 33	Plagioklas	41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.8	Cu 44	Biotit	Sp
Fe <sub>2</sub> O <sub>3 T</sub>	13.00	Zn 91	Muskovit	-
MnO	0.30	Nb 16	Amphibol	19
MgO	4.46	Ba -	Chlorit	12
CaO	5.83	Pb 5	Granat	12
Na <sub>2</sub> O	2.84	Rb 20	Pyrit	-
K <sub>2</sub> O	0.83	Sr 263	Klinopyroxen	Sp
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	Y 35	Titanit	-
		Zr 209		

Der Granat- Amphibolit im Teufenbereich 1297 - 1306 m unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen Amphiboliten durch seinen geringeren SiO<sub>2</sub>- Gehalt. Auffallend sind in diesem Bereich höhere Cr - und Ni - Werte bei gleichzeitiger Verarmung an Rb und Zr. Stellenweise wurde bis zu 3 Gew.-% Ilmenit nachgewiesen. Die Daten dieser Gesteine sind in Tab. C. 3. 8. zusammengestellt.

Tab. C.3.8: Chemische und mineralogische Zusammenstellung der Granat-Amphibolite 1297 - 1306 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich	Gew.- %
	271B1b 1297.2 m	271B1b 1297.2 m		in Z - Proben	271B1b 1297.2 m
SiO <sub>2</sub>	47.0	Cr 270	Quarz	0 - 11	-
TiO <sub>2</sub>	1.14	Ni 105	Plagioklas	25 - 35	36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.0	Cu -	Biotit	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3 T</sub>	9.60	Zn 78	Muskovit	nur in Störungen	
MnO	0.15	Nb -	Amphibol	45 - 65	41
MgO	9.16	Ba -	Chlorit	4 - 10	4
CaO	9.81	Pb -	Granat	0 - 15	15
Na <sub>2</sub> O	2.52	Rb 13	Pyrit	0 - 2	-
K <sub>2</sub> O	0.49	Sr 333	Klinopyroxen	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	Y 25	Ilmenit	0 - 3	4
		Zr 95			

In die Granat-Amphibolite ist zwischen 1307 und 1326 m ein granatfreier oder -armer Amphibolit eingeschaltet. Hauptminerale sind Plagioklas und Amphibol sowie untergeordnet Chlorit, Klinopyroxen, Biotit und in Mobilisaten Quarz. Die chemischen und mineralogischen Analysendaten eines Kernstückes sowie der Variationsbereich der mineralogischen Zusammensetzung der Z - Proben sind in Tab. C. 3. 9. zusammengestellt.

Tab. C.3.9: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Amphibolite 1307 - 1326 m.

	Gew.-%	ppm	Mineral	Variations- bereich	Gew.- %
	278F1g	278F1g		in Z - Proben	278F1g
	1324.07 m	1324.07 m			1324.07 m
SiO <sub>2</sub>	47.4	Cr 315	Quarz	5 - 25	-
TiO <sub>2</sub>	1.80	Ni 155	Plagioklas	30 - 50	26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4	Cu 40	Biotit	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	12.1	Zn 91	Muskovit	-	-
MnO	0.19	Nb <5	Amphibol	10 - 45	66
MgO	8.92	Ba -	Chlorit	5 - 15	8
CaO	9.16	Pb -	Granat	-	-
Na <sub>2</sub> O	2.93	Rb 10	Pyrit	-	-
K <sub>2</sub> O	0.47	Sr 182	Klinopyroxen	0 - 5	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	Y 36			
		Zr 123			

Als weitere wichtige Gesteinstypen treten verschiedene "Meta-Ultrabasite" auf. Sie sind in den Teufenbereichen 1327 - 1337 m, 1381 - 1385 m, 1400 m und 1410 - 1416 m in die zuvor beschriebenen Amphibolite und Granat-Amphibolite eingelagert. Charakteristisch für diese Gesteine ist eine starke Anreicherung an MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> T, Cr und Ni sowie eine Verarmung an SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Rb, Sr und Zr.

Mineralogisch sind diese Gesteine überwiegend aus zwei Amphibolarten (Anthophyllit und Hornblende) und Chlorit zusammengesetzt. In zwei Proben konnte das Mineral Talk mit Gehalten von 14 - 27 Gew.% bestimmt werden. Zwei dieser Ultrabasite sind plagioklasfrei; als "Akzessorien" treten Calcit, Klinopyroxen und möglicherweise in sehr geringen Mengen Magnesit auf. Im Gesteinsdünnschliff 288C1qT wurde weiterhin das Mineral Serpentin identifiziert (BLÜMEL, pers. Mitt.). Durch die röntgenographische Untersuchung des gleichen Kernstückes konnte diese Aussage jedoch nicht bestätigt werden. Die gemessenen Quarz-Gehalte stammen wahrscheinlich aus dem Nebengestein. Das erklärt auch bei einigen Proben den für Ultrabasite etwas zu hohen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von 45.7 - 46.8 Gew.%. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung einiger ausgewählter Kernstücke und Mischproben (Z-Proben) sind in Tab. C. 3. 10.- 12. dargestellt.

Tab. C.3.10: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite 1327 - 1337 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Variations- bereich in Z - Proben	Gew.- %	
	279F1h 1330.08 m		279F1h 1330.08 m				279F1h 1330.08 m	
SiO <sub>2</sub>	45.7		Cr	538	Quarz	0 - 5		-
TiO <sub>2</sub>	1.48		Ni	345	Plagioklas	15 - 20		19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.3		Cu	163	Amphibol	55 - 75		55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	12.1		Zn	89	Klinopyroxen	0 - 5		-
MnO	0.16		Nb	<5	Chlorit	5 - 15		26
MgO	13.3		Ba	-	Talk	-		Sp
CaO	7.41		Pb	-				
Na <sub>2</sub> O	2.33		Rb	<5				
K <sub>2</sub> O	0.25		Sr	179				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14		Y	29				
			Zr	119				

Tab. C.3.11: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite 1381 - 1385 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %		
	288F4 1382.6m	288C1qT 1380.71m	Z1383 m 1380.71m	288C1qT 1380.71m		288F4 1382.6m	288C1qT 1380.71m	
SiO <sub>2</sub>	42.35	43.8	Cr	575	655	Amphibol	40	45
TiO <sub>2</sub>	0.92	1.04	Ni	358	618	Chlorit	29	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.89	10.2	Cu	57	-	Talk	27	16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	14.07	13.5	Zn	196	102	Anthophyllit	-	18
MnO	0.18	0.18	Nb	9	-			
MgO	21.98	19.7	Ba	-	-			
CaO	5.14	6.39	Pb	9	-			
Na <sub>2</sub> O	0.92	1.2	Rb	<5	<5			
K <sub>2</sub> O	0.24	0.19	Sr	178	105			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.19	Y	25	22			
			Zr	119	105			

Tab. C.3.12: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Meta - Ultrabasite bei 1400m und 1410 - 1416 m.

	Gew.-%		ppm		Mineral	Gew.- %		
	291G1n	293H2r	291G1n	293H2r		291G1n	293H2r	
	1400.72m	1410.1m	1400.72m	1410.1m		1400.72m	1410.1m	
SiO <sub>2</sub>	41.5	46.8	Cr	692	579	Amphibol	54	78
TiO <sub>2</sub>	0.99	0.78	Ni	362	406	Chlorit	46	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.3	8.10	Cu	8	12	Talk	-	Sp
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	13.7	14.7	Zn	237	114	Titanit	-	Sp
MnO	0.19	0.24	Nb	7	<5			
MgO	19.1	18.7	Ba	-	-			
CaO	7.84	7.46	Pb	-	-			
Na <sub>2</sub> O	0.44	0.71	Rb	<5	<5			
K <sub>2</sub> O	0.11	0.12	Sr	28	40			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.12	Y	20	21			
			Zr	107	75			

Im Teufenbereich 1440 - 1441,6 m durchschlägt ein steilstehender pegmatoider Quarz-Feldspat-Gang (Kernansprache) die Amphibolite. Da beim Bohren außer dem Gang stets auch Nebengestein erfaßt wurde, steigt der Quarz-Gehalt in den Z-Mischproben der Teufe 1440-1443 m lediglich auf 48 Gew.%.

Von 1445 bis 1475 m wurde eine Wechselfolge von Amphiboliten (teilweise granatführend) mit "ultrabasischen" Einschuppungen erbohrt. In dem Amphibolit treten als Hauptgemengteile Amphibol und Plagioklas sowie untergeordnet Chlorit und stellenweise Granat auf. In dem "ultrabasischen" Gestein sind ebenfalls Amphibol und Plagioklas die Hauptmineralphasen, jedoch treten deutlich weniger Plagioklas, dafür mehr Amphibol und zusätzlich Klinopyroxen und Ilmenit als neue Phasen auf. Chemisch zeigen die "ultrabasischen" Gesteine eine Anreicherung von Cr, Ni und Mg, und eine Verarmung an SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Rb und Zr. Für die Beprobung eines Kernstücks (KM 301B1b) wurde ein Minikern (Durchmesser 2 cm) gebohrt. Dabei zeigte sich, daß diese Ultrabasite als z.T. nur cm - große Linsen in den Amphibolit eingeschuppt sind. Der Minikern enthielt eine solche Linse, die herauspräpariert und gesondert untersucht wurde. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung dieser beiden Proben und eines charakteristischen Amphibolittyps dieser Abfolge ist in Tab. C. 3. 13. zusammengestellt.

Tab. C.3.13: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Amphibolits und der eingeschalteten "Ultrabasite" 1444 - 1475 m. Für das Kernstück 301B1b sind zwei Analysen aufgeführt, wobei die eingeschleppte ultrabasische Linse mit UB gekennzeichnet ist.

	Gew.-%			ppm			Mineral			Gew.- %		
	306A2b	301B1b		306A2b	301B1b		306A2b	301B1b		301B1b		
	1464.8m	1451.91m		1464.8m	1451.91m		1464.8m	1451.91m		1451.91m		
	UB				UB				UB			
SiO <sub>2</sub>	48.20	45.8	43.7	Cr	202	586	870	Qrz	Sp	-	-	
TiO <sub>2</sub>	1.66	1.50	1.18	Ni	64	334	496	Plg	46	21	-	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.30	16.20	12.80	Cu	31	119	141	Amph	50	63	76	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> r	10.80	9.48	11.7	Zn	<5	62	76	Chl	4	16	24	
MnO	0.17	0.13	0.16	Nb	10	8	7	Talk	-	-	Sp	
MgO	7.04	12.4	17.0	Ba	-	-	-					
CaO	8.73	8.23	8.57	Pb	<5	-	-					
Na <sub>2</sub> O	3.22	2.66	1.33	Rb	15	17	5					
K <sub>2</sub> O	0.87	0.67	0.80	Sr	286	387	86					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.20	0.14	Y	30	26	23					
				Zr	166	145	113					

In dem gleichen Teufenbereich wurde erstmals ein Serpentin (1449.29 m KM 300G1j) identifiziert. Dieses Gestein konnte nicht anhand der Z-Proben identifiziert werden. Das Zentrifugenmaterial aus diesem Bereich (1450-1454 m) zeigt den für Serpentine charakteristischen Stoffbestand nicht so deutlich wie die untersuchte Kernprobe. An der Kernprobe wurden die seit Bohrbeginn höchsten Gehalte an MgO (24.0 Gew.-%), Cr (1300 ppm) und Ni (700 ppm) sowie die niedrigsten Werte an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7.3 Gew.-%), K<sub>2</sub>O (0.10 Gew.-%) und Rb (< 3 ppm) bestimmt. In Tabelle C. 3. 14 sind die am Kernstück bestimmten Gehalte zusammengestellt.

Tab. C.3.14: Chemische und mineralogische Zusammensetzung des Serpentinits 1449.29 m (KM 300 G1j).

	Gew.-%	Mineral	Gew.-%
	300G1j 1449.29 m		300G1j 1449.29 m
SiO <sub>2</sub>	41.6	Quarz	-
TiO <sub>2</sub>	0.98	Plagioklas	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3	Biotit	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	15.2	Anthophyllit	11
MnO	0.20	Hornblende	28
MgO	24.0	Serpentin	43
CaO	4.06	Talk	Sp
Na <sub>2</sub> O	0.50	Klinopyroxen	Sp
K <sub>2</sub> O	0.10		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17		

Die unterste Gesteinsserie bilden vererzte biotit- und granatführende Hornblende-Gneise im Teufenbereich 1476 - 1530 m. In diese Gesteine sind immer wieder Amphibolite eingeschaltet. Da diese Einheit anhand der chemischen und mineralogischen Daten im einzelnen nicht aufgelöst werden kann, werden hier zwei typische Beispiele für ein "mehr - gneisiges" und für ein amphibolitisches Gestein vorgestellt. Der Amphibolit besteht aus Plagioklas (30 Gew.%) und Amphibol (60 Gew.%) mit Chlorit und akzessorischem Ilmenit. Der Hornblende-Gneis hingegen hat deutliche Quarz-Gehalte von 10 - 30 Gew.%, und ist biotit- und granatführend. Der Anteil an Amphibol geht in den Hornblende-Gneisen stark zurück. Die Gehalte schwanken zwischen 5 und 25 Gew.%. Chemisch lassen sich die Hornblende-Gneise durch einen Anstieg von SiO<sub>2</sub> und K<sub>2</sub>O bei gleichzeitiger Abnahme von MgO, CaO und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> T von den Amphiboliten unterscheiden. Auffallend sind die durchweg hohen Schwefel-Gehalte in diesen Gesteinen mit Maxima von 1 bis 2 Gew.%. Röntgenographisch wurden Pyrit-Gehalte bis zu 4 Gew.% gemessen. Die an den unterschiedlichen Gesteinstypen gemessenen Daten sind in Tab. C. 3. 15. aufgeführt.

Tab. C.3.15: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der vererzten Abfolge von biotit- und granatführenden Hornblende - Gneise sowie Amphiboliten 1476 - 1530 m (Spurenelementdaten stehen für diese Proben nicht zur Verfügung).

	Gew.-%		Mineral	Gew.-%		
	316B1b 1514.7m	Z - Probe 1504 m		316B1b 1514.7m	Z 1504m	Z 1498m
SiO <sub>2</sub>	47.87	55.6	Quarz	-	28	16
TiO <sub>2</sub>	1.59	1.19	Plagioklas	32	26	36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.66	16.5	Biotit	-	<1	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	10.63	10.2	Hellglimmer	-	21	10
MnO	0.18	0.10	Amphibol	62	7	24
MgO	7.81	3.15	Chlorit	4	15	5
CaO	9.69	3.02	Granat	-	-	9
Na <sub>2</sub> O	2.97	2.70	Klinopyroxen	-	-	Sp
K <sub>2</sub> O	0.74	2.42	Pyrit	-	3	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.19	Ilmenit	2	-	-

### C.3.2 Vergleich der Ergebnisse von Bohrmehl und Bohrklein im Teufenbereich 992 - 1192 m

Im KTB-Report 88-2 wurde bereits aufgezeigt, daß der an Bohrklein bestimmte Mineralbestand eine gute Korrelation mit dem untersuchten Kernmaterial gleicher Teufe aufweist. Im Verlauf der Richtbohrarbeiten (992 - 1228 m) waren über eine große Strecke zwei unterschiedliche Feststoffproben, nämlich Cuttings sowie Bohrmehl aus der Zentrifuge verfügbar. Durch vergleichende Untersuchungen an beiden Probenarten sollte geklärt werden, welches Material für eine kontinuierliche quantitative Aufnahme des stofflichen Bestandes der durchteuften Formationen am besten geeignet ist. Im einzelnen ergeben sich dabei folgende Fragen :

- a) Können lithologische Wechsel oder Störungs- bzw. Vergrünungszonen durch beide Probenarten belegt werden.
- b) Erfolgt eine Mineralfraktionierung des "Feststoffs" während des Aufstiegs im Bohrloch.
- c) Bei welcher Probenart ist die durch Nachfall oder Bohrlochausbrüche zu erwartende Kontamination aus anderen Bereichen am geringsten.

In den nachfolgenden Abb. C. 3. 1 (Teil 1 -4) sind die an beiden Probenarten gemessenen charakteristischen Mineralphasen des Teufenbereichs 995 - 1192 m dargestellt.

Zu a):

Prinzipiell können alle auftretenden lithologischen Veränderungen durch beide Probenarten erfaßt werden. Im einzelnen sind das:

1) vererzte Störungszone mit Pyritgehalten  $> 1$  Gew. % von 1026 - 1040 m (Abb. C. 3. 1. Teil 1).

2) Höhere Bt-Gehalte in den Paragneisen im Teufenbereich 1072 - 1086 m bzw. geringere Alteration der Gesteine angezeigt durch abnehmende Chlorit-Gehalte (Abb. C. 3. 1 Teil 2).

3) Ab 1130 m wird eine deutliche Zunahme der Alteration festgestellt, hier veranschaulicht durch den Anstieg der Chlorit-Gehalte (Abb. C. 3. 1 Teil 3).

4) Der lithologische Wechsel von Paragneisen zu Amphiboliten mit zwei neu auftretenden Mineralphasen (Amphibol und Prehnit) bei einer Teufe von 1160 m wird deutlich aufgezeigt (Abb. 3.1 Teil 4). Die Plagioklas-Gehalte steigen hier signifikant an, der Quarz-Anteil nimmt drastisch ab.

Zu b):

Eine Fraktionierung beim Austrag der "Feststoffe" durch die Spülung ist bisher in keiner Probenart nachweisbar. Mit zunehmender Vertiefung der Bohrung wären solche Prozesse denkbar. Dabei wird möglicherweise das Cuttingmaterial mit der deutlich größeren Korngröße ( $>>160 \mu\text{m}$ ) stärker betroffen sein, als das Bohrmehl mit einer relativ einheitlichen Korngröße von  $< 100 \mu\text{m}$ .

Zu c):

Die gemessenen Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung in den Teufenbereichen 1016 - 1021 m und 1177 - 1184 m beruhen auf Nachfall. Die erste Nachfallzone wird im Cuttingsmaterial wesentlich deutlicher aufgezeigt, während die zweite Zone beide Probenmaterialien gleich stark kontaminiert.

Ein Vergleich des Quarzgehaltes in Cuttings und Bohrmehl zeigt ab 1166 m deutliche Unterschiede, die im folgenden diskutiert werden. Beim Bohren mit Rollenmeißeln muß die Bohrspülung mit einer höheren Pumprate zirkuliert werden. Die eingesetzte Zentrifuge ist nicht für solch große Spülmengen ausgelegt, so daß nur ein Teil des Spülungsstromes von der Zentrifuge durchgesetzt werden kann. Ein großer Teil der Spülung wird also mit einer Feststoffbelastung des zuvor erbohrten Gesteins wieder in das Bohrloch eingebracht, während die Cuttings über das Schüttelsieb abgetrennt werden. Dadurch wird ein "Nachschleppen" des Quarzes im Bohrmehl des Teufenbereiches 1166 - 1176 m hervorgerufen.

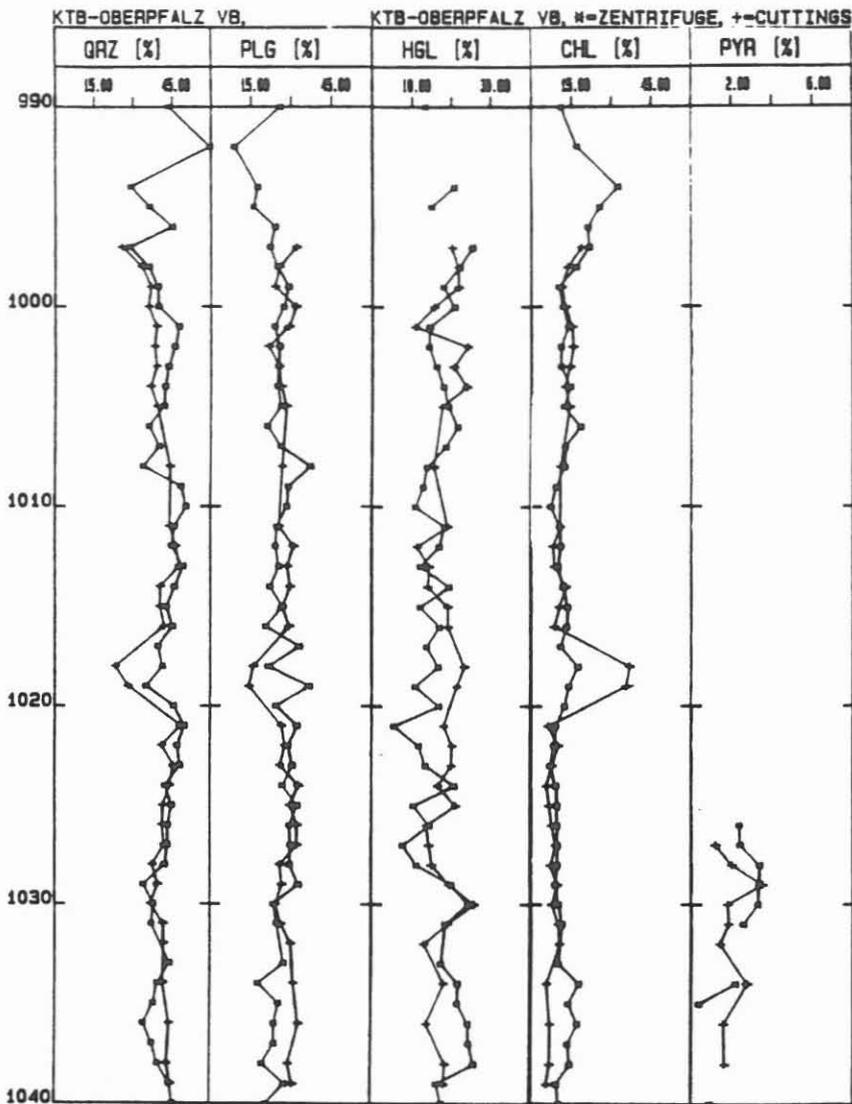


Abb. C. 3. 1: Quantitativer Mineralbestand der untersuchten "Feststoffe" (Cuttings = +, Zentrifugenproben = \*) im Teufenbereich 995 - 1192 m. Dargestellt sind die im jeweiligen Teufenbereich gesteinsbildend wichtigen Minerale.

Teil 1: Teufenbereich 990 -1040 m.

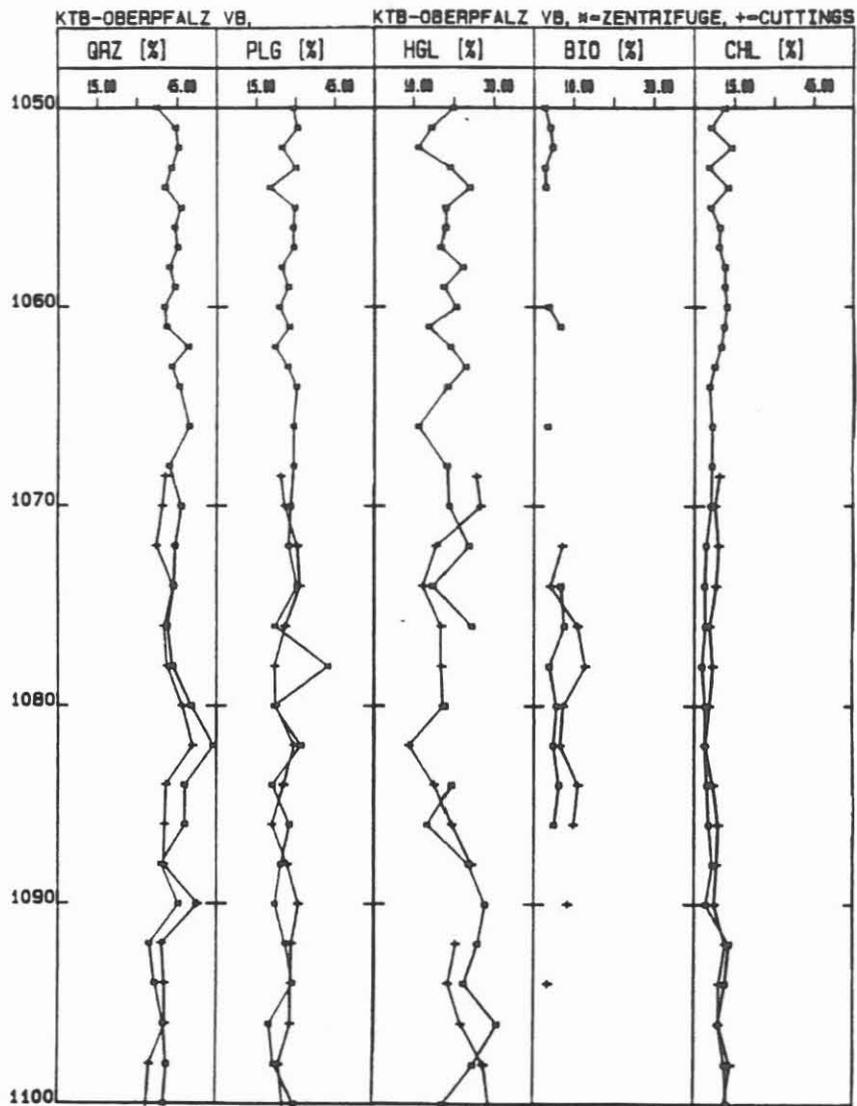


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 2: Teufenbereich 1050 - 1100 m.

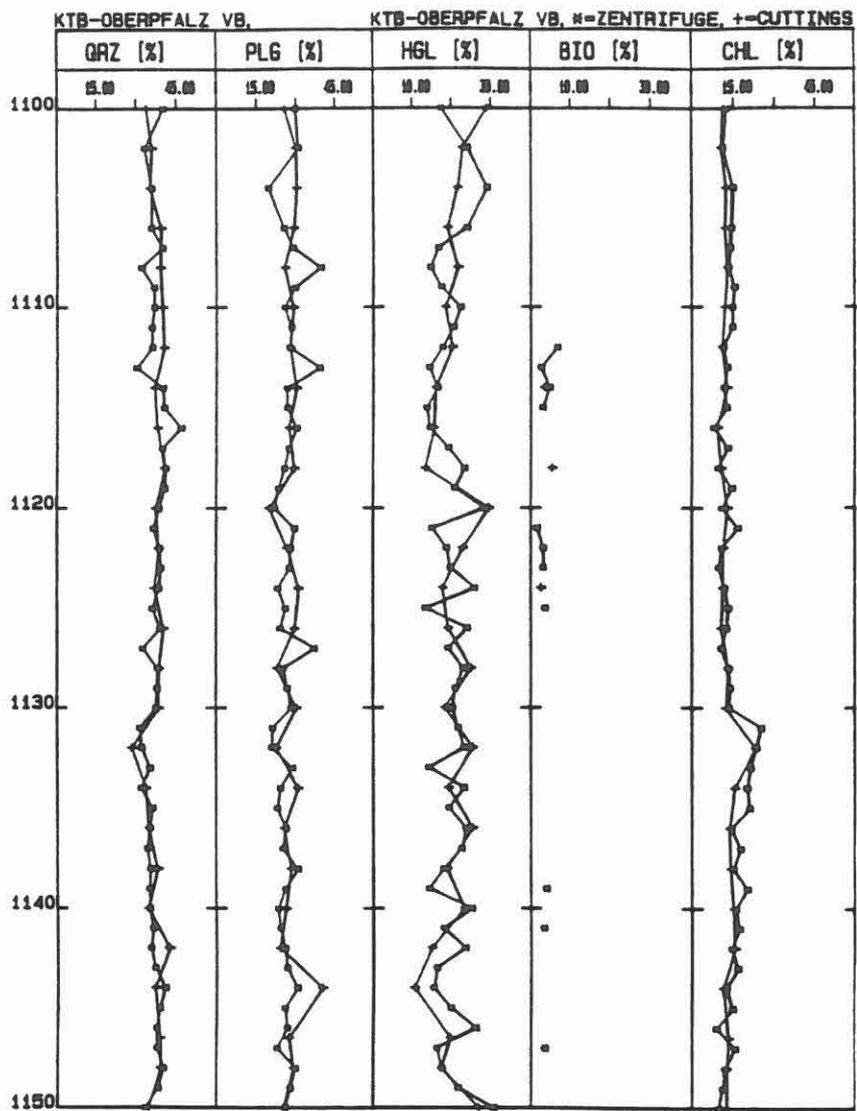


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 3: Teufenbereich 1100 -1150 m.

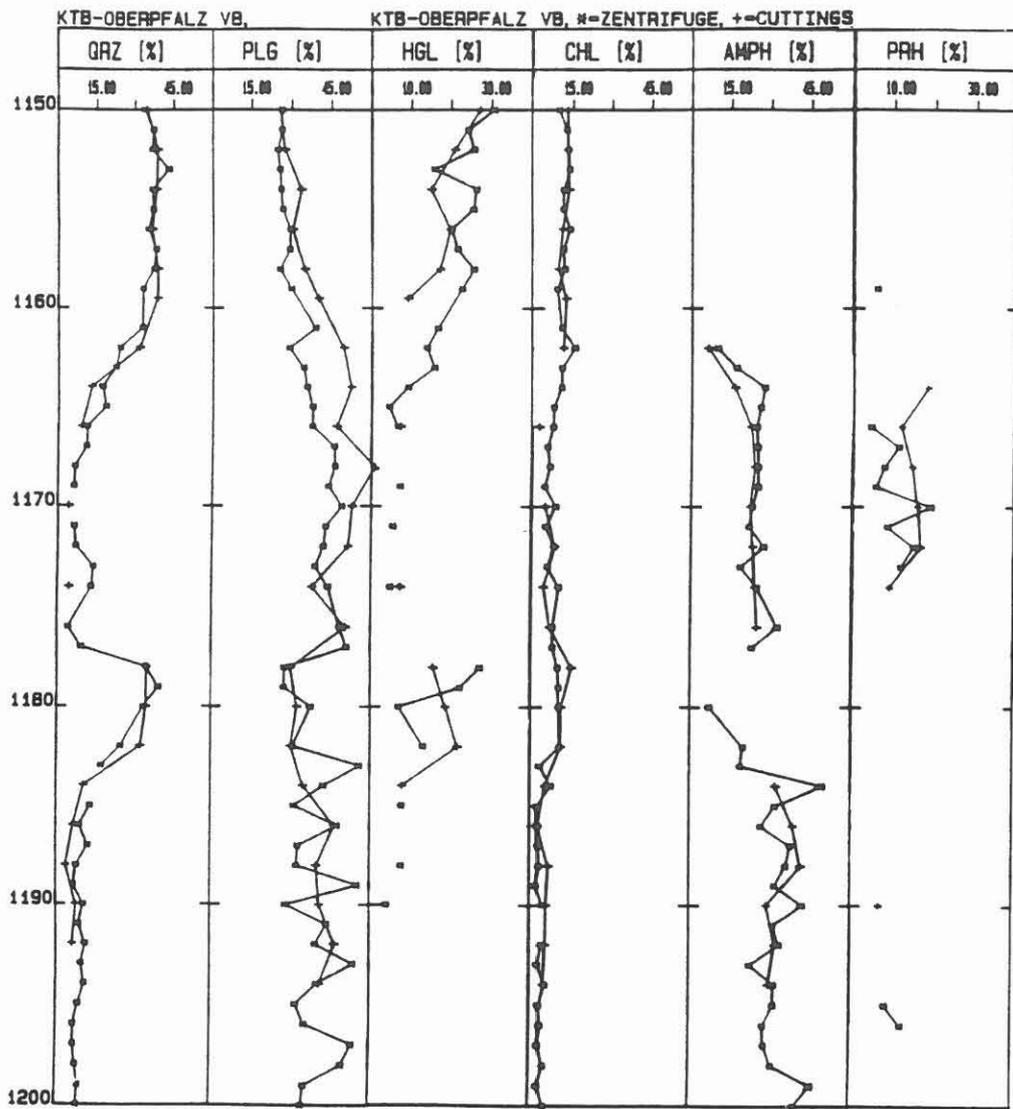


Abb. C.3.1: Fortsetzung

Teil 4: Teufenbereich 1150 - 1200m.

Weiterhin auffällig sind die teilweise stark schwankenden Gehalte einzelner Mineralphasen (Plagioklas und Hellglimmer). Dagegen sind die darstellenden Kurven von z. B. Chlorit nahezu deckungsgleich. Eine endgültige Erklärung hierfür kann zur Zeit noch nicht gegeben werden. Möglich wäre eine starke Variation der Mineralparagenesen, Gesteinsinhomogenitäten oder eine ungenaue Probennahme. Definiert man den Chloritgehalt als Maß für den Alterationsgrad der Gesteine, so sollte das Mineral Chlorit bei gleichbleibender Alteration der Gesteine keine so starken Schwankungen der absoluten Gehalte aufzeigen.

Bleibt die Frage, welche Probenart für eine routinemäßige Aufnahme des quantitativen Mineralbestandes untersucht werden soll. Bei der Anwendung der Seilkerntechnik mit Diamantbohrwerkzeugen fällt überwiegend Bohrmehl an. Eine Korrelation mit den ausgetragenen Cuttings ist bei diesem Bohrverfahren nur ganz schlecht möglich, da diese durch Nachfall aus Störungszonen erheblich kontaminiert sind (Abb. C. 3. 2). Beim Bohren mit Rollenmeißeln fallen beide Probenarten an, die auch gut miteinander korrelieren. Eine Bearbeitung der Zentrifugenproben ist bei wechselnder Lithologie allerdings nur sinnvoll, wenn die technische Auslegung der Zentrifuge derart gewählt wird, daß die gesamte zirkulierende Spülmengemenge durchgesetzt wird und vom Bohrmehl gereinigt werden kann. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu der beschriebenen Verschleppung von Mineralphasen. Bei geeigneter Auslegung der Zentrifuge haben diese Proben den Vorteil gegenüber Cuttings, daß sie vermutlich weniger stark durch Bohrlochausbrüche kontaminiert werden. Im Hinblick auf größere Teufenbereiche werden Bohrmehlproben durch evtl. auftretende Fraktionierungsprozesse während des Ausbringens der "Feststoffe" durch die Spülung vermutlich weniger stark beeinflusst.

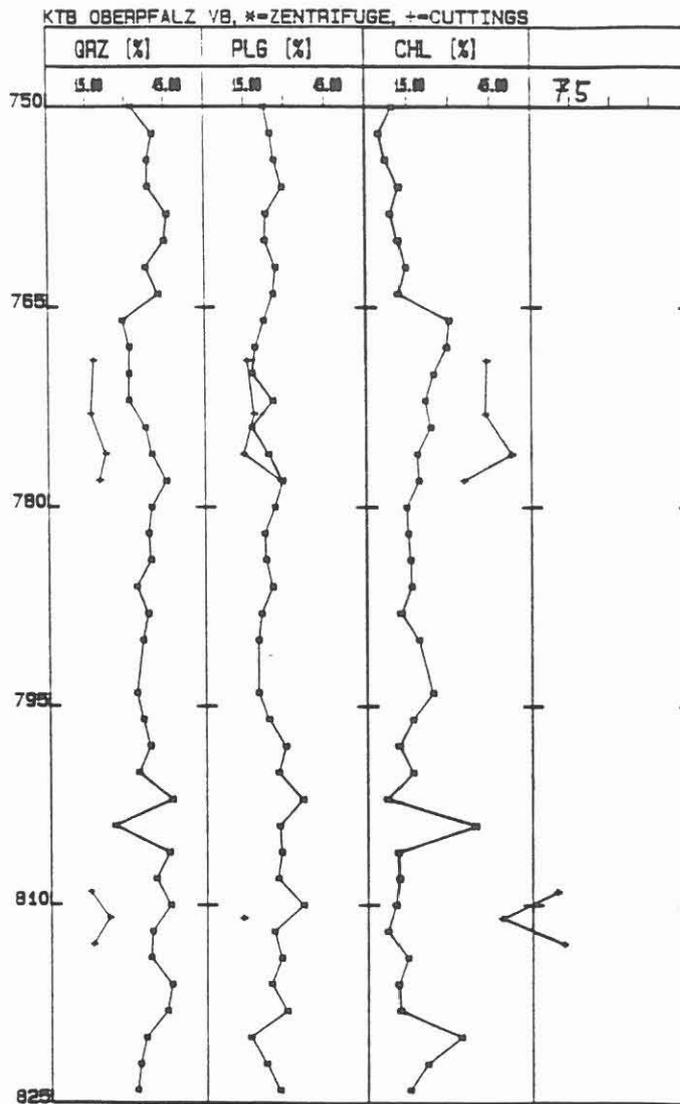


Abb. C.3.2: Vergleich der Gehalte von Quarz, Plagioklas und Chlorit in Zentrifugenproben (\*) und Cuttings (+) bei Anwendung der Seilkerntechnik mit Diamantbohrwerkzeugen.

## C. 4 Spülanalytik

### C. 4.1 Funktionsprinzip der ICP-AES

Die Bestimmung der Kationen in der Bohrspülung erfolgt mit Hilfe der ICP-Atomemissionsspektrometrie. Im KTB-Feldlabor steht dafür ein ICP-AES-Gerät der Firma ARL (3580, Vakuum) zur Verfügung. Die Gerätekonfiguration umfaßt folgende Komponenten:

- (a) Hochfrequenzgenerator (Induktionsspule)
- (b) Plasmabrenner (Fackel, Plasma- und Kühlgasstrom)
- (c) Zerstäubereinheit (Zerstäuber, Zerstäuberkammer)
- (d) Spektrometer (Primärspalt, Gitter, Sekundärspalt, Photomultiplier)
- (e) Datenverarbeitungssystem

Das Gerät verfügt über zwei Spektrometerkammern, wobei im Monochromator die sequenzielle Analyse beliebiger Elemente möglich ist, während im Polychromator die simultane Analyse von 11 ausgewählten Elementen durchgeführt werden kann (s.Tab. C.4.1).

Der prinzipielle Aufbau eines ICP-AES ist in Abb. C. 4. 1 dargestellt. Die Probenlösung wird mittels einer peristaltischen Pumpe in einen Zerstäuber (Meinhard-Zerstäuber) eingeleitet. Das durch den Zerstäuber erzeugte Aerosol wird in der Zerstäuberkammer zu 90 - 95% als Kondensat abgeschieden und verworfen. Nur das feinste Probenaerosol gelangt in ein Plasma, das durch induktive Erhitzung in einer Hochfrequenzspule erzeugt wird. Die Verdampfung der Probenlösung und die Anregung der in ihr enthaltenen Atome erfolgt bei Temperaturen von 5000 bis 10000 °C. Die temperaturabhängigen Vorgänge im Plasma sind in Abb. C. 4. 2 schematisch dargestellt. Die Atome kehren unter Abgabe von Strahlung der Energie  $\Delta E = h \cdot \nu$  vom angeregten in den Grundzustand zurück. Das Boltzmannsche Verteilungsgesetz beschreibt die physikalische Grundlage der Atomemission.

$$N_E / N_0 = ( G_E / G_0 ) \cdot \exp \cdot ( \Delta E / k \cdot T )$$

- $N_0$  = Anzahl der Atome im Grundzustand
- $N_E$  = Anzahl der Atome im angeregten Zustand
- $G$  = Statistischer Faktor
- $k$  = Boltzmann-Konstante
- $T$  = Absolute Temperatur

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

- $h$  = Plancksches Wirkungsquant
- $\nu$  = Frequenz

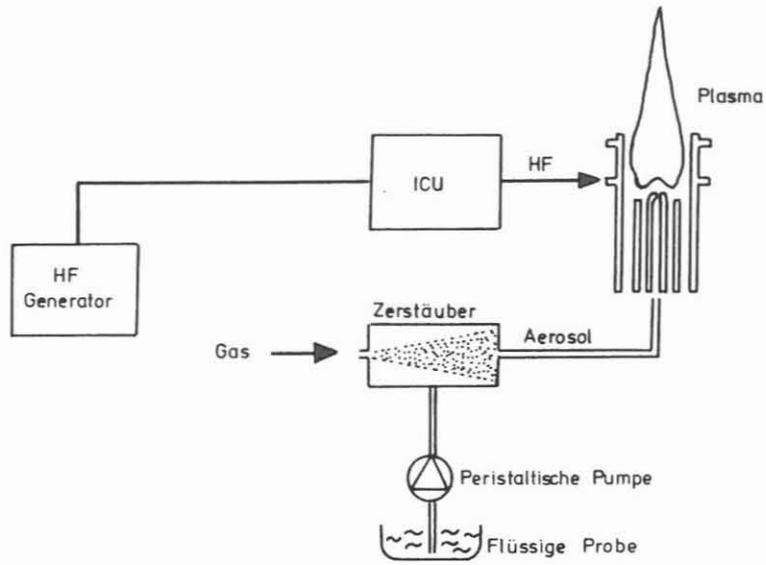


Abb. C. 4. 1 Prinzipieller Aufbau eines ICP-AES

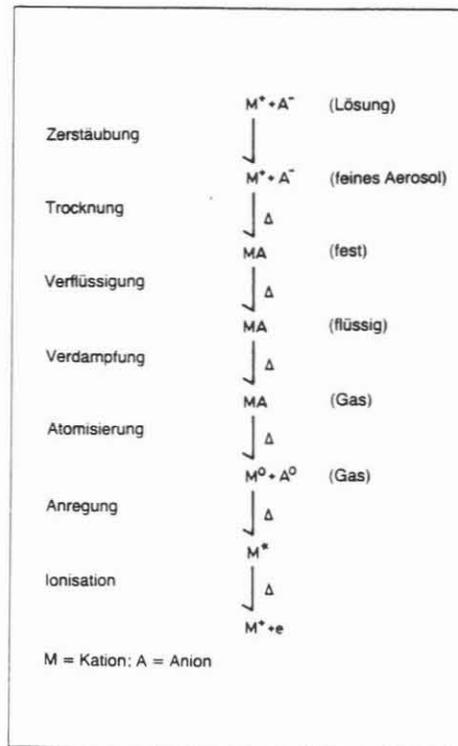
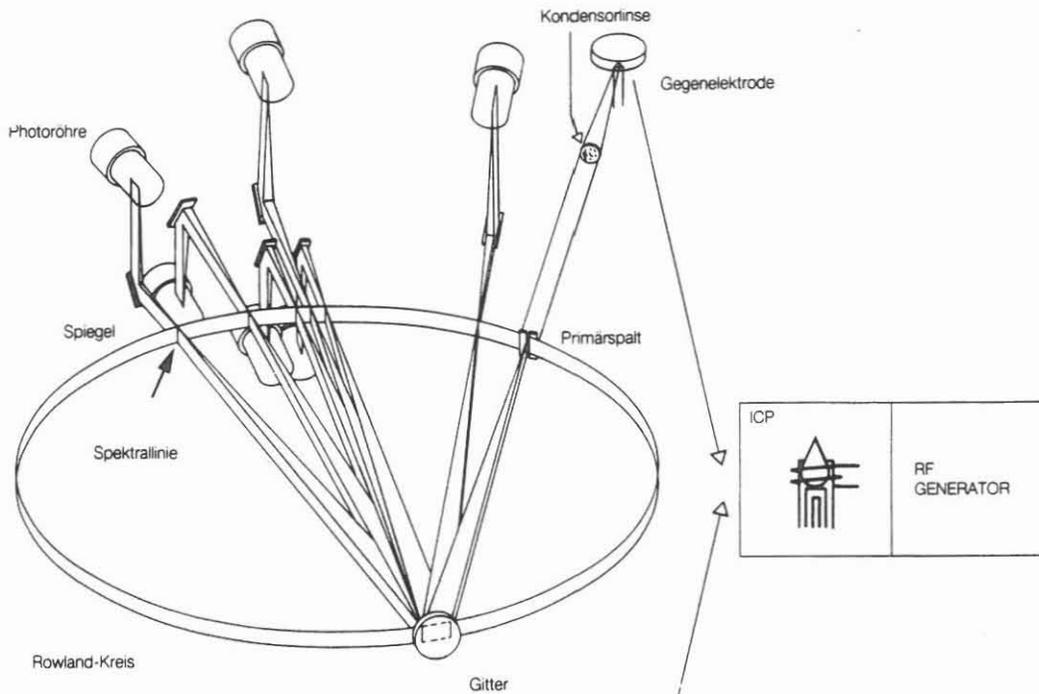


Abb. C. 4. 2 Prozesse in einem induktiv gekoppelten Plasma (nach Schrader et al., 1981)

### STRAHLENGANG IM POLYCHROMATOR



### STRAHLENGANG IM MONOCHROMATOR

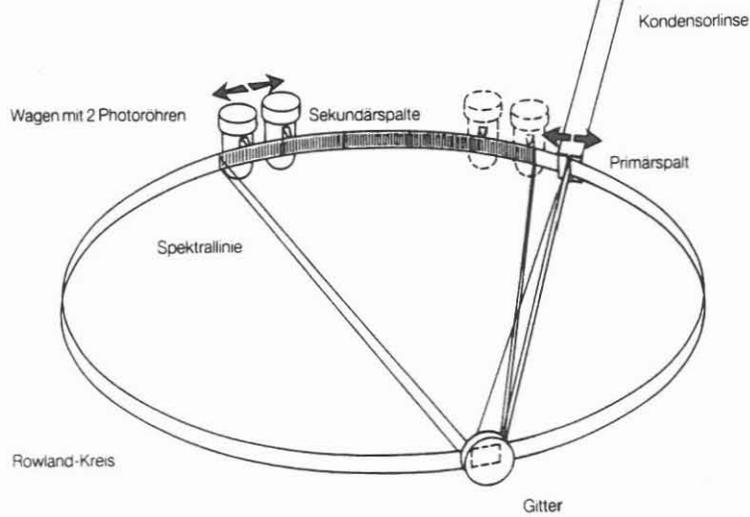


Abb. C. 4. 3 Strahlengang im Monochromator und im Polychromator des ICP-AES 3580 der Fa. ARL  
Das erzeugte Emissionsspektrum wird im Spektrometer durch

ein Konkavgitter in einzelne, elementspezifische Spektrallinien zerlegt (s. Abb. C. 4. 3).

Die Intensitäten der Spektrallinien sind ein Maß für die Konzentration der Elemente.

#### C. 4. 1. 1 Geräteparameter und verwendete Meßprogramme

In Tabelle C. 4. 1 sind die für die Spülungsanalytik ausgewählten Elemente und die jeweils verwendeten Spektrallinien aufgeführt.

Tab. C. 4. 1 Für die Spülungsanalytik verwendete Spektrallinien

Element	Wellenlänge (Å)	
Na	5895.92	
Ca	3933.66	simultane Messung
K	7664.91	Polychromator
Li	6707.84	
Sr	4077.71	
Ba	4554.03	
Fe	2599.40	sequentielle Messung
Mg	3838.26	Monochromator
Mn	2576.10	
Zn	2138.56	

Für die Eichung der Spülungsanalysen werden Standardlösungen ( Fixanal Eichlösungen ) verwendet. Die Eichkurven ( 3 - Punkt Eichung ) werden so angesetzt, daß die Elemente in der Probenlösung im mittleren Konzentrationsbereich der Eichkurve gemessen werden können. Bedingt durch die nötige Verdünnung der Spülproben werden die Elemente Na, Ca, K, Fe und Mg in der Eichkurve in Konzentrationsbereichen von 1 bis max. 40 ppm angesetzt. Die Konzentrationsbereiche der Eichkurve für die Elemente Li, Sr, Ba, Mn, und Zn variieren zwischen 10 bis max. 500 ppb. Innerhalb dieser Konzentrationsbereiche werden für die Elemente Na, Ca, K, Fe, Mg, Li, Sr, Ba und Mn Reproduzierbarkeiten von 1 bis 3 % relativer Standardabweichung ermittelt. Für das Element Zn beträgt die relative Standardabweichung  $\leq 6$  %.

C. 4. 2 Ergebnisse der Kationen- und Anionenanalyse des Teufenbereichs 992 - 1530 m

Bis in eine Teufe von 992 m haben die Bohrspülungsanalysen gezeigt, daß Änderungen im Chemismus der Bohrspülung einerseits von den aus bohrtechnischen Gründen in das Spülungssystem eingeleiteten Stoffen wie Dehydril, Leitungswasser, NaOH und Natriumkarbonat abhängen, andererseits aber auch eindeutig verursacht werden durch Austauschreaktionen zwischen dem erbohrten Gestein und der Bohrspülung.

Die Lokalisierung von Zuflußhorizonten mineralisierter Wässer setzt voraus, daß zu jeder Zeit während des Bohrvorgangs die chemischen Bestandteile aus den Spülungszusätzen bilanziert und die Wechselwirkungen zwischen Bohrmehl und Spülung quantitativ erfaßt werden können.

Die Ergebnisse der Bohrspülungsanalysen des Teufenbereiches 992-1530 m sind in Übersichtslogs (Maßstab 1:1000) im Anhang dargestellt.

In Tab. C. 4. 2 sind die mittleren Kationen- und Anionengehalte ausgewählter Teufenabschnitte zwischen 992 - und 1530 m sowie die unterschiedlichen technischen Einleitungen in das Spülungssystem während dieser Bohrphase zusammengefaßt. Zusätzlich aufgeführt ist die chemische Analyse einer 1%-igen synthetischen Probe des Spülungszusatzes Dehydril. Hauptbestandteile des Dehydrils sind die Elemente Si, Mg, Na und Li. Die Li- und Mg-Gehalte in der Bohrspülung ermöglichen jederzeit die genaue Berechnung der aktuellen Konzentration des Spülungszusatzes in der Spülung und damit auch die Erfassung der Grundgehalte der anderen durch das Dehydril in die Spülung eingebrachten Elemente.

Beim Erreichen der Teufe 992 m weist die Bohrspülung eine 1%-ige D-HT-Konzentration auf. Durch Austauschreaktionen mit Mineralen der bis 992 m durchteuften glimmerreichen Gneise hat die Spülung im Vergleich zu der 1%-igen synthetischen Dehydril-Probe erhöhte Gehalte an K, Ba, Ca, Sr, Fe und Mn sowie an  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ . Im Anschluß an die Bohrlochmeßphase bei 992 m wurden während Nachbohrarbeiten und Drill Stem Tests Wasser, NaOH und höher konzentrierte "frisch" angesetzte D-HT-Spülung eingeleitet. Zu Beginn der ersten Richtbohrphase zwischen 995 m und 1229 m weist die Spülung dadurch eine 1.6%-ige D-HT-Konzentration auf.

An Hand der Analysen des Teufenbereichs zwischen 1079 - 1096m soll im Folgenden gezeigt werden, mit welcher Genauigkeit Bilanzierungen der chemischen Bestandteile der Bohrspülung bei Einleitungen in das Spülungssystem durchgeführt werden können. Die Bilanzierung der Gehalte einzelner Elemente bei Spülungseinleitungen läßt sich unter Verwendung folgender Gleichungen durchführen:

$$\text{Ausgangsspülung} \quad : \quad (K_E / 1 \cdot 10^6) \cdot V_A = K_E \quad (\text{kg})$$

$$\text{Spülungseinleitung} : (K_E^1 \cdot X \% \text{ D-HT} / 1 \cdot 10^6) \cdot V_E = K_E^1 \quad (\text{kg})$$

$$\text{Leitungswasser} \quad : \quad (K_E^2 / 1 \cdot 10^6) \cdot V_E = K_E^2 \quad (\text{kg})$$

Konzentration des  
Elementes in der

$$\text{Mischung} \quad : \quad K_{EM} \text{ (ppm)} = ((K_E + K_E^1 + K_E^2) \cdot 1 \cdot 10^6) / (V_A + V_E)$$

- $K_E$  = Konzentration des Elementes in der Ausgangsspülung (in ppm)  
 $K_E^1$  = Konzentration des Elementes im 1%-igen synthetischen Dehydril (in ppm)  
 $K_E^2$  = Konzentration des Elementes im Leitungswasser (in ppm)  
 $V_A$  = Spülmengemenge der Ausgangsspülung (in l)  
 $V_E$  = Eingeleitete Spülmengemenge (in l)  
 $K_{EM}$  = Konzentration des Elementes in der Mischung (in ppm)

Die Verwendung der oben beschriebenen Gleichungen soll am Beispiel der Mg - Gehalte in der Bohrspülung aufgezeigt werden.

Zwischen 1079 und 1086 m beträgt die Mg - Konzentration der Ausgangsspülung 2310 ppm (= 2,31 g/l). Das Spülvolumen beträgt in diesem Teufenbereich etwa 50 m<sup>3</sup>. Es berechnet sich 9999also ein gesamter Mg - Gehalt von 115,5 kg in der Ausgangsspülung. Bei 1088 m werden 10 m<sup>3</sup> einer 2,5%-igen D-HT-Spülung zugesetzt (Ansatz: 15 m<sup>3</sup> 2,5% D-HT, 50 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 8 kg NaOH). Nach der Einleitung beträg das Spülvolumen 60 m<sup>3</sup>. Eine 2,5%-ige D-HT-Spülung enthält 3450 ppm Mg; das entspricht einem Mg - Gehalt von 34.5 kg in der Einleitung. Über das Leitungswasser kommen noch etwa 0,08 kg Mg hinzu. Der Mg - Gehalt in der Mischung nach der Einleitung sollte dann 2500 ppm betragen. Die Bohrspülungsanalysen 1090 - 1096 m ergeben nach der Einleitung einen Mg - Gehalt von 2530 ppm. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß selbst in Bohrphasen in denen Spülungseinleitungen durchgeführt werden, Abweichungen der Elementgehalte von der erwarteten Mischungszusammensetzung erkennbar bleiben. Zuflußhorizonte von Formationswässern oder mineralisierter Oberflächenwässer, die z. B. durch einen Elementeintrag von Na, Ca und Cl<sup>-</sup> gekennzeichnet wären, können daher jederzeit eingegrenzt werden.

Tab. C. 4. 2 Spülmngszusammensetzung (in ppm) des Teufenbereichs 992 - 1530 m. jeweils kurz nach einer Spülmngseinleitung bzw. kurz vor der nächsten Spülmngsänderung

Teufe Spülmngseinleitung	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	D-HT %
synthetische 1%-ige D-HT Spülmng	170	13	1.8	30	0.08	0.08	4	1380	n.d.	1	23	1.00
985 - 992 Logging - Phase	310	90	230	29	0.9	4.8	1010	1500	11.6	24.2	78	1.03
	<b>versch. Spülmngseinleitungen von Wasser und X % D-HT während Nachbohrarbeiten u. Drill Stem Tests</b>											
995 - 1000	420	100	150	47	1.0	4.8	760	2280	10.3	34.9	94	1.61
1017 5 m <sup>3</sup> 2.5 %	430	110	190	46	1.1	5.9	960	2320	12.6	40.8	97	1.61
1018	460	110	190	52	1.1	6.0	960	2510	12.9	-	-	1.78
1037 10 m <sup>3</sup> 2.5 %	450	110	220	49	1.2	6.3	1080	2540	14.4	45.9	117	1.73
1042	420	100	170	49	1.0	5.3	820	2420	11.3	36.0	109	1.69
1070 - 1073 2 kg NaOH	440	120	180	48	1.1	5.4	880	2320	12.2	38.6	114	1.64
1075	480	120	190	48	1.1	5.5	920	2350	12.5	36.2	113	1.65
1079 - 1086 10 m <sup>3</sup> 2.5 % aus: 10 m <sup>3</sup> 2.5 % mit 50 kg Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und 8 kg NaOH	500	110	190	47	1.1	5.5	920	2310	12.5	36.5	99	1.62
1090 - 1096	840	90	150	52	0.9	4.6	750	2530	9.8	32.9	89	1.78
1106 - 1108	840	80	170	53	0.9	4.9	770	2570	10.3	33.2	95	1.81

Tab. C. 4. 2 Fortsetzung

Teufe Spülungseinleitung	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	D-HT %
<b>50 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>												
1116	1260	80	180	54	0.9	5.2	820	2610	10.7	31.4	94	1.85
1138	1240	80	200	53	0.9	5.1	830	2590	10.7	39.9	95	1.82
<b>50 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>												
1144 - 1150	1670	80	230	54	1.0	5.7	890	2610	11.2	45.0	99	1.85
<b>5 m<sup>3</sup> 2.5 % mit Rest Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>												
1156	1720	70	190	56	0.9	5.0	780	2720	10.1	34.0	103	1.92
1174	1660	80	180	55	1.0	5.0	840	2700	10.7	37.5	105	1.89
<b>15 m<sup>3</sup> Ansatz 5 m<sup>3</sup> 2.5 % + 15 m<sup>3</sup> 2.5 % mit 50 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 5 kg NaOH</b>												
1190 - 1200	1720	100	190	59	0.9	4.6	730	2880	9.3	34.9	129	2.03
1210 - 1216	1600	100	190	58	0.9	4.8	820	2870	10.4	38.5	-	2.01
<b>6 m<sup>3</sup> 2.5 %</b>												
1224 - 1229	1540	90	180	60	0.9	4.5	790	2980	10.1	34.9	130	2.08
1226 - 1231	1500	100	200	58	1.0	4.7	820	2880	10.5	39.4	129	2.01
<b>14 m<sup>3</sup> 0.7%</b>												
1232 - 1236												
<b>8 m<sup>3</sup> Ansatz s.o.</b>												
1238 - 1244												
<b>8 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O</b>												
1245												
<b>10 m<sup>3</sup> 0.6 %</b>												
1246 - 1250												
1252 - 1255	870	80	120	40	0.7	2.9	560	1960	7.0	32.1	89	1.38

Tab. C. 4. 2 Fortsetzung

Teufe Spülungseinleitung	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	D-HT %
1277 - 1280 4 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O	880	100	140	40	0.7	3.0	620	2020	7.7	33.0	91	1.40
1288 - 1290	790	90	120	37	0.7	2.7	550	1850	6.9	30.7	93	1.29
1310 - 1312 7 m <sup>3</sup> 1 %	790	110	120	36	0.8	2.7	620	1830	7.7	28.8	104	1.26
1318 - 1320 5 m <sup>3</sup> 2 % Pille	750	90	110	37	0.7	2.5	570	1870	7.3	24.1	96	1.29
1321 - 1323 8 m <sup>3</sup> 1 %	770	90	110	41	0.8	2.7	600	2040	7.7	26.6	102	1.42
1329 - 1332	740	110	100	41	0.9	n.b.	620	2090	7.8	28.7	98	1.44
1353 - 1356 6 m <sup>3</sup> 1 %	720	120	110	40	0.8	2.9	660	2040	9.3	32.0	103	1.41
1368 - 1373 4 m <sup>3</sup> 1 % u. Rest alte Spülung	670	120	100	37	0.7	2.4	640	1950	8.3	25.8	104	1.32
1380 - 1384 7 m <sup>3</sup> 1 % u. Rest alte Spülung	660	160	120	37	0.8	2.5	740	2050	9.2	29.9	112	1.36
1399 - 1402	620	150	110	37	0.8	2.4	730	2000	9.1	34.5	115	1.34
1455 - 1459 8 m <sup>3</sup> 1.25 %	620	200	130	39	1.1	2.9	970	2210	11.6	22.7	117	1.45
1462 - 1465	590	160	100	43	0.9	2.3	790	2330	9.4	28.2	129	1.56
1469 8 m <sup>3</sup> 1.25 %	590	170	110	44	0.9	2.5	850	2370	10.2	27.2	127	1.59
1480 - 1487 16 m <sup>3</sup> 1.25 % 10 m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O	580	180	120	43	1.0	2.5	860	2310	10.3	19.7	118	1.55
1499 - 1501	430	150	90	35	0.8	2.2	680	1960	8.1	16.1	91	1.29
1525 - 1528	460	170	100	38	1.0	2.2	730	1960	8.9	17.6	103	1.34

In der Tab.: C. 4. 3 wird diese Bilanzierung auch für die anderen analysierten Elemente durchgeführt. Der Vergleich der gemessenen Spülungszusammensetzung nach der Einleitung mit der berechneten Spülungszusammensetzung zeigt eine gute Übereinstimmung.

Tab C. 4. 3 Beispiel für eine chemische Bilanzierung im Spülungssystem

	Spülung vor der Einleitung Volumen 50 m <sup>3</sup> 1079 - 1086 m	Spülung nach der Einleitung * Volumen 60 m <sup>3</sup> 1090 - 1096 m	berechnete Spülung nach der Einleitung
Na	500	840	780
Ca	110	90	100
K	190	150	160
Li	47	52	52
Sr	1,1	0,9	0,95
Ba	5,5	4,6	4,6
Fe	920	750	770
Mg	2310	2530	2500
Mn	12,5	9,8	10,4
Cl <sup>-</sup>	36,5	32,9	32,3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	99	89	93,6

\* Eingeleitet wurden 10 m<sup>3</sup> einer 2,5%-igen D-HT-Spülung aus einem Ansatz: 15 m<sup>3</sup> 2,5% D-HT, 50 kg Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 8 kg NaOH; Leitungswasserzusammensetzung (siehe KTB - Report 88-1). Die Zusammensetzung der 2.5% igen D-HT Spülung läßt sich durch Umrechnung aus der Analyse der 1%igen sythetischen D-HT Spülung, dargestellt in Tabelle C. 4. 2., ermitteln

Aussagen über die Richtung von Austauschprozessen zwischen Spülung und Bohrmehl sind am eindeutigsten in Teufenbereichen zu treffen, in denen keine technischen Spülungseinleitungen erfolgt sind.

In Tab. C. 4. 2 sind daher die mittleren Elementgehalte der Bohrspülung kurz nach einer Spülungseinleitung bzw. kurz vor der nächsten Spülungsänderung zusammengefaßt.

Die Auswertung dieser Daten zeigt, daß die Spülung im Bereich der Paragneise, die zwischen 992 und 1160.5 m erbohrt wurden, K, Ba, Fe und Mn sowie Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> anreichert. Im Teufenbereich zwischen 992 und 1068 m fällt der pH-Wert der Spülung stark von pH = 9,6 auf pH = 7,96 ab. Die Analyse der Bohrspülung zeigt in diesem Teufenabschnitt eine Anreicherung an Fe und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( 760 ppm Fe bzw. 94 ppm SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> bei 995 m auf 1080 ppm Fe bzw. 117 ppm SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> bei 1037 m ,s.Tab. C.4.2). Die RDA-Analysen belegen für den Teufenbereich zwischen 1024 und 1040 m eine Störungszone mit bis zu 4 Gew.-% Pyrit (s. C. 3. 1). In Laborversuchen konnte bereits gezeigt werden, daß der

pH-Abfall bei gleichzeitiger Fe und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Anreicherung in der Spülung auf die Oxidation des Pyrits zurückgeführt werden muß (s. KTB Report 88-2).

Aus der Kationen- und Anionenanalyse im Teufenbereich zwischen 992 und 1090 m geht eindeutig hervor, daß die pH-Erniedrigung nicht auf einen Zufluß von Formationswässern zurückzuführen ist. Die Na, Ca, und  $\text{Cl}^-$ -Gehalte zeigen in diesem Teufenbereich relativ enge Variationsbereiche. Erst mit der Einleitung von insgesamt 150 kg  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  und 13 kg NaOH läßt sich eine Stabilisierung des pH-Wertes in einer Teufe von circa 1180 m erreichen. Der Na-Gehalt der Spülung liegt daher im Teufenbereich zwischen 1142 und 1200 m im Mittel bei 1700 ppm. Der hohe  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -Anteil in der Spülung bewirkt eine chemische Ausfällung des Calciums in Form von  $\text{CaCO}_3$ . Im Teufenbereich zwischen 1090 und 1260 m beträgt der mittlere Ca-Gehalt in der Spülung nur noch 80 ppm. Nach Ende der Richtbohrphase, zu Beginn der Bohrphase mit der Seilkerntechnik bei 1229 m, wurde der Dehydrilgehalt in der Bohrspülung durch Einleitung von Wasser und neu angesetzter Spülung auf eine D-HT-Konzentration von 1.4 % erniedrigt (s. Tab. C. 4. 2).

Charakteristisch für den Teufenbereich zwischen 1260 und 1530 m ist eine kontinuierliche Anreicherung der Elemente Ca, Sr, Fe, Mn und  $\text{SO}_4^{2-}$  sowie eine Verarmung von  $\text{Cl}^-$  und Na (s. Tab. C. 4. 2). Die K- und Ba-Gehalte bleiben in diesem Teufenbereich nahezu konstant. Die Anreicherung von Ca, Sr, Fe und Mn beruht auf Austauschreaktionen der D-HT-Spülung mit den ab 1160 m durchteuften biotit-, granatführenden Amphiboliten bzw. Metabasiten und "Ultra"-Basiten, die mittlere Amphibol-Gehalte von 40 Gew.-% aufweisen.

In Laborversuchen konnte festgestellt werden, daß Austauschprozesse zwischen Amphibol und D-HT-haltiger Spülung zu einer Anreicherung von Ca, Sr, Fe und Mn in der Spülung führen können (s. KTB-Report 88-2).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß auf Grund der Ergebnisse der Spülungsanalytik im Teufenbereich zwischen 992 und 1530 m keine Zuflußhorizonte höher mineralisierter Oberflächen- bzw. saliner Formationswässer festzustellen sind. Die Elementanreicherungen von K, Ba, Ca, Sr, Fe und Mn sowie  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  beruhen auf Reaktionen der Spülung mit Mineralphasen wie Glimmer, Plagioklas, Amphibol, Calcit und Pyrit.

Um die pH- bzw. Temperaturabhängigkeit dieser Spülungs- / Gesteinswechselwirkungen näher zu untersuchen, werden z. Z. Langzeitversuche in Zusammenarbeit mit der Firma Henkel durchgeführt, die freundlicherweise Druckautoklaven für Versuche bei Temperaturen größer als  $100^\circ\text{C}$  zur Verfügung gestellt hat.

Für diese Untersuchungen wurden 3 Kernproben (zwei Amphibolite und ein Gneis) aus dem Teufenbereich zwischen 274 und

602 m ausgewählt. In der Tabelle C. 4. 4 ist der Mineralbestand dieser Proben aufgeführt. Tabelle C. 4. 5 zeigt die Ergebnisse von Leachig-Versuchen, die bei 50°C in verschließbaren Kautex-Flaschen durchgeführt wurden. Jeweils 1 g Gesteinsmehl ( $\leq 63\mu$ ) wurde mit 100 g D-HT-Spülung versetzt (Probe aus dem Reservetank, mit Leitungswasser angesetzt) und dann nach 14, 28 bzw. 41 Tagen untersucht. Die Zusammensetzung der Ansatzspülung (Reservetank) für diesen Versuch ist ebenfalls dargestellt.

Die Elemente Ca, Fe, Mn und Zn werden durch Austauschreaktionen des Amphibols und vor allem des Calcits (bezogen auf die steigende Ca-Gehalte) in der Spülung angereichert. In der mit Gneis versetzten Spülung sind hingegen die Elemente K, Ba, Fe, Mn und Al angereichert. Eine Verlängerung der Versuchsdauer bewirkte keine Veränderung der Kationengehalte. Die  $\text{SO}_4^{2-}$ -Gehalte sind in der pyrithaltigen Amphibolitprobe (41A1R) aus der Teufe 274.4 m deutlich gegenüber der Ansatzspülung erhöht. Die Verlängerung der Versuchsdauer auf 41 Tage führte bei diesem Gestein jedoch zu einer weiteren  $\text{SO}_4^{2-}$ -Anreicherung bis auf 182 ppm in der Spülung dieser Probe.

Tab. C. 4. 4 Mineralogische Zusammensetzung von Kernproben, die für Leaching - Versuche ausgewählt wurden (Gew.-%)

KM/Sekt. Teufe	41A1R 274,4	50D14T 353,74	112F3bT 601,82
Quarz	-	-	34
Kalifeldspat	11	13	-
Plagioklas	44	50	21
Biotit	-	-	14
Hornblende	30	18	-
Chlorit	14	9	13
Muskovit	-	-	17
Prehnit	-	6	-
Calcit	-	3	-

Austauschreaktionen zwischen der D-HT-Spülung und dem Gesteinsmehl können jedoch eine Al-Anreicherung von 9 ppm in der Ansatzspülung auf 200 ppm in der mit Gneis versetzten Spülung nicht befriedigend erklären. Wegen seiner Immobilität bei hydrothermalen Alterationsprozessen wird das Element Al in der Literatur häufig zur Normierung von Elementverhältnissen verwendet. K/Al-Verhältnisse von etwa 0.35 in der mit Gneis versetzten Spülprobe legen die Interpretation nahe, daß feinschuppige Schichtsilikate, wie z.B. Muskovit (K/Al etwa 0.48) und Biotit in die Gel-Struktur des Dehydrils mit eingebaut werden. Der aus den oben beschriebenen Laborversuchen abgeleitet Einbau von Schichtsilikaten in die Gelstruktur des Dehydril bestätigt sich auch in den Bohrspülungsanalysen.

