

KTB REPORT 90-2

Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB

Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung
im KTB-Feldlabor

Bericht 8

Teufenbereich von 3500-4000,1 m (E.T.)



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

R. Emmermann, H.-G. Dietrich, J. Lauterjung, Th. Wöhr

Redaktion: Prof. Dr. R. Emmermann, Dr. H.-G. Dietrich,
Dr. J. Lauterjung und Dipl.-Geophys. Th. Wöhrl

Druck: Wittmann & Wäsch, 3007 Gehrden

Titelbild: Kernstück 836 E 1 k nach einem indirekten Zugversuch (Brasilian-Test) mit der felsmechanischen Universalprüfmaschine im KTB-Feldlabor.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Forschungskennzeichen: RG 8604-0) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung
- Hannover 1990 -

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 01 53, D-3000 Hannover 51. Telefon: (05 11) 643-2675.

VORWORT

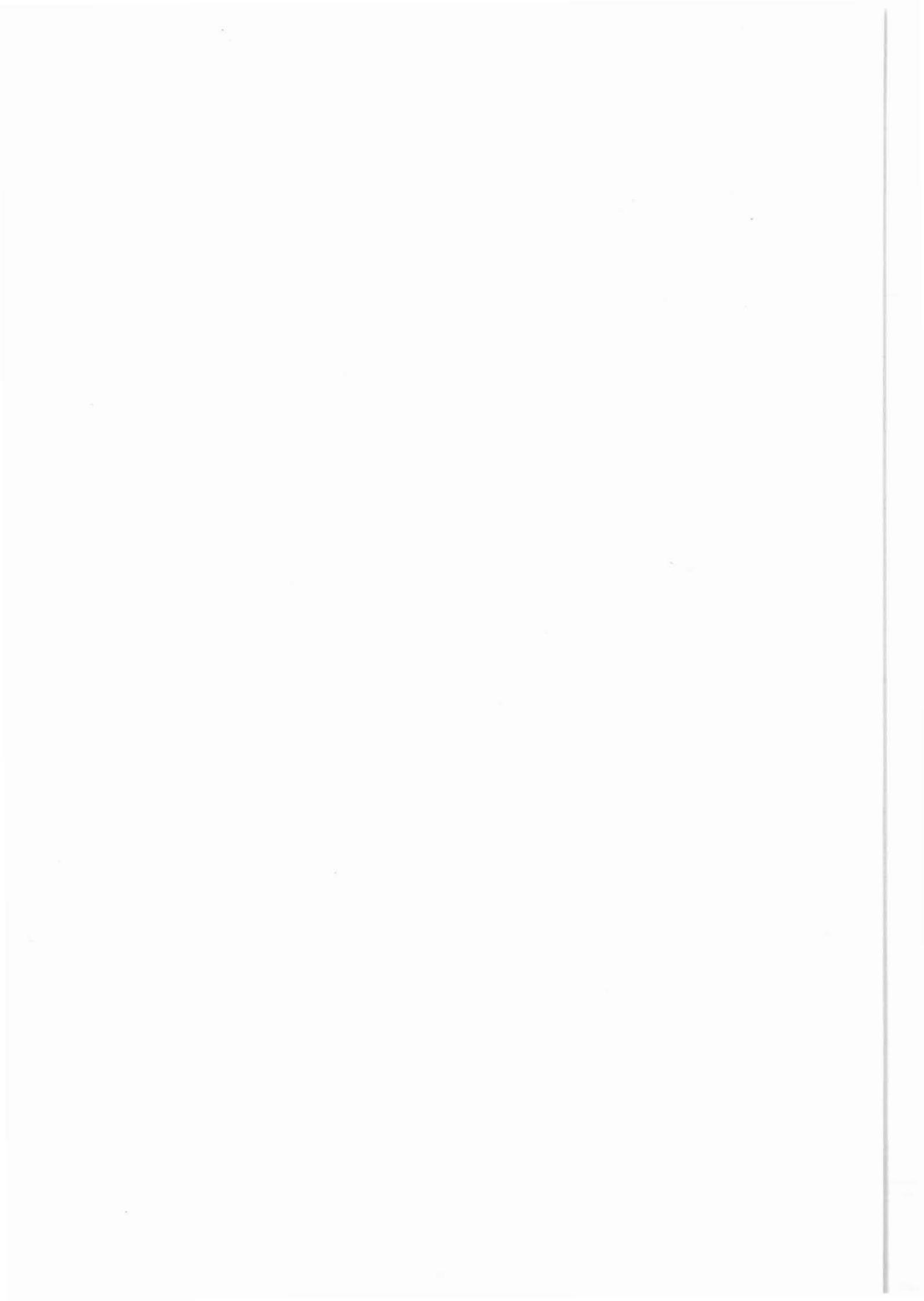
Das Feldlabor ist konzipiert als eine Gemeinschaftseinrichtung aller am KTB beteiligten Wissenschaftler und Wissenschaftlergruppen. Es soll sicherstellen, daß kontinuierliche Untersuchungen an Kernmaterial, Spülproben, Bohrspülung und Gesteinsfluiden durchgeführt und dabei alle Größen und Eigenschaften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

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in regelmäßigen Abständen in den KTB-Reports dargestellt. Bisher sind folgende sieben Berichte mit Ergebnissen aus dem Feldlabor veröffentlicht:

KTB-Report 88-1	Teufenbereich	0	-	480	m	VB 1
KTB-Report 88-2	Teufenbereich	480	-	992	m	VB 1
KTB-Report 88-6	Teufenbereich	992	-	1530	m	VB 1
KTB-Report 88-9	Teufenbereich	1530	-	1998	m	VB 1
KTB-Report 89-2	Teufenbereich	1709	-	2500	m	VB 1a
KTB-Report 89-4	Teufenbereich	2500	-	3009.7	m	VB 1a
KTB-Report 89-5	Teufenbereich	3009.7	-	3500	m	VB 1a

Das Feldlabor untersteht organisatorisch dem Direktorat "Geowissenschaften" der KTB-Projektleitung. Mit der Leitung vor Ort ist Dr. H.-G. Dietrich beauftragt; sein Stellvertreter ist Dipl.-Geophys. T. Wöhrle. Das wissenschaftliche und technische Personal wird im Rahmen des DFG-Projektes "Personelle Ausstattung KTB-Feldlabor" finanziert und ist über Privat-Arbeitsverträge bei Prof. Dr. R. Emmermann an der Universität Gießen angestellt. Antragsteller dieses DFG-Projektes sind Prof. Dr. R. Emmermann, Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung der Universität Gießen; Prof. Dr. H. Berckhemer, Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt, Prof. Dr. G. Friedrich, Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen; Prof. Dr. K. von Gehlen, Institut für Geochemie, Petrologie und Lagerstättenkunde der Universität Frankfurt; Prof. Dr. Ing. O. Natau, Institut für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe; Prof. Dr. H. Soffel, Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München; Prof. Dr. B. Stöckhert, Institut für Geologie der Ruhr-Universität Bochum; Prof. Dr. K. Weber, Institut für Geologie und Dynamik der Lithosphäre der Universität Göttingen und Prof. Dr. K. H. Wedepohl, Geochemisches Institut der Universität Göttingen.



Tiefbohrung KTB OBERPFALZ VB
Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung
im KTB-Feldlabor
Bericht 8

Teufenbereich von 3500 - 4000.1 m

INHALTSVERZEICHNIS

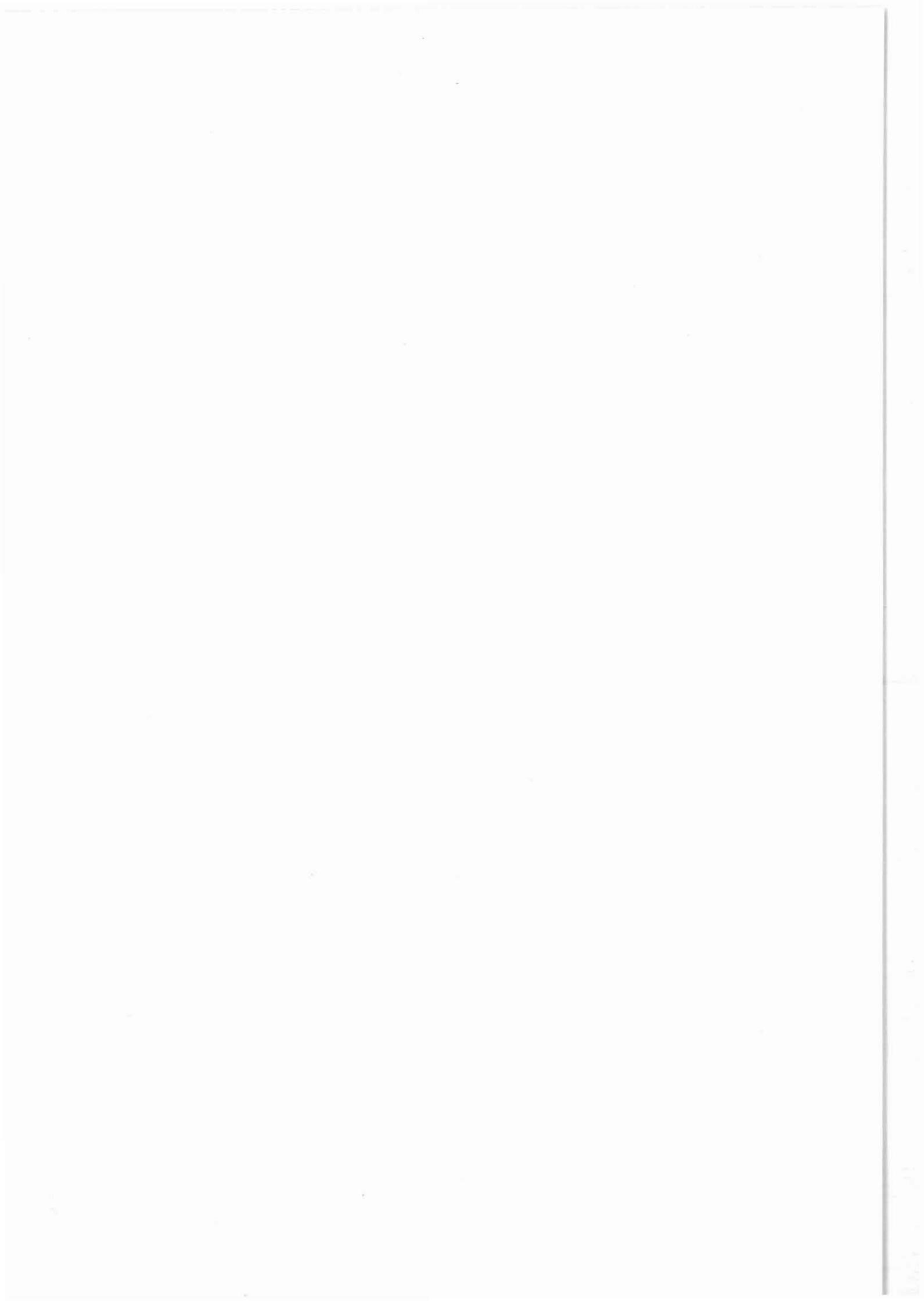
	VORWORT	
A.	Einleitung	A 1
A.1	Allgemeines	A 1
A.2	Bohrtechnik	A 6
A.3	Probenahme	A 6
A.4	Sonstiges	A 10
A.5	Literaturverzeichnis	A 10
B.	Geologie	
	Zusammenfassung/Abstract	B 3
B.1	Übersicht	B 6
B.2	Sillimanit-Biotit-Gneise (3500 - 3572 m)	B 6
B.2.1	Petrographie	B 6
B.2.2	Gefüge	B 8
B.2.3	Chemische Zusammensetzung	B 10
B.3	Allanit-führende Biotit-Plagioklas-Gneise (3572 - 3573.5 m)	B 14
B.4	Metabasit-Abfolge (3573.5 - 4000 m)	B 16
B.4.1	Amphibolite und Metagabbros	B 16
B.4.1.1	Petrographie und Metamorphose der Metabasite	B 16
B.4.1.2	Beschreibung besonderer Einzelheiten der Metabasite	B 28
B.4.1.3	Geothermobarometrie des Hochdruck- Granulitfazies-Stadiums	B 32
B.4.1.4	Deformationsgefüge der Metabasite	B 33
B.4.1.5	Chemische Zusammensetzung	B 35
B.4.2	Quarz-Feldspat-Mobilisate in den Meta- basiten	B 45

B.4.3	Meta-Ultramafitite	B 47
B.4.4	Granat- und Hornblende-führende, Plagioklas-reiche Gneise	B 54
B.4.5	Augengneise	B 54
B.4.6	Meta-Aplite	B 60
B.4.7	Pegmatoide	B 64
B.4.8	Quarz-Gänge	B 64
B.5	Erzmineralisation	B 67
B.5.1	Sulfidische Erzminerale	B 71
B.5.2	Oxidische Erzminerale	B 80
B.6	Kataklase	B 91
B.7	Großstruktur	B 96
B.8	Bohrung VB1b	B 97
B.9	Danksagung	B 101
B.10	Literaturverzeichnis	B 102
B.11	Anhang	B 105
C.	Geochemie	
	Zusammenfassung	C 2
	Abstract	C 3
C.1	Einleitung	C 4
C.2	Probenahme und Probenaufbereitung	C 5
C.3	RFA/RDA-Analytik	C 5
C.3.1	Allgemeines	C 5
C.3.2	Ergebnisse an Bohrmehlproben	C 6
C.3.3	Bestimmung der Gesteinsdichte mit RDA	C 18
C.4	Spülunganalytik	C 21
C.4.1	Allgemeines	C 21
C.4.2	Ergebnisse und Diskussion	C 21
C.4.3	Fluid Sampler	C 22
C.5	Gasanalytik	C 26
C.5.1	Allgemeines	C 26
C.5.2	Ergebnisse	C 26
C.5.2.1	Kontinuierliche Gasanalytik	C 26
C.5.2.2	Esterzusatz - Methanquelle !	C 35
C.5.2.3	Bohrlochzirkulationen	C 36
C.5.3	Fluid Sampler	C 39

C.6	Vergleich der Ergebnisse von VB1a und VB1b	C 41
C.7	Schriftenverzeichnis	C 45
C.8	Danksagung	C 46
C.9	Anhang Tiefenlogs aller Ergebnisse (1 : 1000) Zusammenstellung sämtlicher Spülungsein- leitungen	C 47
D.	Geophysik	
D.1	Dichte	D 2
D.2	Ultraschallseismik	D 5
D.3	Natürliche Radioaktivität	D 14
D.4	Wärmeleitfähigkeit	D 23
D.5	Natürliche Remanente Magnetisierung (NRM)	D 28
D.6	Magnetische Suszeptibilität	D 34
D.7	Elektrische Leitfähigkeit	D 38
D.8	Entspannungsdeformation und akustische Emission	D 44
D.9	Permeabilität	D 57
D.10	Porosität	D 60
D.11	Literatur	D 62
D.12	Danksagung	D 64
E.	Gefüge und Deformation	
E.1	Fragestellung	E 2
E.2	Methodik	E 2
E.3	Ergebnisse und Interpretation	E 5
E.4	Schriftenverzeichnis	E 12
E.5	Anhang: Datenliste der aufgenommenen Scher- kriterien von 480 m - 2004 m	E 13

F.	Ergänzende Untersuchungen	
F.1	Einleitung	F 2
F.2	Ergebnisse der Untersuchungen	F 3
F.2.1	Kinematik, Raumlage und Ausbildung der spröden Verschiebungszonen	F 3
F.2.1.1	Aufschiebungen	F 3
F.2.1.2	Abschiebungen	F 8
F.2.2	Mineralisation auf den Verschiebungsflächen	F 9
F.2.3	Extensionsrisse	F 18
F.2.4	Altersabfolge der bruchhaften Gefüge	F 21
F.3	Schlußfolgerung	F 23
F.4	Schriftenverzeichnis	F 25
F.5	Danksagung	F 26
G.	Kernorientierung in der KTB-VB - aktueller Stand	
H.	Sedimentrohr-Proben in der KTB-Vorbohrung VB1b	
I.	Kontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung	
I.1	Einleitung	I 2
I.2	Ergebnisse	I 3
I.3	Bewertung	I 5
I.4	Schriftenverzeichnis	I 10
I.5	Danksagung	I 10

A. Einleitung



A. Einleitung

A.1 Allgemeines

In diesem achten Report werden die Ergebnisse der Untersuchungen im KTB-Feldlabor für den Teufenbereich von 3500.0 m bis zur Endteufe bei 4000.1 m der Vorbohrung KTB OBERPFALZ VB dargestellt, der vom 10. November 1988 bis zum 4. April 1989 erbohrt worden ist (Abb. A.1.1 und A.1.2).

Die zum achten Bericht des Feldlabors gehörende Zusammenstellung geologisch relevanter Daten findet sich in den Blättern 17, 18 und 19 am Ende des Reports.

Ergänzt werden die Darstellungen und Resultate des Feldlabors durch folgende zusätzliche Berichte:

- Kontinuierliche makroskopische Aufnahme der duktilen Verformung und kinematischer Markierungen an KTB Kernen von A. Zadow, H. Heinisch, J. H. Behrmann, S. Lich und A. Volp (vgl. Kap. E)
- Bruchtektonik im Teufenbereich von 2500 bis 3893 m von G. Zulauf (vgl. Kap. F)
- Kernorientierung in der KTB-VB - aktueller Stand - von J. Kohl, D. Schmitz und C. Röhr (vgl. Kap. G)
- Sedimentrohrproben in der KTB-Vorbohrung VB1b von J. Sigmund und H.-G. Dietrich (vgl. Kap. H)
- Kontaminationsfreie Bohrspülungsentsorgung von H.-J. Heinschild (vgl. Kap. I)

Am Ende des Reports findet sich eine Übersichtsdarstellung des gesamten geologischen Profils von 0 - 4000.1 m mit den wesentlichen Angaben zur Foliation, den durch Bohrkernmaterial belegten Teufenabschnitten und einem Vertikalschnitt der Bohrung mit den verschiedenen Bohrlochabschnitten VB 1, VB 1a und VB 1b.

Die im Rahmen von Flüssigkeitseinschlußuntersuchungen aus dem Teufenbereich zwischen 3500 m und 4000.1 m genommenen Proben wurden von K. D. Homann bereits im fünften Bericht des Feldlabors vorgestellt (KTB-Report 89-2, Abschnitt G.)

Die Arbeitsfähigkeit des KTB-Feldlabors wurde zwischenzeitlich durch den fortgeschrittenen Aufbau des geplanten Rechenzentrums auf der KTB-Bohrlokation (vgl. KTB-Report 89-2, Abschnitt I.) wesentlich verbessert. Die Abbildungen A.1.3 (oben und unten) sollen einen Überblick über einen Teil der Hardware-Konfiguration und spezielle Peripherie-Geräte geben. Ein Großteil der Prozeßrechner (z. B. A.1.4) ist bereits über Ethernet-Netzwerk mit dem Zentralrechner verbunden, so daß sie mit entsprechender Ausrüstung an der Netzwerkkommunikation teilnehmen können.

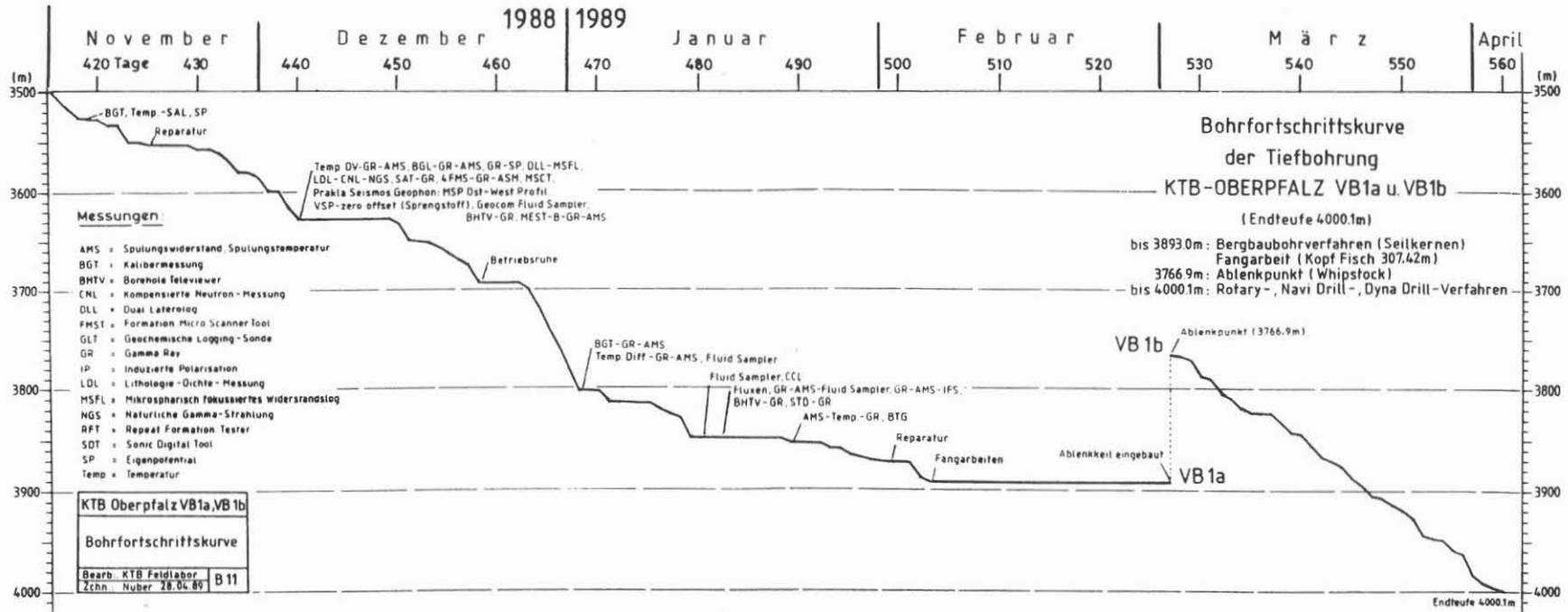


Abb. A.1.1: Bohrfortschrittskurve der Bohrung KTB OBERPFALZ VB von 3500.0 m bis 4000.1 m (vierter Abschnitt der Ablenkbohrung VB 1a und gesamter Abschnitt der Ablenkbohrung VB 1b)

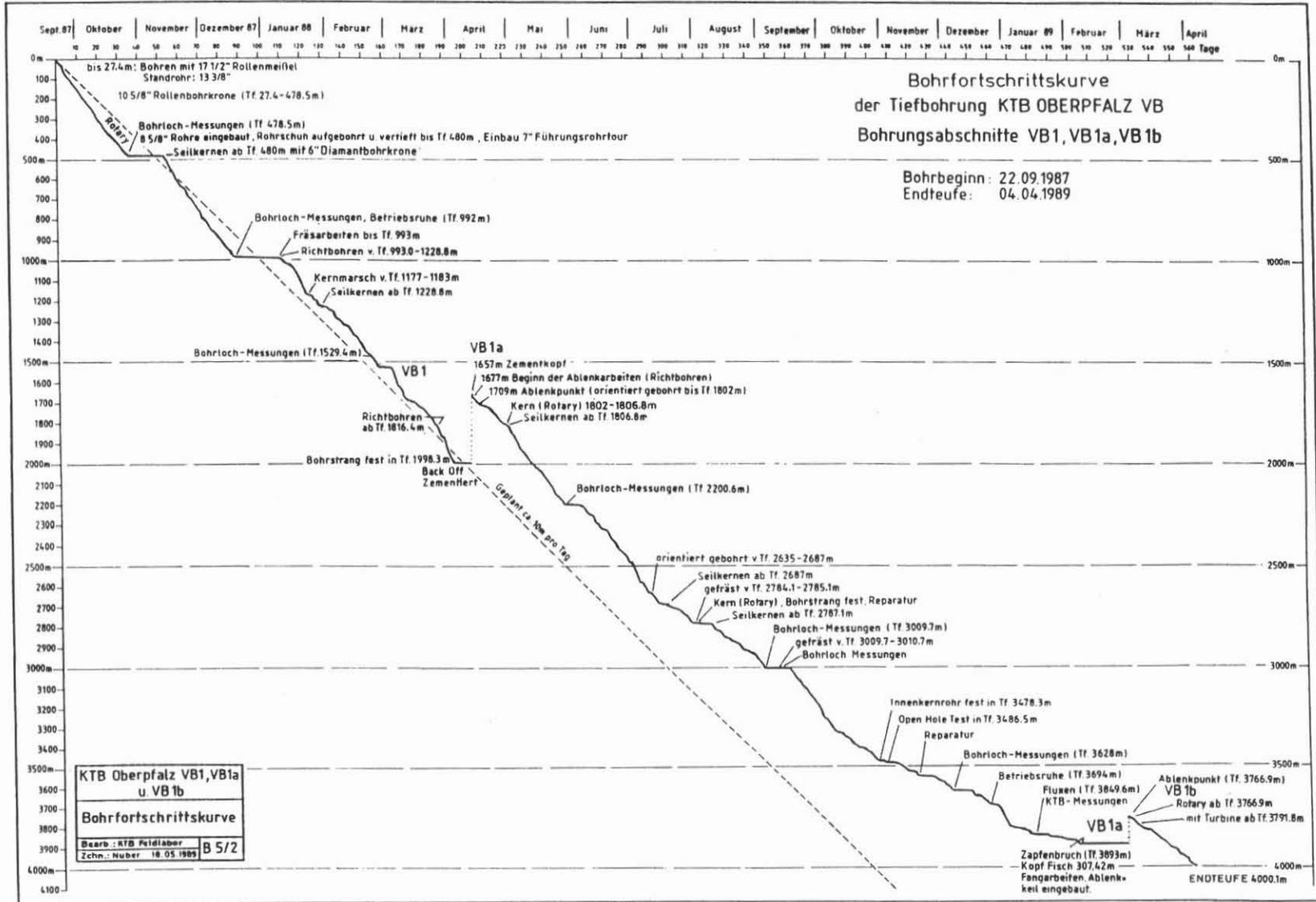


Abb. A.1.2: Bohrfortschrittskurve der Vorbohrung KTB OBERPFALZ VB von 0 - 4000.1 m (Endteufe)

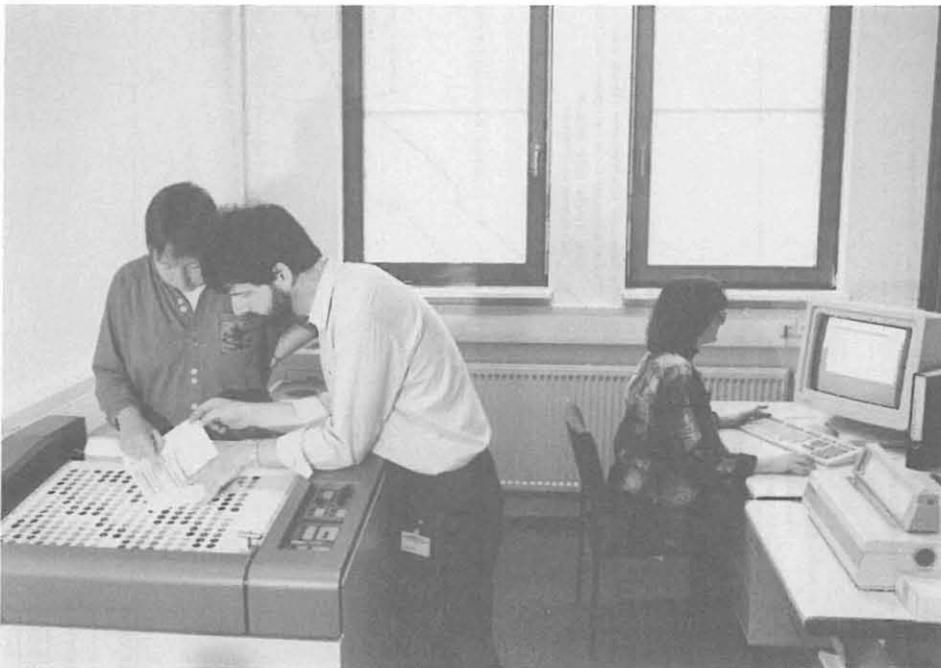


Abb. A.1.3: Überblick über einen Teil des Rechenzentrums (z. B. VAX 6210) und der speziellen Peripherie-Geräte (z. B. Versatec Farbplotter)

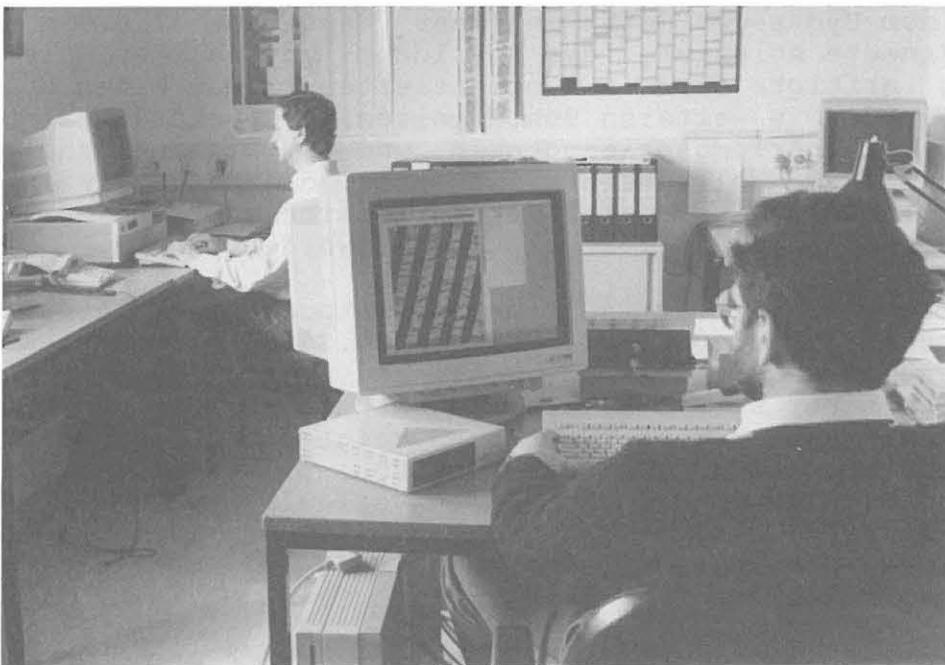
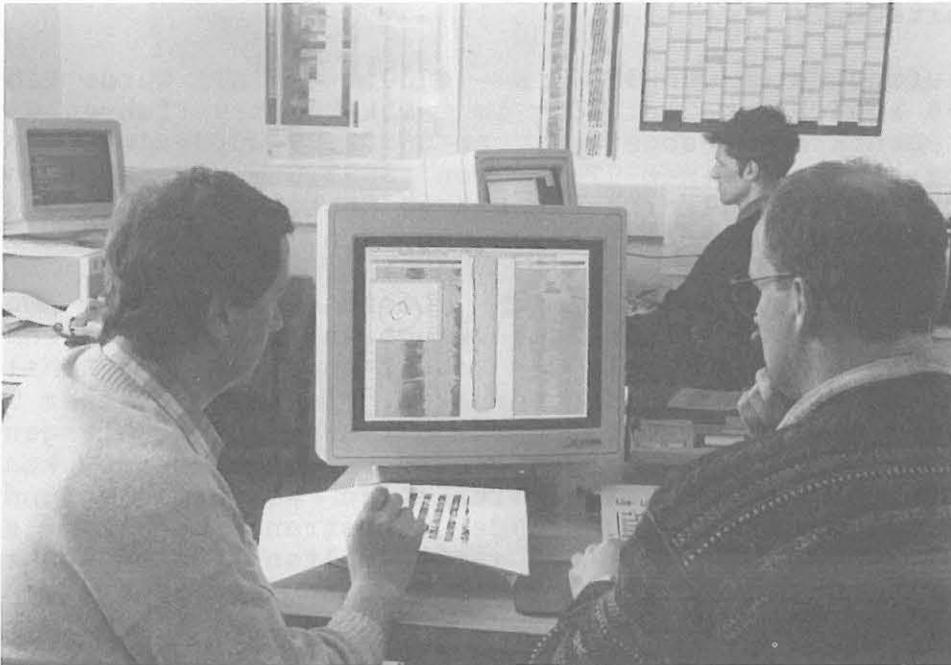


Abb. A.1.4: Auswertung von bohrlochgeophysikalischen Messungen an einem Prozeßrechner durch verschiedene Arbeitsgruppen der KTB-Projektleitung und des KTB-Schwerpunktprogrammes (oben: Breakout-Orientierungen mit Hilfe des akustischen Borehole-Televiwers; unten: Bohrkernnachorientierung mit Hilfe von FMST-Messungen)

A.2 Bohrtechnik

Der Teufenbereich von 3500 m - 4000.1 m (ET) wurde ab dem 10.11.88 zunächst vollständig im Seilkernbohrverfahren mit 6" Diamant-Bohrkronen abgeteuft. Am 06.02.89 wurde während der Kernarbeiten in einer Teufe von 3893.0 m ein sogenannter Durchspüler im Seilkernbohrgestänge festgestellt und deshalb mit dem Ausbau des Bohrstranges begonnen.

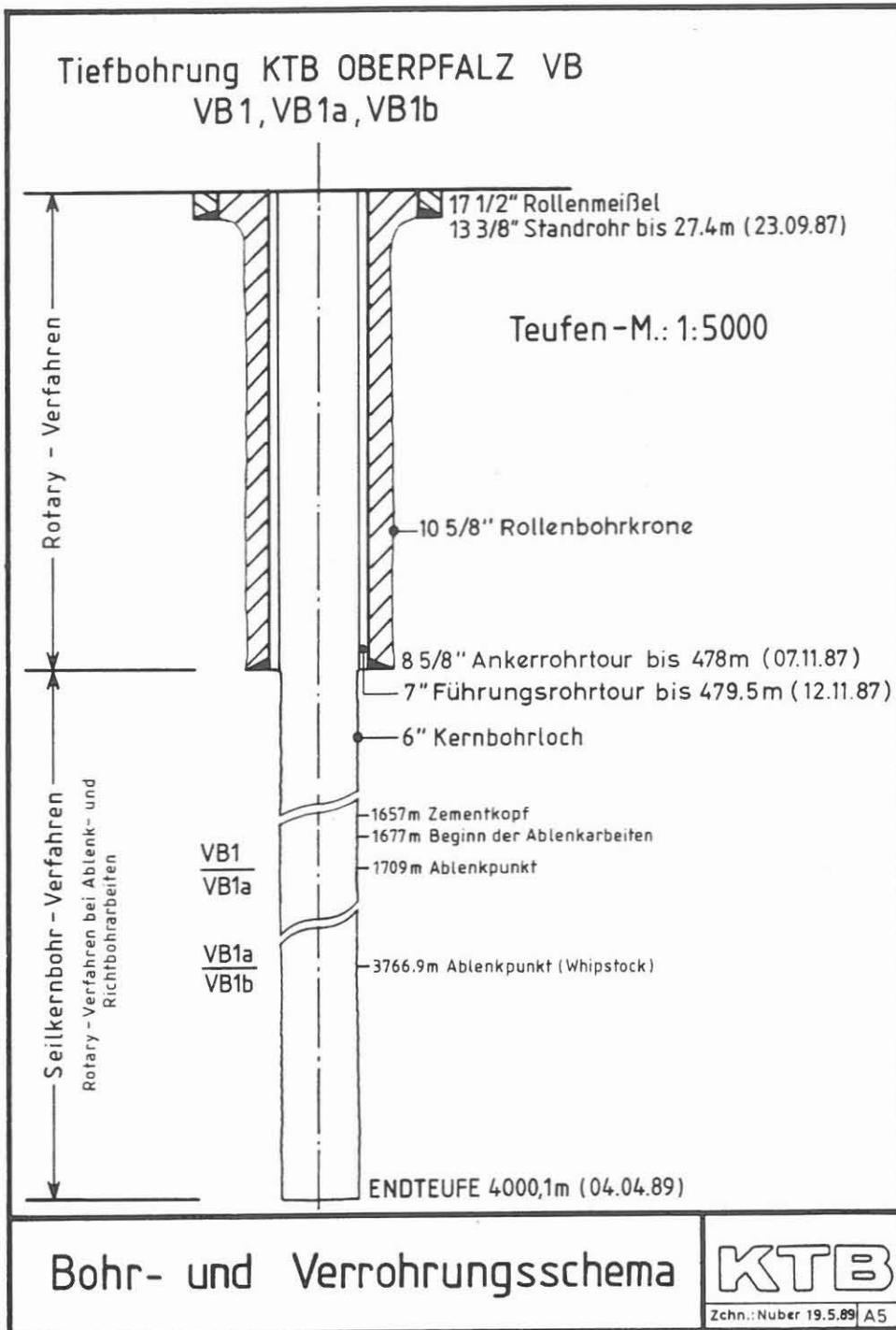
Nachdem bereits über 300 m des Gestänges ausgebaut worden waren, kam es zu einem Zapfenbruch an einer Seilkernbohrstange. Nach dem Aufprall des Bohrstranges auf der Bohrlochsohle wurde der Kopf des sogenannten "Fisches" in einer Teufe von 307.42 m festgestellt. Obwohl der Restzapfen gefangen und der Seilkernbohrstrang wieder gesund verbunden werden konnte, war es nicht möglich, eine Zirkulation herzustellen und den Strang freizuziehen. Nachdem der Bohrstrang bei einer sogenannten "Back off-Operation" zur gezielten Lösung einer Gestängeverbindung im Bereich eines Durchspülers abgerissen war (Kopf Fisch bei 2680.26 m), wurde entschieden, den im Bohrloch verbliebenen Bohrstrang so tief wie möglich abzutrennen und zutage zu fördern und anschließend die Bohrung zum zweiten mal abzulenken. Nach Schneiden des Seilkernbohrstranges mit einem Hydra-Jet Gerät in einer Teufe von 3794.6 m wurde eine erneute Ablenkung des Bohrlochs vorgenommen. Die Ablenkung erfolgte durch den orientierten Einbau eines Ablenkkeiles. Für die weiteren Bohrarbeiten wurde ein 3 1/2" Bohrstrang mit Bohrlochsohlenmotoren und 6" Diamant- und Warzenmeißel zum Vollbohren eingesetzt, da der Seilkernbohrstrang in Folge festgestellter Korrosionsschäden der Seilkernbohrstangen nicht mehr eingesetzt werden konnte.

Die neue Bohrung trägt seit dem Ablenkpunkt bei 3766.9 m bis zur Endteufe bei 4000.1 m, die am 04.04.89 erreicht wurde, die Bezeichnung VB 1b. Das Bohr- und Verrohrungsschema mit einer Übersicht über die verschiedenen Abschnitte der Bohrung mit den eingesetzten Bohrverfahren zeigt die Abbildung A.2.1. Eine zusammenfassende Darstellung über alle Ablenkungsarbeiten und Richtbohrphasen sowie den Verlauf des Bohrloches in einem Vertikalschnitt (W-E-Projektion) und die teufenmäßige Verteilung der Auskesselungszonen im 6 1/2" Bohrloch zeigt Abbildung A.2.2.

A.3 Probenahme

Über die oben genannte Seilkernstrecke, d. h. den untersten Abschnitt der Bohrung VB 1a, wurden insgesamt 100 Kernmärsche (KM 856 teilweise, KM 857 - 956) abgebohrt. Der Kerngewinn war wieder, wie bei den vorangegangenen Seilkernbohrarbeiten, sehr gut und betrug knapp 100 %.

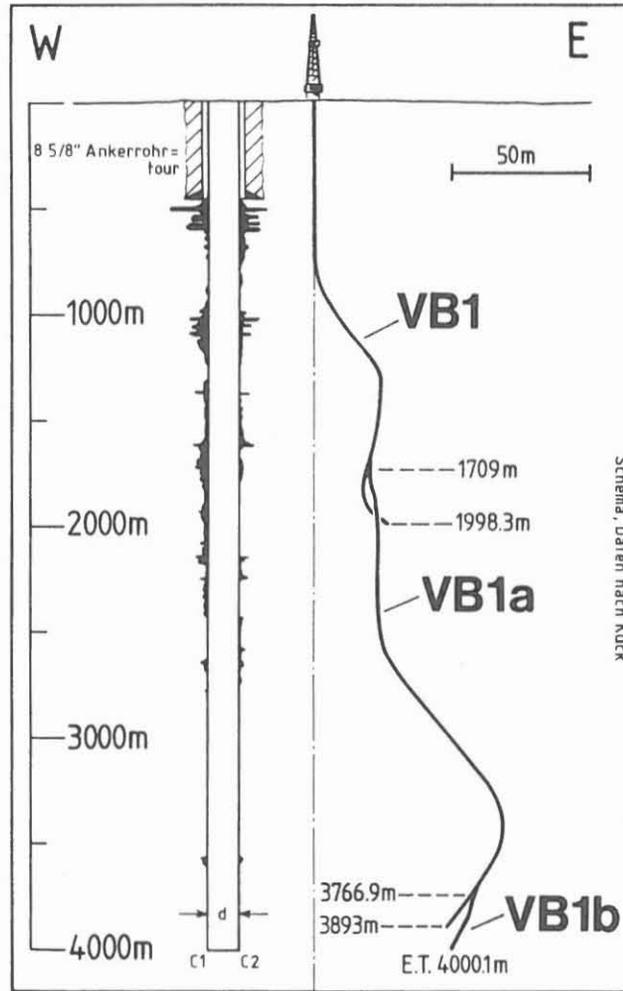
Im Berichtsabschnitt wurden insgesamt zwei orientierte Kerne entnommen (Tab. A.3.1). Bei diesem Verfahren werden unmittelbar beim Bohren durch einen mit Messern versehenen Innenkernrohrschuh in den Kern drei Kerben geritzt. Durch Meßeinrichtungen kann die räumliche Lage der Messer und damit der Ritzungen auf dem Bohrkern ermittelt werden, so daß sich der Bohrkern direkt orientieren läßt (Schmitz, et al. 1989). Eine direkte Orientierung ist darauf aufbauend auch für jene Bohr-



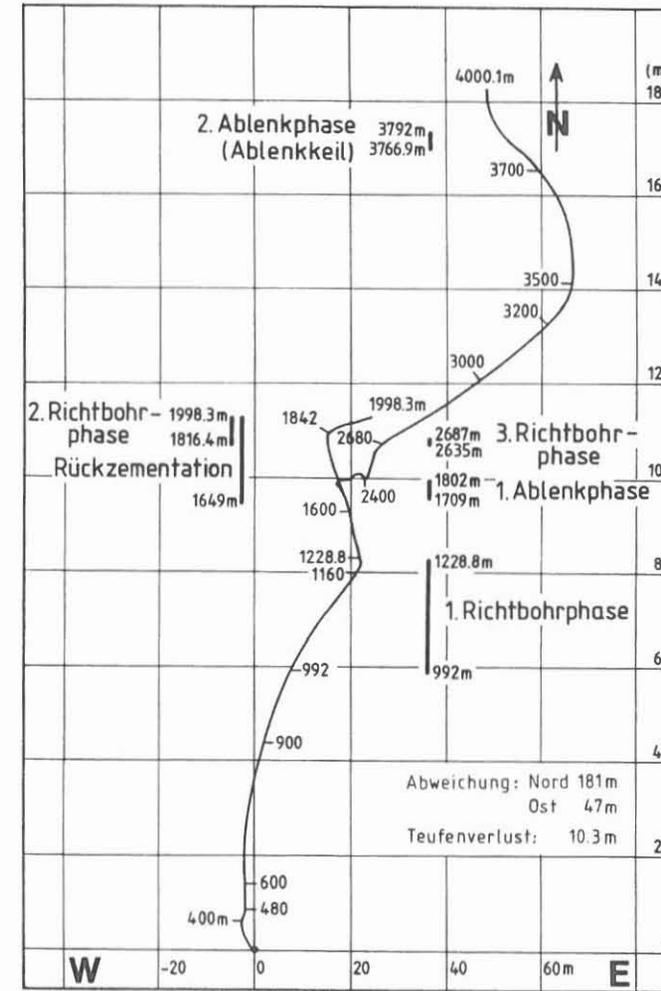
KTB Feldlabor

Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

Abb. A.2.1: Bohr- und Verrohrungsschema der Vorbohrung KTB OBERPFALZ VB bis zur Endteufe bei 4000.1 m



Bearb.: Kohl, Zch.: Nuber Dez. 89



Bearb.: Kück, Zch.: Nuber Feb. 90

Abb. A.2.2: Vertikal- und Horizontalprojektion der Vorbohrung KTB OBERPFALZ VB mit Markierung aller Richtbohr- und Ablenkungsarbeiten und den Auskesselungsbereichen im 6"-Bohrloch (zusammengestellt und ergänzt von Kohl nach Bearbeitungen von Kück, Referat Bohrlochmessungen, KTB-GP-BM)

kerne möglich, die nach oben und unten an den orientierten Bohrkern unmittelbar angepaßt werden können (vgl. Abschnitt G.).

Tab. A.3.1: Übersicht der Auswertung orientierter Bohrkernmärsche (KM) in der Bohrung KTB OBERPFALZ VB

Datum	KM	Kernintervall (ohne anpaßbare Kernstrecken)	mittlere Einfallswerte der Foliation	
			Azimut	Einfallswinkel
11.11.88	860	3516.7 - 3517.3 m	ca. 100°	ca. 20°
28.12.88	910	3711.0 - 3715.8 m	ca. 150°	ca. 50°

Zusätzlich zur Gewinnung von Bohrkernmaterial wurden während der Seilbohrkernphase im Teufenabstand von 1.0 m Bohrkleinproben (Cuttings) am Schüttelsieb und Bohrmehlproben an der Zentrifuge genommen. Entsprechendes gilt für die Beprobung der Bohrspülung am Auslauf. Während des Einsatzes der Vollbohrwerkzeuge von 3766.9 m - 4000.1 m wurde die Probenahme erhöht, indem der Teufenabstand von 1.0 m auf 0.5 m reduziert wurde.

Größere (oft mehrere Zentimeter große) Gesteinsbruchstücke konnten bei insgesamt zwölf Einsätzen eines Sedimentrohres beim Bohren mit Vollbohrwerkzeugen gewonnen werden. Auf dieser Weise standen, wie die Auswertung zeigt (vgl. Abschnitt H.) fast 6.5 kg Gesteinsmaterial aus dem Teufenbereich zwischen 3824.2 und 3997.9 m zusätzlich zur Bearbeitung zur Verfügung.

Nach Fertigstellung der Vorbohrung wurden im Rahmen des anschließenden Meßprogramms am 12./13.04.89 und 20./21.06.89 über 30 Seitenkerne aus dem hier bearbeiteten Bereich von 3500 - 4000.1 m mit einem speziellen Sidewall Core Driller Tool (MSCT) der Firma Schlumberger genommen. Die makroskopische und lithologisch-strukturelle Beschreibung dieser Seitenkernproben findet sich bereits im KTB-Report 89-4.

Neben den übertage gewonnenen Bohrspülungsproben wurden während des Abteufens des untersten Bohrlochabschnittes der VB 1a von 3500 m - 3893 m sieben Flüssigkeits- und Gasproben in situ aus verschiedenen Teufen gewonnen (s. Abschnitt C. Geochemie). Weitere Proben aus diesem Teufenbereich und dem Bohrlochabschnitt VB 1b wurden nach Erreichen der Endteufe im Rahmen des anschließenden Langzeittest- und Meßprogramms gewonnen, wobei auch ein Mehrfachprobennehmer erfolgreich eingesetzt werden konnte. Das Test- und Meßprogramm wurde im April 1990 abgeschlossen wurde.

A.4 Sonstiges

Unterlagen für die Bestellung von KTB-Probenmaterial können beim

NLFB
Betrieb KTB OBERPFALZ
Wissenschaftliche Einrichtungen
Postfach 67
8486 Windischeschenbach
Telefon 09681 / 40014 (Sekretariat, Frau Ritter)
Telefax 09681 / 40038

angefordert werden.

A.5 Literaturverzeichnis

- Emmermann, R.; Dietrich, H.-G.; Heinisch, M. und Wöhrle, Th.
(Hsg.): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB. Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Bericht 5, Teufenbereich 1709 - 2500 m, KTB-Report 89-2.
- Emmermann, R.; Dietrich, H.-G.; Heinisch, M. und Wöhrle, Th.
(Hsg.): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB. Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Bericht 6, Teufenbereich 2500 - 3009.7 m, KTB-Report 89-4
- Emmermann, R., Dietrich, H.-G.; Heinisch, M. und Wöhrle, Th.
(Hsg.): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB. Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Bericht 7, Teufenbereich 3009.7 - 3500 m, KTB-Report 89-5
- Schmitz, D.; Hirschmann, G.; Kessels, W.; Kohl, J.; Röhr, C. und Dietrich, H.-G.: Core orientation in the KTB pilot well - Scientific Drilling, 1, 150 - 155, 1989.

B. Geologie

KTB Oberpfalz VB –
Ergebnisse der geowissenschaftlichen
Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor,
Teufenbereich: 3500 – 4000.1 m

J. Sigmund
W. Hacker
S. Keyssner
J. Kohl
H. Müller
C. Röhr
A. Stroh
M. Tapfer



KTB-Report	90-2	B1 - B142	96 Abb.	Hannover 1990
------------	------	-----------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB 1a und 1b, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 3500 bis 4000.1 m:

B. GEOLOGIE

J. Sigmund, W. Hacker, S. Keyssner, J. Kohl, H. Müller, C. Röhr, A. Stroh und M. Tapfer *)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung/Abstract	B 3
B.1 Übersicht	B 6
B.2 Sillimanit-Biotit-Gneise (3500 - 3572 m)	B 6
B.2.1 Petrographie	B 6
B.2.2 Gefüge	B 8
B.2.3 Chemische Zusammensetzung	B 10
B.3 Allanit-führende Biotit-Plagioklas-Gneise (3572 - 3573.5 m)	B 14
B.4 Metabasit-Abfolge (3573.5 - 4000 m)	B 16
B.4.1 Amphibolite und Metagabbros	B 16
B.4.1.1 Petrographie und Metamorphose der Metabasite	B 16
B.4.1.2 Beschreibung besonderer Einzelheiten der Metabasite	B 28
B.4.1.3 Geothermobarometrie des Hochdruck-Granulitfazies-Stadiums	B 32

*) Anschrift der Verfasser: KTB-Feldlabor
8486 Windischeschenbach

B.4.1.4	Deformationsgefüge der Metabasite	B 33
B.4.1.5	Chemische Zusammensetzung	B 35
B.4.2	Quarz-Feldspat-Mobilisate in den Metabasiten	B 45
B.4.3	Meta-Ultramafitite	B 47
B.4.4	Granat- und Hornblende-führende, Plagioklas-reiche Gneise	B 54
B.4.5	Augengneise	B 54
B.4.6	Meta-Aplite	B 60
B.4.7	Pegmatoide	B 64
B.4.8	Quarz-Gänge	B 64
B.5	Erzmineralisation	B 67
B.5.1	Sulfidische Erzminerale	B 71
B.5.2	Oxidische Erzminerale	B 80
B.6	Kataklase	B 91
B.7	Großstruktur	B 96
B.8	Bohrung VB1b	B 97
B.9	Danksagung	B 101
B.10	Literaturverzeichnis	B 102
B.11	Anhang	B 105

Zusammenfassung

Dieser Bericht umfaßt die bisherigen Ergebnisse der petrographisch-geochemischen und strukturellen Bearbeitung des letzten Abschnittes der KTB-Vorbohrung von 3500 bis 4000.1 m.

Von 3500 bis 3572 m dominieren mittelkörnig-flaserige Sillimanit-Biotit-Gneise. Sie führen Granat, reliktschen Kyanit und Muskovit.

Die Allanit-führenden Biotit-Plagioklas-Gneise zwischen 3572 und 3573.5 m bilden den Übergang zur liegenden Metabasit-Abfolge.

Die Metabasit-Abfolge reicht von 3573.5 m bis zur Endteufe und besteht hauptsächlich aus Amphiboliten und einigen Metagabbros. Darin eingeschaltet sind Meta-Ultramafitite, Granat-Biotit-Hornblende-Augengneise sowie Granat- und Hornblende-führende, Plagioklas-reiche Gneise. Die Metabasit-Abfolge wird von vielen leukokraten Mobilisaten, Meta-Apliten und Pegmatoiden durchzogen. Ein duktiles Streckungsgefüge ist erstmals gehäuft entwickelt.

Die Metamorphose-Entwicklung der Metabasite begann mit einem frühem Hochdruck-Granulitfazies-Stadium. Metabasite, bei denen dieses Stadium noch deutlich zu erkennen ist, bestehen aus großen Klinopyroxen-Körnern mit parallel orientierten, lamellenförmigen Amphibol-, Rutil-, Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen. Diese Klinopyroxene werden randlich von würmförmigen Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektiten umgeben. Der weitere Mineralbestand ist Granat, Ti-reiche braune Hornblende, granoblastischer Plagioklas, Rutil, Ilmenit, Quarz und Biotit. Granat schließt Rutil, Quarz, Zoisit, Kyanit, Plagioklas und Klinopyroxen (bis 30 Mol-% Jadeit) ein.

Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz- sowie Hornblende-Plagioklas-Quarz-Symplektite zeigen als eingefrorene Zwischenstadien die Anpassung an die dominierenden amphibolitfaziellen Bedingungen an. Untergeordnet ist ein spätes Grünschieferfazies-Stadium erhalten.

Unter den Erzmineralen ist der größte Teil der Ni-Co-Fe-S-Mischphasen und Ni-Sulfide (Millerit) an die Metabasite gebunden. Auch die Ti-Oxide Ilmenit, Rutil treten bevorzugt in den Metabasiten auf. Magnetit hingegen wird nur vereinzelt beobachtet. Graphit ist in den Paragneisen weit verbreitet, in Amphiboliten und Meta-Ultramafititen selten. Unterhalb 3800 m treten sekundär Magnetit, Hämatit, Goethit und Ilvait auf. Sie sind an Zonen starker Epidotisierung gebunden.

Eine offene Kluft bei 3817 m und eine poröse, mit Epidot imprägnierte Zone bei 3861 m sind Ursachen für den Zufluß salinärer Formationswässer. Zwischen 3798 und 3873 m tritt lokal eine starke Klüftung mit Epidot-Mineralisation auf.

Das Einfallen der Foliation pendelt in den Gneisen zwischen NE und SE. In den Metabasiten ist nur sporadisch eine Foliation entwickelt. Kataklastische Scherflächen sind nur noch mm bis cm-mächtig. Mit dem Einsetzen der Metabasit-Abfolge tritt häufig core-disking auf.

Abstract

This report presents preliminary results of the petrographical, geochemical and structural investigations of the depth interval from 3500 to 4000.1 m of the scientific well 'KTB Oberpfalz VB'.

Medium-grained, flaser-like sillimanite-biotite-gneisses predominate from 3500 to 3572 m. They contain garnet, relictic kyanite and muskovite.

From 3572 to 3573.5 m medium-grained, allanite-bearing, granoblastic biotite-plagioclase gneisses form the transition to the subjacent metabasite sequence.

The metabasite sequence extends from 3573.5 m to the final depth and mainly consists of amphibolites and some metagabbros. Meta-ultramafic rocks, garnet-biotite-hornblende augengneisses as well as garnet- and hornblende-bearing plagioclase-rich gneisses occur as intercalations. Quartz-plagioclase mobilisates, meta-aplites and pegmatoides are widespread in this sequence. For the first time a stretching linear is prominent.

The metamorphic development of the metabasites started with a high-pressure granulite facies stage. Metabasites with good preservation of this stage consist of large clinopyroxenes with parallel aligned, lamellar amphibole, rutile, quartz, and plagioclase inclusions. These clinopyroxenes are rimmed by vermicular clinopyroxene-plagioclase-quartz symplectites. Further minerals are garnet, Ti-rich brown hornblende, granoblastic plagioclase, rutile, ilmenite, quartz, and biotite. Garnet includes rutile, quartz, zoisite, kyanite, plagioclase, and clinopyroxene (up to 30 mol-% of jadeite).

Clinopyroxene-plagioclase-quartz and hornblende-plagioclase-quartz symplectites are frozen in intermediate stages of the adaption to the dominating amphibolite facies conditions. A late low grade metamorphic stage (greenschist facies and lower) is subordinate.

Most of the Ni-Co-Fe-S phases and Ni-sulfides (Millerite) as well as ilmenite and rutile are confined to the metabasic sequence. Magnetite is subordinate. Graphite is widespread in the paragneisses and rare in amphibolites and ultramafic rocks. Below 3800 m secondary magnetite, hematite, goethite and ilvaite are bound to epidote-rich zones.

An open fissure at 3817 m and a porous, epidote-rich zone at 3861 m are the reason for an influx of saline formation water. Between 3798 and 3873 m epidote-rich faults occur.

The dip direction of the foliation in the paragneisses alternates between NE and SE. In the metabasic sequence a foliation is rarely developed. Cataclasites are only mm to cm thick. Core diskings is prominent within the metabasites.

B.1 Übersicht

Abb. B.1.1 zeigt das Übersichtsprofil der Berichtsstrecke. Es gliedert sich in den gekernten Abschnitt VB1a (3500 - 3893 m) und die nicht gekernte Ablenkbohrung VB1b (3766.9 - 4000.1 m).

Petrographisch gliedert sich der Profilverein von 3500 - 4000.1 m in zwei Haupt-Abschnitte:

- (1) 3500 bis 3572 m: Sillimanit-Biotit-Gneise mit grauwacke-ähnlichem Chemismus und amphibolitfazieller Metamorphose,
- (2) 3573.5 - 4000.1 m: Metabasite mit basaltischem Chemismus, mit frühem Hochdruck-granulitfaziellen Metamorphosestadium und amphibolitfazieller Überprägung. Untergeordnet sind Meta-Ultramafitite, (Granat)-Biotit-Hornblende-Gneise bis Augengneise und Meta-Aplite eingeschaltet.

Im Übergangsbereich (3572 - 3573.5 m) tritt ein 1.5 m mächtiger Allanit-führender Biotit-Plagioklas-Gneis auf.

B.2 Sillimanit-Biotit-Gneise (3500 - 3572 m)

B.2.1 Petrographie

Im Teufenbereich 3500 bis 3572 m treten Granat-führende Sillimanit-Biotit-Gneise auf. Sie entsprechen weitgehend denen aus höheren Teufenbereichen. Es handelt sich ganz überwiegend um mittelkörnig-flaserige Typen, untergeordnet um mittelkörnig-lagige. Feinkörnig-straflagige Gneise sind auf die Kernmärsche 862 - 866 (3523 - 3538 m) beschränkt. Mit Annäherung an die liegende Metabasit-Abfolge sind die Gneise zunehmend undeutlich foliiert. Ab 3544 m (866Flt) treten wirrstrahlige Fibrolith-Knoten statt der darüber vorkommenden foliationsparallelen Sillimanit-Aggregate auf. Weiterhin sind Hellglimmer-Aggregate charakteristisch, die als Pseudomorphosen nach Sillimanit und Kyanit gedeutet werden können. Granat ist oft nur akzessorisch vertreten, erscheint aber in einigen Gneisen in Biotit-reichen Lagen in größerer Menge (bis 1 Vol.-% des Gesamtgesteins). Die Granate führen gelegentlich Biotit- oder Rutil-Einschlüsse. Kyanit tritt wie in höheren Teufenbereichen vorwiegend als kleine reliktsche Einschlüsse in Plagioklas, selten in größeren Körnern mit Muskovit-Saum auf (Abb. B.2.1). Im Dünnschliff 688A4a (2820.2 m) konnte zwischen Kyanit und einschließendem Muskovit ein schmaler Saum aus Margarit mit der Mikrosonde identifiziert werden (vgl. Abb. B.3.8 in KOHL et al. 1989: B35). Gelbbraune Turmalin-Blasten wurden in wenigen Schlifften in der Gneismatrix gefunden.

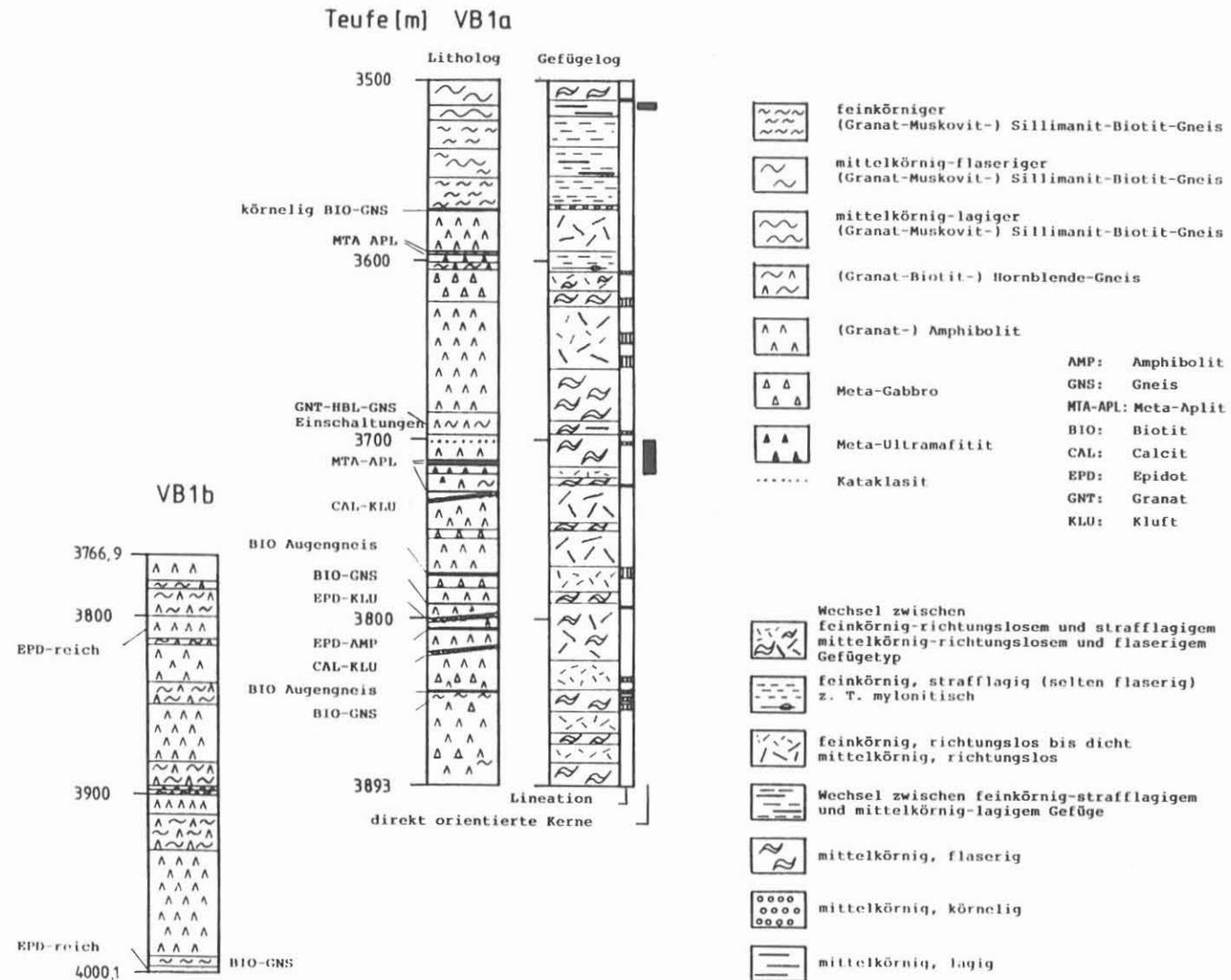


Abb. B.1.1: Geologisches Profil VB1a und VB1b

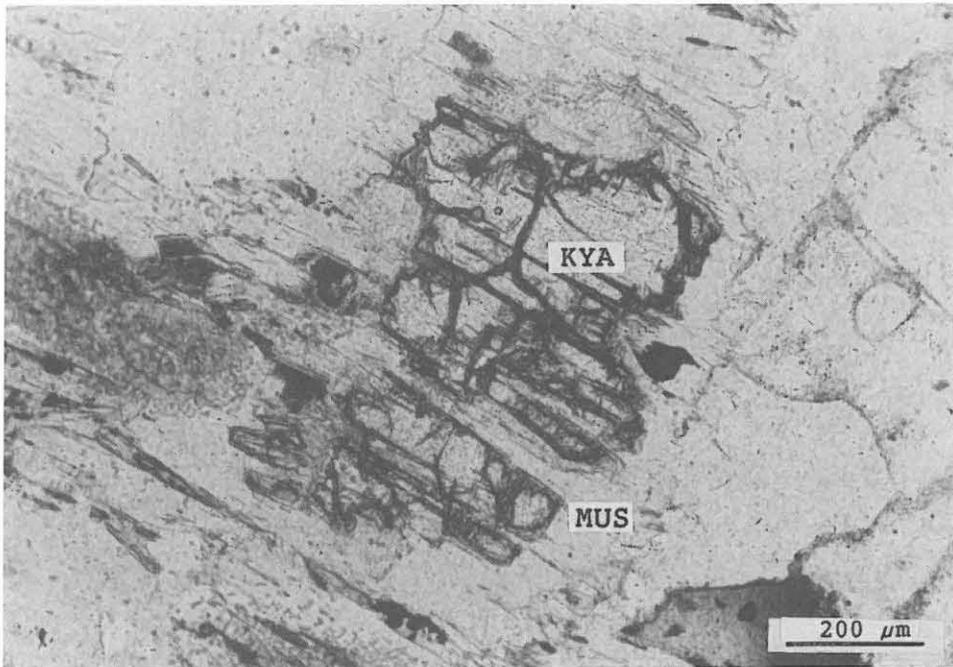


Abb. B.2.1: Kyanit(KYA) in Muskovit(MUS), Sillimanit-Biotit-Gneis, DS 874C11, 3570.97 m, //N.

Besondere Beobachtungen:

Nadelige Sillimanit-Schwärme werden oft von einem Quarz-Einkristall eingeschlossen. Der Rand eines solchen Quarzkorns folgt den Konturen des Sillimanit-Schwarms. Das Quarz-Sillimanit-Aggregat wird seinerseits von einem Plagioklas-Korn eingeschlossen.

Im Grenzbereich zu den liegenden Allanit-führenden Biotit-Plagioklas-Gneisen erscheinen Hellglimmer-Aggregate mit Sillimanit-Einschlüssen (Abb. B.2.2).

Im Kernmarsch 859 tritt in mittelkörnig-flaserigem Gneis eine 5 mal 3 cm große Kalksilikat-Linse aus Apatit, Granat, Quarz Zoisit, Hellglimmer und Calcit auf (Abb. B.2.3). Sie ähnelt der in KM 752 beschriebenen Linse (MÜLLER et al. 1989: B16f).

B.2.2 Gefüge

In der dominierenden, **mittelkörnig-flaserigen** Gefügevarietät werden augenförmige Quarz-Feldspat-Verwachsungen oder gedrungene bis isometrische Plagioklase (DS 859B2f, 3513.3 m) von einem offenen Glimmerteilgefüge umflasert. In Bereichen mit kleingefalteter Foliation sind Muskovit, Biotit und Quarz rekristallisiert, ohne daß eine achsenebenen-parallele Schieferung ausgebildet ist (DS 857C1h, 3005.12 m).

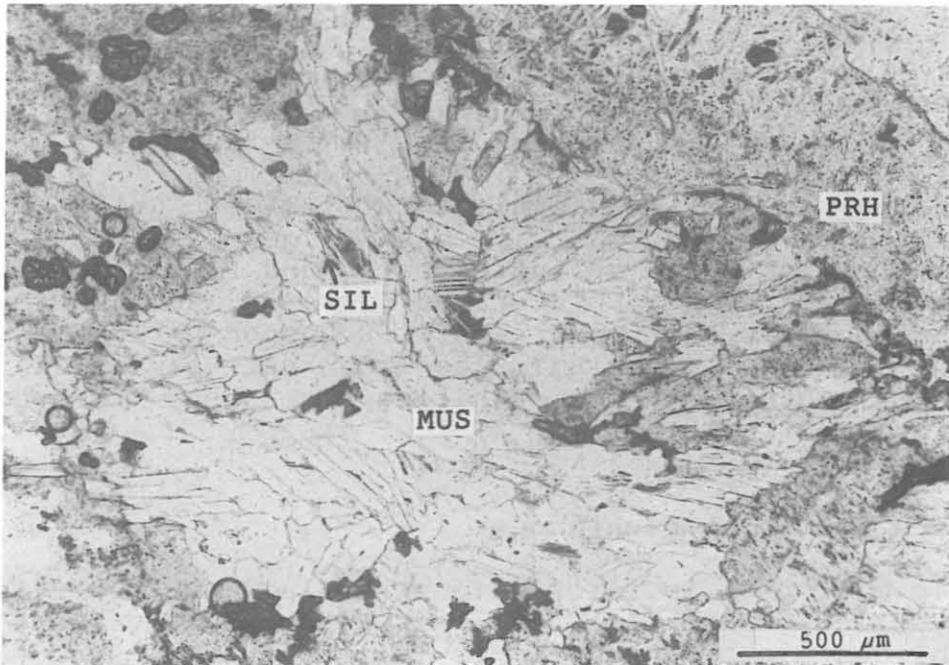


Abb. B.2.2: Muskovit-Aggregat (MUS) mit Sillimanit-Einschlüssen (SIL) und Prehnit-Gang (PRH) in Sillimanit-Biotit-Gneis, DS 874E11, 3572.08 m, //N.



Abb. B.2.3: Kalksilikat-Linse in Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, KST 859D2r, 3514.7 m.

Das mittelkörnig-lagige Gefüge ist durch einen ungleichkörnigen, granoblastischen Quarz-Plagioklas-Kornverband gekennzeichnet. Biotit-Sillimanit-Verwachsungen, Biotite und Muskovite sind mit ihrer Basis s-parallel eingeregelt und bilden ein mehr oder weniger geschlossenes Teilgefüge.

Die makroskopisch feinkörnig-straflagige Gefügevarietät zwischen 3523.0 und 3538.8 m hat folgende mikroskopische Charakteristik: In 's' gelängte Quarze und Plagioklase bilden einen granoblastischen Kornverband, der von anastomosierenden Sillimanit-Biotit-Lagen oder Biotit-Schuppen umflasert wird. In s-parallelen Quarz-Plagioklas-Lagen hat Plagioklas ebene Korngrenzflächen, Quarz zeigt hingegen gebogene Phasengrenzflächen gegen Plagioklas.

Besondere Gefüge-Beobachtungen:

Bei 3548 m tritt im feinkörnig-straflagigen Gneis eine cm-mächtige, leukokrate Lage auf. Muskovite und alterierte Biotite bilden ein offenes Glimmer-Teilgefüge und sind straff eingeregelt (Abb. B.2.4). Im Gegensatz dazu bilden Quarz und Plagioklas ein granoblastisches Gefüge.

Im feinkörnigen Granat-Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis zwischen 3537.3 m und 3538.7 m ist eine Scherbandfoliation ausgebildet. Die s-Flächen sind fein gefältelt. In lineationsparallelen Schnitten sind die maximal 3 mm langen Sillimanit-Linsen gelängt und spitzwinklig zur Foliation angeordnet. Die Foliation (s-Fläche) fällt mit etwa 25° ein, die Scherflächen (c-Flächen) fallen um 20 - 25° steiler ein. Die in der Foliation orientierten Biotite, Muskovite und Sillimanit-Linsen werden in die c-Flächen eingeregelt (Abb. B.2.5). Das Quarz-Teilgefüge ist insbesondere an diesen c-Flächen feinkörnig rekristallisiert. Die c-Flächen sind als diskontinuierliche Flächenschar ausgebildet und werden als "extensional crenulation cleavage" ("ecc", PLATT & VISSERS 1980) interpretiert. Die geometrische Beziehung von Foliation zur c-Flächenschar deutet abschiebenden Bewegungssinn (down-dip) der Hangendscholle in Bezug zur jetzigen Lage der Foliation an. Die Foliation ist durch jüngere Deformationen verstellt, sodaß keine absoluten Aussagen über den Bewegungssinn bei Anlage der Scherflächen möglich sind.

B.2.3 Chemische Zusammensetzung

Die Sillimanit-Biotit-Gneise entsprechen chemisch denen der höheren Teufenbereiche. Sie belegen z.B. im Na₂O-K₂O-Diagramm nach WIMMENAUER (1984, Abb. B.2.6, Analysen in Tab. B.2.1) den gleichen Streubereich von Grauwacken über tonige Grauwacken bis zu Tonsteinen wie die Sillimanit-Biotit-Gneise aus dem darüber liegenden Teufenabschnitt 3000 - 3500 m. Ins

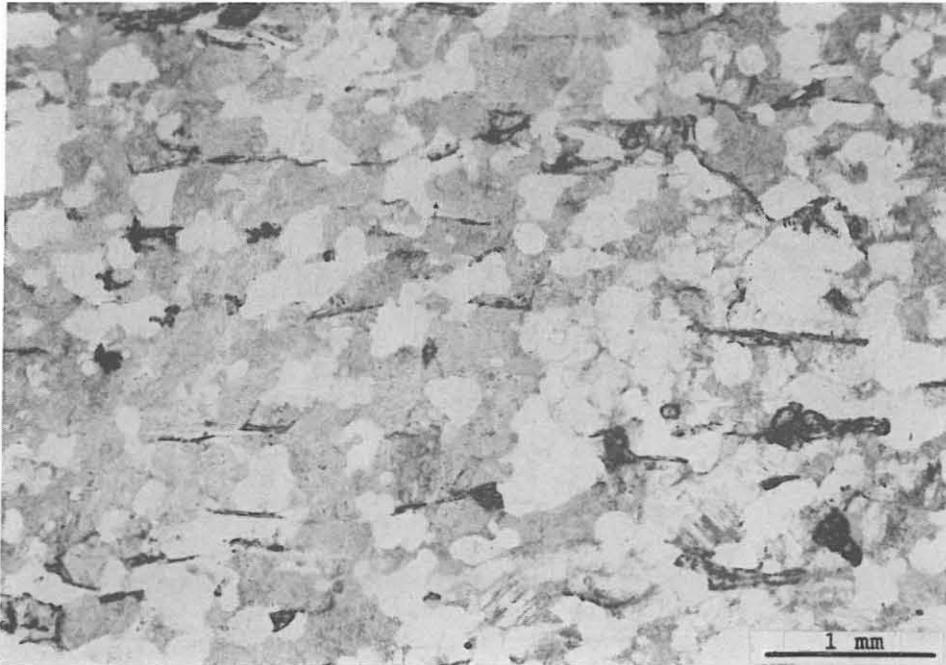


Abb. B.2.4: Straff eingeregelt alterierte Biotite in Sillimanit-Biotit-Gneis, DS 867G9n, 3548.63 m, //N.

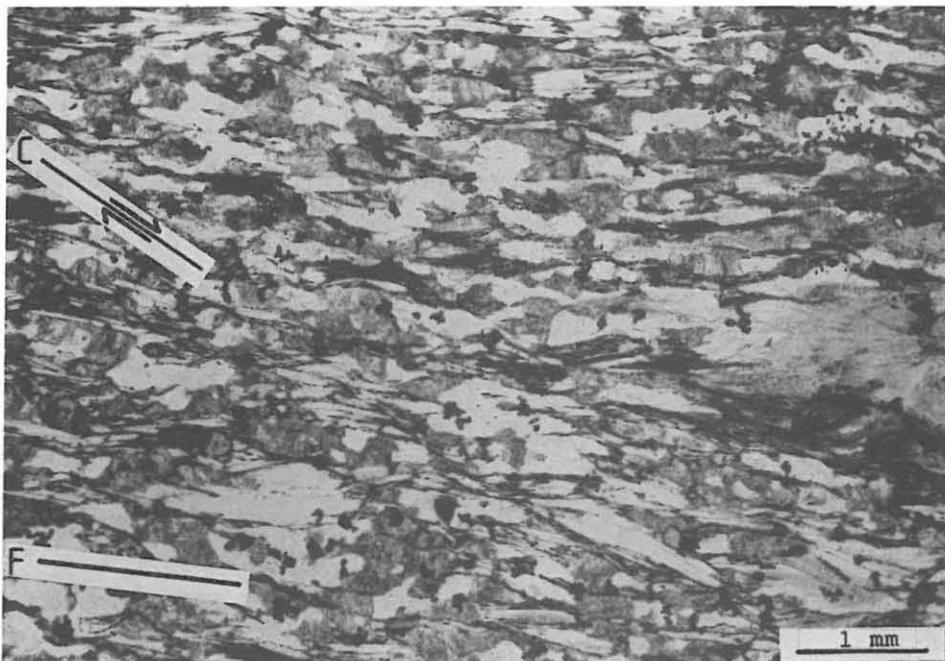


Abb. B.2.5: ecc-Gefüge in Sillimanit-Biotit-Gneis, Foliation (F), Cleavage (C), DS 865F2ag, 3538.07 m, //N.