Tab. C. 4. 5 Leaching - Versuche bei 50°C, D-HT-Spülung und aufgemahlenes Kernmaterial, 1 g Gesteinsmehl auf 100 ml Spülung (alle Angaben in ppm)

Versuchsdauer (in Tagen)	Probe Teufe	Na	Ca	K	Li	Sr	Ba	Fe	Mg	Mn	Zn	Si	Al	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
14	D-HT	350	30	20	53	0.2	0.6	6	2430	0.1	0.1	-	9	23	104
28	Ansatzspülung	360	30	10	53	0.2	0.6	9	2370	0.1	0.4	4110	-	-	-
41	1.8 % D-HT													13	65
14	41A1R *	350	70	20	50	0.3	0.6	150	2360	1.5	0.6	-	90	14	141
28	274.4m	350	70	20	51	0.3	0.7	170	2410	1.7	0.9	4220	90	-	-
41	Amphibolit													14	182
14	50D14T	370	260	20	54	0.4	0.6	120	2560	1.8	0.6	-	90	20	-
28	353.74m	370	270	20	54	0.4	0.6	150	2550	1.9	0.9	4420	-	-	-
41	Amphibolit													13	118
14	114F3bT	340	40	70	51	0.4	1.0	80	2360	1.0	0.7	-	200	21	105
28	601.82m	350	50	80	52	0.4	1.1	90	2360	1.1	0.8	4400	210	-	-
41	Gneis													12	102

\* Probe 41A1R enthält sichtbar Pyrit; der Pyritgehalt liegt jedoch unterhalb der Nachweisgrenze der RDA (< 1 Gew.%).

Ab einer Teufe von 1700 m wird eine kontinuierliche Al - Messung in der Spülung durchgeführt. Es wurden im Mittel K - Gehalte von 250 ppm und Al - Gehalte von 750 ppm bestimmt. Das Bohrmehl kann aus der verdünnten Spülprobe wegen der Adsorptionseffekte für positiv geladene Ionen und der kolloidalen Struktur des D-HT nicht durch Filtration entfernt werden (siehe KTB Report 88-1). Das Bohrmehl wird daher bei der Aufbereitung aus der verdünnten Spülprobe auszentrifugiert. Aber auch durch eine Verlängerung der Zentrifugierdauer (bis zu 5 h bei 5000 U/min) lassen sich die eingebauten Schichtsilikate nicht von den kolloidalen Partikeln des Spülgugszusatzes entfernen. Denkbar ist ein Einbauprozeß der schichtparallelen Verwachsungen ähnelt ("mixed-layer"-Minerale), welche vor allem typisch für Tonminerale sind.

Diese Ergebnisse lassen es sinnvoll erscheinen, zukünftig anstelle des NaOH zur pH - Einstellung der Spülung KOH zu verwenden, da die Bohrspülungsanalysen in Bezug auf die Gehalte an K durch den oben beschriebenen Schichtsilikateinbau in die Gelstruktur des Dehydril verfälscht sind. Dies hätte auch den Vorteil, daß Zutrittshorizonte von migrierenden Wässern durch niedrigere Na - Gehalte in der Bohrspülung leichter auffindbar wären, da das Element Na Hauptkation in den meisten natürlichen Wässern ist.

### C. 4. 3 Dekrepiationsanalytik

Im Berichtszeitraum wurde zusätzlich erstmals die Analyse fluider Einschlüsse mit Hilfe des ICP-Dekrepiationsverfahrens durchgeführt. Gegenüber mikrothermometrischen Untersuchungen an Flüssigkeitseinschlüssen, die einerseits äußerst zeitaufwendig sind und andererseits nur einen indirekten Hinweis auf die Lösungstemperaturen und den Chemismus der Einschlüsse geben, hat das Dekrepiationsverfahren den Vorteil, daß die Zusammensetzung der Einschlüsse direkt gemessen werden kann.

#### Meßprinzip:

Die ICP-Dekrepiationsmethode wurde am Imperial College in London von der Arbeitsgruppe M. Thompson et al. (1980) entwickelt. Die Anfertigung der Dekrepiationsanlage erfolgte am Geochemischen Institut der Universität Göttingen nach dem Vorbild einer entsprechenden Meßeinrichtung am Imperial College in London.

Das Grundprinzip der Messung besteht darin, daß ein schnelles Aufheizen von Kristallen, die Flüssigkeitseinschlüsse enthalten, zur Dekrepiation des Wirtsminerals führt. Ausschlaggebend für das Zerbersten des Wirtsminerals ist der plötzliche Anstieg des internen Flüssigkeitsdrucks bei thermischer Energiezufuhr. Der Inhalt der Flüssigkeitseinschlüsse wird als feines Spray freigesetzt und verdampft. Die Dekrepite werden dann in einem Argonstrom ins Plasma des ICP-AES eingeleitet.

In Abb C. 4. 4 ist schematisch die Meßanordnung für die Dekrepiationsanalyse dargestellt. Für die Dekrepiationsmessung wird der Zerstäuber aus der Zerstäuberkammer des ICP-AES entfernt. Der Trägergasstrom, der den Zerstäuber verläßt, wird zunächst über ein Mehrwegventil in die Dekrepiationskammer geführt. Die Dekrepiationskammer, die die Probe (zumeist Quarz Separate ~ 500 mg) enthält, besteht aus einem Quarz - Reagenzglas ( $\phi = 20$  mm, Länge 18 cm), welches in die Bohrung eines elektrischen Ofens eingebracht wird. Der elektrische Ofen wird mittels eines Thermoelements und eines Ein/Aus - Reglers auf die gewünschte Temperatur eingestellt (bei Routine - Messungen  $650^{\circ}\text{C}$ ). Der Trägergasstrom führt die Dekrepite beim Verlassen der Dekrepiationskammer über das Mehrwegventil direkt ins Plasma. Die externe Argonversorgung des Plasmas über das Mehrwegeventil ermöglicht ein Wechseln der Proben in der Dekrepiationskammer. Die Eichung der Dekrepiationsanalysen erfolgt durch Zerstäubung von Standardlösungen bekannter Zusammensetzung.

# Flußdiagramm für die ICP-Dekrestitutionsanalytik

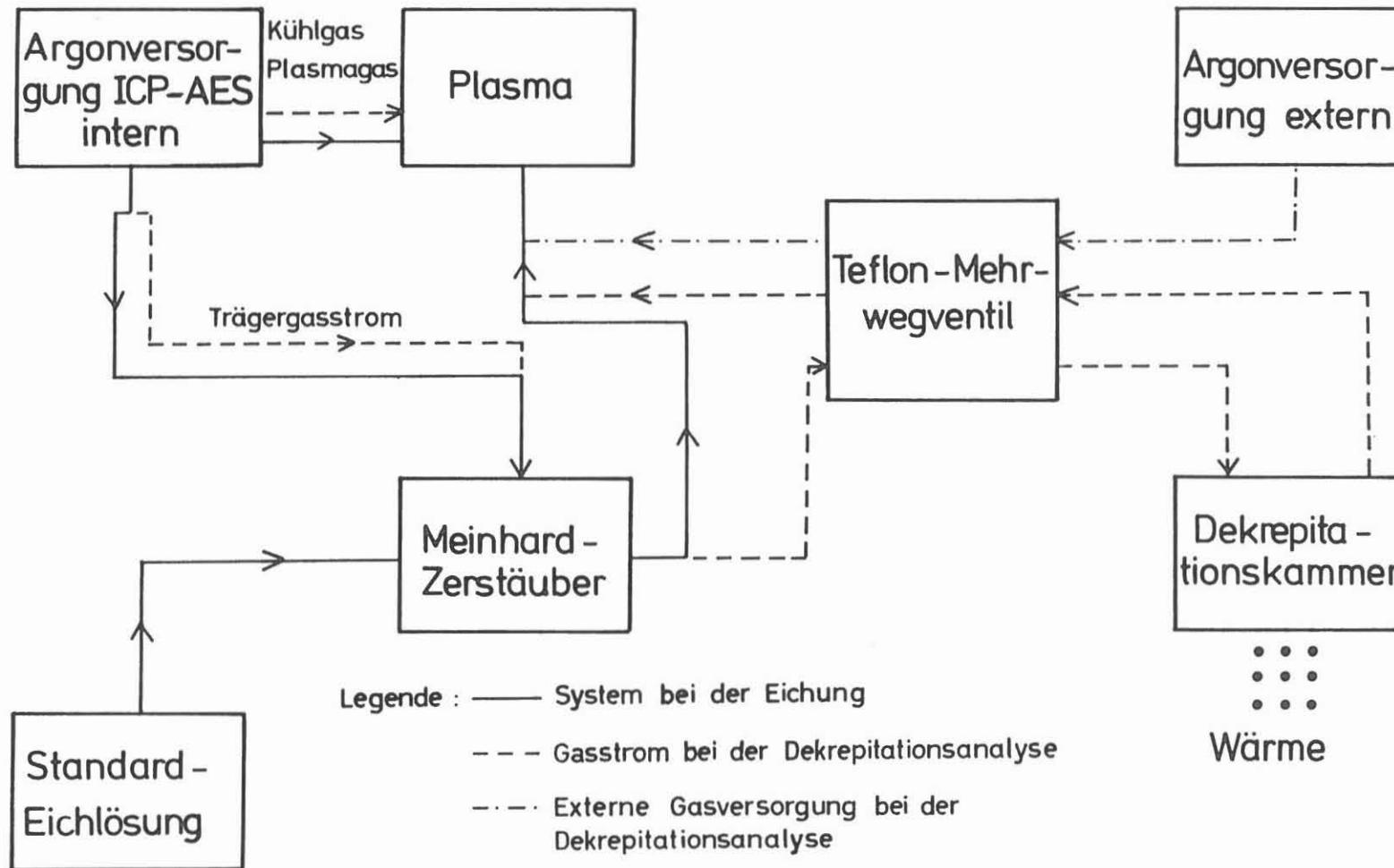


Abb. C. 4. 4. 4:

Voraussetzung für die Dekrepiationsanalyse ist die simultane Messung aller Elemente, da das Zerplatzen der Einschlüsse nur während eines sehr kurzen Zeitraumes - im 10er Sekundenbereich - stattfindet. Routine - Messungen werden bei einer Vorintegrationszeit von 15 sec und einer Intergrationszeit von 45 sec durchgeführt.

Das ICP-AES im Feldlabor ist für simultane Analysen mit 10 feststehenden Photoröhren zur Messung der Elemente Na, Ca, K, Li, Si, Al, P, S, Zn und Sc ausgestattet. In der Tabelle C. 4. 6 sind die zur Analyse ausgewählten Spektrallinien dieser Elemente aufgeführt.

Tab. C. 4. 6 Wellenlängen der ausgewählten Spektrallinien

Element	Wellenlänge (Å)	mögliche spektrale Interferenzen
Ca	3933.66	Sc, Ti <sup>(1)</sup> , V <sup>(2)</sup>
Al	3961.53	Co, Ti, Ce, Sm, Ca <sup>(1)</sup> , V <sup>(2)</sup>
P	1782,83	I <sup>(1)</sup>
S	1807,31	-
Na	5895,92	Fe, Ti, V <sup>(2)</sup>
Zn	2138.55	Cu, V <sup>(1)</sup> , Al, Fe, Ni, Ti <sup>(2)</sup>
Li	6707.84	V, Ti <sup>(2)</sup>
Sc	3613.80	Ce, Mo, Tb, Th, Dy, Zr <sup>(1)</sup> , Cr, Cu, Fe <sup>(2)</sup>
Si	2516.12	Yb, Mo, Hf, Cr, V <sup>(1)</sup> , Fe, Mn <sup>(2)</sup>
K	7664.91	Ti <sup>(2)</sup>

(<sup>1</sup>) Heinrichs et al. (1985)

(<sup>2</sup>) Winge et al. (1985)

Bei der Auswahl der Spektrallinien wurden intensitätsstarke, möglichst interferenzfreie Linien bevorzugt.

#### Ergebnisse und Diskussion:

Die Ergebnisse der ersten Dekrepiationsanalysen sind in Abb. C. 4. 5 in Form eines Dreieckplots der Hauptkationen ( $\Sigma$  Na + Ca + K) in den fluiden Einschlüssen dargestellt. Da das Ausmaß der Dekrepiation auch bei Wiederholungsmessungen an verschiedenen Teilmengen separierter Quarze derselben Probe unterschiedlich stark sein kann, ermöglicht die Dekrepiationsanalyse nur die Bestimmung der Elementverhältnisse. Die Berechnung der absoluten Elementgehalte aus der Dekrepiationsanalyse ist dann möglich, wenn die Salinität der fluiden Einschlüsse durch mikrothermometrische bzw. kryometrische Messungen (Heiz- bzw. Kühltisch) bekannt ist (Rankin et al., 1982). Salinitätsbestimmungen können jedoch im KTB - Feldlabor nicht durchgeführt werden.

Abb. C. 4. 5 A zeigt die Ergebnisse von Wiederholungsmessungen, die an einer Quarzlinse aus dem Bereich des "Eckergneises" (Harz) durchgeführt wurden. Teilmengen von Quarz-Separaten dieser Probe wurden sowohl am Imperial College in London (dargestellt durch "X") als auch im KTB - Feldlabor (dargestellt durch ".") auf ihre Flüssigkeitseinschluß-Zusammensetzung untersucht. Die darstellenden Punkte der beiden Meßserien stimmen gut überein. Für die K/Na-Verhältnisse wird eine Reproduzierbarkeit von 10 %, für die Ca/Na-Verhältnisse von 5 % relativer Standardabweichung erzielt.

Abb. C. 4. 5 B zeigt die Ergebnisse der ersten Dekrepitationsanalysen, die an Separaten aus Quarzgängen der KTB - Vorbohrung (Teufen siehe Abbildungsunterschrift) durchgeführt wurden.

Hauptsächlich treten in diesen Quarzgängen sekundäre, ein- bis zweiphasige Einschlußbahnen auf. Die zweiphasigen Einschlüsse weisen neben einer flüssigen Phase eine " Gasblase " auf, die beim Abkühlen der im Quarz eingeschlossenen thermalen Lösung entstand. Die relative Größe des Blasenvolumens, bezogen auf das Gesamtvolumen des Flüssigkeitseinschlusses ist ein Maß für die ursprüngliche Temperatur der hydrothermalen Lösung. Je größer die Gasblase in mehrphasigen Einschlüssen ist, desto höher war die Temperatur der hydrothermalen Lösung. Die fluiden Einschlüsse aus Quarzgängen der KTB - Vorbohrung haben vorwiegend ein geringes Blasenvolumen von 1 - 3 Vol %. Hieraus läßt sich eine relativ niedrige ehemalige Lösungstemperatur ableiten ( $\leq 150$  °C).

Die Einschlußanalyse (s. Abb. C. 4. 5) zeigt, daß Na das dominante Kation ist. Der relative Ca - Gehalt in der  $\Sigma$  Na + Ca + K variiert zwischen 2 bis 18 Gew%. Der K - Gehalt lag bei den ersten Dekrepitationsanalysen unterhalb der Nachweisgrenze.

Das K/Na - Verhältnis fluider Phasen im Gleichgewicht mit dem Alkalifeldspatsystem  $K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$  ist temperaturabhängig. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch das K/Na - Verhältnis der Lösung. Ein relativ geringer K - Gehalt in den fluiden Einschlüssen spricht für eine niedrige Temperatur der Lösung, die zur Bildung der Einschlüsse geführt hat. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der oben beschriebenen Einschlußpetrographie.

Aus den Fluidanalysen läßt sich also prinzipiell eine Temperaturabschätzung der hydrothermalen Lösungen, die durch die fluiden Einschlüssen repräsentiert werden, durchführen.



## C.5 Gasanalytik

Mit Hilfe der Bestimmung der in der Bohrspülung gelösten Gase ist es möglich, gasförmige und wäßrige Zuflußhorizonte zu lokalisieren und deren Gaszusammensetzung festzustellen. Im Gegensatz zu der analog durchgeführten Bohrspülungsanalytik liefert die Gasanalyse on line - Ergebnisse. Somit sind Änderungen in der Gaszusammensetzung sofort feststellbar.

Das Konzept einer kontaminationsfreien Bohrspülungsentgasung mit einem neu entwickelten Spülungsentgaser (NL - BAROID) konnte infolge technischer Schwierigkeiten bisher noch nicht realisiert werden. Deshalb wurde vorübergehend auf eine konventionelle Gasprobennahme (Quirlentgaser - GEODATA) zurückgegriffen. Dieser Quirlentgaser befindet sich zwischen dem Auslauf der Spülung und dem Schüttelsieb (Abb. C.5.1) in der vorbeifließenden Bohrspülung. Das von der Gasfalle freigesetzte Gas wird über eine Gasleitung zum Massenspektrometer gepumpt.

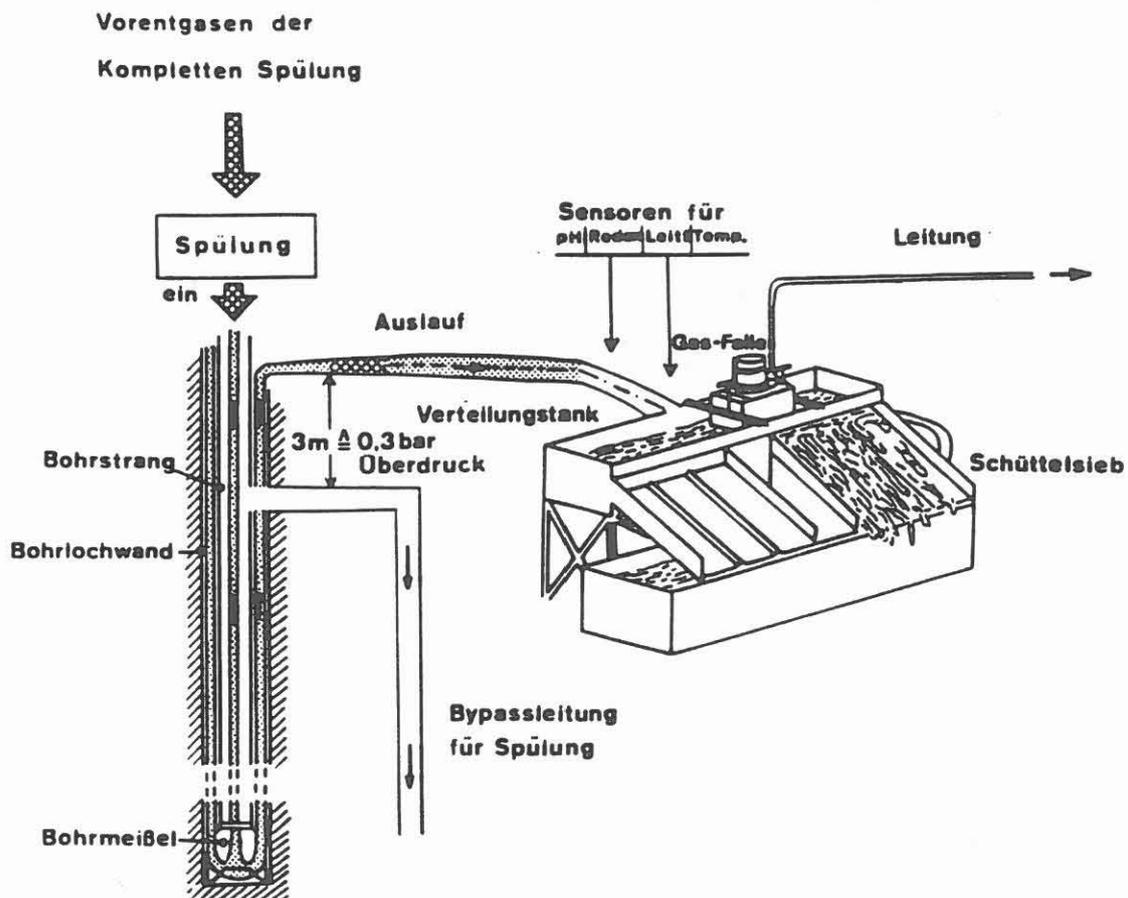


Abb. C.5.1: Schematische Darstellung der Gasprobennahme

Die gesamte zirkulierende Bohrspülung wird, bevor sie wieder durch den Bohrstrang ins Bohrloch gepumpt wird, über einen separaten Spülungsentgaser entgast. Die von diesem Entgaser freigesetzten Gase zeigen Luftzusammensetzung; d.h., die Bohrspülung wird schon beim Durchlaufen des Schüttelsiebs vollständig entgast und mit Luft equilibriert.

Über die vom Quirlentgaser freigesetzten Gasmengen lassen sich keine Aussagen machen, da weder die entgaste Bohrspülungsmenge und der Anteil an Fremdluft, noch die freigesetzte Gasmenge absolut bekannt sind. Die vom Quirlentgaser freigesetzte Gasmenge wird deshalb auf 100 % festgelegt, um einen Bezugspunkt bei der nachfolgenden Analyse der einzelnen Gasanteile festzulegen. Der Anteil der in der Bohrspülung gelösten Gasmenge muß jedoch sehr gering sein, da keine Gasbläschen in der Spülung beobachtet und die mit der Bohrspülung abgefüllten Polyäthylenflaschen nicht aufgebläht werden.

#### C.5.1 Funktionsprinzip des Prozeßgas-Massenspektrometers

Die Gasanalyse wird mit einem Prozeßgas-Massenspektrometer (MS) der Fa. VAKUUM GENERATORS durchgeführt. Das zu messende Gas wird innerhalb des MS in einer Ionenquelle ionisiert. Die Gasatome und/oder Gasmoleküle werden nach der Ionisierung in einem elektrischen Feld mit der Potentialdifferenz  $V$  auf eine Geschwindigkeit  $u$  beschleunigt. Ein Gasion der Masse  $m$  und der Ladung  $ze$  bekommt dann die kinetische Energie :

$$zeV = \frac{m \cdot u^2}{2}$$

Die beschleunigten Ionen gelangen in das Magnetfeld (Analysatorregion) des MS. Das magnetische Feld  $B$  übt eine Kraft ( $B \cdot ze \cdot u \approx$  Lorentzkraft) auf die Gasionen aus. Die Richtung dieser Kraft ist senkrecht zu der magnetischen Feldrichtung und der Bewegungsrichtung der Ionen. Damit beschreiben die Ionen im Magnetfeld eine Kreisbahn, deren Krümmungsradius ( $R$ ) sich aus dem "Gleichgewicht" zwischen Zentrifugalkraft ( $mu^2/R$ ) und der Kraft des magnetischen Feldes ergibt.

$$Bzeu = \frac{m \cdot u^2}{R} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R} = \frac{B \cdot ze}{m \cdot u}$$

Das magnetische Feld lenkt die monoenergetischen Ionen in Abhängigkeit ihres Masse/Ladungsverhältnisses ab. Die Ionen werden durch Blenden am Eingang und Ausgang der Analysatorregion "gefiltert". Der Ionenstrom wird am Magnetausgang mit einem Faraday-Becher oder Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) gemessen.

### C.5.2 Ergebnisse des Teufenbereichs 992 - 1530 m

Im Anhang C.9.4 sind die Teufenlogs der gemessenen Gase dargestellt. Aufgetretene Datenlücken entstanden durch notwendige Umrüstungen am MS während der Bohrphase und sind durch 0-Meßwerte gekennzeichnet. Im Teufenbereich 1150 - 1240 m wurde die Position des Quirlentgasers in der Spülungsrinne (Sandfalle) ohne Rücksprache so geändert, daß die Gasfalle in der stehenden Spülung hing. Als freigesetzte Gasphase wurde in dieser Zeit nur Luft gemessen (Datenlücke).

Ganz allgemein ist die Gaszusammensetzung der aus der Bohrspülung freigesetzten Gase von den eingesetzten Bohrwerkzeugen (Rollenmeißel - Diamantbohrkrone) abhängig. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der eingesetzten Rollenmeißeln betrug weniger als 100 Umdrehungen pro Minute, während die eingesetzten Diamantbohrkronen bei mehr als 200 Umdrehungen pro Minute in Betrieb waren. Inwieweit auch eine Änderung der Bohrspülungszusammensetzung eine Rolle spielt, muß noch geklärt werden. Die Variationsbereiche der freigesetzten Gase während des Berichtszeitraums sind für beide Meißelarten in Tabelle C.5.1 zusammengestellt. Mit den eingesetzten Rollenmeißelwerkzeugen wurden keine Kerne erbohrt, sondern sie wurden nur für Richtbohrarbeiten eingesetzt.

Tab.C.5.1 : Variationsbereiche der freigesetzten Gase im Teufenbereich 992 - 1530 m

	Rollenmeißel			Diamantbohrkrone		
N <sub>2</sub>	78	-	92 %	78	-	97 %
O <sub>2</sub>	5.5	-	20.9 %	1.5	-	20.9 %
Ar	0.93	-	1.0 %	0.93	-	1.5 %
CO <sub>2</sub>	0	-	0.8 %	0	-	0.04 %
He	5	-	9 ppm	5	-	20 ppm
CH <sub>4</sub>	0	-	380 ppm	0	-	2200 ppm
H <sub>2</sub>	0	-	1000 ppm	0	-	16000 ppm

Im Teufenbereich 1228 - 1530 m wurde, wie schon erwähnt, das Seilkernbohrverfahren eingesetzt und somit kommt es infolge von Bohrkernentnahmen zu häufigen Abschaltungen der zirkulierenden Bohrspülung. Auf diese Weise werden die sehr stark variierenden Meßwerte verursacht, da diese Zirkulationsstill-

stände im Bereich des Quirlentgasers eine Equilibrierung der Bohrspülung mit der Luft bewirken und bei Zirkulationsbeginn durch O<sub>2</sub> - Anstieg und H<sub>2</sub> - Abnahme charakterisiert sind. Je nach Zeitdauer dieser Zirkulationsstillstände lassen sich nach Zirkulationsbeginn Bohrstillstandsgase (Tripgase), die meist aus dem Bereich der Bohrlochsohle stammen, feststellen. Diese Tripgase zeichnen sich durch deutlich höhere CH<sub>4</sub>-, He- und CO<sub>2</sub> - Gehalte aus (Tab. C.5.2).

Tab.C.5:2 : Vergleich zwischen "erbohrten Gasen" und Bohrstillstandsgasen (Tripgase)

	Teufe 1492 m	"Tripgas"
CO <sub>2</sub>	0.02 %	0.03 %
He	8 ppm	11 ppm
CH <sub>4</sub>	180 ppm	950 ppm
H <sub>2</sub>	6100 ppm	930 ppm

Die Teufenlogs der unterschiedlichen Gase zeigen, daß sich N<sub>2</sub> und Ar umgekehrt zum O<sub>2</sub> verhalten. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine vermehrte N<sub>2</sub>- und Ar- Freisetzung während des Bohrprozesses, sondern um eine O<sub>2</sub>- Aufzehrung. Deswegen kommt es zu einer scheinbaren N<sub>2</sub>- und Ar- Anreicherung, da die Meßergebnisse, wie schon erwähnt, immer auf 100% bezogen sind.

Die Eh- und pH - Meßwerte der Bohrspülung werden von der Mud Logging Unit (ARGE PREUSSAG, NL - BAROID und GEODATA) gemessen. Die Teufenbereiche, die sich durch niedrige O<sub>2</sub> - Gehalte auszeichnen, können ebenfalls durch niedrige Eh-Werte charakterisiert werden. Alle Eh-Werte, die kleiner 0 mV waren, wurden in diesem Bericht als 0-Meßwerte dargestellt (Software-Anpassung). In der folgenden Abb. C.5.2 ist ein direkter Vergleich zwischen den O<sub>2</sub> - Gehalten im freigesetzten Gas und den Eh - Werten der Bohrspülung dargestellt.

Trotz der häufigen Zirkulationsabschaltungen und der dadurch bedingten Equilibrierung der Spülung mit Luft lassen sich Zonen eingrenzen, die O<sub>2</sub>-Minima aufweisen. Solche Bereiche befinden sich in folgenden Tiefen :

1070 - 1088 m	1380 - 1405 m
1100 - 1103 m	1430 - 1445 m
1113 - 1130 m	1465 - 1500 m
1300 - 1325 m	1510 - 1520 m

Diese Zonen müssen reduzierende Spezies, wie z.B. Sulfide und Graphit führen, um diese O<sub>2</sub>-Abnahmen in der Bohrspülung produzieren zu können.

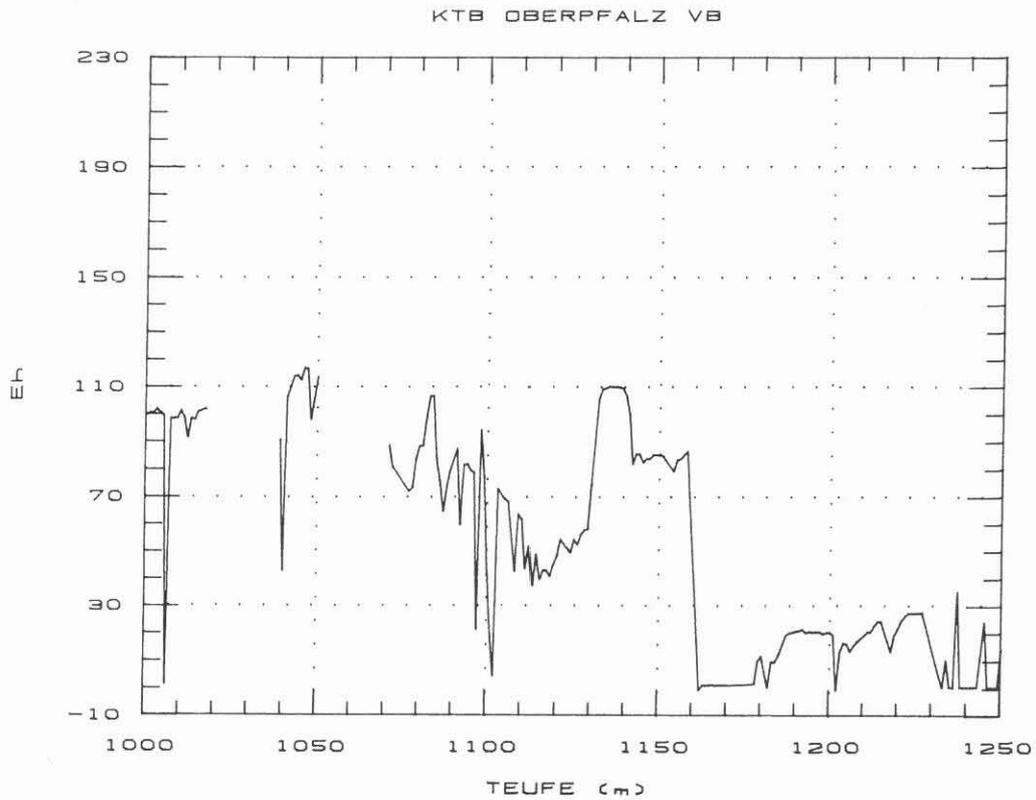
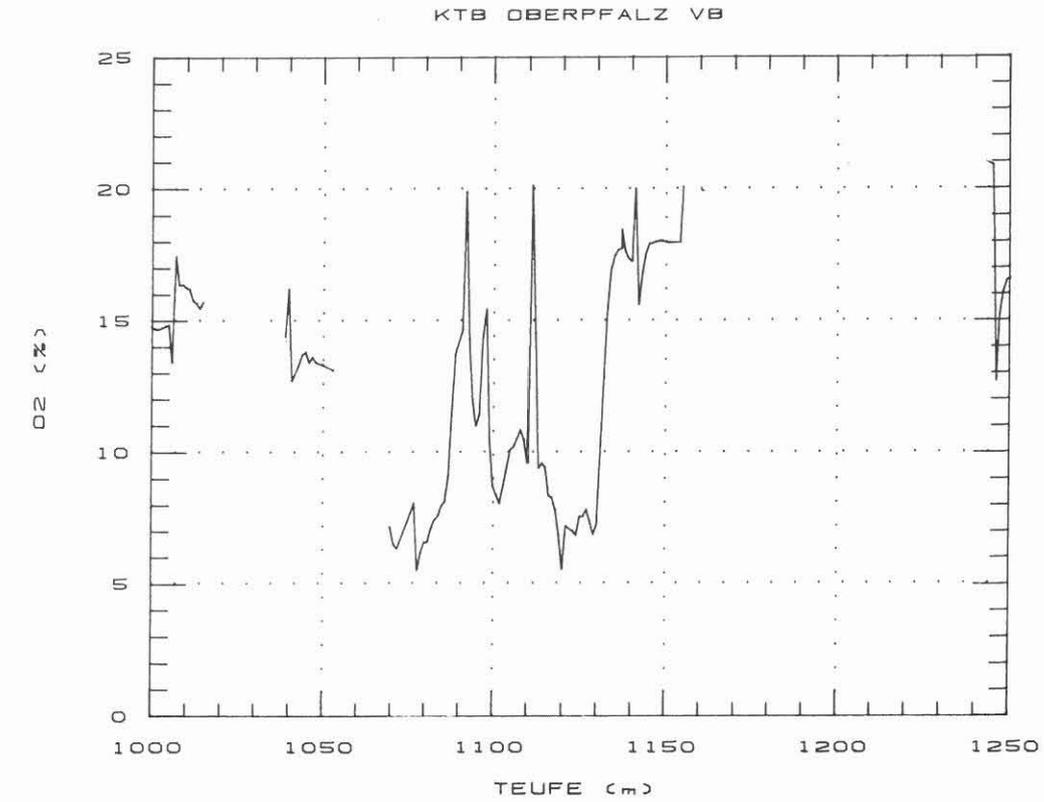


Abb.C.5.2 : Vergleich zwischen O<sub>2</sub>-Gehalten der freigesetzten Gase aus der Bohrspülung und den Eh-Werten der Bohrspülung.

Bei Einsatz des Rollenmeißels (992 - 1228 m) werden nicht so niedrige O<sub>2</sub> - Gehalte erreicht wie beim Bohren mit Diamantkronen (1228- 1530 m). Die Ursache könnte in der Korngröße der anfallenden Feststoffe liegen, denn im Teufenbereich 992 - 1228 m fallen Cuttings und im anschließenden Teufenbereich Bohrmehl an. Das sehr fein aufgemahlene Gesteinspulver weist eine erheblich größere Oberfläche als die Cuttings auf. Durch diesen Oberflächeneffekt kann es sehr viel intensiver mit der Bohrspülung "reagieren" (O<sub>2</sub> verbrauchen).

Einzelne Bereiche zeichnen sich durch erhöhte CH<sub>4</sub> - Gehalte (>150 ppm) aus. Die Grenze bei 150 ppm ist willkürlich gewählt. Der "Backgroundwert" während des Bohrens liegt bei 100 ppm. Folgende Horizonte können als "CH<sub>4</sub> - Lieferanten" gekennzeichnet werden:

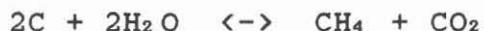
1070 m	1340 m
1100 m	1375 - 1380 m
1103 m	1405 m
1305 m	1505 - 1530 m

Die O<sub>2</sub>-Minima und die CH<sub>4</sub>-Maxima korrelieren sehr gut miteinander. Diese Zonen werden von der Arbeitsgruppe Geologie als graphitführende Horizonte identifiziert. In den Amphiboliten, ab ca. 1160 m, konnten makroskopisch keine graphitführenden Horizonte festgestellt werden. Die Gasanalytik belegt jedoch, daß zumindest geringe Graphitgehalte in den aufgeführten Teufenbereichen vorkommen müssen. An die graphitführenden Horizonte ist durchweg eine sulfidische Vererzung (meist Pyrit) gebunden. Diese Sulfidanreicherungen lassen sich mit den RFA/RDA - Analysen belegen, und stimmen ausgezeichnet mit den durch CH<sub>4</sub> - Peaks markierten Teufenbereichen überein.

Das durch den Quirlentgaser freigesetzte Methan könnte aus zwei unterschiedlichen "Quellen" bzw. aus Mischungen dieser "Quellen" stammen:

1. Methan wurde während der Metamorphose gebildet.
2. Methan wurde extern durch Infiltration und/oder Diffusion zugeführt (Ursprung: meteorisch, magmatisch oder metamorph).

Die graphitführenden Horizonte sind durchweg an Störungszonen gebunden. Deutlich treten diese Horizonte nur in den Gneisen auf. In den durchteuften Amphiboliten wurden, wie schon erwähnt, makroskopisch keine Graphitanreicherungen festgestellt. Somit könnte die Zersetzung von organischem Material aus den Sedimenten den Ursprung für den Graphit darstellen. Da die Störungszonen erst deutlich nach der Metamorphose der Sedimente angelegt wurden, müssen Transportprozesse für den Graphit stattgefunden haben. Der Graphit kann jedoch nur als Gasphase transportiert werden. Ein möglicher Transportmechanismus könnte nach dem folgenden Schema stattgefunden haben:



Graphite enthalten je nach den p - und T - Bedingungen ihrer Bildung noch bis in den Prozentbereich flüchtige Bestandteile ( z.B.  $\text{CH}_4$  ). Da in den graphitführenden Horizonten deutlich höhere Methangehalte auftreten, könnte der Graphit in Form von Methan transportiert worden sein.

Unter geologisch relevanten p - T - Bedingungen sind in einem C - O - H - S - System folgende Komponenten vorhanden:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{SO}_2$ .

Die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten und der Zusammensetzung der C - O - H - S - Fluide ist in Abb. C.5.3 dargestellt.

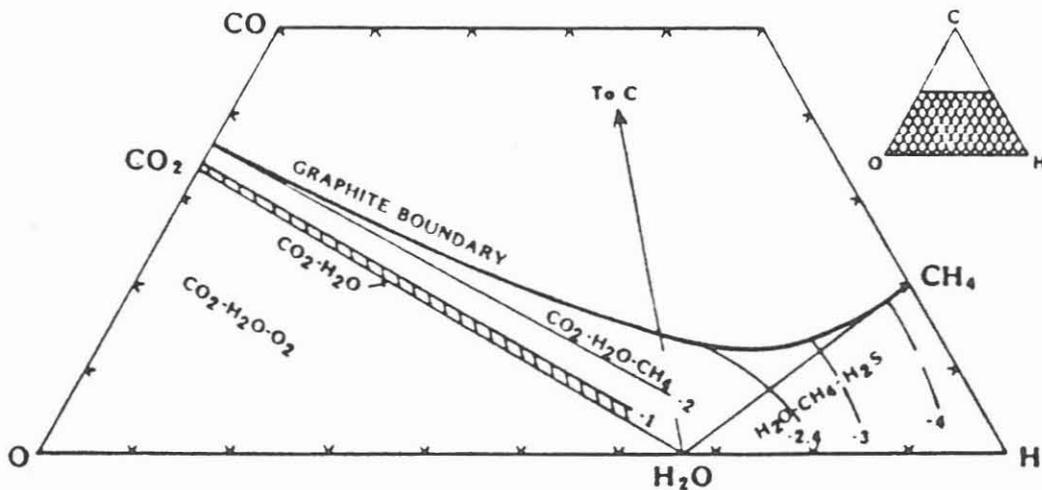


Abb. C.5.3: Zusammensetzung von C-O-H-S - Fluiden bei  $T=1100^\circ\text{C}$  und  $p=5000\text{bar}$ .  $f_{\text{S}_2}$  ist definiert durch  $\text{Fe}_{0.905}\text{S}$  (HOLLOWAY, 1981).

Das Diagramm C.5.3 wurde zwar für extrem hohe Temperaturen aufgestellt, aber es lassen sich doch einige generelle Beziehungen erkennen. Fluide, die ihren darstellenden Punkt auf der  $H_2O - CO_2$  - Linie besitzen, bestehen aus den beiden Komponenten  $H_2O$  und  $CO_2$ . Fluide, deren Zusammensetzung innerhalb der Grenzen  $H_2O - CO_2$ ,  $H_2O - CH_4$  und der Graphitgrenze (graphite boundary) liegt, sind  $H_2O - CO_2 - CH_4$  - Gemische unterschiedlicher Zusammensetzung. Das Fluidzusammensetzungsfeld  $O_2 - CO_2 - H_2O$  ist bei der Metamorphose noch nicht verwirklicht.

Fluide, deren C - Anteil größer ist als der Gehalt, der durch die Graphitgrenze markiert ist, sind in der Natur nicht gegeben. Solche Fluide bestehen dann aus Graphit sowie  $CH_4$ ,  $CO_2$  und  $H_2O$  mit wechselnder Zusammensetzung. Die Anwesenheit von Graphit im Gestein limitiert somit die Zusammensetzung der koexistierenden C - O - H - S - Fluide.

Diese Zusammensetzung variiert auch mit der Temperatur (Abb. C.5.4).

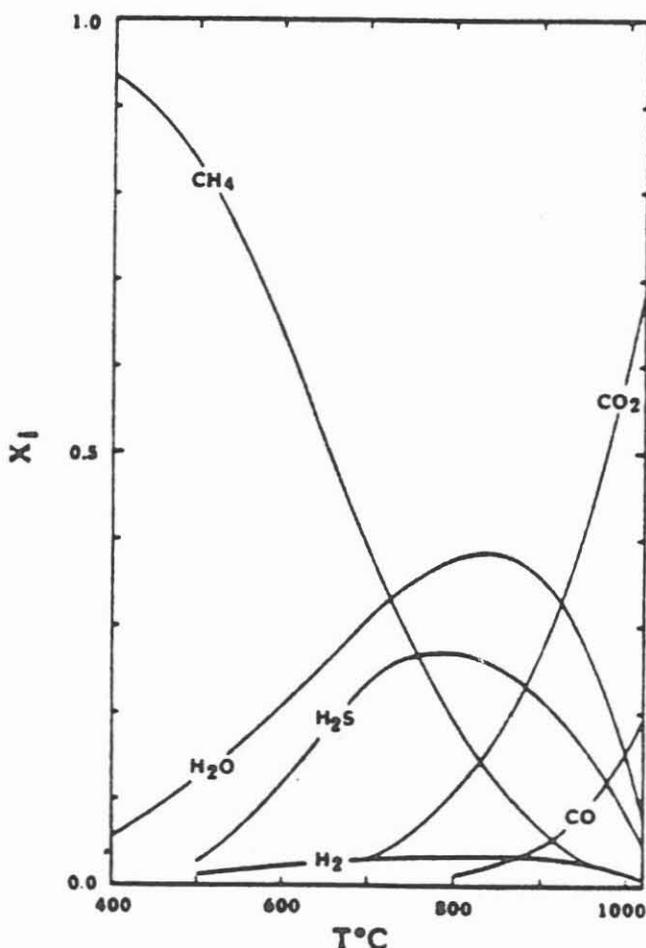


Abb. C.5.4.: Zusammensetzung von C-O-H-S - Fluiden bei Anwesenheit von Graphit. P, T und  $f_{s2}$  wie in Abb. C.5.4 (HOLLOWAY, 1981)

So sind die mit Graphit koexistierenden Fluide bei Temperaturen von 500°C überwiegend aus Methan und bei ca. 900°C hauptsächlich aus H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> zusammengesetzt.

Die Graphitabscheidung aus der Gasphase (CH<sub>4</sub>) benötigt "oxidierendere" Bedingungen und/oder p - T - Änderungen und könnte, wie schon erwähnt, analog der Gleichung



erfolgt sein. Das dabei freiwerdende Wasser könnte durch die Bildung von Chlorit aufgebraucht werden, da die Störungszonen durch Chloritanreicherungen charakterisiert sind (Tabelle C.5.3). Wird als primäre Quelle des Graphits organisches Material vorausgesetzt, so enthalten diese organischen Substanzen auch Schwefelverbindungen. Bei den Transportprozessen des Kohlenstoffs könnten die Schwefelkomponenten ebenfalls über eine Gasphase (H<sub>2</sub>S) mittransportiert und in den Störungszonen als sulfidische Vererzung (meist Pyrit) ausgeschieden werden (Tab. C.5.3).

In den Störungszonen lassen sich nämlich neben Graphit - und Chloritanreicherungen auch meist Sulfidvererzungen nachweisen. Denkbar ist natürlich auch eine nachträgliche (nach der Graphitabscheidung) Vererzung.

Setzt man für die gemessenen He - Gehalte ebenfalls einen Grenzwert bei > 10 ppm fest, dann lassen sich folgende Tiefenbereiche lokalisieren, in denen He angereichert ist:

1305 m  
1405 m  
1515 - 1530 m

<sup>4</sup>He wird in der Natur durch radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium ständig neugebildet. Diese He - Bildungsprozesse laufen nach folgendem Schema ab :



Die reduzierende Wirkung des Graphits bewirkt eine Uranausfällung aus migrierenden uranhaltigen Lösungen und führt zu einer Urananreicherung in kohlenstoffreichen Horizonten. Dieser Prozeß ist in der Natur weit verbreitet. Erste U- und Th- Bestimmungen an einer graphitreichen Zentrifugenprobe (1992m) ergaben 18 bzw. 13ppm. In Erdkrustengesteinen beträgt das U/Th-Verhältnis ca.1:4, während es in dieser Probe 1.4:1 beträgt. Somit wurde das Uran in dieser graphitreichen Probe elementspezifisch angereichert.

Diese Ergebnisse legen nahe, daß die He-Anreicherung in den Gasen durch radiogen gebildetes He zustande kommt.

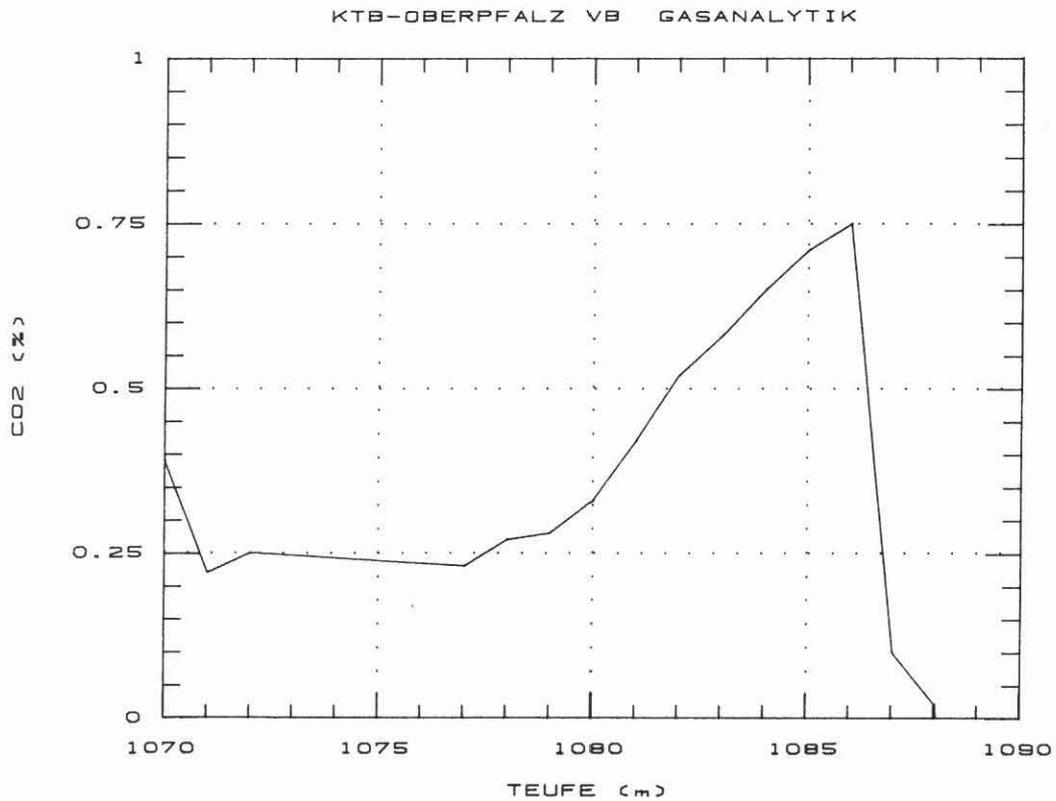
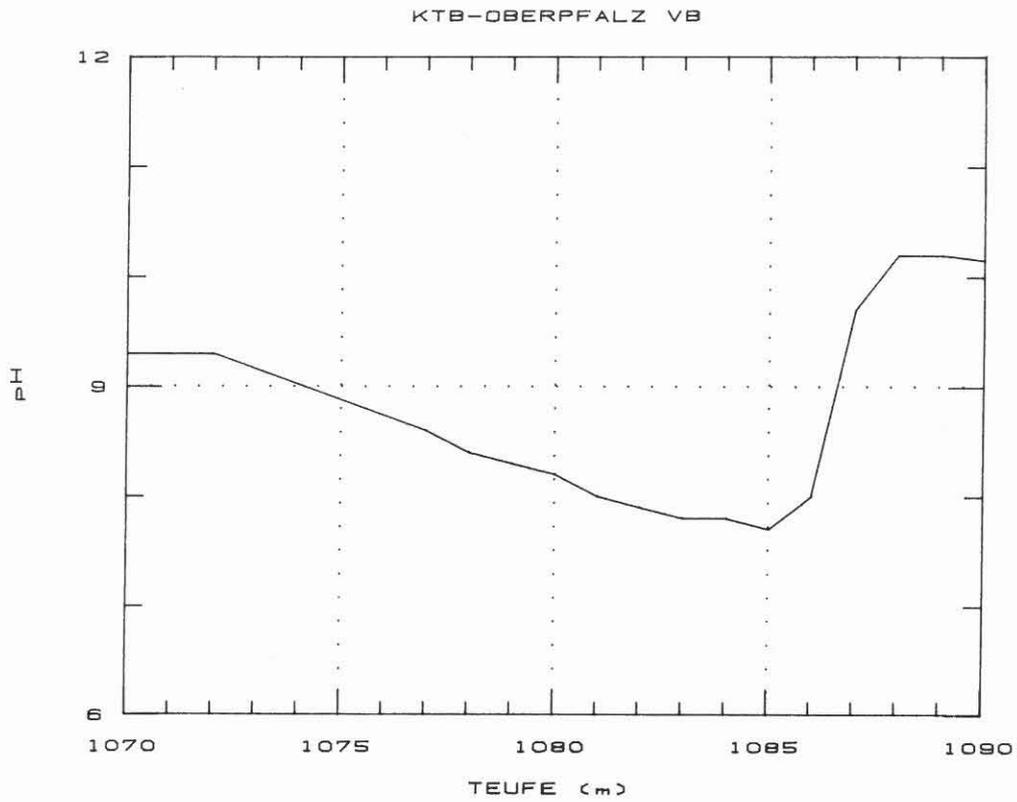


Abb. C.5.5: Vergleich zwischen den CO<sub>2</sub> - Gehalten der freigesetzten Gase aus der Bohrspülung und dem pH - Wert der Bohrspülung.

Im direkten Vergleich der Wasserstoff-Gehalte im Teufenbereich 992 - 1228 m (Rollenmeißel) und 1228 - 1530 m (Diamantkronen) kann deutlich aufgezeigt werden, daß ab 1246 m die H<sub>2</sub>-Gehalte sprunghaft ansteigen. Bei den im Anhang graphisch dargestellten H<sub>2</sub>-Gehalten des Teufenbereichs 1250 - 1550 m sind Diamantkronenwechsel durch  $\wedge$  - Symbole markiert. Dadurch wird sofort sichtbar, daß sich die H<sub>2</sub>-Gehalte nach einem Wechsel des Bohrwerkzeuges ändern. Die H<sub>2</sub>-Gehalte, die während der Bohrphase mit Rollenmeißel gemessen werden konnten, sind signifikant niedriger.

Somit kann eindeutig belegt werden, daß je nach Bohrkronentyp (Material) durch Wechselwirkung der Bohrkrone mit dem Gestein (Reibung) und der Spülung (H<sub>2</sub>O) H<sub>2</sub> gebildet wird. Es muß sich bei den gemessenen H<sub>2</sub>-Gehalten überwiegend um artifizielles Gas handeln.

Die durch den Quirlentgaser freigesetzten und mit dem MS gemessenen CO<sub>2</sub>-Gehalte sind sehr gering. Sie werden in erster Linie durch den pH-Wert der Bohrspülung gesteuert.

In der Abb. C.5.5 ist diese Beziehung graphisch dargestellt.

Die Teufenbereiche, die durch erhöhte CO<sub>2</sub> - Gehalte markiert werden, zeigen sehr hohe Schwefelgehalte in den untersuchten Feststoffen. Inwieweit der pH-Wert der Bohrspülung mit den Schwefelgehalten der Feststoffe zusammenhängt wurde schon im Kapitel (Spülungsanalytik) ausführlich erläutert. Der pH-Wert hat großen Einfluß auf das rheologische Verhalten der Bohrspülung und wird deshalb durch technische Einleitungen von NaOH in das Spülungssystem auf einem "künstlichen" Level gehalten, wodurch ein Vergleich mit anderen Parametern nicht möglich ist. Eine systematische "Kartierung" dieser schwefelreichen Gesteinshorizonte kann daher nicht durchgeführt werden.

### C.5.3 Festlegung von Störungszonen anhand chemischer Parameter

Mit Hilfe chemischer Parameter können die im Berichtszeitraum aufgetretenen Störungszonen charakterisiert werden. Dabei werden sowohl RFA -, RDA - als auch MS - Meßergebnisse zu Grunde gelegt. In erster Linie sind dies die Gehalte von Schwefel, Chlorit, Sulfiderze (Pyrit + Zinkblende), Methan, Helium und Sauerstoff. Für die einzelnen Elemente bzw. Minerale wurden die durchschnittlichen Grundgehalte ermittelt. Eine Überschreitung dieser "Backgroundwerte" dient zur Klassifizierung der Störungszonen. In der nachfolgenden Tabelle C.5.3 sind die durch chemische und mineralogische Parameter charakterisierten "Störungszonen" aufgeführt.

Tabelle C.5.3: Charakterisierung von "Störungszonen"

Tiefe (m)	Schwefel	Chlorit	Pyrit +Zinkbl.	Methan	Helium	Sauerstoff
992 - 996	X	X	XX	D1	D1	D1
1024 - 1040	XXX	X	X	D1	D1	XX
1102 - 1116	XX	X		D1	D1	X
1131 - 1135	X	X		D1	D1	X
1140 - 1162	X	X		D1	D1	D1
1178 - 1182	X	X		D1	D1	D1
1186 - 1190	X			D1	D1	D1

1230 - 1270	XXX	X	XX	XX		X
1295 - 1296	X	X	XX			
1299	X					
1302 - 1304	X	X	XX	XX	X	X
1318 - 1322	XX	X		XX		X
1340	XX	X		X		
1356	XX	X				
1360	X	X				
1364 - 1366	X					
1375 - 1380	XX	X	XX	X		X
1386	X	X		X		XX
1400	X					X
1406	XX			XX	X	XX
1446	X					X
1462	XXX	X	XX	XX		X
1466	XX	X	XX			XX
1468	X			X		X
1476 - 1478	XX			X		XX
1482 - 1486	XX	X		X		X
1490 - 1532	XXX		XX	XX	XX	XX

	"Background"	X	XX	XXX	
S	<1000	1000-5000	5000-10000	>10000	ppm
Pyr	-	≈1	>1		%
Chl	<10	10-20			%
He	0-10	10-20	>20		ppm
CH <sub>4</sub>	<150	150-300	>300		ppm
O <sub>2</sub>	20.9-10	10-5	<5		% D
O <sub>2</sub>	20.9-15	15-10	<10		% R

D = Diamantbohrkrone

R = Rollenmeißel

— = Übergang von Rollenmeißel zu Diamantbohrkrone

D1 = Datenlücke

## C.6. Zusammenfassung

An dem im Teufenbereich 992 - 1530 m erbohrten Material wurde im 2 m Abstand eine quantitative Bestimmung des Stoffbestandes durchgeführt. Durch die Richtbohrarbeiten im Teufenbereich 992 - 1228 m konnte aus dieser Formation nur ein einziger Kern (KM 253) erbohrt werden. In diesem Bereich wurde der Probenabstand des Bohrkleins deshalb auf 1 m verdichtet.

Anhand der chemischen und mineralogischen Daten wurde der Versuch unternommen, ein lithologisches Profil zu erstellen. Die erzielten Ergebnisse zeigen eine monotone, alterierte Gneisserie die bei einer Teufe von 1160 m in eine Metabasitserie übergeht. Diese Metabasite weisen als Hauptgemengteile Amphibol und Plagioklas auf und sind teilweise sehr granatreich (bis 28 Gew.-%). Sie werden daher als Granat-Amphibolite bzw. Amphibolite bezeichnet. In dieser Abfolge konnten in den Teufenbereichen 1327-1337 m, 1381-1386 m, 1400 m und 1410 - 1416 m Meta-"Ultrabasite" ( $\text{SiO}_2$  42 - 46 Gew.-%) nachgewiesen werden. Bei Teufe 1449.21 (Kernstück 300G1j) steht ein Serpentin (Serpentin 41 Gew.-%) an. Der Teufenbereich 1476 - 1532 m ist durch eine Abfolge von vererzten Bt- und granatführenden Hbl-Gneis und Amphiboliten gekennzeichnet.

Während der Richtbohrarbeiten konnten über einen großen Bereich zwei unterschiedliche Feststoffproben (Cuttings und Bohrmehl aus der Zentrifuge) untersucht werden. Durch die vergleichenden Untersuchungen konnte belegt werden, daß die beim Seilkernverfahren erbohrten "Cuttings" überwiegend als Nachfall anzusprechen sind. Im Bereich 1166 - 1176 m wurde ein "Nachschleppen" des Minerals Quarz in den Zentrifugenproben festgestellt. Die Ursache dafür liegt in einer erhöhten Pumprate während dem Bohren mit Rollenmeißeln, so daß, bei der jetzigen Auslegung der Zentrifuge, nicht mehr die gesamte Spülmengmenge von den Feststoffen gereinigt werden kann.

Anhand der durch die chemisch-analytische Untersuchung der Bohrspülung erzielten Daten, konnten keine Zuflußhorizonte von frei migrierenden Wässern nachgewiesen werden.

Am ICP-AES wurde die Dekreptionsanalytik aufgenommen, um die Zusammensetzung von Fluideinschlüssen in Quarzen zu bestimmen. Die Einschlußuntersuchungen zeigen, daß Na das vorherrschende Kation der "fluid inclusions" ist.

Durch die Installierung eines Quirlentgasers in der Spülungsrinne konnte erstmals eine kontinuierliche Untersuchung der in der Spülung gelösten Gase durchgeführt werden. Deutlich graphitführende Horizonte zeichnen sich durch signifikant höhere  $\text{CH}_4$ - und He-Gehalte aus. Das Redoxverhalten der Bohrspülung korreliert mit den  $\text{O}_2$ - und  $\text{H}_2$ -Gehalten der Spülung, wobei Wasserstoff durch den Bohrprozeß gebildet wird (artifi-

ziell). Die Menge des gebildeten Wasserstoffs ist von dem verwendeten Werkzeug abhängig und beträgt beim Bohren mit Diamantbohrkronen bis 2 %. Der pH-Wert der Bohrspülung kontrolliert die CO<sub>2</sub>-Gehalte in der freigesetzten Gasphase.

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen lassen sich durchteufte Störungszonen durch folgende Parameter charakterisieren : Cl, He, Schwefel, Chlorit und Sulfiderze (insbesondere Pyrit und Zinkblende).

### C.7 Schriftenverzeichnis

- HEINRICHS, H., KÖNIG, N., SCHULTZ, R. (1985): Atom-Absorptions- und Emissionsspektroskopische Bestimmungsmethoden für Haupt- und Spurenelemente in Probelösungen aus Waldökosystem-Untersuchungen. Im Selbstverlag des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben der Universität Göttingen.
- HEINSCHILD, H.-J., HOMANN, K.D., STROH, A., TAPFER, M. (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB - Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m: KTB Report, 88-2: C1 - C107, Hannover.
- HOLLOWAY, J.R. (1981): Fugacity and activity of molecular species in supercritical fluids. In: Fraser, D.G., Ed., Thermodynamics in Geology, 161-181
- RANKIN, A.H., ALDERTON, D.H.M., THOMPSON, M. and GOULTER (1982): Determination of uranium: carbon ratios in fluid inclusion decrepitates by inductively coupled plasma emission spectroscopy. Min. Mag., Vol. 46, 179-186
- SCHRADER, W., GROBENSKI, Z. und SCHULZE, H. (1981): Einführung in die AES mit dem induktiv gekoppelten Plasma (ICP). Angewandte Atom-Spektroskopie, Heft 28
- THOMPSON, M., RANKIN, A.H., WALTON, S.J., HALLS, C. and FOO, B.N. (1980): The analysis of fluid inclusion decrepitate by inductively-coupled plasma atomic emission spectroscopy an exploratory study. Chem. Geol., 30: 121-133
- WINGE, R.K., FASSEL, V.A., PETERSON, V.J. and FLOYD, M.A. (1985): Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy, An Atlas of Spectral Information. Physical Sciences Data 20.

### C.8 Danksagung

Die Schmelztabletten zur Bestimmung der chemischen Gesteinszusammensetzung wurden im Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung in Gießen hergestellt und dort auch gemessen. Unser Dank gilt dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr. Emmermann und seinen Mitarbeitern, insbesondere Frau M. Grünhäuser für die Durchführung der Messungen und Frau N. Hüttel, Frau A. Harjung sowie Herrn F. Naujoks für die Probenpräparation. Unser weiterer Dank gilt den technischen Mitarbeitern der Geochemiegruppe im Feldlabor, Herrn Kamm, Herrn Lippert, Frau Weber und Herrn Welker. Herrn Dr. Erzinger danken wir für die Durchführung des Umzuges des Massenspektrometers von Gießen nach Windischeschenbach sowie zahlreiche praktische Hinweise bei aufgetretenen Problemen. Die Programmeinweisung wurde von Herrn Samel aus Gießen durchgeführt, dem unser herzlicher Dank gebührt. Herrn Dr. A.H. Rankin danken wir für die Einführung in die Methode der ICP-Dekrepiationsanalytik. Weiterhin danken wir Herrn Prof. Dr. Emmermann und Herrn Dr. Lauterjung für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Die Textverarbeitung wurde überwiegend an Rechnersystemen der AG Geophysik durchgeführt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

**C.9 Anhang**

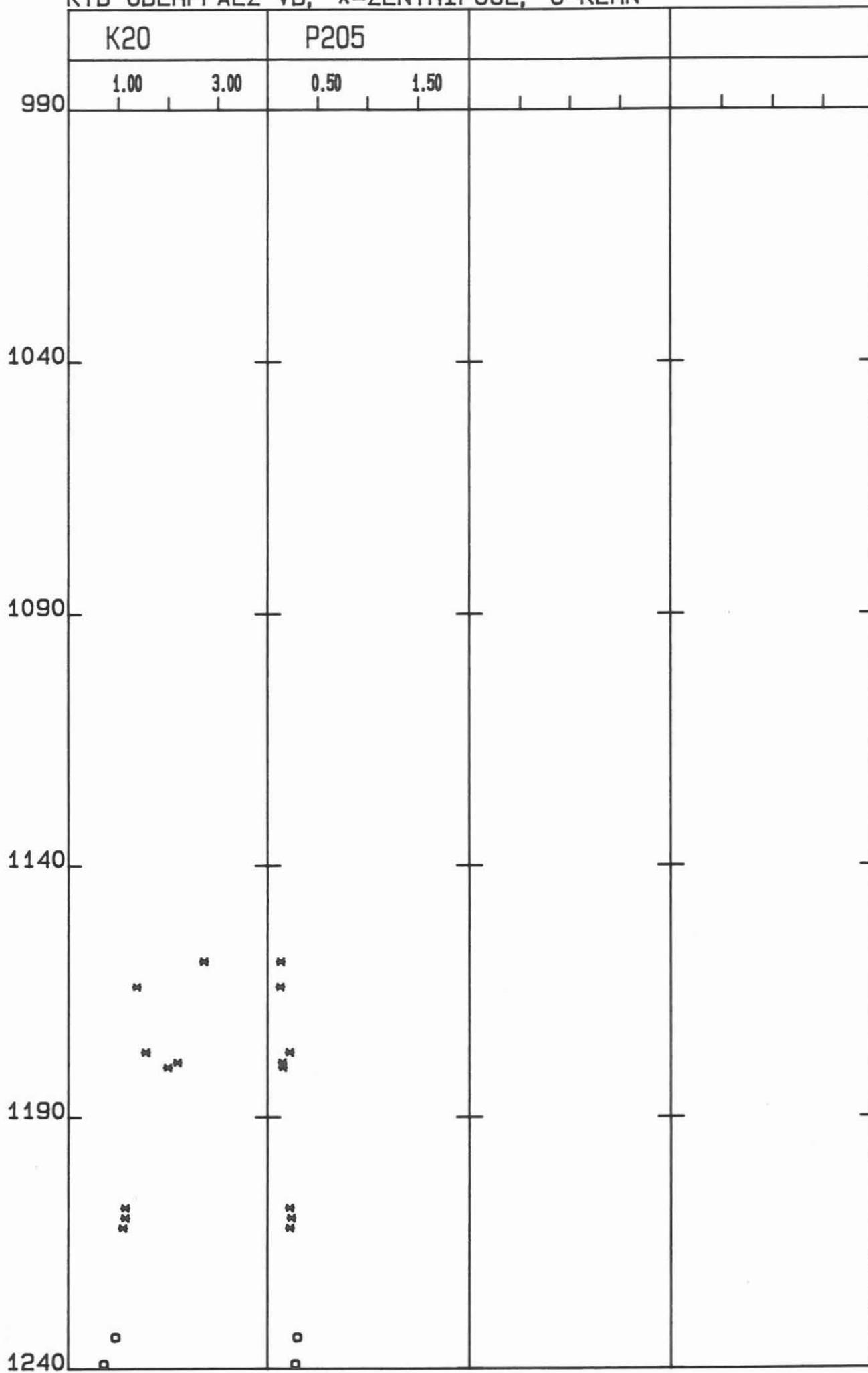
- C.9.1 Tiefenlogs der RFA-Analysen
- C.9.2 Tiefenlogs der RDA-Analysen
- C.9.3 Tiefenlogs der Kationen- und Anionenanalysen
- C.9.4 Tiefenlogs der in der Bohrspülung gelösten Gase

C.9.1 Tiefenlogs der RFA-Analysen (1:1000)

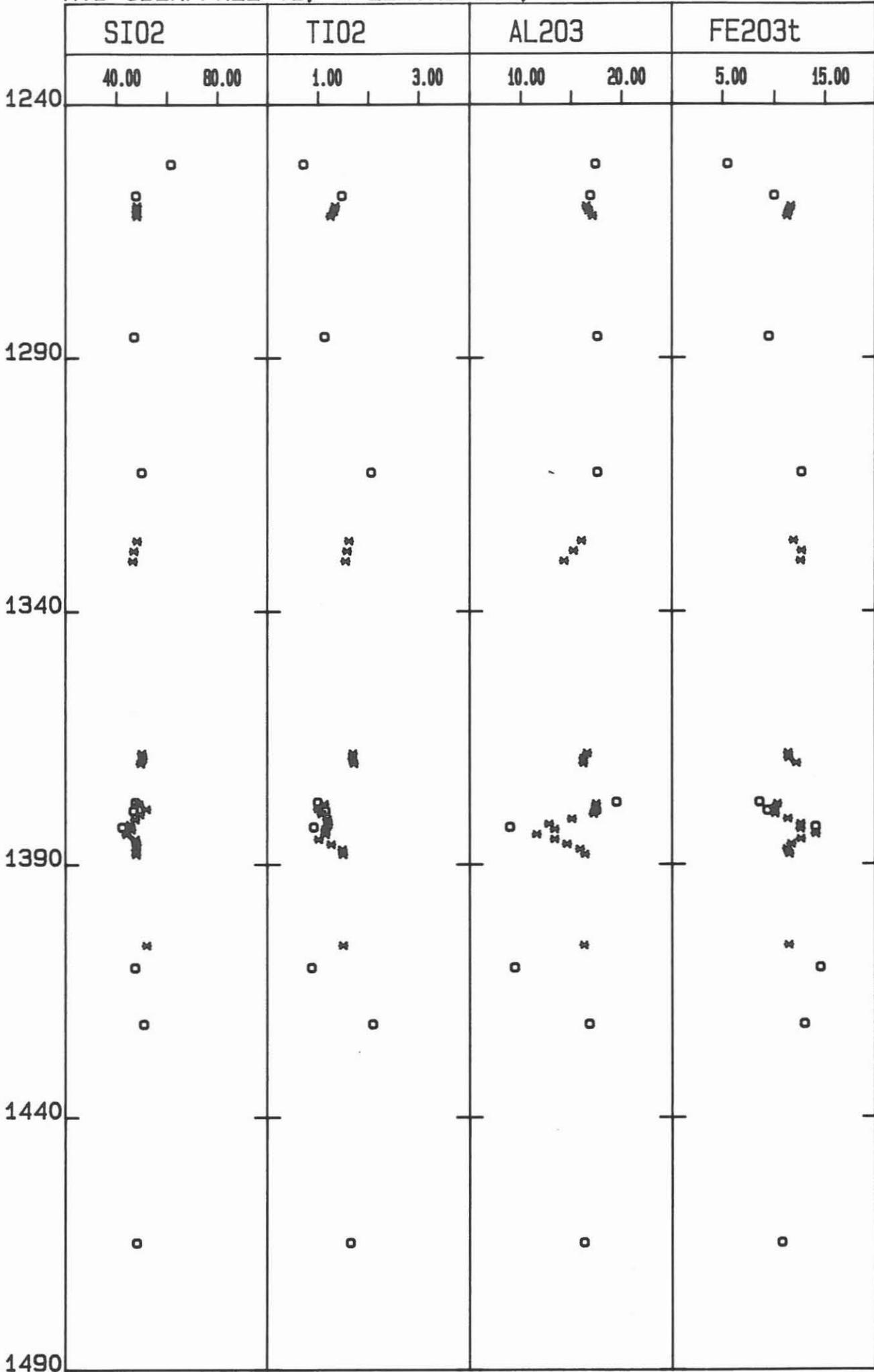




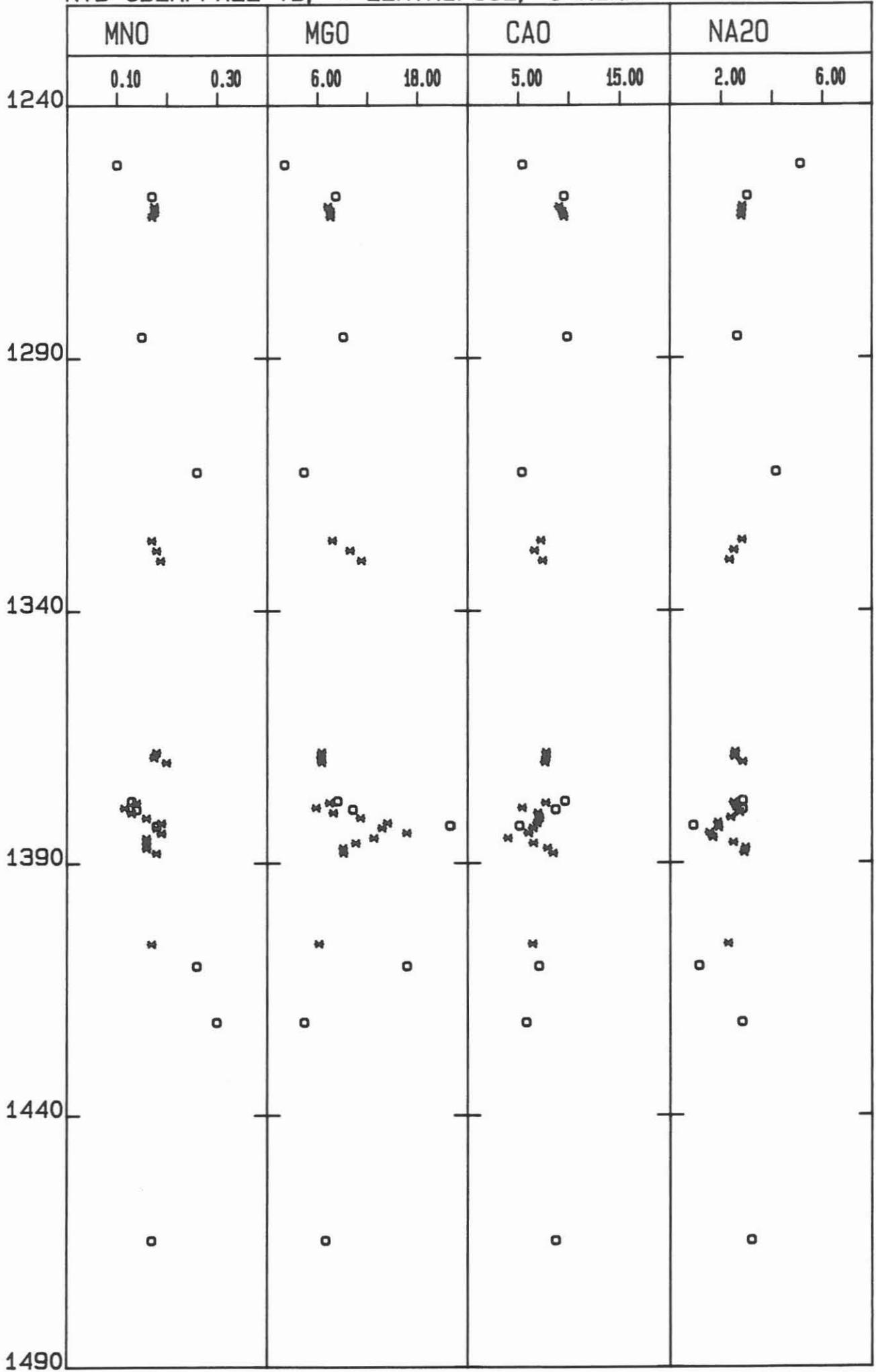
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE, O=KERN



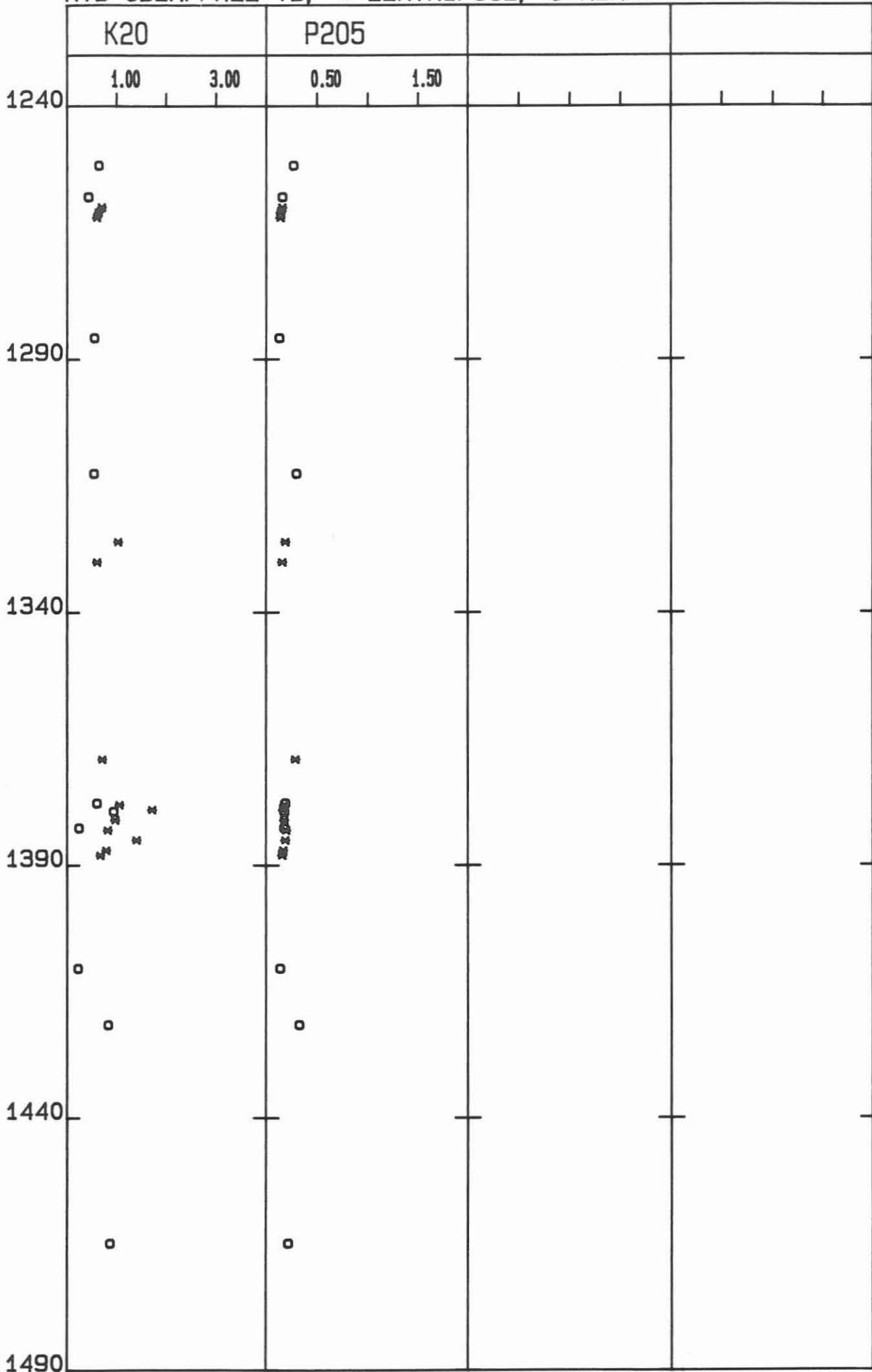
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE, O=KERN



KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE, O=KERN



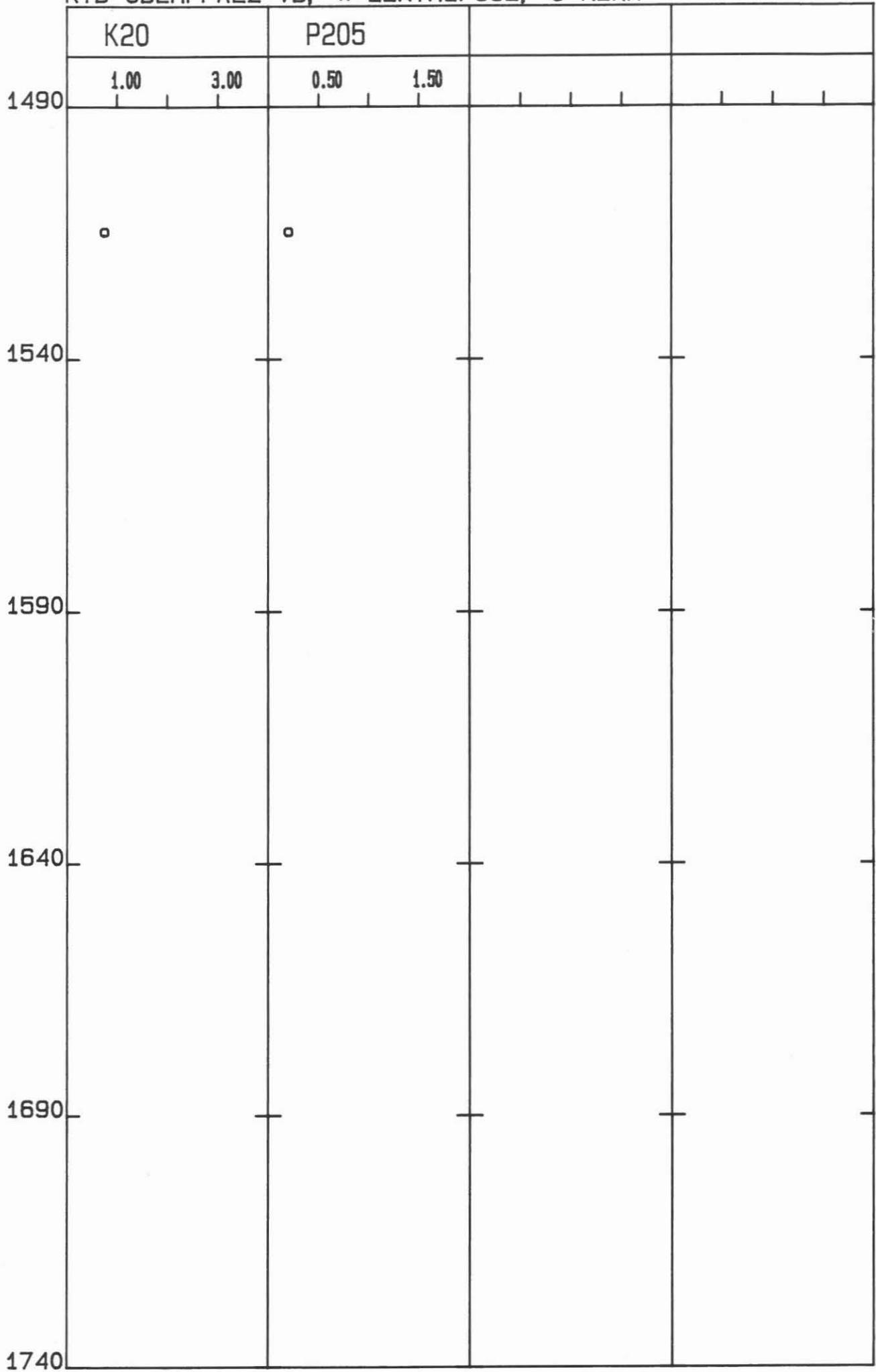
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE, O=KERN



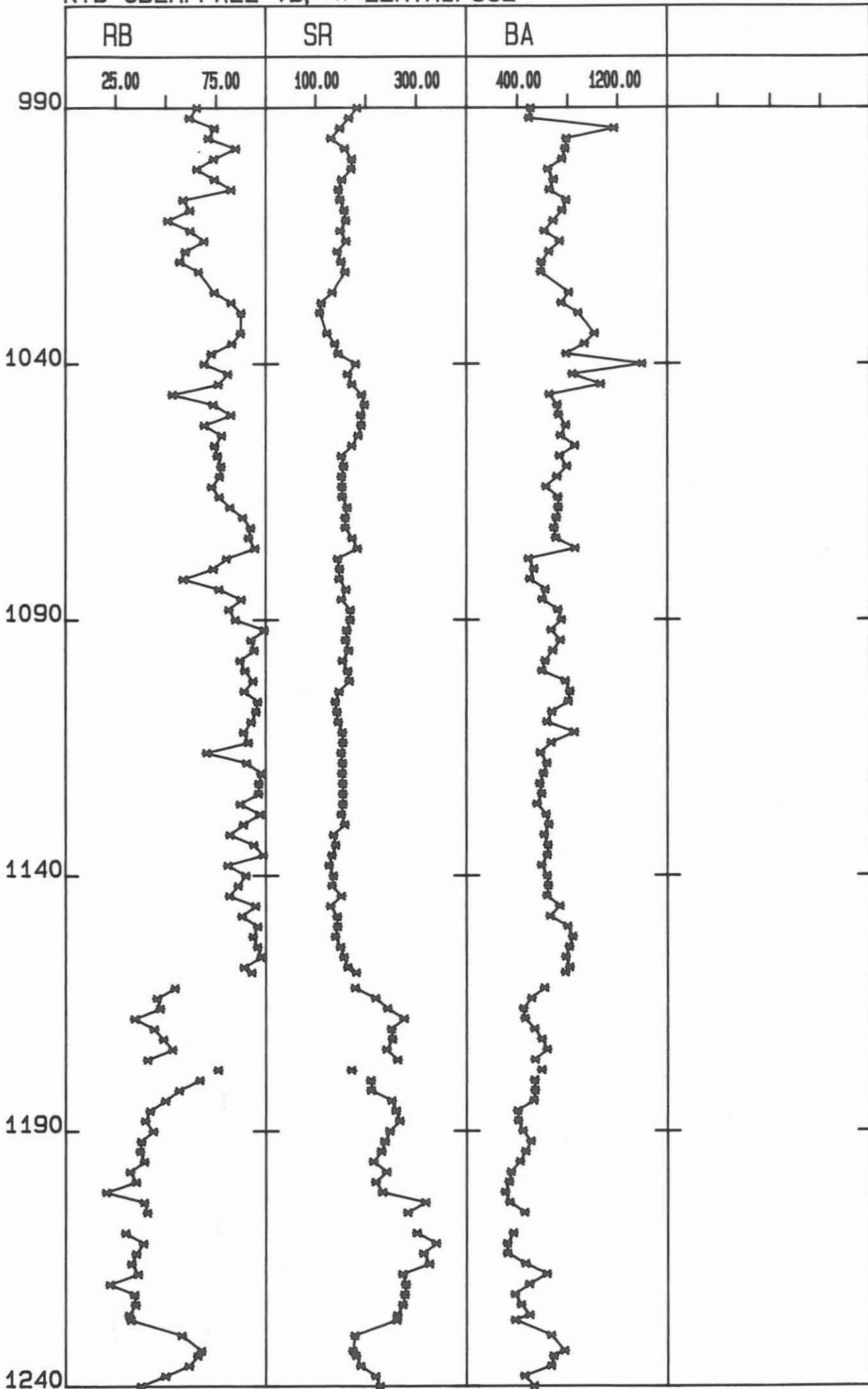




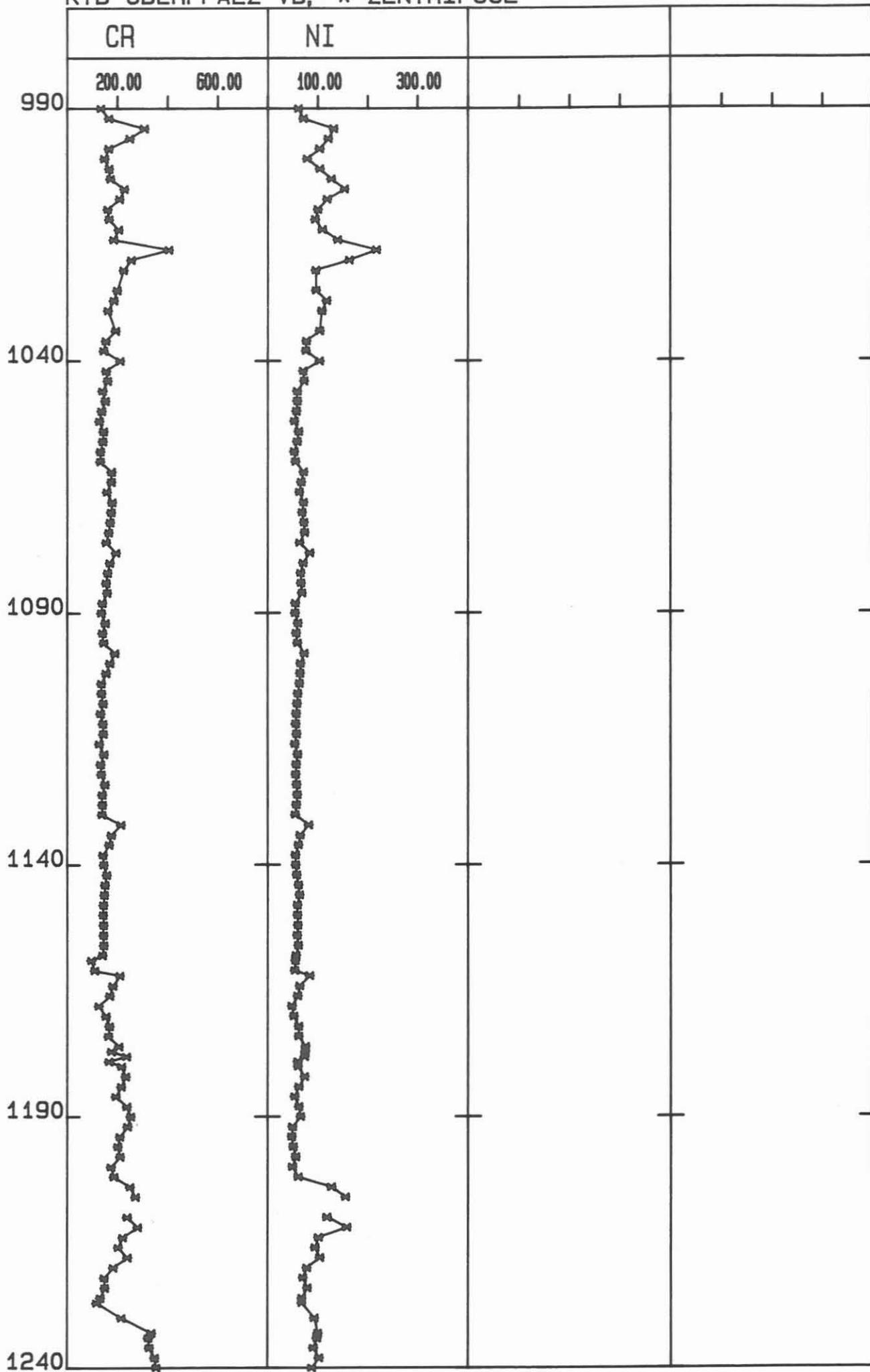
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE, O=KERN



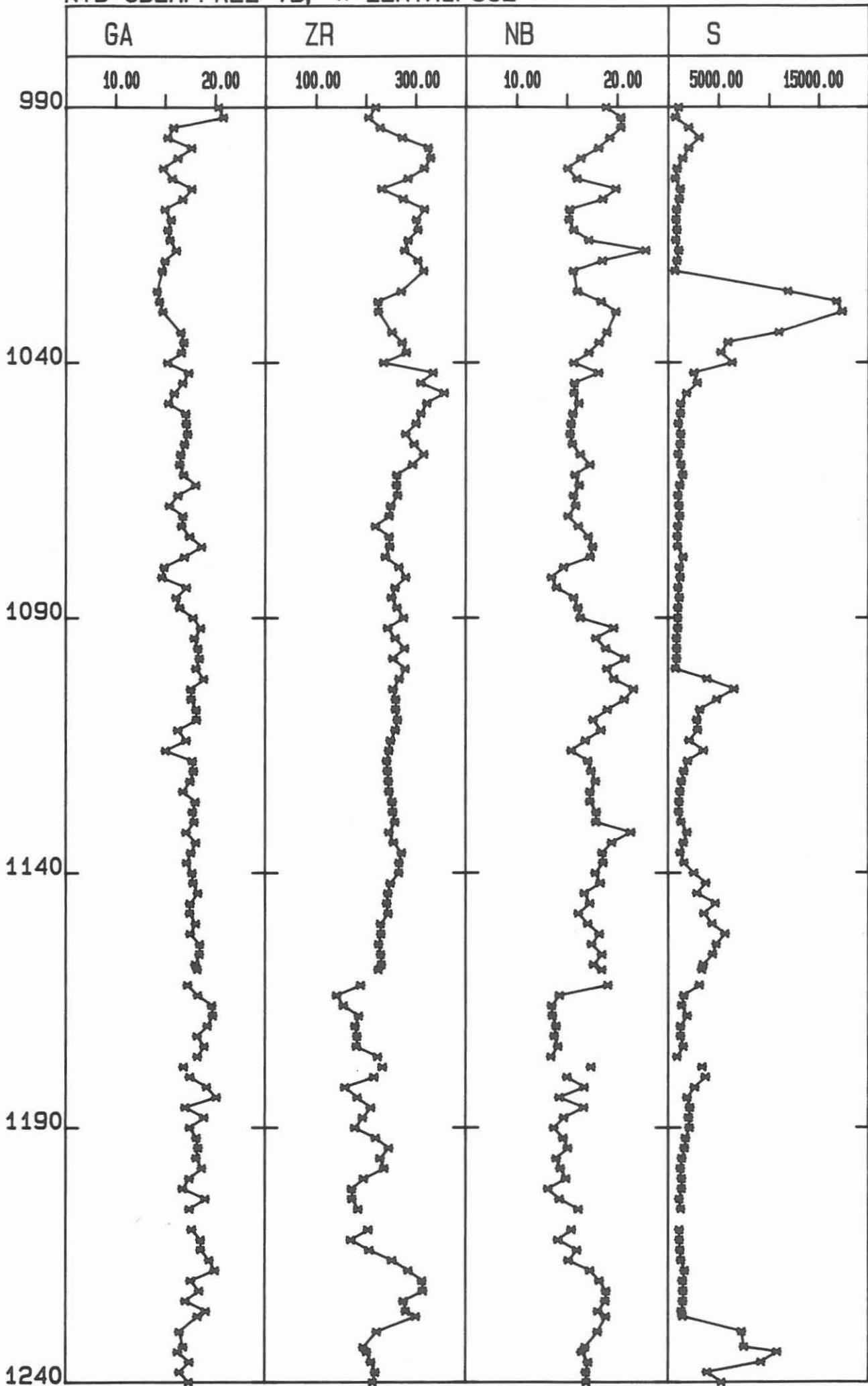
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



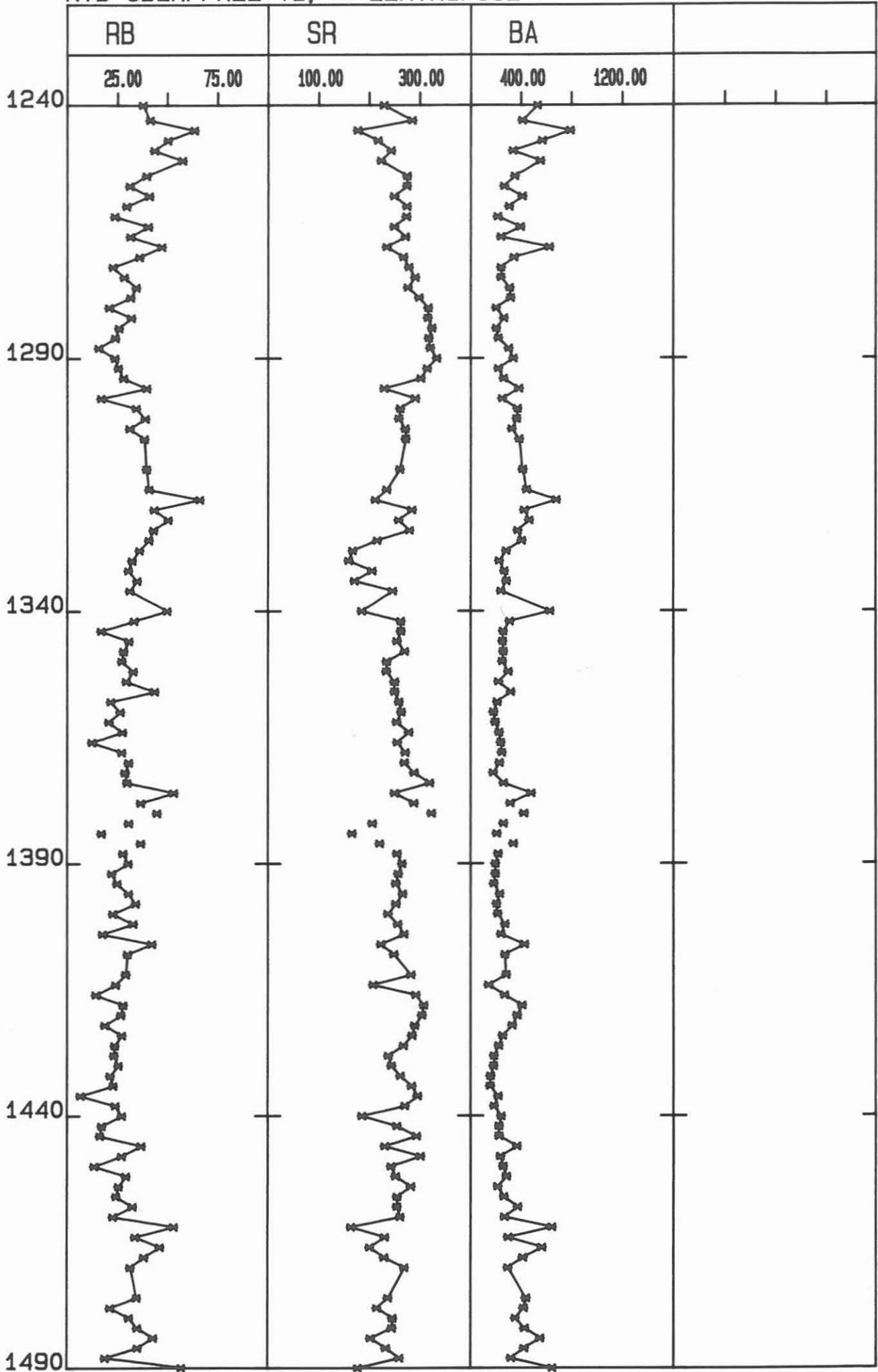
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



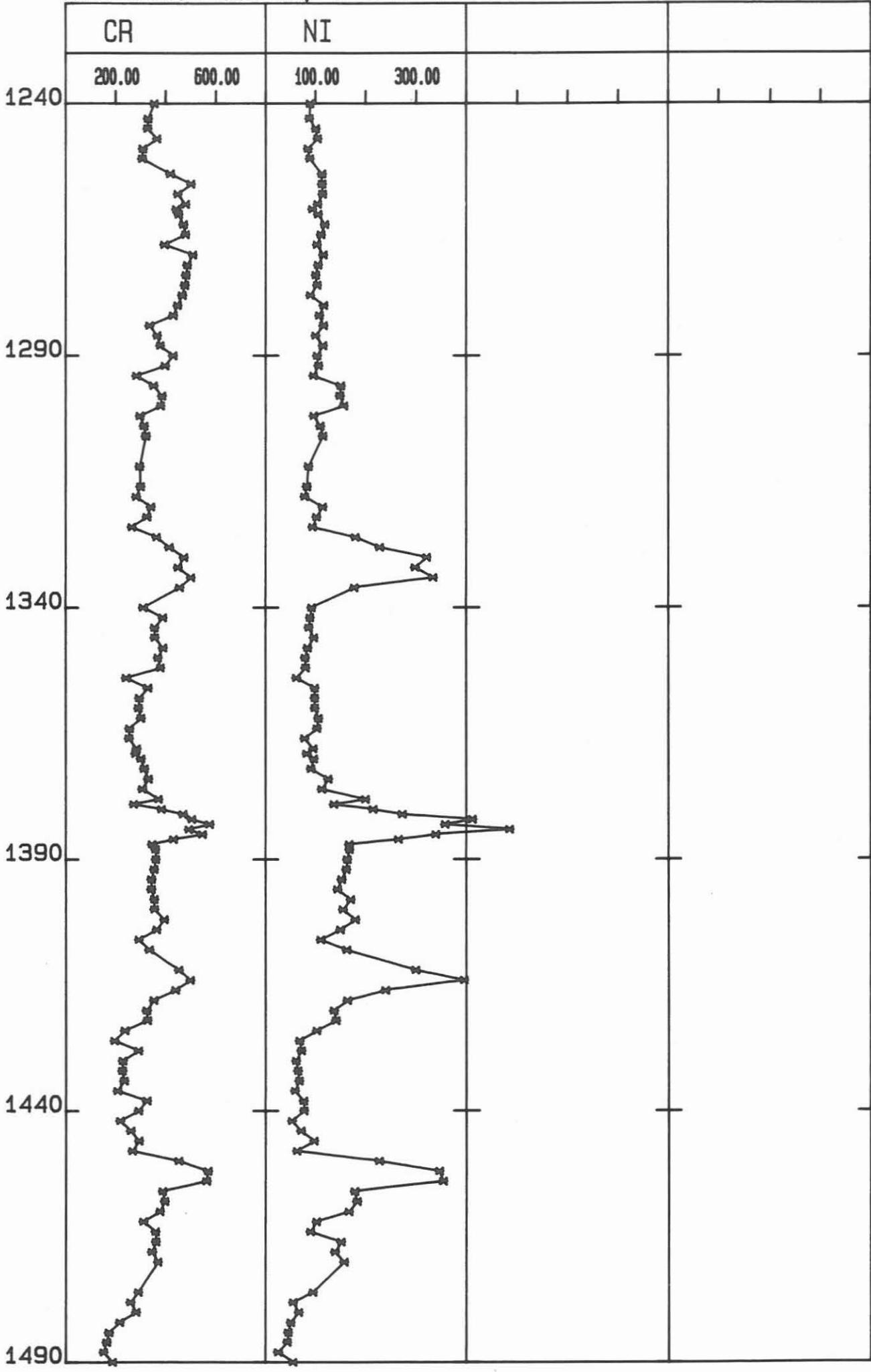
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



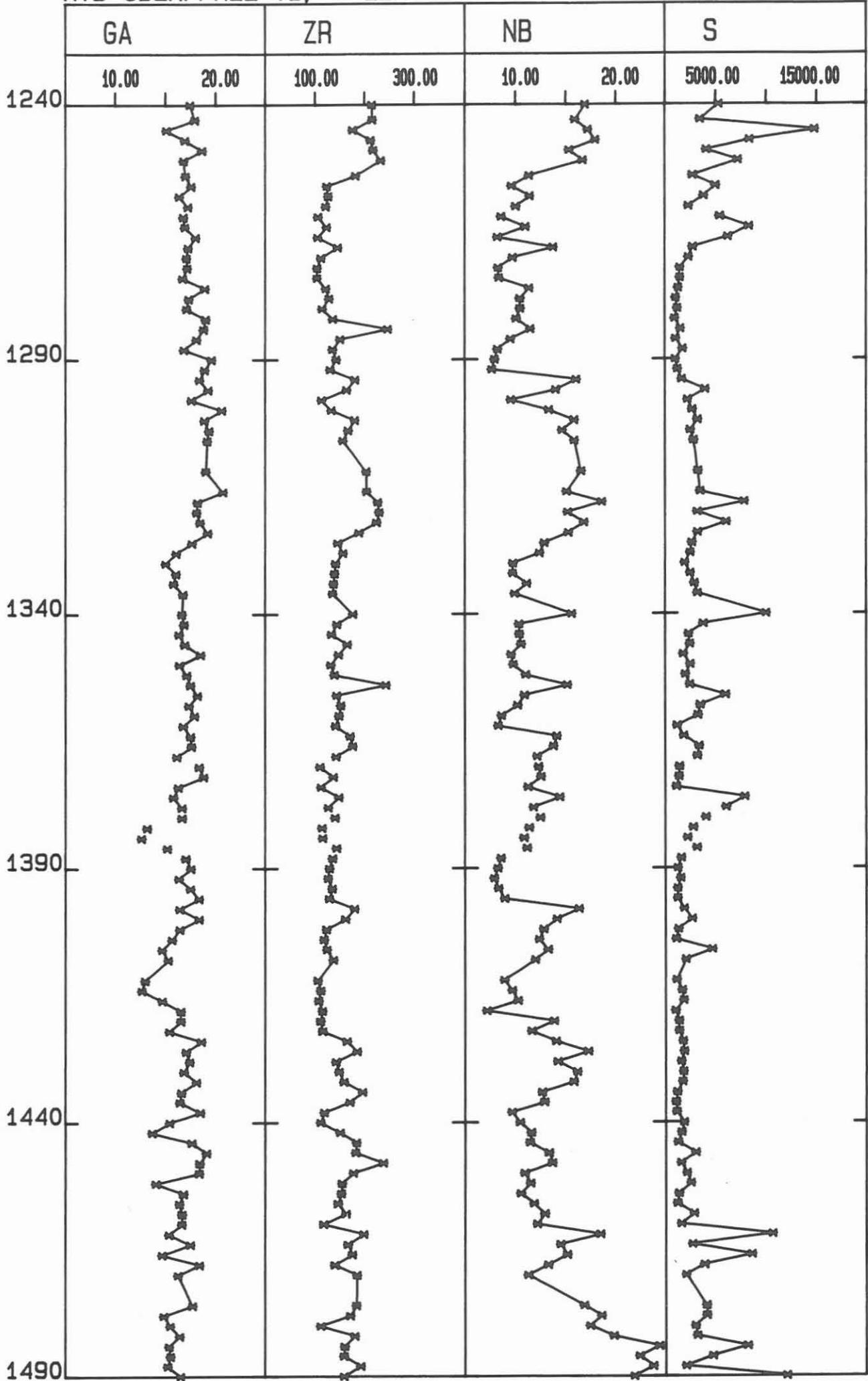
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



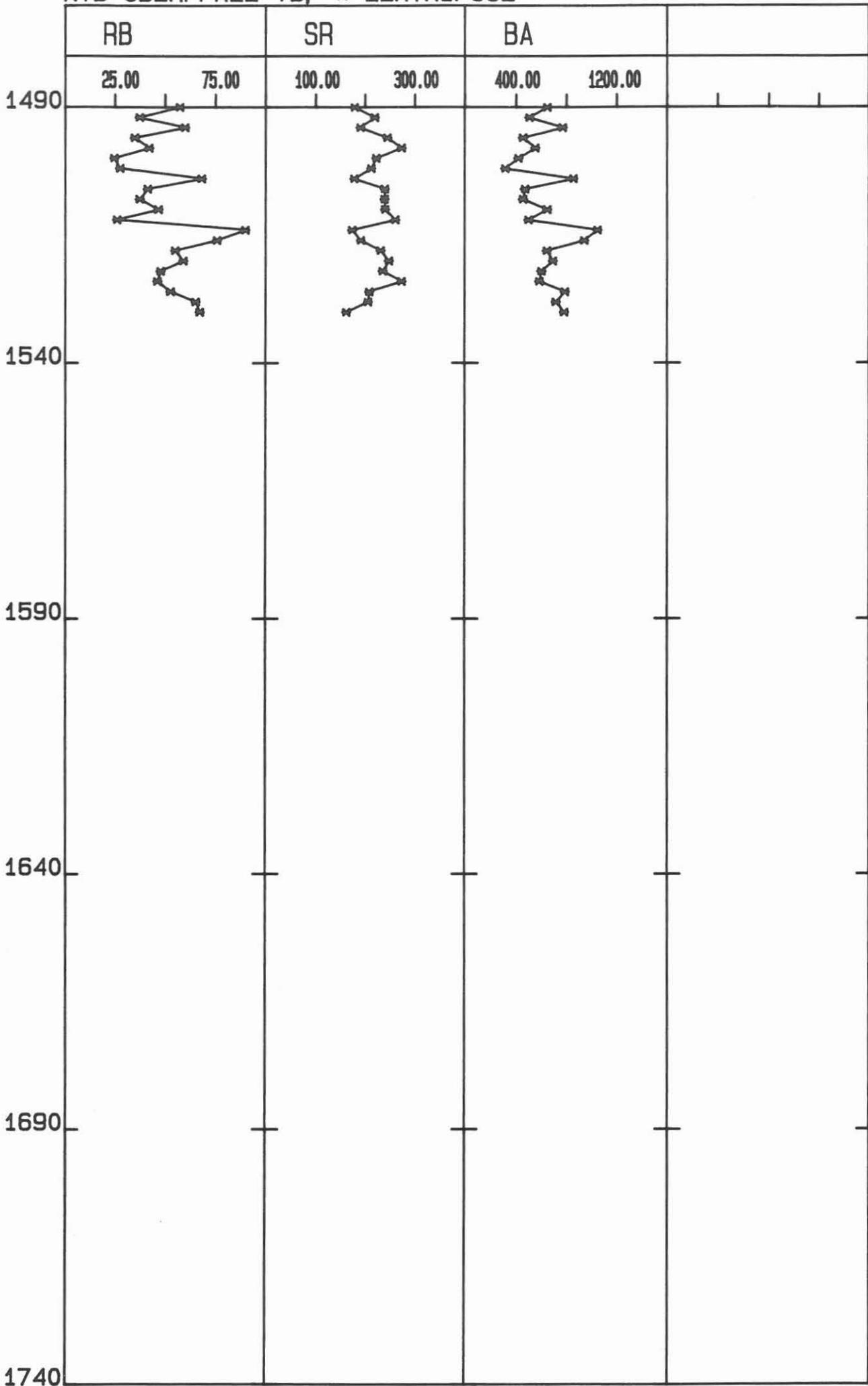
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



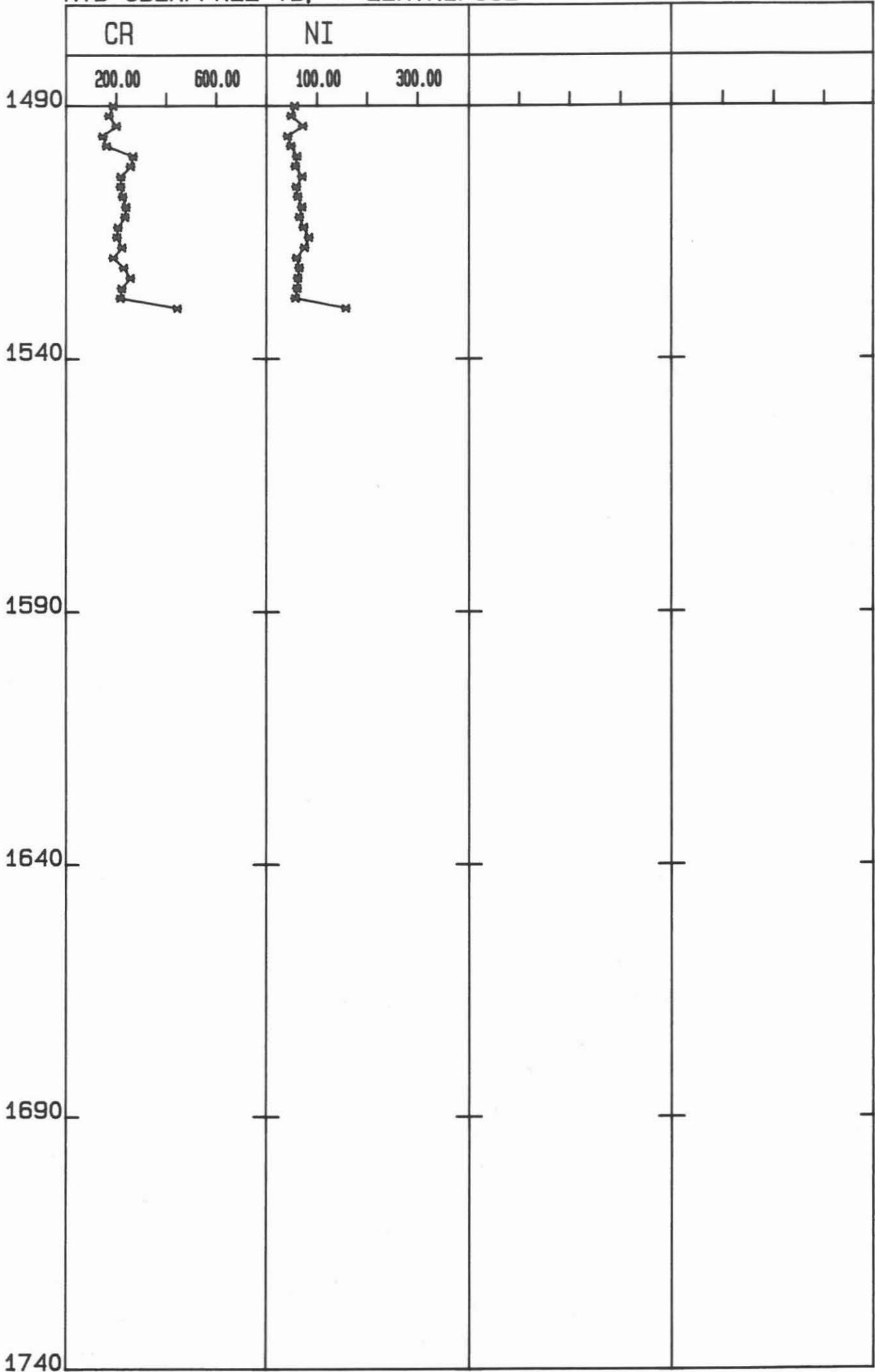
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



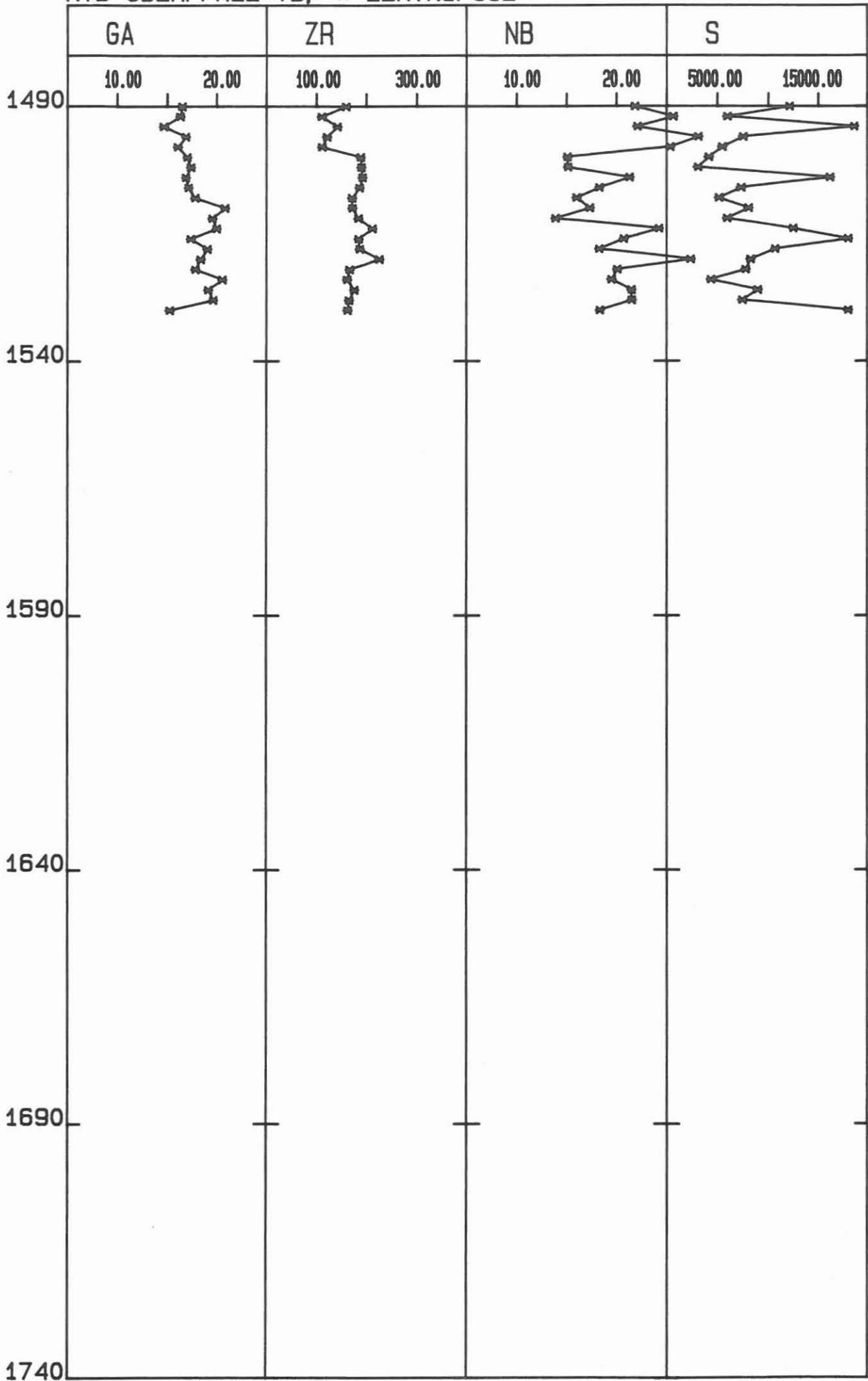
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



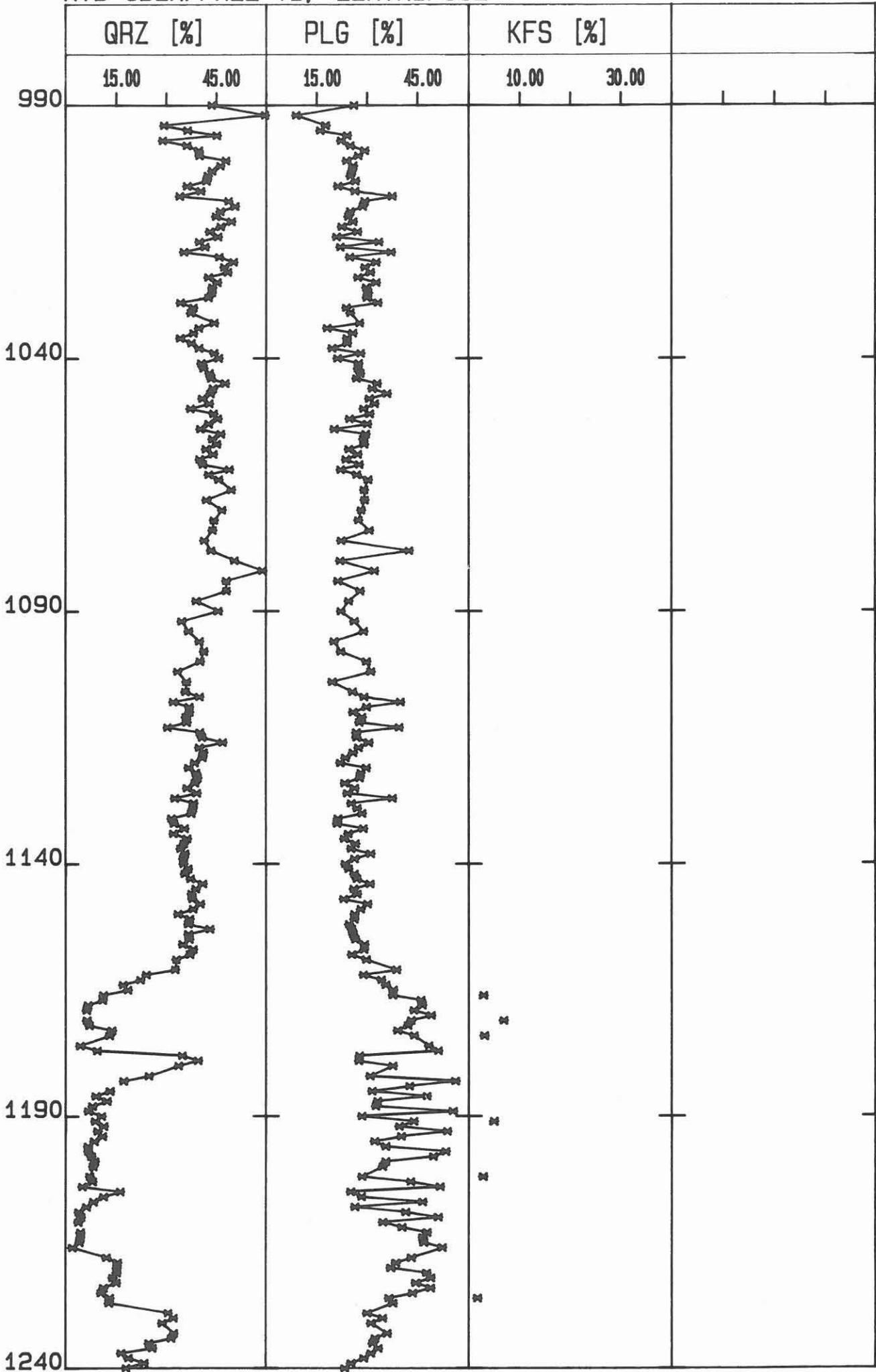
KTB OBERPFALZ VB, \*=ZENTRIFUGE



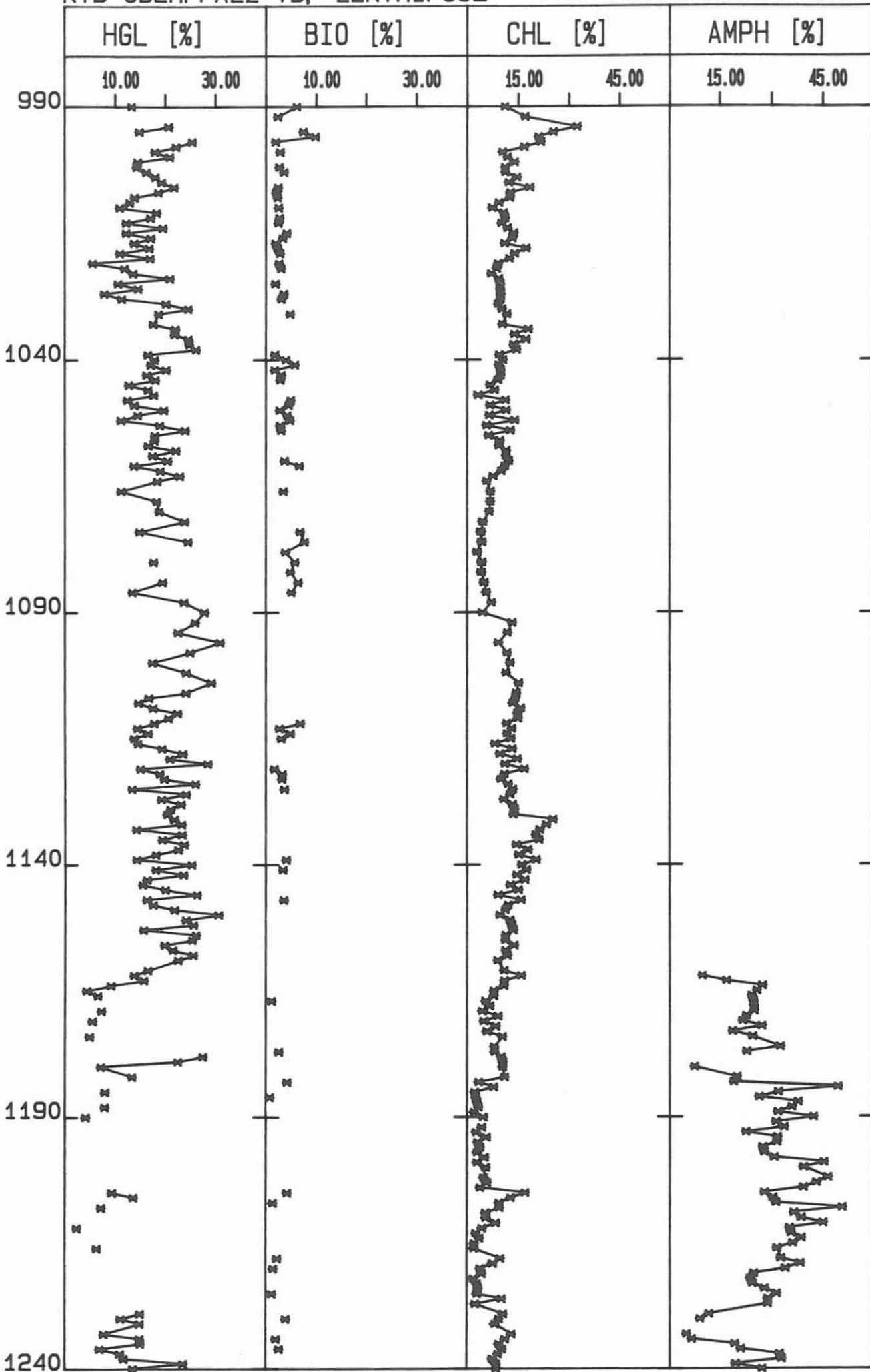


C.9.2 Tiefenlogs der RDA-Analysen (1:1000)

KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE

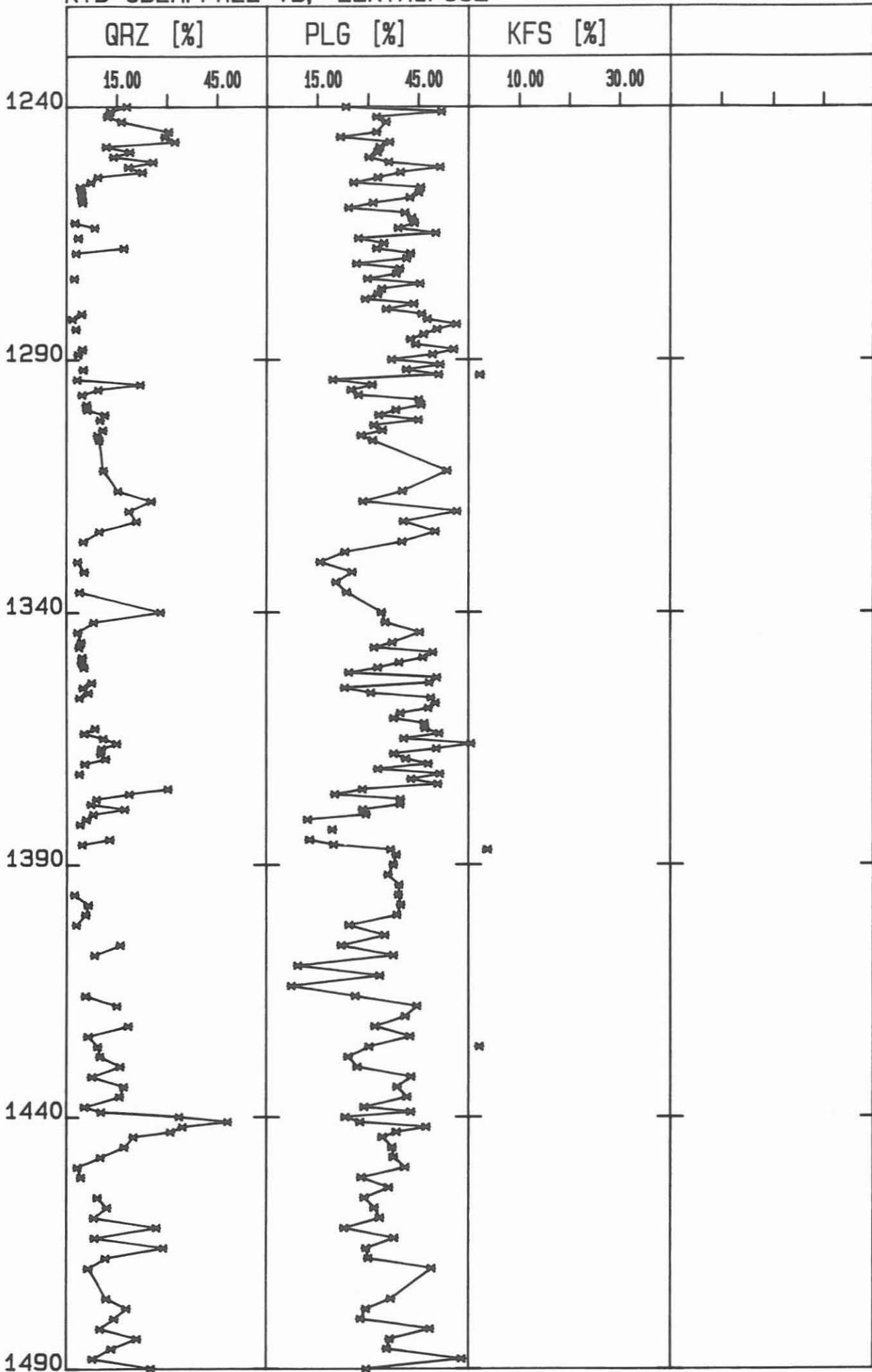


KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE

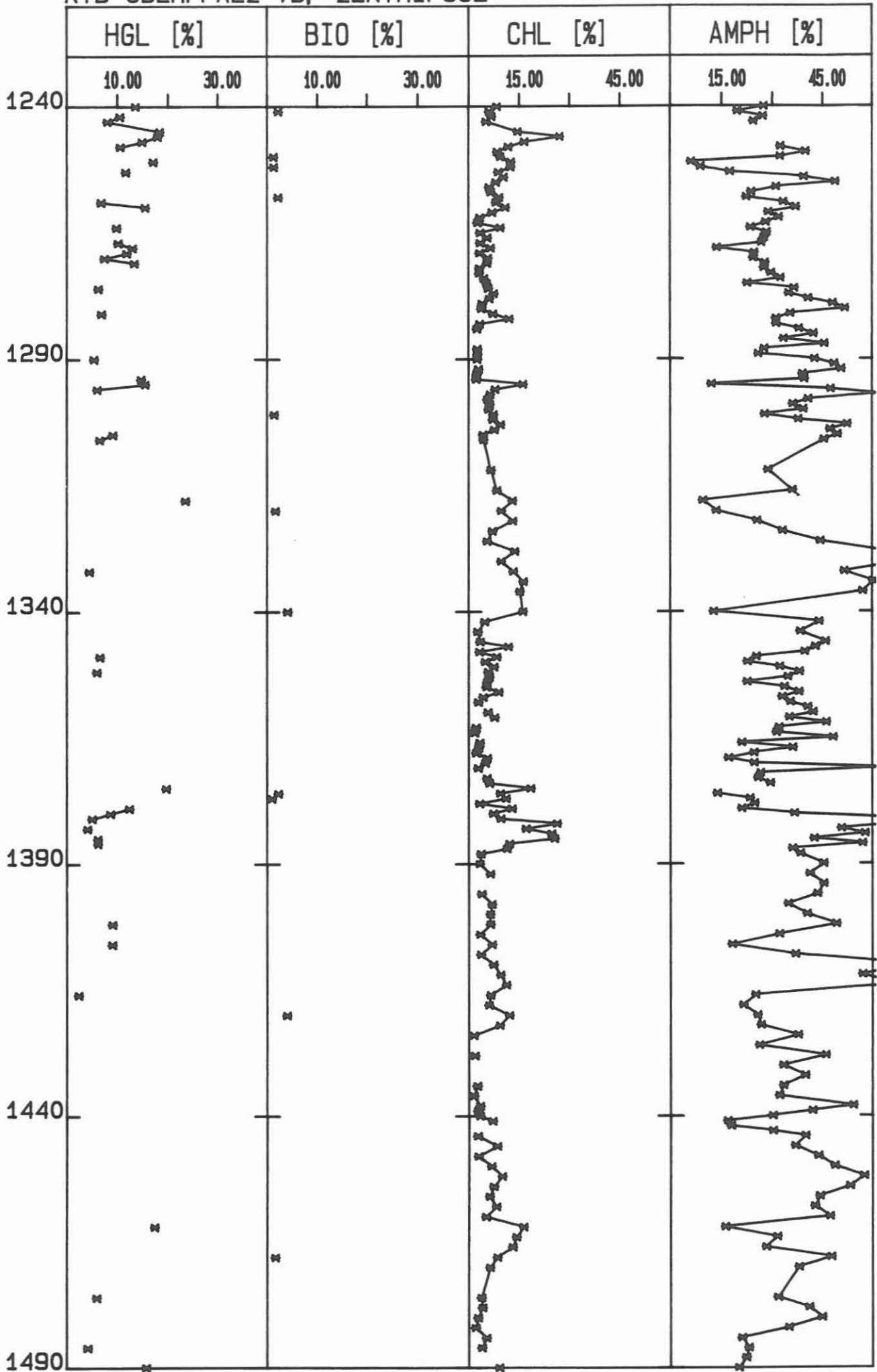




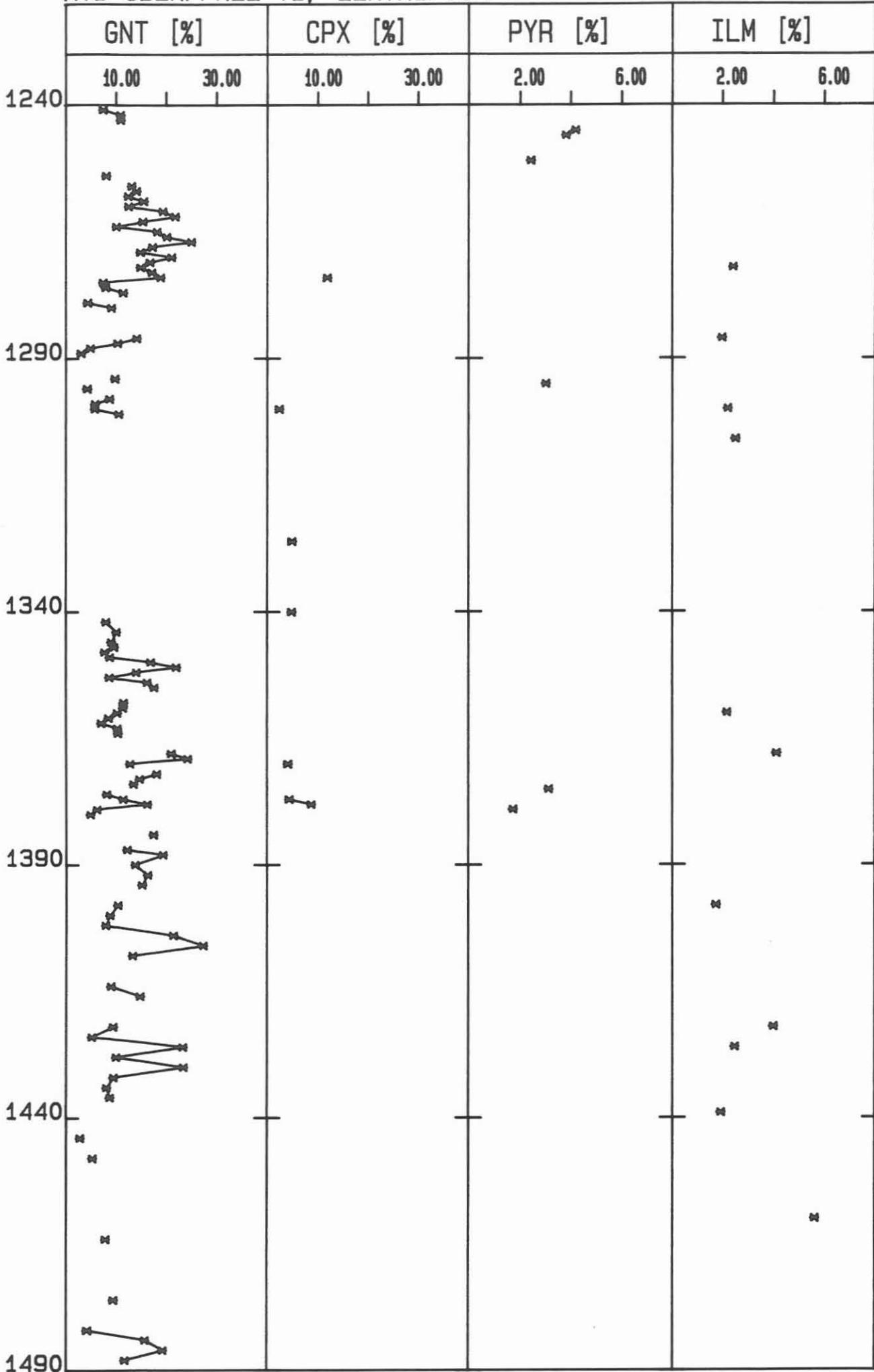
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



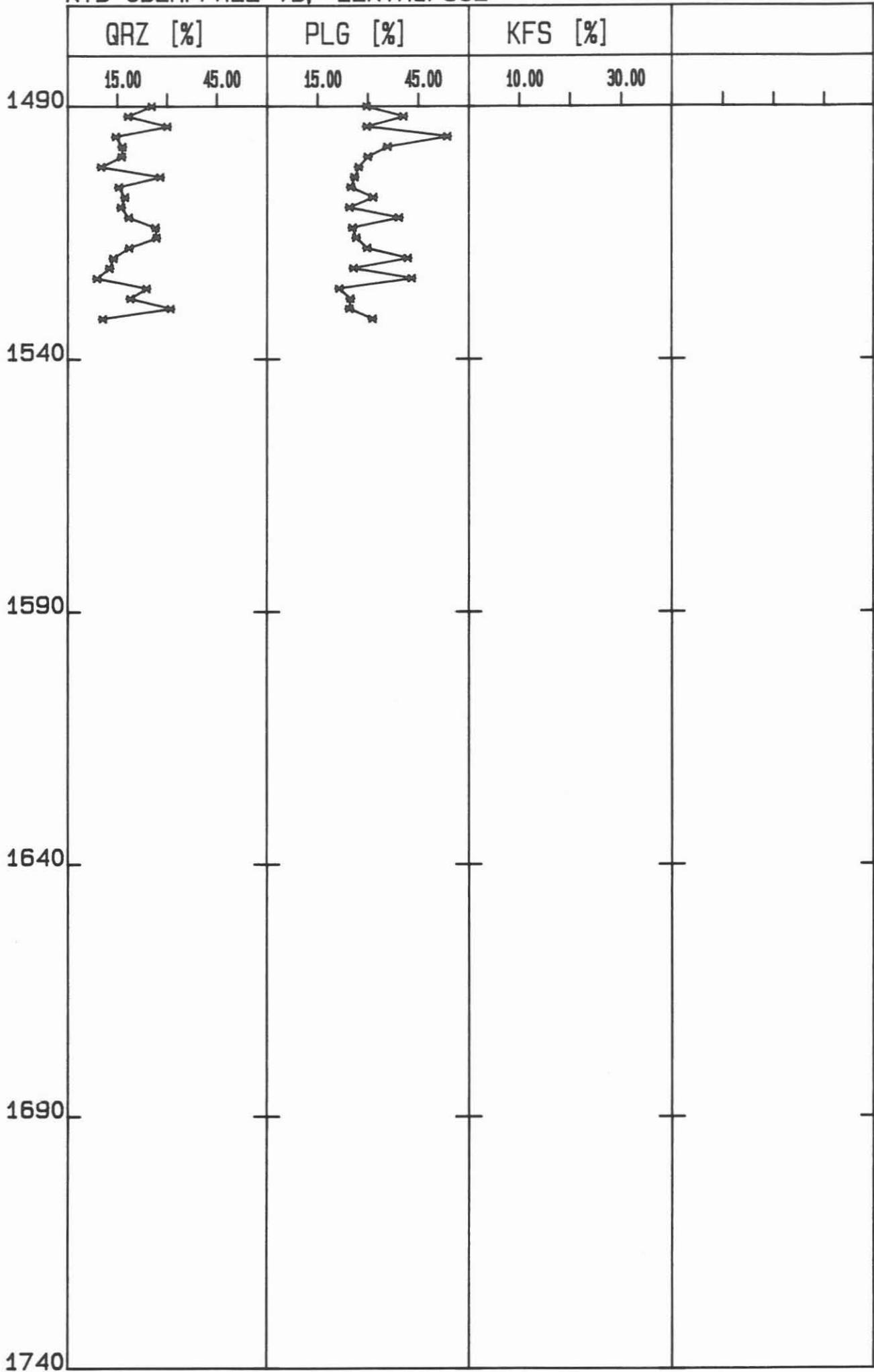
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