- B 12 -

K_STK	857C1h	859B2f	859F2ah	861F2ad	863E2ac	863G2ap	865B2n	865F2ag
TEUFE	3505.12	3513.28	3516.41	3520.85	3530.79	3533.00	3535.04	3537.99
SIO2	64.4	66.1	63.7	51.6	56.9	55.3	60.0	58.4
TIO2	0.75	0.73	0.77	1.05	0.96	0.98	0.89	0.91
AL2O3	16.8	16.2	16.3	20.5	18.9	20.1	17.0	17.7
FE2O3	5.54	5.34	5.53	9.31	7.48	7.97	6.67	7.79
MNO	0.06	0.08	0.08	0.14	0.13	0.15	0.17	0.22
MGO	2.19	2.14	1.93	3.79	2.77	3.51	2.67	3.45
CAO	1.36	1.39	1.09	1.00	1.13	1.05	1.42	1.24
NA2O	3.1	3.4	3.6	2.3	2.2	1.7	2.3	2.8
K2O	2.50	2.09	2.03	4.07	3.48	3.51	2.64	2.87
P2O5	0.11	0.06	0.12	0.07	0.09	0.09	0.12	0.13
ZR	200	194	198	216	210	231	208	209
Y	35	30	34	42	37	41	35	40
SR	153	149	142	153	155	136	161	156
RB	59	51	42	102	79	79	57	73
ZN	92	81	87	156	119	126	104	124
CU	21	23	19	71	63	19	31	25
NI	30	27	28	52	36	41	37	46
CR	59	54	63	87	71	79	73	74
U	<5	<5	<5	6	7	5	5	7
TH	5	7	6	10	8	8	<5	10
QRZ	43	43	38	23	31	35	35	39
CHL	6	7	14	7	15	10	15	11
KFS	-	-	-	-	-	-	-	-
BIO	-	-	-	16	-	3	-	-
GNT	-	-	-	-	-	-	-	5
PLG	38	39	34	38	24	28	29	32
HGL	13	12	15	16	29	24	21	14

K_STK	873A1a	873D1k	874A1a	874C1e
TEUFE	3563.70	3565.93	3569.10	3570.80
SIO2	68.5	59.6	60.7	60.7
TIO2	0.71	1.00	0.84	0.90
AL2O3	15.4	18.5	17.1	18.3
FE2O3	5.17	7.49	6.67	6.72
MNO	0.08	0.14	0.08	0.08
MGO	1.99	2.95	2.69	3.15
CAO	1.32	1.30	1.28	1.30
NA2O	2.9	2.7	2.5	2.4
K2O	2.45	3.40	2.98	3.23
P2O5	0.12	0.09	0.13	0.15
ZR	196	229	197	197
Y	32	39	33	33
SR	148	156	163	160
RB	62	87	78	82
ZN	81	105	99	103
CU	24	<15	55	<15
NI	29	37	38	40
CR	60	75	98	97
U	<5	10	<5	7
TH	6	37	7	20
QRZ	46	38	34	41
CHL	7	11	12	6
KFS	-	-	-	-
BIO	-	-	12	8
GNT	-	-	-	-
PLG	34	33	33	35
HGL	14	19	10	10

Tab. B.2.1: RFA- und RDA-Analysen von z.T Granat-führenden Sillimanit-Biotit-Gneisen.

Edukt-Diagramm

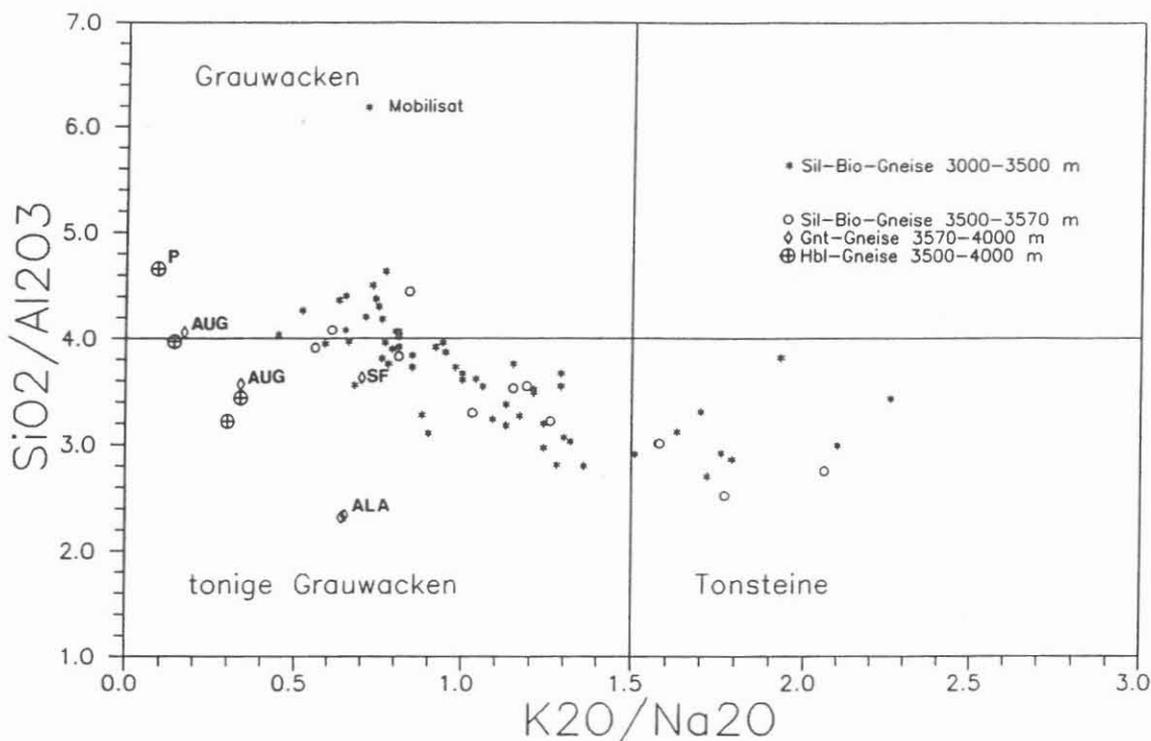


Abb. B.2.6: Eduktdiagramm nach WIMMENAUER (1984); außer den normalen Sillimanit-Biotit-Gneisen sind auch (z.T. Hornblende-freie) Gneiseinschaltungen in den Metabasiten eingetragen. SF = Sillimanit-freier Gneis an der Grenze zum Allanit-führenden Gneis (3571.9 m), ALA = Allanit-führender Biotit-Plagioklas-Gneis (3572.2-4 m, vgl. Kap. B.3), AUG = Augengneise (3775.6-9 m, vgl. Kap. B.4.5), P = Plagioklas-reiche, anorthositartige Gneislage (3703.9 m, vgl. Kap. B.4.4).

Tonstein-Feld fallen vorwiegend Muskovit-reiche und ehemals Sillimanit-reiche Gneise, deren Sillimanit mehr oder weniger vollständig serizitisiert ist.

Eine Sillimanit-freie Gneisprobe (874E11, 3571.93 m, Tab. B.2.2) aus dem Grenzbereich zwischen Sillimanit-Biotit-Gneisen und Allanit-führenden Biotit-Plagioklas-Gneisen liegt zwar im Edukt-Diagramm nahe bei den Sillimanit-Biotit-Gneisen, weist aber bereits höhere Gehalte an CaO und Cr sowie niedrigere Gehalte an P_2O_5 , Y und Zn auf und leitet damit zu den Allanit-führenden Gneisen über.

Orthit-Gneise			
K_STK	874E11	874E1n	874E1o
TEUFE	3571.93	3572.24	3572.42
SiO2	58.4	49.0	50.1
TiO2	0.92	1.13	1.20
Al2O3	16.1	21.1	21.4
Fe2O3	6.64	6.97	7.21
MnO	0.06	0.05	0.06
MgO	3.44	3.76	4.23
CaO	2.99	4.56	4.60
Na2O	3.5	4.7	4.6
K2O	2.44	3.00	3.01
P2O5	0.03	0.08	0.12
Zr	214	251	255
Y	23	18	17
SR	245	465	482
RB	65	106	103
Zn	75	74	78
Cu	29	<15	<15
Ni	38	43	45
CR	103	129	128
U	<5	5	12
TH	9	12	6
QRZ	33	-	-
CHL	16	11	7
BIO	9	22	13
GNT	-	-	-
PLG	42	67	80

Tab. B.2.2: RFA- und RDA-Analysen von Sillimanit-freien, z.T. Allanit-führenden Biotit-Plagioklas-Gneisen.

B.3 Allanit-führende Biotit-Plagioklas-Gneise (3572 - 3573.5 m)

Der unmittelbare Grenzbereich zur liegenden Metabasit-Abfolge ist durch ein nahezu quarzfreies, mittelkörniges Gestein mit rundlichen Plagioklasen gekennzeichnet, das auch schon in höheren Teufenabschnitten (MÜLLER et al. 1989: B20f) im Kontaktbereich zu Amphiboliten auftrat (Abb. B.3.1).

In den Gesteinen treten drei verschiedene Plagioklas-Generationen auf. Die älteste ist stark saussuritisiert und bildet den Kern größerer Körner. Um diese herum befindet sich die zweite, serizitisierte Plagioklas-Generation. Klarer, zonierter Plagioklas der dritten Generation umgibt die beiden älteren Plagioklasen. Allanit ist mit maximal 0.5 Vol % auffallend häufig. Er ist oft idiomorph ausgebildet und führt Biotit-Einschlüsse (Abb. B.3.2). Biotit wird oft von Prehnit verdrängt.

Der um 3490 m beobachtete, vermutlich sekundär neugebildete Biotit in Chlorit (MÜLLER et al. 1989: B10) tritt auch in dieser Einheit lokal auf.

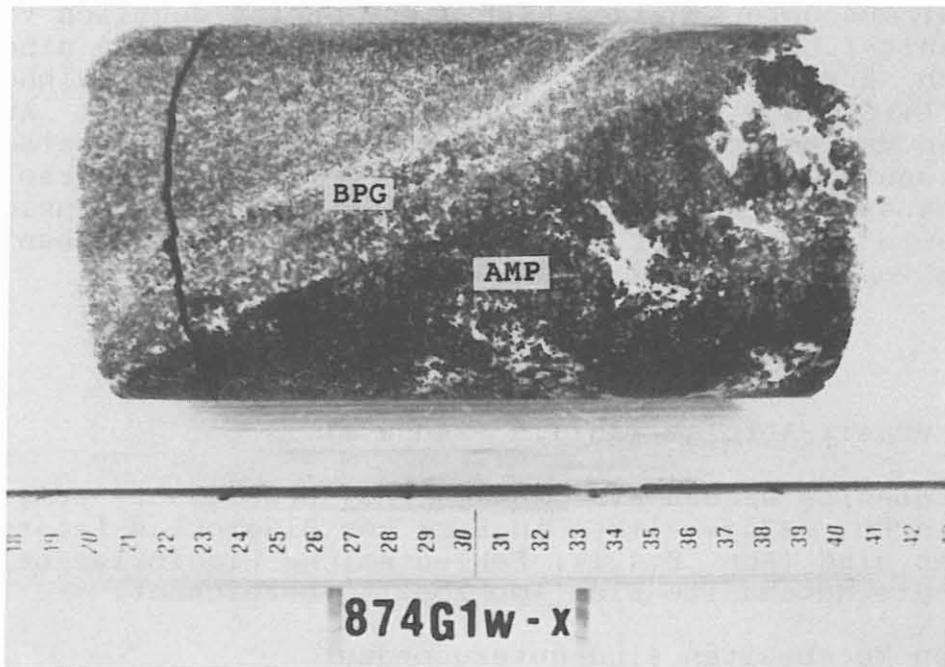


Abb. B.3.1: Grenze Biotit-Plagioklas-Gneis (BPG) und Amphibolit (AMP), mit 65° einfallend, KST 874 G1w-x, 3573.5 m.

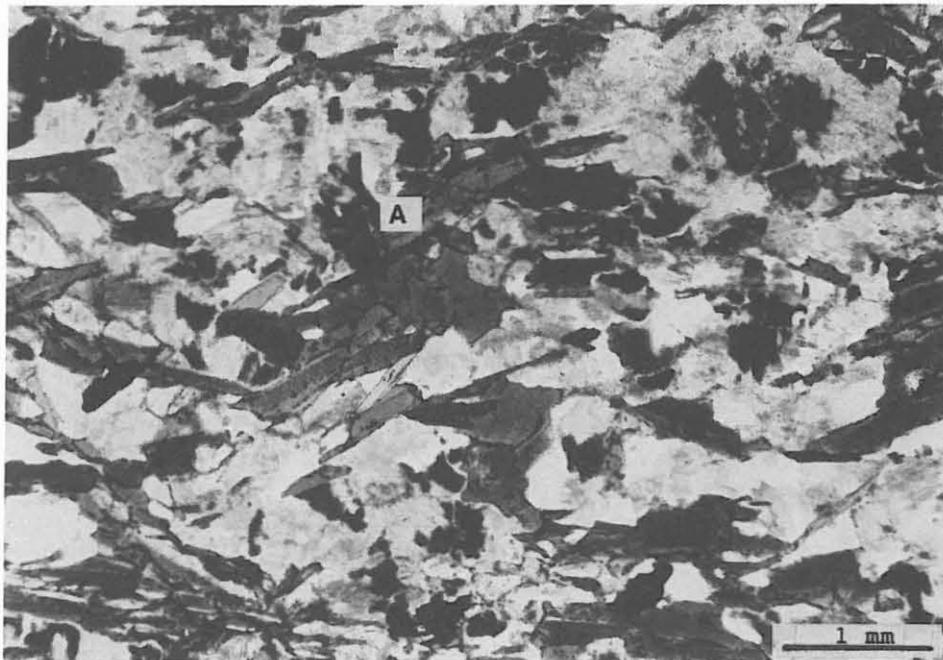


Abb. B.3.2: Allanit (A) mit pleochroitischem Hof in Biotit, Biotit-Plagioklas-Gneis, DS 874F1sK, 3573.31 m, //N.

Im Chemismus unterscheiden sich diese Gneise deutlich von den Sillimanit-führenden (Abb. B.2.6, Tab. B.2.2). Sie sind wesentlich ärmer an SiO_2 , Y, Rb, Zn, Cu, (MnO) und reicher an TiO_2 , Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , Sr, Cr, (Zr), d.h. mit Annäherung an den Metabasit-Körper werden die Gneise "basischer". Dies könnte einer metasomatisch geprägten Kontaktaureole um den Metabasit entsprechen, die entweder bei der Intrusion der Metabasite oder bei der gemeinsamen regionalmetamorphen Überprägung von Gneisen und Metabasiten gebildet wurde.

B.4 Metabasit-Abfolge (3573.5 - 4000 m)

Die Metabasite werden als 'Metagabbro' bezeichnet, falls noch magmatische Gefügerelikte in Form von Plagioklas-Leisten zu erkennen sind (Abb. B.4.1). Fehlen solche Plagioklas-Leisten, werden die Metabasite als 'Amphibolit' bezeichnet.

Mit den Metabasiten sind untergeordnet

- (1) Meta-Ultramafitite,
- (2) Granat-Biotit-Hornblende-Augengneise,
- (3) Granat- und Hornblende-führende, Plagioklas-reiche Gneise,
- (4) Pegmatoide, Mobilisate sowie Meta-Aplite

vergesellschaftet. Die Metabasit-Abfolge von 3575 - 4000 m ähnelt den Metabasiten von 1160 - 1610 m. Auf Unterschiede wird weiter unten noch eingegangen.

B.4.1 Amphibolite und Metagabbros

Die Metabasite bestehen im wesentlichen aus Hornblende, Plagioklas, Klinopyroxen, Granat, Quarz, Biotit, Ilmenit, Titanit und Rutil. Sie variieren in ihrer Korngröße zwischen sehr feinkörnig (um 100 μm) und mittelkörnig (um 1 mm). Grobkörnige Metabasite (um 1 cm) sind selten und geringmächtig (einige cm). Die Metabasite sind massig, selten foliiert und werden meist von leukokraten Quarz-Plagioklas-Mobilisaten durchzogen (vgl. Kap. B.4.2).

B.4.1.1 Petrographie und Metamorphose der Metabasite

In den Metabasiten sind drei Metamorphose-Stadien zu erkennen (RÖHR et al. 1990):

- (1) ein frühes Hochdruck-Granulitfazies-Stadium,
- (2) ein dominierendes Amphibolitfazies-Stadium und
- (3) ein spätes Grünschieferfazies-Stadium (im weiteren Sinn).

Die gleiche Metamorphose-Abfolge wurde schon in der oberen Metabasit-Abfolge (1160 - 1610 m) beobachtet (KEYSSNER et al. 1988). In der unteren Metabasit-Abfolge (3573.5 - 4000 m) ist allerdings das frühe Hochdruck-Granulitfazies-Stadium viel deutlicher erhalten als in der oberen Metabasit-Abfolge.

Hochdruck-Granulitfazies-Stadium

Metabasite, bei denen dieses frühe Stadium noch deutlich erhalten ist, bestehen aus großen Klinopyroxen-Körnern mit parallel orientierten, lamellenförmigen Amphibol-, Rutil-, Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen. Diese Klinopyroxene werden randlich von würmchenförmigen Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektiten verdrängt. Der weitere Mineralbestand ist Granat, Ti-reiche braune Hornblende, granoblastischer Plagioklas, Rutil, Ilmenit, Quarz und Biotit. Diese Gesteine sind in der Regel mittelkörnig, selten aber auch feinkörnig. Einige führen Plagioklas-Leisten und werden deshalb als Hochdruck-granulitfaziale Metagabbros angesprochen (Abb. B.4.1 u. B.4.2). Die Plagioklas-Leisten bestehen jetzt aus Plagioklas (An10-An30), Zoisit, phengitischem Hellglimmer (Si = 6.5) und etwas Titanit.

Der Granat (charakteristische Zusammensetzung: Alm45, Pyr30, Gross25) ist nur schwach zoniert (Abb. B.4.3). Als Einschlüsse wurden beobachtet: Rutil, Quarz, Zoisit, Kyanit, Plagioklas (An33 bis An92) und Klinopyroxen (8 Mol-% Jadeit, im Kernstück 264H4nT, 1269.6 m bis 30 Mol-% Jadeit = Omphacit; Abb. B.4.4, B.4.5 u. B.4.6). Der Jadeit-Gehalt der Klinopyroxen-Körner mit den lamellenförmigen Einschlüssen liegt um 10 Mol-%, der An-Gehalt der eingeschlossenen Plagioklas-Lamellen bei 23 Mol-% (Abb. B.4.7 u. B.4.8). Der Jadeit-Gehalt des Klinopyroxens der würmchenförmigen Symplektite schwankt zwischen 1 und 14 %, der An-Gehalt der zugehörigen Plagioklas-Phase zwischen 17 und 25 %. Die granoblastischen Plagioklas-Körner sind stark zoniert (An21 im Zentrum, An84 am Rand) und führen ebenfalls Al_2SiO_5 -Einschlüsse (Abb. B.4.9).

Amphibolitfazies-Stadium

Die Hochdruck-granulitischen Amphibolite bzw. Metagabbros wurden später amphibolitfaziellen Bedingungen angepaßt. Da die verschiedenen Stadien dieses Prozesses eingefroren nebeneinander erhalten sind, kann die Anpassung rekonstruiert werden.

Die Anpassung an amphibolitfazielle Bedingungen bewirkte:

- 1) Den Zerfall von Klinopyroxen in Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit. Daraus bildet sich ein Hornblende-Plagioklas-Quarz-Symplektit, bei dem die würmchenartige Verwachsung immer mehr in eine poikiloblastische übergeht (Abb. B.4.2 u. B.4.10). Am Ende dieses Prozesses existieren Hornblende- und Plagioklas-Körner in einem granoblastischen Gefüge.

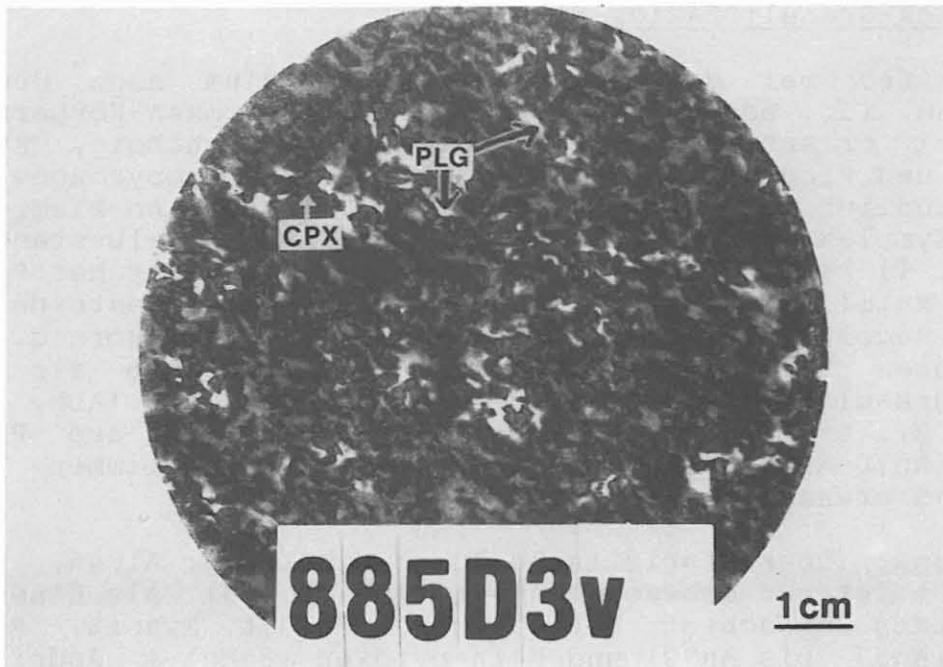


Abb. B.4.1: Metagabbro mit relictischen Plagioklas(PLG)-Leisten und Klinopyroxen(CPX), KST 885D3v, 3620.7 m.

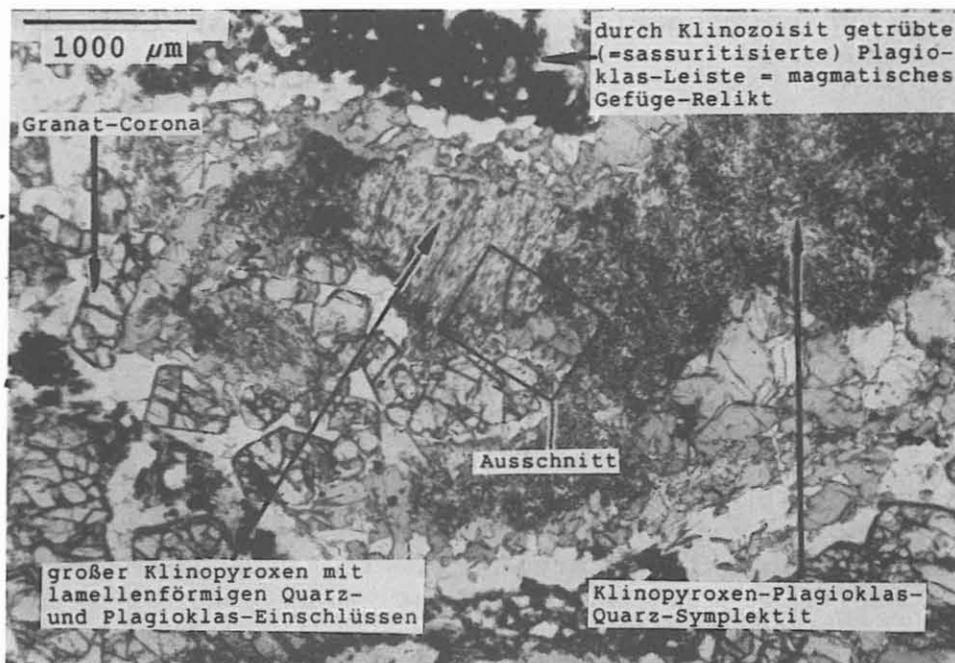


Abb. B.4.2: Übersicht über relictische, magmatische Gefüge und bei der Metamorphose neu eingestellte Gefüge eines Meta-Gabbros. Die Lage eines Detailbildes ist markiert. PS 885C3n, 3620.16 m, //N.

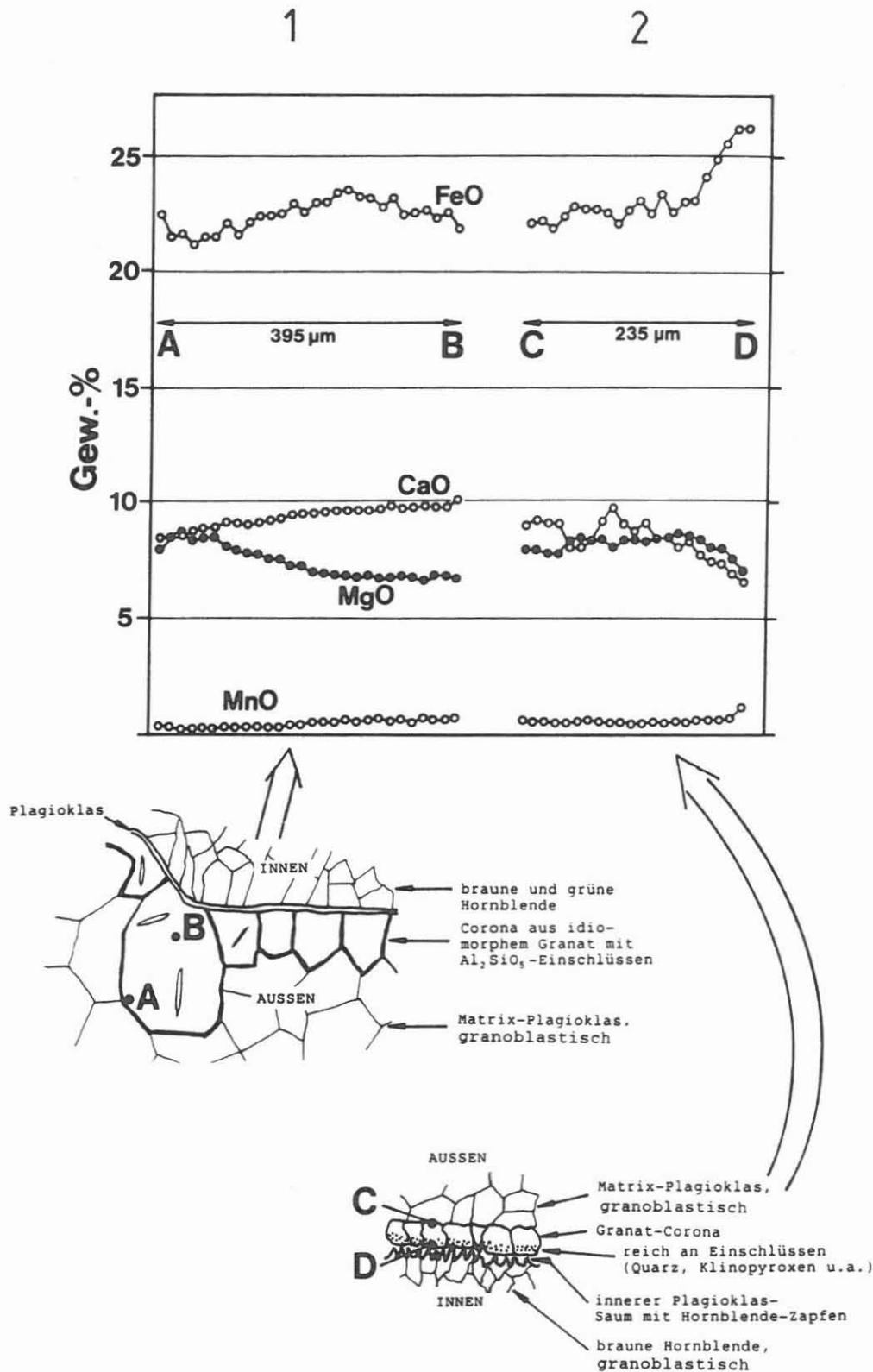


Abb. B.4.3: Die unterschiedliche Zusammensetzung der beiden Granat-Profile korrespondiert mit verschiedenen Granat-Corona-Typen: (1) idiomorpher Granat mit Kyanit und Plagioklas-Einschlüssen), (2) Granat an der Innenseite Quarz-einschlußreich und mit Hornblende-Zapfen. In der Tab.4.1 (Fortsetzung) sind einzelne Granat-Mikrosonden-Analysen aufgeführt. PS 885C3n, 3620.16 m.

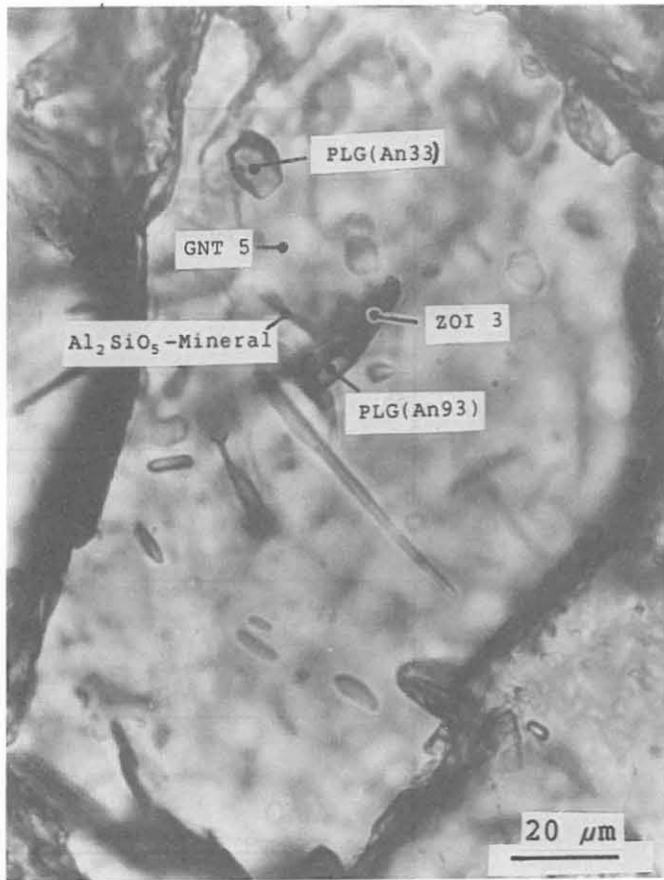


Abb. B.4.4: Einschlüsse in Corona-Granat. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen sind markiert. Meta-Gabbro. PS 885C3n, 3620.16 m, //N.



Abb. B.4.5: Ausschnitt aus einer Granat-Corona. Dieser spezielle Typ ist an seiner Innenseite reich an Quarz-Einschlüssen. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen und die Lage eines Detailbildes sind markiert. Meta-Gabbro, PS 885C3n, 3620.16 m, //N.

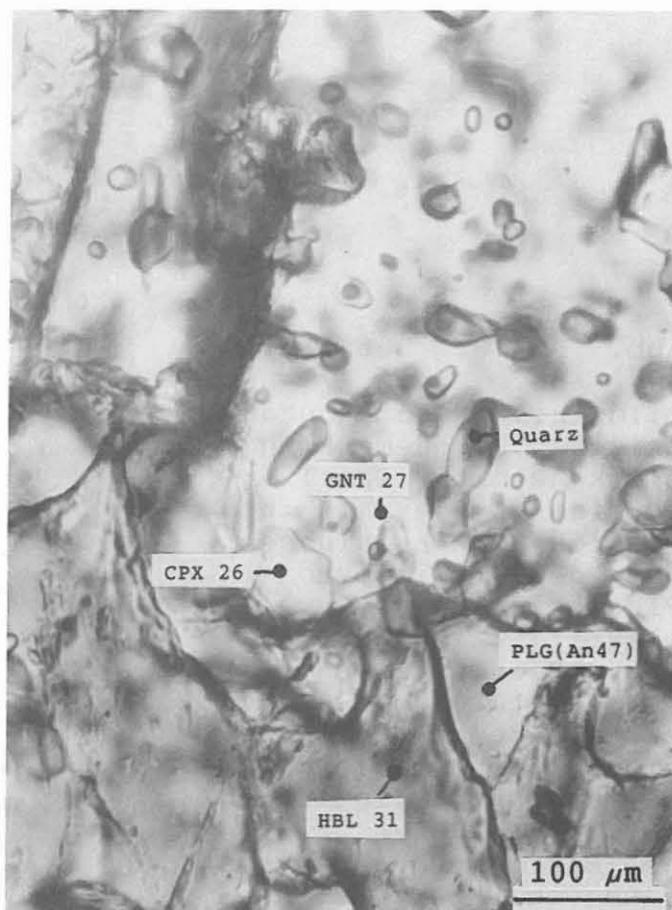


Abb. B.4.6: Detail aus Abb. B.4.5. Einschlußreicher Corona-Granat. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen sind markiert. Meta-Gabbro, PS 885C3n, 3620.16 m, //N.

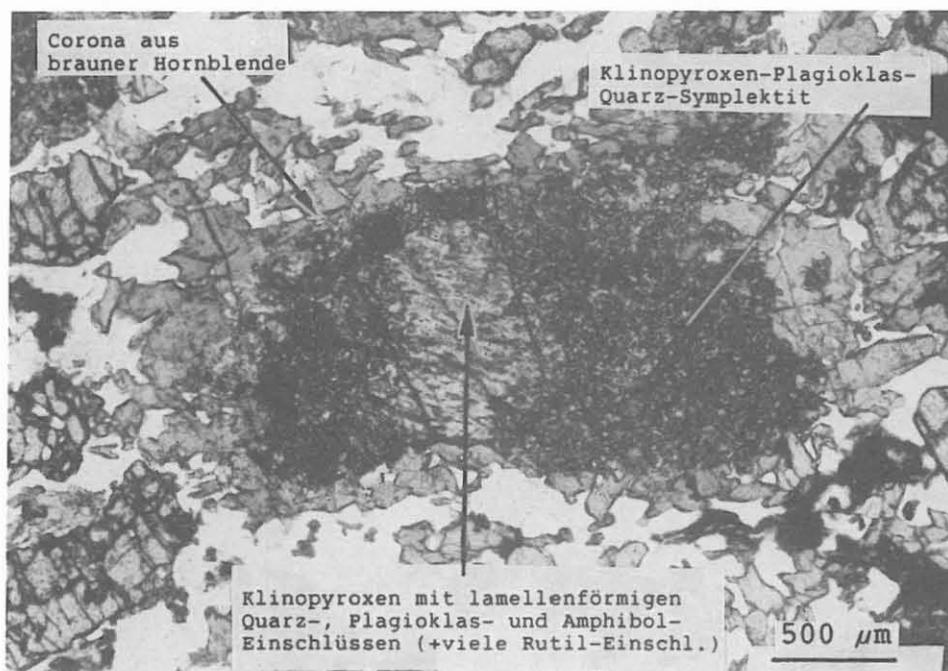


Abb. B.4.7: Das Bild zeigt exemplarisch die Lagebeziehung zwischen großem Klinopyroxen mit lamellenförmigen Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen (Kern), Klinopyroxen-Quarz-Plagioklas-Symplektit (Saum um den Kern) und braune Hornblende (äußerer Saum), Meta-Gabbro. DS 885C3n, 3620.16 m, //N.

Abb. B.4.8: Detailbild aus Abb. B.4.2. Das Bild zeigt den Kontakt zwischen großem Klinopyroxen mit lamellenförmigen Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen und dem Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit. Zwischen Granat und Klinopyroxen ist (ungeachtet des beschriebenen Kontaktes) eine Corona aus Hornblende und Plagioklas entwickelt. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen sind markiert. Meta-Gabbro, PS 885C3n, 3620.16 m, //N.

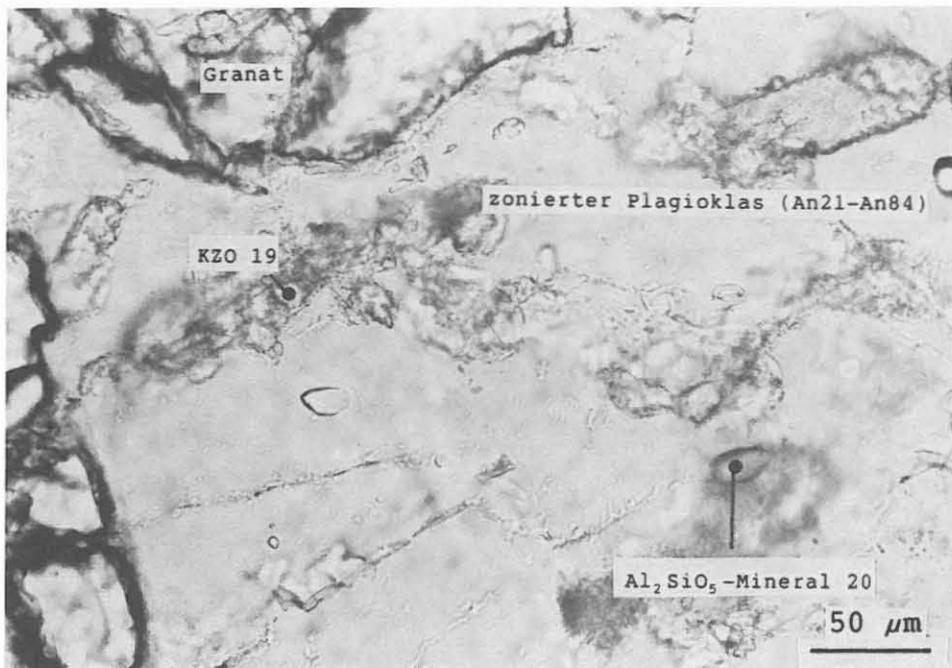
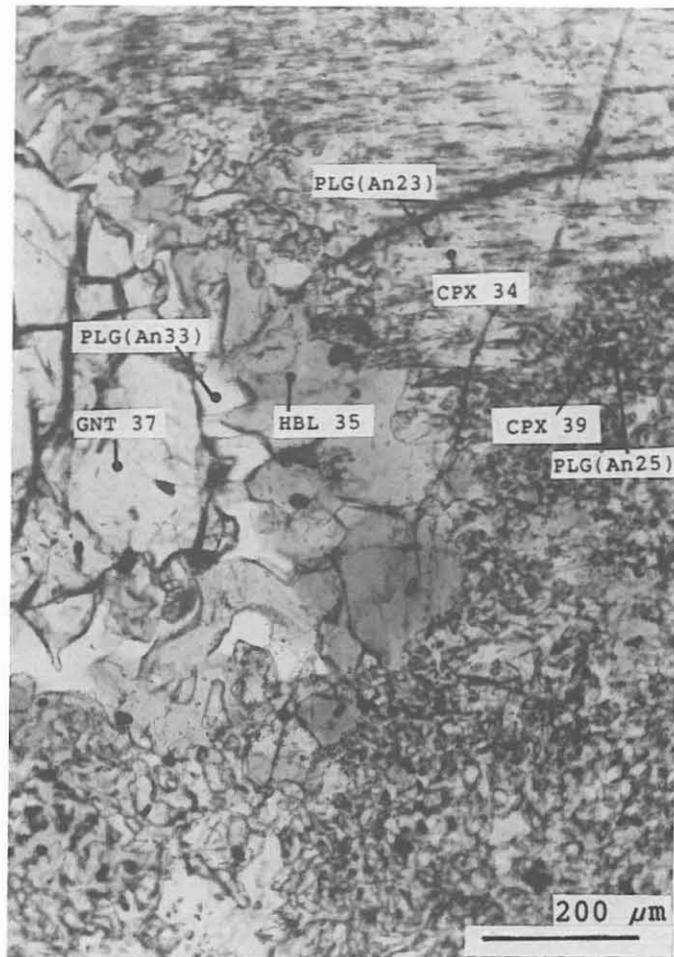


Abb. B.4.9: Klinozoisit- und Al₂SiO₅-Mineral-Einschlüsse in zoniertem Plagioklas. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen sind markiert. Hochdruck-granulitischer Meta-Gabbro. PS 885C3n, 3620.16 m, //N.