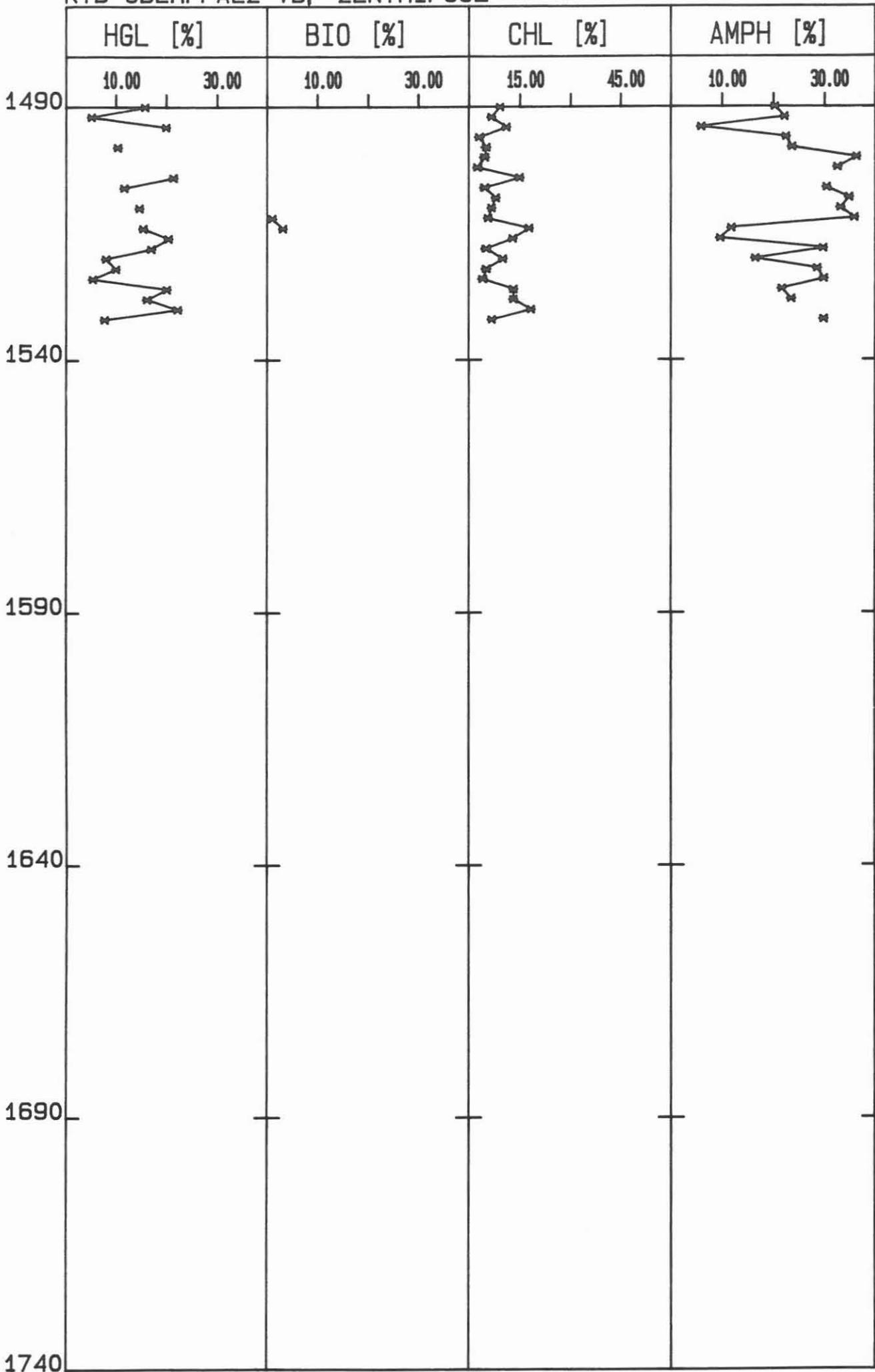
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



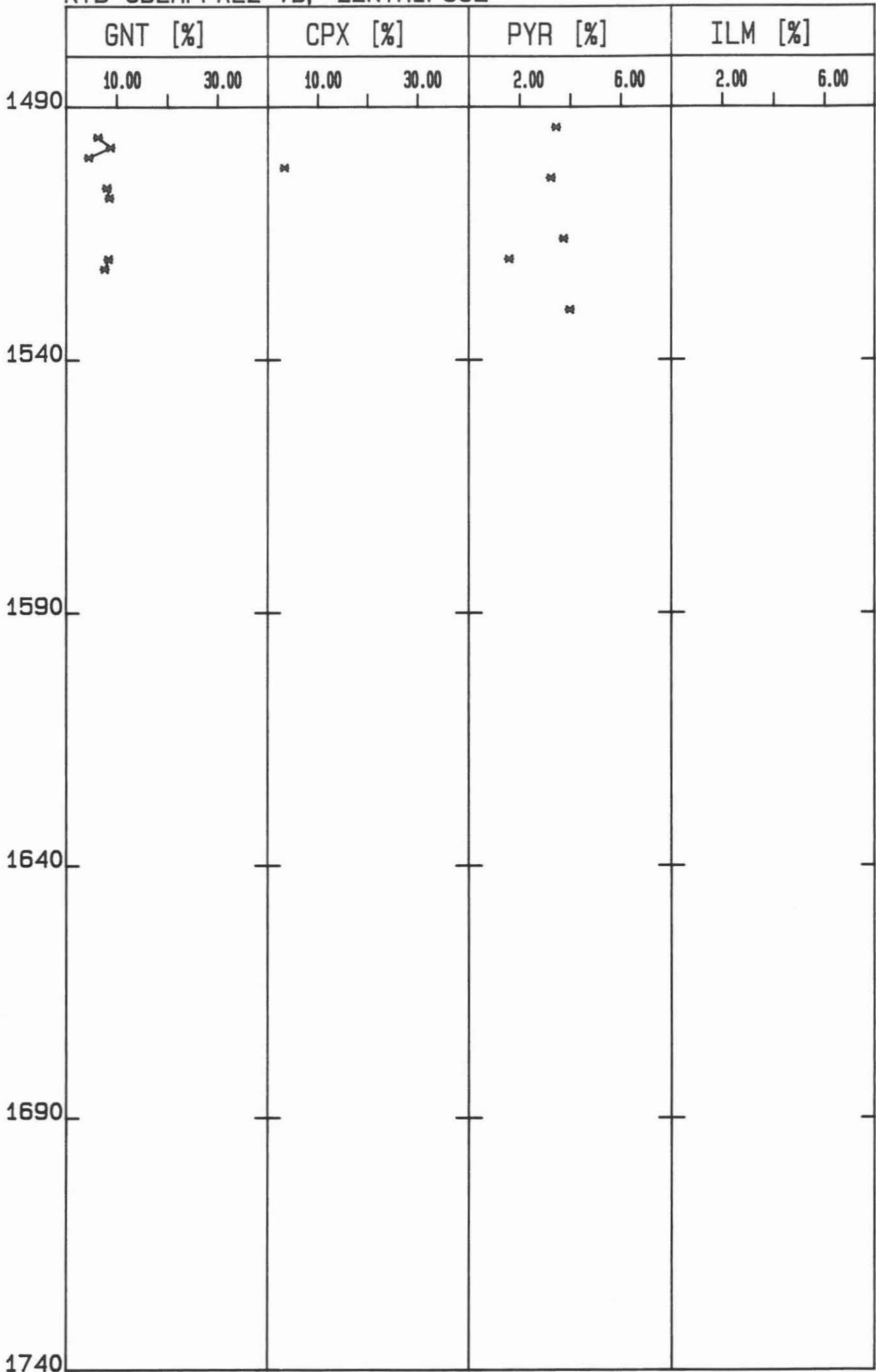
KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE



KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE

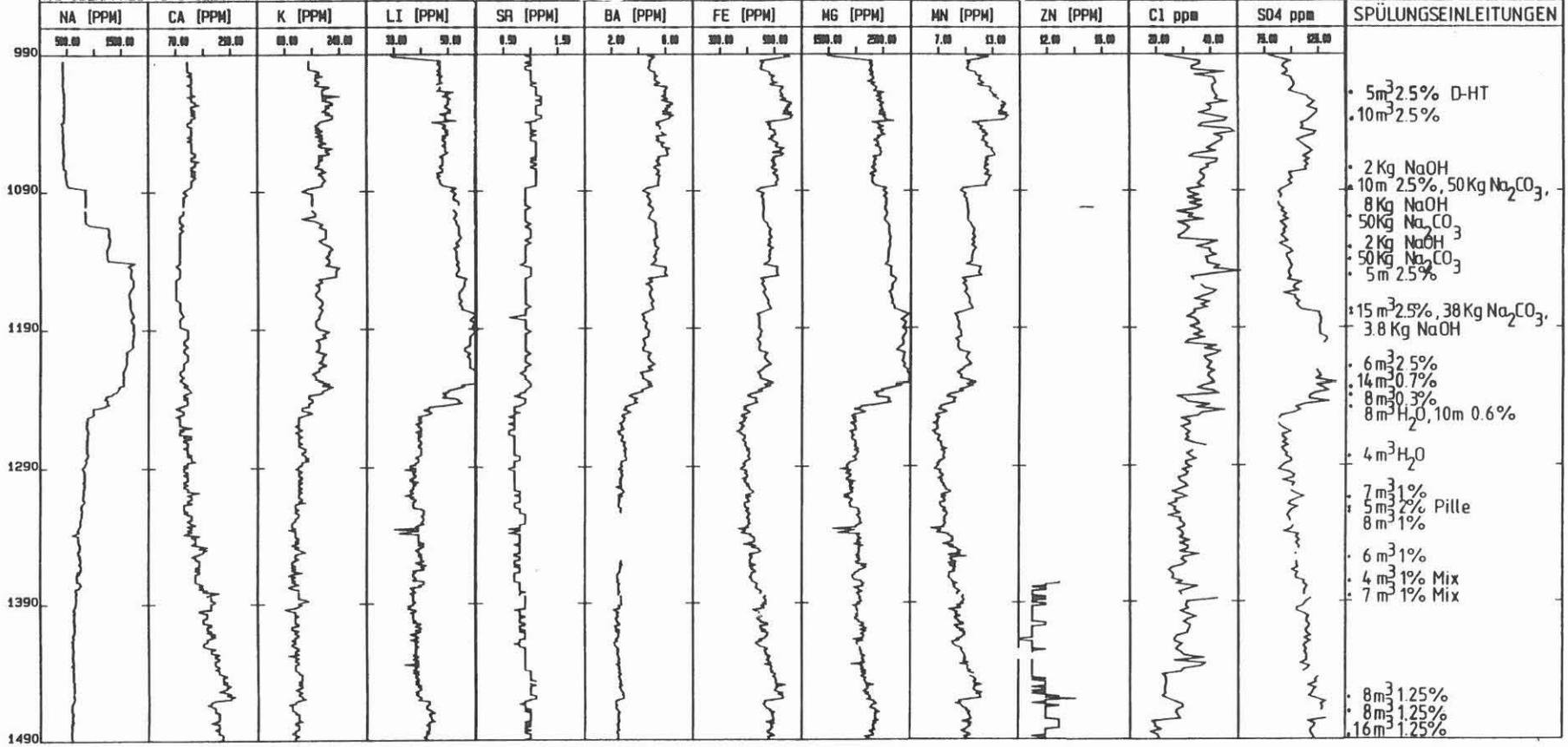


KTB-OBERPFALZ VB, ZENTRIFUGE

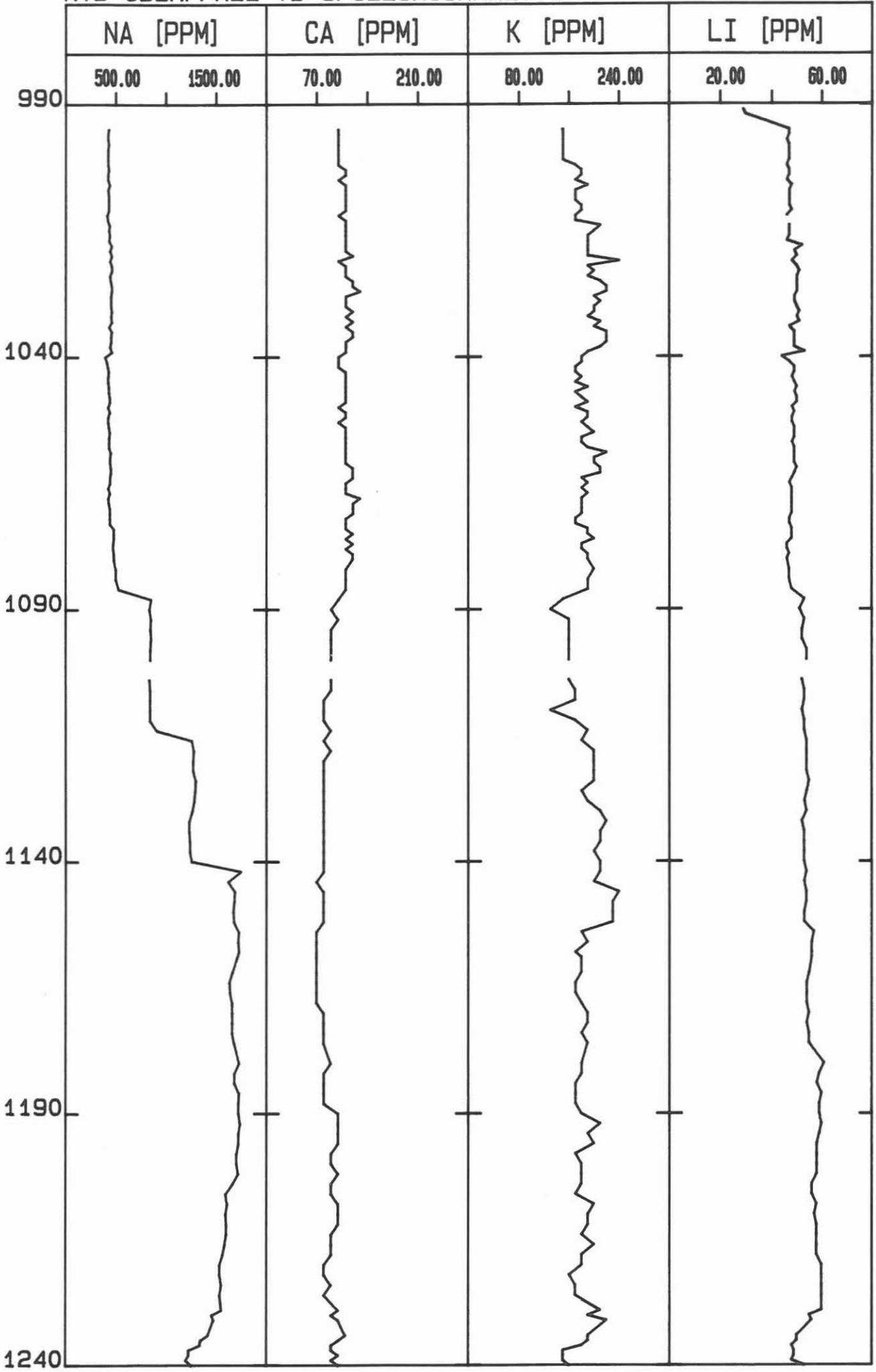


C.9.3 Tiefenlogs der Kationen- und Anionenanalyse (1:1000)

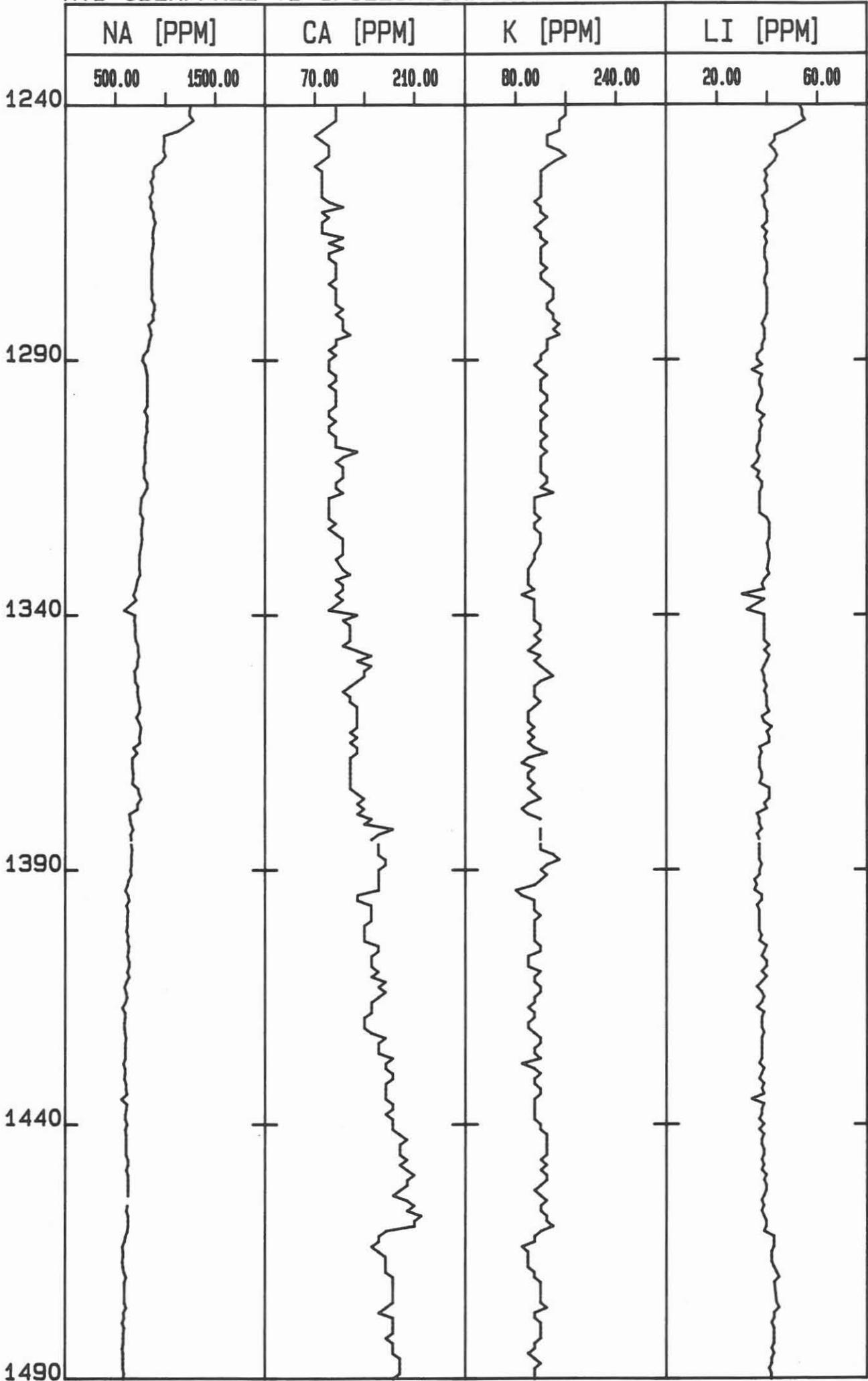
KTB OBERPFALZ VB SPÜLUNGSANALYTIK



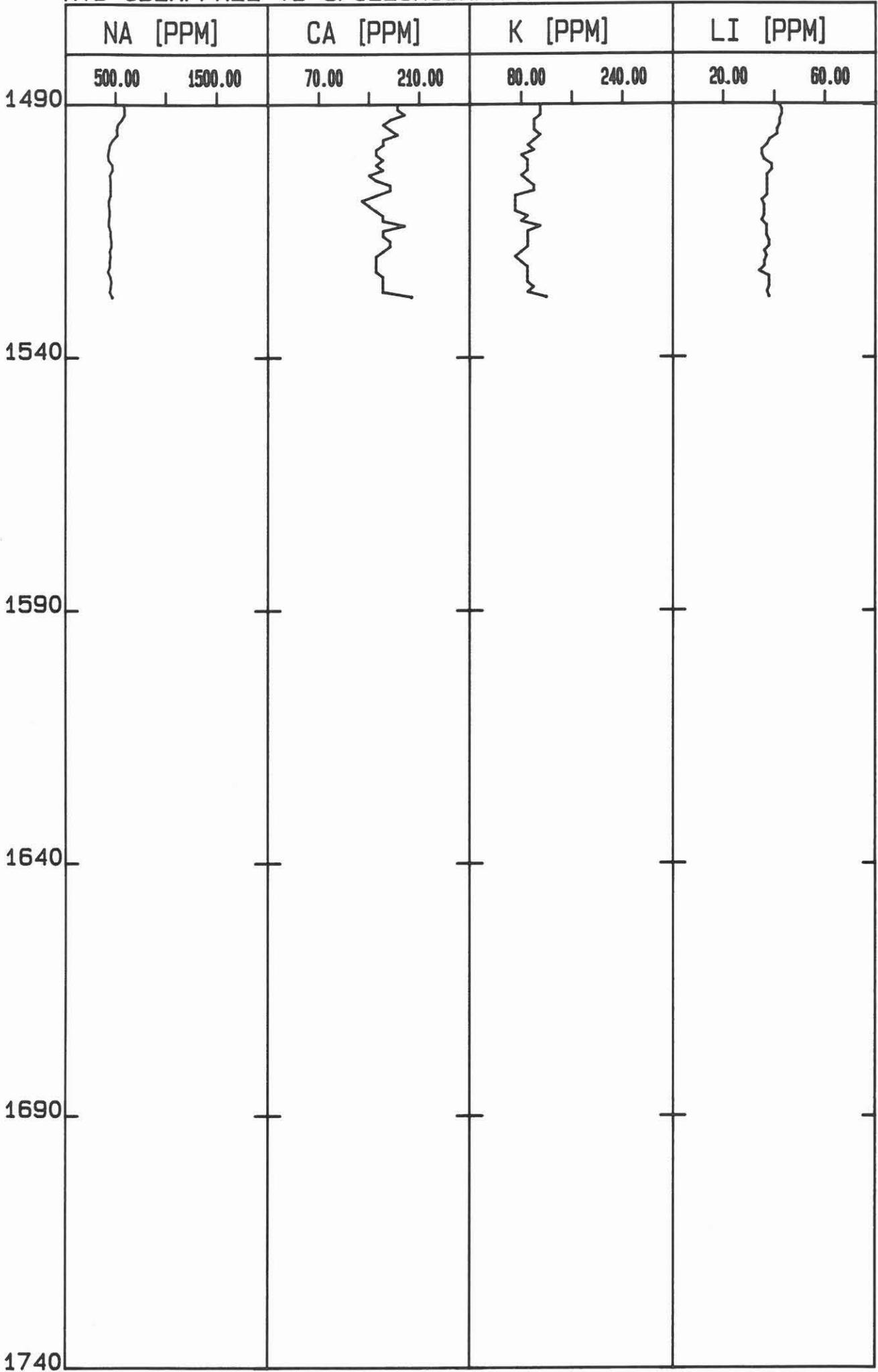
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



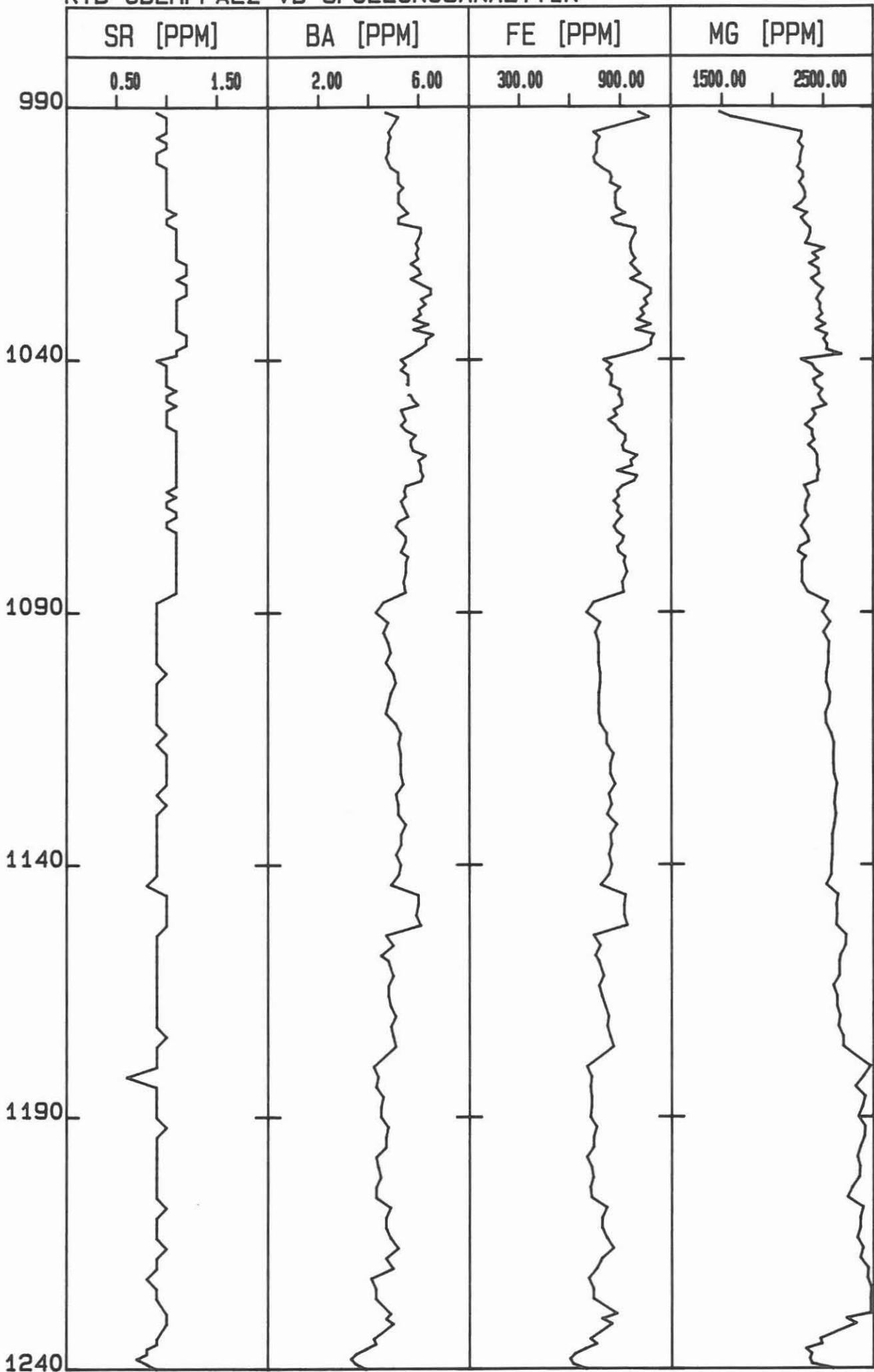
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



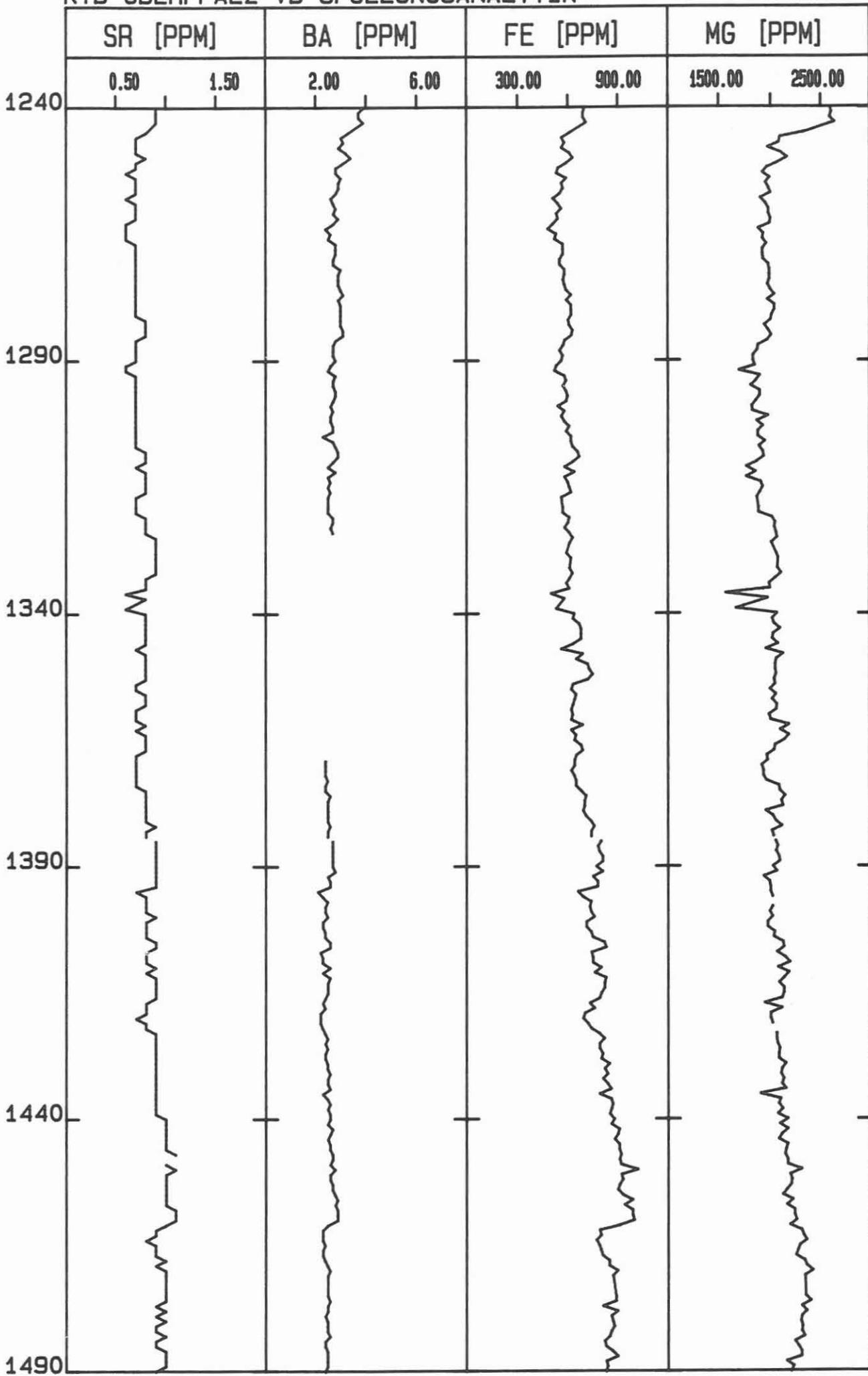
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



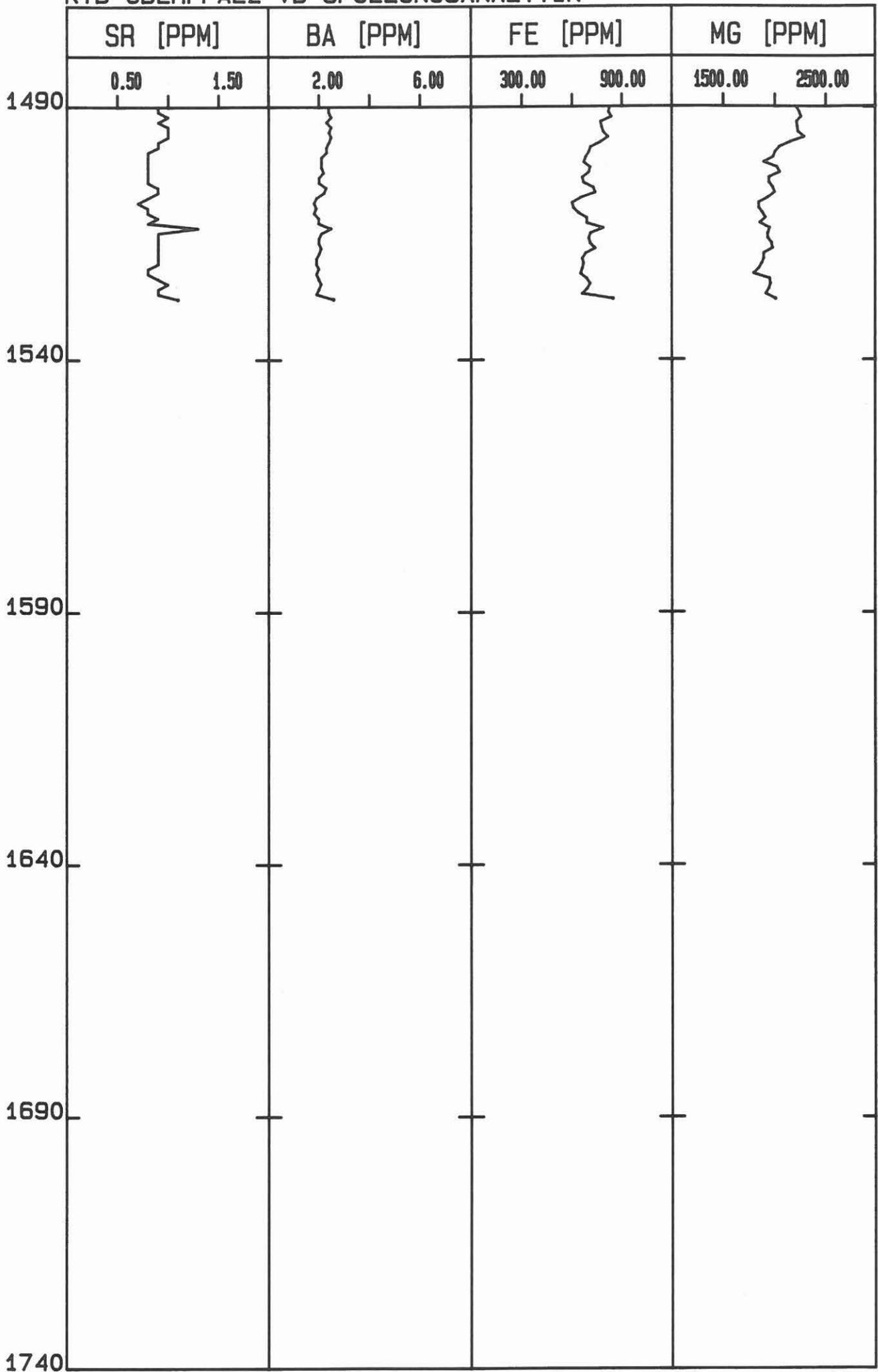
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



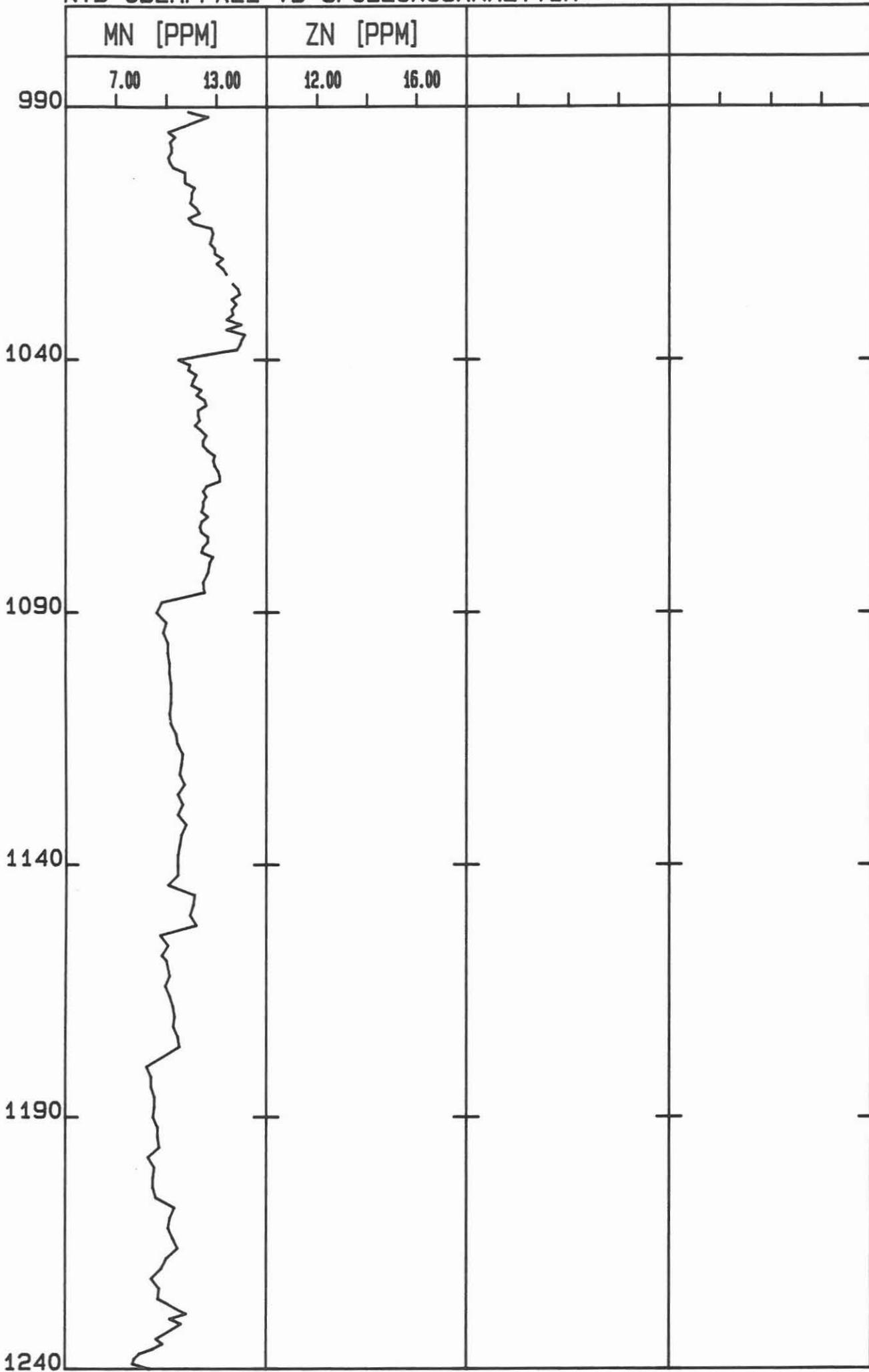
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



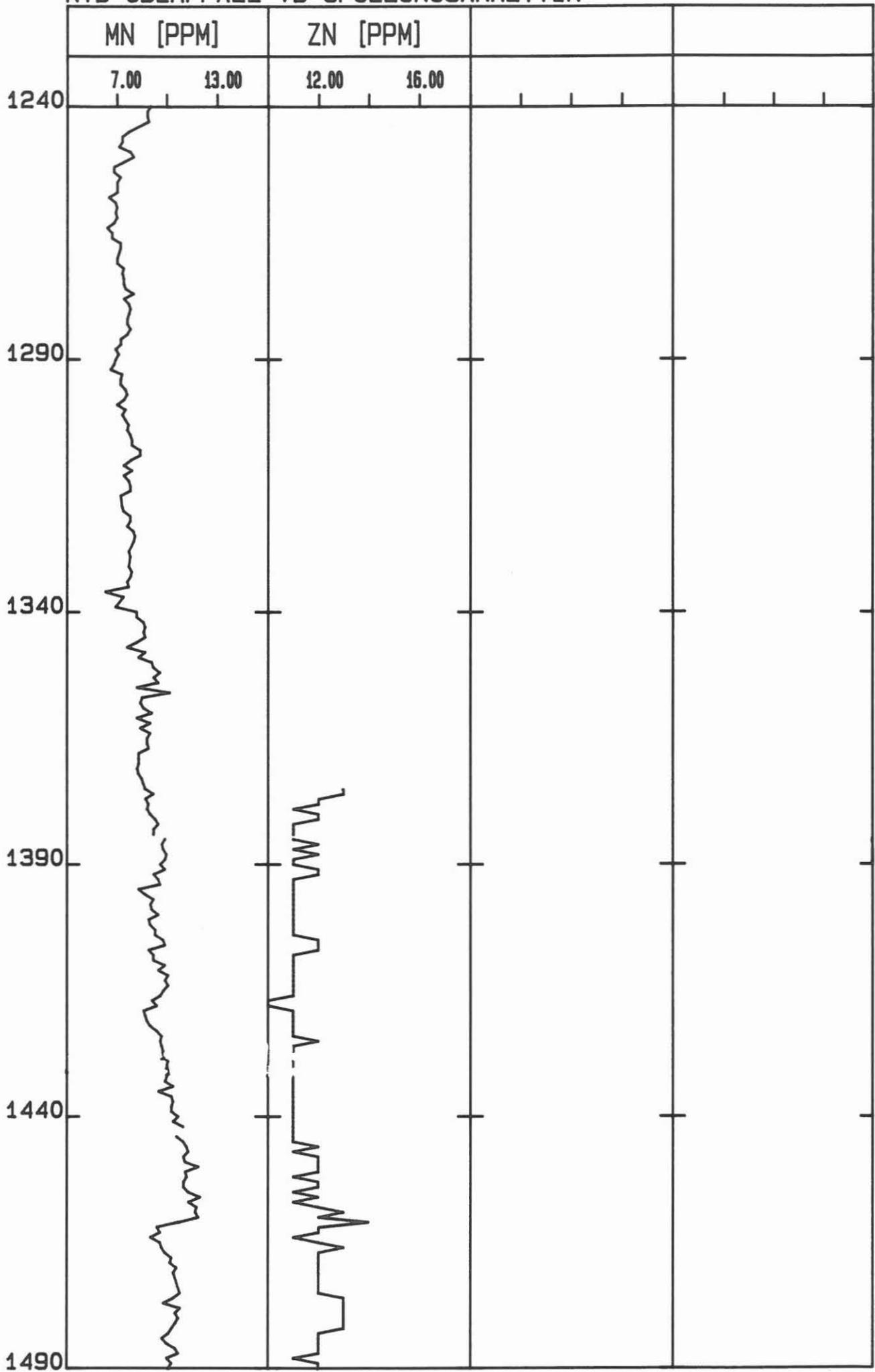
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



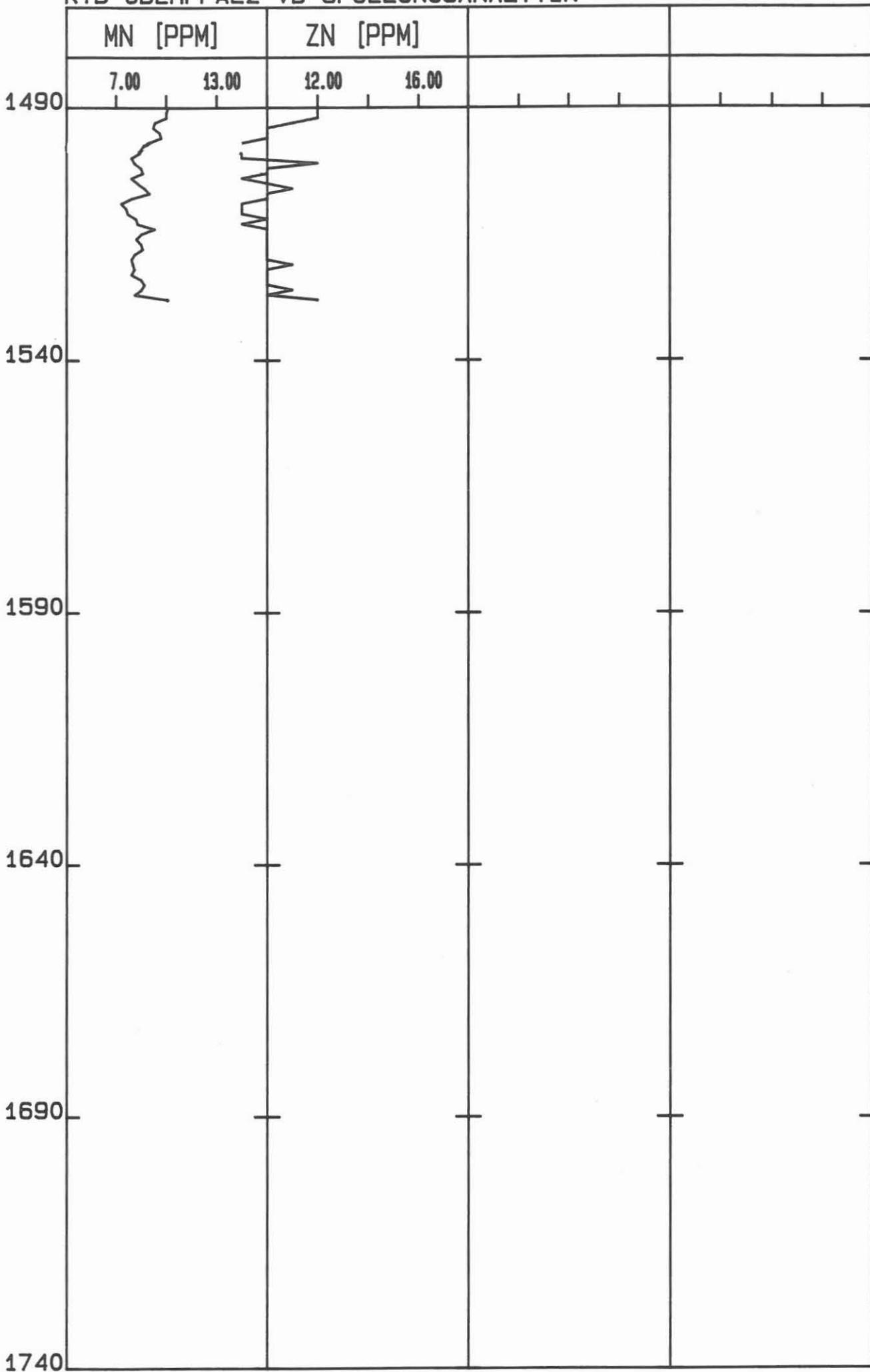
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



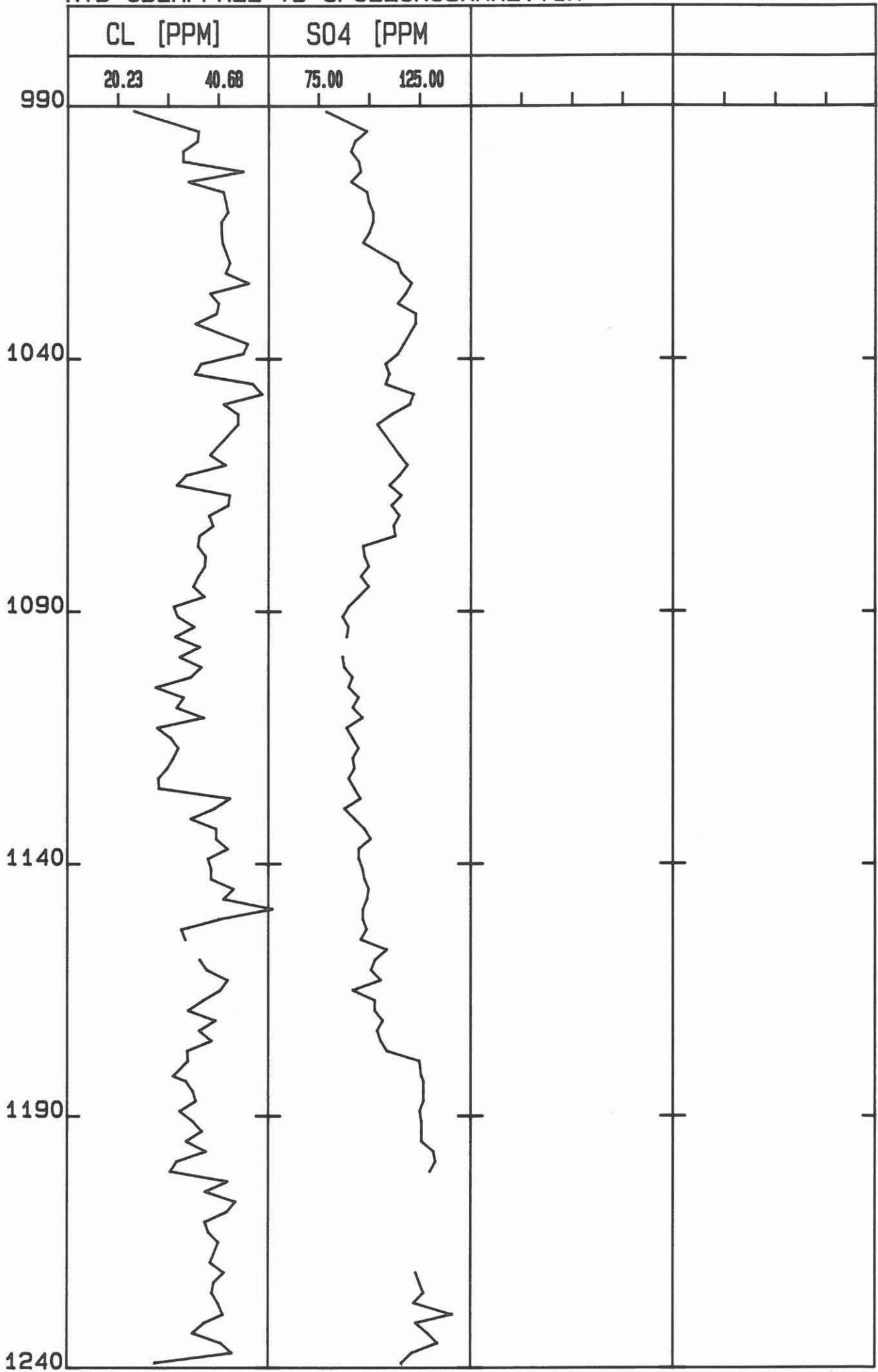
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



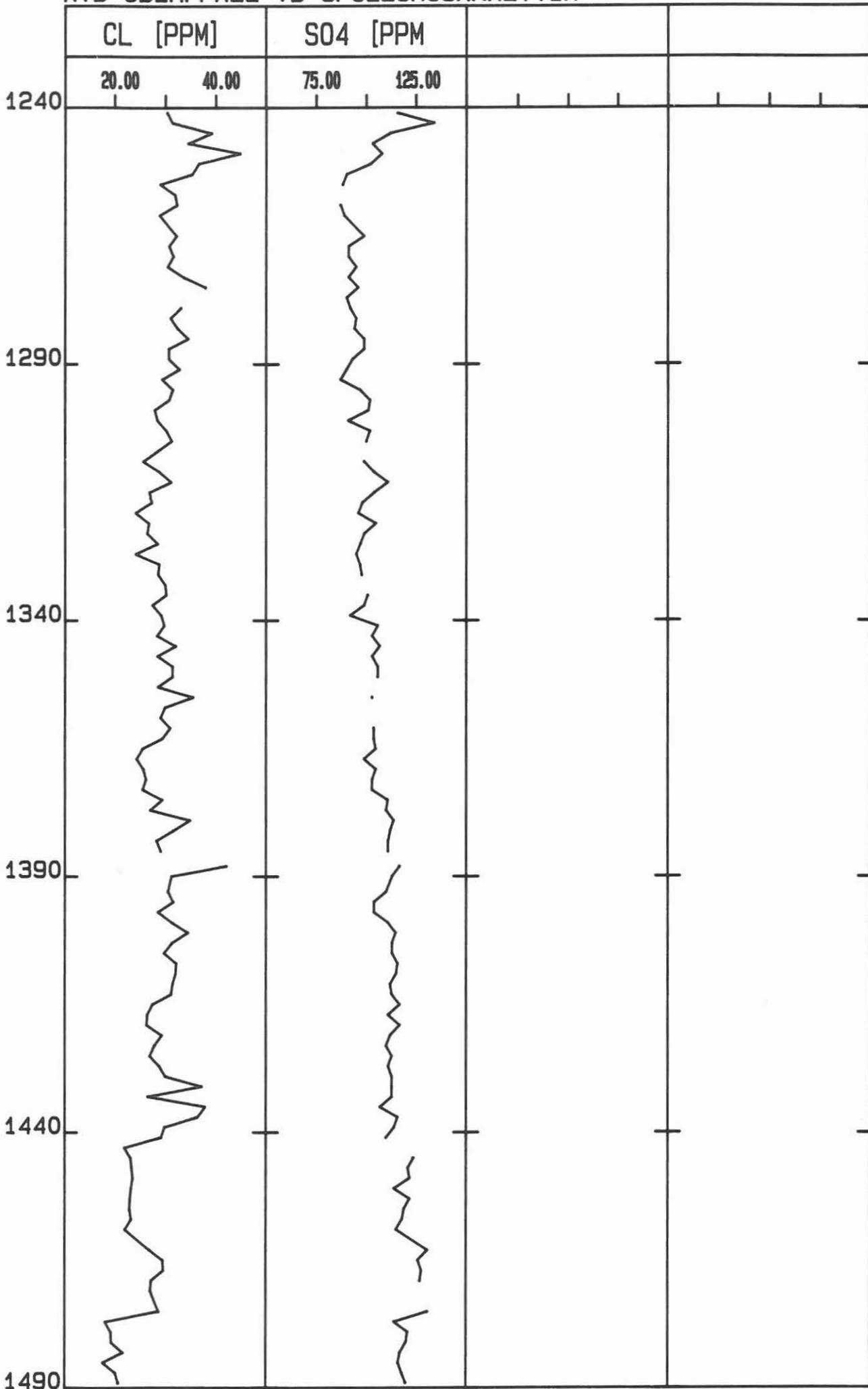
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



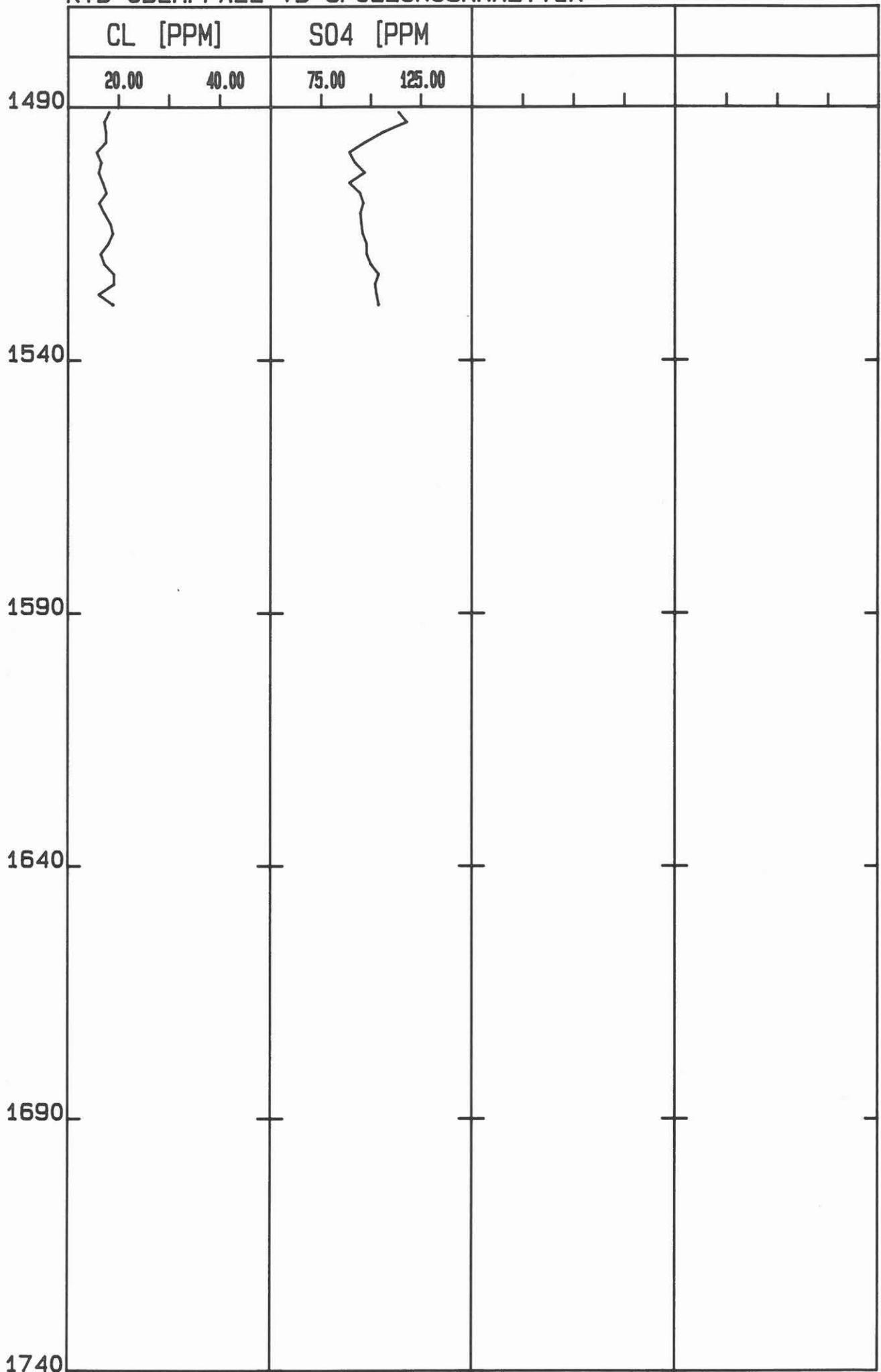
KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK



KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK

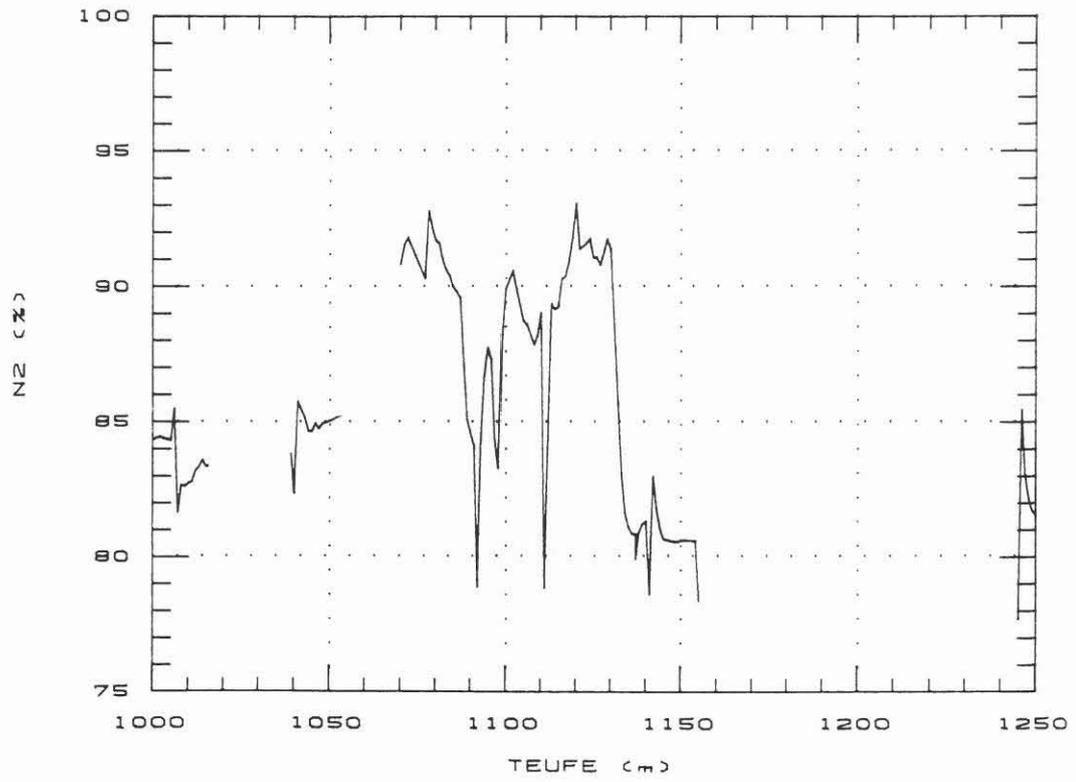


KTB OBERPFALZ VB SPUELUNGSANALYTIK

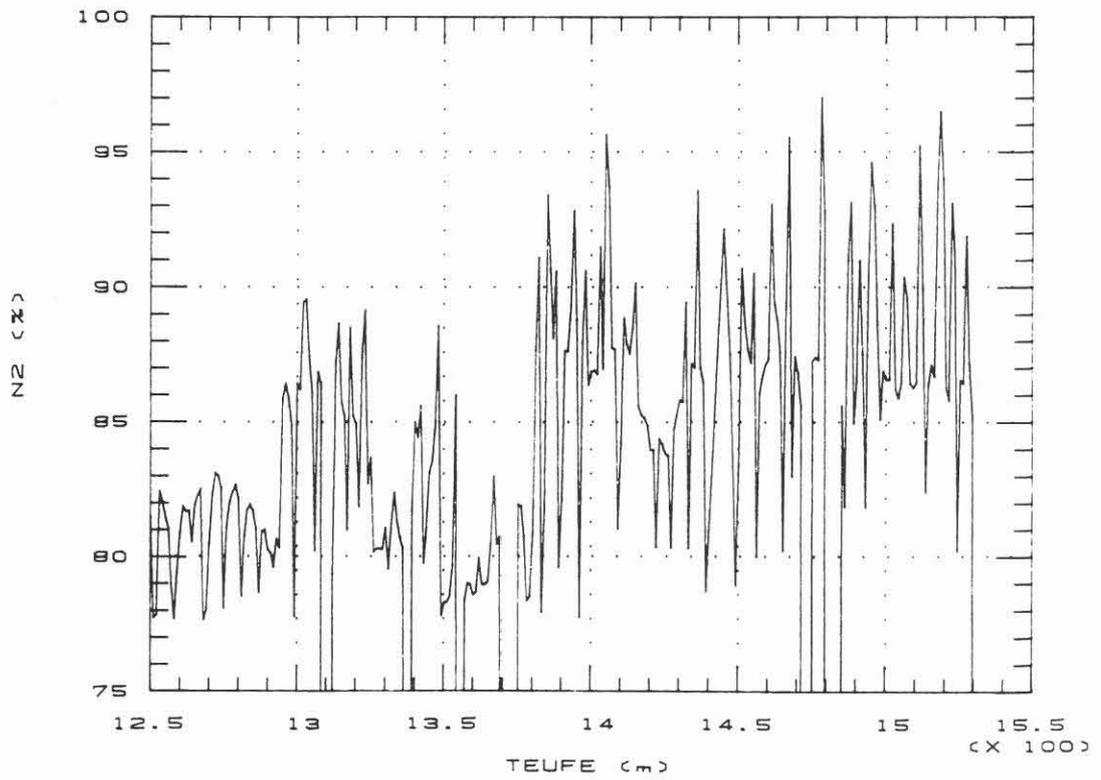


C.9.4 Tiefenlogs der in der Bohrspülung gelösten Gase

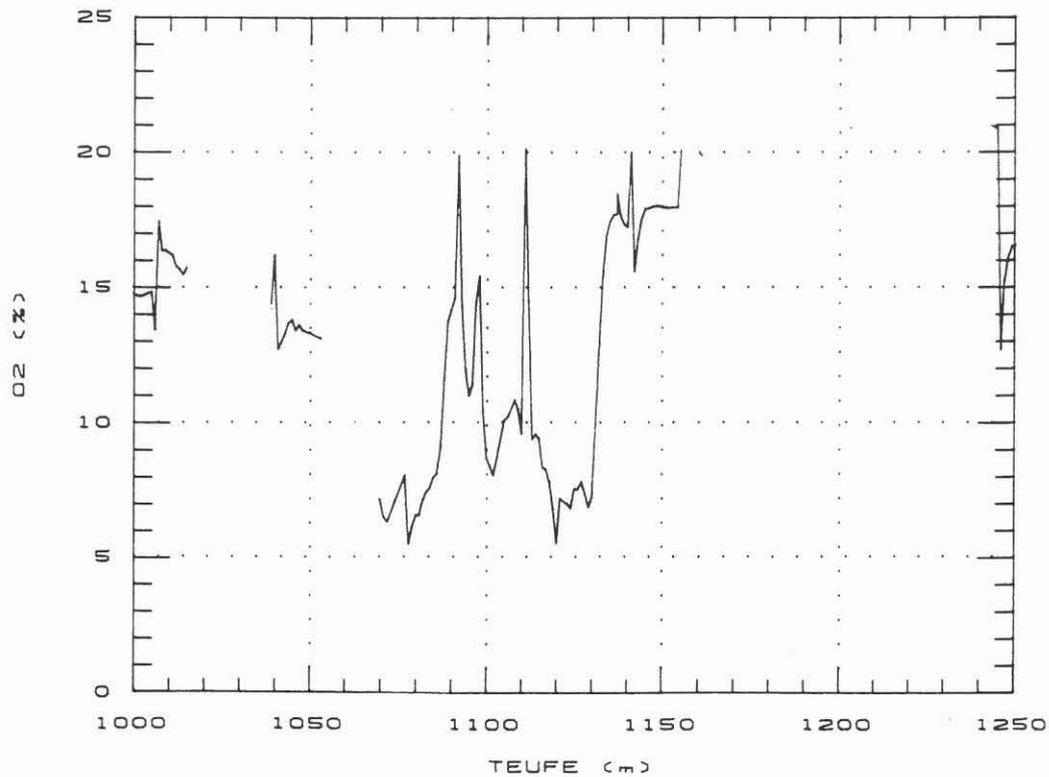
KTB OBERPFALZ VB



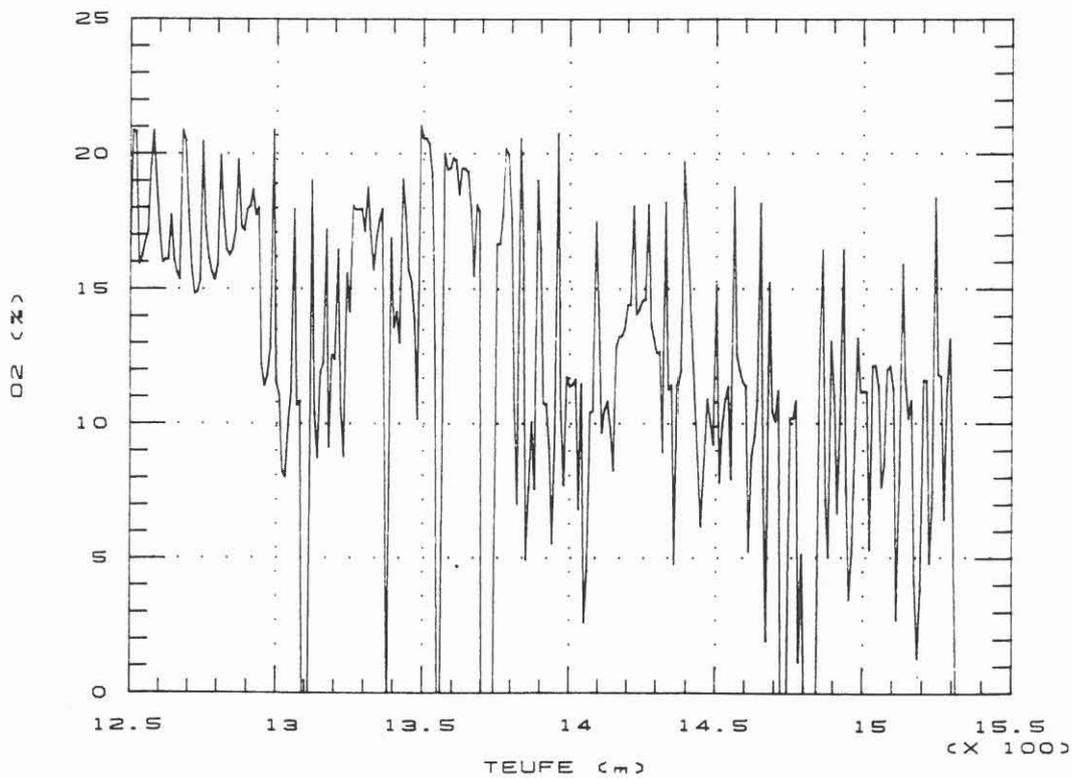
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK



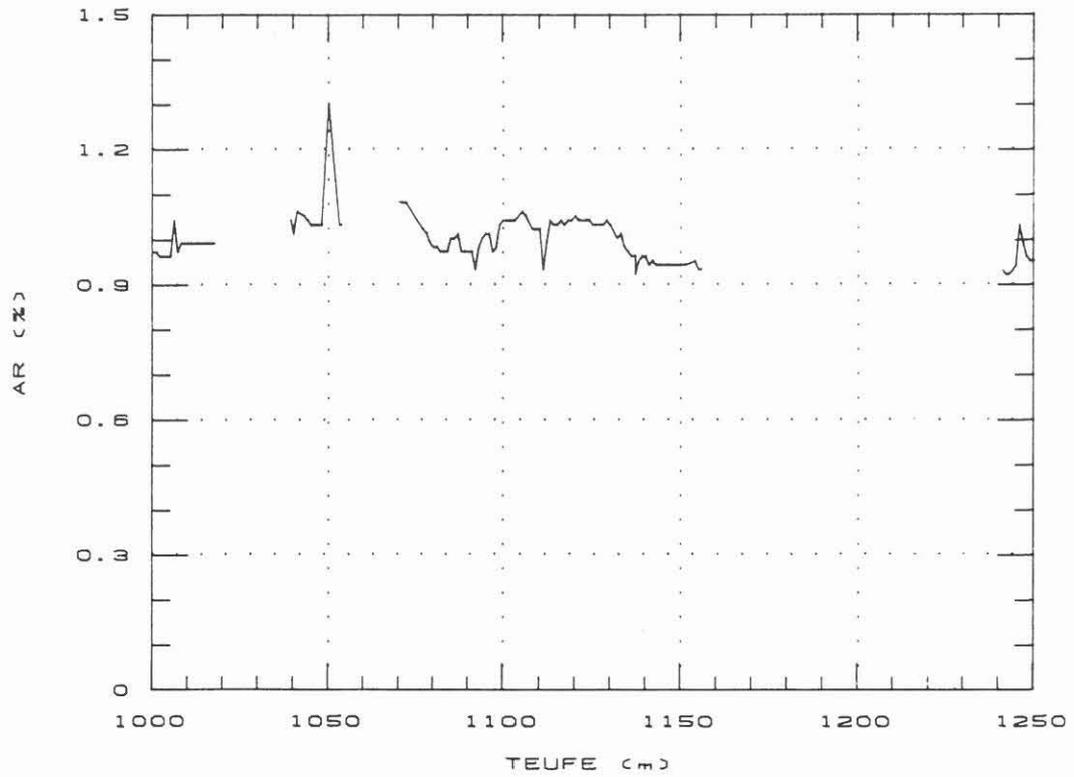
KTB OBERPFALZ VB



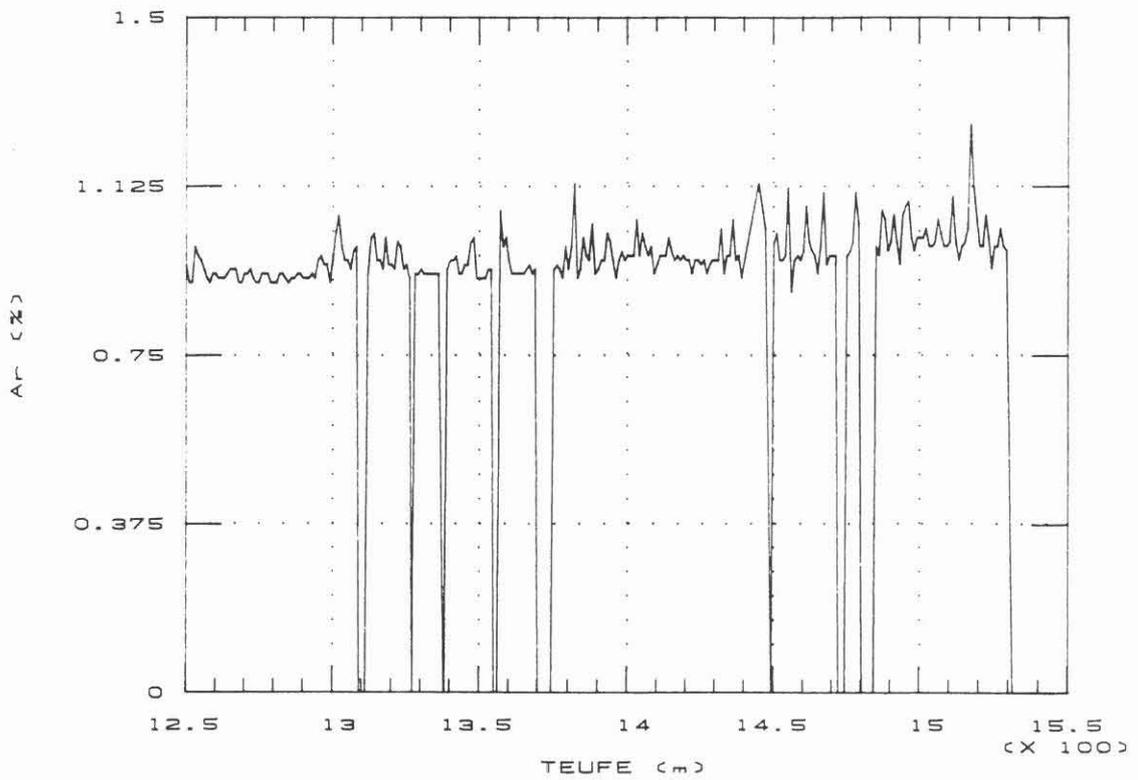
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK



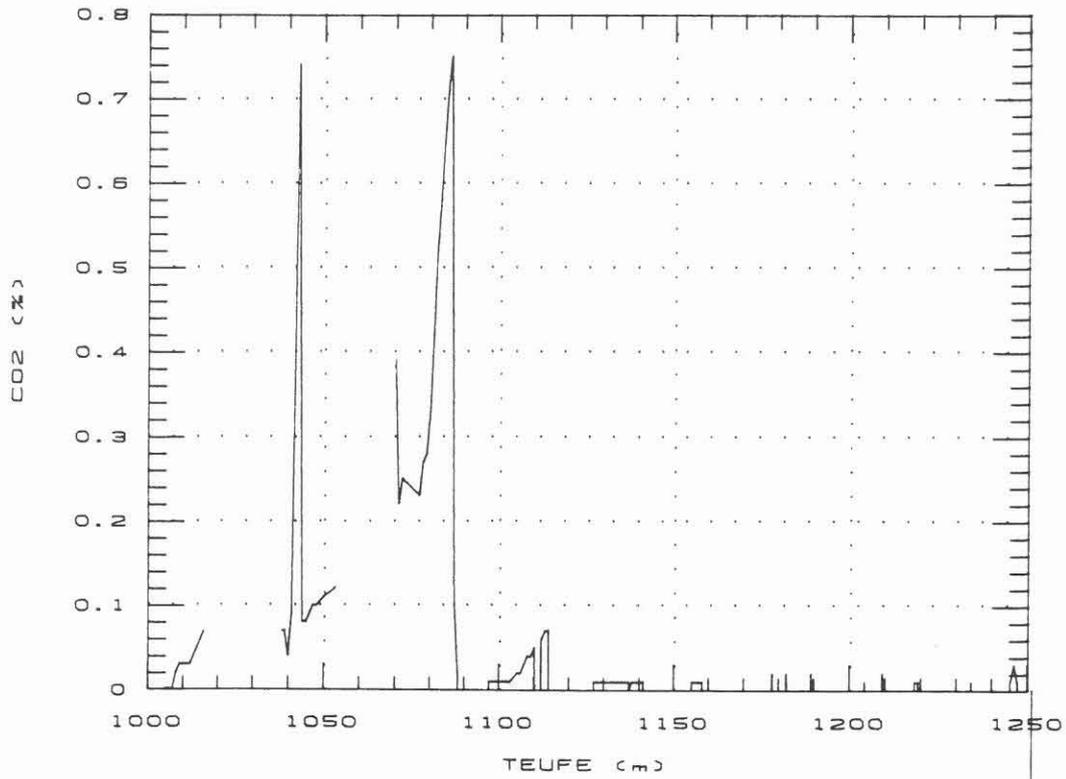
KTB OBERPFALZ VB



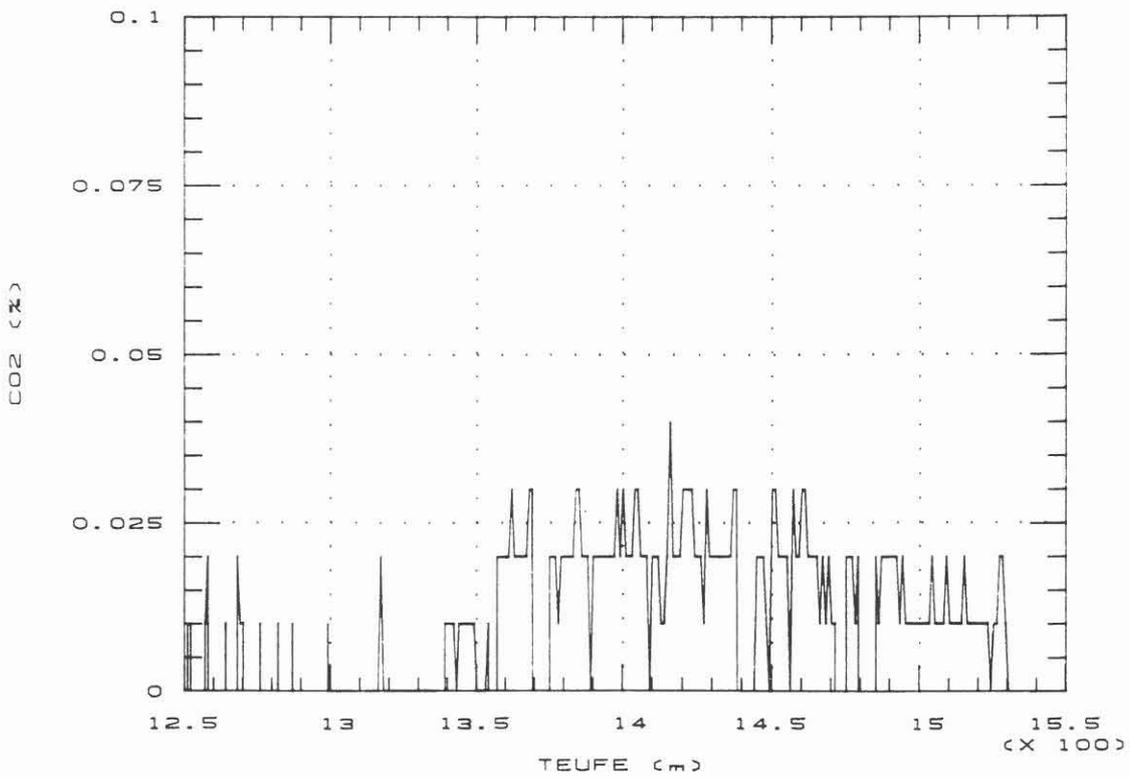
KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK

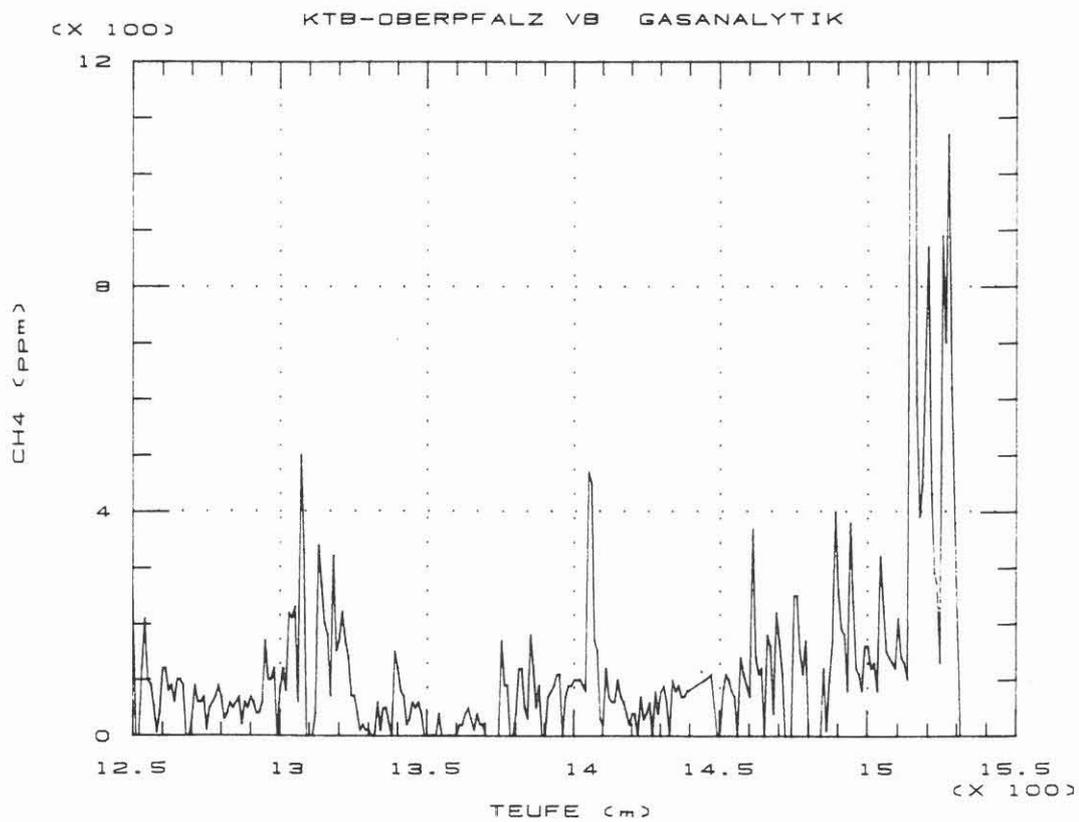
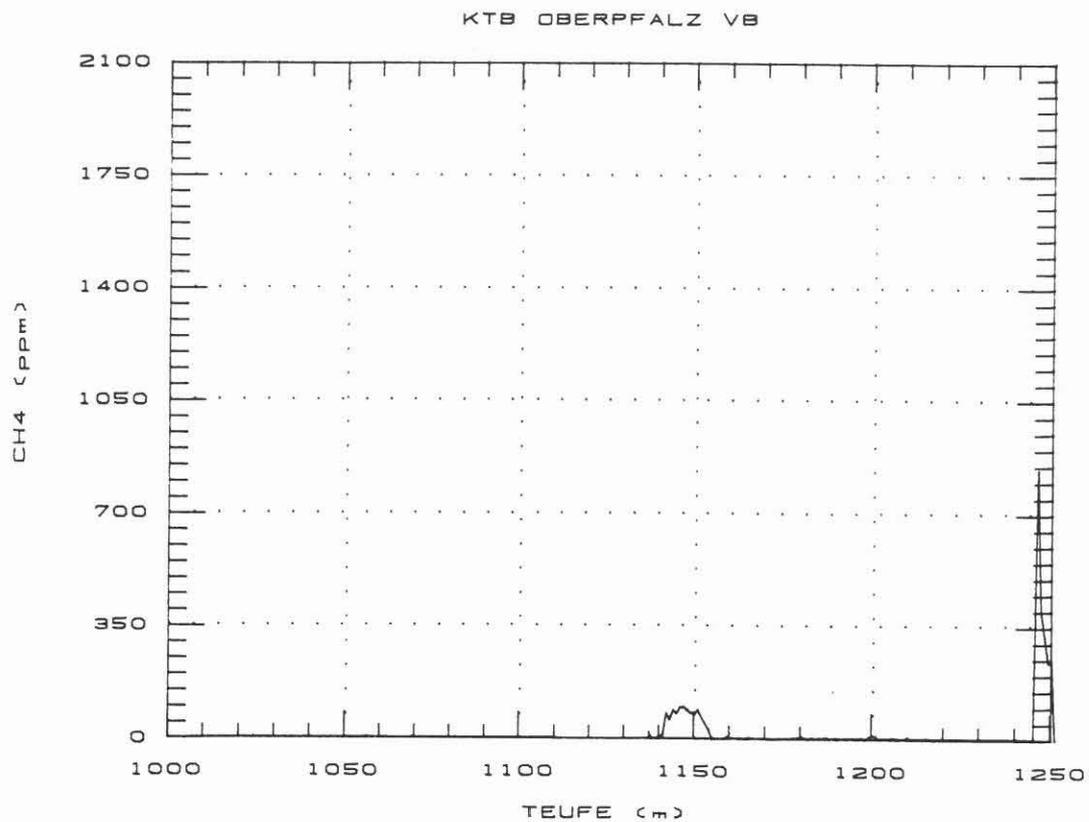


KTB OBERPFALZ VB

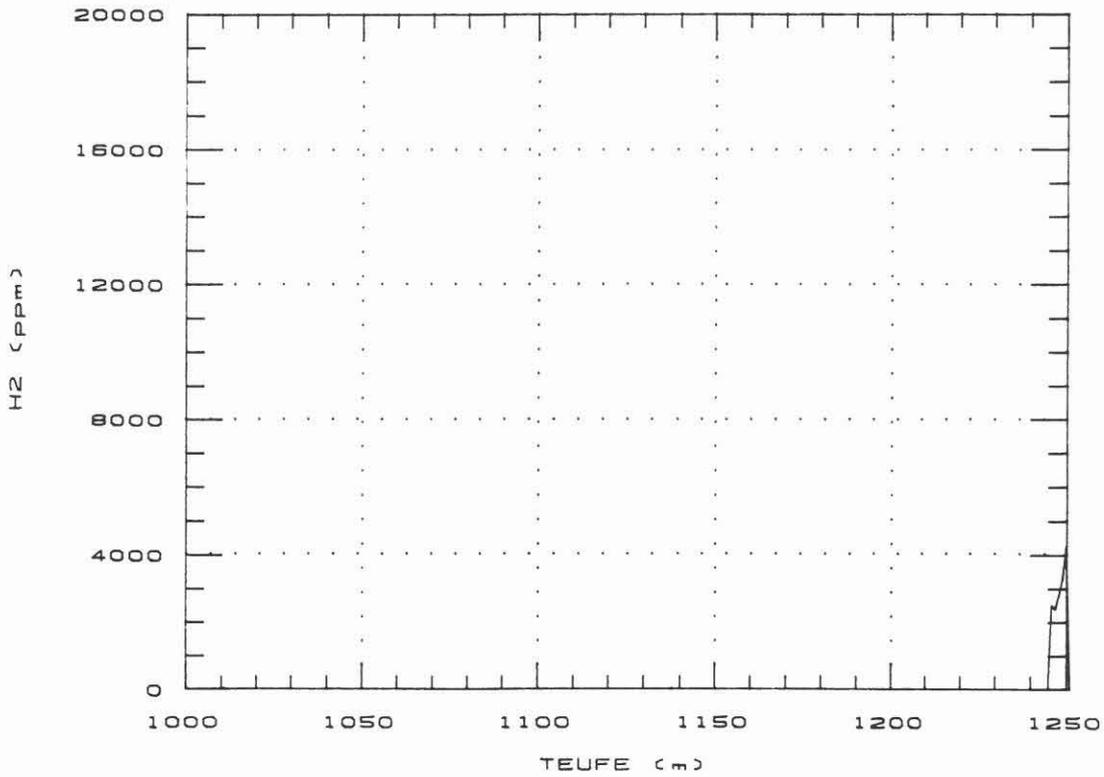


KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK

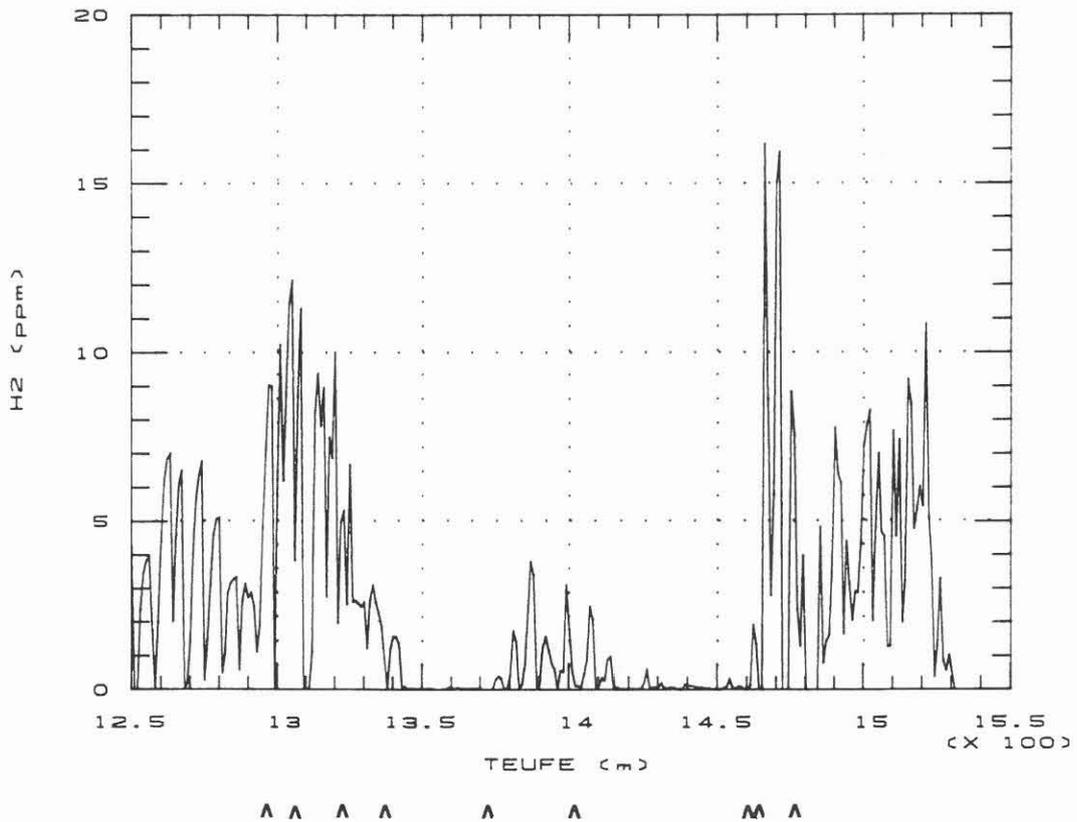




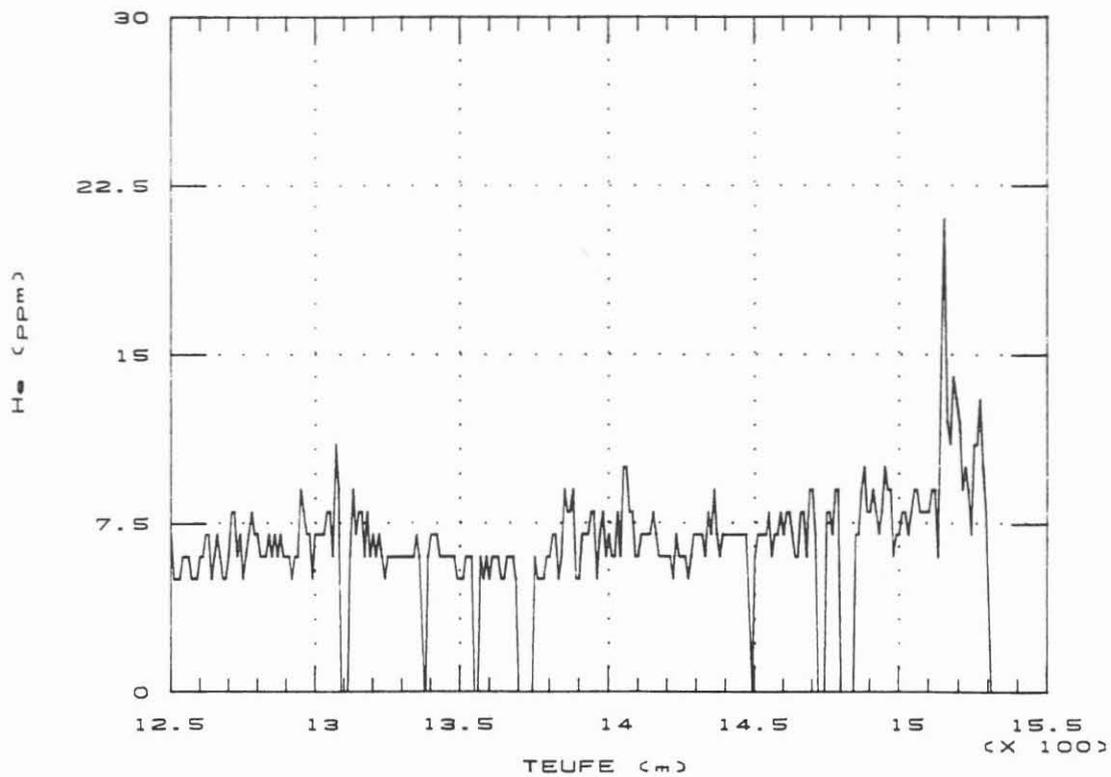
KTB OBERPFALZ VB



(X 1000) KTB OBERPFALZ VB GASANALYTIK



KTB-OBERPFALZ VB GASANALYTIK



## D. Geophysik

### KTB Oberpfalz VB – Gesteinsphysikalische Untersuchungen

A. Rauen  
E. Lippmann  
E. Huenges  
Ch. Bücken  
J. Wienand  
K. E. Wolter



KTB-Report	88-6	D1-D60	34 Abb.	Hannover 1988
------------	------	--------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m:

## D. Geophysik

A. Rauen, E. Lippmann, E. Huenges, Ch. Bucker, J. Wienand & K.E. Wolter \*)

### Inhaltsverzeichnis:

D.1	Einleitung .....	D	2
D.2	Dichte .....	D	3
D.2.1	Allgemeines .....	D	3
D.2.2	Dichte der Cuttings .....	D	3
D.2.3	Dichte der Bohrkerne .....	D	5
D.3	Ultraschallseismik .....	D	6
D.3.1	Allgemeines .....	D	6
D.3.2	Ergebnisse .....	D	6
D.4	Elektrische Leitfähigkeit .....	D	11
D.4.1	Allgemeines .....	D	11
D.4.2	Meßmethode .....	D	11
D.4.3	Ergebnisse .....	D	13
D.4.4	Bemerkungen zu den Meßergebnissen .....	D	14
D.5	Wärmeleitfähigkeit .....	D	19
D.5.1	Allgemeines .....	D	19
D.5.2	Meßmethode .....	D	19
D.5.2.1	Probenvorbereitung .....	D	19
D.5.2.2	Aufnahme der Temperatur-Zeit-Kurven .....	D	22
D.5.2.3	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit .....	D	25
D.5.2.4	Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Proben .....	D	27
D.6	Natürliche remanente Magnetisierung (NRM) .....	D	32
D.6.1	Allgemeines .....	D	32
D.6.2	Beschreibung der Ergebnisse .....	D	32
D.6.3	Königsberger Q-Faktor .....	D	35
D.7	Suszeptibilität .....	D	38
D.7.1	Allgemeines .....	D	38
D.7.2	Suszeptibilität der Cuttings .....	D	38
D.7.3	Suszeptibilität der Bohrkerne .....	D	39
D.7.4	Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkerne und Cuttings .....	D	39
D.7.5	Korrelation Suszeptibilität-Dichte .....	D	40
D.8	Danksagung .....	D	44
D.9	Schriftenverzeichnis .....	D	45
D.10	Spannungs-Nachwirkungsmessungen .....	D	47

\*) Anschrift der Verfasser: KTB-Feldlabor  
8486 Windischeschenbach

### D.1. Einleitung

Der hier beschriebene Bohrabschnitt von 992 m bis 1530 m umfaßt zwischen 992 und 1227 m eine Richtbohrstrecke, in der nur im Teufenbereich von 1177-1183 m ein Kern gezogen wurde (KM 253). Aufgrund des verwendeten Rollenmeißels fielen in der Richtbohrstrecke neben Bohrmehl auch Cuttings (Korngrößen  $\geq 63 \mu\text{m}$ ) an, die auf ihre Suszeptibilität und Dichte hin untersucht werden konnten. An insgesamt 67 Kernmärschen (253-319) im Teufenbereich von 1177-1530 m wurden die Untersuchungen der gesteinsphysikalischen Parameter, soweit möglich, kontinuierlich fortgesetzt.

In den Berichtszeitraum fiel auch der Umzug vom provisorischen Feldlabor in der Schule in Windischeschenbach in das an der Bohrlokation errichtete Zentralgebäude. Damit konnten zusätzliche Apparaturen zur Messung der natürlichen Gamma-Strahlung, der elektrischen Leitfähigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und der Spannungsnachwirkungen aufgebaut werden. Die ersten Ergebnisse werden auf den folgenden Seiten zusätzlich zu den bereits aus den ersten beiden KTB-Reports bekannten Messungen dargestellt.

## D.2 Dichte

### D.2.1 Allgemeines

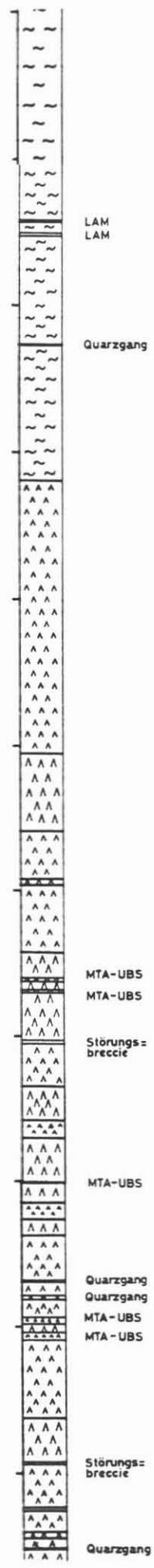
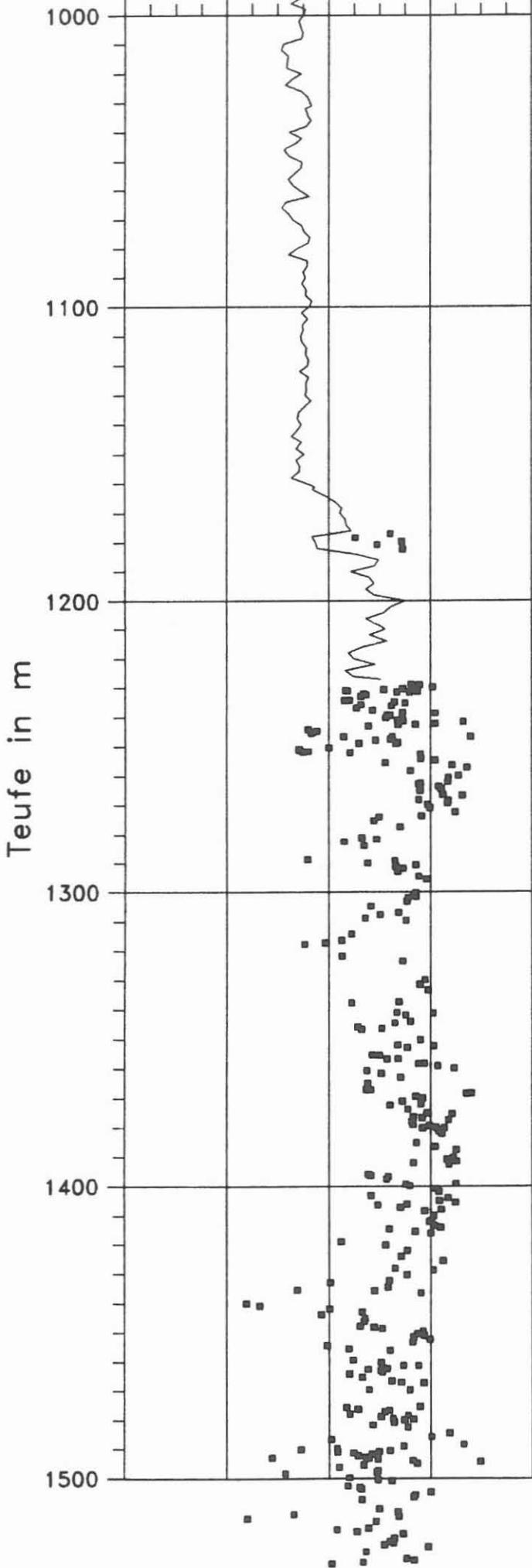
Die Dichte der Kerne (1177-1183 m , 1227-1530 m) wurde nach dem Archimedischen Prinzip bestimmt. Die Dichte der Cuttings (994 - 1227 m) wurde mit dem Pyknometer gemessen. Das im KTB Report 88-1 (BÜCKER et al., 1988) beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Cuttings wurde in diesem Berichtabschnitt modifiziert. Das zur Vermeidung von Luftbläschen im Pyknometer bisher angewandte Auskochen im Trockenschrank wird dadurch umgangen, daß das Wasser nun unter Vakuum in die Pyknometer eingelassen wird. Zusätzlich wird das Wasser vorher noch im Ultraschallbad entgast, Lufteinschlüsse können so weitestgehend entfernt werden. Vergleichsmessungen zwischen diesen beiden Methoden zeigten, daß das Vakuum-Verfahren systematisch höhere Dichtewerte liefert und damit mit den an Kernen gemessenen Werten deutlich besser vergleichbar ist.

### D.2.2 Dichte der Cuttings

Die Dichte der Cuttings wurde von 994 m bis 1227 m kontinuierlich alle 2 m bestimmt (vgl. Abb. D.2.1). Die Dichtewerte weichen in dem Teufenabschnitt bis 1160 m nur wenig von dem Mittelwert  $2.75 \text{ g/cm}^3$  ab. Dabei ist die Schwankungsbreite der Dichte im Teufenabschnitt bis 1080 m (oberhalb der Lamprophyr-Gänge) größer als in dem folgenden Abschnitt bis 1160 m. Dies kann auf eine homogenere Lithologie im Abschnitt 1080 - 1160 m zurückgeführt werden. Der markante Gesteinswechsel vom Granat-Biotit-Gneis zum Granat-Amphibolit in der Teufe 1160 m (vgl. a. Abschnitt B: "Petrographie") ist in den Dichtewerten der Cuttings deutlich erkennbar, die Dichte steigt auf Werte um  $2.9 \text{ g/cm}^3$  an. Auffallend ist aber die an dem Kernmarsch 253 (um 1180 m) gemessene Dichte, die höher liegt als die an den Cuttings aus der gleichen Teufe bestimmte Dichte. Dieser Dichteunterschied zwischen Kernen und Cuttings kann nicht methodisch bedingt sein, sondern muß vielmehr lithologischen Ursprungs sein. Es liegt daher die Vermutung nahe, daß es sich bei den Cuttings aus dem Teufenbereich des Kernmarsches 253 größtenteils um Nachfall handelt. In diesem Bereich ist neben der Dichte auch in der geologischen Ansprache von Kernen und Cuttings ein markanter Unterschied feststellbar, der mit den Dichtewerten korreliert. Bei den Kernen handelt es sich um einen Amphibolit mit Granatanreicherungen, bei den Cuttings wurde in der Teufe 1177 m durch Mikroskopie ein Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis festgestellt (vgl. Abschnitt B, "Petrographie"). Dieses ist ein eindeutiges Indiz dafür, daß der Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis Nachfall aus oberen Teufen ist.

KTB VB, Dichte, g/cm<sup>3</sup>

2.4 2.6 2.8 3.0 3.2



- Granit
- Gneis
- Amphibolit
- Kataklasit
- Kerngewinn

Abb. D.2.1:  
 Dichte der Bohrkerne und  
 der Cuttings im Teufen-  
 bereich 992 - 1 530 m.  
 (\_\_\_ Cuttings, ... Bohr-  
 kerne).  
 Im rechten Teil der Abb.:  
 Litholog.

### D.2.3 Dichte der Bohrkerne

Die starke Heterogenität der Dichtewerte im untersuchten Teufenbereich hängt mit der häufig wechselnden Lithologie zusammen (vgl. a. Abb. D.2.1). Das Litho-Profil umfaßt ab 1227 m neben verschieden ausgebildeten Amphiboliten auch Metagabbros, Meta-Ultrabasite sowie geringmächtige Lagen von Hornblende-Gneisen und Quarzgängen, dementsprechend variiert die Dichte der Bohrkerne zwischen  $2.64 \text{ g/cm}^3$  und  $3.10 \text{ g/cm}^3$ . Typische Werte für die Amphibolite liegen um  $2.9 \text{ g/cm}^3$ , mit einem Streubereich von  $2.8 \text{ g/cm}^3$  bis über  $3.0 \text{ g/cm}^3$ . Dieser weite Variationsbereich ist wahrscheinlich auf unterschiedliche Biotit- und Granat-Führungen im Amphibolit zurückzuführen. Die Metagabbros (1252-1280 m) und die Meta-Ultrabasite (z. B. bei 1383 m und bei 1401 m) fallen durch besonders hohe Dichtewerte um oder über  $3.0 \text{ g/cm}^3$  auf. Die Hornblende-Gneise bei 1250 m Teufe zeigen Dichtewerte um  $2.75 \text{ g/cm}^3$  und der Quarzgang bei 1440 m zeigt noch niedrigere Dichtewerte von  $2.65 \text{ g/cm}^3$ . Die ebenfalls recht niedrigen Dichtewerte innerhalb der Amphibolitserie unterhalb von 1480 m können noch nicht erklärt werden.

### D.3. Ultraschallseismik

#### D. 3.1 Allgemeines

Die Messung der seismischen Geschwindigkeiten der Bohrkerne wurde auch im Teufenbereich 992-1530 mit der Ultraschall-Apparatur USD10 der Firma Krautkrämer durchgeführt (Beschreibung siehe KTB-Report 88-2). Der am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der LMU München entwickelte Meßplatz zur Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten in axialer Richtung befindet sich zur Zeit in der Erprobungsphase, so daß mit ersten Meßergebnissen voraussichtlich im nächsten KTB-Report zu rechnen ist.

#### D.3.2 Ergebnisse

In Abbildung D.3.1 sind die Ergebnisse der Radialdurchschallungen dargestellt. Gezeigt werden die azimutal gemittelten Geschwindigkeiten an insgesamt 256 Kernen.

Der aus der Untersuchung der Cuttings bekannte Übergang von der Gneisserie zu den folgenden Amphiboliten bei 1160 m konnte aufgrund der fehlenden Kerne während der Richtbohrphase durch Geschwindigkeitsmessungen an Bohrkernen nicht erfaßt werden. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß eine Geschwindigkeitsänderung mit Hilfe der Digital Sonic - Long Spacing Messungen (DRAXLER & HÄNEL, 1988) ermittelt werden konnte.

Im Teufenbereich von 1250-1280 m ist eine auf Werte um 7000 m/sec erhöhte Geschwindigkeit auffällig. Dieser Bereich wird lithologisch durch eine monotone, etwa 30 m mächtige Schicht eines Meta-Gabbros charakterisiert. Auffällig sind weiterhin erhöhte Geschwindigkeiten mit Werten bis zu 7000 m/sec bei 1380 m und bei 1410 m. In diesen Teufen treten Meta-Ultrabasite auf. An den Amphiboliten wurden dagegen deutlich niedrigere Geschwindigkeiten um 6000 m/sec mit einer Schwankungsbreite zwischen 5000 m/sec und 6700 m/sec gemessen; insbesondere die Granat-Amphibolite bei 1470 m sowie die migmatischen, Granat-führenden Amphibolite bei 1510 m weisen Geschwindigkeitswerte bis unter 5000 m/sec auf.

Abbildung D.3.2. zeigt nochmals die azimutal gemittelten P-Wellen-Geschwindigkeiten (...). Zusätzlich wurden zur Verdeutlichung etwaiger Trends und Korrelationen in die Abbildung aufgenommen:

- a) die über einen Teufenbereich von 15 m gemittelten Geschwindigkeiten
- b) die über den gleichen Teufenbereich gemittelten Dichten der Kerne.

Da die Daten für Dichte und Geschwindigkeit nicht äquidistant sind, wurde ein gleitendes Mittelungsverfahren angewandt, das die innerhalb eines Teufenintervals von 15m liegenden Meßdaten über die Teufe integriert, aus dem Integral den Mittelwert berechnet und den so erhaltenen Wert dem Mittelpunkt des Teufenintervals zuordnet.

Bedingt durch den Umzug aus dem provisorischen Feldlabor in Windischeschenbach in das Feldlabor an der Bohrlokation konnten im Zeitraum vom 10.-17.2. keine Messungen vorgenommen werden. Die während dieser Zeit angefallenen Kerne konnten z.T. erst Wochen nach der Kernentnahme seismisch untersucht werden. Die in dem betroffenen Teufenbereich 1270-1317m ermittelten Geschwindigkeiten sind deshalb im Vergleich zu den Geschwindigkeiten ähnlicher Gesteinsserien zum Teil deutlich erniedrigt. Es gilt ganz allgemein, daß die gezeigten Daten u.U. stark von Relaxationsprozessen nach Druckentlastung und durch Austrocknungseffekte der Kerne bei langer Lagerzeit zwischen Kernentnahme und Messung verfälscht sein können. Die Veränderungen treten in Richtungen senkrecht zur Foliation stärker auf als parallel zur Foliation und können daher u.U. wesentlich die beobachteten Anisotropien verursachen. Diese Effekte können etwaige Korrelationen zwischen seismischen Geschwindigkeiten und lithologischen Parametern überlagern. Es bedarf daher einer Aufbereitung der Rohdaten, um die erwähnten Effekte soweit wie möglich korrigieren zu können. Aus Zeitgründen konnte eine solche Aufbereitung bisher noch nicht durchgeführt werden.

In den Abbildungen D.3.3.a und b werden einige repräsentative Ergebnisse von Radialdurchschallungen von Bohrkernen unter verschiedenen Azimuten dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine starke Korrelation zwischen P-Wellen-Geschwindigkeit und der für konstante Amplitude nötigen Verstärkung des Empfängers. Dieser Befund kann mit dem Auftreten von Mikrorissen und daraus resultierender schlechterer Durchschallbarkeit des Gesteins erklärt werden.

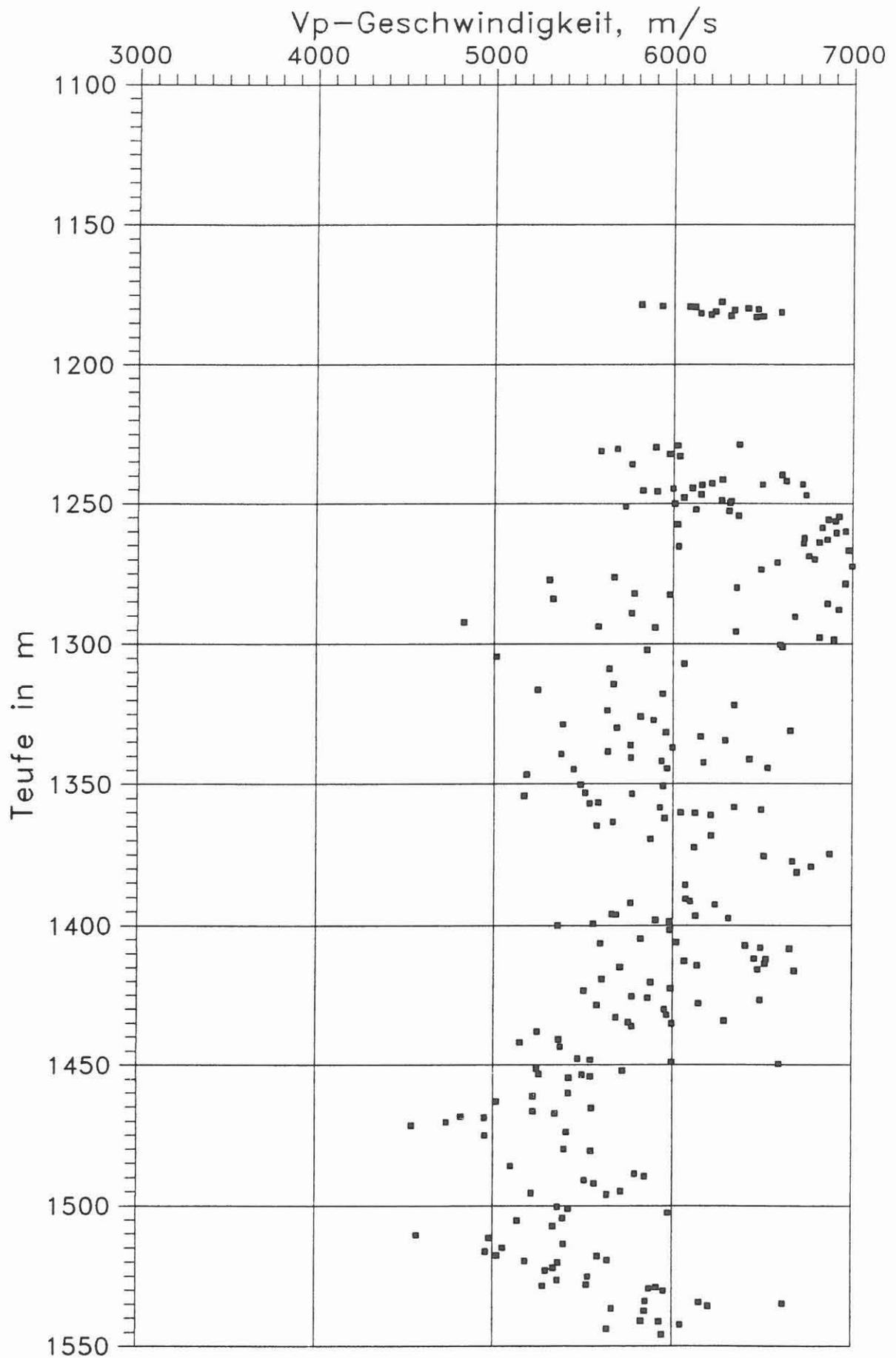
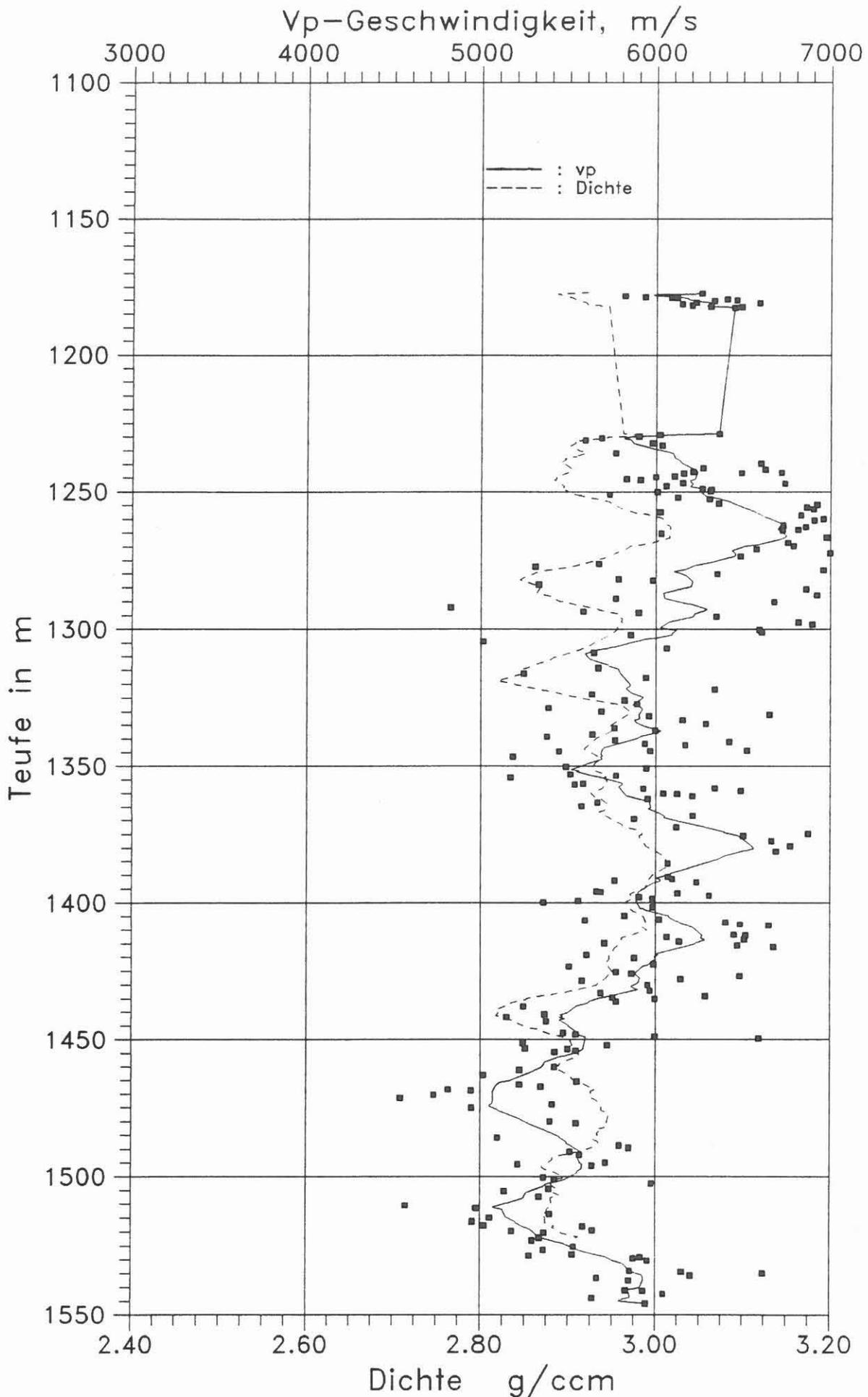


Abb. D.3.1 Ergebnisse der Radialdurchschallungen von Bohrkernen



**Abb. D.3.2** (.....) gemessene P-Geschwindigkeiten  
(——) mittlere P-Geschwindigkeit  
(----) mittlere Dichte  
jeweils gleitendes Mittel über 15 m

Abb. D.3.3.a

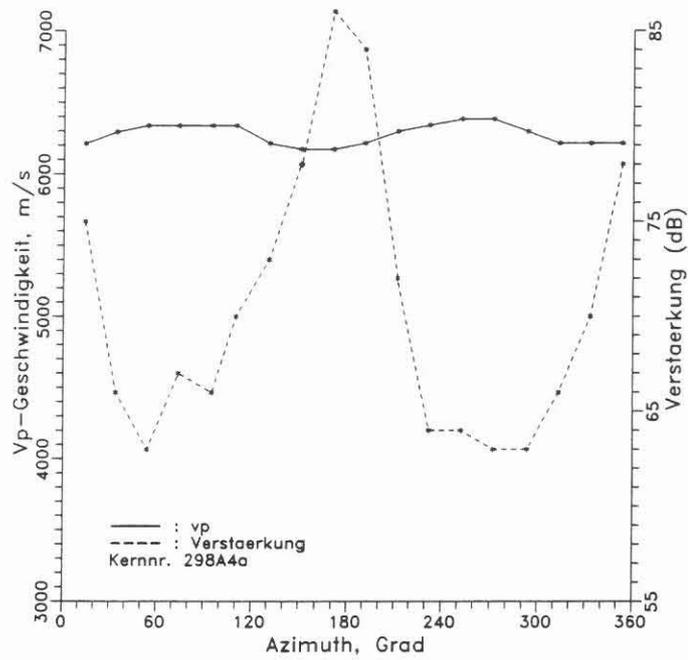


Abb. D.3.3.b

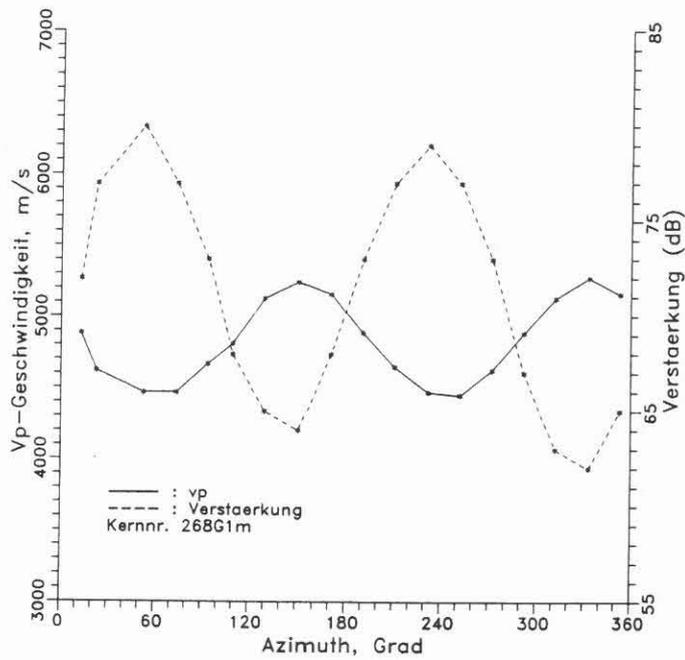


Abb. D.3.3.a und D.3.3.b:  
Typische Beispiele für Radial-Durchschallungen an Bohrkernen unter verschiedenen Azimuten.  
(—) p-Wellen-Geschwindigkeit  
(----) am Empfänger nötige Verstärkung für konstante Amplitude

## D.4. Elektrische Leitfähigkeit

### D.4.1 Allgemeines

Die Apparatur zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Bohrkernen wurde am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München entwickelt und in der dortigen mechanischen Werkstatt und in der Elektronikwerkstatt aufgebaut. Nach Aufbau und Tests in München konnte die Apparatur im April '88 ins Feldlabor transportiert und mit den Messungen an KTB-Bohrkernen begonnen werden.

Da die Bohrkerne des 1. Bohrabschnittes (0 bis 480 m Teufe) zur Freigabe anstanden, mußten, noch bevor Kerne für weitere Untersuchungen nach außen vergeben wurden, die elektrischen Messungen durchgeführt werden. Aus der Kürze der Zeit resultiert die geringe Anzahl von 19 vermessenen Kernproben. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargelegt, ebenso die Ergebnisse aus den Messungen an Bohrkernen aus dem 2. Bohrabschnitt (480 m bis 992 m Teufe).

Die Bohrkerne müssen annähernd zylinderförmige Gestalt haben, d.h. planparallele Enden aufweisen, um in die vorhandene Meßapparatur eingesetzt werden zu können. Das Sägen der Endflächen beansprucht die Bohrkerne stark, so daß viele der ausgewählten Kerne dadurch zerfallen und für die Messung nicht mehr geeignet sind. Außerdem müssen die Proben eine Mindestlänge von 9 cm aufweisen.

Aus diesen Gründen konnten von den 50 ausgewählten Bohrkernen aus dem 2. Abschnitt (entsprechend einem Meßpunktsabstand von etwa 10 m) nur 32 Kerne tatsächlich gemessen werden.

### D.4.2 Meßmethode

Ein Wechselspannungsgenerator liefert eine in der Amplitude veränderliche Wechselspannung von 20 Hz Frequenz. Diese Wechselspannung wird an die abgesägten Enden des Bohrkerns angelegt (vgl. Abb. D.4.1).

Um die Übergangswiderstände gering zu halten und dadurch einen möglichst hohen Meßstrom durch den Bohrkern zu erreichen, erfolgt die Ankopplung der stromzuführenden Kupferelektroden nicht direkt, sondern über wassergetränkte Filzscheiben. In verschiedenen Versuchen hat sich gezeigt, daß eine Ankopplung über stark saline Elektrolyte (wie zum Beispiel gesättigte Kupfersulfatlösung) nicht nötig war, um einen ausreichenden Meßstrom zu realisieren. Mit der Verwendung von normalem Leitungswasser wird auch eine chemische

Beeinflussung des Bohrkerns ausgeschlossen.

Der durch den Bohrkern geleitete Strom verursacht längs des Kernes, aufgrund dessen elektrischen Widerstandes, einen Abfall der elektrischen Spannung. Dieser Spannungsabfall über eine bestimmte Strecke wird über ringförmige Elektroden gemessen. Diese Kupferblech-belegten Potentialelektroden werden direkt auf die Mantelfläche des Bohrkernes aufgelegt. Sowohl zur Messung des Stromes, als auch zur Spannungsmessung werden handelsübliche Digitalmultimeter verwendet.

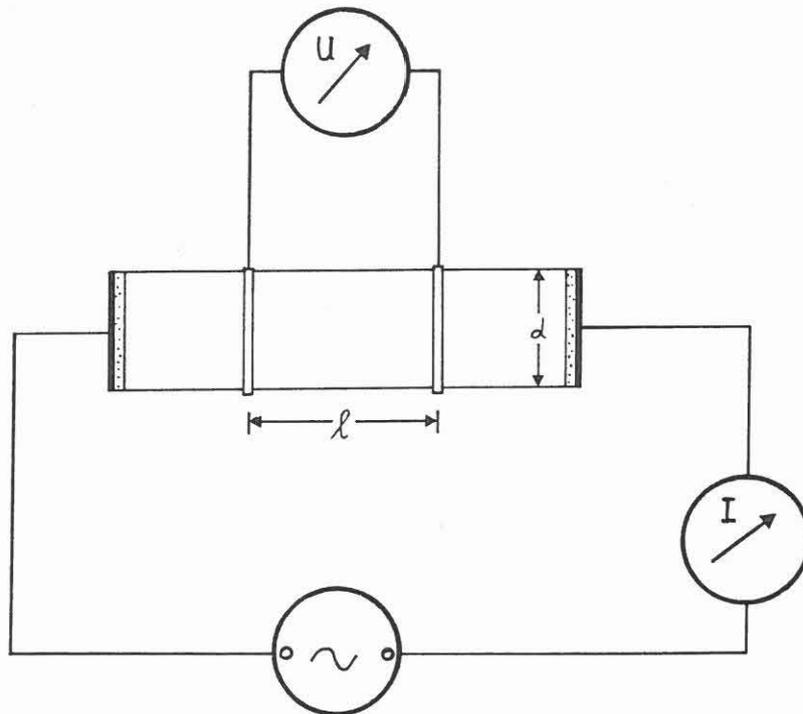


Abb. D.4.1. : Aufbau der Apparatur zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Bohrkernen.

Der spezifische elektrische Widerstand  $\varrho$  (in der Einheit  $\Omega\text{m}$ ) eines Bohrkerns berechnet sich zu :

$$\varrho = \frac{U}{I} * \frac{A}{l} \quad (\text{D.4.1})$$

mit : U = Potentialdifferenz (Spannung) in V

I = Strom in A

A = Querschnittsfläche des Bohrkerns in  $\text{m}^2$

l = Abstand der Potentialelektroden in m

Für jede Probe werden mehrere Wertepaare von Spannung in Abhängigkeit des Stromes gemessen, um eine statistische Datensicherheit zu erreichen. Der Geometriefaktor  $A/l$  wird für jede Meßreihe einmal bestimmt.

Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  (in der Einheit  $1/\Omega m = S/m$ ) ist gleich dem Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes :

$$\sigma = 1 / \rho \quad (D.4.2)$$

Da der spezifische elektrische Widerstand, bzw. sein Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit, sehr stark von der Füllung des Porenraumes abhängt, werden alle Bohrkern über Nacht in ein Bad mit normalem Leitungswasser gelegt. Durch diese, bei allen gemessenen Bohrkernen gleiche Behandlung sind die Randbedingungen, was die Wassersättigung des offenen Porenraums angeht, für jeden Bohrkern in gleicher Weise festgelegt.

#### D.4.3 Ergebnisse

In der Abbildung D.4.2 sind die gemessenen spezifischen elektrischen Widerstände von Bohrkernen des 1. Bohrabschnittes in einem Teufenlog dargestellt. Die großen Datenlücken sind zum Teil durch die hohen Kernverluste und den schlechten Erhaltungszustand der Kerne aus diesem Bohrabschnitt zu erklären, zum anderen Teil auch durch die bereits geschilderten Schwierigkeiten bei der Präparation.

Es fällt die enorme Variationsbreite der Meßwerte über  $2\frac{1}{2}$  Dekaden auf. Der Kern mit dem höchsten gemessenen Widerstand (Kernstück 15D2e) von  $40000 \Omega m$  stammt aus dem Marmorband in etwa 130 m Teufe. Der kleinste gemessene Widerstand beträgt  $119 \Omega m$ , gemessen an einem Stück Amphibolit (48A1b) aus etwa 333 m Teufe, der Vererzungen in Form von Pyrit und Magnetkies aufweist (vgl. KTB-Report 88-1, GRAUP et al., 1988).

Im nächsten Log (vgl. Abb. D.4.3) sind die gemessenen Widerstände von Bohrkernen des 2. Bohrabschnitts in Abhängigkeit der Teufe dargestellt. Hier ist der Variationsbereich wesentlich kleiner als im 1. Abschnitt, wie auch aus dem eintönigen Verlauf der Lithologie unterhalb 530 m (Gneise) (vgl. KTB-Report 88-2, HACKER et al., 1988) zu erwarten war. Trotzdem fallen im Mittel erhöhte Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes im Teufenbereich unterhalb 720 m Teufe auf.

Dies könnte eventuell auf einen verringerten Erzgehalt im Gestein zurückzuführen sein, aber auch durch eine verminderte Elektrolytleitfähigkeit (evtl. verursacht durch eine verringerte Porosität) zu erklären sein. Eine eindeutige Aussage ließe sich durch die Kenntnis der Frequenzabhängigkeit des

gemessenen Widerstandes treffen.

#### D.4.4 Bemerkungen zu den Meßergebnissen und zum weiteren zeitlichen Verlauf der Messungen

Wie in der Abbildung D.4.4 deutlich wird, hängen die Meßergebnisse stark von der Durchfeuchtung der Meßprobe ab. Unter der Annahme, daß der Bohrkern im Gebirge "bergfeucht", d.h. wassergesättigt war, hängt die Durchfeuchtung zum Zeitpunkt der Messung wiederum davon ab, wie lange ein Bohrkern schon dem Trocknungsprozeß an der Luft ausgesetzt und wie vollständig die nachträgliche Sättigung mit Wasser war.

Die Konsequenz aus diesen Trocknungseffekten muß sein, die Bohrkern möglichst bald nach dem Erbohren, noch im ursprünglichen bergfeuchten Zustand, zu vermessen. Durch den erst vor kurzem ermöglichten Einsatz der Meßapparatur ergab sich jedoch die Notwendigkeit, bereits vor Monaten erbohrte Proben nachträglich elektrisch zu vermessen.

Dazu muß versucht werden, den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen. Dies soll durch das Einlegen der Proben über Nacht in ein Wasserbad erreicht werden. Dieses einfache Verfahren kann natürlich keinen genau definierten Wassersättigungsgrad liefern, da die Sättigung außer von der Zeit, die die Probe im Wasserbad verbrachte, sicher noch vom Porenvolumen und von der Permeabilität der Probe abhängt. Die einfache und schnelle Anwendbarkeit dieser Methode und der relativ geringe Unterschied zu einer im Vakuum wassergesättigten Probe (vgl. Abb. D.4.5) rechtfertigen diese Vorgehensweise.

Um das zeitraubende Sägen der Kerne zu vermeiden, ist eine zweite Elektrodenanordnung im Aufbau. Diese Anordnung entspricht im Prinzip einer Wenner-Geometrie, wie sie auch in der Feld-Geoelektrik Anwendung findet. Die 4 annähernd punktförmigen Elektroden werden hierbei auf die Mantelfläche des Bohrkernes aufgepreßt. Über die beiden äußeren Elektroden wird der Meßstrom eingespeist und durch die beiden inneren Elektroden die Spannung abgegriffen. Diese Methode ist auch mit Bohrloch-Meßverfahren (DLL, SHDT, FMST, vgl. KTB-Report 87-3, HÄNEL, 1988) vergleichbar.

Diese Apparatur hätte aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung den zweiten wesentlichen Vorteil, auch Messungen an kleinen Bohrkernen oder auch nur Bohrkernbruchstücken zu ermöglichen. Gerade auch im Hinblick auf den zu erwartenden stückigen Bohrkernanfall in größeren Tiefen der Hauptbohrung erscheint eine solche Apparatur sehr wichtig.

Desweiteren ist geplant, auch die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes zu bestimmen. Die Kenntnis der Frequenzabhängigkeit des Widerstandes bildet eine wertvolle Informationsquelle zum Verständnis der Leitungsmechanismen in einem elektrisch leitfähigen Medium. So ist beispielsweise eine Unterscheidung in elektrolytische und elektronische Leitungsmechanismen erst durch frequenzabhängige Messungen möglich.

Die Entwicklung und der Bau dieser Meßanordnung erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen der Arbeitsgruppe Geophysik des Feldlabors und dem Münchner Institut für Geophysik.

KTB VB, spez. elektr. Widerstand in  $\Omega \cdot m$

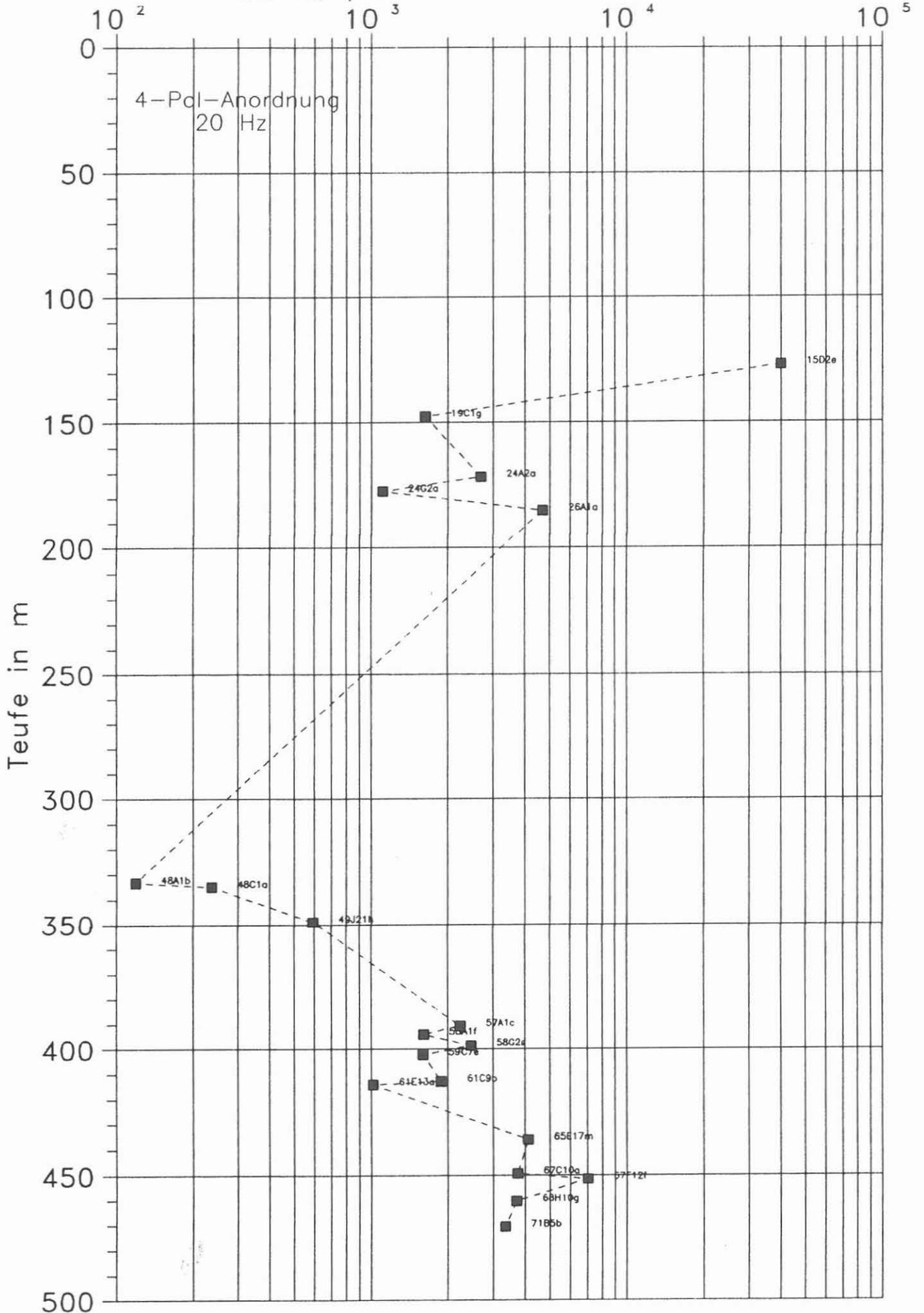


Abb. D.4.2 : spezifischer elektrischer Widerstand von Bohrkernen im Tiefenbereich von 0 bis 480 m.