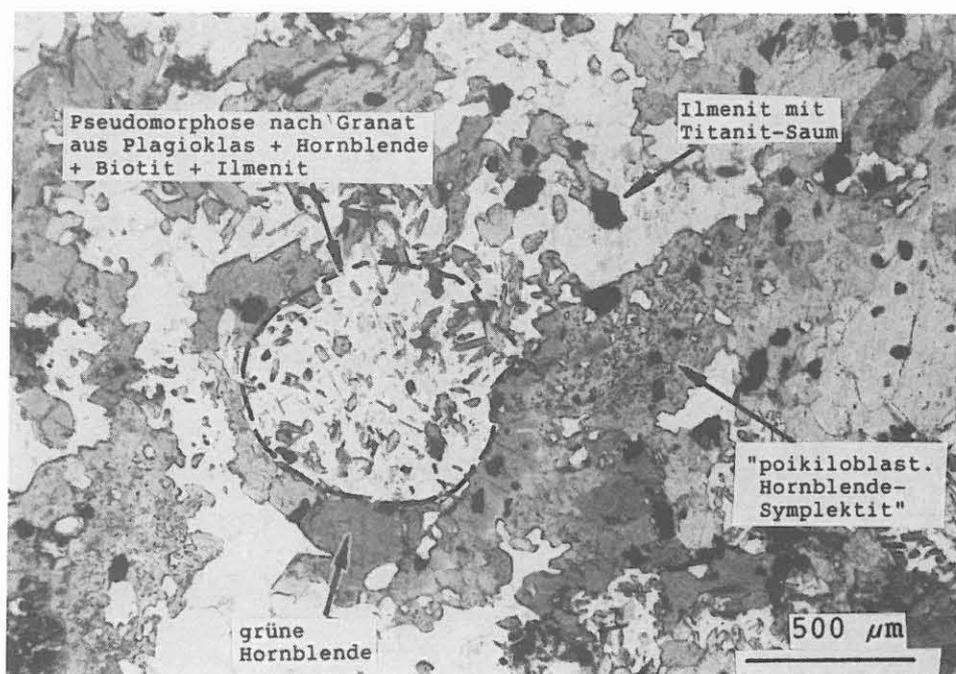


Abb. B.4.10: Das Bild zeigt das Resultat der amphibolitfaziellen Überprägung der hochdruck-granulitfaziellen Metabasite: Granat wird zu Plagioklas+Hornblende, der Klinopyroxen-Symplektit zu "poikiloblastischem Hornblende-Symplektit" umgewandelt. Amphibolit. DS 919A1aII, 3758.90 m, //N.

- 2) Die Bildung von Coronen aus Plagioklas ± Hornblende um Granat (Abb. B.4.8) bis hin zum völligen pseudomorphen Ersatz des Granats durch Plagioklas + Hornblende ± Biotit (Abb. B.4.10).
- 3) Die weitverbreitete Neubildung von olivgrüner, Tiärmerer Hornblende (TiO₂-Gehalte um 0.6 Gew.-% im Vergleich zu 1.5 - 2.2 % in den braunen Hornblenden, Tab. B.4.1).
- 4) Die Bildung von Titanit-Coronen um Ilmenit und Rutil, bis hin zum völligen Verschwinden von Rutil (Abb. B.4.11).

Mit der Teufe ist ein Gradient im Ausmaß der amphibolitfaziellen Anpassung festzustellen (RÖHR et al. 1990):

- (1) An der Oberfläche der Zone Erbdorf - Vohenstrauß wurden bislang keine Klinopyroxen-Symplektite und Granat-Coronen gefunden. Hornblende-Plagioklas-Symplektite kommen gelegentlich vor. Nach SCHÜSSLER (1987) sind Coronen aus Plagioklas ± Hornblende ± Biotit verbreitet. Die amphibolitfazielle Paragenese Plagioklas + Hornblende dominiert.
- (2) In der oberen Metabasit-Abfolge (1160 - 1610 m) sind Hochdruckrelikte (Symplektite und Granat-Coronen) noch recht selten.

Klinopyroxen

- 1 großer Klinopyroxen mit lamellenförmigen Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen
- 2 großer Klinopyroxen mit lamellenförmigen Quarz- und Plagioklas-Einschlüssen, wie 1
- 3 Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit, in großen Klinopyroxen 1, 2
- 10 Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit, in großer, brauner Hornblende
- 26 Klinopyroxen-Einschluß in Granat
- 34 großer Klinopyroxen mit lamellenförmigen Einschlüssen
- 39 Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit, neben 34
- 5 Klinopyroxen-Plagioklas(An17)-Quarz-Symplektit
- 7 Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit

Analyse	1	2	3	10	26	34	39	5	7
SiO2	51.88	52.81	51.91	52.96	50.28	51.65	51.05	52.82	52.57
TiO2	0.39	0.12	0.22	0.05	0.32	0.21	0.30	0.20	0.21
Al2O3	4.82	3.55	2.78	0.33	4.67	4.93	5.31	4.74	4.97
Cr2O3	0.04	0.00	0.05	0.00	0.02	0.30	0.41	0.00	0.00
FeO	7.38	7.73	7.15	7.25	6.76	7.44	5.95	5.53	5.96
MnO	0.08	0.11	0.14	0.15	0.12	0.07	0.06	0.02	0.05
NiO	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03
ZnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
HgO	12.49	12.74	13.52	14.19	13.56	12.79	12.90	12.75	12.95
CaO	20.28	19.90	21.25	23.63	21.24	19.83	21.01	20.23	20.58
Na2O	1.44	1.59	0.98	0.18	1.03	1.54	1.33	1.91	1.56
K2O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Summe	98.84	98.54	98.02	98.79	98.05	98.77	98.36	98.24	98.89
Aliv	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Si	1.934	1.974	1.953	1.990	1.883	1.923	1.904	1.964	1.946
Ti	0.011	0.003	0.006	0.001	0.009	0.006	0.008	0.006	0.006
Alvi	0.212	0.156	0.123	0.015	0.207	0.216	0.234	0.208	0.217
Cr	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.009	0.012	0.000	0.000
Fe3+	0.002	0.005	0.029	0.015	0.084	0.029	0.025	0.000	0.000
Fe2+	0.228	0.237	0.196	0.213	0.128	0.203	0.161	0.172	0.185
Mn	0.003	0.004	0.005	0.005	0.004	0.002	0.002	0.001	0.002
Mg	0.694	0.710	0.758	0.795	0.757	0.710	0.717	0.707	0.715
Ca	0.810	0.797	0.857	0.952	0.852	0.791	0.840	0.806	0.817
Na	0.104	0.115	0.072	0.013	0.075	0.111	0.096	0.138	0.112
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Kosmoc	0.12	0.00	0.15	0.00	0.00	0.88	1.21	0.00	0.00
Jadeit	10.14	11.02	4.16	0.00	0.00	7.38	5.91	13.80	11.28
Acmit	0.16	0.50	2.89	1.31	7.53	2.91	2.50	0.00	0.00
Tirsch	1.09	0.34	0.62	0.14	0.90	0.59	0.84	0.56	0.59
Catsch	4.44	1.97	3.46	0.48	9.05	6.54	7.88	2.95	4.65
DiHdJo	75.54	77.37	81.57	94.40	74.43	71.97	75.30	77.27	76.65
EnFSRb	8.51	8.79	7.14	3.45	7.24	9.73	6.36	5.42	6.84
Wollast	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe2+/FH	0.25	0.25	0.21	0.21	0.15	0.22	0.18	0.20	0.21

Amphibol

- 7 brauner Amphibol
- 8 brauner Amphibol, wie 7
- 22 grüner Amphibol
- 23 grüner Amphibol
- 31 brauner Amphibol, innerhalb einer Granat-Corona
- 35 brauner Amphibol, Saum um Klinopyroxen

	7	8	22	23	31	35
SiO2	46.31	46.47	44.11	43.03	43.76	42.99
TiO2	2.12	1.93	0.48	0.63	1.73	1.55
Al2O3	9.65	9.53	12.20	12.43	11.46	12.45
Cr2O3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.23
FeO	11.24	10.65	11.21	11.99	10.59	11.68
MnO	0.06	0.07	0.09	0.11	0.12	0.03
NiO	0.00	0.15	0.03	0.02	0.01	0.05
ZnO	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.08
HgO	14.12	14.63	14.02	13.60	13.90	13.39
CaO	11.06	10.79	10.81	10.69	11.28	11.39
Na2O	1.84	1.87	2.03	2.08	1.95	2.11
K2O	0.68	0.64	0.80	0.69	0.63	0.92
Summe	97.21	96.86	95.80	95.28	95.43	96.85
Si	6.706	6.717	6.428	6.317	6.446	6.296
Al	1.294	1.283	1.572	1.683	1.554	1.704
Fe3+	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SumZ	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al	0.353	0.341	0.525	0.469	0.436	0.446
Ti	0.231	0.210	0.053	0.070	0.192	0.171
Fe3+	0.405	0.536	0.844	0.991	0.498	0.545
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.027
Mg	3.047	3.152	3.045	2.976	3.051	2.922
Fe2+	0.956	0.751	0.523	0.482	0.807	0.886
Mn	0.007	0.010	0.011	0.014	0.015	0.004
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SumY	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe2+	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	1.716	1.671	1.688	1.682	1.780	1.787
Na	0.284	0.329	0.312	0.318	0.220	0.213
SumX	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.233	0.195	0.262	0.274	0.337	0.386
K	0.126	0.120	0.149	0.129	0.118	0.172
SumA	0.358	0.315	0.410	0.403	0.456	0.558

Tab. B.4.1: Mikrosonden-Analysen von Klinopyroxenen, Amphibolen, Granaten und akzessorischen Mineralen des hochdruckgranulitischen Metagabbros 885C3n (3620.16 m).

Granat

- 15 Granat um Al₂SiO₅-Mineral und Plagioklas(An92)-Einschluß
- 16 Granat-Rand des Kornes 15
- 27 Corona-Granat, Rand, dem schmalen Plagioklas/Amphibol Saug zugewandt
- 28 Granat-Rand gegenüber Amphibol
- 29 Granat-Rand gegenüber äußerem Matrix-Plagioklas
- 37 Granat
- 5 Granat mit Anorthit-, Zoisit- und Al₂SiO₅-Mineral-Einschlüssen
- 3 Granat-Zentrum
- 4 Granat-Rand
- A,B,C,D Endpunkte der Granat-Profile, A-B und CD

	15	16	27	28	29	37	5	3	4	A	B	C	D
SiO ₂	38.69	38.51	38.32	38.78	38.49	38.18	39.41	39.26	39.27	39.34	39.16	38.92	39.00
TiO ₂	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.14	0.06	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.03
Al ₂ O ₃	22.32	22.16	21.96	22.29	22.24	22.11	22.10	22.21	22.19	22.19	21.94	21.96	21.72
Cr ₂ O ₃	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	-	0.02	0.00	-	-	-	-
FeO	20.37	21.85	23.27	21.56	21.81	24.24	22.04	20.02	21.21	22.52	21.82	21.95	26.08
MnO	0.40	0.48	0.91	0.46	0.47	0.69	0.57	0.48	0.52	0.49	0.79	0.55	1.16
NiO	0.00	0.01	0.10	0.02	0.00	0.03	-	0.05	0.02	-	-	-	-
ZnO	0.00	0.04	0.08	0.00	0.00	0.08	-	0.02	0.05	-	-	-	-
MgO	8.11	7.44	7.61	8.73	8.06	7.68	7.13	8.36	7.81	8.05	6.76	7.93	7.06
CaO	9.54	8.63	6.88	8.33	8.77	7.88	10.22	8.95	8.95	8.53	10.13	8.91	6.56
Na ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	-	0.01	0.01	-	-	-	-
Summe	99.48	99.19	99.14	100.26	99.90	101.12	101.52	99.44	100.07	101.15	100.68	100.27	101.64
Si	2.956	2.970	2.969	2.940	2.939	2.903	2.976	3.001	2.997	2.972	2.987	2.966	2.973
Al	2.010	2.015	2.006	1.992	2.001	1.982	1.966	2.001	1.996	1.976	1.973	1.972	1.951
Fe ³⁺	0.077	0.041	0.054	0.125	0.117	0.201	0.082	0.000	0.010	0.079	0.053	0.097	0.103
Fe ²⁺	1.224	1.368	1.454	1.242	1.276	1.341	1.310	1.280	1.344	1.344	1.340	1.302	1.560
Mn	0.026	0.031	0.060	0.030	0.030	0.045	0.036	0.031	0.034	0.031	0.051	0.035	0.075
Mg	0.923	0.855	0.879	0.987	0.917	0.870	0.803	0.953	0.888	0.907	0.769	0.901	0.802
Ca	0.781	0.713	0.571	0.677	0.718	0.642	0.827	0.733	0.731	0.691	0.828	0.727	0.536
Andradit	3.7	2.0	2.6	6.2	5.7	9.6	4.1	0.0	0.5	4.0	2.6	4.9	5.2
Grossular	22.5	21.8	16.5	16.6	18.4	11.7	23.5	24.4	23.9	19.1	25.0	19.4	12.7
Pyrop	31.3	28.8	29.6	33.6	31.2	30.0	27.0	31.8	29.6	30.5	25.7	30.4	27.0
Spessart	0.9	1.1	2.0	1.0	1.0	1.5	1.2	1.0	1.1	1.1	1.7	1.2	2.5
Almandin	41.4	46.1	49.0	42.3	43.4	46.2	44.0	42.7	44.8	45.2	44.8	43.9	52.5

Biotit, Ilmenit, Al₂SiO₅-Mineral, Klinozoisit, Anorthit

- 32 Biotit
- 9 Ilmenit
- 13 Al₂SiO₅-Mineral
- 20 Al₂SiO₅-Mineral
- 19 Klinozoisit
- 3 Zoisit-Einschluß in Granat
- 4 Plagioklas(An93) Einschluß in Granat

	32	9	13	20	19	3	4
SiO ₂	36.84	0.02	37.82	37.00	38.04	39.63	44.66
TiO ₂	2.60	52.87	0.01	0.02	0.10	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	15.27	0.01	62.31	62.47	27.51	31.78	34.71
Cr ₂ O ₃	0.06	0.00	0.02	0.01	0.00	-	-
FeO	14.16	44.14	1.02	0.47	6.63	2.58	0.94
MnO	0.10	1.35	0.04	0.04	0.04	0.06	0.03
NiO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	-	-
ZnO	0.07	0.00	0.05	0.05	0.19	-	-
MgO	14.77	0.50	0.07	0.00	0.02	0.04	0.12
CaO	0.00	0.00	0.14	0.06	23.33	23.65	18.06
Na ₂ O	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73
K ₂ O	9.67	0.02	0.00	0.01	0.01	-	-
Summe	93.60	98.91	101.49	100.15	95.86	97.79	99.25

Tab. B.4.1: Fortsetzung.

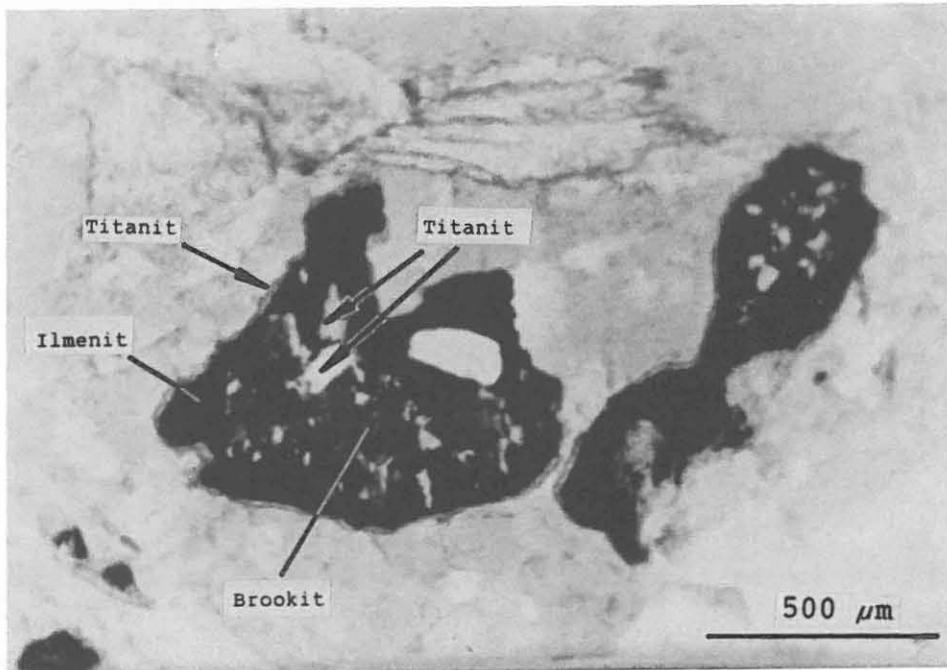


Abb. B.4.11: Pseudomorphose aus innerem Titanit-Brookit-Aggregat und äußerem, unregelmäßigem Ilmenitsaum. Ganz außen der in der ganzen Bohrung weitverbreitete schmale Titanit-Saum. Amphibolit. DS 948D9b, 3865.35 m, //N.

- (3) In der unteren Metabasit-Abfolge (3573.5 - 4000.1 m) sind sie weit verbreitet und gut erhalten. Die amphibolitfazielle Anpassung war hier am geringsten.

Grünschieferfazies-Stadium

In Zusammenhang mit einer Deformation unter niedrigen Temperaturen wurden die Metabasite lokal grünschiefer- bis zeolithfaziell überprägt.

Dabei kam es zur Bildung von (Klino)-Zoisit in Plagioklas (Abb. B.4.12 u. B.4.13), zur Albitisierung von Plagioklas, zur Bildung von Epidot, Prehnit und Kalifeldspat auf Biotit-Spaltflächen, zur Chloritisierung von Granat bis hin zu Pseudomorphosen nach Granat aus Epidot ± Chlorit ± Ilmenit (Abb. B.4.14). Die olivgrünen Hornblenden erhielten einen Saum aus hellgrüner Hornblende bis Aktinolith (RÖHR et al. 1990).

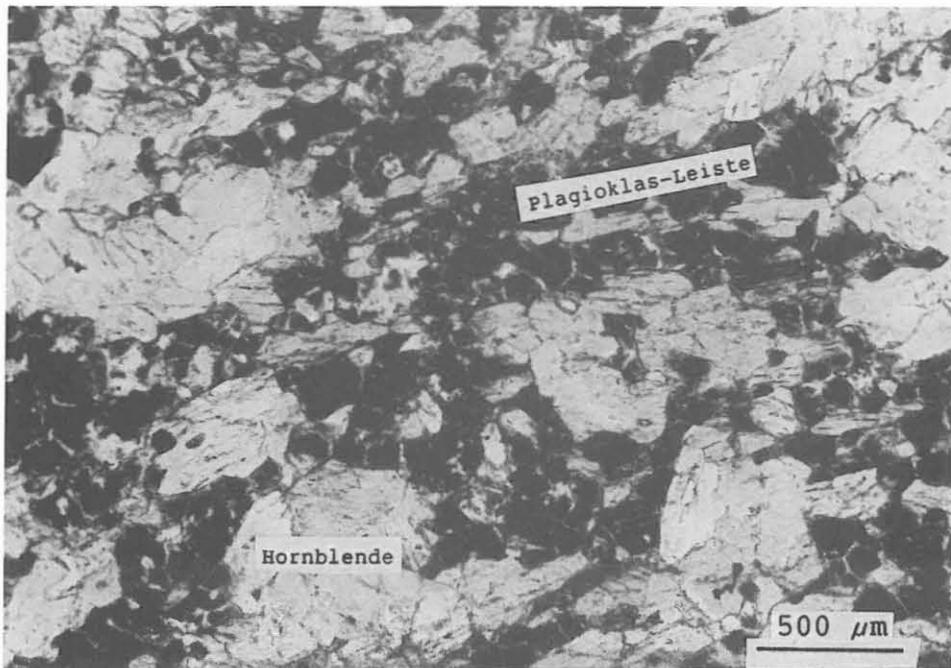


Abb. B.4.12: Die Plagioklas-Leisten (magmatisches Gefüge-Relikt) sind rekristallisiert und saussuritisert (= getrübt durch Klinozoisit). Nur die Korngrenzen der Rekristallisate sind nicht getrübt. Foliiertes Meta-Gabbro, DS 910E1vII, 3715.07m, //N.

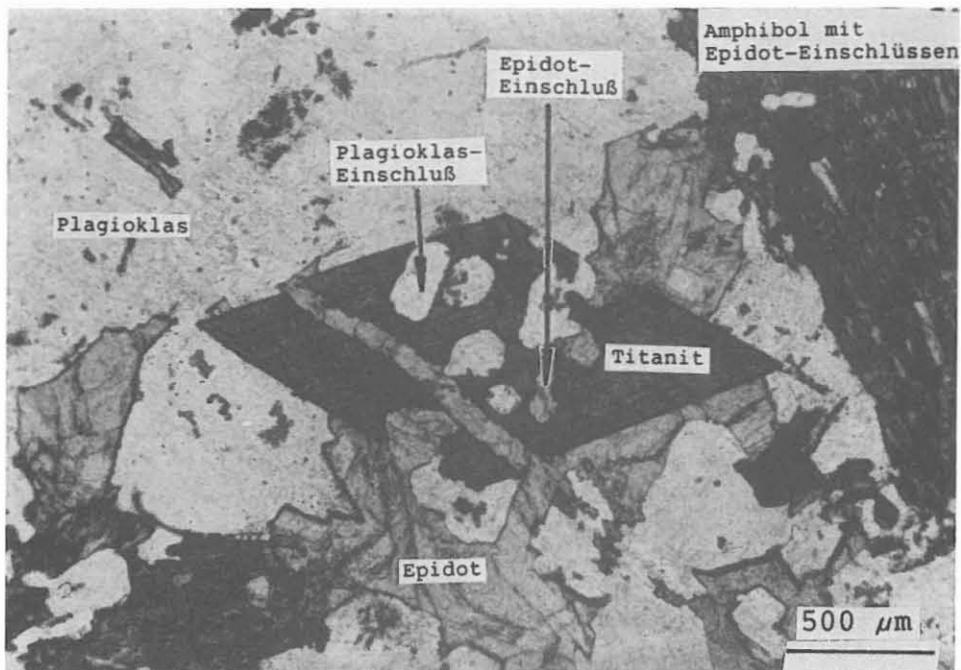


Abb. B.4.13: Idiomorpher, poiklitischer Titanit und Epidot-Mineralisation in Mobilisat-Schliere eines Amphibolits. DS 914A1dK, 3733.21 m, //N.

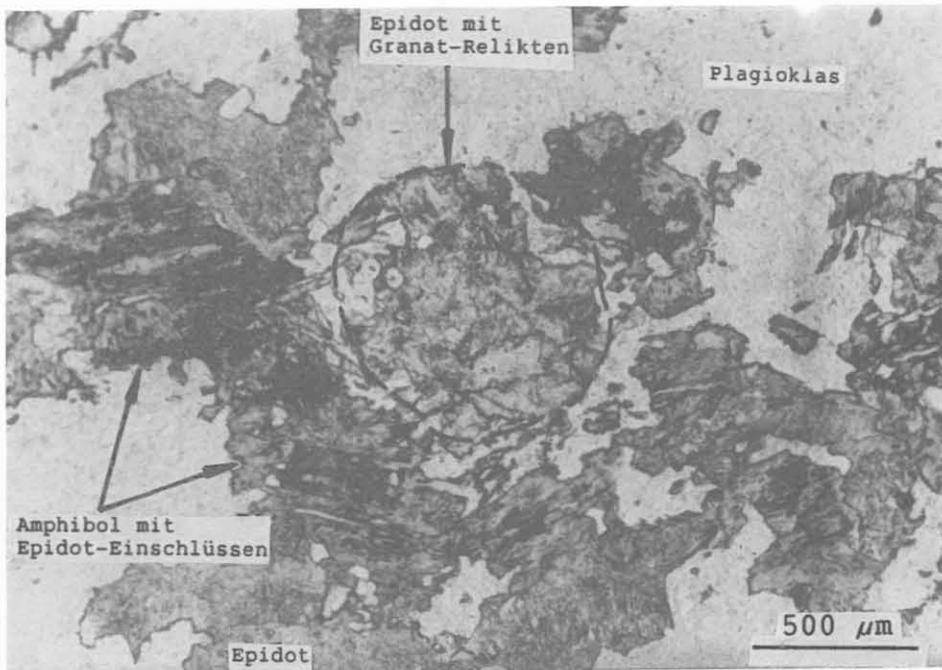


Abb. B.4.14: Pseudomorphose nach Granat aus Epidot. Leuko-
krater Epidot-Amphibolit. DS 913B1e, 3728.22 m, //N.

B.4.1.2 Beschreibung besonderer Einzelheiten der Metabasite

In diesem Abschnitt werden besondere Einzelbeobachtungen der Metabasite mitgeteilt.

In Granat-reichen Amphiboliten ("Granatite") werden bei Kernmarsch 950 (3868.11 m) hellgrüne, Fe-reiche Klinopyroxene ($Fe/(Fe+Mg) = 0.5$) mit dunkel-olivgrünem Amphibol-Saum beobachtet (Abb. B.4.15). Die Klinopyroxene schließen parallel orientierte Amphibol-Lamellen ein. Es kommen keine Klinopyroxen- bzw. Hornblende-Plagioklas-Symplektite wie in benachbarten Hochdruck-granulitischen Amphiboliten vor. Im gleichen Granat-reichen Amphibolit ist häufig ein schmaler Plagioklas-Saum an der Grenze von Quarz zu Granat entwickelt (Abb. B.4.16). Die Quarze zeigen mitunter Subkornbildung.

Plagioklas-Coronen sind außer um Granat auch um Ilmenit mit Titanit-Saum in den Amphiboliten verbreitet (Abb. B.4.17).

In Nachbarschaft zu Hornblende-Biotit-Augengneisen (3775 m) ist im Hornblende-Biotit-Granat-Gneis eine Klinopyroxen-Corona um Quarz-Linsen entwickelt (Abb. B.4.18).

Im Granat-Amphibolit bei Kernmarsch 925 (3796.14 m) treten Verwachsungen von orientiertem Biotit mit Plagioklas auf (Abb. B.4.19). Es könnte sich dabei um Biotit-Plagioklas-Pseudomorphosen nach Hellglimmer mit phengitischer Zusammensetzung als Produkt einer allochemen Reaktion handeln.

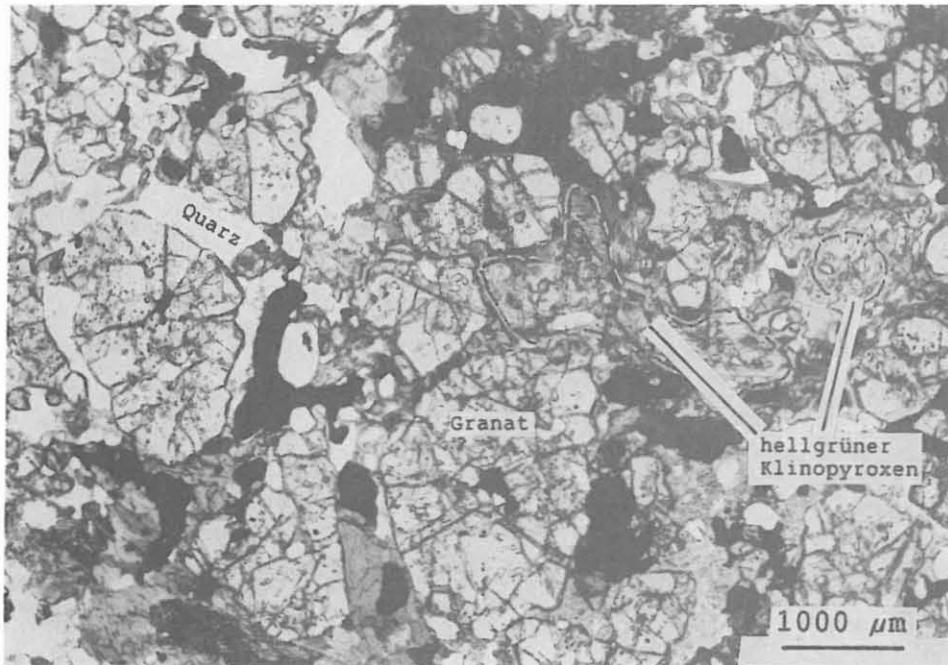


Abb. B.4.15: In diesem relativ quarzreichen Klinopyroxen-Granat-Amphibolit kommen keine Klinopyroxen-Symplektite vor. Der hellgrüne Klinopyroxen ist relativ Fe-reich und zeigt orientierte Amphibol-Einschlüsse durch retrograde Gleichgewichtsreaktion. DS 950B3b, 3868.11 m, //N.

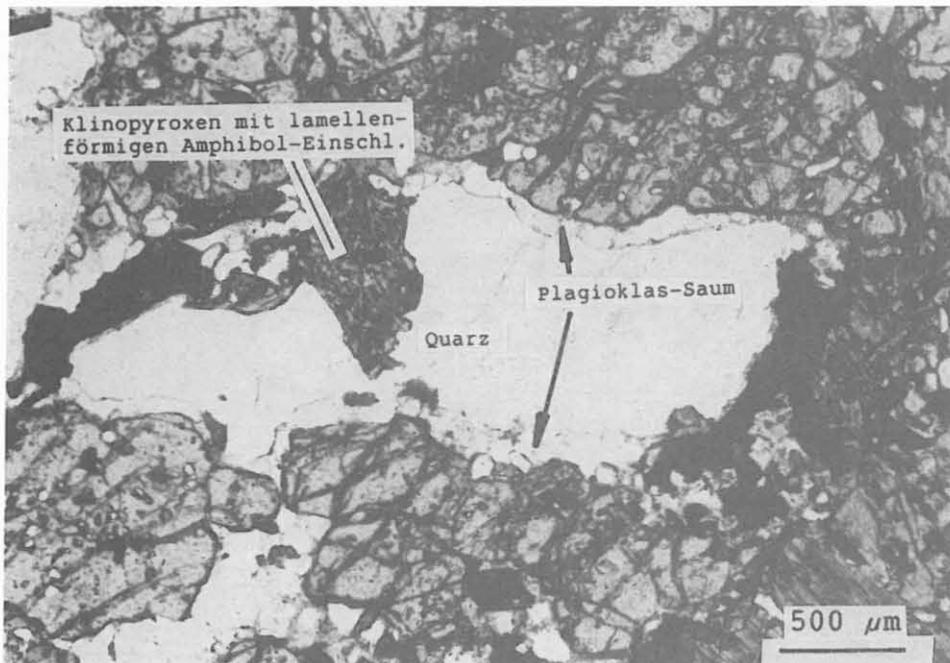


Abb. B.4.16: An der Grenze Granat-Quarz ist ein Plagioklas-Saum entwickelt. Relativ quarzreicher Klinopyroxen-Granat-Amphibolit. DS 950B3b, 3868.11 m, //N.

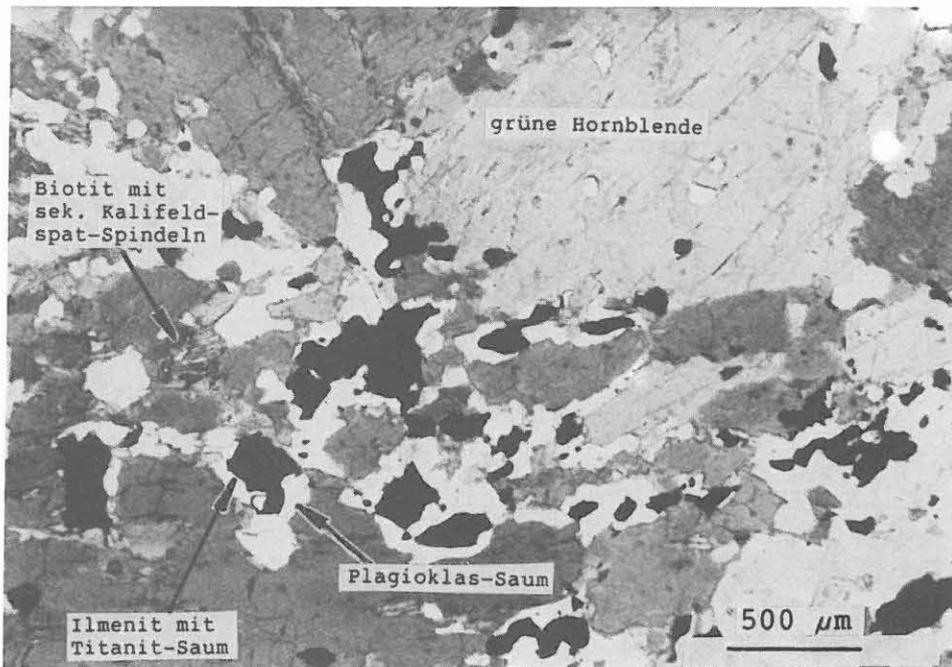


Abb. B.4.17: Plagioklas-Coronen sind in den Amphiboliten nicht nur um Granat sondern auch um Ilmenit (mit Titanit-Saum) verbreitet. Ilmenitreicher Granat-Amphibolit. DS 914D1k, 3735.14 m, //N.

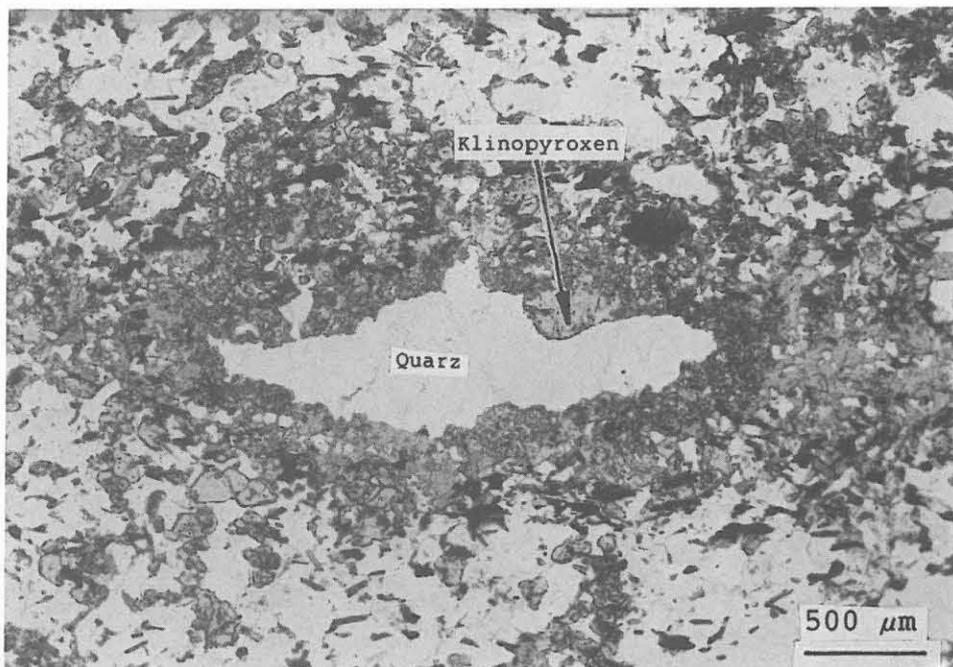


Abb. B.4.18: In diesem Hornblende-Biotit-Granat-Gneis sind um Quarz-Linsen Klinopyroxen-Coronen (\pm Hornblende \pm Biotit \pm Granat) entwickelt. DS 921F1x, 3774.40 m, //N.

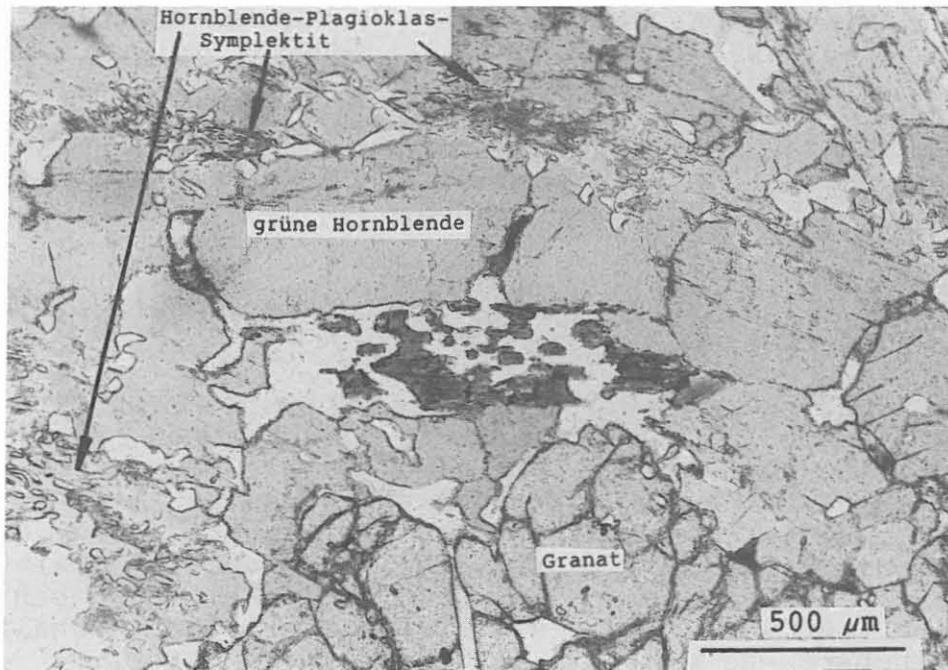


Abb. B.4.19: Aggregat (Bildmitte) aus Biotit und Plagioklas (eventuell eine Pseudomorphose nach phengitischem Hellglimmer) in Granat-Amphibolit. DS 925E1kK, 3796.14 m, //N.

Granat-Coronen in hochdruck-granulitischen Meta-Gabbros können in zwei Typen unterteilt werden (Abb. B.4.3):

- (1) Die Granate des Typs 1 führen u.a. Kyanit- und Plagioklas-Einschlüsse und sind zur Außenseite der Corona hin idiomorph entwickelt.
- (2) Die Granate des Typs 2 führen an ihrer Innenseite reichlich Quarz- und gelegentlich Klinopyroxen-Einschlüsse. Die Hornblende an der Innenseite der Granat-Corona ist zapfenförmig entwickelt (Abb. B.4.5). Die Granate sind nicht idiomorph.