KTB VB, spez. elektr. Widerstand in  $\Omega m$

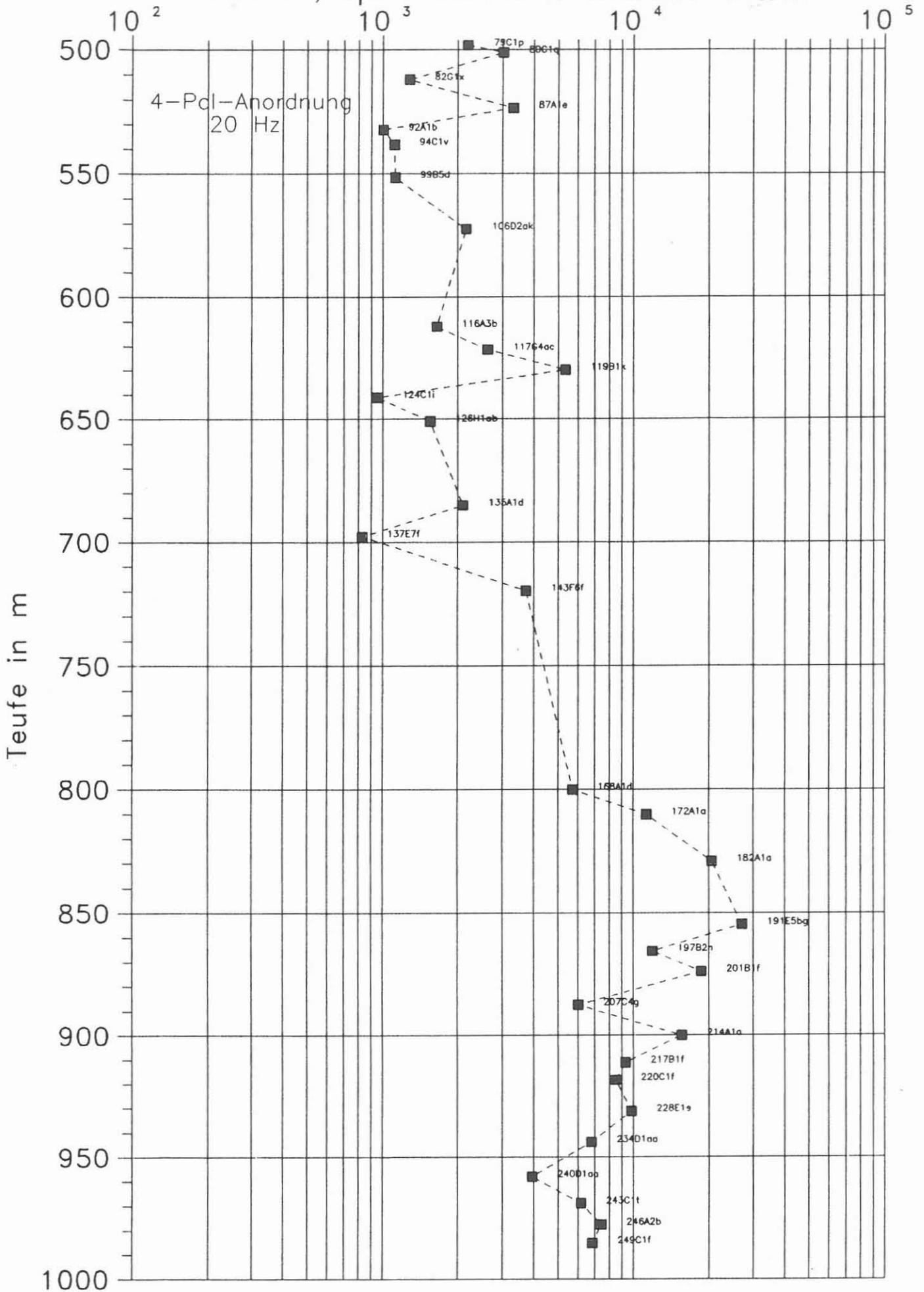


Abb. D.4.3 : spezifischer elektrischer Widerstand von Bohrkernen im Tiefenbereich von 480 m bis 992 m.

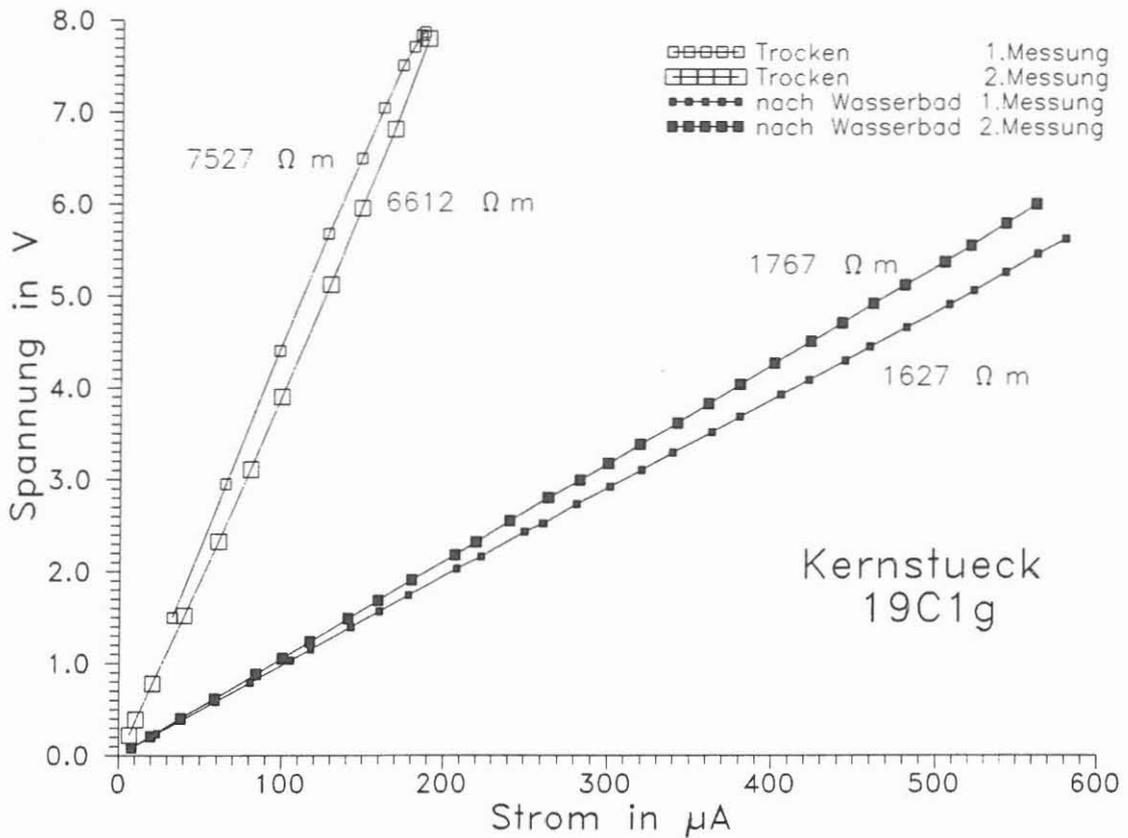


Abb. D.4.4 : gemessene Spannung in Abhängigkeit vom eingespeisten Strom. Nach Gleichung D.4.1. berechnet sich für jede Meßreihe der spezifische elektrische Widerstand.

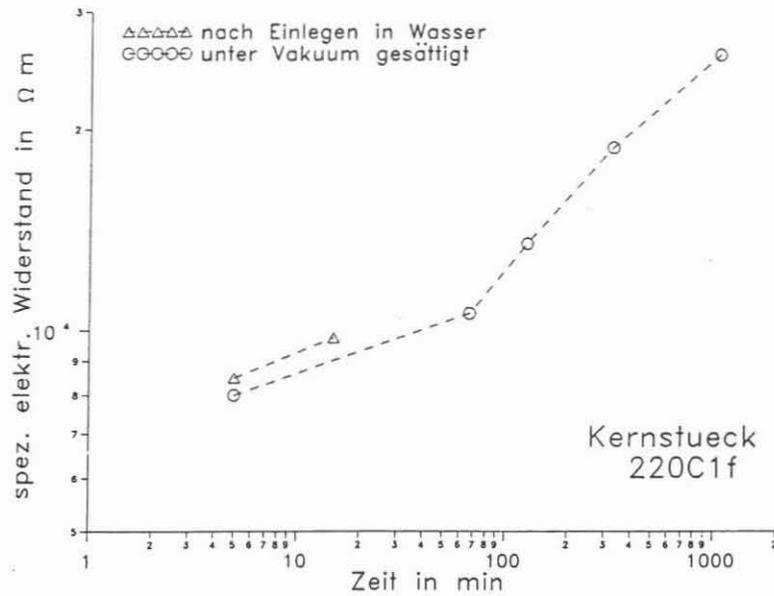


Abb. D.4.5 : Austrocknungseffekte . Vergleich gemessener spez. elektr. Widerstände in Abhängigkeit von der Austrocknungszeit. Der Bohrkern wurde auf 2 Arten präpariert :  
 - durch Einlegen in Leitungswasser (hier: 2 Wochen)  
 und später  
 - durch Wassersättigung unter Vakuum

## D.5 Wärmeleitfähigkeit

### D.5.1. Allgemeines

Zur Bestimmung des Wärmestroms aus dem Erdinnern und der Temperaturverteilung im Erdinnern benötigt man die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit (im folgenden Wlf) der Gesteine, die durch das Fourier-Gesetz (1) beschrieben wird :

$$(1) \quad q = k * \text{grad } T$$

mit q	: Wärmeflußdichte	(W/m <sup>2</sup> )
k	: Wlf-Tensor	(W/m K)
grad T	: Temperaturgradient	(K/m)

Eine stationäre Wlf-Bestimmung an Gesteinen gemäß Gleichung (1) kommt zur Ermittlung dieser Materialeigenschaft wegen zu großer Versuchszeiten für das Feldlabor nicht in Frage. Statt dessen muß die Wlf aus einer Aufheizkurve des Gesteins bestimmt werden. Am Institut für Angewandte Geophysik der Technischen Universität Berlin wurde ein für einen automatischen Meßablauf geeignetes instationäres Verfahren entwickelt. Dazu wird die Wlf aus dem Temperaturverhalten einer zylindrischen Wärmequelle an der Probenoberfläche bestimmt.

### D.5.2. Messung der WLF von Gesteinen mit Hilfe der Halbraum-Linien-Quellen-Apparatur

#### D.5.2.1 Probenvorbereitung

In der Halbraum-Linien-Quellen-Apparatur (HLQ) sind die zylindrische Wärmequelle und ein Thermistor zur Temperaturmessung innerhalb einer sogenannten Nadelsonde angeordnet. Diese Nadelsonde ist in einem Halbraum schlechter Wlf, einem rechteckigen Plexiglaskörper (100 x 75 x 29 mm) eingebettet. Abb. D.5.1 zeigt den Aufbau der Nadelsonde, bestehend aus zwei durchbohrten Keramikrohren in einem Edelstahlrohr ( $\varnothing$  2 mm), die durch den eingeklebten Thermistor in der Mitte der Sonde getrennt sind. Durch die ganze Länge wird ein Heizdraht hin und zurückgeführt.

Damit die Halbraum-Randbedingung hinreichend gut erfüllt ist, muß die Meßfläche auf einem Volumen mit einer Mindestgröße von 80 mm x 70 mm x 35 mm liegen. Beim momentanen Entwicklungsstand (Juni 1988) sind als Meßflächen gesägte und geschliffene Flächen (400er Körnung) an der Stirn oder auf einer Kalotte eines Bohrkerns geeignet. Es wird zur Zeit getestet, ob mit einer Neukonstruktion des Sondenhalbraums und einer Ankopplung an die nicht bearbeitete Zylindermantelfläche eine Wlf-Bestimmung mit annehmbaren Fehlern (d.h. < 5 %) möglich ist.

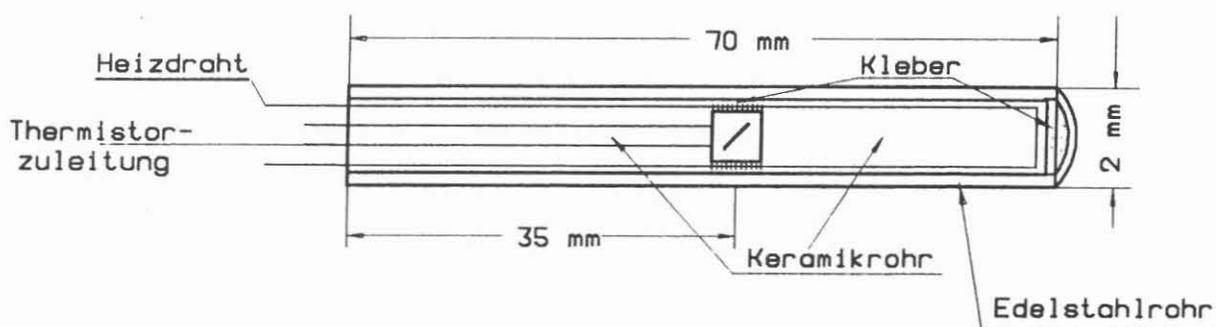


Abb. D.5.1 Aufbau der Nadelsonde

Für die Routineuntersuchungen im Feldlabor sind genaue Bestimmungen des Sättigungszustands aller Proben zeitlich nicht durchführbar. Die Bohrkerns sind nach der Entnahme aus dem Kernrohr für die Durchschallungs- und die Dichtemessung in Wasser gelegt worden. Die hier beschriebenen Wlf-Messungen erfolgten einige Monate später, so daß die Proben im Kernlager austrockneten. Vor der Messung wurden sie daher mindestens eine Stunde in Leitungswasser gelegt.

Zur Abschätzung des Einflusses dieser Teilsättigung wurden im Institut für Angewandte Geophysik in Berlin an ausgewählten Gesteinen mit der unten beschriebenen Meßanordnung Versuche gemacht, die ergaben, daß diese Teilsättigung die Wlf eines vakuumgetrockneten Gesteins mit einer Porosität von 1 % um ca. 1 % erhöht. Eine Vollsättigung, d. h. Wassersättigung einer vorher evakuierten Probe, erhöht die Wlf einer 1 % porösen Probe um ca. 10 %. Bei Gesteinen mit weit höheren Porositäten ist der Einfluß der durch die oben genannte Prozedur erreichten Teilsättigung schwerer faßbar. Daher ist in Ergänzung zu den Routineuntersuchungen geplant, die Wlf ausgewählter Proben unter Vakuumsättigung und Vakuumtrocknung zu vermessen. Das Austrocknen in ca. einer Stunde zwischen Entnahme aus dem Wasserbad und Abschluß der Messungen macht sich bei den niedrigporösen Kernen nicht bemerkbar.

Als Kontaktmittel zwischen Gesteinsfläche und Sondenhalbraum hat sich Spülflüssigkeit mit 2.5 % Dehydril HT bewährt. Infolge ihrer thixotropen Eigenschaften kann man von nahezu ausschließlich konduktiver Wärmeleitung ausgehen, die im oben genannten Berliner Institut zu  $0.7 \text{ W/mK}$  bestimmt worden ist. Die Spülung trocknet zwar im Laufe der Messung aus, bildet aber mit ihren schwerer flüchtigen Bestandteilen und infolge ihrer Adsorptionseigenschaften (siehe HEINSCHILD et al, 1988) einen dünnen Film auf der Gesteinsfläche, der reproduzierbare Messungen der Wlf zuläßt. Andere Kontaktmittel wie Wärmeleitpaste (Siliconpaste der Fa. Wacker Chemie) und ein Wasser-Glyzerin-Gemisch schieden wegen der schlechteren Reproduzierbarkeit bzw. wegen der möglichen chemischen Veränderungen der Proben aus.

# HALBRAUM-LINIEN-QUELLEN-APPARATUR

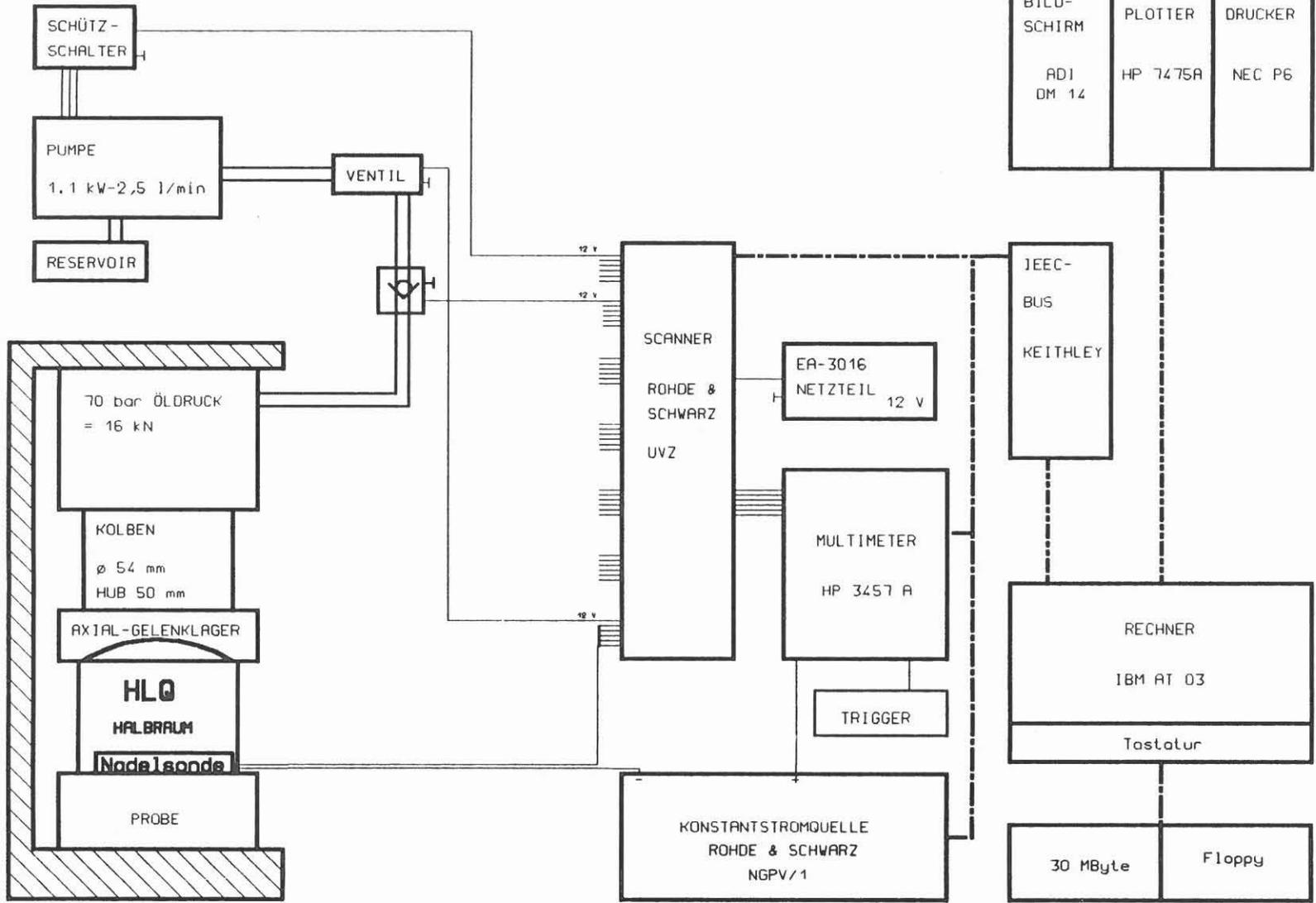


Abb. D.5.2 Halbraumlinienquellen-Apparatur im KTB-Feldlabor zur Messung der Wlf an Bohrkernen

Abb. D.5.2 stellt den Meßaufbau der HLQ-Apparatur exemplarisch für eine Meßstelle dar. Insgesamt können fünf Halbraumsonden, vier auf Kalottenflächen und eine auf die Stirnfläche eines präparierten Bohrkerns aufgedrückt werden.

Die Druckeinstellung erfolgt mit einer Hydraulikpumpe und je Meßstelle mit einem Schaltventil, einem Rückschlagventil, damit die Pumpe abgeschaltet werden kann, einem Öldruckkolben zur Kraftübertragung und einem Axialgelenklager zum Ausgleich nichtparalleler Flächen. Die Pumpe und die Ventile werden mit dem Scanner vom Rechner geschaltet. Untersuchungen an verschiedenen Gesteinen haben ergeben, daß reproduzierbare Wlf-Werte schon bei 5 bar Sondenanzpreßdruck erreicht werden. Eine Erhöhung auf 30 bar ergibt keine Veränderung der Wlf innerhalb der Fehlergrenzen. Im Feldlabor werden daher 5 bar Sondenanzpreßdruck eingestellt.

Das hier beschriebene Wlf-Meßverfahren wird mit Eichkörpern überprüft. Macor, eine Glaskeramik, bezogen bei der Firma Schröder in Ellerau, eignet sich z. B. als Eichkörper, da es homogen aufgebaut ist, kein Wasser aufnimmt und eine Wlf ähnlich der Gesteine besitzt. Dieser Körper wurde bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig mit einem stationären Verfahren auf  $1.61 \text{ W/mK} \pm 1 \%$  vermessen. Ein weiterer Eichkörper stammt aus einer Quick Thermal Conductivity Meter (QTM)-Apparatur, welche vom NLFb Hannover freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde. Die Wlf dieser Glaskeramik wird mit  $1.34 \text{ W/m} \pm 5 \%$  angegeben. Zu bemerken ist, daß bei der hier vorgestellten Methode der Eichkörper zur Kontrolle des Systems dient, nicht zur Ermittlung von empirischen Korrekturfaktoren. Das weiter unten beschriebene Auswerteverfahren benötigt keine Kalibrierung. Die Wlf von Macor wurde so auf  $1.57(2) \text{ W/m K}$  und die Wlf des  $1.34$ -Körpers auf  $1.36(3) \text{ W/m K}$  bestimmt. In Klammern sind die Fehler des Mittelwertes notiert, die sich hier jeweils aus 10 Wiederholungsmessungen ergaben. Sie beziehen sich auf die letzte angegebene Ziffer des Meßwertes. Die Abweichungen der gemessenen Mittelwerte von den Eichwerten liegen unter 2 %.

#### **D.5.2.2 Aufnahme der Temperatur-Zeit-Kurven eines konstant geheizten Gesteins**

Die beschriebene instationäre Wlf-Messung erfordert eine zeitlich konstante Heizleistung. Abb. D.5.3 zeigt die gemessene Leistung der in Luft gehaltenen Halbraumsonde, also ohne Wärmeabfuhr, über die typische Versuchsdauer von 150 Sekunden. Trotz des sich durch die Temperatur ändernden Heizdrahtwiderstandes zeigt Abb. D.5.3, daß die Konstantstromquelle die Leistung innerhalb von  $0.02 \%$  konstant hält.

Zur Bestimmung der Aufheizkurve wird der Thermistorwiderstand mit einer 4 Leitermessung, also unter Ausschluß von Kabel Fehlern, vom Multimeter genauer als  $0.0001 \%$  erfaßt. Abb. D.5.4

zeigt, daß durch Eichung und Polynom Anpassung relative Temperaturänderungen auf ca.  $5/10000$  °C bestimmt werden können. Das Multimeter wird mit einem Schwingquarztrigger auf  $1 \mu\text{s}$  genau jede Sekunde getriggert. In die Zeitbestimmung geht auch die Totzeit zwischen Durchschalten des Heizstroms und der Aufnahme des ersten Meßwerts ein. Diese Verzögerung wurde mit einem Frequenzzähler auf  $1 \mu\text{s}$  genau vermessen und die Zeiten werden entsprechend korrigiert.

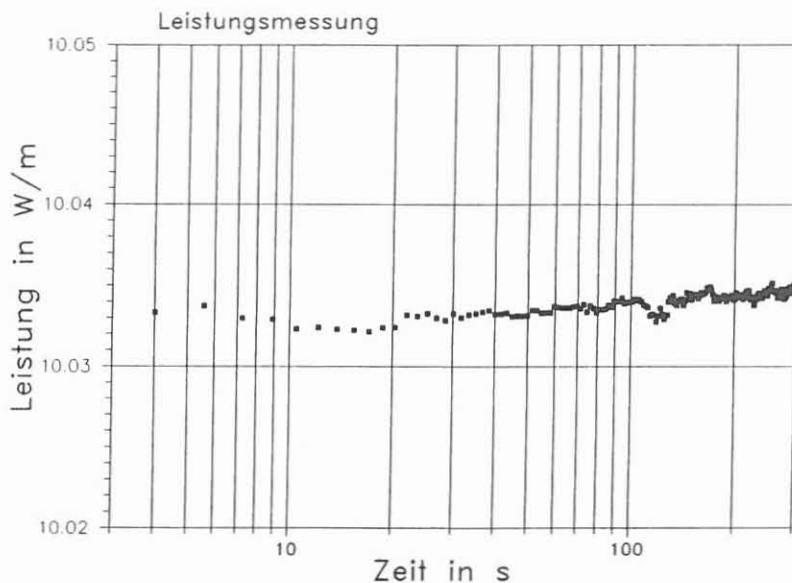


Abb. D.5.3 Leistung/Heizdrahtlänge während einer Aufheizung der HLQ in Luft

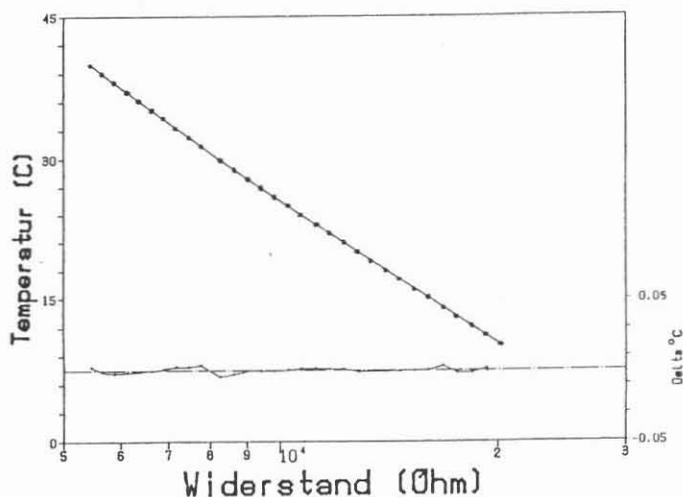


Abb. D.5.4 Eichkurve eines Thermistors. Durchgezogene Linie = Least-Square-Fit eines Polynoms 7.Grades an die Meßpunkte. Untere Kurve = Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten (Skala rechts).

Abb. D.5.5 gibt eine mit dem o. g. System aufgenommene Temperatur-Zeit-Kurve an Macor wieder. Die + - Zeichen geben die Temperaturen und die x-Symbole die aus den Temperatur-Zeit-Änderungen gemäß Gleichung (2) errechneten scheinbaren Wlf-Werte wieder.

$$(2) \quad k_i = Q / 2\pi * \ln(t_{i-1}/t_i) / (T_i - T_{i-1})$$

mit  $Q$ : = Wärmeleistung / Längeneinheit (W/m)  
 $t_i$ : = Zeit (s)  
 $T_i$ : = Temperatur zur Zeit  $t_i$  (K)  
 $k_i$ : = scheinbare Wlf an der Stelle  $i$  (W/m K)

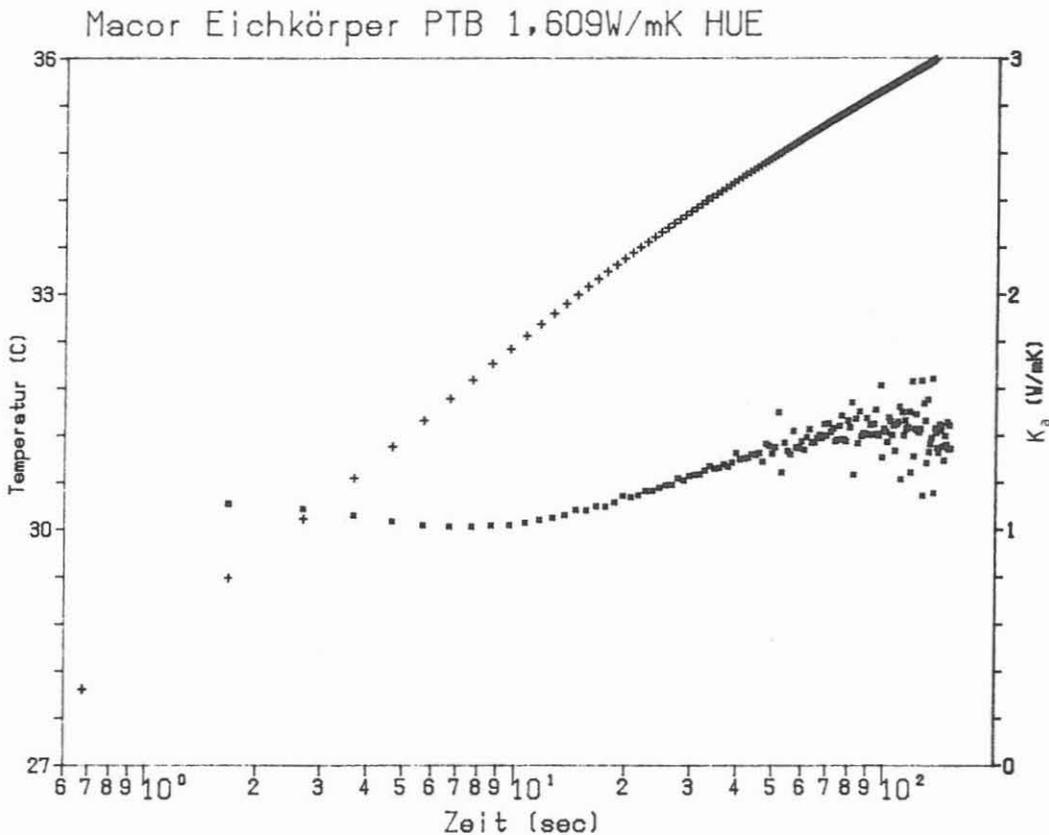


Abb. D.5.5 Aufheizkurve von MACOR. + = Temperaturen ; x = mit (2) errechnete scheinbare Wlf-Werte.

Die scheinbare Wlf wird von dem System Nadelsonde, Kontaktschicht und Gestein und mit zunehmender Zeit den Randeffekten durch die Gesteins- und die Sondenabmessungen bestimmt. Abschätzungen von ERBAS (1985) ergeben, daß die Information über die Wlf des Gesteins bei den gegebenen Abmessungen nur dem Zeitintervall zwischen 30 und 80 Sekunden entnommen werden kann. Die scheinbare Wlf bei kürzeren Zeiten ist durch die Kontaktschicht und bei längeren Zeiten durch die Randeffekte beeinflusst.

### D.5.2.3 Bestimmung der Wlf des Gesteins durch Analyse der Aufheizkurve

Die Temperatur einer konstant geheizten zylindrischen Linienquelle im homogenen, isotropen Vollraum läßt sich nach KRISTIANSEN (1982) durch Gleichung (3) approximieren:

$$(3) \quad T(t) = A_1 + A_2 * \ln(t) + A_3 * \ln(t)/t + A_4/t$$

Die Koeffizienten  $A_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) werden mit einem LSQ-Verfahren aus der Aufheizkurve ermittelt. Dadurch liegt für ein bestimmtes Zeitintervall  $T(t)$  analytisch vor. Durch Differenzieren nach  $\ln(t)$  bekommen wir eine Gleichung (4) für die scheinbare Wlf  $k_a(t)$  ( $a$ =apparent).

$$(4) \quad k_a(t) = Q / 2\pi * (A_2 + A_3/t - \ln(t)/t - A_4/t)^{-1}$$

Diese Gleichung sollte bei großen Zeiten die Wlf wiedergeben. ERBAS (1985) hat gezeigt, daß diese Funktion  $k_a(t)$  nur unter bestimmten Bedingungen zur tatsächlichen Wlf führt: Trotz Standardabweichungen mehrerer Approximationen einer Aufheizkurve unter  $1/1000$  °C ergibt die Kurvendiskussion von  $k_a(t)$ , daß nur die Anpassung zur besten Lösung führt, für die  $k_a(t)$  ein Maximum bei sehr großen Zeiten besitzt. Die Maxima der anderen Lösungen nähern sich asymptotisch dieser besten Lösung.

Der Algorithmus, der aus der Aufheizkurve die Wlf des Materials berechnet, folgt diesen Überlegungen. Dabei werden in dem durch die Randeffekte begrenzten Zeitbereich (s.o.) für einen Satz von Intervallen mit variablen Intervallanfängen und Intervalllängen jeweils die Koeffizienten von Gleichung (3) bestimmt. Mit diesen Koeffizienten stehen mit Gleichung (4) ein Satz von Funktionen der scheinbaren Wlf zur Verfügung, die auf ihr Verhalten bei großen Zeiten untersucht werden. Eine Lösung muß die vier unten aufgelisteten Kriterien erfüllen. Man findet im allgemeinen mehrere Lösungen, aus denen die sogenannte asymptotische Wlf ermittelt wird, d.h. die Wlf mit einem Maximum von  $k_a(t)$  bei der höchsten Zeit.

- Standardabweichung der Approximation der Aufheizkurve (3) unter  $0.001$  °C.
- Maximum von  $k_a(t)$ , also (4), von allen Approximationen oberhalb einer Grenzzeit von  $1000$  Sekunden.
- $k_a(t)$  stetig am Maximum
- der Wert der Wlf ergibt sich aus (5) durch Einsetzen des Koeffizienten  $A_2$  der nach dem oben beschriebenen besten Approximation der Aufheizkurve

$$(5) \quad k = Q / (2\pi * A_2)$$

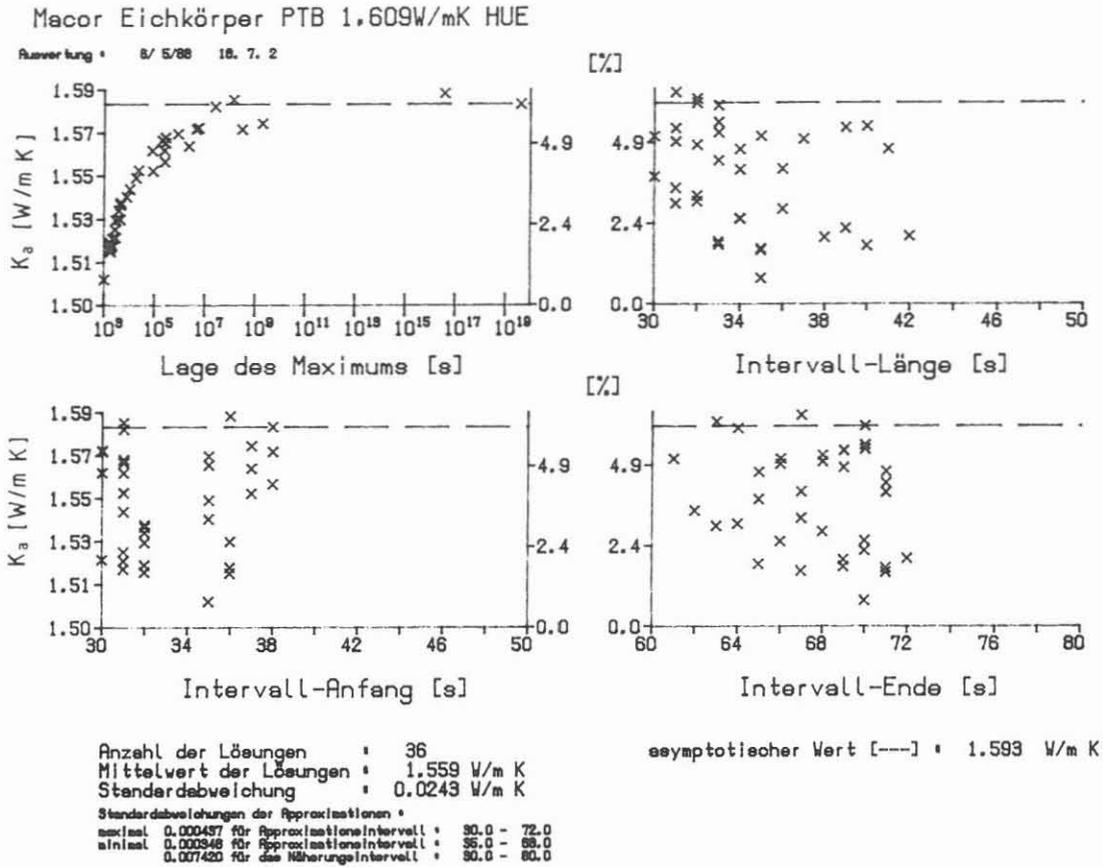


Abb. D.5.6 Auswertung einer Messung am Standard Macor  
 ( $k = 1.61 \pm 1 \% \text{ W/m K}$ ).

Abb. D.5.6 zeigt die Auswertung der in Abb. D.5.5 gezeigten Messung an Macor, welche mit dem im Feldlabor auf dem Rechner installierten FORTRAN-Programm HLQAUS (Autor ERBAS, 1985 bzw. 1988) erstellt worden ist. Mit Kreuzen sind Lösungen der Anpassung der Aufheizkurve markiert, die im Diagramm links oben in Abhängigkeit von der Lage des Maximums der dazugehörigen  $k_a(t)$ -Funktion eingezeichnet sind. Anhand der restlichen drei Diagramme, die zusätzlich eine relative Skalierung besitzen, können die Lösungen dem Approximationsbereich zugeordnet werden. Den asymptotischen Wert, also den Bestwert, findet man auf der gestrichelten Linie. In dem unteren Teil der Abbildung sind noch statistische Angaben zu den Lösungen und der asymptotische Wert aufgelistet.

Wegen der Dauer werden Auswertungen und Darstellungen der Auswertungen entsprechend Abb. D.5.6 von allen Messungen des Tages über Nacht abgearbeitet. Der Experimentator entscheidet anschließend anhand der Abbildung, ob der errechnete asymptotische Wert so richtig interpretiert werden kann.

#### D.5.2.4 Wlf ausgewählter Bohrkerne

Die Auswahl der Kerne aus den ersten 1500 m erfolgte nach lithologischen Gesichtspunkten.

Abb. D.5.7 gibt die Ergebnisse einiger Wlf-Messungen bis 500 m wieder. Diese Messungen entstanden zwischen Fertigstellung der Apparatur und Ausgabe der zersägten Proben an externe Institute. Bis zu dieser Ausgabe existierte noch keine Schleifeinrichtung, so daß für die mit \* markierten Meßpunkte nur gesägte Proben zur Verfügung standen. Für diese Werte wurden mit Hilfe von Untersuchungen am Institut für Angewandte Geophysik in Berlin Fehler abgeschätzt. Es war in diesem Teufenbereich eine generelle Untersuchung der Richtungsabhängigkeit und der Reproduzierbarkeit, wie es bei den Proben ab 470 m Teufe durchgeführt wurde, nicht sinnvoll.

Die Wlf der Proben ab 470 m Teufe wurden aus fünf Wiederholungsmessungen errechnet und statistisch ausgewertet. Zur Wiederholung der Messung wurde die Sonde abgenommen und mit einer Abweichung innerhalb eines Winkelbereichs von wenigen Grad neu aufgesetzt, so daß ein Mittelwert für einen zylindrischen Halbraum je nach Wlf in der Größenordnung von ca.  $1...10 \text{ cm}^3$  erfaßt wurde.

Die Messungen werden auf die z-Richtung parallel zur Bohrachse und die Winkel in der dazu senkrechten Ebene bezogen. Die  $0^\circ$ -Richtung weist dabei von der Kernmitte auf die vorläufige Orientierungslinie.

Mit der Nadelsonde wird die Wlf in der Ebene senkrecht zu ihrer Orientierung gemessen. Eine bzw. alle Diagonalelemente des Wlf-Tensors können daher nur aus Messungen in den drei Achsen bestimmt werden. Die Messungen in der  $90^\circ/z$ -Ebene und der  $0^\circ/z$ -Ebene durch Ankopplung an der Stirnfläche des Bohrkerns müssen daher später durch Messungen auf der Kalotte in der  $0^\circ/90^\circ$ -Ebene ergänzt werden. Eine zusätzliche Messung in der  $90^\circ/z$ - bzw.  $0^\circ/z$ -Ebene je nach Kalottierung dient dazu, die Unterschiede in der Wlf zwischen den Meßstellen Stirnfläche und der mindestens 10 cm entfernten Kalottenfläche zu interpolieren.

Abb.D.5.7 Wlf KTB VB 0 - 500 m. \*=Einzelmessung an nur gesägtem Kern ohne Orientierung mit abgeschätztem Fehler, ■=in 90°/z-Ebene und o=in 0°/z-Ebene mit mittlerem quadratischen Fehler des Mittelwertes.

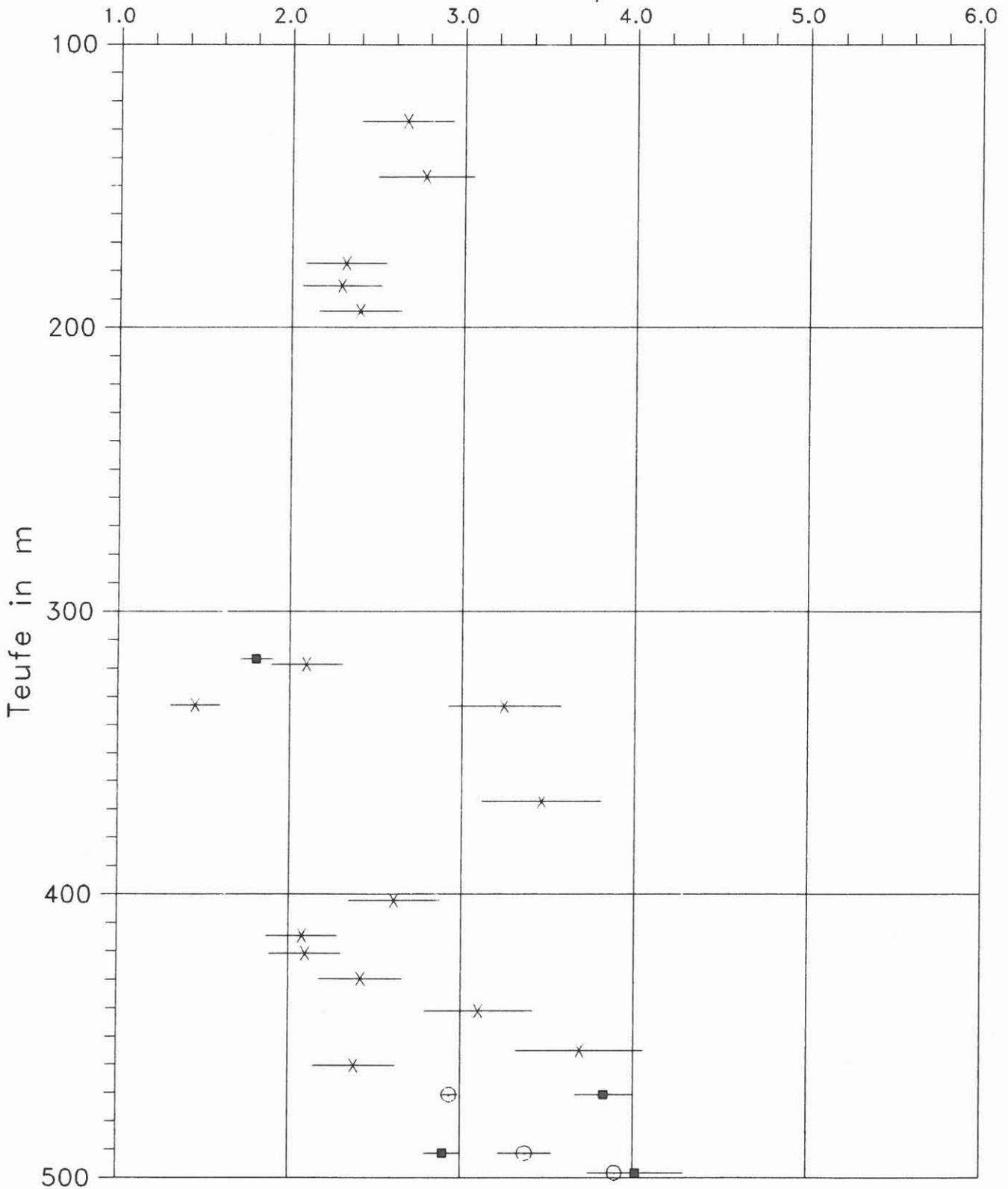


Abb.D.5.8 Wlf KTB VB 500 - 1000 m. ■ = in 90°/z-Ebene und o = in 0°/z-Ebene mit mittlerem quadratischen Fehler.

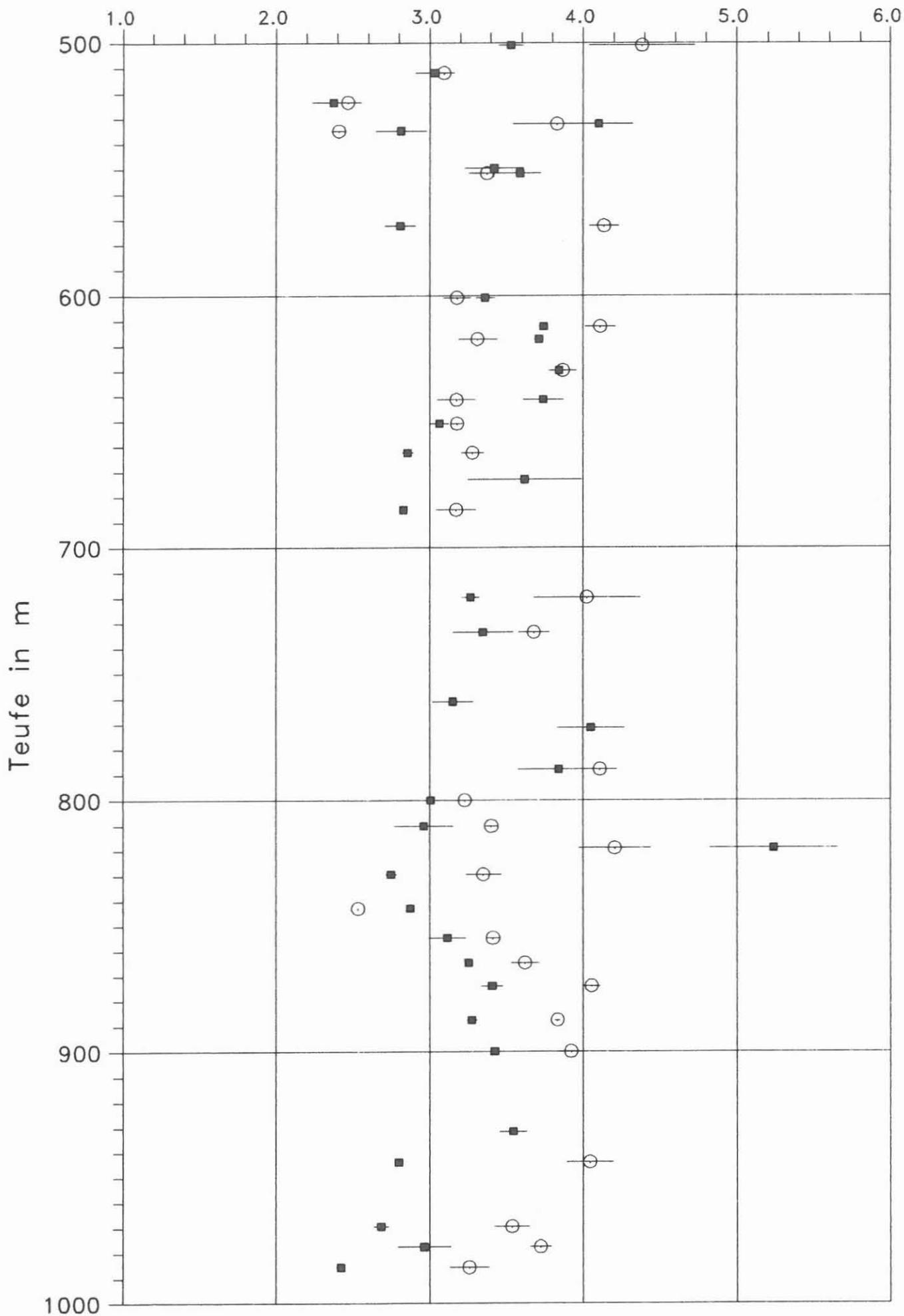
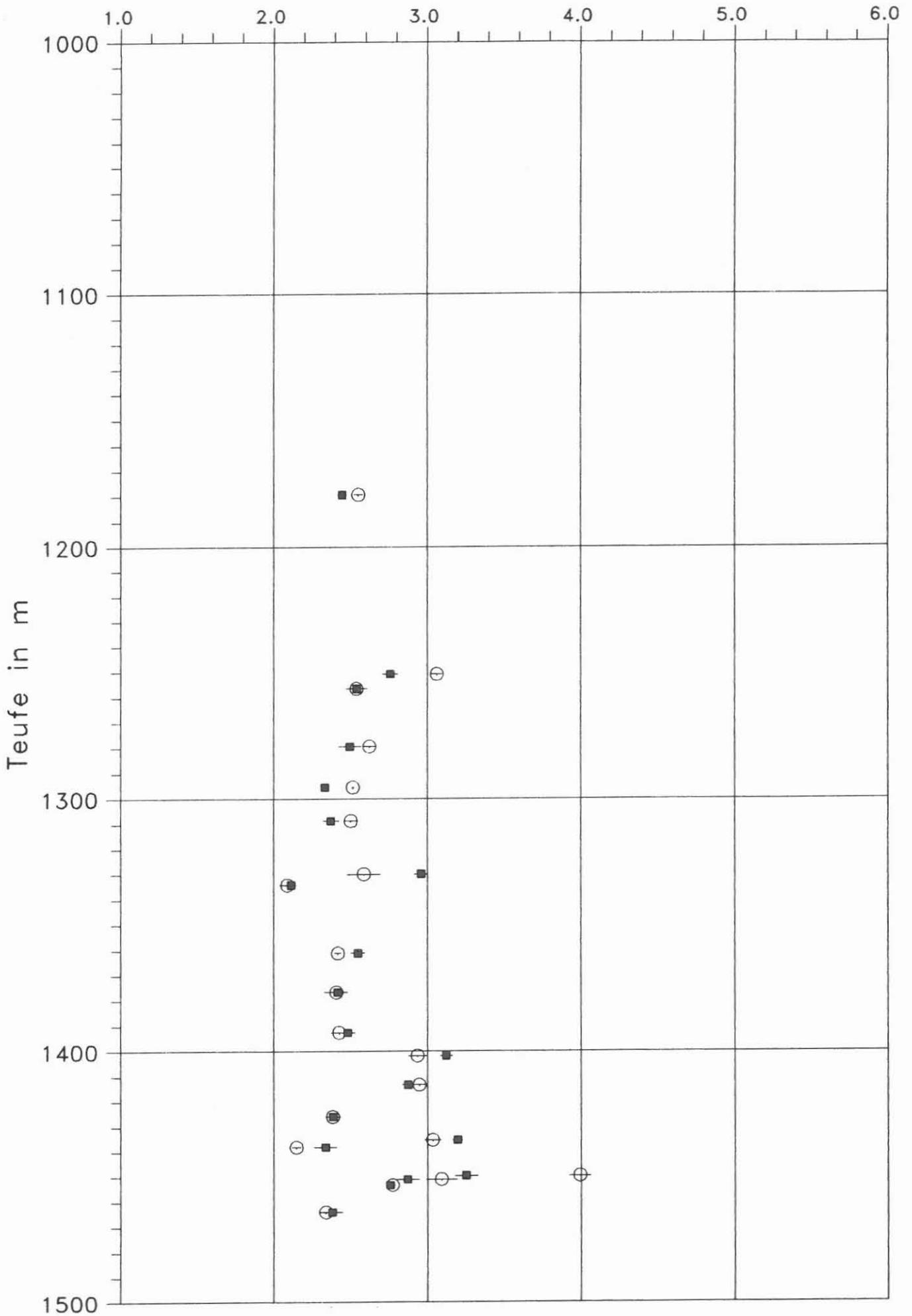


Abb.D.5.9 Wlf KTB VB 1000 - 1500 m. ■ = in 90°/z-Ebene und o = in 0°/z-Ebene mit mittlerem quadratischen Fehler.



Die Werte in Abb. D.5.8 liegen zwischen 1.84 und 5.2 W/mK mit einem mittleren Wert von 3.4 W/m K. Die niedrigste Wlf wurde an einem Granat-Hornblende-Biotit-Kalifeldspat-Gneis mit einem niedrigen Quarz-Gehalt gemessen. Auch bei den Proben mit den nächstniedrigsten Wlf-Werten aus 523 m Tiefe, einem Granat-Biotit-Gneis, und aus 534 m Tiefe einem Granat-Muskovit-Biotit-Gneis wurde mit der RDA ein Quarz-Gehalt unter 15 % gemessen (siehe HEINSCHILD et al., 1988). Die sonst vermessenen Proben besitzen höhere Quarzgehalte und höhere Wlf-Werte. Auffallend ist die teilweise starke Anisotropie der Wlf gerade dieser besser leitenden Proben. So liegen die Wlf-Werte z. B. des Granat-Sillimanit-Biotit-Gneises aus 943.5 m Tiefe zwischen 4.0 (2) und 2.80 (2) W/mK.

Zu untersuchen ist noch, inwieweit diese Anisotropie auf die Quarzlagen in der Foliation zurückzuführen sind. Eine fehlende Foliation im Quarzdiorit aus 511.95 m, bei dem der Quarz nach makroskopischen Befund homogen verteilt ist, führt zu keinen unterschiedlichen Werten. Dagegen treten gleichzeitig eine heterogene Quarzverteilung im Granat-Muskovit-Biotit-Gneis aus 501.0 m Teufe und eine anisotrope Wlf von 3.53 (8) zu 4.4 (3) W/mK auf.

Abb. D.5.9 gibt die gemessenen Wlf an zur Verfügung stehenden Kernen zwischen 1100 und 1500 m Teufe wieder. Einhergehend mit einem lithologischen Wechsel zu Amphiboliten sind niedrigere Wlf als im Bereich zwischen 500 und 1000 m zu beobachten. Auffallend ist die geringe Anisotropie der Wlf in diesem Teufenbereich bis auf eine Ausnahme bei 1449.55 m.

Die vorläufige Orientierungslinie ist allgemein so angebracht, daß die Foliation parallel  $0^\circ$  aus der Stirnfläche streicht. Daher liegen die Wlf-Werte in der  $0^\circ/z$ -Ebene i.a. höher. Ein Vergleich der orientiert gemessenen Werte in Abb. D.5.8 zeigt, daß Ausnahmen existieren, bei denen es umgekehrt ist. Sie sind dadurch erklärbar, daß die Foliation nicht immer in einer zur Orientierungslinie einheitlichen Richtung liegt. Die Werte lassen sich jedoch wieder auf die Lagen der Foliation beziehen, da im Feldlabor diese Richtungen in Bezug auf die vorläufige Orientierungslinie gesammelt werden. Die Transformation des Wlf-Tensors wird erst nach Messung der Wlf auf den Kalottenflächen gemacht werden. Nach der Nachorientierung der Kerne ist dann mit aller Vorsicht auch eine Aussage über die Wlf in der unmittelbaren Umgebung der KTB möglich.

## D.6 Natürliche remanente Magnetisierung

### D.6.1 Allgemeines

Im Teufenbereich von 992 - 1530 m konnte die natürliche remanente Magnetisierung an 140 Bohrkernen bestimmt werden (Kernmärsche 253-319). Im Mittel wurde wieder alle 2m ein Kernstück nach der im KTB-Report 88-2 (WIENAND et al., 1988) beschriebenen Methode vermessen.

### D.6.2 Beschreibung der Ergebnisse

In Abbildung D.6.1 ist im linken Teil die NRM und im rechten Teil die Inklination der NRM im Maßstab 1:2.000 dargestellt. Auf Anforderung können die Teufenlogs im Maßstab 1:200 zur Verfügung gestellt werden. Ausgewertet und dargestellt wurden, wie auch schon in den KTB-Reports 88-1 und 88-2, nur NRM-Werte  $> 5 \text{ mAm}^{-1}$  ( $0.5 \text{ nT}$ ); Meßwerte  $> 10 \text{ mAm}^{-1}$  können entsprechend der Empfindlichkeit der Apparatur als zuverlässig betrachtet werden. Die gestrichelten Linien in der Abbildung kennzeichnen wieder die Meßgrenze bzw. den Wert der Inklination des heutigen Erdmagnetfeldes ( $61^\circ$ ).

Gegenüber dem Teufenabschnitt von 480-992 m liegt die mittlere Magnetisierung der Bohrkern in dem hier betrachteten Abschnitt deutlich höher, nämlich um etwa den Faktor 10 bei  $100 \text{ mAm}^{-1}$  ( $=0.1 \text{ Am}^{-1}$ ). Auch die Schwankungsbreite der Magnetisierungswerte ist deutlich höher mit Werten zwischen  $20 \text{ mAm}^{-1}$  und über  $4000 \text{ mAm}^{-1}$ . Dies steht wiederum im Einklang mit der in diesem Bohrabschnitt stark wechselnden und heterogenen Lithologie. Die Meta-Ultrabasite in den Teufen 1381.45 m, 1409.50 m, 1449.50 m und 1456.15 m weisen die höchsten Magnetisierungswerte auf. Diese hohen Werte können mit Magnetitgehalten in den Gesteinen in Zusammenhang gebracht werden (s. a. Abschnitt B : "Erzmineralisation"). Sie korrelieren auch mit hohen Suszeptibilitätswerten (vgl. Abschnitt "Suszeptibilität"). Die Amphibolite zeigen mit größtenteils über  $100 \text{ mAm}^{-1}$  eine höhere Magnetisierung als die Metagabbros, die sich durch eine relativ geringe Magnetisierung auszeichnen (Teufenbereiche 1160-1219 m (Kernmarsch 253 in der Richtbohrstrecke) und 1252-1280 m).

Nach wie vor (vgl. KTB-Report 88-1 und 88-2) liegt die mittlere Inklination der NRM der Bohrkern relativ steil bei ca.  $80^\circ$ . Trotz der gegenüber dem Teufenabschnitt 478 - 992 m insgesamt höheren Magnetisierungswerte stehen auch hier wieder die steilen sowie die negativen Inklinationen auffallend häufig in Zusammenhang mit relativ schwachen Magnetisierungen (Abb. D.6.2). Die detaillierten gesteins- und paläomagnetischen Untersuchungen an den aus den Bohrkernen gezogenen Plugs, die am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophy-

sik der LMU München derzeit durchgeführt werden, sollten klären können, ob diese steilen Inklinationswerte durch den Bohrprozess selbst hervorgerufen werden oder hierfür andere Ursachen verantwortlich sind. Ähnlich komplexe Magnetisierungen mit steilen Inklinationen wurden an Gesteinsproben des Deep Sea Drilling Projects festgestellt (J. HALL, 1977, DSDP Leg 37; P. JOHNSON, 1978, DSDP Leg 45). HALL und JOHNSON interpretierten diese Magnetisierungskomponente als durch den Bohrprozess induziert und nannten sie "drilling remanence" (vgl. a. PETERSEN, 1978). PETERSEN (1978) konnte durch Messungen der axialen Magnetisierung im Innen- und Außenraum des Bohrgestänges zeigen, daß die Magnetisierung des Bohrgestänges nicht ausreicht, eine isothermale remanente Magnetisierung in der Größenordnung der beobachteten drilling remanence zu erzeugen. Er führt die drilling remanence vielmehr auf eine "piezo"-remanente Magnetisierung zurück, die durch den Druck des Bohrgestänges auf das erbohrte Gestein aufgebaut wird. PETERSEN weist aber auch darauf hin, daß diese relativ instabile piezo-remanente Magnetisierungskomponente durch schrittweise Wechselfeld-Entmagnetisierung beseitigt werden kann.

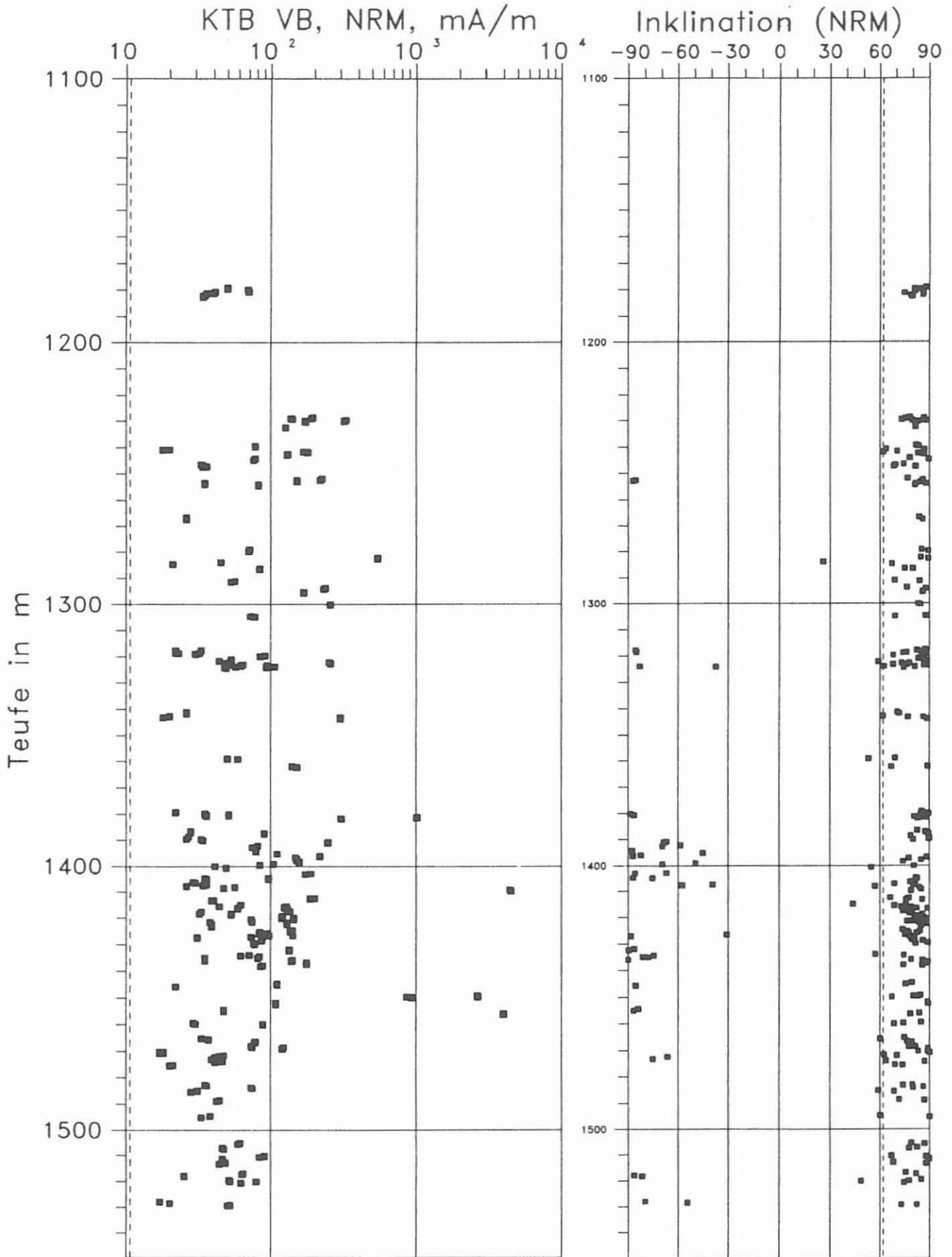
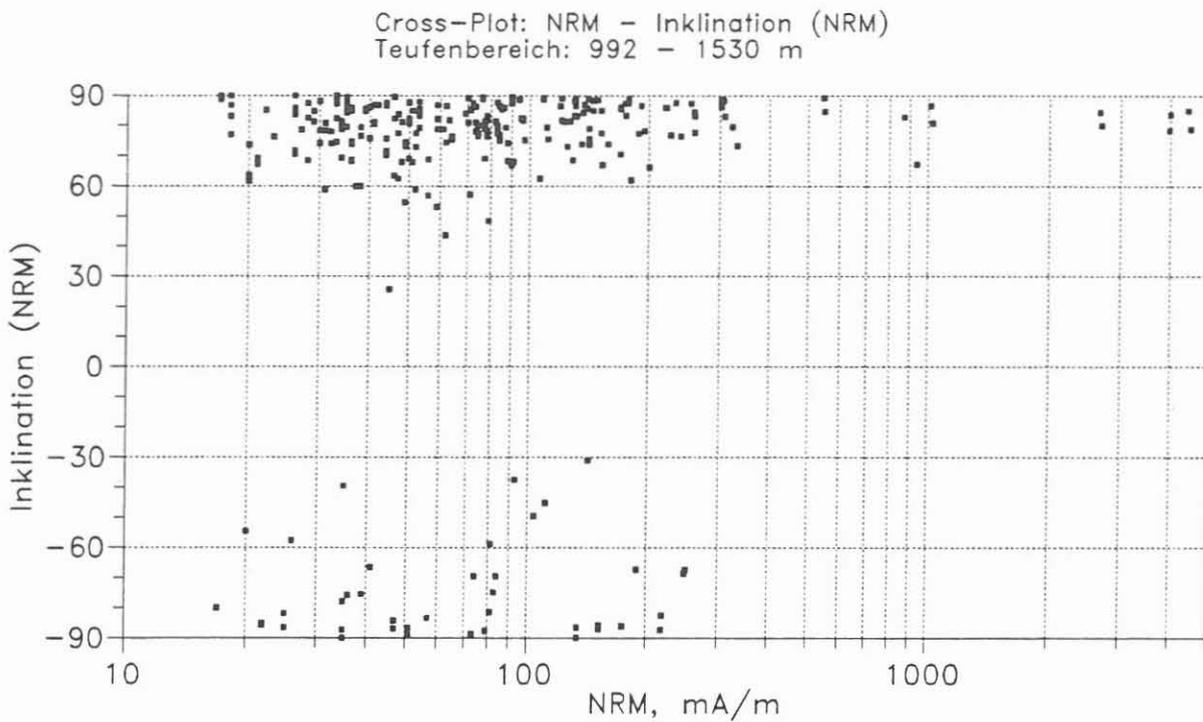


Abb. D.6.1: Teufenlog von natürlicher remanenter Magnetisierung (NRM) und der Inklination der NRM im Teufenabschnitt 1100-1530 m.



**Abb. D.6.2** Abhängigkeit der natürlichen remanenten Magnetisierung von der Inklination der NRM. Steile sowie negative Inklinationen werden hauptsächlich bei schwacher Magnetisierung gemessen.

### D.6.3 Königsberger Q-Faktor

Die gesamte (pauschale) Magnetisierung einer Probe bzw. eines Bohrkerns ergibt sich aus der Summe der remanenten ( $M_R$ ) und induzierten ( $M_I$ ) Anteile:

$$M = M_I + M_R$$

Das Verhältnis  $Q = M_R/M_I = M_R/k \cdot H$  (dimensionslos)

von natürlicher remanenter Magnetisierung zu natürlicher induzierter Magnetisierung wird als Q-Faktor nach Königsberger bezeichnet.  $k$  (ein Tensor) bezeichnet dabei die Suszepti-

bilität und  $H$  das erdmagnetische Feld am Fundort des Gesteins, wobei für die Oberpfalz näherungsweise gilt:  $H = 48000$  nT. Bei Serpentiniten und Magnetitserzen ist  $0.6 < Q < 2$ , bei Basalten dagegen  $1 < Q < 20$  (ANGENHEISTER & SOFFEL, 1972). Über den Königsberger  $Q$ -Faktor können erste Anhaltspunkte über die Stabilität der remanenten Magnetisierung gewonnen werden.  $Q$ -Faktoren  $> 1$  deuten auf eine relativ stabile Magnetisierung hin.

In Abbildung D.6.3 sind die aus der NRM und der Suszeptibilität berechneten  $Q$ -Faktoren gegen die Teufe aufgetragen. In den meisten Bereichen liegt  $Q$  zwischen 1 und 10, was als charakteristisch für die durchteuften Amphibolite und Metagabbros angesehen werden kann. Ein besonders hoher  $Q$ -Faktor wurde für den Meta-Ultrabasit in der Teufe von 1455 m berechnet, demgegenüber wurden aber ebenfalls für Meta-Ultrabasite in der Teufe um 1412 m auch die kleinsten  $Q$ -Faktoren ( $< 1$ ) bestimmt. Neben unterschiedlichen Erzführungen kann dieser Effekt auch auf unterschiedliche Korngrößen und damit unterschiedliches Stabilitätsverhalten der Erzminerale zurückgeführt werden.