Die beiden Typen unterscheiden sich auch in ihrer Zonierung: Bei Granat-Coronen des Typs 1 nehmen die FeO- und MnO-Gehalte nach außen geringfügig ab. Die CaO- und MgO-Gehalte verhalten sich unterschiedlich, bei Abnahme des CaO-Gehaltes nimmt der MgO-Gehalt in gleichem Maße zu (Abb. B.4.3 links). Granat-Coronen mit Einschluß-reicher Innenseite (Typ 2) weisen eine Abnahme des FeO- und MnO-Gehaltes bei gleichzeitiger Zunahme des MgO- und CaO-Gehaltes nach außen hin auf (Abb. B.4.3 rechts).

Abb. B.4.11 zeigt ein Brookit-Titanit-Ilmenit-Aggregat. In der KTB-VB wurden sie erstmalig in diesem Teufenabschnitt beobachtet (z.B. DS 948D9b, 3865.35 m). Die gleichen Brookit-Aggregate wurden auch an der Oberfläche in einem Amphibolit des Bohrplatzes beobachtet. Mikrosonden-Analysen der Minerale sind in Tab. B.8.1 aufgelistet. Die Genese dieser Aggregate ist noch unklar.

B.4.1.3 Geothermobarometrie des Hochdruck-Granulitfazies-Stadiums (vgl. RÖHR et al. 1990)

Die Mikrosonden-Analysen konnten mit freundlicher Unterstützung durch P. O'Brien und D. Krauß am Bayer. Geoinstitut, Bayreuth, durchgeführt werden.

Das Granat-Klinopyroxen-Thermometer wurde an drei Mineral-Paaren angewendet:

- (1) Meta-Gabbro 264H4nT (1269.6 m, Abb. in KEYSSNER et al. 1988: Abb. B.2.26): großer Klinopyroxen mit vielen Rutil-Einschlüssen, $Fe/(Fe+Mg)=0.15$. Um dieses Korn befindet sich - durch einen schmalen, retrograden Plagioklas- und Amphibol-Saum getrennt - eine Granat-Corona ($X(Fe)=0.39$, $X(Mn)=0.01$, $X(Mg)=0.37$, $X(Ca)=0.23$). Für einen angenommenen Druck von 10 kbar ergeben sich nach ELLIS & GREEN (1979) $800^{\circ}C$. Der Jadeit-Gehalt des Klinopyroxens von 14 % stört das Thermometer.
- (2) In dem Klinopyroxen- und Granat-reichen Hornblende-Gneis 619ElgK (2547.1 m) tritt ein Granat-Einschluß in Klinopyroxen auf (Abb. in KOHL et al. 1989: Abb. B.2.9 und Farbtitelbild KTB Report 89-4). Granat: $X(Fe)=0.55$, $X(Mn)=0.03$, $X(Mg)=0.12$, $X(Ca)=0.29$, Klinopyroxen: $Fe/(Fe+Mg)=0.33$. Für 10 kbar ergibt sich nach ELLIS & GREEN $720^{\circ}C$. Der Jadeit-Gehalt im Klinopyroxen beträgt hier nur vernachlässigbare 1 %.
- (3) Im Meta-Gabbro 885C3n (3620.7 m) tritt ein Klinopyroxen-Einschluß in einer Granat-Corona auf (Abb. B.4.6). Granat: $X(Fe)=0.49$, $X(Mn)=0.02$, $X(Mg)=0.30$, $X(Ca)=0.19$, Klinopyroxen: $Fe/(Fe+Mg)=0.22$, $X(Jd)=0.08$ (CPX 26, Tab. B.4.1). Für 10 kbar ergibt sich nach ELLIS & GREEN $740^{\circ}C$. Aus dieser Klinopyroxen-Analyse errechnet sich ein deutlicher Fe^{3+} -Gehalt. Berücksichtigt man diesen als Akmit-Komponente, ergibt sich eine um rund $100^{\circ}C$ niedrigere Temperatur.

Eine Druckabschätzung ist mit dem Jadeit-Gehalt im Klinopyroxen und der Paragenese mit Quarz möglich. Der höchste bisher gemessene Jadeit-Gehalt aus einem Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit beträgt 14 Mol-%. Mit dem Klinopyroxen-Aktivitäts-Modell von HOLLAND (1980:132) und einer Temperatur von $700^{\circ}C$ läßt sich damit ein **Mindestdruck** von **11 kbar** bestimmen. Das Vorliegen von Klinopyroxen-Plagioklas-Quarz-Symplektit läßt einen ehemals Jadeit-reicheren Klinopyroxen vermuten, der jetzt durch den Symplektit ersetzt ist. Der Mindestdruck erhöht sich dann entsprechend. Im Kernstück 264H4nT (1269.6 m) wurde ein Omphacit-Einschluß (Jd30) in Granat nachgewiesen. Die ehemalige Paragenese mit Quarz vorausgesetzt, errechnet sich daraus ein Mindestdruck

von 14 kbar.

Die Kyanit-Einschlüsse in einigen Granat-Coronen (Probe 885C3n, 3620.7 m, Abb. B.4.4) ermöglichen die Anwendung des Granat-Plagioklas- Al_2SiO_5 -Quarz-Thermobarometers (GPAQ), falls sie im Gleichgewicht mit Quarz und Plagioklas standen. Die An-Gehalte im Plagioklas dieser Paragenese sind nicht bekannt. Im Gestein wurden sehr variable An-Gehalte mit den Extremwerten An25 und An93 bestimmt. Die Zusammensetzung des Granats, der die Kyanit-Einschlüsse führt, ist: $X(\text{Fe})=0.43$, $X(\text{Mn})=0.01$, $X(\text{Mg})=0.31$, $X(\text{Ca})=0.26$. Es wurden die GPAQ-Formulierungen von NEWTON & HASELTON (1981) und GANGULY & SAXENA (1984) angewendet. Beide ergaben sehr ähnliche Werte. Für 700°C ergibt sich für An25 14 kbar, für An92 11 kbar. Bei 750°C ergeben für An25 16 kbar und für An92 12 kbar. Die ermittelten Drücke fallen alle in das Kyanit-Stabilitätsfeld.

Die Signifikanz der ermittelten Granat-Klinopyroxen-Temperaturen ist noch unsicher, da Störungen durch die spätere amphibolitfazielle Überprägung kaum abgeschätzt werden können. Die ermittelten Drücke im Bereich von 11-16 kbar sind mit dem Übergangsbereich Hochdruck-Granulitfazies/Eklogitfazies kompatibel.

Die p-T-Bedingungen der amphibolitfaziellen Prägung wurden an den vergesellschafteten Granat-Sillimanit/Kyanit-Biotit-Gneisen zu $660 - 710^\circ\text{C}$ bei 6-8 kbar (REINHARDT & KLEEMANN 1989) bestimmt. Der Übergang von der Hochdruck-Granulitfazies/Eklogitfazies zur Amphibolitfazies ist somit im wesentlichen eine isotherme Druckentlastung.

B.4.1.4 Deformations-Gefüge der Metabasite

Im Liegenden der beschriebenen Hochdruck-granulitischen Meta-Gabbros (KM 885C) sind die gleichen Meta-Gabbros in lokal begrenzten, geringmächtigen Scherzonen (z.B. KM 885G) unter Hochtemperatur-mylonitischen Bedingungen deformiert worden. Die sonst massigen Meta-Gabbros haben hier ein mittelkörniges Flasergefüge. Die Anisometrie der Plagioklasfasern bildet ein Streckungsgefüge ab, das überwiegend subhorizontal liegt, vereinzelt auch bis 50° einfällt. Die ehemals magmatischen Plagioklas-Leisten sind teilweise vollständig saussuritisiert und meistens feinkörnig rekristallisiert (Abb. B.4.12). Sie zeigen ein Pflastergefüge mit ebenen Korngrenzen und Tripelpunkt-Konfiguration. Nicht rekristallisierte, gröberkörnige Plagioklas-Altkörner sind selten erhalten. Die Hornblenden sind möglicherweise durch Subkornrotation (mündl. Mitt. G. Schalkwijk) feinkörnig rekristallisiert (Abb. B.4.20). Die Rekristallisate zeigen eine \pm einheitliche kristallographische Orientierung. Häufig sind größere Hornblende-Altkörner erhalten, die Schwärme feiner Rutilite eingeschlossen haben (Abb. B.4.21, ehemals Ti-reicher, magmatischer Klinopyroxen oder Hornblende).

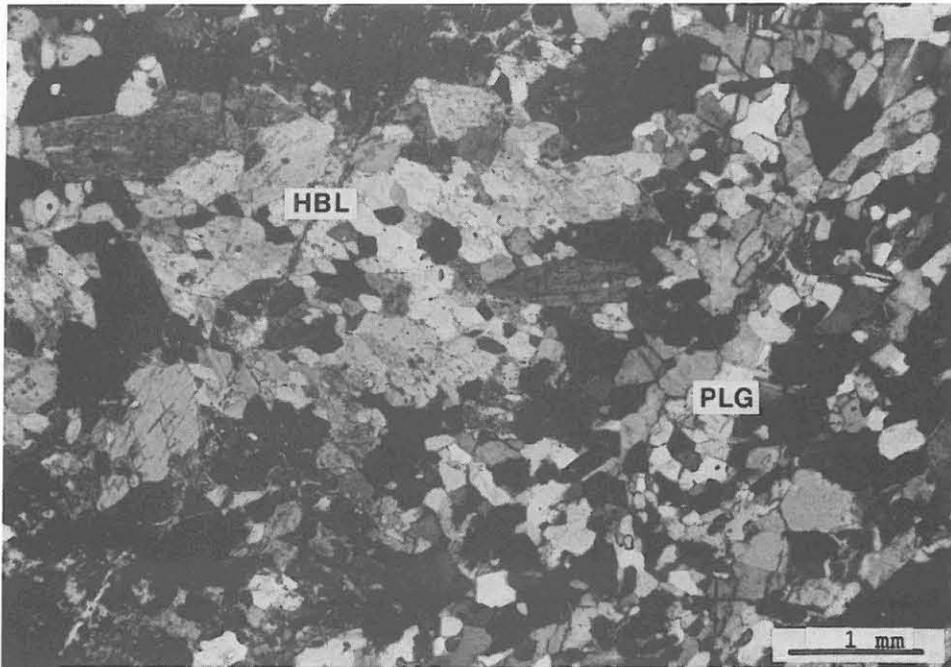


Abb. B.4.20: Hornblende (HBL)- und Plagioklas (PLG)-Rekristallite in deformiertem Metagabbro, DS 882H4bf, 3607.03 m, +N.

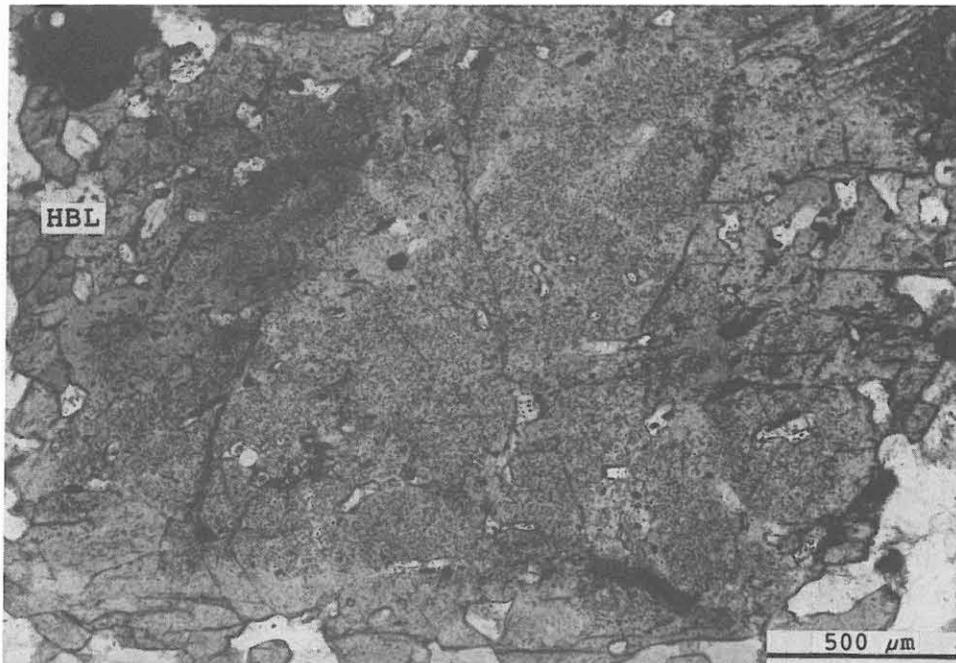


Abb. B.4.21: Rutil-Einschlüsse in großer Hornblende, links rekristallisierte Hornblendene (HBL); Metagabbro, DS 882H4bf, 3607.03 m, //N.

Die feinkörnig-dichten Amphibolite zeigen mikroskopisch ein Pflastergefüge aus grüner Hornblende und Plagioklas mit überwiegend ebenen Phasengrenzflächen. Plagioklas-reiche Lagen und vereinzelte Zeilenquarze definieren die Foliation. Die Zeilenquarze sind nicht rekristallisiert und weisen undulöse Auslöschung auf. Ein horizontal liegendes Streckungslinear wird durch stark unterschiedliche Längen und Breiten der Zeilenquarze und Plagioklas-Lagen erzeugt.

Im Dünnschliff 898C3gIII (3654.5 m) kommen 450 μm große Granate und 150 μm große Klinopyroxen-Plagioklas-Symplektite neben 150 μm großen granoblastischen Plagioklas- und Hornblende-Körnern vor. Dies legt nahe, daß dieses Gestein schon unter hochdruck-granulitischen Bedingungen feinkörnig war.

Das Streckungslinear in den Augengneisen und Metabasiten liegt nach vereinzelt Beobachtungen (u.a. Kernstück KST 941F1oK, 3847 m) parallel zur Faltenachse enger Falten.

B.4.1.5 Chemische Zusammensetzung

Die RFA- und RDA-Analysen der "granulitischen" Metabasite, d.h. der Amphibolite und Meta-Gabbros mit mikroskopisch erkennbaren Hochdruck-Gefügerelikten, sowie die der normalen Amphibolite, Granat-Amphibolite und Meta-Gabbros sind in Tab. B.4.2 aufgeführt. Die Analysen spezieller Typen (sehr Granat-reiche Amphibolite ("Granatite"), ein Epidot-Amphibolit und Biotit-Hornblende-Gneise) sind in Tab. B.4.3 zusammengefaßt.

Das $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ -Diagramm (Abb. B.4.22) zeigt, daß es sich um basaltische Gesteine mit Tendenz zu andesitischem (dioritischen) Chemismus handelt. Einige "Granatite" und Meta-Gabbros zeigen Übergänge zu ultrabasischer Zusammensetzung. Generell sind die Gesteine, in denen das gabbroide Gefüge noch erkennbar ist, SiO_2 -ärmer als die Amphibolite. Für die Meta-Gabbros im Teufenbereich 1160 - 1610 m war dagegen ein tendenziell höheres MgO/FeO -Verhältnis festgestellt worden (vgl. KEYSSNER et al. 1988: B45ff.). Die "granulitischen" Metabasite unterscheiden sich chemisch nicht von den Metabasiten ohne Hochdruckrelikte. Demzufolge ist die amphibolit-fazielle Überprägung im wesentlichen isochem verlaufen. Das bedeutet, daß der abweichende Chemismus der "Granatite" vermutlich primär magmatische Unterschiede widerspiegelt. Die "Granatite" unterscheiden sich von den anderen Metabasiten vor allem durch höhere Gehalte an Fe_2O_3 total, P_2O_5 , Zr (Abb. B.4.23 bis B.4.25), Y, Zn, U, (TiO_2) während MgO , K_2O , Rb, Cr und Ni niedriger liegen als bei den normalen Amphiboliten. Nicht im Alkali-Gehalt, wohl aber in den Gehalten an P_2O_5 und Zr tendieren die "Granatite" zu alkalibasaltischer Zusammensetzung. Bei diesen z.T. mehrere Meter mächtigen, Granatreichen Lagen, die fast immer diffuse Grenzen zu normalem Amphibolit zeigen, könnte es sich um Schmelznester oder frühe

Granulitische Metabasite

K_STK TEUFE	874H1z 3574.47	875B1oR 3576.31	877B3q 3585.83	880B4e 3598.97	884B1f 3613.35	885C3o 3620.18	891B1d 3645.58	891F1ai 3649.32
SiO2	47.9	46.6	48.5	47.8	46.6	46.9	49.0	48.9
TiO2	2.30	1.93	1.60	2.17	1.26	1.36	1.00	1.03
Al2O3	14.6	13.6	15.8	13.5	15.4	15.4	14.5	14.5
Fe2O3	13.00	12.03	10.70	13.24	10.80	10.40	9.82	9.83
MnO	0.19	0.18	0.15	0.20	0.15	0.14	0.15	0.15
MgO	6.99	7.19	7.45	6.59	10.16	7.78	8.67	8.28
CaO	9.80	9.68	9.10	10.06	9.28	9.55	10.14	10.28
Na2O	2.9	1.9	2.9	3.2	2.9	3.4	3.1	3.2
K2O	0.71	1.22	0.92	0.81	0.48	0.49	0.44	0.41
P2O5	0.32	0.25	0.21	0.41	0.18	0.22	0.11	0.10
Zr	150	136	137	231	109	120	74	68
Y	34	33	30	45	22	24	23	22
SR	178	208	291	150	297	299	212	205
RB	17	29	20	19	13	11	11	12
Zn	104	99	87	116	81	80	78	79
CU	<15	48	<15	42	59	49	48	53
NI	37	34	61	28	108	69	91	86
CR	203	232	192	228	121	114	281	288
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TH	57	<5	44	<5	<5	<5	<5	<5

QRZ	4	6	3	-	-	-	-	1
CHL	-	5	-	-	3	-	-	-
AMF	32	66	52	36	35	48	37	35
BIO	-	2	-	-	-	-	-	-
GNT	19	-	11	19	20	16	20	20
PLG	38	22	34	29	41	35	39	34
CPX	7	-	-	15	-	-	4	8

K_STK TEUFE	912D4n 3724.36	912F4p 3725.25	920G21K 3769.81	921C1n 3772.23	921D1o 3772.92	922E11K 3779.47	928E1oK 3808.95	936B1cK 3826.60
SiO2	49.8	50.7	51.7	49.2	50.5	47.3	48.4	45.9
TiO2	1.42	1.97	1.81	1.44	1.52	1.18	1.73	1.90
Al2O3	14.6	15.2	14.1	15.2	15.5	15.1	14.9	13.7
Fe2O3	10.00	10.95	11.27	10.28	10.04	10.38	10.83	11.70
MnO	0.14	0.16	0.17	0.15	0.15	0.16	0.18	0.17
MgO	6.26	4.76	4.94	7.05	6.77	8.99	6.71	6.28
CaO	9.27	8.64	8.74	8.63	8.45	9.53	8.58	9.30
Na2O	3.2	3.5	3.5	3.3	3.5	2.7	3.0	3.2
K2O	0.96	0.88	0.55	1.16	1.09	0.72	0.95	0.98
P2O5	0.21	0.35	0.23	0.22	0.26	0.13	0.26	0.38
Zr	125	181	147	146	160	104	156	195
Y	32	46	38	33	38	30	39	42
SR	207	178	180	224	216	190	221	220
RB	18	12	9	28	25	19	23	20
Zn	82	98	91	88	92	84	92	101
CU	28	36	42	29	33	51	23	1
NI	45	28	20	51	50	110	21	55
CR	206	81	65	205	204	249	257	149
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	38

QRZ	6	6	10	-	6	-	4	-
CHL	-	-	-	4	-	4	6	-
AMF	38	30	17	57	17	34	45	49
BIO	3	2	-	5	3	-	-	4
GNT	7	11	24	-	19	23	-	-
PLG	46	50	30	35	39	39	31	47
EPD	-	-	-	-	-	-	14	-
CPX	-	-	19	-	16	-	-	-

Tab. B.4.2: RFA- und RDA-Analysen von granulitischen Metabasiten, Granat-Amphiboliten, Amphiboliten und Meta-Gabbros.

- B 37 -

K_STK	936C1dK	939C1cK	939E1gK	949A1b	953B2f	953F2pK		
TEUFE	3827.10	3832.22	3833.83	3866.81	3873.47	3876.81		
SI02	47.4	46.3	46.9	49.5	46.5	49.5		
TIO2	1.82	1.75	1.20	1.16	1.32	1.09		
AL203	14.2	14.3	14.4	14.8	14.8	15.1		
FE203	10.84	10.97	10.08	9.73	11.04	9.24		
MNO	0.16	0.16	0.15	0.14	0.17	0.14		
MGO	6.02	7.11	8.40	7.03	8.13	7.51		
CAO	8.89	9.89	10.00	8.64	10.02	9.67		
NA2O	3.8	3.2	2.9	3.9	3.1	3.4		
K2O	1.19	0.85	0.54	1.09	0.82	0.89		
P2O5	0.38	0.35	0.15	0.10	0.13	0.11		
ZR	172	163	99	98	101	98		
Y	40	36	28	28	29	30		
SR	185	201	172	212	203	171		
RB	22	14	15	25	13	22		
ZN	89	91	80	85	84	73		
CU	42	48	46	42	45	47		
NI	54	65	95	75	88	77		
CR	150	202	169	116	160	156		
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5		
QRZ	-	-	-	-	-	2		
CHL	-	-	-	3	-	-		
AMF	31	38	43	49	55	27		
BIO	6	2	-	-	-	2		
GNT	9	9	14	-	-	10		
PLG	40	46	37	40	35	50		
EPD	-	-	-	-	10	-		
CPX	15	5	6	-	-	8		
Granat-Amphibolite								
K_STK	877E3x	877E3z	881A3c	882E4ak	888A3c	888E3n	889A1b	899A1a
TEUFE	3588.54	3588.89	3600.46	3604.66	3627.78	3630.96	3633.54	3657.90
SI02	51.0	47.4	49.1	45.9	47.3	49.8	48.8	47.3
TIO2	2.20	2.40	1.37	1.06	1.89	1.44	1.44	1.11
AL203	15.7	16.2	14.1	15.6	15.0	15.5	15.3	14.6
FE203	11.60	13.60	9.94	9.43	11.70	10.10	10.46	9.86
MNO	0.19	0.21	0.15	0.14	0.16	0.14	0.16	0.15
MGO	4.37	4.89	6.79	8.54	5.98	6.99	8.47	9.00
CAO	5.70	5.60	9.51	9.90	8.88	8.25	9.32	10.25
NA2O	3.0	3.4	3.1	2.7	3.7	4.1	3.0	2.8
K2O	0.66	0.96	0.97	1.05	0.72	0.77	0.78	0.39
P2O5	0.29	0.41	0.21	0.12	0.41	0.20	0.16	0.14
ZR	135	129	147	86	178	134	107	87
Y	30	29	29	20	34	27	28	24
SR	259	241	263	291	273	252	238	223
RB	12	19	17	26	8	15	18	9
ZN	115	138	89	69	118	87	76	78
CU	<15	<15	39	43	30	34	44	44
NI	32	36	36	75	64	69	81	96
CR	82	90	306	158	138	200	231	294
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TH	48	60	5	<5	<5	<5	<5	<5
QRZ	20	12	6	-	2	3	4	-
CHL	8	11	-	-	2	4	4	2
AMF	20	24	54	57	58	53	42	47
BIO	-	4	-	-	-	-	-	-
GNT	12	7	6	-	-	6	14	2
PLG	40	42	34	44	38	33	37	35
EPD	-	-	-	-	-	-	-	12
TIT	-	-	-	-	-	-	-	2

Tab. B.4.2: Fortsetzung.

K_STK	899E1m	900A1a	902C2g	907D1hk	921A1b	928C1k	944E6xT	
TEUFE	3661.05	3663.10	3672.62	3696.36	3770.53	3806.86	3858.30	
SI02	53.8	48.5	51.0	51.6	49.0	48.0	55.7	
TI02	0.89	1.37	1.40	1.32	1.43	1.58	1.30	
AL203	19.8	15.3	15.9	15.7	14.9	13.4	14.4	
FE203	6.38	10.10	9.90	9.64	9.78	10.86	8.21	
MNO	0.10	0.15	0.15	0.14	0.15	0.18	0.12	
MGO	3.68	6.80	7.08	5.34	7.04	7.39	4.34	
CAO	7.61	9.21	9.30	7.38	8.78	8.30	6.80	
NA2O	5.3	3.4	3.3	4.4	3.0	3.0	3.2	
K2O	0.63	0.60	0.59	0.97	1.10	0.93	1.42	
P2O5	0.25	0.30	0.21	0.16	0.23	0.23	0.25	
ZR	295	143	132	173	152	157	200	
Y	19	30	29	35	33	38	40	
SR	555	259	288	229	224	156	184	
RB	11	11	9	15	25	23	32	
ZN	56	94	80	85	85	89	78	
CU	26	34	31	32	30	23	<15	
NI	31	61	50	34	52	17	26	
CR	91	185	177	110	179	333	113	
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5	24	
QRZ	3	-	6	3	-	5	18	
CHL	-	-	3	4	-	8	-	
AMF	17	67	47	47	33	45	18	
BIO	-	-	-	-	3	-	-	
GNT	6	-	6	3	19	13	7	
PLG	74	33	37	42	44	29	44	
HGL	-	-	-	-	-	-	12	
Amphibolite								
K_STK	876B2ac	882G4ay	890B1e	898E3mk	903A1fT	905D4o	907C1gKII	908F1oK
TEUFE	3581.90	3606.30	3639.56	3655.44	3676.46	3684.95	3695.78	3703.82
SI02	51.1	65.7	48.2	53.3	54.3	48.4	51.5	47.8
TI02	1.41	0.32	0.96	0.85	1.16	1.31	0.92	1.88
AL203	14.9	16.3	14.7	15.3	15.9	14.5	18.3	14.4
FE203	9.82	2.35	9.95	8.35	8.17	9.74	6.09	11.35
MNO	0.16	0.02	0.15	0.13	0.11	0.15	0.08	0.16
MGO	5.77	2.29	8.83	6.65	4.74	6.38	2.19	6.95
CAO	6.85	3.58	9.30	8.11	7.42	9.55	5.70	10.24
NA2O	2.8	4.7	3.1	4.6	4.8	3.3	5.3	3.1
K2O	1.31	0.94	0.63	0.39	0.55	0.51	0.77	0.47
P2O5	0.32	0.00	0.08	0.12	0.14	0.16	0.31	0.33
ZR	138	21	71	110	100	99	283	140
Y	27	5	23	33	18	25	28	30
SR	248	311	259	197	427	298	288	112
RB	33	24	16	8	6	9	10	8
ZN	102	23	76	76	97	79	77	87
CU	35	<15	47	30	23	27	<15	42
NI	31	16	92	58	32	23	<15	50
CR	185	23	292	191	73	116	34	180
U	<5	<5	<2	<5	<5	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
QRZ	15	35	-	-	6	3	5	2
CHL	4	5	4	4	-	-	3	4
AMF	21	5	57	44	41	49	9	42
BIO	13	-	-	-	-	-	1	-
GNT	9	-	-	-	-	-	3	7
PLG	38	55	30	51	53	49	79	26
EPD	-	-	4	-	-	-	-	-
PRH	-	-	5	-	-	-	-	19
TIT	-	-	-	-	-	-	-	-
CPX	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. B.4.2: Fortsetzung.

K_STK	908G1q	911B1h	911D1w	912B4bk	916G1q	919A1a	919G1n	920A1c
TEUFE	3704.98	3716.60	3717.75	3722.05	3746.92	3758.90	3764.18	3764.76
SIO2	64.9	48.6	48.3	45.5	46.4	47.9	47.6	49.6
TIO2	0.49	1.11	0.63	1.13	1.73	1.91	1.60	1.56
AL203	17.0	15.6	12.0	13.9	15.2	15.4	15.2	15.1
FE203	4.34	9.10	11.34	11.16	11.03	11.18	10.94	10.24
MNO	0.07	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17
MGO	2.00	8.52	13.33	11.55	7.37	5.63	6.96	6.13
CAO	4.82	8.56	5.76	7.55	9.90	8.73	9.06	8.33
NA2O	6.1	3.2	2.5	2.8	2.8	3.3	3.1	3.4
K2O	0.48	1.30	0.89	0.90	0.70	0.80	1.19	1.29
P2O5	0.17	0.13	-	0.09	0.26	0.36	0.27	0.25
ZR	167	91	121	80	134	177	156	155
Y	18	24	19	21	32	35	32	38
SR	421	286	109	114	221	245	262	265
RB	9	30	12	30	13	14	33	39
ZN	45	71	111	80	110	92	96	90
CU	5	30	<15	22	41	38	29	21
NI	<15	90	164	104	80	54	30	24
CR	23	237	280	187	194	136	208	195
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5

QRZ	17	-	8	-	-	5	-	-
CHL	-	4	16	13	6	3	8	4
AMF	11	59	52	60	52	49	57	54
BIO	-	-	-	-	-	1	-	-
GNT	4	-	-	-	-	-	-	-
PLG	68	37	24	28	40	43	35	42
EPD	-	-	-	-	-	-	-	-
PRH	-	-	-	-	-	-	-	-
TIT	-	-	-	-	-	-	-	-
CPX	-	-	-	-	-	-	-	-

K_STK	922B1d	922C1q	926A1b	926D11	943C1s
TEUFE	3776.73	3777.63	3798.74	3801.91	3850.84
SIO2	47.5	46.6	45.0	49.8	48.1
TIO2	1.44	1.36	1.82	1.67	1.56
AL203	15.0	15.2	14.1	14.3	14.9
FE203	11.03	10.97	12.46	10.57	11.24
MNO	0.18	0.17	0.23	0.17	0.18
MGO	7.45	8.34	7.93	5.41	7.32
CAO	9.01	9.59	8.45	7.80	9.08
NA2O	2.8	2.6	2.9	3.6	3.1
K2O	1.12	0.67	0.88	1.43	1.12
P2O5	0.15	0.14	0.35	0.30	0.26
ZR	138	119	177	136	166
Y	37	33	39	45	35
SR	199	192	263	257	254
RB	28	17	32	29	30
ZN	90	90	116	96	95
CU	26	39	35	16	30
NI	67	89	71	43	62
CR	223	228	173	125	238
U	<5	<5	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5

QRZ	-	-	-	2	-
CHL	4	4	11	5	7
AMF	60	61	60	52	51
KFS	-	-	-	6	-
GNT	-	-	-	-	-
PLG	36	35	29	34	42
EPD	-	-	-	-	-
PRH	-	-	-	-	-
TIT	-	-	-	-	-

Tab. B.4.2: Fortsetzung.

- B 40 -

Meta-Gabbro

K_STK	882H4bf	883A1bK	885G3ak	900B7a	912D4gK	926A1b
TEUFE	3607.03	3607.15	3623.21	3663.63	3723.80	3798.74
SI02	45.8	45.9	47.1	47.5	46.4	45.0
TI02	1.26	1.17	1.38	1.58	1.49	1.82
AL203	16.2	16.2	16.0	14.9	14.6	14.1
FE203	9.59	10.22	10.00	10.69	11.04	12.46
MNO	0.14	0.15	0.14	0.16	0.16	0.23
MGO	7.86	8.95	7.85	6.73	8.05	7.93
CAO	9.61	9.61	9.77	9.27	9.56	8.45
NA2O	3.0	2.8	2.8	3.3	2.7	2.9
K2O	0.58	0.51	0.83	0.61	0.77	0.88
P2O5	0.17	0.13	0.17	0.36	0.23	0.35
ZR	109	99	124	133	125	177
Y	23	21	29	33	31	39
SR	313	319	317	249	247	263
RB	10	10	16	5	17	32
ZN	71	74	78	98	87	116
CU	50	58	29	36	62	35
NI	70	84	50	55	93	71
CR	100	103	123	185	200	173
U	<5	<5	<5	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5
QRZ	-	-	-	2	2	-
CHL	-	3	-	6	3	11
AMF	56	59	55	46	57	60
BIO	-	-	4	-	-	-
GNT	-	-	-	-	-	-
PLG	44	38	41	46	38	29

Tab. B.4.2: Fortsetzung.

Granatite

K_STK	891E1v	901G2s	914F1t	915B1bk	916B1f	936A1aK	938A1a	949A1e
TEUFE	3647.98	3669.21	3737.02	3739.47	3743.42	3825.40	3829.60	3867.22
SiO2	38.7	45.6	44.3	51.5	48.4	43.7	43.6	52.5
TiO2	3.21	2.95	3.74	2.21	2.82	3.93	3.84	1.62
Al2O3	13.0	14.4	13.5	13.9	16.4	13.3	13.6	14.8
Fe2O3	17.80	17.87	18.09	15.23	12.96	17.21	17.37	14.43
MnO	0.34	0.30	0.28	0.23	0.18	0.24	0.27	0.21
MgO	5.21	3.85	4.20	2.60	2.94	4.18	4.01	1.65
CaO	11.77	9.11	9.32	7.49	8.37	9.50	9.65	5.70
Na2O	1.9	2.3	3.3	4.5	4.4	2.6	3.0	5.3
K2O	0.70	0.32	0.42	0.27	0.38	0.35	0.25	0.34
P2O5	2.60	2.31	1.11	1.73	0.87	0.84	0.95	1.13
Zr	421	437	289	370	332	226	236	366
Y	90	59	57	56	46	64	57	58
SR	153	159	185	316	245	141	116	267
RB	7	3	4	<3	4	4	5	<3
Zn	154	109	149	165	120	140	115	119
CU	60	107	35	27	29	46	54	105
NI	24	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15
CR	18	<15	<15	<15	17	16	16	<15
U	5	5	<5	<5	<5	<5	6	<5
TH	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
QRZ	2	12	-	11	-	6	-	14
CHL	6	6	-	-	-	-	-	8
AMF	53	33	58	31	18	46	37	23
BIO	-	-	-	-	-	5	-	-
GNT	17	32	13	20	33	11	27	11
PLG	18	17	21	37	45	32	26	44
TIT	4	-	-	-	-	-	-	-
CPX	-	-	-	-	-	-	11	-

K_STK	950B3b	954F1n	955D1g
TEUFE	3868.04	3882.36	3886.19
SiO2	51.4	51.1	54.9
TiO2	2.05	1.66	1.42
Al2O3	13.4	15.9	16.0
Fe2O3	16.61	13.94	11.34
MnO	0.26	0.22	0.18
MgO	2.10	1.89	1.50
CaO	7.18	6.82	5.91
Na2O	4.2	5.1	6.3
K2O	0.23	0.93	0.93
P2O5	1.64	1.07	0.81
Zr	341	436	354
Y	65	56	57
SR	259	345	292
RB	<3	8	10
Zn	135	147	136
CU	31	117	18
NI	<15	<15	<15
CR	<15	<15	<15
U	<5	<5	<5
TH	<5	<5	<5
QRZ	13	7	6
CHL	2	3	-
AMF	27	46	28
BIO	-	-	3
GNT	29	7	6
PLG	29	37	57

Tab. B.4.3: RFA- und RDA-Analysen von Granatiten, Hornblende-Gneisen und Epidot-Amphibolit.

Hbl-Gneise				Epidot-Amphibolit	
K_STK	886D2p	946A1a	954C1d	K_STK	914A1dK
TEUFE	3626.42	3858.50	3879.33	TEUFE	3733.21
SiO2	48.6	53.0	60.7	SiO2	44.9
TiO2	1.95	1.48	0.77	TiO2	3.56
Al2O3	15.1	15.4	15.3	Al2O3	13.2
Fe2O3	11.65	9.12	5.70	Fe2O3	15.84
MnO	0.18	0.13	0.07	MnO	0.21
MgO	5.67	4.23	1.28	MgO	5.27
CaO	8.61	7.44	3.46	CaO	9.27
Na2O	3.3	3.6	6.4	Na2O	3.3
K2O	1.00	1.24	0.89	K2O	0.42
P2O5	0.32	0.29	0.21	P2O5	0.48
Zr	195	205	287	Zr	205
Y	44	44	36	Y	42
Sr	218	201	240	Sr	305
Rb	4	22	12	Rb	6
Zn	103	84	78	Zn	157
Cu	43	28	<15	Cu	18
Ni	33	26	<15	Ni	17
Cr	125	109	17	Cr	33
U	<5	<5	<5	U	<5
Th	<5	<5	<5	Th	<5
QRZ	5	11	17	QRZ	-
CHL	4	4	3	CHL	8
AMF	53	31	14	AMF	47
BIO	-	2	-	BIO	-
GNT	-	5	-	GNT	5
PLG	38	47	67	PLG	29
PRH	-	-	-	EPD	8
				PRH	-
				TIT	3

Tab. B.4.3: Fortsetzung.

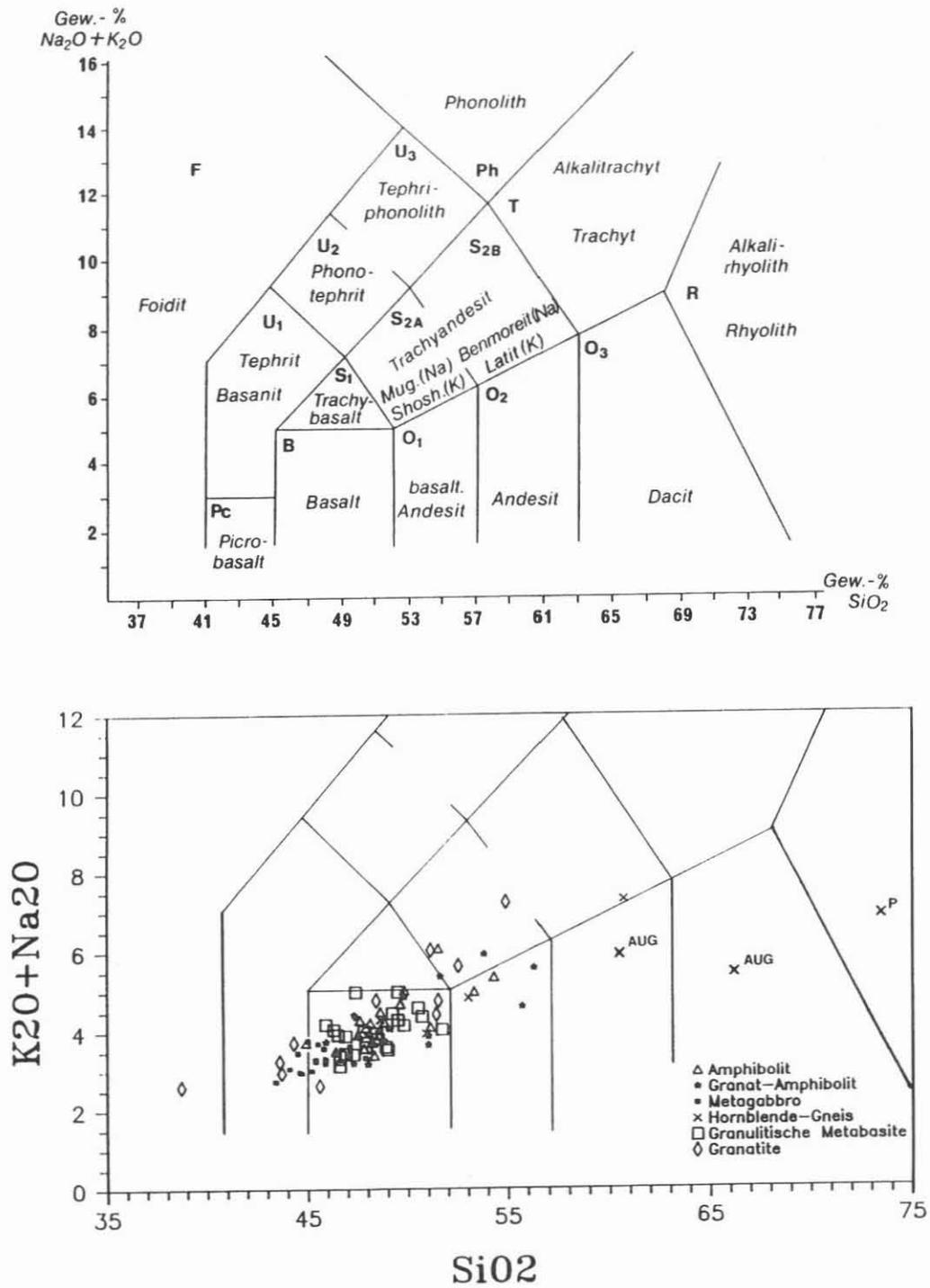


Abb. B.4.22: Metabasite im TAS-Diagramm (Le Maître 1984); AUG = Augengneise (3775.6-9 m, vgl. Kap. B.4.5), P = plagioklasreiche, leukokrate Gneislage (3703.9 m, vgl. Kap. B.4.4).

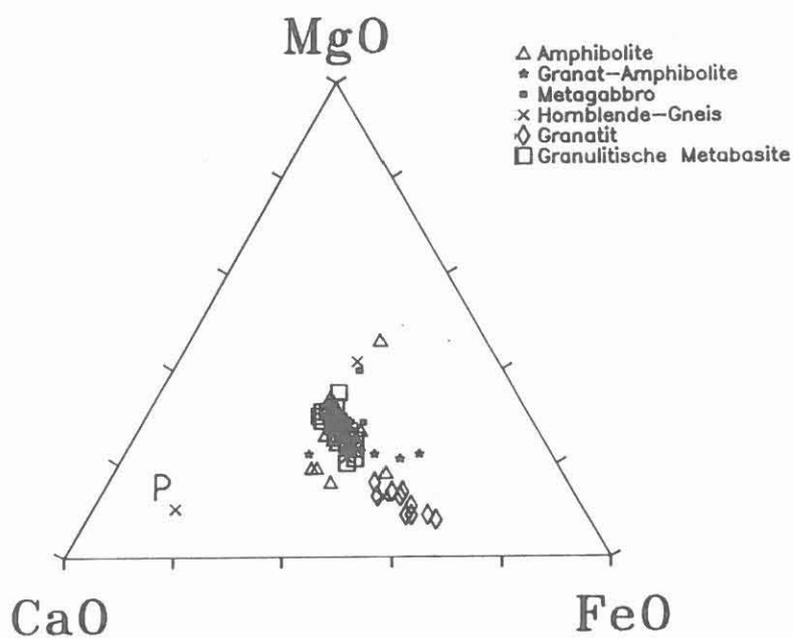


Abb. B.4.23: Metabasite im Dreieck MgO-CaO-FeO; P = Plagioklas-reiche, leukokrate Gneislage (3703.9 m, vgl. Kap. B.4.4).

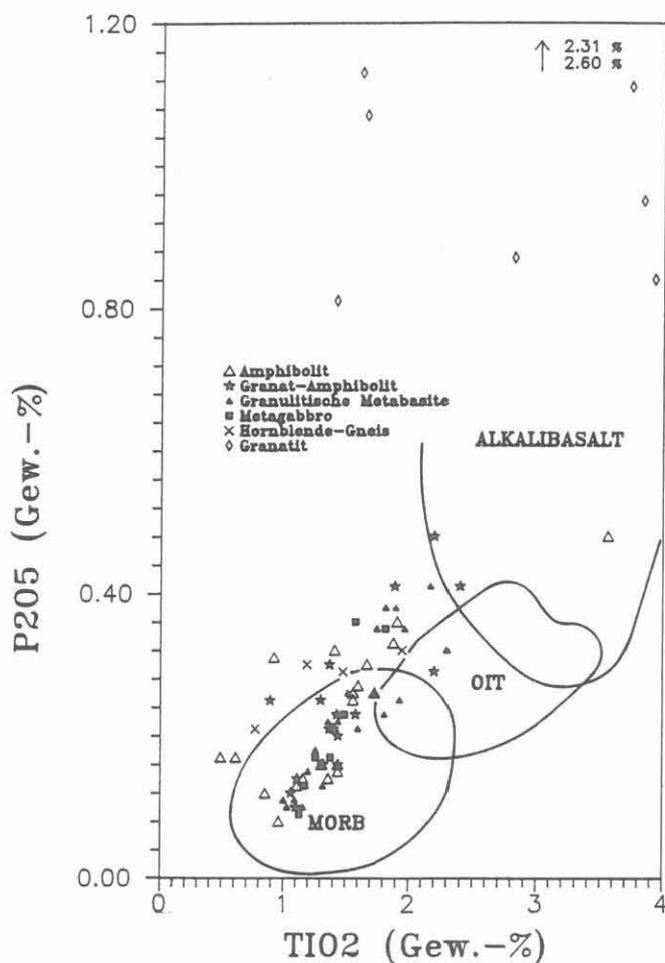


Abb. B.4.24: P₂O₅-TiO₂-Diagramm nach RIDLEY et al. (1974).

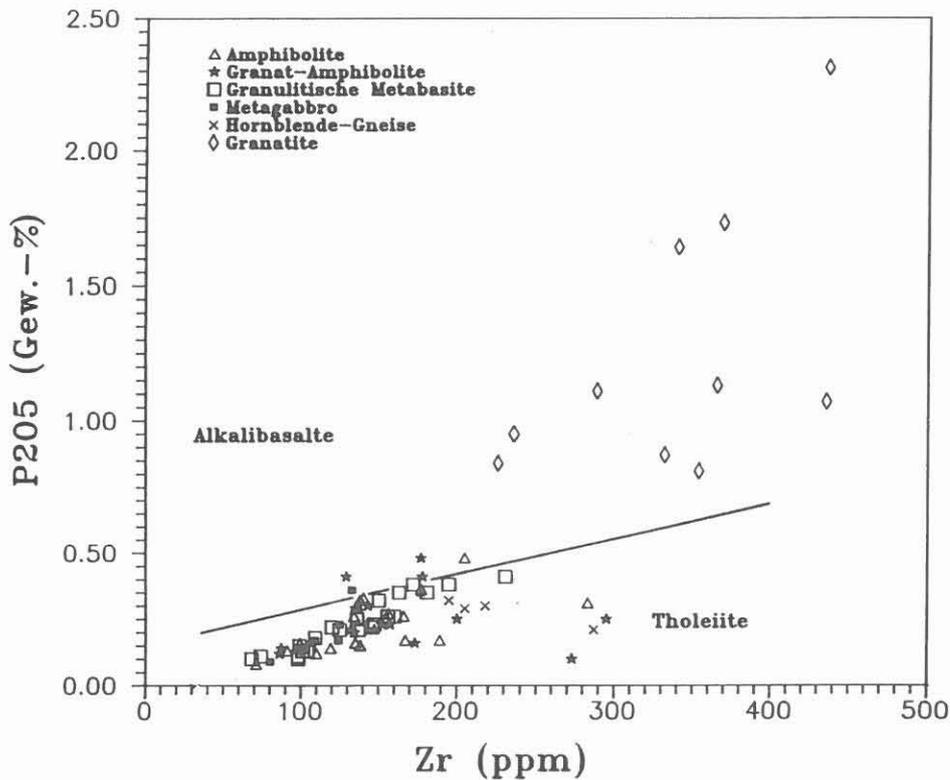


Abb. B.4.25: P_2O_5 -Zr-Diagramm nach WINCHESTER & FLOYD (1976).

Gänge im Gabbro gehandelt haben. Ähnlich hohen Fe-Gehalt wie die "Granatite" hat auch der Epidot-Amphibolit. Die Hornblende-Gneise haben z.T. einen etwas weniger basischen Chemismus.

B.4.2 Quarz-Feldspat-Mobilisate in den Metabasiten

Mobilisate sind fein- bis mittelkörnige (< 5 mm) Quarz-Feldspat-Anreicherungen. Ihre Ausbildung ist sehr variabel: sie bilden teils konkordante, teils diskordante Lagen, teils unregelmäßig begrenzte Schlieren. Einige Mobilisate sind massig, andere foliiert. Zu diesen Mobilisaten gehören auch die Meta-Aplite und Pegmatoide, die in Kapitel B.4.6 und B.4.7 beschrieben sind.

Bei Kernmarsch 953 (3877.3 m) treten quarzarme Mobilisate mit bis zu 2 cm großen, idiomorphen Hornblenden auf (Abb. B.4.26). Die Zwillingslamellen der bis zu 5 mm großen Plagioklase (bis 5 mm) sind verbogen. Die Korngrenzen sind meist suturiert oder zeigen feinkörnige Rekristallisate. Die idiomorphen Hornblenden haben z.T. idiomorphe Plagioklase eingeschlossen, die ihrerseits kleine Biotit-Einschlüsse aufweisen (Abb. B.4.27). Die Plagioklas-Einschlüsse sind verzwillingt, eine Rekristallisation an Korngrenzen ist nicht zu beobachten.

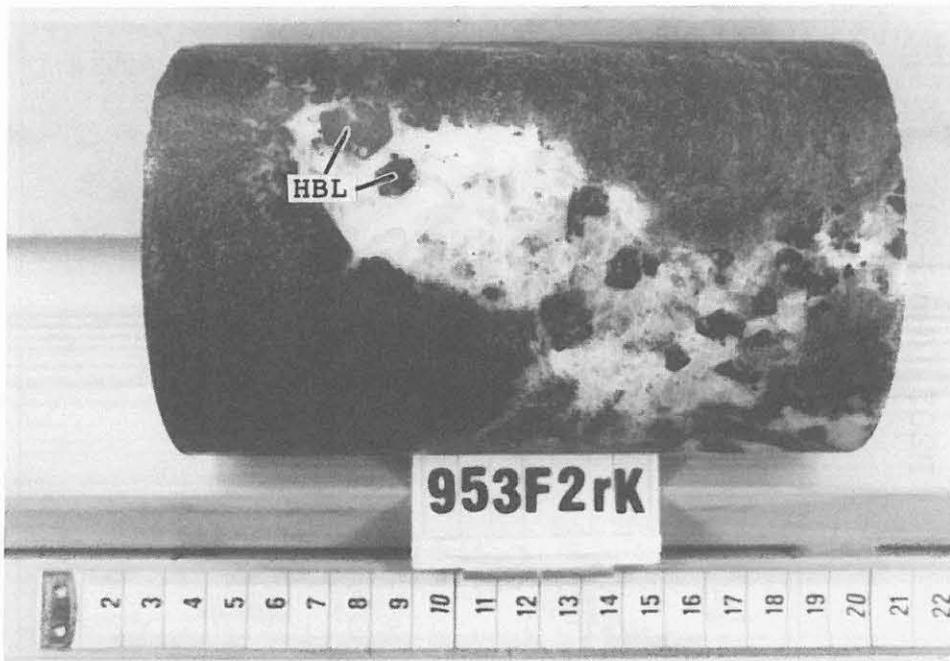


Abb. B.4.26: Quarz-Feldspat-Mobilisate mit großen Hornblendens (HBL) in Amphibolit, KST 953F2rK, 3877.3 m.

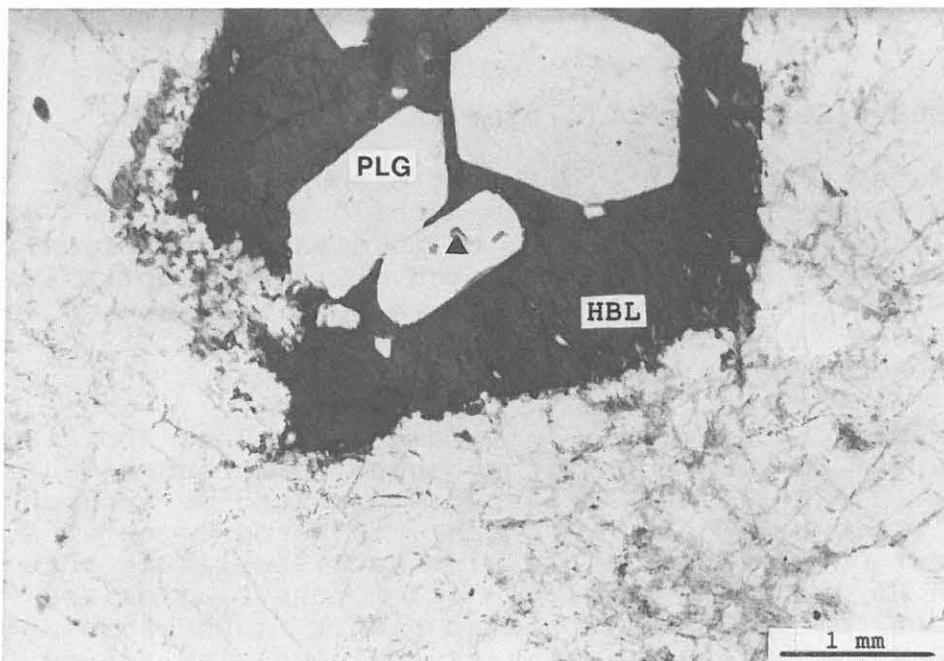


Abb. B.4.27: Hornblende (HBL) mit Plagioklas (PLG)-Einschlüssen (▲ = Biotit) in Quarz-Plagioklas-Mobilisat, DS 953F2rK, 3877.28 m, //N.

Die Variabilität der leukokraten Mobilisate geht wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Genese zurück. Neben primär magmatischer Genese zur Zeit der Gabbro-Intrusion muß mit einer Mobilisat-Genese zur Zeit des Hochdruck-Granulitfazies-/Eklogitfazies-Stadiums, des Amphibolitfazies-Stadiums und der späten, niedriggradigen Überprägung gerechnet werden.

B.4.3 Meta-Ultramafitite

Heterogener, teilweise Serpentin-reicher Chlorit-Amphibol-Fels

Von 3716.7 - 3720.2 m tritt der einzige, größere Meta-Ultramafitit-Körper unterhalb 3500 m auf. Ein zwischengeschalteter grobkörniger Meta-Gabbro (3717.5 - 3717.8 m) teilt den Körper in zwei Teile. Drei Dünnschliff-Beispiele machen die makroskopisch kaum zu erkennende Heterogenität deutlich:

- (1) Dünnschliff 911B1j (3716.92 m): das Gestein besteht im wesentlichen aus einer wirrstrahligen Matrix (um 500 µm) aus hellgrüner Hornblende mit einem farblosen Klino-Amphibol-Saum und Chlorit. Um 5 mm große, rekristallisierte Hornblende-Großkristalle mit fleckiger Durchstäubung mit Opakmineralen werden als magmatische Gefüge-Relikte gedeutet.
- (2) Dünnschliff 911FlahK (3719.51 m): Das Gestein wird durch 5-10 mm große, poikilitische Klinopyroxen-Porphyrroklasten charakterisiert, die randlich von hellbrauner bis hellgrüner, pargasitischer Hornblende verdrängt werden (Abb. B.4.28). Der Klinopyroxen und chloritisierter Biotit sind sehr reich an feinstkörnigen Ilmenit-Einschlüssen. Die poikilitischen Einschlüsse in den Porphyroklasten sind Pseudomorphosen nach Olivin und bestehen aus einem Talk-Amphibol-Kern, Serpentin und einem grünen Schicht-Silikat. Den Großteil des Gesteins nehmen feinstkörnige, symplektitähnliche Chlorit-Hornblende-Aggregate ein, die teilweise so um Kerne aus Amphibol oder Serpentin angeordnet sind, daß sie an Pseudomorphosen erinnern (Abb. B.4.29 u. B.4.30). Um 50 µm große braune Spinell-Körner werden von einer inneren Corona aus Cr-reichen Magnetit und einer äußeren Corona aus Magnetit umgeben (Abb. B.4.31 u. B.4.32). Mineral-Analysen aus diesem Gesteine sind in Tab. B.4.4 wiedergegeben.
- (3) Dünnschliff 911E1ad (3718.76 m): Farblose Klinoamphibole (um 800 µm lang) sind in diesem Typ in die Foliation eingeregelt. Daneben sind eine Reihe von Strukturen zu beobachten, die auf Pseudomorphosen schließen lassen:

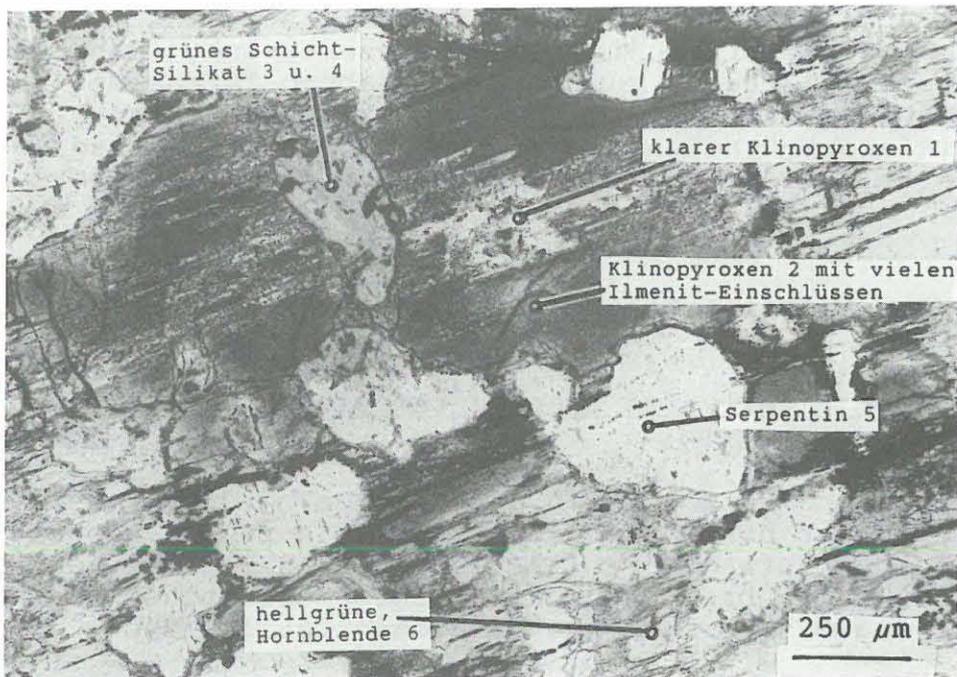


Abb. B.4.28: Übersicht über einen typischen poikilitischen Klinopyroxen-Porphyroklasten mit Serpentin-Pseudomorphosen nach Olivin. Die Punkte der Mikrosonden-Analysen sind markiert. Serpentinreicher Meta-Ultramafitit, PS 911FlahK, 3719.5 m, //N.

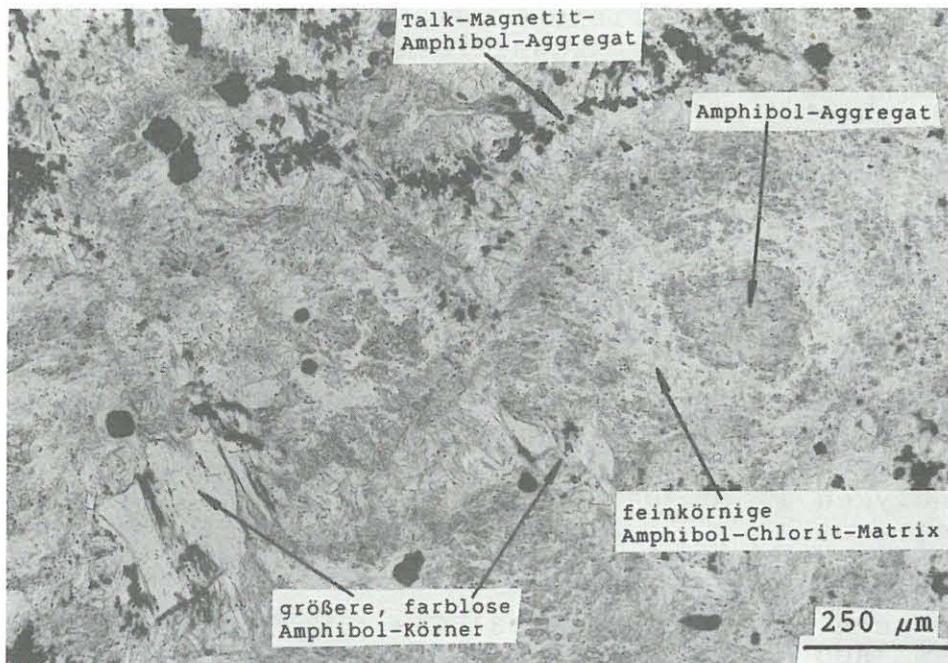


Abb. B.4.29: Übersicht über das Gefüge des serpentinreichen Meta-Ultramafitits mit Pseudomorphosen-ähnlichen Texturen. Serpentinrei. Meta-Ultramafitit, PS 911FlahK, 3719.5 m, //N.

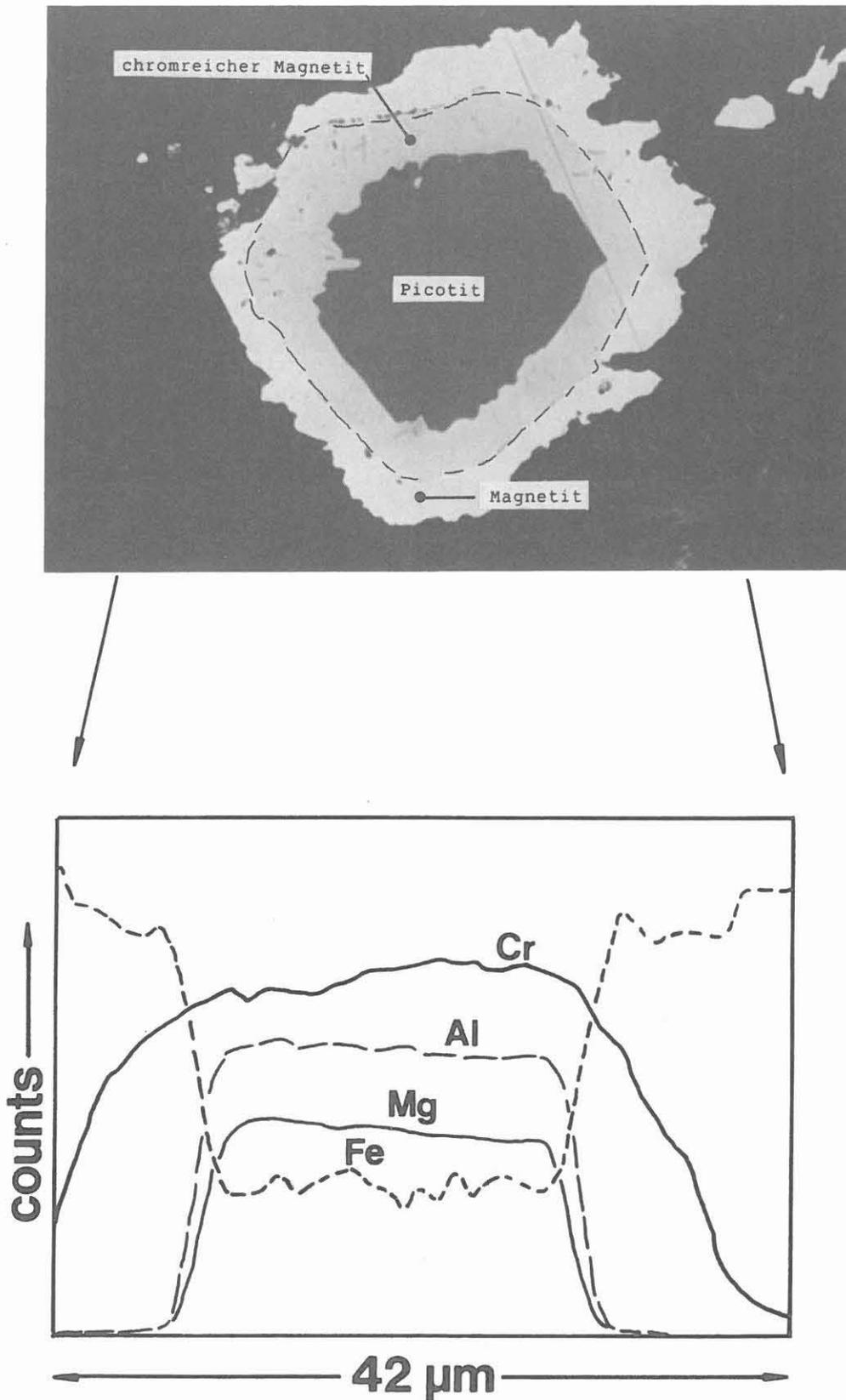


Abb. B.4.31: Die braunen Spinelle in dem serpentinenreichen Ultramafitit werden von einem inneren chromreichen Magnetit und einem äußeren, chromfreien Magnetit umgeben. Serpentinreicher Meta-Ultramafitit, PS 911FlahK, 3719.5 m.

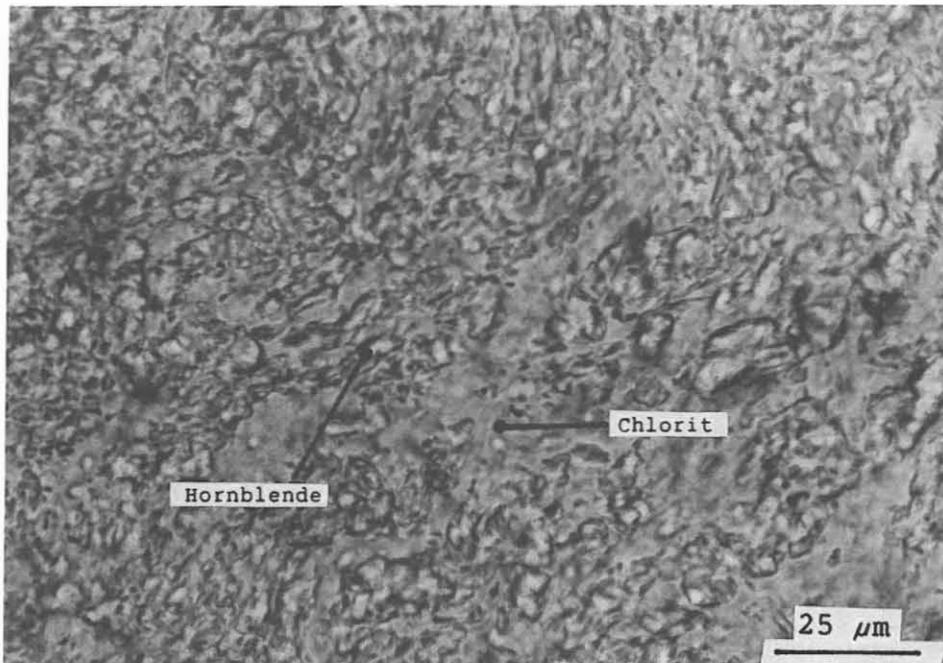


Abb. B.4.30: Die feinkörnige, symplektit-ähnliche Chlorit-Amphibol-Matrix im Detail. Serpentinreicher Meta-Ultramafitit, PS 911FlahK, 3719.5 m, //N.

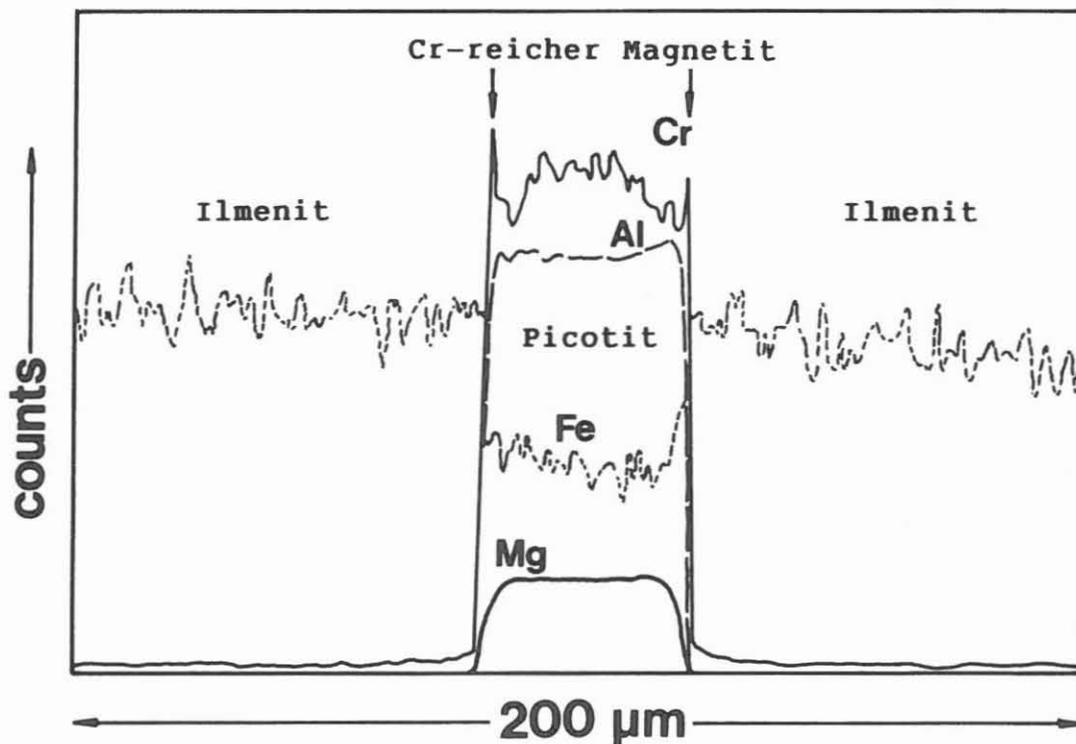


Abb. B.4.32: Mikrosonden-Profil über einen braunen Spinell-Einschluß in Ilmenit. Der braune Spinell wird durch einen schmalen Saum aus chromreichem Spinell vom Ilmenit getrennt. Die Cr-Zonierung ist hier deutlich von solchen Spinellen verschieden, die nicht in Ilmenit eingeschlossen sind (Abb. B.4.31). Serpentinreicher Meta-Ultramafitit, PS 911FlahK, 3719.5 m.

Amphibole

6Amf = sehr hellgrüner Amphibol, verdrängt vom Rand her den poikilitischen Cpx-Großkristall. Der Amphibol führt selber auch fundliche Serpentin-Einschlüsse Amphibol der Matrix. gröðeres Korn
7Amf = sehr hellgrüner Amphibol der Matrix, symplektitisch mit Chlorit verwechselt. Dieser "symplektit" ist Hauptbestandteil der Matrix.
Alle drei Amphibole sind parasitische Hornblenden.

Klinopyroxene

1 Cpx = frischer, klarer Cpx-reliktischer Teil eines poikilitischen Großkristalls (Einschlüsse aus Serpentin-Aggregaten)
2 Cpx = Cpx desselben Großkristalls aber sehr reich an winzigen, opaken Einschlüssen

Analyse	6Amf	7Amf	13Amf	Analyse	1 Cpx	2 Cpx
SiO2	43.57	45.17	43.20	SiO2	52.76	52.11
TiO2	0.38	0.34	0.09	TiO2	0.21	0.64
Al2O3	15.90	13.55	16.29	Al2O3	1.62	3.37
Cr2O3	0.09	0.07	0.05	Cr2O3	0.39	0.82
FeO	5.86	6.42	7.22	FeO	3.73	4.39
MnO	0.10	0.14	0.21	MnO	0.12	0.16
NiO	0.04	0.06	0.02	NiO	0.00	0.04
MgO	16.41	17.32	16.94	MgO	15.95	15.89
CaO	10.70	10.17	9.72	CaO	21.12	19.23
Na2O	3.25	2.97	2.91	Na2O	0.46	0.69
K2O	0.15	0.10	0.09	K2O	0.01	0.00
Summe	96.45	96.31	96.74	Summe	96.37	97.34
Si	6.260	6.492	6.204	Aliv	0.000	0.000
Al	1.741	1.509	1.796	Si	1.998	1.954
Fe3+	-	-	-	Ti	0.006	0.018
Ti	-	-	-	Alv	0.072	0.149
Sum2	8.000	8.000	8.000	Cr	0.012	0.024
Al	0.953	0.788	0.962	Fe3+	0.000	0.000
Ti	0.041	0.037	0.010	Fe2+	0.118	0.138
Cr	-	-	-	Mn	0.004	0.005
Fe3+	0.010	0.008	0.006	Ni	0.000	0.001
Mg	3.514	3.710	3.626	Mg	0.900	0.888
Fe2+	0.482	0.458	0.397	Ca	0.857	0.773
Mn	-	-	-	Na	0.034	0.050
Ca	-	-	-	K	0.005	0.000
SumY	5.000	5.000	5.000	Sum	4.000	4.000
Mg	-	-	-	Kosmoc	1.184	2.474
Fe2+	0.222	0.314	0.470	Jadett	2.290	2.632
Mn	0.012	0.017	0.026	TiFsch	0.606	1.837
Ca	1.647	1.566	1.496	CaTsch	1.915	4.426
Na	0.119	0.103	0.009	DiHdJo	84.371	72.366
SumX	2.000	2.000	2.000	EnFsrh	9.634	16.265
Ca	-	-	-	Wollast	0.000	0.000
Na	0.787	0.725	0.802	Fe2/PH	0.116	0.134
K	0.027	0.018	0.017			
SumA	0.814	0.743	0.819			

Tab. B.4.4: Mikrosonden-Analysen von Klinopyroxen, Amphibolen und anderen Mineralen des serpentinitreichen Meta-Ultramafits 911F1ahK (3719.5 m).

Schichtsilikate

3grün = grüne Phyllosilikat, das zusammen mit Serpentin die runden Einschl. im poikilit. Cpx-Großkristall bildet
4grün = wie 3
12CHL = Chlorit, der zusammen mit 13 Amf, die symplektitähnliche Verwachsung bildet. Hauptbestandteil der Matrix. (= Klinochlor)
5Serp = Serpentin. Rundlicher Einschluss (Olivin-Pseudomorphose) in poikilit. Cpx-Großkristall
8Talk = Talk aus der Matrix

Magnetit, Chromit, Spinell, Ilmenit

9MGN = Magnetit neben Graphit
11MGN = Magnetit, netzförmig
14SPI = Zentrum des braunen Spinells mit Magnetitsaum
15MGN = chromreicher Magnetit-Saum um braunen Spinell-Einschluss, nahe am Spinell
16MGN = Magnetit-Saum um braunen Spinell-Einschluss, am Außenrand
17MGN = zwischen 15MGN und 16MGN
20SPI = Zentrum des braunen Spinell-Einschlusses in großem Ilmenit
21SPI = Rand des braunen Spinell-Einschlusses in großem Ilmenit
19ILM = großer Ilmenit, mit braunem Spinell-Einschluss, Mn-reich

Analyse	9MGN	11MGN	14SPI	15MGN	16MGN	17MGN	20SPI	21SPI	19ILM
SiO2	0.05	0.14	0.01	0.05	0.04	0.04	0.01	0.02	0.00
TiO2	0.03	0.04	0.01	0.38	0.07	0.18	0.42	0.77	54.22
Al2O3	0.02	0.02	43.30	0.78	0.03	0.23	41.73	42.66	0.01
Cr2O3	0.02	0.00	20.75	15.85	1.48	11.08	20.71	18.87	0.09
FeO	93.24	92.67	25.23	75.06	91.02	80.10	23.67	25.00	40.42
MnO	0.02	0.02	0.00	1.07	0.00	0.45	0.00	0.00	4.75
NiO	0.07	0.18	0.10	0.06	0.09	0.14	0.12	0.12	0.00
ZnO	0.00	0.00	0.35	0.87	0.02	0.43	0.42	0.84	0.00
HgO	0.01	0.05	9.94	0.16	0.05	0.09	10.13	9.12	0.28
CaO	0.04	0.09	0.00	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
Na2O	0.02	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
K2O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Summe	93.52	93.21	99.70	94.36	92.83	92.86	97.23	97.42	99.79
Ti	0.001	0.001	0.000	0.011	0.002	0.005	0.009	0.017	1.032
Al	0.001	0.001	1.477	0.035	0.001	0.011	1.460	1.495	-
Cr	0.001	0.000	0.475	0.480	0.045	0.341	0.486	0.444	-
Fe3	1.993	1.986	0.047	1.459	1.946	1.635	0.035	0.026	0.000
Sum	1.997	1.993	1.999	1.987	1.996	1.993	1.990	1.982	1.032
Fe2	1.002	1.003	0.564	0.944	1.000	0.974	0.552	0.595	0.856
Mg	0.001	0.003	0.429	0.009	0.003	0.005	0.448	0.404	0.011
Mn	0.001	0.001	0.000	0.035	0.000	0.015	0.000	0.000	0.102
Zn	0.000	0.000	0.007	0.025	0.001	0.012	0.009	0.018	-
Sum	1.003	1.007	1.001	1.013	1.004	1.007	1.010	1.018	0.968

Analyse	3grün	4grün	12CHL	5Serp	8Talk
SiO2	44.70	35.36	30.99	44.27	59.44
TiO2	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Al2O3	8.42	12.38	18.18	0.59	1.85
Cr2O3	0.31	0.54	0.00	0.01	0.00
FeO	14.01	19.28	7.87	7.07	4.12
MnO	0.07	0.10	0.12	0.27	0.03
NiO	0.23	0.33	0.14	0.05	0.16
MgO	23.47	20.22	29.26	36.06	29.33
CaO	0.28	0.54	0.09	0.02	0.01
Na2O	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02
K2O	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Summe	91.52	88.79	86.68	88.36	94.98

Tab. B.4.4: Mikrosonden-Analysen von Klinopyroxen, Amphibolen und anderen Mineralen des serpentinitreichen Meta-Ultramafits 911F1ahK (3719.5 m).