KTB VB, Teufenbereich 992 - 1530 m.  
Koenigsberger Q-Faktor,  $Q = M_{rem}/M_{Ind}$

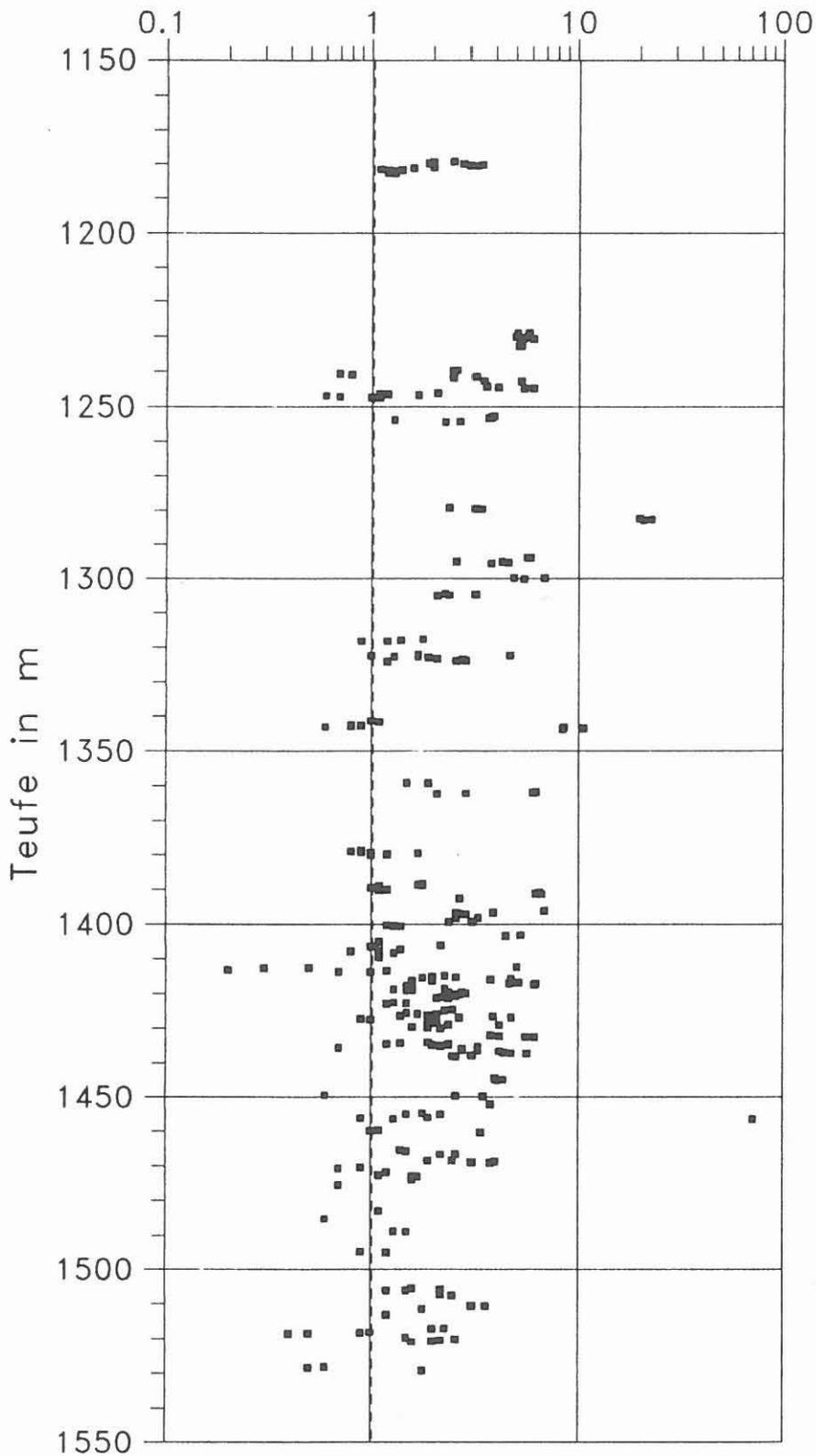


Abb. D.6.3: Teufenlog der Königsberger Q-Faktoren (Verhältnis von natürlicher remanenter zu natürlicher induzierter Magnetisierung).  
(gestrichelte Linie:  $Q = 1$ )

## D.7. Suszeptibilität

### D.7.1 Allgemeines

Auf das Prinzip der Messung der magnetischen Suszeptibilität an Bohrkernen und Bohrklein wurde bereits im KTB-Report 88-1 (BÜCKER et al. 1988) näher eingegangen.

Im Teufenintervall von 992 m bis 1530 m sind teilweise Messungen an Bohrklein, teilweise an Bohrkernen und in bestimmten Teufenbereichen an beiden Probenarten parallel zueinander durchgeführt worden. Diese überlappenden Bereiche waren in der Richtbohrphase von 1178 m bis 1183 m (Kernmarsch 253) und während des ersten Teils der Kernbohrarbeiten im Bereich von 1229 m bis 1285 m. Ein Vergleich der Suszeptibilitätswerte von Bohrklein und Kernmaterial aus diesen überlappenden Teufenbereichen ist im Abschnitt D.7.4 aufgezeigt.

### D.7.2 Suszeptibilität von Bohrkleinproben

Das Bohrkleinmaterial lag in Form von getrockneten Mischproben (mit verschiedenen Korngrößen) im Teufenbereich von 994 m bis 1284 m vor, meistens in 1-Meter Abständen beprobt. Das Material wurde in Probendöschen gefüllt, gewogen und dann im Suszeptibilitätsmeßgerät (M.S.2. der Fa. Bartington) gemessen.

Um die Suszeptibilität in SI-Einheiten angeben zu können, müssen die Meßwerte auf das Volumen des Probenmaterials normiert werden. Dieses Probenvolumen wurde aus der Masse der Probe und einer mittleren Bohrklein-Dichte von  $2.71 \text{ g/cm}^3$  (siehe hierzu Abschnitt D.2) errechnet. Außerdem wurde noch ein Eichfaktor berücksichtigt, der sich aus dem Meßwert für eine bekannte Eichprobe ableitet.

Die korrigierten Meßwerte sind zusammen mit den Bohrkernmessungen in Abbildung D.7.1 dargestellt, und zwar sowohl in linearer, als auch in logarithmischer Darstellung der Suszeptibilitätsachse. In der linearen Darstellungsweise fallen die Maxima sehr viel stärker ins Auge, während die Minima nur in logarithmischer Darstellung aufgelöst werden können.

Peaks in den Bohrklein-Messungen sowohl zu kleinen, als auch zu großen Meßwerten hin, treten wesentlich seltener auf, als bei den Bohrkern-Messungen. Dies ist dadurch zu erklären, daß die Bohrkleinproben eine Mischprobe über einen gewissen Teufenbereich darstellen und dadurch eine Mittelung der Meßwerte erfolgt.

Bereiche, in denen die gemessene Suszeptibilität über einige Meßpunkte hinweg erhöht bleibt, lassen sich von 1018 m bis 1027 m, um 1040 m und um 1077 m erkennen. Im Bereich des Zwischenkernmarsches (Kernmarsch 253) von 1178 m bis 1183 m liegen die Bohrkleinmeßwerte ebenfalls deutlich erhöht, wie auch ab der Teufe von 1229 m, von der aus wieder durchgehend gekernt wurde. Zu dieser Erhöhung der Bohrkleinwerte gegenüber denen der Bohrkerne siehe den Abschnitt D.7.4..

### D.7.3 Suszeptibilität der Bohrkerne

Es wurde versucht, möglichst lückenlos über den gesamten Kerngewinn in 1-cm-Abständen zu messen. Aus den auf diese Weise erhaltenen Rohdaten wurden über ein Auswerteprogramm arithmetische Mittelwerte über 20-cm-Intervalle berechnet, um die Datenfülle zu vermindern. Erst durch diese Datenreduktion können die Meßwert-Dateien schnell in Form von Teufenlogs dargestellt werden und mit den Messungen der anderen petrophysikalischen Parameter verglichen werden. Sowohl die Mittelwertbildung, als auch die Darstellung der Meßwerte in Form eines Logs in frei wählbarem Maßstab, mit Ausgabe auf einen Drucker, erfolgen automatisch über den Rechner.

Im Teufenlog (Abb. D.7.1) sind die so erhaltenen Kern-Suszeptibilitäten mit denen des Bohrkleinmaterials im Maßstab 1:2000 aufgetragen. Auf Anfrage können auch Logs in anderen Maßstäben (z.B. 1:200) bereitgestellt werden.

Der größte Teil der Meßwerte liegt im Bereich von  $0.5 \cdot 10^{-3}$  SI bis  $1 \cdot 10^{-3}$  SI-Einheiten; es fallen jedoch einige sehr deutliche Minima und Maxima auf.

Die deutlichsten Minima liegen bei 1317 m, 1348 m, 1440 m (hier durchteufte die Bohrung einen Quarzgang) und bei 1479 m. Die gemessenen Suszeptibilitäten gehen bis auf etwa  $10^{-5}$  SI-Einheiten zurück.

Die stärksten Maxima treten um 1382 m, bei 1410 m, bei 1413 m, bei 1449 m und in der Teufe von 1456 m hervor. Diese Peaks lassen sich jeweils sehr gut mit den relativ geringmächtigen Ultrabasit-Einschaltungen korrelieren. (Siehe hierzu den Abschnitt "B" im gleichen Band.)

### D.7.4 Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrklein und Bohrkernen

Wie bereits in der Abbildung D.7.1 deutlich wird, liegen die Suszeptibilitätswerte des Bohrkleins über denen der Kerne, wenn Teufenbereiche betrachtet werden, die beide Messungen enthalten.

Zur Verdeutlichung sind in der Abbildung D.7.2 die Suszeptibilitätswerte von Bohrklein zu denen von Bohrkernen in einem Cross-Plot aufgetragen. Die erhöhten Suszeptibilitätswerte des Bohrkleins liegen sicher in dem Gehalt an Abrieb, hervorgerufen durch den Bohrvorgang, begründet.

Zum Einsatz kamen Diamant-imprägnierte Bohrkronen. Beim Bohrvorgang wird die metallene Matrix, in welche die Schneiddiamanten eingebettet sind, abgeschliffen, so daß stets neue Schneiddiamanten an die Oberfläche gelangen. Durch diesen Mechanismus schärft sich die Bohrkronen dauernd selbst, solange bis sie verschliffen ist. Dieses zermahlene Abriebmaterial wird mit der Bohrspülung ausgetragen und zusammen mit dem Bohrklein-Material vom Schüttelsieb entnommen.

Darüberhinaus wird das gewonnene Bohrklein im Wesentlichen aus Nachfall bestehen und nur zum kleinsten Teil von der Bohrlochsohle stammen (siehe hierzu auch Kapitel D.2).

Im Teufenbereich bis 480 m konnten ebenfalls parallel zueinander die Suszeptibilitäten von Bohrklein und Bohrkronen gemessen werden. Die Meßwerte am Bohrklein liegen hier kaum über denen an Bohrkernen, was in der Abbildung D.7.3 gezeigt wird.

Das ist durch das andere Bohrverfahren, das in diesem Bohrabschnitt angewandt wurde, zu erklären. Bei dem hier zum Einsatz gebrachten Rollenbohrverfahren ist der Anteil des Abriebs wesentlich geringer, da die Gesteinszerstörung durch die mechanische Wirkung des Rollenmeißels selbst erfolgt, und nicht durch einen beabsichtigten Verschleiß mit daraus folgendem Abrieb der Krone. Im Gegensatz zum Dia-Bohrverfahren ist sicher, daß im Normalfall der größte Teil des Bohrklein-Austrags tatsächlich von der Bohrlochsohle stammt.

#### **D.7.5 Gegenüberstellung von Suszeptibilität und Dichte von Bohrkernen**

In Abbildung D.7.4 sind in einem Cross-Plot die Suszeptibilitätswerte den an den gleichen Bohrkernstücken gemessenen Dichtewerten gegenübergestellt. Wegen des sehr viel größeren Wertebereichs der Suszeptibilität ist die betreffende Achse in logarithmischem Maßstab gezeichnet.

Deutlich ist eine Korrelation zwischen Dichte und Suszeptibilität zu erkennen. Mit zunehmender Dichte steigt auch die gemessene Suszeptibilität. Dieser Zusammenhang ist wie folgt zu verstehen: die erhöhte Suszeptibilität ist durch einen erhöhten Gehalt an Erzmineralen im Bohrkern hervorgerufen. Da die betreffenden Minerale auch eine relativ (im Vergleich zur Gesteinsmatrix) hohe Dichte aufweisen, entsteht der beobachtete Zusammenhang. Die Dichten von z.B. Magnetit, Magnetkies und Pyrit liegen über  $4.5 \text{ g/cm}^3$  (vgl. WOHLBERG, 1982) und damit deutlich über der Blockdichte der Bohrkernkerne (um  $2.9 \text{ g/cm}^3$ ).

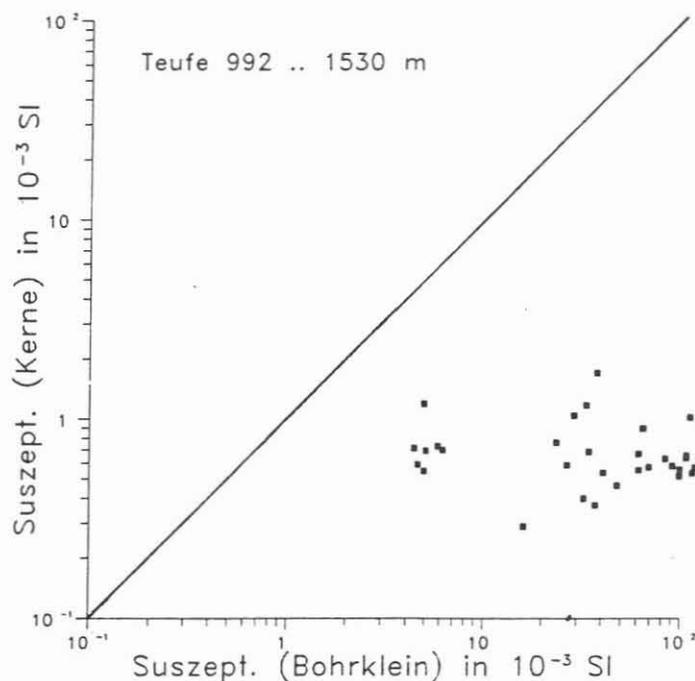


Abb. D.7.2 : Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkernen und Bohrklein. Die Werte der Kernmessungen wurden über etwa 1 m gemittelt und den Bohrklein-Werten der gleichen Teufe gegenübergestellt.

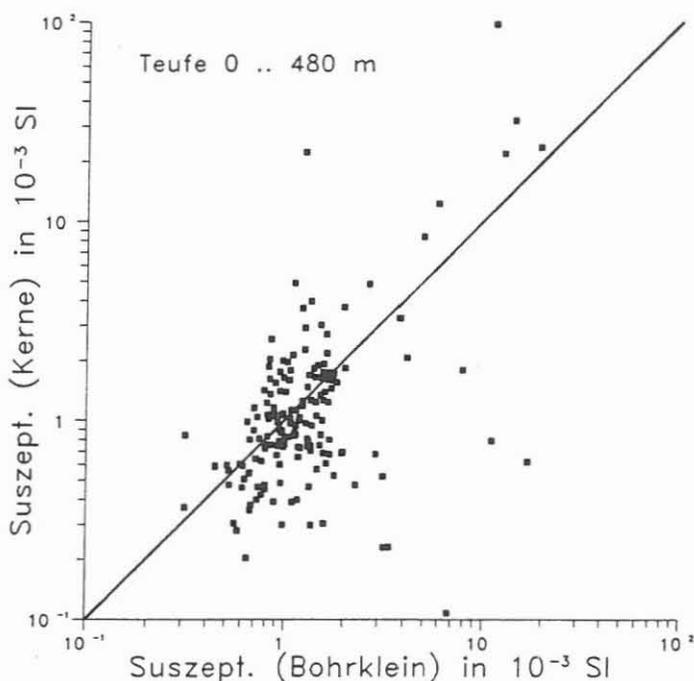


Abb. D.7.3 : Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkernen und Bohrklein. Die Werte der Kernmessungen wurden über etwa 1 m gemittelt und den Bohrklein-Werten der gleichen Teufe gegenübergestellt.

- D42 -

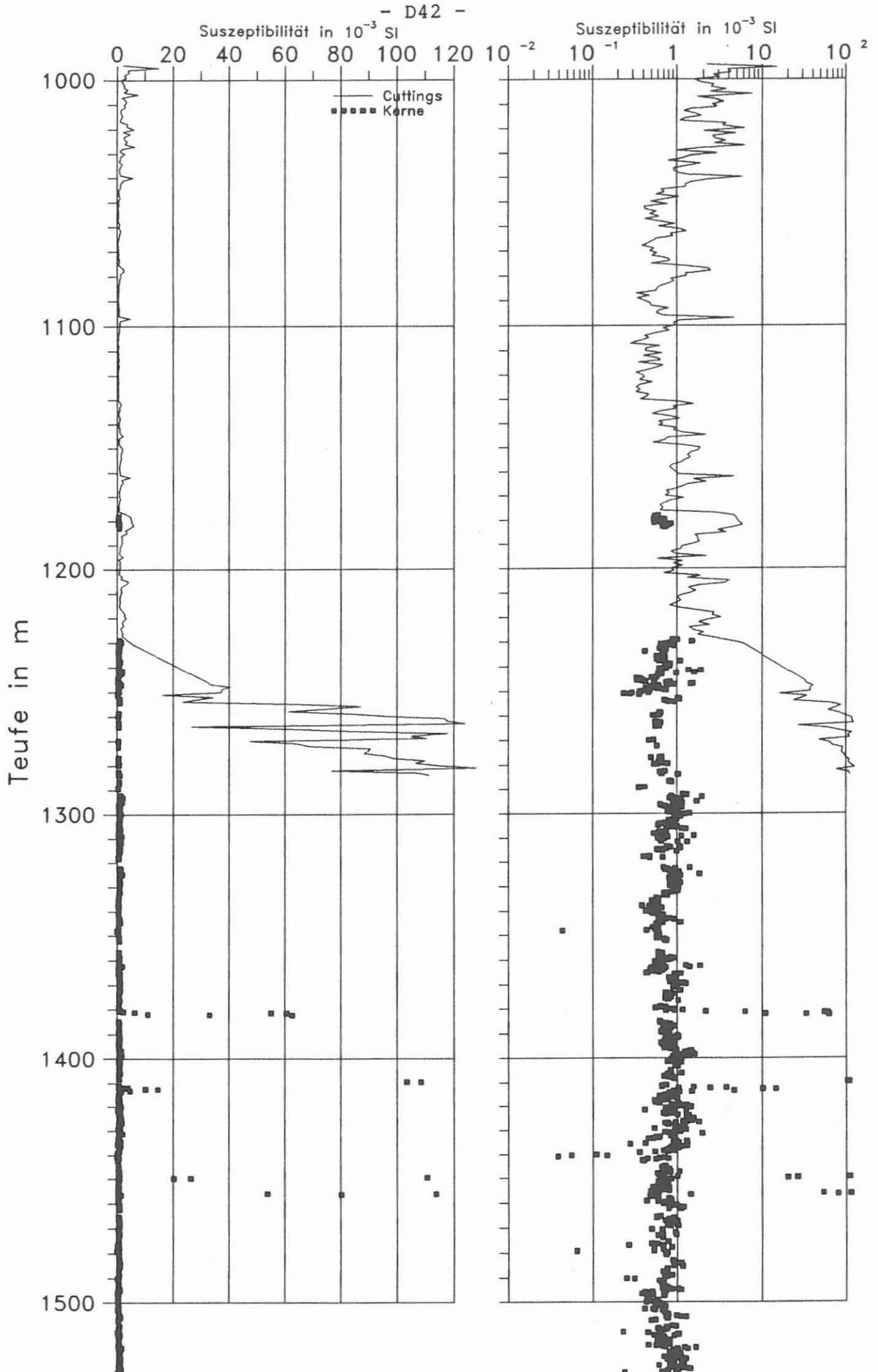


Abb. D.7.1: Suszeptibilität, gemessen an Bohrkernen und Bohrklein im Maßstab 1 : 2000

Cross-Plot Suszeptibilitaet-Dichte  
Teufenbereich: 1000 - 1500 m

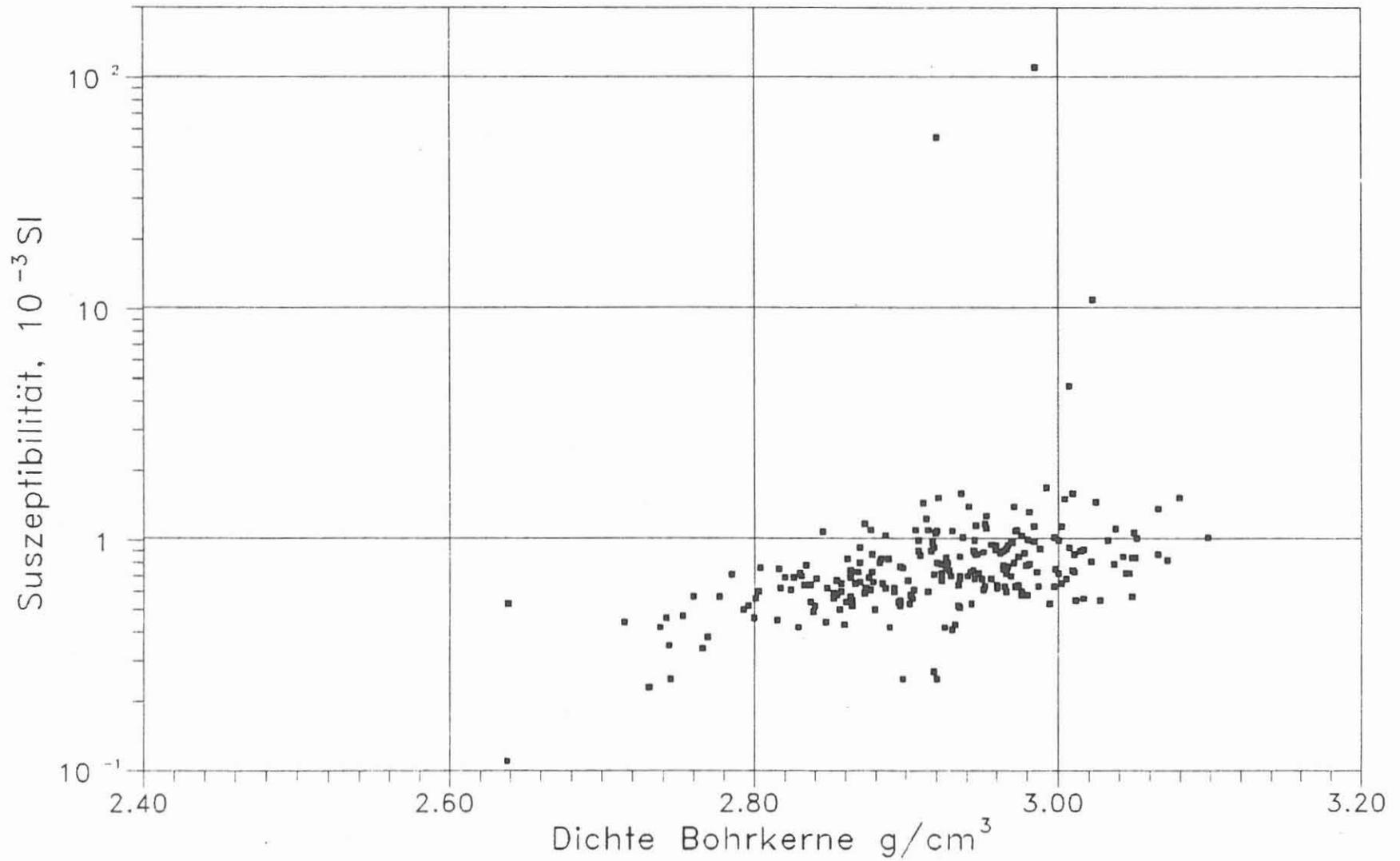


Abb. D.7.4 : Cross-Plot von Suszeptibilität gegen Dichte,  
jeweils an den gleichen Kernstücken gemessen.

#### D.8 Danksagung

Die Messungen im Feldlabor wurden zum großen Teil von unseren technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern R. Fürnrohr, M. Jäger, A. Kick und H. Köstler durchgeführt. Für ihre stete Einsatzbereitschaft danken wir ihnen herzlich.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München konnte im Feldlabor die Apparatur zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit installiert werden und eine neue Apparatur entwickelt werden. Für die gute Zusammenarbeit möchten wir uns insbesondere bei Dr. A. Berktold und Dipl. Geophys. G. Staccone bedanken.

Die Apparatur zur Messung der Wärmeleitfähigkeit und einige der oben beschriebenen Messungen entstanden am Institut für Angewandte Geophysik der TU Berlin unter Mitarbeit von Prof. H. BURKHARDT, Kemal ERBAS, der u.a. das Auswerteprogramm zur Verfügung gestellt hat, Daniel PRIBNOW, der zahlreiche Programmierarbeiten gemacht und neue Ansätze für Halbraumsonden entwickelt hat, und Meinrad REIBELT, mit dessen Arbeiten die Meßbedingungen im Feldlabor genauer definiert werden können.

Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes danken wir Prof. Dr. R. Emmermann und Dr. J. Lauterjung.

## D.9 Schriftenverzeichnis

- ANGENHEISTER, G. & H.C. SOFFEL (1972): Gesteinsmagnetismus und Paläomagnetismus, Studienhefte zur Physik des Erdkörpers, Gebr. Bornträger, Stuttgart.
- BÜCKER, C., Eigner, K.-H., Rauch, E., Rauen, A., Wienand, J. & K.E. Wolter, (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 0-480 m: D. Geophysik.-KTB-Report 88-1: D1-D42, Hannover.
- DRAXLER, J.K. und R. Hänel (1988): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik: Bohrlochmessungen in der KTB-Oberpfalz VB - Intervall 487.5-1529.4 m, KTB Report 88-4, Hannover.
- ERBAS, K. ; 1985; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern mit einer Halbraum-Linien-Quellen-Apparatur; Diplomarbeit am Institut für Angewandte Geophysik der Technischen Universität Berlin.
- ERBAS, K.; 1988; HLQ AUS; FORTRAN-Programm zur Auswertung einer Messung mit einer Halbraumlinienquellenapparatur.
- GRAUP, G., Hacker, W., Keyssner, S., Massalsky, T., Müller, H., Röhr, C. & S. Uhlig (1988): KTB Oberpfalz VB - Erste Ergebnisse der geologischen Aufnahme bis 480 m.- KTB Report, 88-1: B1-B98, Hannover.
- HACKER, W., Keyssner, S., Massalsky, T., Müller, H., Röhr, C., Uhlig, S. & G. Graup (1988): KTB Oberpfalz VB - Erste Ergebnisse der geologischen Aufnahme bis 992 m. - KTB Report, 88-2: B1-B98, Hannover.
- HALL, J.M. und P.J.C. RYALL, (1977): Paleomagnetism of basement rocks, Leg 37. In Aumento, F., Melson, W.G. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v.37: p.423-424, Washington (U.S. Government Printing Office).
- HÄNEL, R. (1987): Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik: Arbeitsprogramm KTB-Bohrlochgeophysik sowie Bohrlochmeßprogramm KTB-Oberpfalz-VB: KTB Report 87-3, Hannover.
- HEINSCHILD, H.J., HOMANN, D., KAMM, H., & H.-J. WELKER (1988): KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Spülanalytik bis 480 m. KTB-Report 88-1; C61 - C73, Hannover.
- JOHNSON, P. (1978): Paleomagnetism of rock samples.- In: Melson, W.G., Rabinowitz, P.D. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v.45: Washington (U.S. Government Printing Office).

KRISTIANSEN, Jan I. (1982): The Transient Cylindrical Probe Method for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials. - Thesis; Department of Geology, Aarhus N, Denmark.

PETERSEN, N. (1978): Glomar Challenger Drillings: The Magnetic Field Produced by the Drill and Drill String. In Dmitriev, L., Heirtzler, J. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v.46: p.377-378, Washington (U.S. Government Printing Office).

WIENAND, J., Rauen, A., Eigner, K.-H., Bücken, C. & K.E. Wolter (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 480-992 m: D. Geophysik.- KTB-Report 88-2: D1-D42, Hannover.

WOHLENBERG, J. (1982): in Landolt-Börnstein, Band 1, Teilband a, Berlin, Heidelberg, New York.

D.10.0 SPANNUNGSNACHWIRKUNGSUNTERSUCHUNGEN:  
- MESSUNG DER RETARDATION UND DER AKUSTISCHEN EMISSION.

WOLTER, K.E., AULBACH, E. & BERCKHEMER, H.

Inhaltsverzeichnis:

	Zusammenfassung
D.10.1	Allgemeine Grundlagen
D.10.2	Meßprinzip
D.10.3	Berechnung der ebenen Deformation
D.10.4	Präparation einer Probe
D.10.5	Meßergebnisse
D.10.5.1	Retardation und akustische Emission
D.10.5.2	Trocknungseffekte
D.10.6	Schriftenverzeichnis

Zusammenfassung

Die viskoelastische Spannungsrelaxation der Bohrkerne wird mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern bei konstanter Temperatur und Feuchtigkeit in drei radialen und in einer axialen Richtung gemessen. Zur Erfassung des vollständigen Relaxationsprozesses sind Meßzeiten bis zu einer Woche erforderlich. Zwei Amphibolit - Proben aus den Teufen 1463.5 m und 1487.7 m wurden zur Untersuchung des Entspannungsprozesses und der akustischen Emissionen herangezogen. Ein weiteres Experiment verdeutlicht am Beispiel zweier lithologisch unterschiedlicher Proben das Deformationsverhalten während des Austrocknens der Bohrkerne.

D.10.1 Allgemeine Grundlagen

Wird ein Bohrkern durch den Bohrvorgang aus dem Gebirge herausgetrennt, so ist er von der im Gebirge herrschenden in situ-Spannung entlastet. Die Gebirgsspannung setzt sich zusammen aus dem Auflastdruck, der tektonischen Spannung, Residualspannung (Restspannungen), Paläospannungen und Spannungen, die durch den Porenwasserdruck induziert werden.

-----  
Dr. Klaus E. Wolter, KTB-Feldlabor, 8486 Windischeschenbach,  
Dipl.Ing. Emil Aulbach, Prof. Dr. H. Berckhemer, Institut für  
Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt, Feld-  
bergstr. 47, 6000 Frankfurt

Die Spannungsentlastung des Kerns läßt sich durch drei Teilprozesse beschreiben:

(1) Momentane Entspannung durch elastische Deformation (Hooke'sches Verhalten). Bei der nachträglichen Untersuchung von Bohrkernen ist dieser Anteil nicht mehr vorhanden. Bedingt durch die elastische Heterogenität der Minerale hat jedoch ein Aufbau von Residualspannungen stattgefunden.

(2) Zeitabhängige partielle Relaxation von Residualspannungen durch viskoelastische Deformation. Daß es solchen Spannungsabbau durch verzögertes Kriechen (Retardation) in Gesteinen auch bei Zimmertemperatur geben kann, haben Laboruntersuchungen (BERCKHEMER et al. 1985, SOBIESIAK 1987) und Messungen an Sedimentbohrkernen (TEUFEL 1983, LESSI et al. 1988) gezeigt.

(3) Die verbleibenden zeitabhängigen oder remanenten Spannungsanteile können teilweise durch Sprödbruch abgebaut werden. Die so entstehenden Mikrorisse sind indikativ für das Primärspannungsfeld.

Der gesamte Themenkreis ist Gegenstand des Forschungsvorhabens Be 299/63 "Restspannungen in Tiefbohrkernen". Das konkrete Ziel ist dabei, aus den Restspannungen im Bohrkern Aussagen über das in situ-Spannungsfeld zu erhalten.

Ein wichtiges Teilexperiment ist hierbei die Untersuchung der viskoelastischen Spannungsrelaxation. Zur modellmäßigen Beschreibung viskoelastischen Verhaltens eignet sich der sogenannte Kelvin-Körper, eine Parallelschaltung elastischer und viskoser Elemente. Die Entspannung erfolgt entsprechend einer mit der Zeit exponentiell abklingenden Deformation. Die oben erwähnten Laborexperimente und Messungen an Sedimentkernen ließen vermuten, daß mit Relaxationszeiten von mehreren Stunden bis zu einigen Tagen zu rechnen ist. Voraussetzung für die Meßbarkeit des Effektes ist deshalb, daß die Kerne unmittelbar nach der Entnahme aus dem Kernrohr vermessen werden. Hieraus ergab sich der zwingende Grund, dieses Experiment im Feldlabor zu installieren, obwohl es nicht zu den Routineuntersuchungen gehört. Nach den jetzt vorliegenden Erfahrungen sind zur vollständigen Erfassung des Relaxationsprozesses Meßzeiten bis zu einer Woche erforderlich. Dies bedeutet, daß eine Beprobung nur an ausgewählten Kernstücken möglich ist, die etwa im Teufenabstand von 100 m entnommen werden.

Die ersten Retardationsmessungen an Bohrkernmaterial der KTB-Vorbohrung konnten erst ab Ende Februar 1988 vorgenommen werden. Der Grund dieser zeitlichen Verzögerung liegt darin, daß in dem provisorischen Feldlabor in der Volksschule Windischeschenbach die Meßapparaturen wegen technischer Schwierigkeiten nicht aufgebaut werden konnten. Weiterhin sorgten technische Probleme an einem einzelnen Meßgerät dafür, daß

bisher nur wenige Messungen durchgeführt wurden, die aber dennoch aussagekräftige Meßergebnisse lieferten.

Sämtliche Spannungsdaten beziehen sich zunächst auf eine Referenzlinie, die am Bohrkern vor Meßbeginn aufgetragen wird. Eine spätere Nachorientierung des Bohrkerns, die erst nach der Auswertung der Teviewer- und Formation Micro-Scanner-Aufnahmen möglich ist, läßt Aussagen über die Orientierung des im Gebirge vorliegenden Spannungssystems zu.

In diesem ersten Bericht beschränken wir uns bewußt darauf, die unmittelbaren Meßdaten der ersten zwei Proben vorzustellen unter Verzicht auf jede physikalische oder geologische Interpretation. Es soll hier in erster Linie gezeigt werden, daß der gesuchte Effekt existiert und daß das hierfür entwickelte System geeignet ist für quantitativ auswertbare Messungen. Mit dem Trocknungsversuch wird deutlich gemacht, daß erfolgreiche Retardationsmessungen nur bei strenger Konstanz des Wassergehaltes der Probe zu aussagefähigen Resultaten führen kann. Neu und unerwartet ist der hier nur pauschal erwähnte Zusammenhang zwischen Deformation und akustischer Emission.

#### D.10.2 Meßprinzip

Mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern (Hottinger Baldwin W1T3) wird die Deformation des Bohrkerns in drei radialen und in axialer Richtung gemessen. Abb. D.10.1 zeigt eine Skizze der Meßapparatur. Die radialen Deformationen werden jeweils als Summenwerte diametral gegenüberliegender Wegaufnehmer bestimmt. Die Aufnehmerpaare  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  sind in der radialen Ebene so angeordnet, daß sie jeweils einen Winkel von  $60^\circ$  miteinander einschließen (Abb. D.10.3). Axial ist nur ein Aufnehmer erforderlich, da die Probe mit ihrer unteren Stirnfläche statisch definiert auf einer Dreispitzenlagerung ruht. Die Probe besteht aus einem Kernabschnitt von 100 mm Länge. Die Messung erfolgt mit einer 4-Kanal Trägerfrequenzmeßbrücke (Hottinger Baldwin KWS 73.AG).

Während des Meßvorganges werden Wassergehalt und Temperatur des Bohrkerns konstant gehalten. Dadurch werden Deformationen ausgeschlossen, die durch Temperaturschwankungen und Austrocknungseffekte hervorgerufen werden. Zu diesem Zweck wird der Bohrkern mit einer hermetisch dichten Wachsschicht versiegelt, bevor er in die Meßapparatur eingebaut wird. Die mit Stahlspitzen versehenen Meßfühler dringen durch die Wachsschicht und sitzen auf der Kernoberfläche auf. Die Meßapparatur befindet sich in einer thermostatisierten Kammer. Die Messungen erfolgten bei einer Kammertemperatur von  $25^\circ\text{C}$ . Die Probe wird so in die Meßapparatur eingesetzt, daß die Orientierung der an der Probe angezeichneten Referenzlinie (siehe Kap. D.10.4.) mit der Orientierung des Aufnehmers  $I_A$  übereinstimmt.

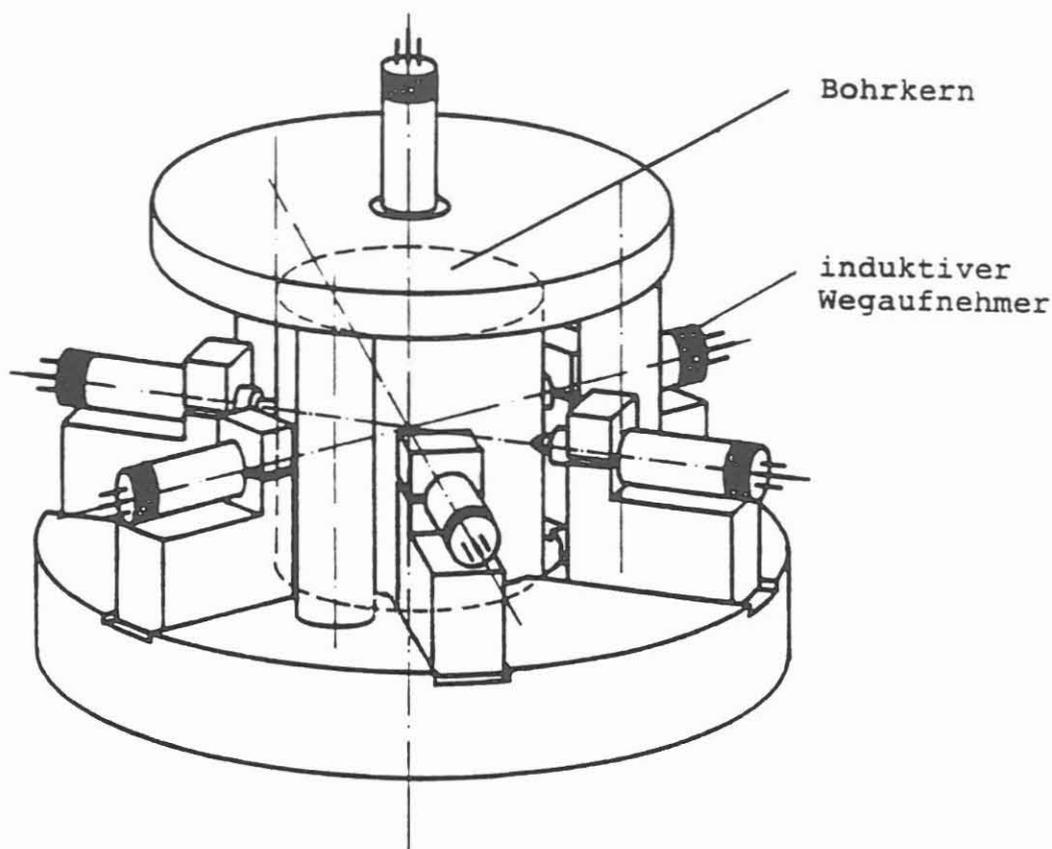


Abb. D.10.1: Skizze der Meßapparatur

Zur Erkennung und Messung akustischer Emissionen während des Retardationsprozesses wird ein piezoelektrischer Sensor an die Mantelfläche der Probe angedrückt. Die akustischen Signale werden als Ereignisse über einen Zähler summiert (AET 204B). Parallel dazu können sie mit Hilfe eines Digital-Speicheroszilloskops (VUKO VKS220-16) als Zeitfunktion dargestellt werden. Zur Vermeidung akustischer Störungen ist die Apparatur in einer weitgehend schalldichten Kammer eingeschlossen und erschütterungsgedämpft gelagert.

Alle Daten der Deformations- und der akustischen Emissionsmessungen werden über einen Mehrkanalschreiber dokumentiert. Speicheroszilloskop und Mehrkanalschreiber stehen über eine IEEE-488 Schnittstelle in Verbindung mit einem IBM-AT Personal Computer, über den alle Meßdaten in frei wählbaren Meßintervallen aufgezeichnet und auf Diskette abgespeichert werden können. Aus Abb. D.10.2 ist die Anordnung des Versuchsaufbaues zu entnehmen. Die Entwicklung der Meßapparatur, die Erarbeitung des Meßprinzips und die Fertigstellung der entsprechenden Software erfolgte am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt.

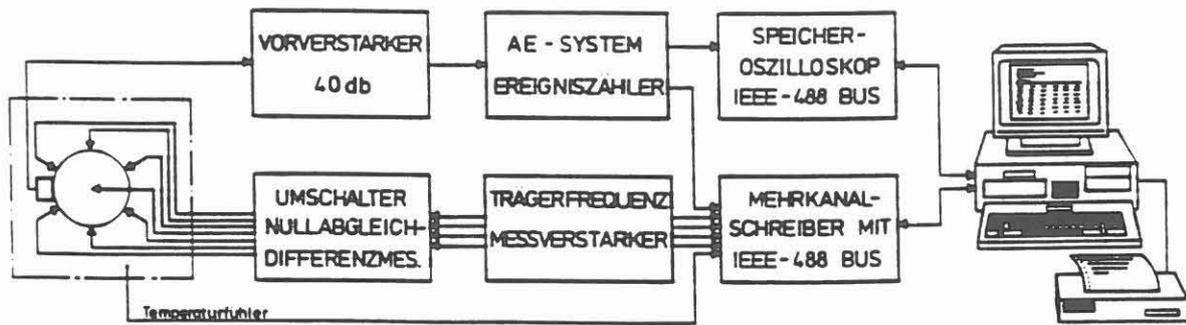


Abb. D.10.2: Skizze der Meßgeräte-Anordnung

### D.10.3 Berechnung der ebenen Deformation

Aus den in der Querschnittsebene des Kerns gemessenen radialen Deformationswerten

$$e_A = \Delta l_A / l_A, \quad e_B = \Delta l_B / l_B, \quad e_C = \Delta l_C / l_C$$

lassen sich für infinitesimale Deformationen (tensorieller Zusammenhang) Betrag und Richtung der maximalen Hauptdeformation  $e_1$  und der minimalen Hauptdeformation  $e_2$  berechnen. Für ein vorgegebenes ebenes Hauptdeformationssystem  $e_1, e_2$  ergibt sich in Analogie zum Mohr'schen Spannungskreis (JAEGER & COOK 1979, S. 45,46) die Dehnung in Richtung  $\Theta$  bezüglich der Richtung von  $e_1$  zu:

$$e(\Theta) = \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2\Theta \quad (1)$$

Bildet im speziellen Fall der Anordnung (Abb. D.10.3) der Aufnehmer  $I_A$  den Winkel  $\beta$  mit  $e_1$ , so gilt:

$$\begin{aligned} e_A &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2\beta \\ e_B &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2(\beta + 60^\circ) \\ e_C &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) + \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \cos 2(\beta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

Wegen

$$\begin{aligned} \cos 2(\beta + 60^\circ) &= -\frac{1}{2} \cos 2\beta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\beta \\ \cos 2(\beta + 120^\circ) &= -\frac{1}{2} \cos 2\beta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\beta \end{aligned} \quad (3)$$

ergibt die Auflösung von (2) nach den Hauptdeformationen

$$e_1 + e_2 = \frac{2}{3}(e_A + e_B + e_C)$$

$$(e_1 - e_2)^2 = \frac{4}{3}(e_B - e_C)^2 + \frac{4}{9}(2e_A - e_B - e_C)^2$$

und damit

$$e_1 = \frac{1}{3}(e_A + e_B + e_C) + \frac{1}{3}\sqrt{3(e_B - e_C)^2 + (2e_A - e_B - e_C)^2} \quad (4)$$

$$e_2 = \frac{1}{3}(e_A + e_B + e_C) - \frac{1}{3}\sqrt{3(e_B - e_C)^2 + (2e_A - e_B - e_C)^2}$$

$$\tan 2\beta = \sqrt{3}(e_C - e_B) / 2e_A - e_B - e_C \quad (5)$$

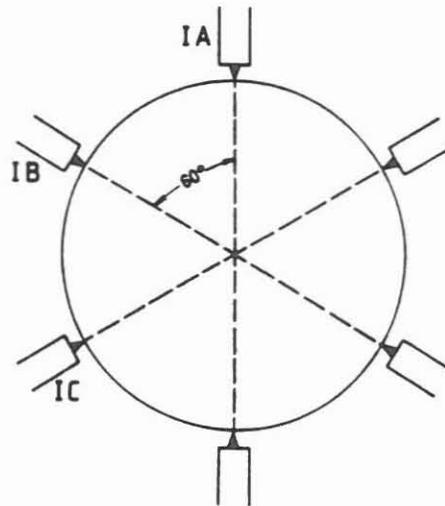


Abb. D.10.3: Anordnung der induktiven Wegaufnehmerpaare in der radialen Ebenen.

Wird die Probe so in die Meßapparatur eingesetzt, daß die zuvor am Kern angebrachte D-Referenzlinie (siehe Kap. D.10.4) mit dem Aufnehmer  $I_A$  zusammenfällt, dann ist  $\beta$  der im Uhrzeigersinn positive Winkel zwischen der  $e_1$ -Richtung und der D-Referenzrichtung. (Wäre die D-Referenzrichtung gleich der Nordrichtung, so wäre  $\beta$  positiv nach Osten zu zählen).

#### D.10.4 Präparation einer Probe

Da der Deformationsvorgang eines Bohrkerns zu dem Zeitpunkt beginnt, in dem dieser aus dem Gebirge herausgebohrt wird, ist es erforderlich die Deformationsmessung so schnell wie möglich nach der Kernentnahme zu beginnen. Aus einem frisch erbohrten Kernmarsch wird sofort nach der Bohrkernentnahme ein Kernstück ausgewählt und mit einer D-Referenzlinie (Referenzlinie für die Deformationsmessung) versehen. Dieses Kernstück stammt aus dem untersten Meter des Kernmarsches, d.h. dem Teil, der zuletzt erbohrt wurde. Aus diesem Kernstück wird ein planparalleler Probenzylinder mit einer Höhe von  $100 \pm 1$  mm herausgetrennt. Dieser Probenzylinder ( $\phi = 94$  mm) wird in ein vorbereitetes Wachsbad (Temp. ca.  $78^{\circ}\text{C}$ ) kurz eingetaucht und so mit einer Wachsschicht umgeben, um den Feuchtigkeitsgehalt in der Probe konstant zu halten. Dieser präparierte Probenzylinder wird in die Meßapparatur eingebaut, die induktiven Wegaufnehmer justiert (Nullmessung) und die Messung gestartet.

Zwischen der Bohrkernentnahme und dem Beginn der Messung sind ca. 45 Min. erforderlich, um den Probenzylinder zu präparieren. Zeitpunkt der Bohrkernentnahme ist, wenn der Bohrkern im Kernrohr atmosphärische Bedingungen erreicht, d.h. wenn das Kernrohr auf dem Drehtisch des Bohrturms angekommen ist. Die Zeitdauer, die zwischen dem Herausbohren des Kerns und dem Beginn einer Messung liegt, beträgt ca. 2-3 Stunden. In dieser Zeit vollzieht sich ein großer Teil des Deformationsvorganges. Dennoch lassen sich an dem Bohrkern auch nachher noch Deformationen über mehrere Tage registrieren bis eine Stabilisierung des Deformationsablaufes eingetreten ist. Dies geht aus den bisher vorliegenden Messungen deutlich hervor.

Die beiden Endstücke des Kernstücks, aus dem der Probenzylinder herausgetrennt wurde, gehen in die Kerninventarisierung. Dort werden sie in den Kernmarsch eingepaßt, mit der F-Referenzlinie (die eigentliche Feldlabor-Referenzlinie) versehen und inventarisiert. Mit Hilfe der Winkeldifferenz zwischen der D-Referenzlinie und der F-Referenzlinie kann die errechnete Orientierung der größten Deformation auf die F-Referenzlinie bezogen werden.

#### D.10.5 Meßergebnisse

##### D.10.5.1 Retardation und akustische Emission

Bei den zahlenmäßigen Ergebnissen wird die kumulative Deformation angegeben, bezogen auf einen Nullpunkt, der drei Stunden nach Meßbeginn angesetzt wird. Die Zeit von drei Stunden ist erforderlich, damit zwischen Bohrkern und Meßraum der Temperatúrausgleich erfolgen kann. Dadurch wird verhindert, daß Deformationen gemessen werden, die auf thermische Einflüsse zurückzuführen sind.

Die Deformation ist mit vier Meßwerten ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) angegeben. Dabei bedeuten  $e_A$ ,  $e_B$  und  $e_C$ , die radial erzielten Deformationswerte und  $e_V$  der axiale Meßwert. Weiterhin beinhaltet die Darstellung der Meßergebnisse die berechnete maximale und minimale Hauptdeformation ( $e_1$ ,  $e_2$ ) und die Orientierung  $\beta$  von  $e_1$  bezogen auf die Feldlabor-Referenzlinie. Das Ergebnis der akustischen Emissions-Messung enthält die Anzahl der registrierten akustischen Ereignisse.

Aus den Kernmärschen 305 und 310 wurden jeweils an einem Bohrkern Retardationsmessungen durchgeführt. Bei beiden Bohrkernen handelt es sich um einen mittelkörnigen, schwach texturierten Amphibolit.

Probe 305:

Kernstück-Nr.:	305D1q
Obere Teufe des Kernstücks:	1463,5 m
Beginn der Messung nach Kernentnahme:	1h 10 min
Deformationszeit:	8h 30 min
Kumulative Deformation:	$e_A = 150 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_B = 51 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_C = 128 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_V = -97 \mu\text{m}/\text{m}$
Maximale und minimale Hauptdeformation:	$e_1 = 171 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_2 = 50 \mu\text{m}/\text{m}$
Orientierung von $e_1$ bezogen auf die Feldlabor-Referenzlinie:	$\beta = 25^\circ$
Anzahl der akustischen Ereignisse:	238 in 8,5h

Probe 310 (1.Versuch):

Kernstück-Nr.:	310J4ab
Obere Teufe des Kernstücks:	1487,7 m
Beginn der Messung nach Kernentnahme:	45 min
Deformationszeit:	14h 30 min
Kumulative Deformation:	$e_A = 279 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_B = 563 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_C = 487 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_V = 681 \mu\text{m}/\text{m}$
Maximale und minimale Hauptdeformation:	$e_1 = 613 \mu\text{m}/\text{m}$ $e_2 = 273 \mu\text{m}/\text{m}$

Orientierung von  $e_1$  bezogen  
auf die Feldlabor-Referenzlinie:  $\beta = 17^\circ$

Anzahl der akustischen Ereignisse: 1900 in 7,5h

Der Versuch mußte nach 14,5h wegen technischer Probleme abgebrochen werden. Nach einer Neujustierung der induktiven Wegaufnehmer und Überprüfung der Meßgeräte wurde der Versuch neu gestartet. Der Beginn der Messung erfolgte 21,5h nach der Kernentnahme. Die Meßergebnisse sind im folgenden dargestellt:

Probe 310 (2. Versuch):

Kernstück-Nr.: 310J4ab  
Obere Teufe des Kernstücks: 1487,7 m  
Beginn der Messung nach Kernentnahme: 21h 30 min  
Deformationszeit: 97h 30 min

Kumulative Deformation:  $e_A = 84 \mu\text{m/m}$   
 $e_B = 376 \mu\text{m/m}$   
 $e_C = 79 \mu\text{m/m}$   
 $e_V = 260 \mu\text{m/m}$

Maximale und minimale Hauptdeformation:  $e_1 = 376 \mu\text{m/m}$   
 $e_2 = -17 \mu\text{m/m}$

Orientierung von  $e_1$  bezogen  
auf die Feldlabor-Referenzlinie:  $\beta = 40^\circ$

Ein deutliches anisotropes Verhalten im Deformationsverlauf ist aus allen drei Messungen zu entnehmen. Die Probe 305 (Abb. D.10.4) zeigt axial eine negative Deformation mit einem maximalen Wert von  $-97 \mu\text{m/m}$ . Das bedeutet, daß sich der Kern in der axialen Richtung zusammengezogen hat. Dies ist bei der Probe 310 (Abb. D.10.5, D.10.6 und D.10.7) nicht der Fall. Die axiale Deformation  $e_V$  erreicht in beiden Messungen (1. und 2. Versuch) positive Werte ( $681 \mu\text{m/m}$  bzw.  $260 \mu\text{m/m}$ ), d.h. der Kern dehnt sich aus. Abb D.10.7 zeigt, daß die Deformation nach 124 h (>5 Tage) immer noch nicht abgeschlossen ist. Die angegebene Orientierung der maximalen radialen Hauptdeformation  $e_1$  bezieht sich auf die F-Referenzlinie. Eine Orientierung des Spannungsfeldes kann noch nicht ermittelt werden, da noch keine Rückorientierung der Bohrkerne vorliegt.

Die Aufzeichnung der akustischen Emissionen zeigt unterschiedliche Ergebnisse. Dies liegt einerseits daran, daß der Kern 310 zeitlich schneller zur Messung zur Verfügung stand als der Kern 305 und andererseits ist es wahrscheinlich, daß sowohl die Anzahl der akustischen Ereignisse als auch die Bandbreite des Frequenzspektrums vom Bohrkernmaterial und dem Deformationsverhalten abhängig ist. Das Ergebnis der Untersu-

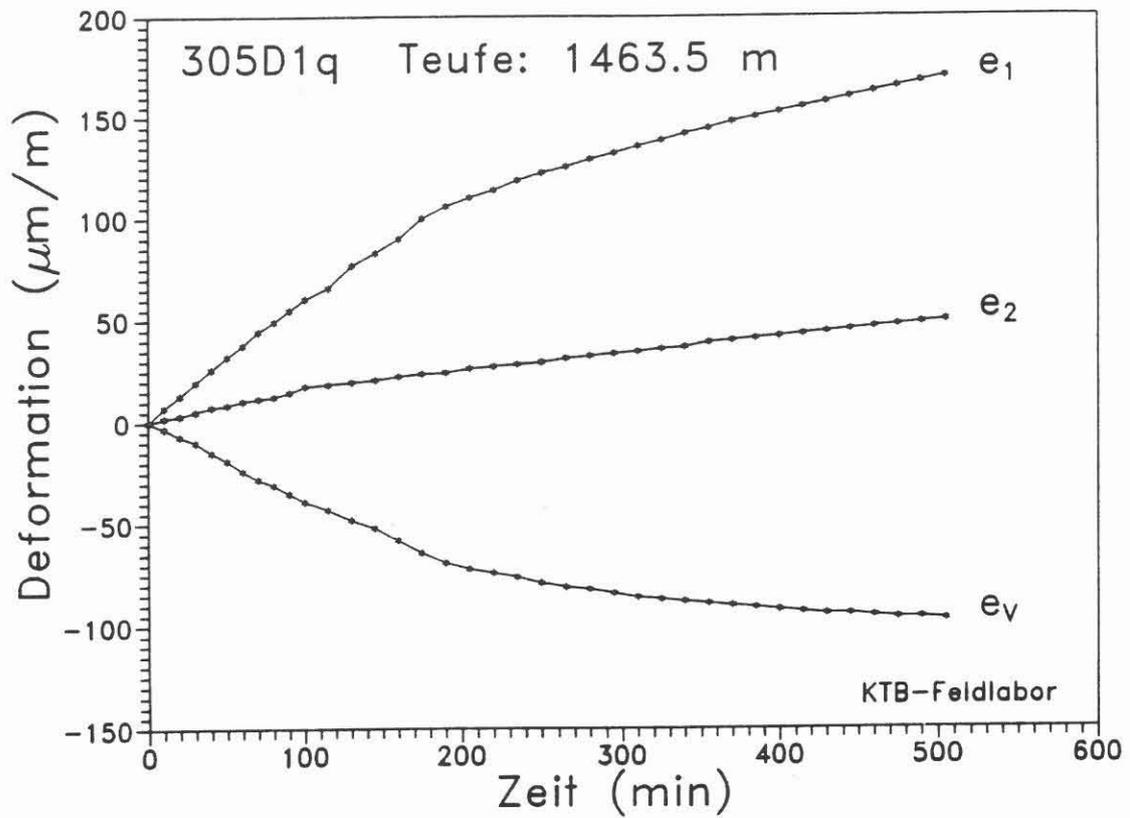


Abb. D.10.4: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 305.

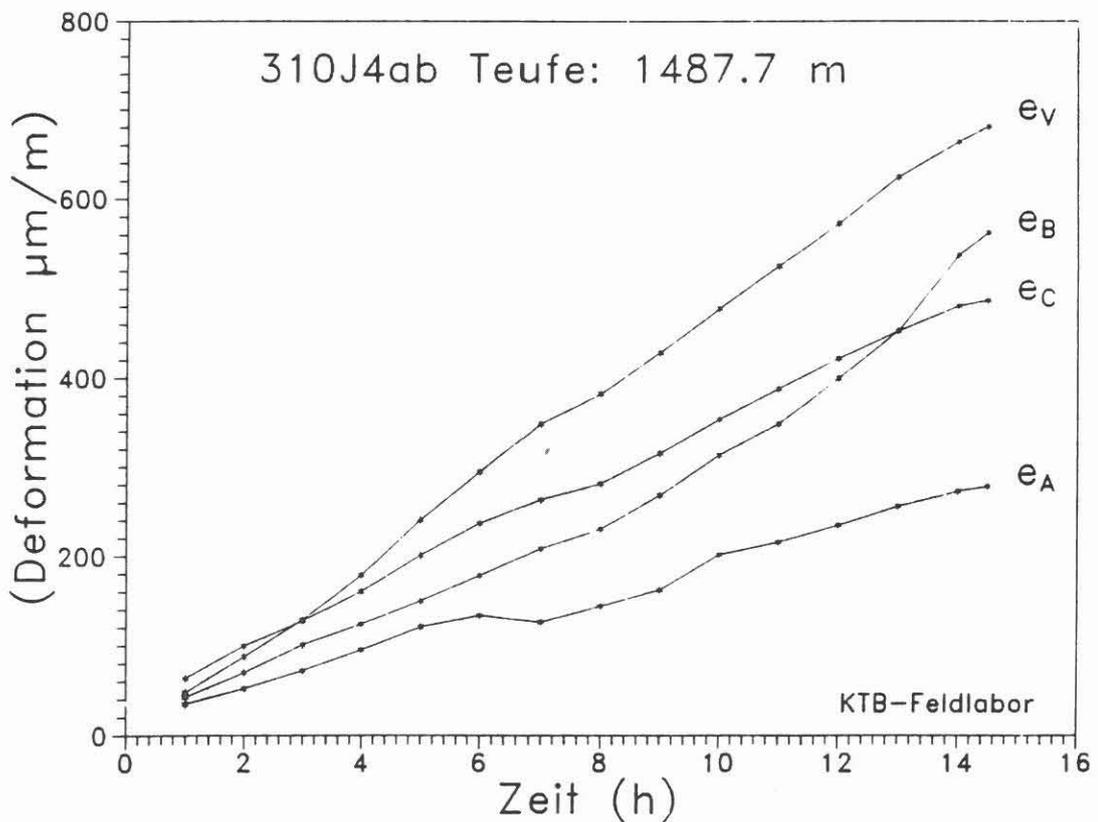


Abb. D.10.5: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (1. Versuch).

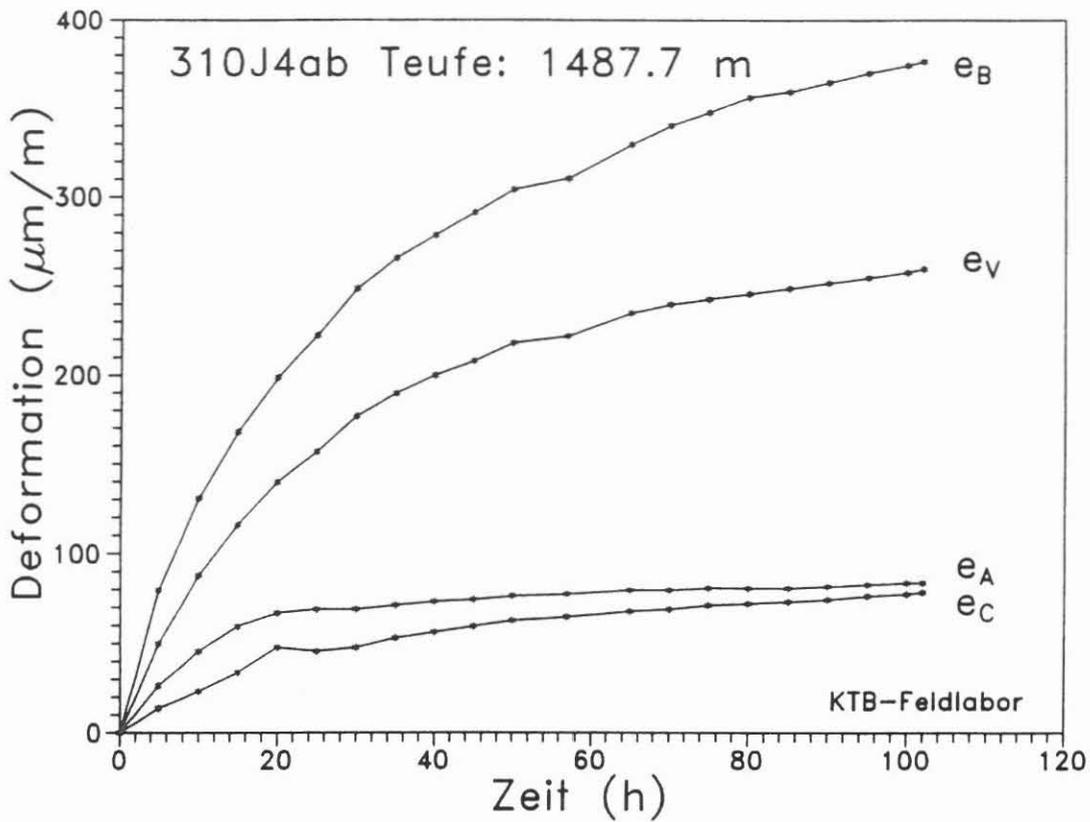


Abb. D.10.6: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (2. Versuch).

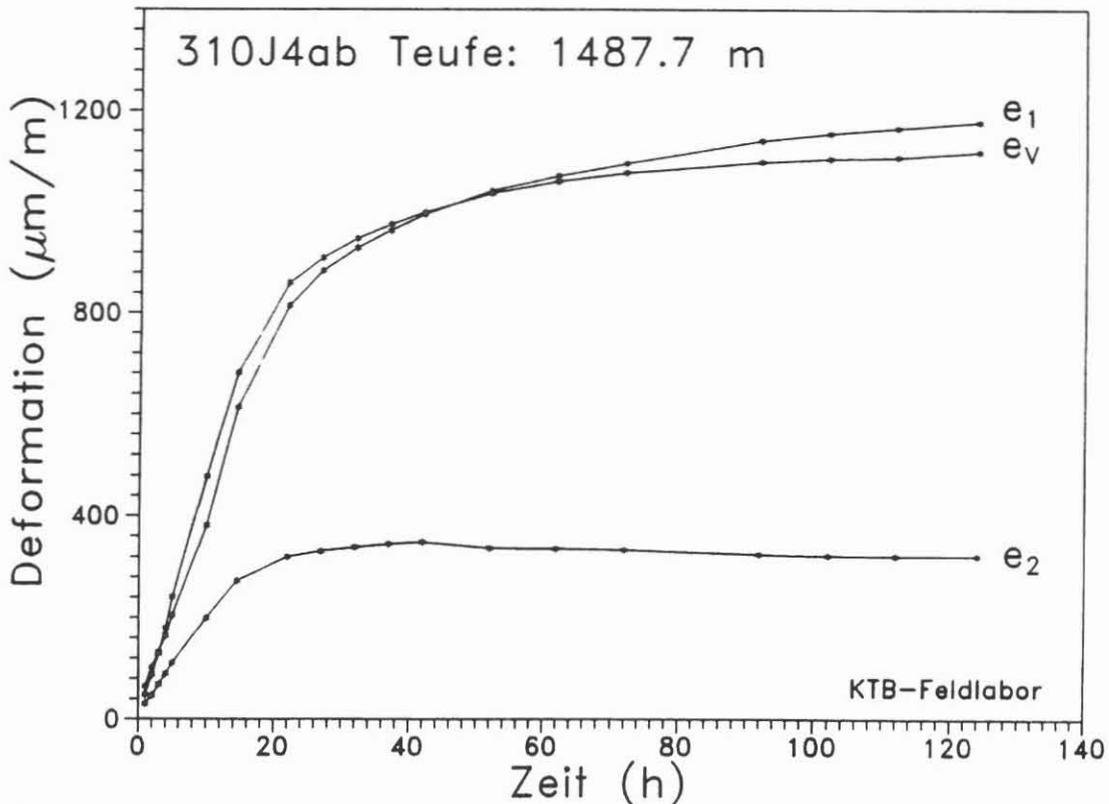


Abb. D.10.7: Zeit-Deformationsverlauf der Probe 310 (1.+2.Versuch)

chung des Frequenzspektrums ergab eine Bandbreite von 135-220 KHz. Die Analyse der akustischen Emissionen wird in Zukunft noch stärker verfolgt, so daß die hier vorgestellten Meßergebnisse nur als erste vorläufige Resultate zu betrachten sind.

#### D.10.5.2 Trocknungseffekte

Makroskopisch ließ sich an verschiedenen Bohrkernen im Kernlager des KTB-Feldlabors beobachten, daß sich an dem Kernmaterial nach mehreren Tagen Risse und Brüche zeigen, die nach der Kernentnahme noch nicht vorhanden waren. Mit den folgenden Versuchen sollte herausgefunden werden, welche Effekte auftreten, wenn ein Bohrkern austrocknet. Dazu wurde folgende Methode angewendet:

Nach Beendigung der Retardationsmessung wurde von der Probe die Wachsschicht entfernt und der Kern 24 h gewässert. Danach wurde der Kern wieder in die Meßapparatur eingebaut und dort über mehrere Tage zwischen 18-20°C getrocknet. Die Abb.D.10.8 und D.10.9 zeigen den Zeit-Deformationsverlauf zweier lithologisch unterschiedlicher Proben. Probe 305 ist der schon oben erwähnte mittelkörnige, schwach texturierte Amphibolit und Probe 402 ist ein sehr strafflagiger, deutlich geschieferter Paragneis.

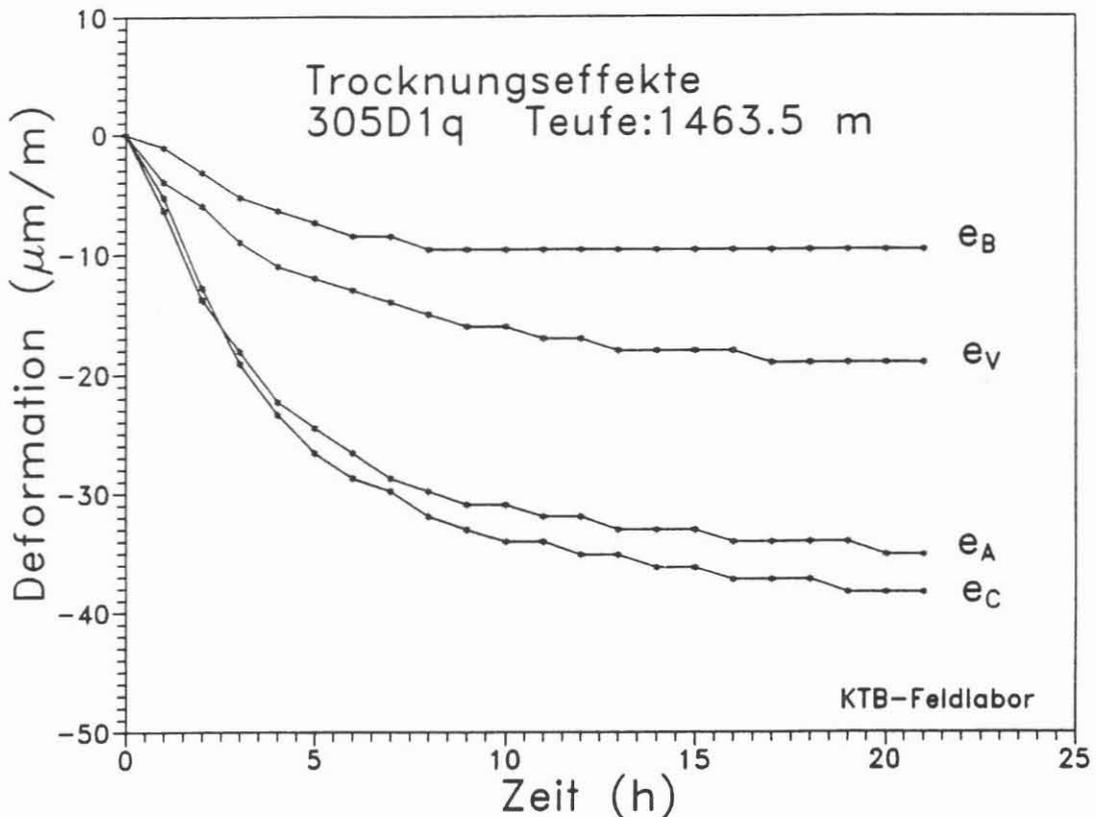


Abb. D.10.8: Trocknungseffekte im Amphibolit

Der Amphibolit zeigt eine geringe Schrumpfung von maximal  $-38 \mu\text{m}/\text{m}$ . Dagegen treten bei dem Paragneis wesentlich größere Schrumpfungen auf. Der Meßwert  $e_A$  verläuft parallel zum Streichen der Foliation und wie aus Abb. D.10.9 ersichtlich, ist die Deformation in dieser Richtung gleich Null. Die Meßwerte  $e_B$  und  $e_C$  zeigen dagegen sehr große Deformationen von  $-320 \mu\text{m}/\text{m}$  bzw.  $-407 \mu\text{m}/\text{m}$ . Das bedeutet, daß während des Austrocknens des Materials sich die größte Kontraktion senkrecht zum Streichen der Foliation ereignet. Das ausgeprägte Trennflächengefüge im Paragneis hat einen erheblichen Einfluß auf das Deformationsverhalten während des Trocknungsprozesses. Wahrscheinlich spielen Kapillarkräfte eine wesentliche Rolle. Quelleffekte können ausgeschlossen werden, da keine quellfähigen Minerale vorhanden sind. Im Vergleich zu dem Amphibolit sind die Deformationen im Paragneis ca. 10 mal größer.