- (a) Chlorit-Opakmineral-Kern mit Klinoamphibol-Saum
- (b) Chlorit-Klinoamphibol-Aggregate mit Erzstaub
- (c) Chlorit-Talk-Aggregate
- (d) große Aggregate aus Opakmineralen (u.a. Ilmenit) + Klinoamphibol + Serpentin + Talk
- (e) Serpentin-Aggregate
- (f) Opakmineral-Aggregate

Die beiden vorliegenden chemischen Analysen der Kernstücke 911B1j und 911E1ad sind im Gegensatz zum Modalbestand sehr ähnlich (Tab. B.4.5, vgl. VON GEHLEN et al. 1990).

Geringmächtige Meta-Ultramafitit-Lagen und -Linsen

Hornblendite

Kurz unterhalb des oben beschriebenen großen Meta-Ultramafitit-Körpers treten noch um 5 cm große Linsen als Einschluß in Amphibolit auf: der Einschluß in Kernstück 912B4bK (3722.05 m) ist ein Hornblendit, der chloritisierten Biotit und sehr wenig Plagioklas führt. Der Chlorit-Hornblendit-Einschluß im Kernstück 912D4gK (3723.80 m) ist reich an Opakmineralen. Der Kontakt zum einschließenden Meta-Gabbro ist reich an Pseudomorphosen nach Granat. Die unmittelbare Begrenzung des Einschlusses gegenüber dem Meta-Gabbro bildet eine schmale Plagioklas-Quarz-Lage, die reliktsch Einschlußreichen Granat (mit Rutil-Einschlüssen) führt. In ihrer chemischen Zusammensetzung (Tab. B.4.5) ähneln diese beiden Proben den Meta-Gabbros und sind mit SiO_2 -Gehalten knapp über 45 % auch nicht ultrabasisch.

Klinopyroxenite

In Granat-reichen Amphiboliten ("Granatit") treten bei Kernmarsch 939 (3830.90 m) zwei max. 2 cm mächtige, feinkörnige Schlieren mit dunklem Saum auf (Abb. B.4.33). Die feinkörnigen Schlieren haben ein Interngefüge aus Lagen von teilweise in Hornblende umgewandelten Klinopyroxenen (Salit, Jd3) und deutlicher deformierten Hornblende-Quarz-Lagen. Weiterhin sind Opakminerale und Apatit häufig. Die Hornblenden in den Schlieren sind blaß-grün. Der dunkle Saum zum Amphibolit besteht aus den gleichen oliv-grünen Hornblenden wie im einschließenden Amphibolit.

Im Kernstück 917B1d (3748.4 m) treten maximal 3 cm große, hellgrüne, lappig-buchtige Meta-Ultramafitit-Schlieren mit dunkelgrünem Saum auf. Sie werden von einem Biotit-reichen Granat- Klinopyroxen- Hornblende- Plagioklas- Gestein eingeschlossen. Der hellgrüne Kernbereich besteht aus diablastisch verwachsenen Klinopyroxen-Amphibol-Körnern, etwas Quarz und wenigen Körnchen Rutil und Ilmenit, jeweils mit Titanit-Saum. Der makroskopisch dunkelgrüne Saum der Schlieren besteht aus Hornblende.

Ultramafitite

K_STK	911B1j	911E1ad
TEUFE	3716.78	3718.60
SI02	43.0	43.9
TI02	0.66	0.70
AL2O3	7.6	6.5
FE2O3	12.34	12.56
MNO	0.21	0.15
MGO	26.01	27.48
CAO	5.20	5.09
NA2O	0.2	0.5
K2O	0.10	0.10
P2O5	0.04	0.05
ZR	53	55
Y	15	16
SR	28	68
RB	7	11
ZN	94	75
CU	16	25
NI	637	639
CR	1523	1473
U	<5	<5
TH	<5	<5
QRZ	-	-
CHL	30	29
AMF	70	54
PLG	-	-
SRP	-	12
TALK	-	6

Tab. B.4.5: RFA- und RDA-Analysen Meta-Ultramafititen.

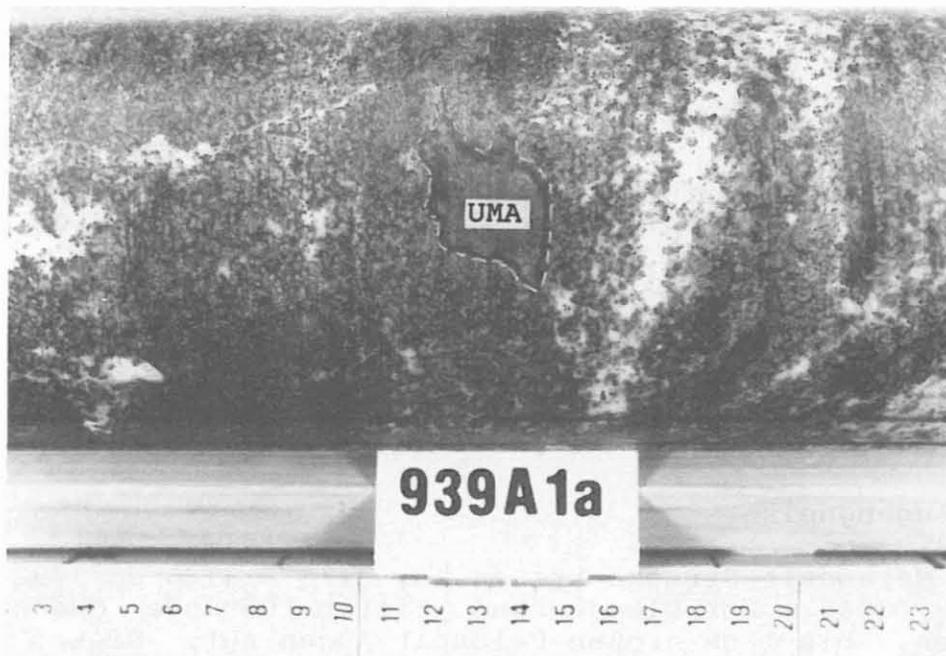


Abb. B.4.33: Meta-Ultramafitit-Linse(UMA) in Granat-Amphibolit, KST 939A1a, 3831.0 m.

In der oberen Metabasit-Abfolge (1160 - 1610 m) kommen ähnliche hellgrüne Klinopyroxenit-Schlieren mit dunkelgrünem Saum vor (KEYSSNER et al. 1988: B30 ff)

B.4.4 Granat- und Hornblende-führende, Plagioklas-reiche Gneise

In den feinkörnig-dichten Amphiboliten treten zwischen 3652 - 3654 m zentimetermächtige Einschaltungen eines feinkörnig-dichten, leukokraten Plagioklas-Gesteins auf, das sehr straff eingeregelt Granat- und Hornblende-Lagen enthält.

Es handelt sich bei diesen Gesteinen vermutlich um ehemalige leukokrate Lagen oder Quarz-Plagioklas-reiche Gänge, die mit ihrem Rahmengestein deformiert und metamorph wurden.

Der straffe Lagenbau fehlt in Schnitten senkrecht zum Linear; die mafischen Lagen zeigen hier eine flaserige Einregelung. Die Anordnung der Minerale bildet annähernd ein stengeliges Gefüge ab. Mikroskopisch bestehen die leukokraten Lagen aus vollständig rekristallisiertem, feinkörnigem Plagioklas. Die dunklen Lagen bestehen aus feinkörnigem Granat, der in Bahnen perlschnurartig angeordnet ist, oder aus feinkörnigen Hornblende-Lagen, die von einem Saum feinkörniger Granate umschlossen werden. Die Hornblende-Lagen führen vereinzelt Klinopyroxen (Abb. B.4.34). WEBER et al. (1989) rekonstruierten aus den dunklen Lagen das finite strain-Ellipsoid der HT-mylonitischen Verformung und gaben Achsenverhältnisse (X:Y:Z) von 50:3:1 an, also ausgeprägt prolate Verformung (Streckung).

Chemisch unterscheiden sich diese Gneise durch hohe $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - und sehr niedrige $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnisse von allen anderen Gneisen (Abb. B.2.6, Tab. B.4.6).

Ähnliche leukokrate Plagioklas-Gesteine sind bei Kernmarsch 907 (3695 m) und 908 (3704 m, Abb. B.4.35) im Amphibolit eingeschaltet. Sie erscheinen nicht so stark deformiert und haben wechselnde Gehalte an Hornblende und Granat.

B.4.5 Augengneise

In der Metabasit-Strecke treten bei 3773 - 3776 m, 3792 m und 3840 - 3846 m Hornblende- und Biotit-führende Gneise mit häufigen, bis 1 cm großen Feldspat-Augen auf. Diese Augengneise werden als geringmächtige, SiO_2 -reiche, späte, aber noch prä-metamorphe Intrusionen in die Metabasit-Einheit gedeutet. Die Granat-, Hornblende- und Biotit-Gehalte sind stark wechselnd. Im Hangenden und Liegenden sind Übergänge zu fein- bis mittelkörnigen Amphiboliten bzw. Granat-Amphiboliten und eine Abnahme der Größe und Anzahl der Feldspat-

Augen-Gneise			Plg-Gneise		MTA-Aplite	
K_STK	921G1ae	922A1b	908F1oKI	878H1bd	880A1b	
TEUFE	3775.63	3775.92	3703.92	3595.97	3598.18	
SiO2	60.4	66.2	73.2	75.2	78.8	
TiO2	1.01	0.60	0.14	0.11	<0.05	
Al2O3	16.9	16.3	15.7	13.5	12.9	
Fe2O3	7.06	4.07	0.91	1.11	0.38	
MnO	0.11	0.06	0.02	0.02	0.04	
MgO	2.10	1.31	0.56	0.67	<0.10	
CaO	4.07	4.14	4.01	1.64	1.26	
Na2O	4.4	4.7	6.3	5.4	5.2	
K2O	1.50	0.81	0.54	0.81	1.55	
P2O5	0.27	0.16	-	-	-	
Zr	428	272	32	28	46	
Y	43	28	7	31	38	
SR	171	176	153	168	87	
RB	28	14	9	9	11	
Zn	98	42	<20	20	<15	
CU	18	43	<15	<15	<15	
NI	15	<15	<15	<15	<15	
CR	40	27	<15	<15	<15	
U	<5	<5	<5	<5	<5	
TH	12	10	<5	9	5	
QRZ	29	27	26	39	42	
CHL	4	3	-	2	-	
BIO	6	6	-	-	4	
GNT	-	-	-	-	-	
PLG	61	63	61	59	54	
AMF			3	-	-	
PRH			10			

Tab. B.4.6: RFA- und RDA-Analysen von Hornblende-führendem Biotit-Augengneisen, Plagioklas-reichem Gneis, und Meta-Apliten.

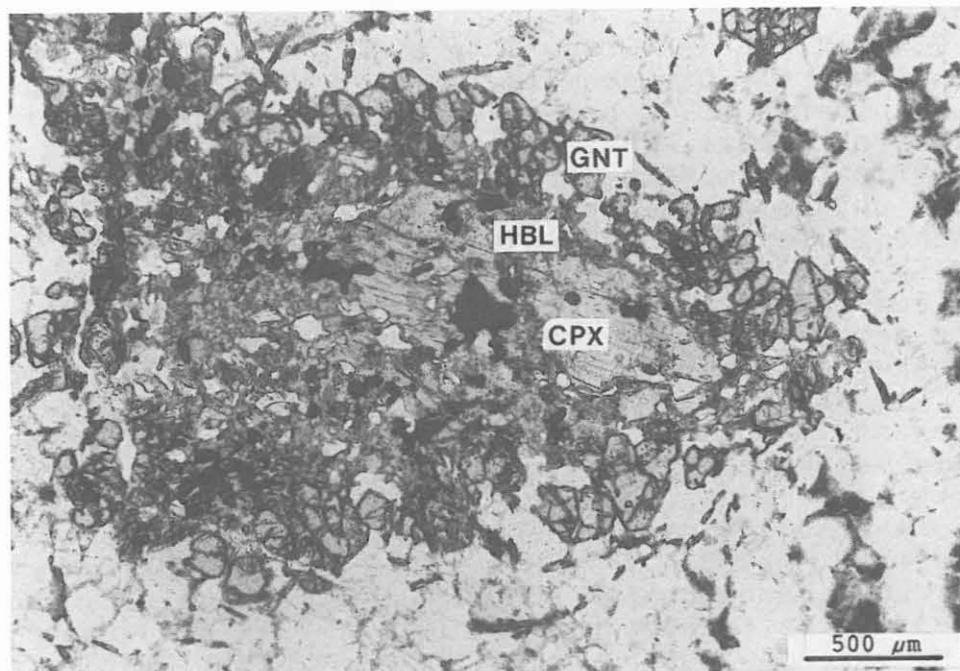


Abb. B.4.34: Klinopyroxen (CPX) mit Hornblende (HBL)- und Granat (GNT)-Saum, Plagioklasreicher Gneis, DS 898C3g+L, 3654.47 m, //N.

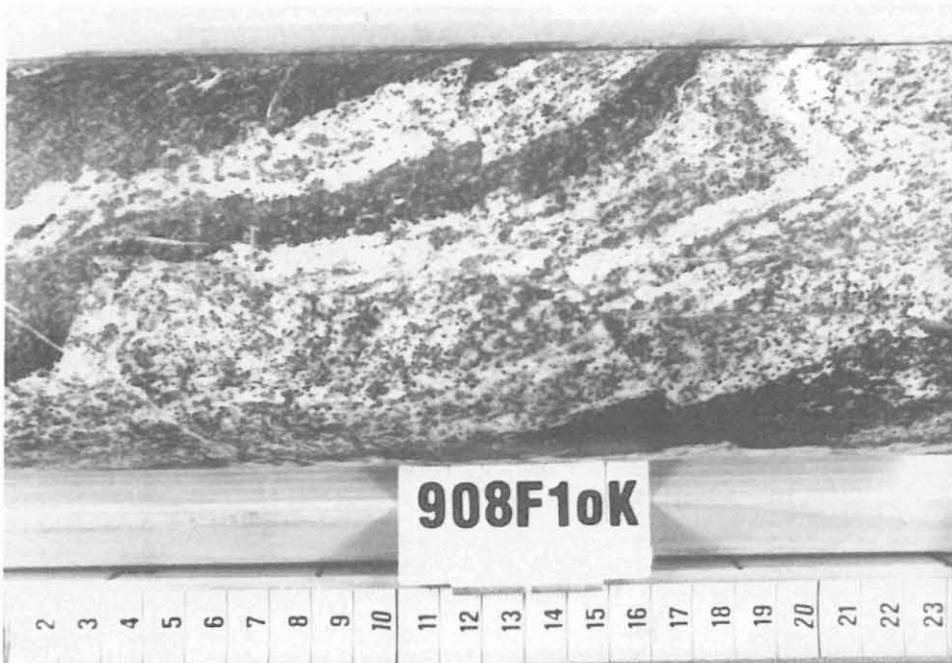


Abb. B.4.35: Gefaltete plagioklasreiche Gneis-Lagen in Amphibolit, KST 908F10K, 3703.86 m.

Augen zu beobachten. Eine straffe Foliation ist nur in feinkörnigen Hornblende- und Biotit-reichen Bereichen ausgebildet. Die meist dunkelgrünen Hornblendens sind maximal 800µm groß, feinkörnige Rekrystallisate erreichen 200µm. Die braunen, feinkörnigen Biotite (bis 200µm) bilden ein offenes Teilgefüge. Mitunter treten sie als Querglimmer auf. Quarze und Plagioklase der Grundmasse sind durchweg feinkörnig rekrystallisiert. Die ehemals rundlichen Feldspat-Augen sind extrem in der Foliations-Ebene gestreckt und haben ein feinkörnig rekrystallisiertes Interngefüge. Häufig sind die Rekrystallisate im Kern der Augen stärker saussuritisiert als am Rand und zeigen daher eine ursprüngliche, vermutlich magmatische Zonierung (An-reicher Kern) an.

Im Kernmarsch 921G und 922A (3775 - 3776 m) sind die Gneise Biotit-reich und hornblendearm und haben eine deutlicher erhaltene Augentextur. Die Augen sind größer (bis 1cm) und nicht so stark gestreckt wie in den hangenden und liegenden Bereichen im Übergang zum Amphibolit. Das Streckungsgefüge ist in senkrecht und parallel zur Streckung orientierten Schnittlagen deutlich sichtbar (Abb. B.4.36). Die Kerne der Plagioklas-Augen sind saussuritisiert und teilweise rekrystallisiert (Abb. B.4.37). Sie sind meist undeutlich verzwilligt und haben häufig Einschlüsse von Calcit, Muskovit, kleinen Serizitschüppchen und Quarz. Die An-Gehalte liegen nach Mikrosondenmessung bei 17 bis 33% (Tab. B.4.7). Häufiger sind in den Plagioklas-Augen Domänen zu beobachten, die auf ehemalige Schachbrettalbite nach Kalifeldspat hinweisen. An den Rändern der Plagioklas-Augen treten feine Myrmekit-Säume



Abb. B.4.36: Augengneis, Schnitt senkrecht (links) und parallel (rechts) der Lineation.

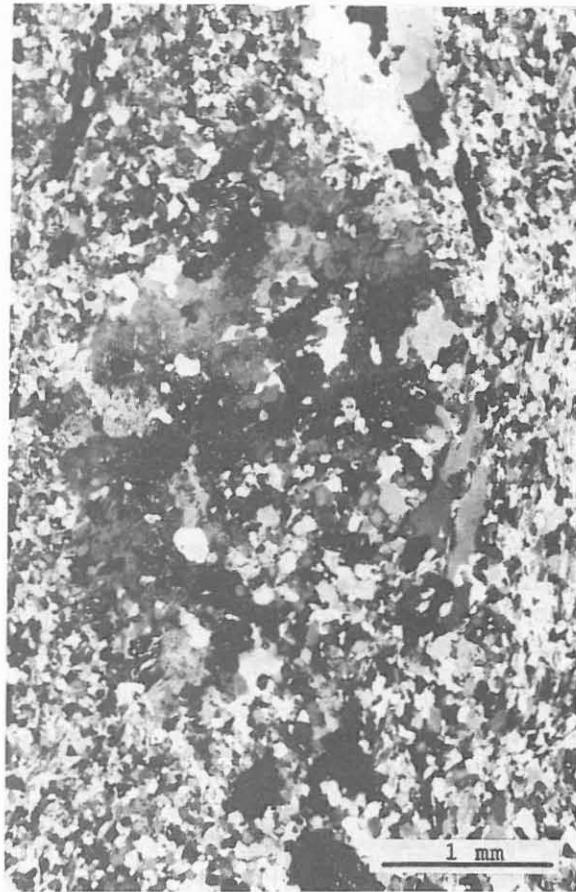


Abb. B.4.37: Saussuritisiertes, teilweise rekristallisiertes Plagioklas-Auge von Biotit umflasert, in feinkörnig-rekristallisierter Quarz-Plagioklas-Matrix, DS 921G1ae, 3775.76 m, //N (links), +N (rechts).

- 7 Granat-Zentrum (Alm. 56, Spess. 2, Pyrop 15, Gross. 27)
 1 alterierter Biotit in der feinkörnigen Gneis-Matrix
 2 chloritisierter Biotit in der feinkörnigen Gneis-Matrix
 6 groß., xenomorph. Hellglimmer-Einschl. in Plag. (Si=6.31)
 3 Calcit-Einschluß in Plagioklas

Analyse	7	1	2	6	3
SiO ₂	38.30	32.15	27.32	46.06	0.01
TiO ₂	0.08	2.04	0.31	0.25	0.01
Al ₂ O ₃	21.24	17.63	17.72	32.78	0.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00
FeO	25.32	24.27	30.19	2.21	1.83
MnO	0.92	0.27	0.28	0.01	0.95
NiO	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
ZnO	0.05	0.00	0.11	0.00	0.00
MgO	3.69	9.00	10.26	0.97	0.46
CaO	9.50	0.12	0.13	0.00	61.80
Na ₂ O	0.01	0.05	0.00	0.34	0.00
K ₂ O	0.01	5.07	0.31	10.22	0.02
Summe	99.12	90.60	86.67	92.86	65.08

An-Gehalte von verschiedenen Plagioklasen des Augengneises 921Glae nach Mikrosonden-Analysen:

- (1) Mitte des Auges = An17 und An33
 (2) rekristallisierter Saum des Auges = An17
 (3) Myrmekit = An33
 (4) feinkörnige Gneismatrix = An31

Tab. B.4.7: Mikrosonden-Analysen von verschiedenen Mineralen des Granat-Biotit-Augengneises 921Glae (3775.76 m).

aus Quarz und Plagioklas auf, die ebenfalls das Produkt der Umwandlung ehemaliger Albite sind (Abb. B.4.38). Außerhalb der Myrmekit-Säume ist der Plagioklas feinkörnig rekristallisiert. Die Neukörner sind häufig verzwillingt.

Klasten und Streckungshöfe zeigen meist symmetrische Gestalt; einzelne, andeutungsweise asymmetrische Klasten gehören dem sigma-Typ an und geben keinen einheitlichen Schersinn wieder. Zeilenquarze wie in Abb. B.4.39 sind in Schnitten parallel zur Streckung deutlich sichtbar. Die "aspect ratios" (Verhältnis von längster zu kürzester Achse) ergeben Werte von 10 und mehr. Feinkörnige Rekristallisation ist in den Zeilenquarzen nicht zu beobachten; eine diskontinuierliche Kornvergrößerung (Temperung) könnte die primäre Rekristallisation überprägt haben. Die häufig senkrecht zur Längserstreckung der Zeilenquarze auftretenden Korngrenzflächen sind stark suturiert.

Am Liegendkontakt der Augengneise bei 3776 m zu feinkörnigem Amphibolit (DS 922A1cI) sind die Plagioklas-Augen wie im Hangenden wieder stärker gestreckt. Das Interngefüge ist meist vollständig rekristallisiert. Im Inneren der Augen sind reliktsch größere, nicht saussuritisierte Plagioklase mit zahllosen kleinen Quarz-Einschlüssen (bis 20 µm) und Myrmekit-Saum vorhanden.

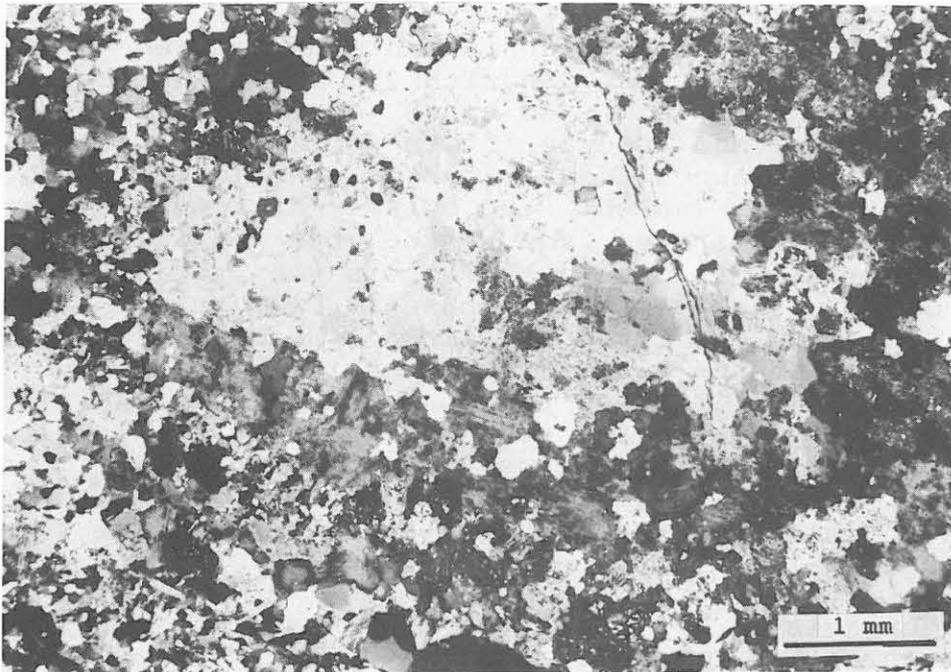


Abb. B.4.38: Plagioklas-Auge mit Myrmekit-Saum, DS 922A1b //L, 3776.32 m, +N.

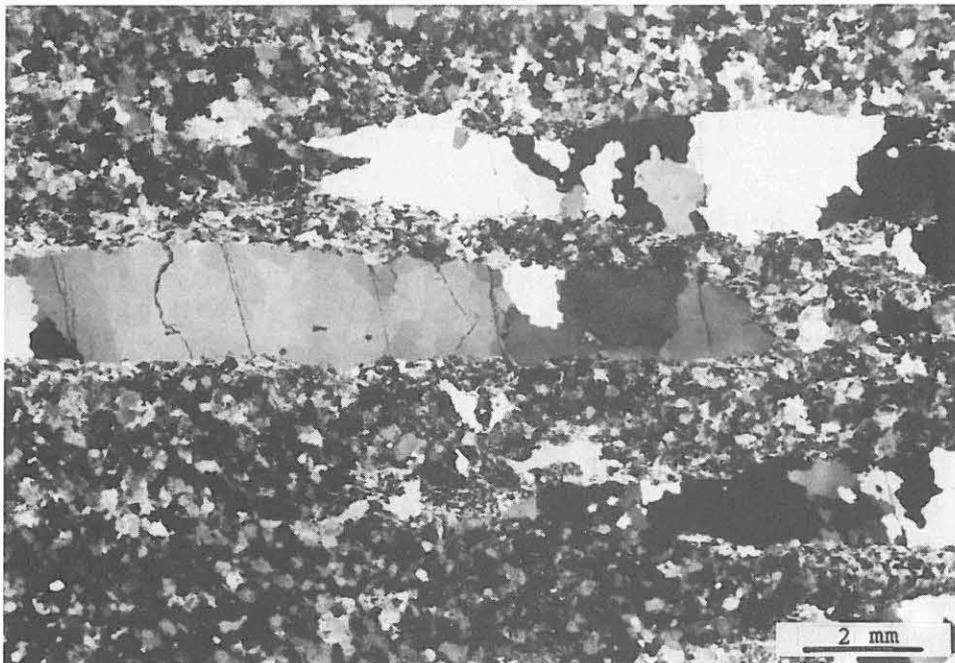


Abb. B.4.39: Zeilenquarze mit suturierten Korngrenzen, DS 922A1b //L, 3776.32 m, +N.

Im Kernmarsch 940 (3841 m) und 941 (3844 m) treten Augengneise im Wechsel mit feinkörnigen Amphiboliten auf (Abb. B.4.40). Diese unterscheiden sich von den hangenden Augengneisen (3773 - 3776 m) zum einen durch eine Hornblende-reichere Matrix, zum anderen ist in den durchweg rekristallisierten Feldspat-Augen das Auftreten von Mikroklin und Meso- bis Antiperthiten neben Plagioklas charakteristisch. Das gleichzeitige Auftreten von Meso- bis Antiperthiten und Mikroklin indiziert das Vorhandensein von zwei voneinander unabhängigen Alkali-Feldspat-Phasen. Die Meso- bis Antiperthite sind das Produkt einer Hochtemperatur-Bildung (Entmischung unterhalb einer druckkorrigierten Solvus-Temperatur) bei granulitischen Bedingungen. Die triklinisierten Kali-Feldspäte (Mikroklin) sind bei niedrigeren Temperaturen (Amphibolit-faziell?) gewachsen und verdrängen dabei randlich die Meso- bis Antiperthite. Altkorn-Relikte sind in den Augen nicht mehr vorhanden (Abb. B.4.41). Myrmekite sind sehr selten und klein.

Die Augengneise bei 3840 - 3846 m sind mit Wellenlängen im dm-Bereich offen verfaltet. Die Auswertung des Formation-Micro-Scanner-Tools (FMST, durch HIRSCHMANN) deutet auf eine weitspannige offene Falte im Bereich der beiden Augengneise bei 3775 und 3840 m hin. Es handelt sich bei beiden Vorkommen wahrscheinlich um eine durchgehende, verfaltete Augengneis-Lage. Im hangenden Vorkommen (3775 m) lassen ehemalige Schachbrett-Albite auf eine metasomatische Umwandlung von primären, magmatischen Kalifeldspäten unter Bildung von Myrmekiten und poikilitischen Plagioklasen mit Quarz-Einschlüssen schließen. Das liegende Vorkommen (3840 m) zeigt eine andersartige metasomatische Umwandlung. Man findet in den rekristallisierten Augen Meso- bis Antiperthite, die von triklinisierten Kalifeldspäten (Mikroklin) randlich bis vollständig verdrängt werden.

Die chemischen Analysen von zwei Proben, die aus dem Bereich des hangenden Augengneises stammen, sind in Tab. B.4.6 aufgeführt. Trotz der beobachteten Mikroklin-Gehalte ist der K_2O -Gehalt gering, während Na_2O deutlich über 4 Gew.-% liegt.

B.4.6 Meta-Aplite

Leukokrate, mittelkörnige Meta-Aplite mit körneligem bis lagigem Gefüge treten als ca. 30 cm mächtige Einschaltungen in mittelkörnig-flaserigem Amphibolit zwischen 3711.8 - 3712.4 m und 3713.1 - 3713.4 m auf. Sie erreichen zwischen 3714.8 - 3716.1 m eine Mächtigkeit von 1.3 m (Abb. B.4.42). Der Mineralbestand umfaßt hauptsächlich Quarz und Plagioklas; Glimmerminerale treten weitgehend zurück.

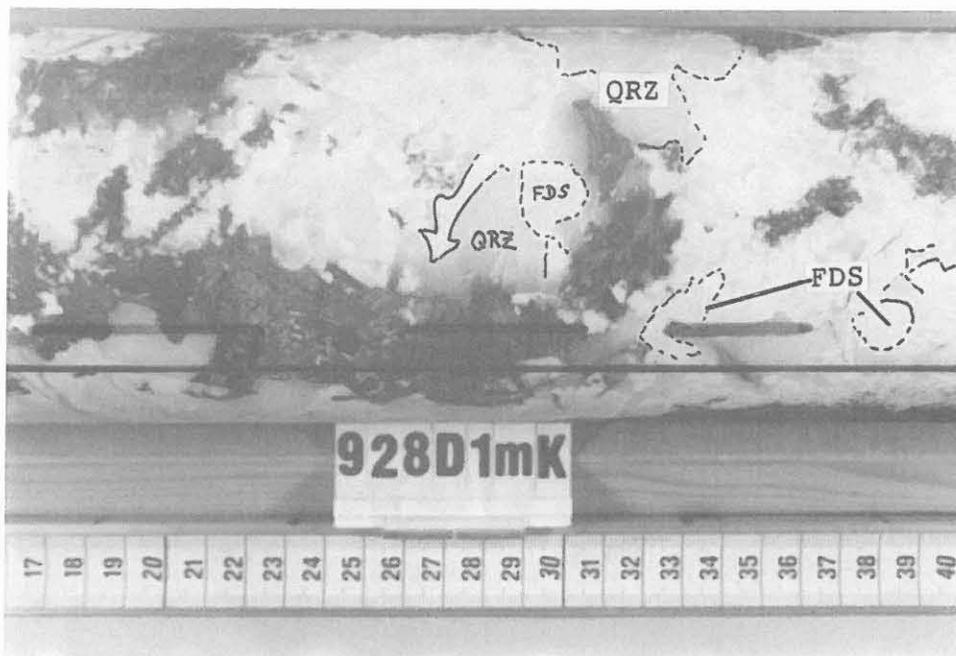


Abb. B.4.45: Pegmatoid mit Quarz (QRZ) und großen Feldspäten (FDS), KST 928D1mK, 3807.45 m.



Abb. B.4.46: Poröses, mit Epidot mineralisiertes Quarz-Feldspat-Pegmatoid, KST 947C1d, 3861.26 m.



Abb. B.4.42: Deformierter Meta-Aplit, Liegendkontakt zu feinkörnigem Amphibolit, KST 911B1f, 3716.19 m.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Augengneisen sind die Meta-Aplite diskordant. Ihr primär-magmatisches Gefüge ist nur lokal duktil deformiert: papierdünne, dunkle Lagen, die Plagioklas-Klasten umfließen, bestehen aus zerriebenem und vollständig chloritisiertem Biotit. Zwischen den bis zu 5 mm großen Plagioklasen liegen xenomorphe Quarz-Aggregate mit feinkörnig-granoblastischem Kornverband. Eine häufig zu beobachtende Saureitrisierung der Plagioklas-Kerne zeichnet einen Zonarbau der Plagioklase nach (Abb. B.4.43), der vermutlich magmatischen Ursprungs ist. Neben häufigen, feinen Serizitschüppchen werden in den Plagioklasen vereinzelt Titanit, Allanit, Apatit und Muskovit als Einschlüsse beobachtet.

In der liegenden Einheit (3714.8 - 3716.1 m) geht das makroskopisch richtungslos-körnige Gefüge kontinuierlich in ein flaserig-lagiges Gefüge über. Die Plagioklas-Klasten zeigen zunehmend augenförmige Gestalt und werden von Quarzlagen umflasert.

Der Lagenbau der Meta-Aplite läßt sich mikroskopisch auf eine duktile Deformation unter erhöhten Temperaturen zurückführen. Die Plagioklas-Klasten sind randlich feinkörnig rekristallisiert ("core and rim structure", Abb. B.4.44). Die rekristallisierten Plagioklas-Körner (bis 100 μm) sind meist serizitisiert sowie mitunter verzwillingt. Rekristallisierter Quarz ist in feinkörnigen Zeilen angeordnet und umflasert die Plagioklas-Klasten. Die Quarz-Rekristallisate sind grobkörniger als die Plagioklas-Rekristallisate (Abb. B.4.43). In Bereichen schwächerer Verformung dominiert Subkornbildung

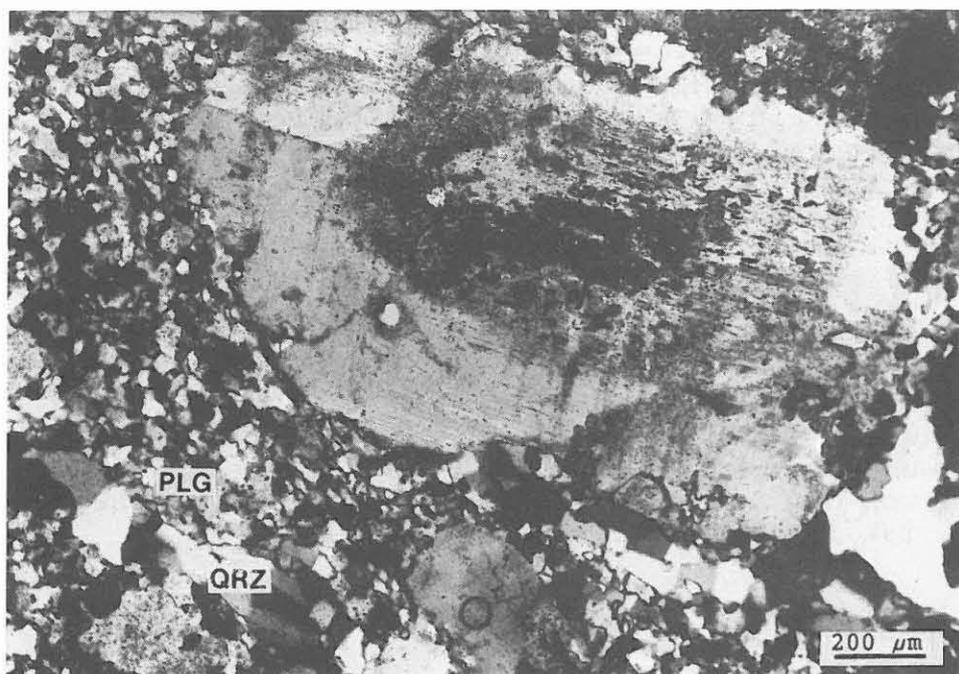


Abb. B.4.43: Zonierter Plagioklas in feinkörnig-rekristallisierter Quarz(QRZ)- und Plagioklas(PLG)-Matrix, deformierter Meta-Aplit, DS 910E1vII, 3715.16 m, +N.



Abb. B.4.44: Boudinierte(BOU) Plagioklase in feinkörnig-rekristallisierter Quarz-Plagioklas-Matrix, deformierter Meta-Aplit, DS 910E1vII, 3715.16 m, +N.

gegenüber Rekristallisation. Die Plagioklas-Klasten sind vereinzelt leicht asymmetrisch geformt und gehören dem sigma-Typ (PASSCHIER & SIMPSON 1986) an. Zusammen mit Quarzfasern deuten sie ein s-c-mylonitisches Gefüge (LISTER & SNOKE 1984) mit abschiebendem Bewegungssinn an (DS 910E1vII).

Der Grad der duktilen Deformation ist in den Meta-Apliten zwischen 3711 und 3716 m unterschiedlich. Die ausgeprägte Rekristallisation von Plagioklas und Quarz ist auf das tiefste Vorkommen beschränkt. Sonst überwiegt semiduktile bis kataklastische Deformation.

Die zwei geringmächtigen Meta-Aplite bei 3595 und 3598 m unterscheiden sich durch ihr primär-magmatisch feinkörniges Gefüge und Mikroklin- (3598 m) bzw. Antiperthit- (3595 m) Führung von den liegenden Vorkommen. Ihre chemische Zusammensetzung ist in Tab. B.4.6 aufgeführt.

B.4.7 Pegmatoide

Pegmatoide sind grobkörnige (> 5mm) teils gangförmige, teils schlierige, kaum deformierte Quarz-Feldspat-Gesteine.

Im Kernmarsch 928 (Abb. B.4.45) ist ein 40 cm mächtiger, diskordanter Pegmatoid-Gang mit buchtig-schlierigen Kontakten zum Nebengestein erbohrt worden. Die bis zu 2 cm großen Plagioklase sind verzwillingt und haben zahlreiche feine Serizit-Schüppchen eingeschlossen. Undulöses Auslösen sowie vereinzelte Knickbänder sind typisch. Quarz zeigt suturierte Korngrenzen. Rekristallisation ist nicht zu beobachten.

Bei Kernmarsch 947 (Abb. B.4.46) treten ähnliche, aber stark poröse Pegmatoide auf. Die Feldspäte und insbesondere die Quarze sind vermutlich durch hydrothermale Lösungen an-, bzw. weggelöst worden. Die hydrothermale Überprägung führte zu einer Epidot-Mineralisation. In diesem porösen Bereich kam es zu einem Fluid-Zufluß aus dem Gebirge (siehe Kap. C. Geochemie).