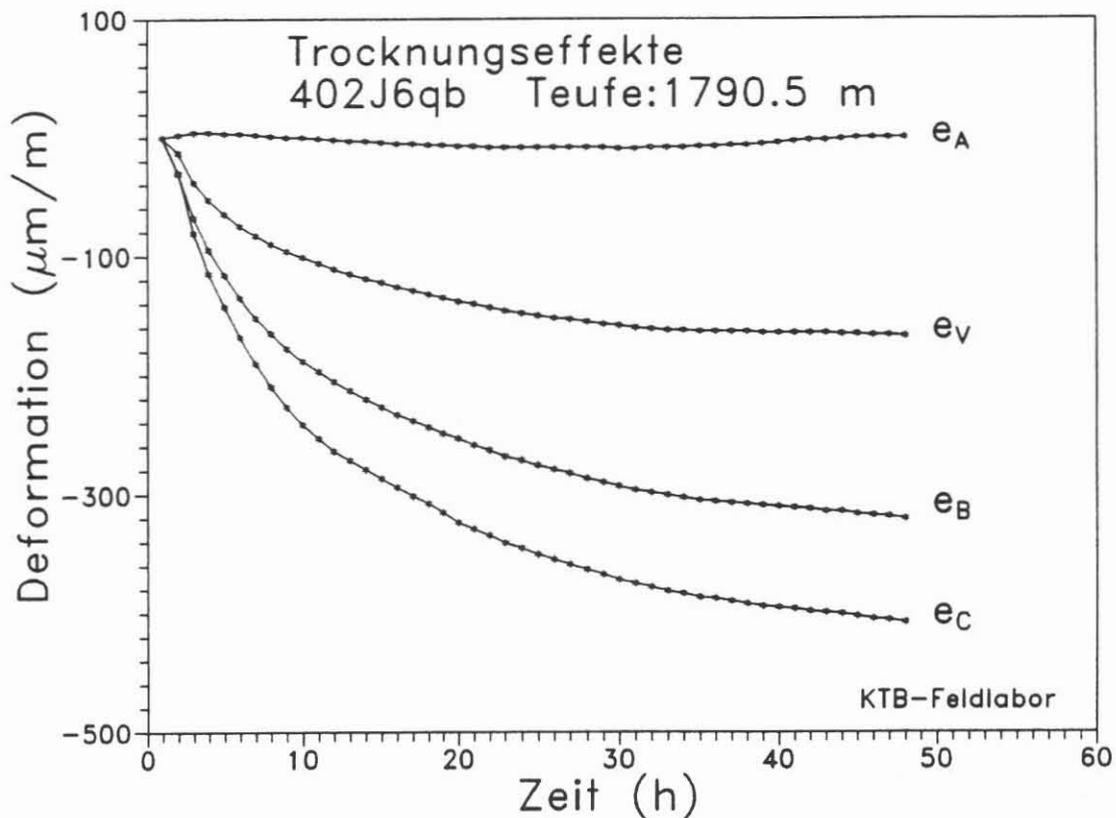


Abb. D.10.9: Trocknungseffekte im Paragneis

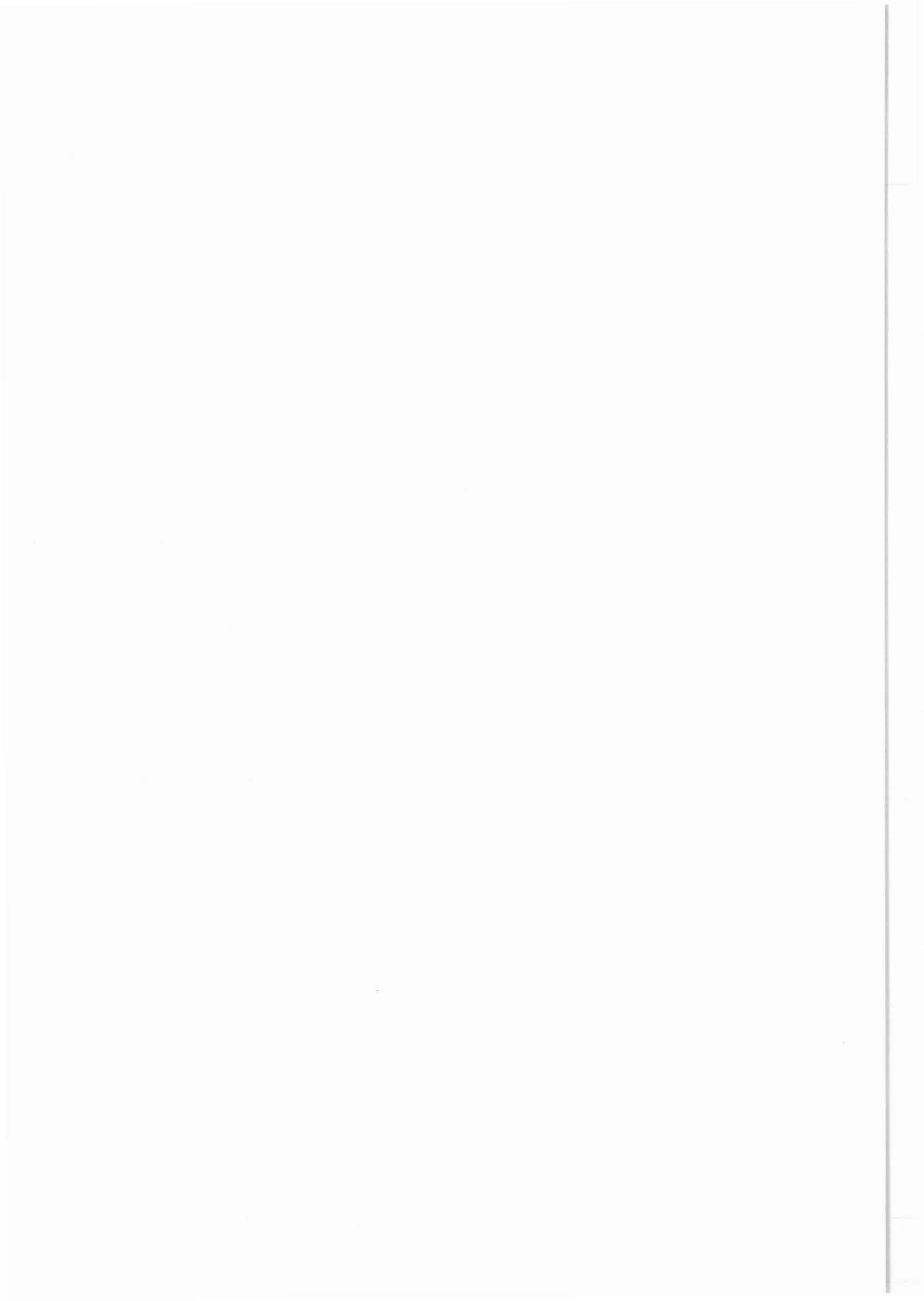
#### D.10.6 Schriftenverzeichnis

- BERCKHEMER, H., Aulbach, E., BÄUMLER, P. & SOBIESIAK, M. (1985): Residual stress in drill cores.- 4th Alfred Wegener Conference, Seeheim, S.91.
- JAEGER, J.C. & COOK, N.G.W. (1979): Fundamentals of rock mechanics.- Chapman & Hall, London.
- LESSI, J., PERREAU, PH. & KOCHER, M. (1988): Mesures de contraintes in-situ méthode relaxation des carottes.-Rev. de l'Institut Français du Pétrole, 43: 17-42.
- SOBIESIAK, M. (1987): Thermische Relaxation von Eigenspannungen in Glas- und Basaltproben. - Dipl.Arbeit, Inst. f. Met. u. Geoph. Frankfurt.
- TEUFEL, L.W. (1983): Determination of in situ-stress from anelastic strain recovery measurements of oriented cores. - Symposium SPE/DOE 11649, Denver, 421-430.

## E. Ergänzende Untersuchungen

KTB Oberpfalz VB –

H. de Wall  
G. Zulauf



KTB Report	88-6	E1-E19	13 Abb., 1 Tab.	Hannover 1988
------------	------	--------	-----------------	---------------

Die bruchhaften Verformungsgefüge im Teufenbereich 0 - 992 m

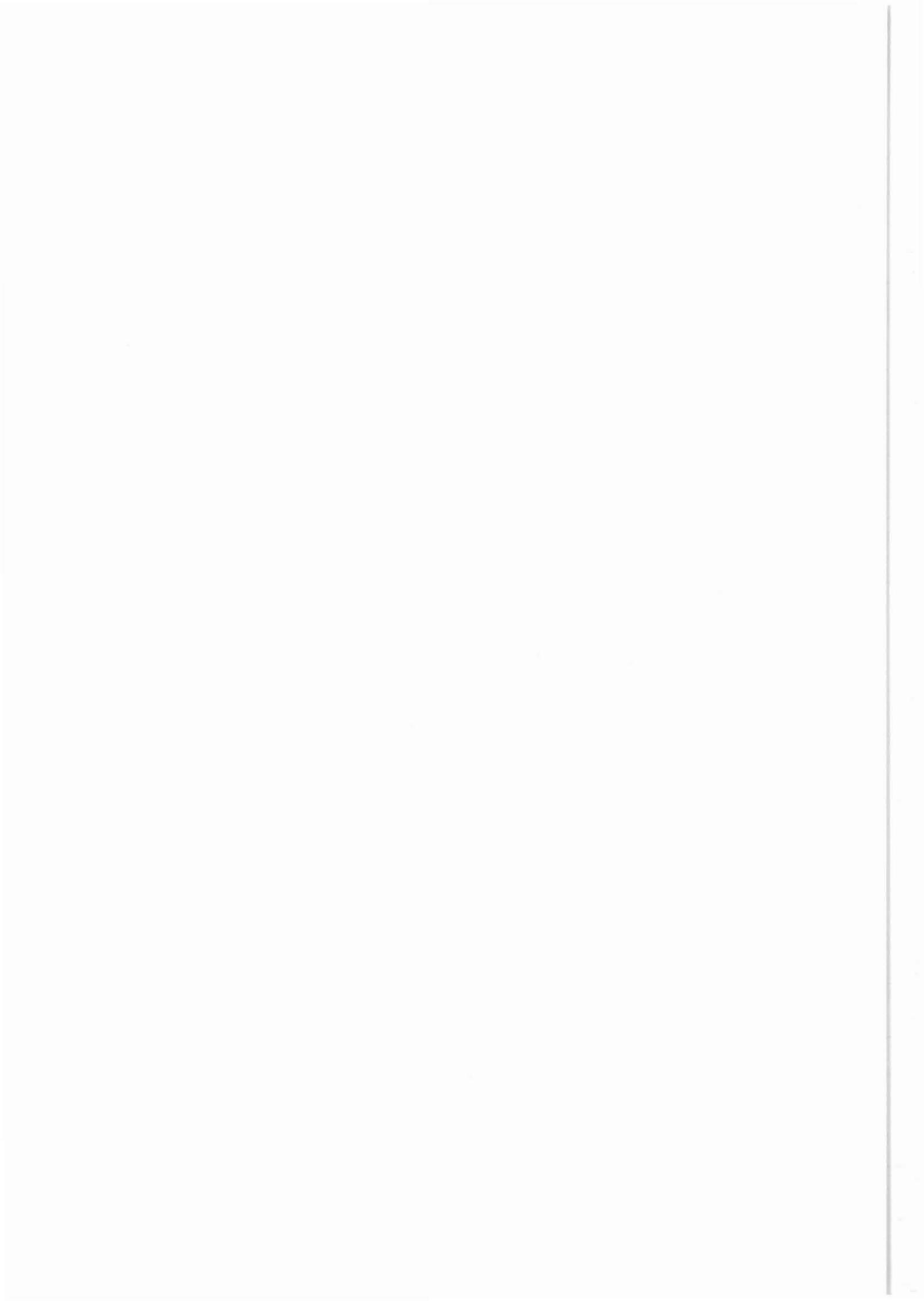
E. Ergänzende Untersuchungen

H. de Wall & G. Zulauf \*

#### INHALTSVERZEICHNIS

- E. 1. Einführung
  - E. 1. 1. Harnischflächen als Anzeiger bruchhafter Deformation und ihre Verwendung als Schersinnindikatoren
  - E. 1. 2. Meßverfahren
  - E. 1. 3. Entwicklung eines Meßinstrumentes
- E. 2. Ergebnisse der Messungen
  - E. 2. 1. Charakteristik der Verschiebungsflächen
  - E. 2. 2. Mineralisationen auf den Harnischflächen
  - E. 2. 3. Altersabfolgen verschiedener Bewegungssysteme
- E. 3. Schlußfolgerung
- E. 4. Literaturverzeichnis

\* Anschrift der Autoren: Dipl.-Geol. H. de Wall, Institut für Geowissenschaften und Dynamik der Lithosphäre, Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, 3400 Göttingen; Dipl.-Geol. Dipl.-Ing. G. Zulauf, Geol.-Paläont. Inst. Universität Frankfurt a.M., Senckenberganlage 32, 6000 Frankfurt a.M.



## E. 1. EINFÜHRUNG

### E. 1. 1. Harnischflächen als Anzeiger bruchhafter Deformation und ihre Verwendung als Schersinnindikatoren

Die im Teufenbereich 0 - 992 m reichlich vorhandenen Harnische weisen zusammen mit den ebenfalls häufig vorkommenden Kataklasiten auf intensive Deformation im spröden Krustenstockwerk hin.

Die Harnische bieten als Oberflächen von Störungen das beste Mittel, um die Bewegungsrichtung und manchmal auch den Bewegungssinn der verschobenen Blöcke zu erfassen (PETIT 1987). Sie sagen jedoch wenig über Deformationsrate, inkrementellen und totalen Versatz aus (MEANS 1987).

Die gewöhnlich vorhandene Harnischstriemung verläuft parallel zur Bewegungsrichtung der verschobenen Blöcke. Im untersuchten Teufenbereich spielen für die Bildung der Striemung vor allem das Einfräsen von harten Partikeln in die Verschiebungsflächen (vgl. ENGELDER 1974) oder Faserwachstum von Kristallen, parallel zum jeweiligen Versatz, die wichtigste Rolle. Über weitere Möglichkeiten zur Bildung von Striemungen auf Harnischen (Trümmerstreifen, Stylolithenbildung etc.), die hier nur untergeordnet in Frage kommen, siehe MEANS (1987).

Bei der Fasermineralisation sind vor allem Calcit und Chlorit zu nennen. Die häufig vorkommenden Graphitharnische sind z.T. als Spiegelharnische ausgebildet und zeigen keinerlei Striemung. Eine Festlegung der Bewegungsrichtung ist dann nicht möglich.

Schwieriger als die Bestimmung der Bewegungsrichtung ist die Festlegung des Bewegungssinns. Gründe hierfür sind vor allem das häufige Fehlen der hierfür notwendigen Stufen auf den Harnischflächen, vor allem bei solchen mit Graphit, Chlorit oder Laumontit als Mineralisation.

NORRIS & BARRON (1969) unterscheiden zwischen angelagerten Stufen (accretion steps), die aus zerriebenem Gesteinsmaterial (fault gouge) oder neu gebildeten Mineralen aufgebaut sind und Bruchstufen (fracture steps), die durch Abtrennung der beiden Schollen oder durch sekundäre Störungen entstehen können. In unserem Falle handelt es sich vorwiegend um angelagerte Stufen (accretion steps).

Daß bei der Bestimmung des Bewegungssinns unter Zuhilfenahme dieser Stufen Vorsicht geboten ist, betonen schon PATERSON (1958) und TJIA (1964). GAY (1970) stellt fest, daß bei fehlender Fasermineralisation (d.h. bei ausschließlichem Vorhandensein von gouge) kongruente und inkongruente Formen der Stufen vorkommen können. Im ersten Fall weisen die steilen Flächen der Stufen in die Bewegungsrichtung der gegenüberliegenden Scholle. Im zweiten Fall zeigen sie in die entgegengesetzte Richtung. Für die Festlegung des Bewegungssinns wurden deshalb lediglich Harnischflächen mit Fasermineralisation herangezogen. Diese können als kongruente Formen der Stufen angesehen werden (PETIT 1987). Als besonders geeignet erwiesen sich die oft vorhandenen Harnischflächen mit

Calcit, da diese in der Regel prägnante Stufen aufweisen. Bei chloritbesetzten Harnischflächen sind die Stufen meist schlecht ausgeprägt oder sie fehlen ganz.

Ein weiteres Hilfsmittel zur Bestimmung des Bewegungssinns sind sekundäre Brüche vom Typus Riedel, deren relative Lage zur Verschiebungsfläche den Bewegungssinn anzeigt.

Mehr als eine Striemung tritt im untersuchten Teufenbereich vor allem in den mit Graphit belegten Harnischflächen auf. RAMSAY & HUBER (1987) warnen in solchen Fällen vor der leichtfertigen Festsetzung der Bewegungsrichtung anhand des jüngsten, prägenden Linears, da dies nicht zwangsläufig parallel zum Gesamtbewegungsvektor verlaufen muß.

### E.1.2. Meßverfahren

Die Raumlage der Harnischflächen und -lineare wurde am Bohrkern mit einem Geologenkompaß gemessen, wobei die bei der Kernaufnahme am Bohrkern angebrachte Orientierungslinie jeweils nach N zeigte. Zur Vertikalstellung der Bohrkern während der Messung dienten PVC-Sanitärrohre.

### E.1.3. Entwicklung eines Meßinstruments

Die oben beschriebene Meßmethode hat den Nachteil, daß sie dem magnetischen Einfluß (z.B. Versorgungsleitungen, Wandarmierung des Feldlabors) unterliegt. Zudem sind zu einer Messung immer zwei Personen erforderlich.

Um die Messung von diesen Nachteilen freizuhalten, wurde von Dr. A. Vollbrecht und H. de Wall (Inst. f. Geol. u. Dynamik d. Lithosphäre, Göttingen) ein Gerät (Abb. E.1.1.) konstruiert, das folgende Vorteile aufweist:

- die Messung wird von magnetischen Feldern nicht beeinflusst;
- da das Gerät aus Aluminium besteht, kann es bei den Wiederholungsmessungen der Geophysiker hinsichtlich der remanenten Magnetisierung nicht mehr zu Beeinträchtigungen durch unseren Meßvorgang kommen;
- die Messung kann am liegenden Kern durchgeführt werden, so daß auf die bisher notwendige zweite Person zur Vertikalstellung des Bohrkerns verzichtet werden kann;
- der Bohrkerndurchmesser spielt für die Messung keine Rolle.

# Gerät zum Einmessen von Flächen und Linearen am Bohrkern „Goniofix“

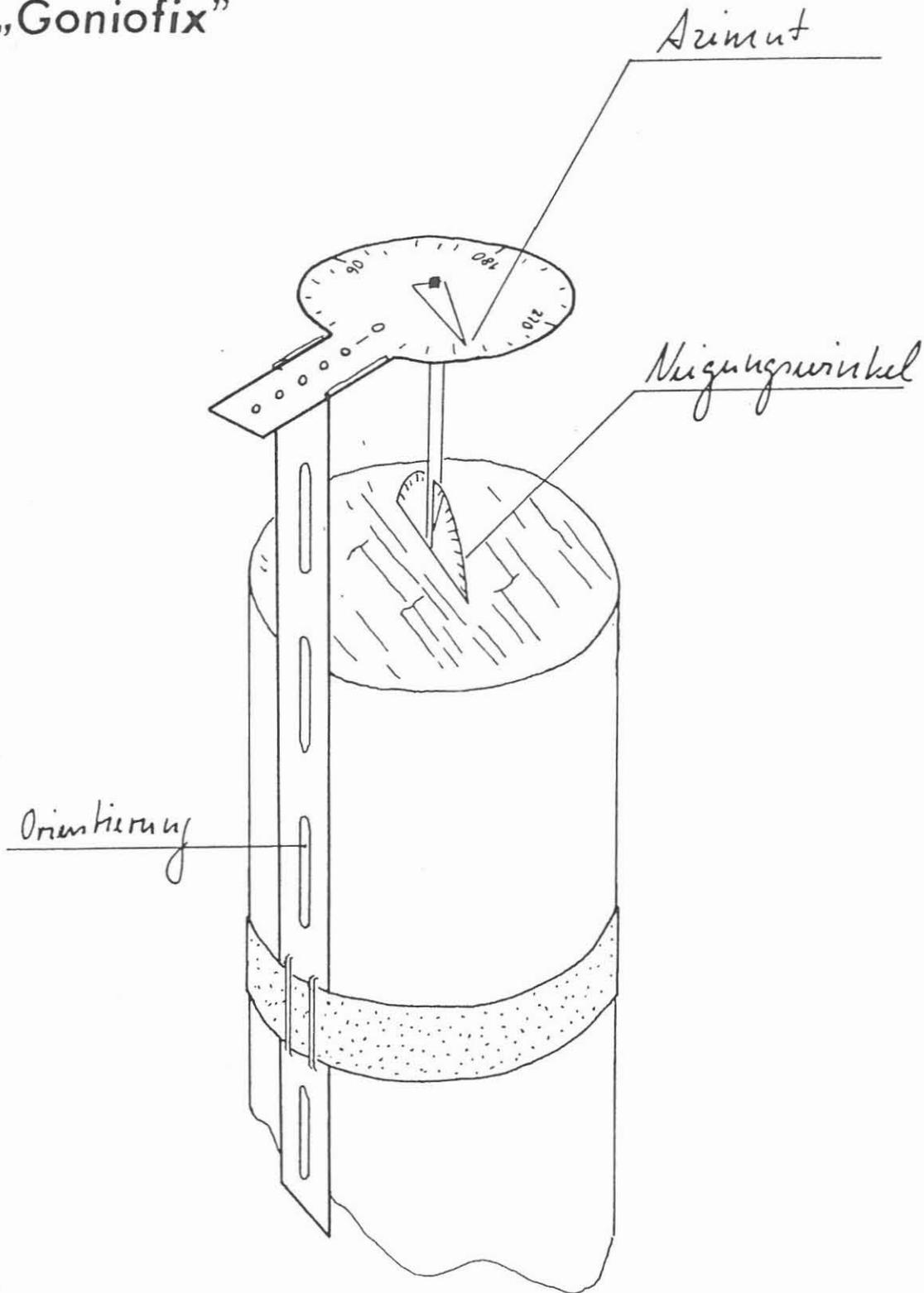


Abb. E.1.1: Messgerät

## E.2. Ergebnisse der Messungen

### E.2.1. Charakteristik der Verschiebungsflächen

Wegen der fehlenden Rückorientierung der Bohrkerne kann eine definitive Raumlage der gemessenen Flächen nicht wiedergegeben werden. Es ist jedoch möglich, anhand der gemessenen Einfallswinkel von Harnischflächen und -linearen, unter Einbeziehung des Verschiebungssinns, eine vorläufige Statistik hinsichtlich der Bewegungsmuster zu erstellen.

In Abb. E.2.1 sind in einem Diagramm sämtliche im Teufenbereich 0 - 992 m gemessenen Einfallswinkel der Harnischflächen gegen die Einfallswinkel der zugehörigen Lineare (Harnisch-

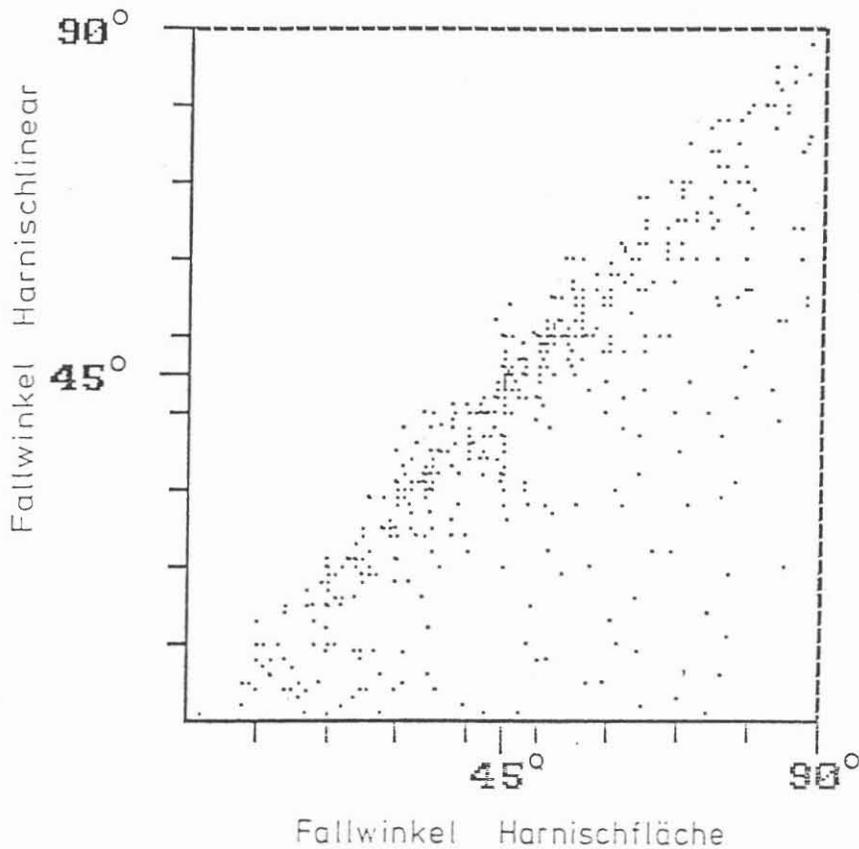


Abb. E.2.1: Darstellung sämtlicher gemessener Verschiebungsflächen aus dem untersuchten Teufenbereich. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

striemung) aufgetragen. Eine Erläuterung zu dieser Darstellung gibt Abb. E.2.2. Die höchste Punktdichte liegt im Bereich zwischen  $30^\circ$  Einfallswinkel (Fläche und Linear) und  $60^\circ$  Einfallswinkel (Fläche und Linear). Es handelt sich hierbei um Ab- bzw. Auf- und Überschiebungen, bei denen die Einfallswinkel von Fläche und Linear i.d.R. um maximal  $10^\circ$  voneinander abweichen (dip-slip fault). In geringerer Anzahl treten flachliegende Verschiebungsflächen und steilstehende Störun-

gen mit Vertikalversatz auf. Relativ selten sind Blattverschiebungen und Schrägaufschiebungen bzw. -abschiebungen.

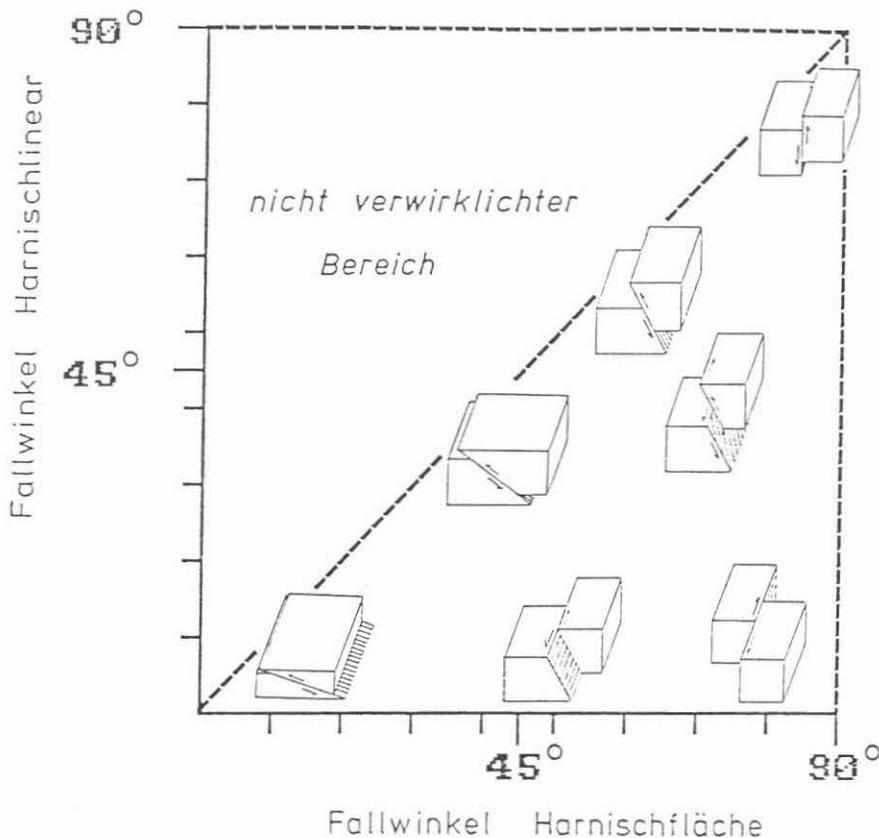


Abb. E.2.2: Erläuterungsschema zu den Abb. E.2.1, E.2.3. u. E.2.4. In dem Diagramm sind die jeweiligen Bewegungsmuster (hier exemplarisch als Aufschiebungen) eingetragen. Diese ergeben sich, wenn man das Einfallen der Verschiebungsfläche gegen das Einfallen des zugehörigen Linears aufträgt.

Die Häufigkeit von Ab- und Aufschiebungen in Abhängigkeit von der Teufe ist aus Tab. E.2.1a-d zu entnehmen.

Im Teufenbereich 0 bis 535 m treten ca. 90 % Auf- und Überschiebungen auf, welche in Abb. E.2.3 dargestellt sind. Die meisten dieser Flächen fallen zwischen  $20^\circ$  und  $60^\circ$  ein. Die jeweils zugehörigen Lineare weisen ähnliche Werte auf. Es liegen also in der Mehrzahl flache Überschiebungen bis Aufschiebungen vor (vgl. Abb. E.2.2). Wesentlich seltener sind steile Aufschiebungen und Schrägaufschiebungen.

Von 535 bis 650 m nehmen die Abschiebungen im Vergleich zu den Aufschiebungen immer mehr zu, und im Teufenbereich 650 bis 710 m treten beide etwa in gleicher Anzahl auf.

Ab 710 m beobachtet man mit zunehmender Teufe wieder vorwiegend Harnischflächen mit aufschiebendem Charakter.

Ab 770 m sind in Gneisen häufig Verschiebungen parallel zur Foliation feststellbar. Aufgrund fehlender Stufen auf den

vorwiegend mit Chlorit besetzten Harnischflächen läßt sich bis ca. 835 m kein Schersinn feststellen.

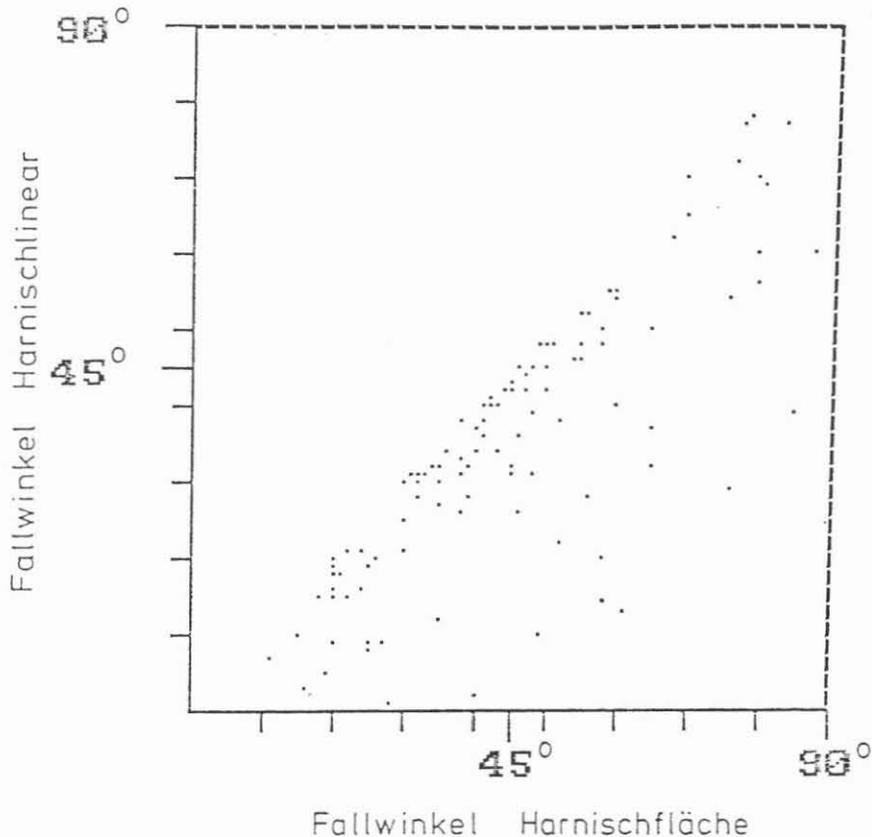


Abb. E.2.3: Darstellung der im Teufenbereich 0 - 535 m auftretenden Aufschiebungen. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

Von 835 bis ca. 850 m überwiegen Aufschiebungen, denen dann bis 950 m fast ausschließlich parallel zur Foliation verlaufende Abschiebungen folgen. Aus Abb. E.2.4 läßt sich entnehmen, daß diese Abschiebungen vorwiegend Einfallswinkel (für Flächen und zugehörige Lineare) von  $40^\circ$  bis  $70^\circ$  aufweisen. Ab 950 m treten wieder gehäuft Harnischflächen mit aufschiebendem Bewegungssinn auf.

Die unterschiedliche Lithologie bedingt die relativ große Vielfalt in der Geometrie und Ausbildung der Verschiebungsflächen.

In den gebänderten Amphiboliten und Gneisen haben die Bewegungen häufig parallel zur Foliation stattgefunden (Abb. E.2.5). Hierbei blieb der moderate Wechsel im Einfallen der Foliation (ca.  $45^\circ$  -  $65^\circ$ ) ohne Einfluß, was mit den Feststellungen von PATERSON (1978: pp44) übereinstimmt. Er bemerkt, daß nur bei einer erheblichen Abweichung (Winkel: Foliation/Scherfläche aufgrund Coulomb-Bedingung) Scherfläche und Foliation nicht zusammenfallen. Neben der Foliation wurden im

untersuchten Teufenbereich die Grenzflächen von Aplit- und Quarz-Feldspat-Gängen zum Nebengestein als bevorzugte Bewegungsflächen benutzt.

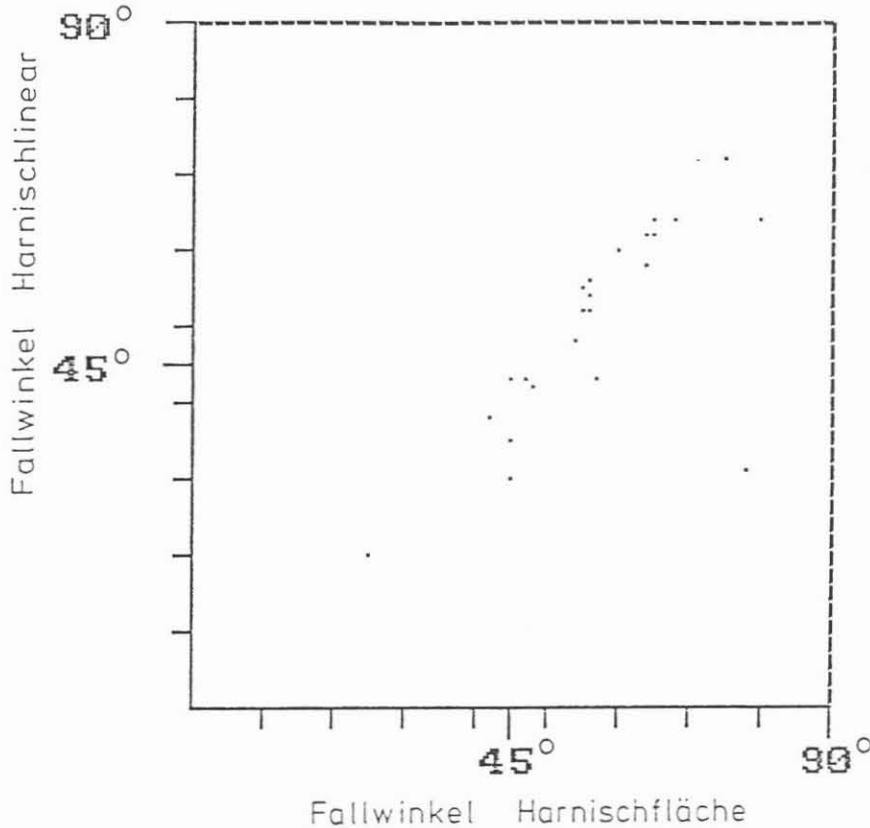


Abb. E.2.4: Darstellung der vorwiegend foliationsparallel verlaufenden Abschiebungen im Teufenbereich 850 - 950 m. Zur Erläuterung vgl. Abb. E.2.2.

Es ist nicht auszuschließen, daß die Verringerung der Kataklyse ab ca. 530 m abwärts mit der gut ausgeprägten und häufig engständigen Foliation in den hier vorhandenen Gneisen zusammenhängt. Die zahlreichen Schieferungsflächen können einen erheblichen Betrag der spröden Verformung aufgenommen haben, selbst wenn die Verschiebung an den jeweiligen Flächen nur gering war.

In den massigen Gesteinen (Amphibolite z.T., Quarzdiorit, feinkörnige Gneise) finden sich häufig konjugierte Scherflächen (Abb. E.2.6). Anstatt des penetrativen Bruches kann es auch zu gestaffelten, fiederspaltenähnlichen Rissen kommen (Abb. E.2.7), die bei 771 m nach RDA-Analyse mit Laumontit verfüllt sind. Ist ein Bruch entstanden, so dient dieser bei späteren Bewegungen häufig wieder als Bewegungsbahn, da er eine Zone relativer Entfestigung im Gestein darstellt. Auf diese Art und Weise können sich die breiten Kataklysezonen entwickelt haben, die vor allem in dem amphibolitreichen Teufenabschnitt von 0 - 530 m vorzufinden sind.



Abb. E.2.5: Foliationsparallele Verschiebungsflächen im gebänderten Amphibolit. Versetzt werden mit Calcit verfüllte Extensionsrisse. Kernstück 12B5, ca. 110 m.



Abb. E.2.6: Konjugierte Scherflächen im Quarzdiorit. Kernstück 83B6c, ca. 512 m.

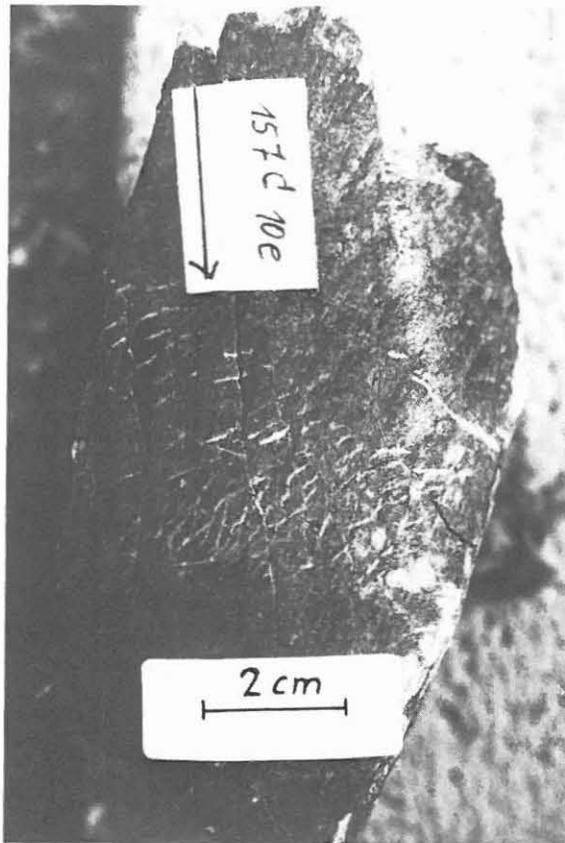


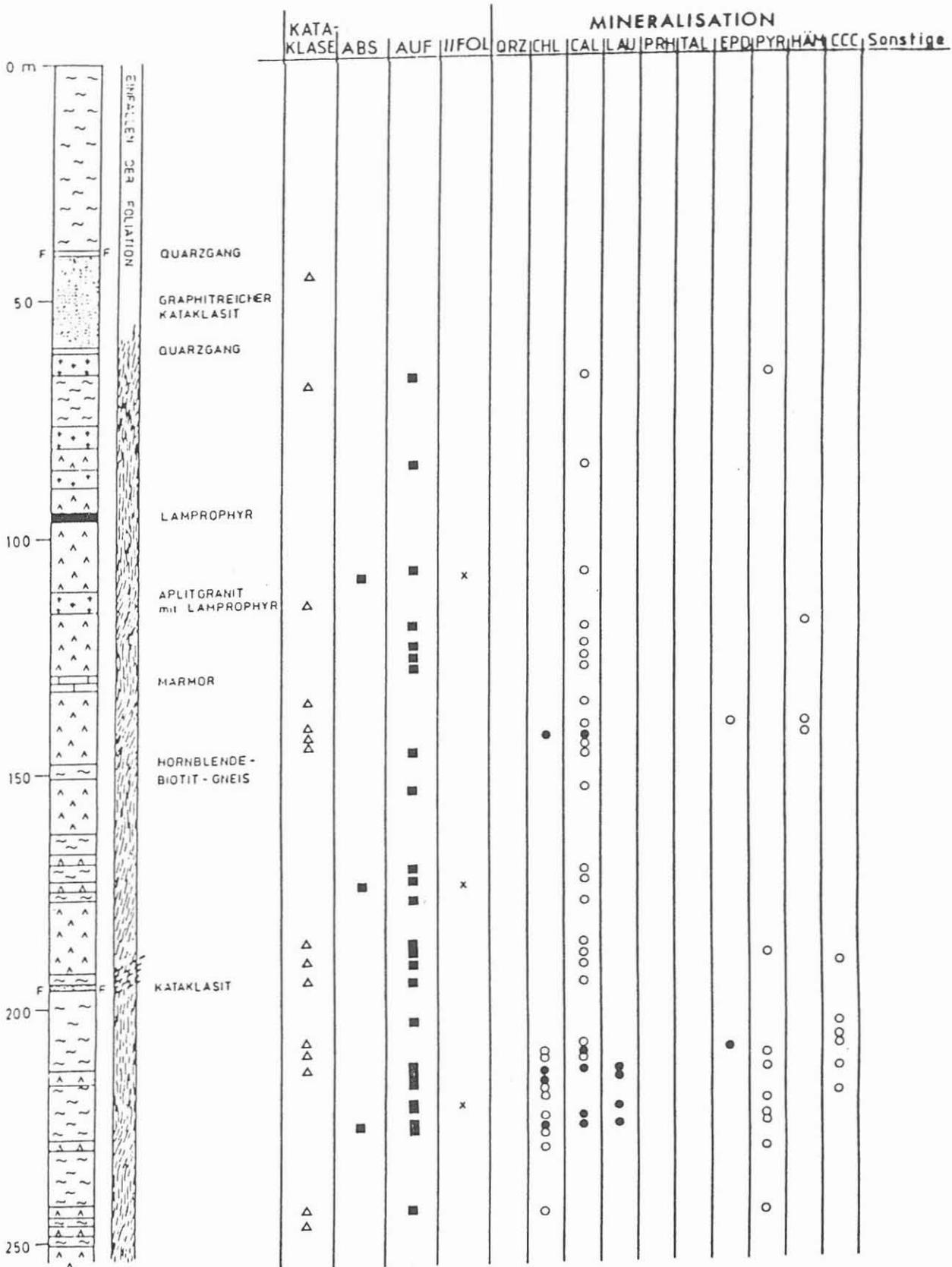
Abb. E.2.7: Mit Laumontit verfüllte, z.T. fiederspaltentartige Extensionsrisse im feinkörnigen Gneis. Kernstück 157C10e, ca. 771 m.

#### E.2.2. Mineralisation auf den Harnischflächen

Bei der Einmessung der Verschiebungsflächen wurden neben Kataklastenmaterial unterschiedliche Mineralisationen als Harnischbeläge festgestellt. Im Falle einer makroskopisch nicht eindeutigen Mineralansprache wurden Proben entnommen, die dann zur röntgendiffraktometrischen Untersuchung im KTB-Feldlabor (Bearbeiter: Herr Stroh) weitergeleitet wurden. Insgesamt wurden 45 Proben qualitativ analysiert.

Wie aus Tab. E.2.1a-d zu entnehmen ist, existieren eine ganze Reihe von neugebildeten Mineralen auf den Harnischflächen.

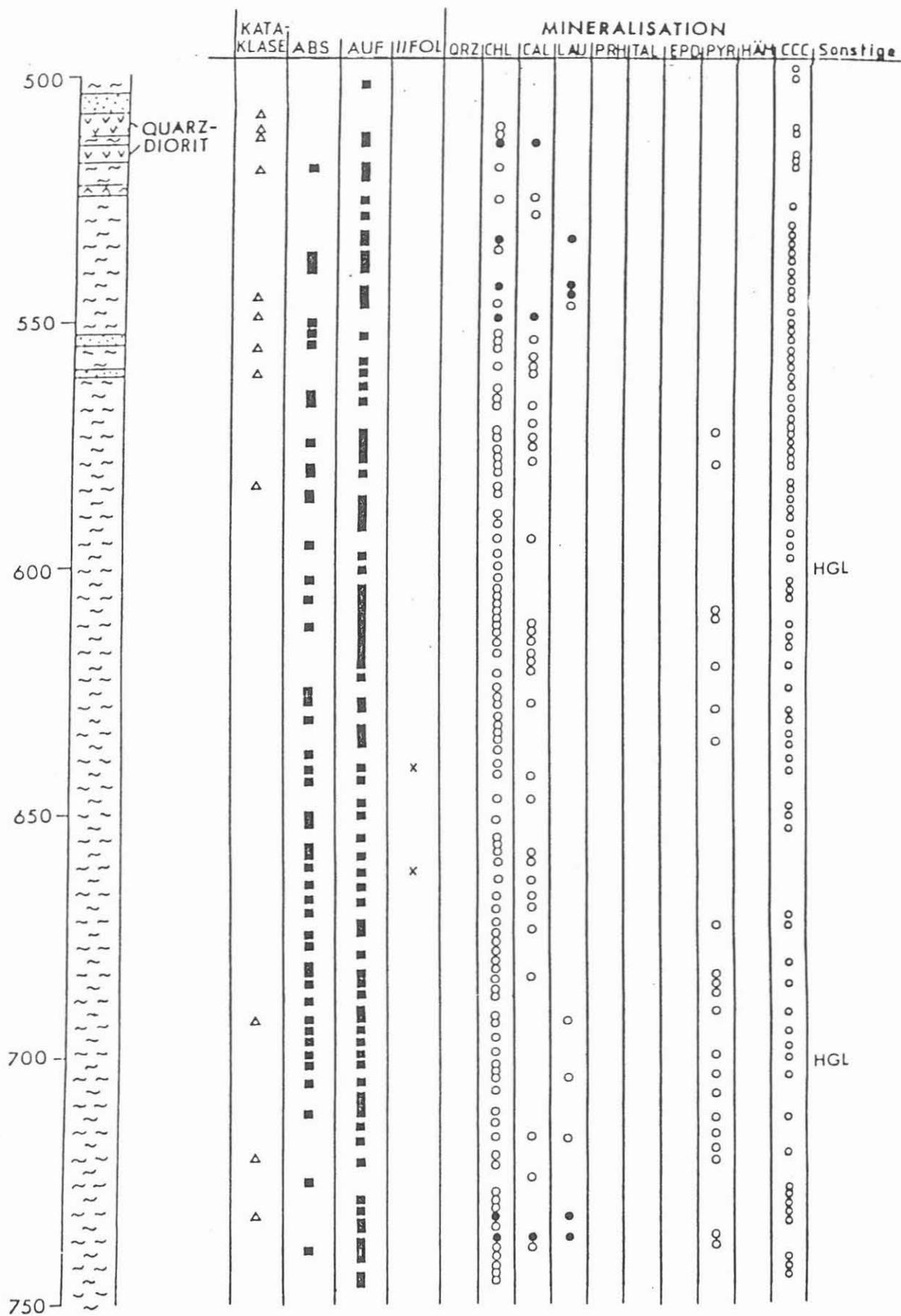
Am auffälligsten ist hierbei Graphit (Abb. E.2.8), der im untersuchten Teufenbereich fast kontinuierlich nachzuweisen ist. Ähnlich verhalten sich Chlorit und Calcit. Chlorit kommt sehr ausgeprägt auf den in den Gneisen von 850 - 950 m foliationsparallel verlaufenden Verschiebungsflächen vor. Calcit als Harnischbelag fällt in dem obersten, amphibolitrei-



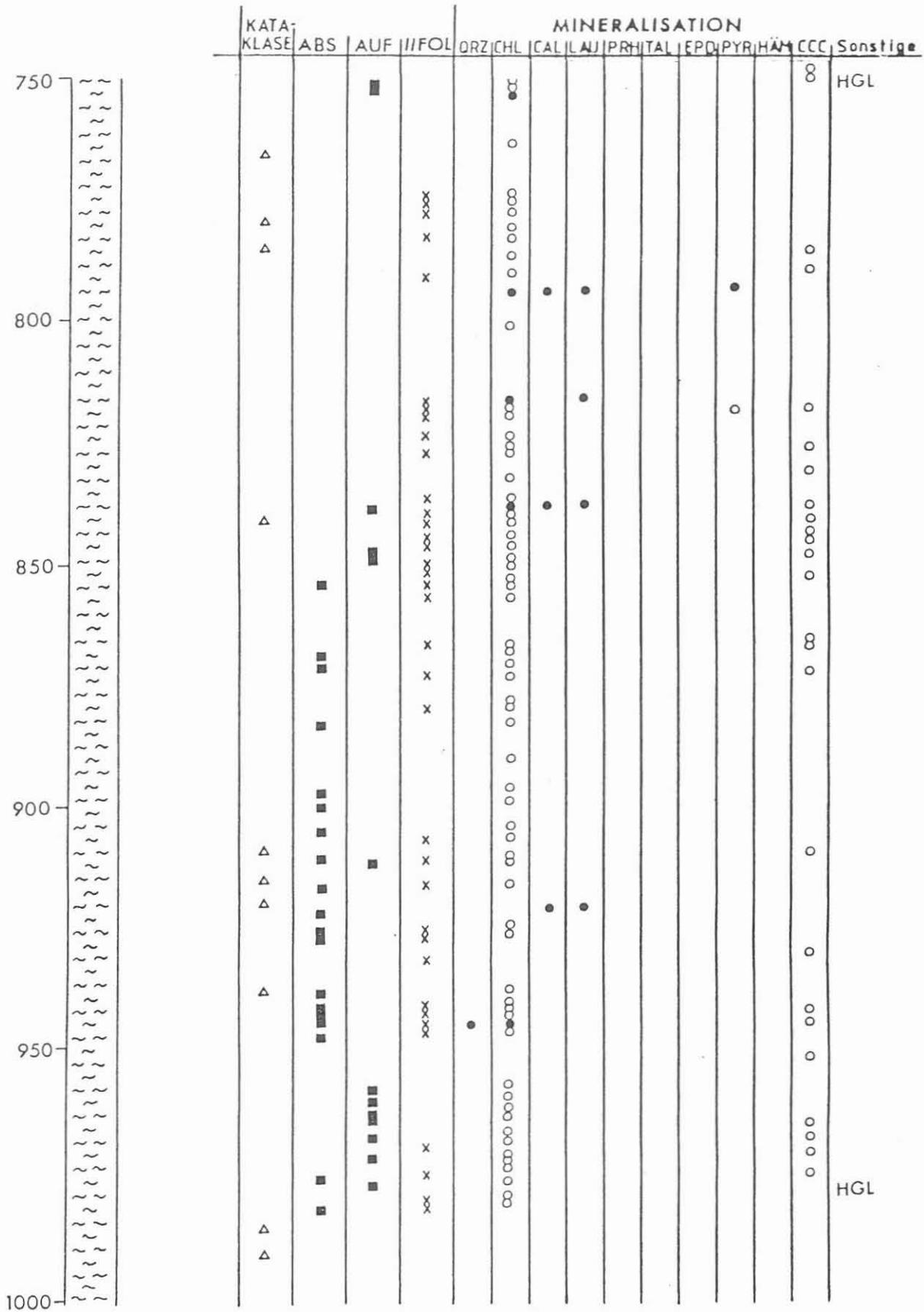
Tab. E.2.1.a

Tab. E.2.1.a-d: Teufenabhängiges Auftreten von Kataklaste, Abschiebungen (ABS), Aufschiebungen (AUF), foliationsparallelen Verschiebungsflächen (// FOL) und der Harnischmineralisation. Ausgefüllte Kreise = durch RDA nachgewiesene Minerale. Lithologisches Profil aus GRAUP et al. (1988). Abkürzungen der Minerale nach KTR-Report 88-1.





Tab. E.2.1.c



Tab. E.2.1.d



Abb. E.2.8: Graphitharnisch. Kernstück 27A2, ca. 200 m.

chen Abschnitt verstärkt durch das Auftreten von prägnanten Stufen auf. Diese Stufen eignen sich vorzüglich zur Bestimmung des Bewegungssinns (Abb. E.2.9).

Laumontit, der auf P-T-Bedingungen im very-low-Bereich hinweist, taucht zuerst bei ca. 240 m auf und läßt sich bis ca. 900 m röntgenographisch nachweisen. Zum Laumontit gesellt sich zwischen 300 und 400 m Prehinit.

Epidot läßt sich nur im obersten Teufenabschnitt, hier z.T. zusammen mit Hämatit auf Harnischoberflächen beobachten.

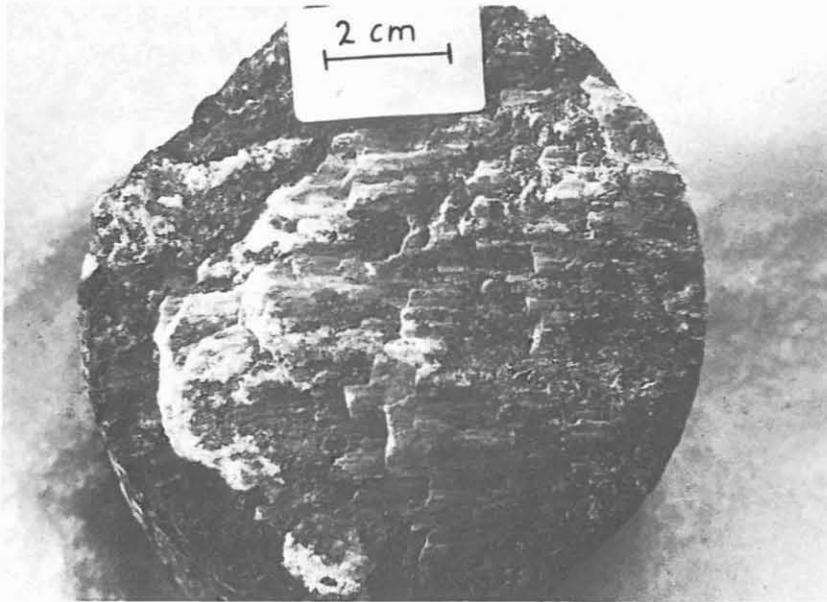


Abb. E.2.9: Calcitbelegte Harnischfläche. Die prägnanten Stufen lassen auf einen Bewegungssinn der Handgendscholle nach links schließen. Kernstück 27B1, ca. 200 m.

### E.2.3. Altersabfolgen verschiedener Bruchsysteme

Auf eine Mehrphasigkeit der bruchtektonischen Vorgänge im untersuchten Teufenbereich deuten neben mehreren Harnischstriemungen mit unterschiedlicher Richtung - vor allem auf den graphitbelegten Verschiebungsflächen - folgende Beobachtungen hin. Es finden sich häufig ältere, mit einem weißen Mineral verfüllte Extensionsrisse, die durch jüngere, diskrete, mit einer grünen Mineralisation (Chlorit ?) belegten Scherbahnen versetzt werden. Bei ca. 420 m wird eine Aufschiebung durch eine Abschiebung versetzt. Auch ältere Katakklasezonen werden durch jüngere Störungen versetzt. Aus Abb. E.2.10 kann man z.B. entnehmen, daß eine relativ flach liegende Katakklasezone mit aufschiebendem Charakter durch eine relativ steile Aufschiebung entlang einer diskreten Bahn versetzt wird. Weiterhin fällt auf, daß die älteren Katakklase oft graphitreicher sind als die jüngeren (Abb. E.2.11).

Ein wichtiger, die Katakklase begleitender Deformationsmechanismus ist Drucklösung. Drucklösungssutturen treten bevorzugt entlang von Bewegungsbahnen (Abb. E.2.12) und im intakten Marmor bei ca. 130 m auf.

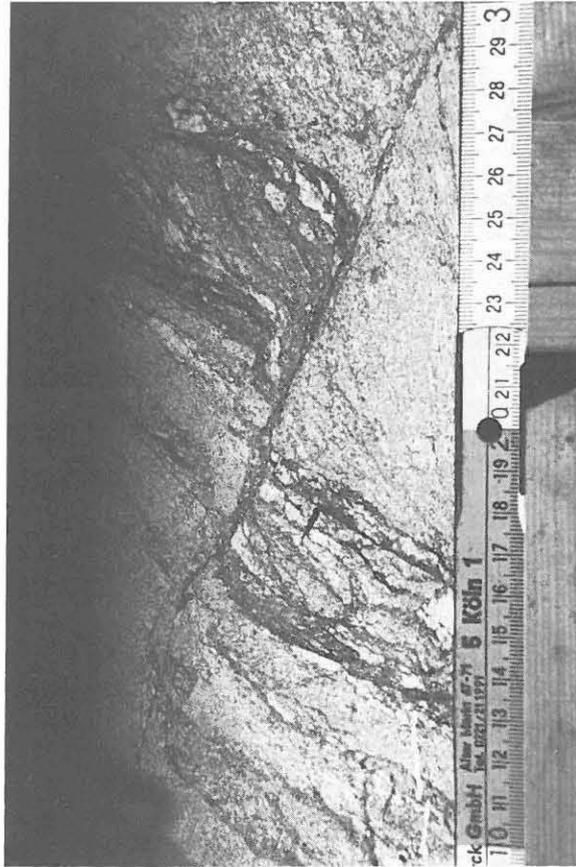


Abb. E.2.10: Eine relativ flache Kataklysezone mit aufschiebendem Charakter wird an einer diskreten Scherbahn in entgegengesetzter Richtung - ebenfalls aufschiebend - versetzt. Kernstück 248B2s, ca. 289 m.

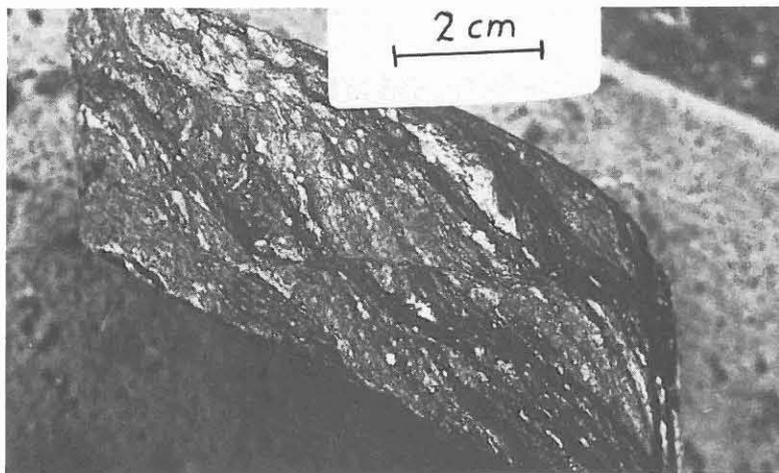


Abb. E.2.11: Ein graphitreicher Kataklyasit wird entlang einer flachliegenden Verschiebungszone versetzt. Kernstück 98B3c, ca. 549 m.

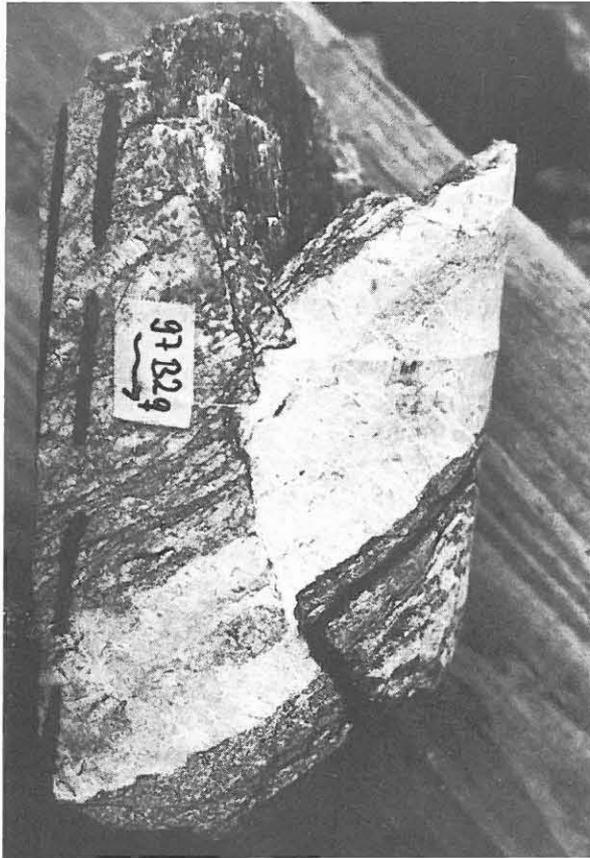


Abb. E.2.12: Drucklösungsstrukturen entlang einer Aufschiebung. Die in den versetzten Quarz-Feldspat-Gang hineinreichenden stylolithenartigen Zapfen verlaufen parallel zur Hauptnormalspannung. Man beachte die Stufen auf dem im oberen Bildteil sichtbaren Harnisch, die hier als kongruente Stufen ausgebildet sind und den aufschiebenden Charakter der Verschiebung bestätigen. Kernstück 97B2q, ca. 545 m. Länge des Etiketts = 2 cm.

### E.3. Schlußfolgerung

Die Auswertungen der gemessenen Verschiebungsflächen lassen trotz fehlender Rückorientierung erste Trends hinsichtlich der Bewegungsmuster (Aufschiebungen, Abschiebungen etc.) erkennen. Es kann als sicher gelten, daß die Gesteine der Bohrung von mehreren bruchtektonischen Deformationen erfaßt worden sind. Hinweise hierfür liefern versetzte Kataklyse-

zonen und mehrere Harnischstriemungen auf den selben Flächen. Für detailliertere Aussagen, insbesondere über die genauen Altersabfolgen der einzelnen Bewegungsakte, müssen Dünnschliffauswertungen herangezogen werden.

Offensichtlich spielt die Lithologie eine gewisse Rolle für die Ausbildung der Bewegungsflächen. Dies läßt sich daran erkennen, daß in der bunten Wechselfolge von Gneisen und Amphiboliten bis ca. 530 m Aufschiebungen bei weitem überwiegen und mit dem Einsetzen der monotonen Paragneisserie ein Wechsel von Aufschiebungen zu Abschiebungen erfolgt.

Für die Rekonstruktion der Paläospannungsfelder ist die Rückorientierung der Bohrkerne unabdingbar. Liegen die Werte über die Rückorientierung (Azimutabweichung der am Bohrkern angebrachten Orientierungslinie, Bohrlochabweichung von der Vertikalen) vor, ist eine rechnerunterstützte Korrektur der von uns gemessenen Werte möglich (vgl. ADAM 1988), so daß anschließend eine - ebenfalls computergestützte - Paläospannungsanalyse erfolgen kann (vgl. ONCKEN 1988).

Weiterhin ist eine strukturgeologische Aufnahme des Umfeldes der Bohrung notwendig, um zusätzliche Raumdaten der Störungssysteme zu gewinnen, so daß diese mit den hier beschriebenen Beobachtungen und Auswertungen verglichen werden können.

Es ist vorgesehen, die Bohrkernaufnahme und -auswertung hinsichtlich der Verschiebungsflächen in der hier dargestellten Art und Weise für die folgenden Teufenabschnitte fortzusetzen.

#### Danksagung

Wir danken den Feldlabor-Mitarbeitern für die röntgendiffraktometrische Untersuchung der Harnischmineralisationen und die freundliche Überlassung von Messdaten des Teufenbereiches 556 bis 729 m.

#### E.4. Literaturverzeichnis

- ADAM, J.-F. (1988): Ein Rechnerprogramm zur Analyse von axialen Richtungsdaten. - 2. Symposium Tektonik-Struktur-geologie-Kristallingeologie im deutschsprachigen Raum. Kurzfassungen der Vorträge und Poster, 24.-26.3.1988; Erlangen.
- ENGELDER, J.T. (1974): Microscopic wear grooves on slickensides: indicators of paleoseismicity. - J. geophys. Res., 79: 4387-4392; Richmond.
- FLEUTY, M.J. (1975): Slickensides and slickenlines. - Geol. Mag., 112: 319-322;
- GAY, N.C. (1970): The formation of step structures on slickensided surfaces. - J. Geol., 78:523-532; Chicago.
- GRAUP, G., HACKER, W., KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C. & UHLIG, S. (1988): KTB Oberpfalz VB - Erste Ergebnisse der geologischen Aufnahme bis 480 m. - KTB Report, 88-1: B1-B104; Hannover.
- HACKER, W., KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C., UHLIG, S. & GRAUP, G. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m. - KTB Report 88-2: B1-B60, 29 Abb.; Hannover.
- KRAUSE, H.-F., PILGER, A., REIMER, V. & SCHÖNFELD, M. (1978): Bruchhafte Verformung. Erscheinungsbild und Deutung mit Übungsaufgaben. - Clausthaler Tektonische Hefte, 16; Clausthal-Zellerfeld.
- MEANS, W.D. (1987): A newly recognized type of slickenside striation. - J. Struct. Geol., 9: 585-590; Oxford.
- NORRIS, D.K. & BARRON, K. (1968): Structural analysis of features on natural and artificial faults, Proceedings of Conference on Research in Tectonics. - Geol. Surv. Can. Paper, 68-52: 136-167; Ottawa.
- ONCKEN, O. (1988): Aspects of the reconstruction of the palaeo-stress-history of a fold- and thrustbelt. - Tectonophysics (im Druck).
- PATERSON, M.S. (1958): Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. - Geol. Soc. Amer. Bull., 69: 465-476; Boulder.
- PATERSON, M.S. (1978): Experimental rock deformation. - The brittle field. - 254 S.; Heidelberg (Springer).
- PETIT, J.P. (1987): Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. - J. Struct. Geol., 9: 597-608; Oxford.
- TJIA, H.D. (1964): Slickensides and fault movements. - Geol. Soc. Amer. Bull., 75: 683-686; Boulder.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1987): The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. - 700 S.; London (Academic Press).
- WINKLER, H.G.F. (1979): Petrogenesis of Metamorphic Rocks. - VII + 348 S.; Berlin - Heidelberg - New York (Springer).