B.4.8 Quarz-Gänge

Im Kernmarsch 923 (3784.5 m) treten vertikale, bis zu 1.5 cm mächtige Quarz-Gänge auf (Abb. B.4.47). Die Gänge sind diskordant zu lagigen Quarz-Feldspat-Mobilisaten und versetzen diese. Jüngere, mit Epidot mineralisierte Scherflächen versetzen die Quarz-Gänge. Das Interngefüge der Gänge indiziert eine duktile Deformation. Die c-Achsen der Quarze sind vorzugsweise parallel zur Erstreckung des Ganges orientiert. Weiterhin zeigen die Quarze eine Formvorzugsregelung mit der langen Achse ebenfalls parallel zum Gang (Abb. B.4.48). Jüngere Deformation führte zur Bildung von Subkörnern, suturierten Korngrenzen auf Grund strain-induzierter Korngrenzwanderung und undulösem Auslösen.

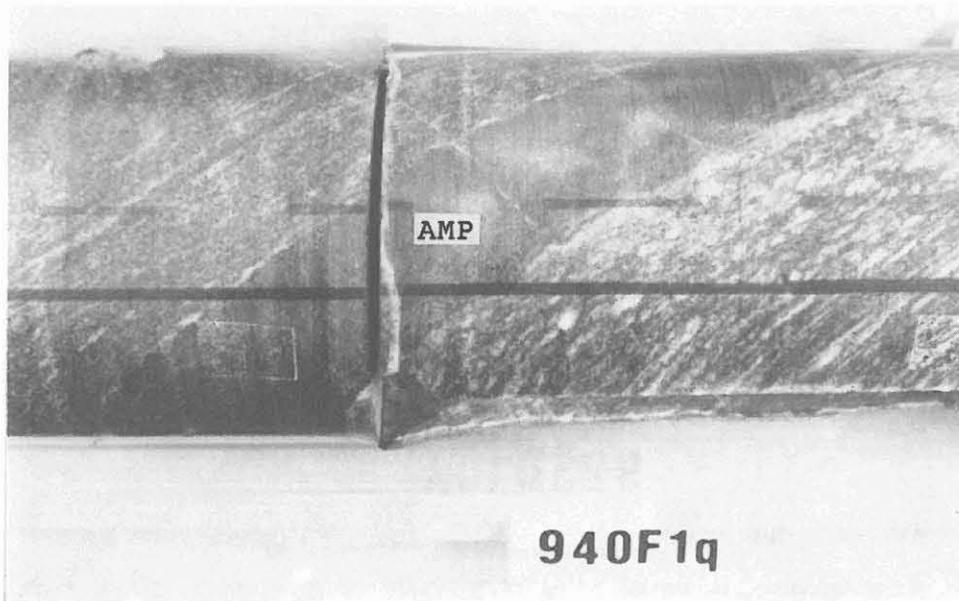


Abb. B.4.40: Amphibolit (AMP) in Wechsellagerung mit Hornblende-Biotit-Augengneisen. KST 940F1q, 3840 m.

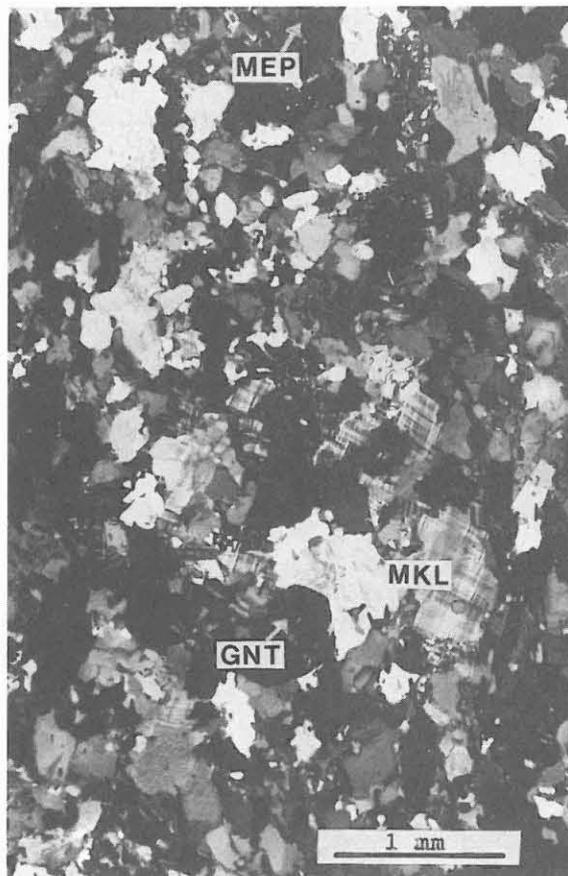
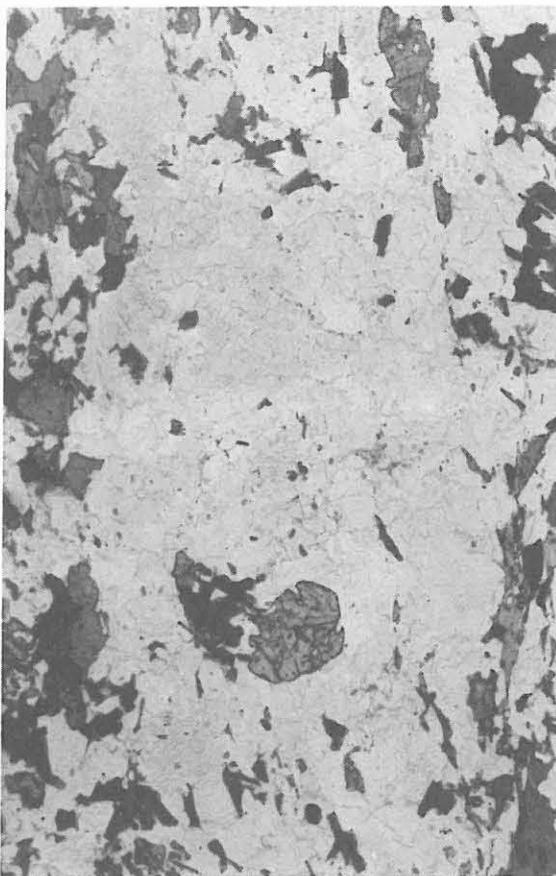


Abb. B.4.41: Mikroklin(MKL)- und Mesoperthit(MEP)-reiches Auge in Biotit-Hornblende-Augengneis, Granat(GNT), DS 941C1dK, 3845.69 m, //N (links), +N (rechts).

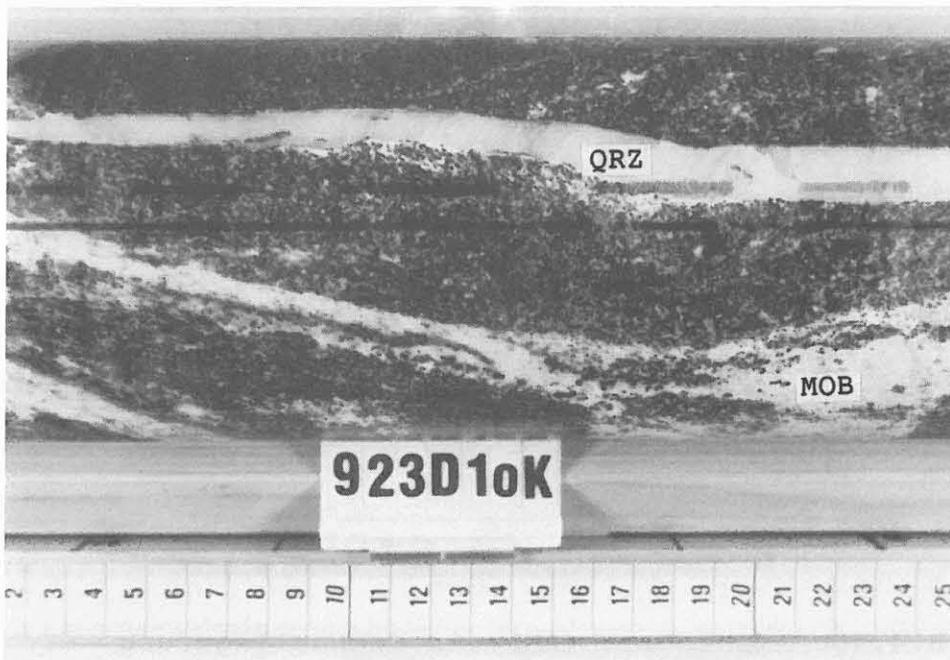


Abb. B.4.47: Steile Quarz-Gänge (QRZ) parallel zu Quarz-Feldspat-Mobilisaten (MOB) in Amphibolit, KST 923D1oK, 3784.55 m.

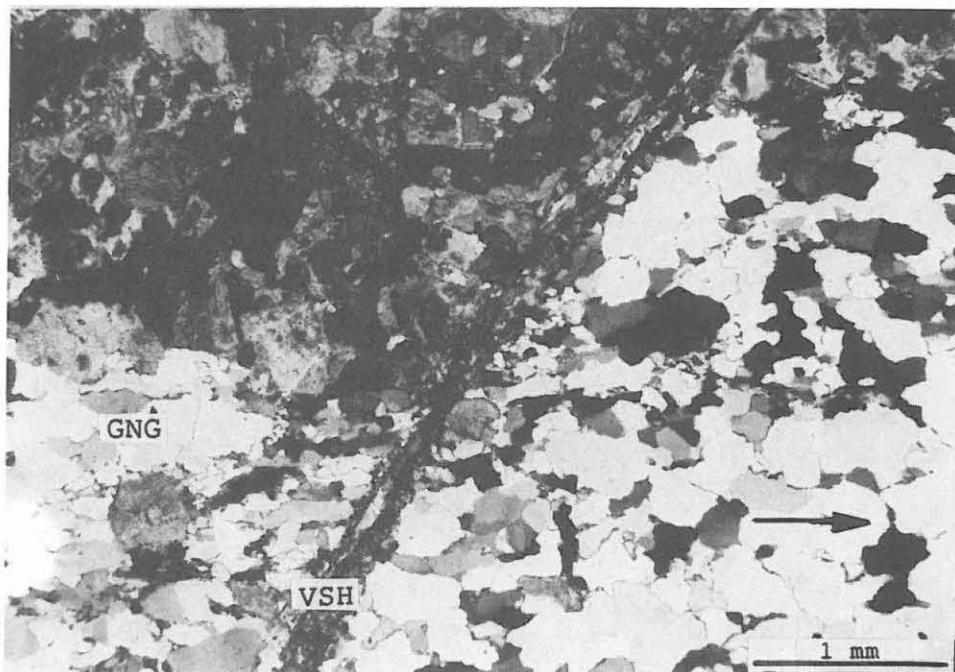


Abb. B.4.48: Deformierter Quarz-Gang. Quarze haben Formvorzugsregelung und kristallographische Orientierung (c-Achsen, ->) parallel zum Gang (GNG), an Scherfläche (VSH) versetzt, GS 923D1oK, 3784.55 m, +N.

B.5 Erzmineralisation

Der sulfidische und oxidische Erzmineral-Anteil der durchteuften Gesteine liegt zumeist in Form kleiner, disseminierter Einzelkörner oder in verwachsenen Aggregaten vor. Kleine sulfidische Minerale werden in der Nachbarschaft leukokrater Mobilisate (Quarz, Feldspat) und entlang kleiner, verheilter Klüfte oder entlang Scherbahnen beobachtet. Eine erhöhte Sulfidführung ist häufig an alterierte Gesteinsabschnitte (mit Chlorit, Epidot) gebunden. Makroskopisch sind zumeist nur die Hauptphasen Pyrit, Pyrrhotin, Chalkopyrit sowie Ilmenit zu identifizieren.

Die magnetischen Anomalien bei 3590, 3720, 3800 und 3884 m werden sowohl durch Magnetit als auch durch Pyrrhotin verursacht (siehe Kap. D: NRM und Suszeptibilität).

Nur wenige Erzminerale zeigen lithologie-bezogene Abhängigkeiten. Viele treten als "Durchläufer" sowohl in den Gneisen als auch in den Metabasiten auf. In den Metabasiten dominieren die oxidischen Erzminerale.

Der Opakmineralbestand setzt sich aus den sulfidischen Mineralen

Pyrit	(PYR)	Pyrrhotin	(FES)	Markasit	(FEK)
Chalkopyrit	(CPY)	Sphalerit	(ZNS)	Galenit	(PBS)
Molybdänit	(MOS)	Millerit	(MIL)	Pentlandit	(PNT)
Ag-Pentland.	(APN)	Kobaltit	(COG)	Siegenit	(SIE)
Polydymit	(PDY)	Arsenopyrit	(ASS)		

und den oxidischen Mineralen

Ilmenit	(ILM)	Rutil	(RUT)	Anatas	(ATS)
Leukoxen	(LEX)	Magnetit	(MGN)	Hämatit	(HAM)
Goethit	(GOE)				

zusammen. Ilvait (ILV), ein Ca-Fe-Silikat mit der Zusammensetzung $\text{CaFe}_2\text{Fe}^{3+}(\text{OH/O/Si}_2\text{O}_7)$, wurde verschiedentlich unterhalb 3800 m beobachtet. Graphit (CCC) ist in den Gneisen weit verbreitet und nur untergeordnet in den basischen Einheiten vorhanden.

Mikrosondenanalysen in Aachen (Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH) und in Bayreuth (Bayer. Geoinstitut) halfen bei der Identifizierung einiger Erzminerale und gaben Aufschluß über den Mineralchemismus der untersuchten Opakminerale.

In der Tabelle B.5.1 ist die Verteilung der Erzminerale semiquantitativ aufgezeigt. Aus Darstellungsgründen werden die stets nur sehr untergeordnet auftretenden Erzminerale in der Tab. B.5.1b zusammengefaßt. Die Abkürzungen entsprechen der in KTB Report 87-1 aufgeführten und ergänzten Kürzelleiste.

Tab. B.5.1a: Semiquantitative Erzmineralverteilung

21.05.90 Lithologie	Schliff-Nr.	Teufe	PYR	PEK	PES	PNT	CPY	ZNS	PBS	MOS	ILM	RUT	ATS	LBX	MGN	BAN	ILV	CCC
SIL BIO GNS, PKO, LIG	858E2q	3509.67	++	(+)			+				+		+					+
ALT klein verfault., chlor. GNS	859B2f	3513.33			(+)	(+)	(+)		(+)		+		+					+
GNS, FBI LIG, PKO	862D3rK	3524.84	+		+	(+)	(+)	(+)	(+)		+	(+)	(+)	(+)				(+)
SIL BIO GNS, PKO, MOB REI	865D2t	3536.71	++		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)				(+)					++
GNS, LIG, KRG, LEU, VGR	865F2ac	3537.83	(+)				(+)	(+)	(+)	(+)			(+)					++
MUS REI GNS MKO z.T. MOB	867E9g	3546.78	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)				(+)
GNS VGR	867G9o	3548.79	+	(+)	(+)		(+)	(+)			(+)	(+)	(+)	(+)				+
GNS DSK LEU MOB BND	871E1q	3557.29	(+)	(+)	++	(+)	(+)	(+)	(+)		+	(+)						(+)
MUS PUR GNS, UDT LIG	873G1v	3567.96				+	(+)	(+)	(+)		+							(+)
GNS, 80 cm vor AMP	874F1p	3572.73	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)	(+)						
GNS ca. 30 cm vor Übergang zu AMP	874F1sK	3573.31	(+)		(+)		(+)	(+)			+	(+)						
SBA, SUL in SBG	874G1x	3573.63	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		+	(+)						
GNT AMP	875A4a	3575.40			+		+	(+)			++	+	(+)					
GNT AMP	875B10r	3576.31	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)			+	+	(+)	(+)				
SER GNT REI AMP	875C21T	3577.51			+	(+)					++	+	(+)					+
GNT AMP, MKO	876A2f	3580.91	?		+	(+)	(+)	(+)		(+)	++	+	(+)	?				+
GNT AMP PKO	876B2ac	3581.95	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)			+	+						+
GNT AMP MKO	876C2ae	3582.29	(+)		+		(+)	(+)			+	(+)						
GNT AMP MKO	876E2ar	3584.60			+	(+)	(+)				++	+	(+)					
GNT AMP mit QRZ PDS BND	877A3a	3585.04	(+)		+	(+)	(+)				+	+	(+)					
GNT AMP MKO	877A31T	3585.42	(+)		+	(+)	(+)				++	+						
	877B3q	3586.57																
GNT AMP, MKO; MOB, CHL	877D3u	3587.78	(+)		++		+	(+)			+	+						
GNT AMP MKO LEI POL	877E3x	3588.82			+		(+)	(+)			+	(+)						
GNT AMP	877E3z	3588.95	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)		(+)	++	(+)						(+)
GNT AMP; PES LSE, MOB, CHL	877F3ad	3589.74	(+)	(+)	++		++	(+)			+	(+)	(+)	(+)				
MTA APL, Randbereich mit BIO SHL	878H1bd	3595.97			(+)			(+)			(+)		(+)					
MTA APL, PKO	880A1a	3598.10	(?)		(+)						(+)	(+)	(+)					
GNT AMP GKO	881A3c	3600.46	(+)		+		(+)	(+)			+	+						
AMP POL, KLU MIN, CHL, MOB	881B4e	3600.87	(+)		+						+							
AMP SFF POL	882E4aK	3604.71	+		+		(+)	(+)			+	+	(+)	(+)				
GNT AMP	882F4aT	3605.80																
MTA GAB, GKO	882H4bc	3606.96	+		+		(+)	(+)	(+)		+	(+)						
MTA GAB, GKO	882H4bf	3607.03	+		++		(+)	(+)	(+)		+	(+)						
SBG, MKO/PKO, QRZ-PYR-LSE	883F1p	3611.50	++	(+)	++			(+)	(+)		+	(+)						
MTA GAB TLW SWA POL, Corona-Textur	884B1e	3613.40	+	(+)	+		(+)	(+)			++	(+)						
MTA GAB LEU MKO	885C3n	3620.21	+		+		(+)	(+)			++	+		+				
GNT REI AMP PKO bis MKO, MOB REI	888A3c	3628.00			+		(+)				++	+						
GNT AMP PKO bis MKO, MOB REI, SBA	888B31K	3628.96	+		+		+	(+)			+	(+)						
PKO-MKO GNT AMP	888F3pK	3631.93	(+)				(+)	(+)			+	(+)						
GNT AMP, VGR, CHL Gängchen, netzförmig	889B1d	3634.63	+	+	(+)		+	(+)	(+)		+	+						(+)
SBG, PLS, MKO	889G1qK	3638.54	(+)		(+)		(+)				+	+						
AMP PKO LIG, flachliegende SBA	890A1c	3639.23	(+)		+		(+)	+			++	+						
GNT AMP PKO	890B1e	3639.57	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		+	+						
BIO GNS SHL in GNT AMP	891A1a I	3644.57	(+)		(+)		(+)				+	+						
GNT AMP PKO DIC	891A1b	3644.94	++		+		(+)	(+)			+	(+)						
GNT AMP, SER PKO	891B1d	3645.58	(+)		+		(+)	(+)			+	+						
GNT AMP, PKO bis MKO	891E1z	3648.40	+		+		+	(+)	(+)		+	+						
GNT AMP, PKO bis MKO	898A2a	3652.84	(+)		+		(+)				+	+						
GNT AMP, PKO bis MKO, KLU, LEU MOB	899C1h	3659.59	(+)		+		(+)				++	+						
GNT AMP, PKO bis MKO, PLS, ALT	900A1a	3663.10	(+)		+		(+)	(+)	(+)		+	+						
GNT AMP, PKO bis MKO, SER GNT REI	900B7a	3664.94	+		+		(+)	+			++	+						
GNT REI AMP, MOB	902F1n	3674.38	(+)		+		(+)	+	+		+	+						
GNT AMP, MKO, PLS, MOB	903A1fT	3676.50	(+)		+		(+)	+	(+)		+	(+)						
AMP, PKO DIC	907D1hK I	3696.61			+		(+)				+	+						
AMP, PKO	907D1hK III	3696.84	+		+		(+)	+	+	(?)	+	+						
GNT AMP, MKO PLS, SBA, LEU GNG, SUL	907G1u	3699.44	+		(+)		+	(+)			+	+						
AMP, MKO LIG PLS, steilst. KAT SBA	908B1dK	3700.88	(+)		(+)		(+)				+	+	+	+				
LEU MTA APL in MKO UDT PLS AMP	910A1bK	3711.87	(+)				(+)	(+)	(+)		+	+	+	+				
MKO LEU KRG MTA APL in AMP	911A1b	3715.20	(+)								+	+						
MTA UMA, kurz nach Überg. aus AMP	911B1j	3716.82	+	(+)	(+)		(+)				++	+	+					(+)

Tab. B.5.1a: Fortsetzung

21.05.90 Lithologie	Schliff-Nr.	Teufe	PYR	PEK	FES	PNT	CPY	ZMS	PBS	MOS	ILM	RUT	ATS	LEX	HGN	HAM	ILV	CCC
MTA UHA	911D1z	3718.10	+	(+)	(+)						+	?		+				
MTA UHA, FKO-MKO CHL HBL REI, ohne MOB	911E1ad	3718.65	+	(+)	(+)						+	(+)	+	(+)	++			
MTA UHA, 3 m mächtig,	911F1abK	3719.51	+		(+)						+	+	(+)	++			+	
MKO AMP, MOB REI, SWA POL	912A4aKI	3721.75	+	(+)	(+)	(+)	(+)	?	(+)		++	+	(+)	(+)				
MKO AMP ohne MOB	912A4aKII	3721.88	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)				+							
MKO AMP mit MOB SRL SWA POL	912B4bK	3722.32	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)				(+)	(+)	(+)					
AMP, MKO PLS	912B4cK	3722.50	(+)		(+)						+				(?)			
MKO AMP mit wenig MOB SRL	912D4gK	3723.91	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)				+	+						
BIO GWT HBL GWS, MKO bis PLS	912F4p	3725.30	+	+	(+)	+	(+)				+	+						
MKO AMP, mehrere MKO MTA APL benachbart	913B1c	3727.67	+								++	+						
MKO AMP, mehrere MKO MTA APL benachbart	913B1e	3727.68	+								++	+						
MKO VGR AMP	913G1af	3732.23	+								++	+						
AMP, große HBL	914A1a I	3732.90	+			(+)					++	+	+	+				
LEU MOB in MKO AMP mit MKO MTA APL	914A1a II	3732.90									+	+	(+)	(+)				
MKO LEU GWT REI AMP	914G1u	3737.79	+	(+)	(+)	(+)					+	(+)						
MKO LEU GWT REI AMP, SBA	915A1aK	3738.96	+	+	+	(+)					+	+	(+)	(+)				
MKO LEU MOB REI GWT REI AMP	916B1f	3743.14		+	+						++	+						
MKO SWA POL GWT AMP	916G1q	3746.99	+	+	(+)	+					+	(+)						
MKO MTA GAB	918A1c	3752.98	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)				
MKO GWT AMP, PRH KLU	918F1t	3757.44									+	+	+	+				
MKO GWT AMP	919C1e	3761.07	+	+	+						+	+						+
MKO GWT AMP	919G1n	3764.48	+								+	+	(+)	(+)				
3 cm Augengneis (Ortho-) in MTA GAB	922F1n	3780.96	+	(+)	+	(+)					+	+	+					
MKO AMP, wenig GWT, POL, MOB REI	925A1b	3793.41	+								+	+						
GWT AMP, FKO, MKO	926A1b	3798.75	(+)			(+)	(+)	(+)			++	+	(+)		(+)	(+)		
GWT AMP, SUL auf KLU	926C1gII	3800.39	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)			++	++			(+)	(+)		
AMP, TIT CNA um ILM, VGR, EPD KLU	926C1gI	3800.55	++								+	+	+		(+)	(?)		
AMP STA GKL, EPD GNG mit CAL KLU	928B1f	3806.18	+								+	+	+					
FKO GWT AMP, Nähe CAL CHL KLU SBA	928B1nK	3808.74	++	+	+						+	+	+	+	+	+	+	
GWT PUR HBL GWS, EPD REI	VC3813	3813.00	+	+							+	+	+	+	(+)			
GWT PUR HBL GWS, EPD REI	VC3814	3814.00	+	(+)	(+)						+	+	+		(+)			
GWT AMP mit QRZ PDS MOB	VC3815	3815.00	+			(+)					+	+	+					
LEU GWT AMP / GWT BIO HBL GWS	SK55B	3816.00	(?)	+		(+)	(+)				+							+
GWT AMP	931B2j	3817.29	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	?			+	(+)			(+)	(+)		
FKO - MKO GWT REI AMP	933B1hK	3818.71	+	+	(+)	(+)	(+)	(+)			++	+						
FKO - DIC GWT AMP, EPD REI entl. KLU	936B1bK	3826.58	++	(+)	(+)						+	+	(+)		(+)	(?)	(?)	
FKO - DIC GWT AMP	936B1cK	3826.87	(+)	+	(+)	(+)	(+)				++	(+)						
GWT AMP mit QRZ PDS MOB	VC3828 I	3828.00	+	(+)	(+)			(+)			+	+	(+)		(+)			
GWT AMP, QRZ PDS MOB	VC3828 II	3828.00	+			(+)					+	+						
FKO - MKO GWT REI AMP, LEU MOB	937B9gI	3829.34	++			(+)	(?)				+	+	(+)					
FKO - MKO SER GWT REI AMP	937B9gII	3829.45	(+)	+		(+)					++	+	(+)					
AMP	VC3830	3830.00	+			(+)					++	+			(+)			
GWT AMP, selten MTA GAB	VC3832	3832.00	(+)	(+)	(+)	(+)					++	+						(+)
FKO - MKO GWT REI MTA GAB	939P1kK	3835.30	(+)	+	(+)	(+)					+	+						
BIO GWS LAG in GWT BIO HBL GWS	940B1g	3837.85	+	+	(+)	(+)					(+)	+						
MKO BIO GWS mit PDS BST, WLG mit FKO AMP	941C1cK	3844.43	+	(+)	(+)						+	+			(+)			
BIO HBL GWS mit Meso Perthiten	SK56	3847.50	+			+					+	+						+
	VC3850	3850.00																
FKO RLS TEX GWT AMP, LAG MOB	944C6f	3856.36	+	(+)	+						+	+			+			
POL MTA GAB mit nn großen PDS BST	944E6t	3858.13	(+)	(+)	(+)						+	+			(+)	(?)		
ZEL DRU QRZ PDS EPD GNG in FKO DIC AMP	947B1b	3860.98	+			(+)					+							
MKO GWT REI AMP, EPD GNG mit SUL	949A1e	3867.32	++								++	+			+	(+)		
AMP, TLW GWT PUR, EPD CHL REI, EPD KLU	SK59B	3871.00	++	(+)	(+)						+	+			+			
MKO GWT AMP, feine EPD PYR MIN KLU	951A3a	3871.65	++			+					+	(+)			+	+		
SUL und EPD REI GWT AMP, Nähe SBA	952A3fT	3872.34	++	(+)	(+)				(+)		+	+		+	(+)	(+)		
SBG, FKO, SPPLIG	953A2a	3872.70		+							+							
MKO GWT AMP, EPD PYR REI SHZ	953A2a	3872.71	++								+	(+)	+	+	+			
MKO GWT AMP mit MOB SRL	953D21K	3875.28	+			(+)					+	+			(+)			
IMO HBL in QRZ MOB in MTA AMP	953P2rK	3877.31	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)				(+)	(+)						
WSL LEU GWT BIO HBL GWS - MKO GWT AMP	954C1d	3879.50	+	(+)	++	(+)	(+)				+	(+)						?
MKO GWT AMP mit SUL, MOB	954P1n	3882.62	(+)		++	(+)	(+)				+	(+)						
MKO PLS GWT AMP	955A1a	3883.60	+	(+)	++	+	(+)				+							

Tab. B.5.1a: Fortsetzung

21.05.90 Lithologie	Schliff-Nr.	Teufe	PYR	PEK	PBS	PNT	CPY	ZNS	PBS	MOS	ILW	RUT	ATS	LEX	MGN	HAM	ILV	CCC
MKO PLS GNT AMP	955B11K	3887.94			+	(+)	(+)				+	(+)			+			
BIO HBL GNS, GNT PUR, selten EPD AMP mit HBL GNS	VC3889	3889.00	+		+		(+)				++	(+)	(+)					
GNT AMP, z.T. EPD PUR	SK61	3913.30	+		+	(+)	+	(+)			+	+			+			
AMP mit wechs. GNT PUR, EPD PUR	SK63	3932.00	(+)		+	(+)	(+)				+	+						
GNT AMP	VC3940	3940.00	+		(+)	(+)	(+)	(+)			+	+						(+)
POL MTA GAB bis AMP ohne GNT	SK65	3972.00	(+)		(+)	(+)	(+)	(?)			+	+						
AMP	SK 66	3974.50	(+)		(+)	(+)					(+)	(+)						
	VC3980	3980.00	+		(+)	(+)		(+)			+					(+)		(+)
	VC3988	3988.00	+		+	(+)					+	+						
	VC3990	3990.00	(+)		(+)	(+)					(+)	(+)			(+)			(+)
	VC3995	3995.00	(+)		(+)	(+)	(+)				(+)	(+)						(+)
AMP	VC3997	3997.00	+		(+)	(+)					+	+						+
AMP und selten HBL GNS, EPD PUR	SK71	3997.00	(+)		+	(+)	(+)				+	+						
AMP	VC3998	3998.00	(+)		(+)	(+)	(+)			(+)	(+)	(+)						(+)
	VC3999	3999.00	(+)		(+)	(+)	(+)	?			(+)	(+)			(+)			(+)
AMP und selten HBL GNS, EPD PUR	SK72	3999.80	++			(+)	(+)				+	+	+	+				
	VC 4000	4000.00	(+)		(+)	(+)	(+)	?			(+)	(+)						(+)

Tab. B.5.1b: Semiquantitative Verteilung der nur selten und untergeordnet auftretenden Erzminerale

21.05.90 Lithologie	Schliff-Nr.	Teufe	Mineral	Menge	Mineral	Menge	Mineral	Menge
GNS, 80 cm vor AMP	874P1p	3572.73	UMI	(+)				
MKO GNT AMP, Nähe CAL CHL KLU SBA	928B1nK	3808.74	GOE	(+)				
MKO BIO GNS mit PDS BST, WLG mit PKO AMP	941C1cK	3844.43	MIL	(+)				
WSL LEU GNT BIO HBL GNS - MKO GNT AMP	954C1d	3879.50	GOE	(+)				
GNS, LIG, KRG, LEU, VGR	865P3ac	3537.83	APW	(+)				
GNS DSK LEU MOB BND	871B1q	3557.29	UMI	(+)	UMI	(+)		
MUS PUR GNS, UDT LIG	873G1v	3567.96	COG	(+)				
GNT AMP; PBS LSE, MOB, CHL	877F3ad	3589.74	COG	(+)				
MKO MTA GAB	918A1c	3752.98	SIE	(+)	MIL	(+)	NIS	(+)
GNT AMP, SUL auf KLU	926C1gII	3800.39	UMI	(+)	GOE	(+)		
AMP mit wechs. GNT PUR, EPD PUR	VC3940	3940.00	MIL	(+)	UMI	(+)		
	VC3990	3990.00	MIL	(+)	VIO	(+)	PDY	(+)
	VC3995	3995.00	MIL	(+)				
GNS, PEI LIG, PKO	862D3rK	3524.84	COG	(+)				
MTA UMA	911D1z	3718.10	MIL	(+)				
MKO AMP, MOB REI, SWA POL	912A4aKI	3721.75	MIL	(+)	SIE	(+)		
MKO AMP ohne MOB	912A4aKII	3721.88	MIL	(+)	UMI	(+)		
MKO AMP mit wenig MOB SHL	912D4gK	3723.91	MIL	(+)	UMI	(+)		
MKO AMP mit MOB SHL SWA POL	912B4bK	3722.32	UMI	(+)	UMI	(+)		
IMO HBL in QRZ MOB in MTA AMP	953P2rK	3877.31	UMI	(+)				
POL MTA GAB bis AMP ohne GNT	SK 66	3974.50	MIL	?	SIE	(+)		
GNT AMP, PKO, MKO	926A1b	3798.75	MIL	(+)				
MTA UMA, kurz nach Überg. aus AMP	911B1j	3716.82	MIL	(+)				
MUS REI GNS MKO z.T. MOB	867B9g	3546.78	APW	(+)				
GNT AMP, VGR, CHL Gängchen, netzförmig	889B1d	3634.63	MIL	(+)	COG	(+)	SIE	(+)

B.5.1 Sulfidische Erzminerale

Pyrit und Pyrrhotin sind wie bisher abwechselnd die dominierenden sulfidischen Phasen. Pyrit findet sich in bis zu 1 mm großen, idiomorphen Einzelkörnern häufig mit zahlreichen silikatischen Einschlüssen in der Grundmasse der Gneise und Metabasite verteilt. An Scherbahnen gebundener Pyrit ist seltener idiomorph und teilweise zerschert. Pyrit bildet weiterhin kleine, xeno- bis hypidiomorphe Körner in der Gesteinsgrundmasse. Optisch homogene, idiomorphe Pyritkristalle sind in enger Vergesellschaftung mit Pyrrhotin zu finden (als Anlagerung und als Einschlüsse in Pyrrhotin, lokal mit einem Chalkopyrit-Saum zwischen Pyrit und Pyrrhotin). Chalkopyrit und Pyrrhotin bilden zweiphasige, cogenetische Einschlüsse in Pyrit, was auf eine Bildungstemperatur von 334 ± 17 °C (YUND & KULLERUD 1966) bzw. 328 ± 5 °C hindeutet (SUGAKI et al. 1975). Sie wurden auch bereits in den Berichten aus höheren Bohrabschnitten beschrieben. Als jüngere Verdrängungen des Pyrits bzw. als Rißfüllungen oder Anlagerungen werden Markasit, Chalkopyrit, Sphalerit, Galenit, Millerit und weitere Ni-Co-Fe-Phasen sowie Magnetit, Hämatit, Goethit und Ilvait beobachtet. In einem Metagabbro bei 3752.98 m (918A1c) finden sich Chalkopyrit und Pentlandit als Einschlüsse in Pyrit vergesellschaftet.

Erste mineralchemische Auswertungen von Mikrosondenanalysen ergeben, daß Pyrit aus dem Metagabbro mit maximal 0.4 Gew.-% Ni keinen auffällig erhöhten Ni-Gehalt aufweist. Dagegen enthält Pyrit aus der Meta-Ultramafitit-Einheit bis 2.32 Gew.-% Ni. In einer Cuttingsprobe aus 3990 m (VC3990) tritt Pyrit mit Millerit (NiS), Violarit ((Ni,Fe)₃S₄) und Chalkopyrit in Paragenese auf (Abb. B.5.1). In diesem Fall baut Pyrit bis 6.67 Gew.-% Ni und 0.64 Gew.-% Co ein (Ni-Pyrit mit erhöhten Co-Gehalten).

In dem Gneisabschnitt oberhalb 3575 m treten leistenförmige Graphiteinlagerungen in Pyrit auf.

Mehrere Generationen von Pyrit werden durch Wachstumszonierung belegt. So wächst zelliger, jüngerer Pyrit auf optisch homogenem, älteren im Bereich von Gängchen und Scherbahnen auf (915A1aK, 3738.96 m; 936B1bK, 3826.58 m).

In einem feinkörnigen, dichten Granat-Amphibolit bei 3826.58 m (936B1bK) weisen zwei verschiedene Pyritgenerationen Chalkopyrit-, Pyrrhotin- und Magnetit-Einschlüsse auf. Beide Generationen werden von jüngerem, saumartigem Magnetit verdrängt.

Stellenweise zeigt Pyrit eine schwache bis deutliche Anisotropie.

Eine Verdrängung von Pyrit und Pyrrhotin durch Fe-Oxide (Magnetit, Hämatit und auch Goethit) bzw. die Ein- und Anla-

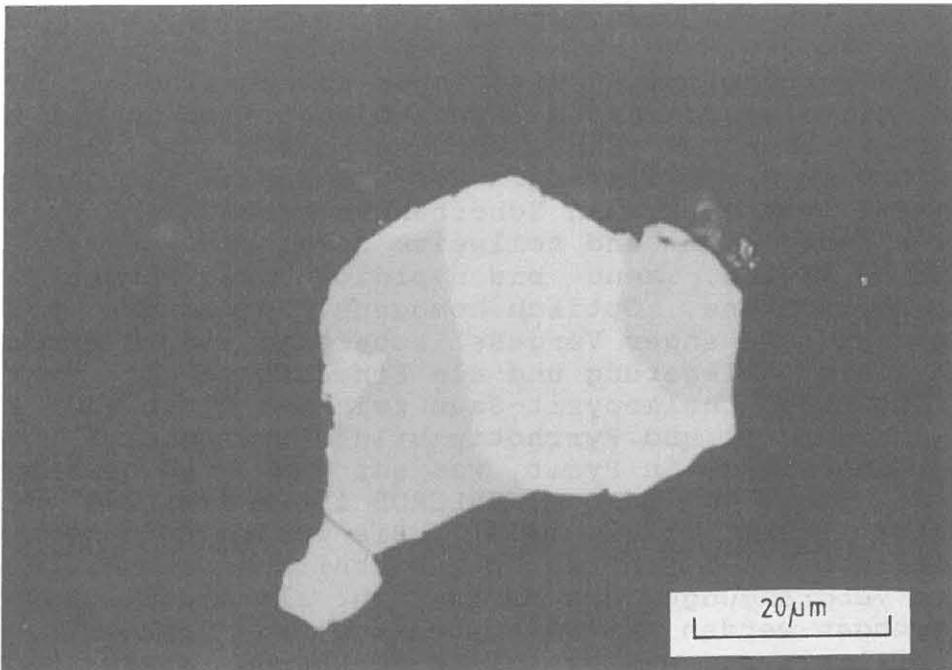


Abb. B.5.1: Kleines komplexes Aggregat aus Ni-Pyrit (hellgrau), in Violarit (grau) eingelagert, neben Millerit (weiß) und (grauem) Chalkopyrit (von links nach rechts) in einer Cuttingsprobe aus Amphibolit.
(Anschliff VC3990, 3990 m, // N, Öl)

gerung von Fe-Oxiden und Ilvait in/an Pyrit und Pyrrhotin tritt unterhalb von 3800 m (Klüfte) verschiedentlich auf (928E1nK, 3808.74 m; VC3850, 3850 m). In einer Meta-Ultramafitit-Linse bei 3720 m wird Pyrit mit Chalkopyrit-Einschlüssen von Magnetit umsäumt. Zwischen 3867 und 3873 m nimmt die Pyritführung im Zusammenhang mit einer intensiven Epidotisierung der Amphibolite stark zu.

Pyrit, Pyrrhotin und auch Chalkopyrit werden als Reaktionsprodukte bei der Alteration von Ilmenit beobachtet (Abb. B.5.2). Pyrrhotin ist in den Metabasiten unterhalb 3573.5 m im Vergleich zu den überlagernden Paragneisen etwas häufiger anzutreffen. Er bildet xenomorphe bis hypidiomorphe Einzelkörner in leukokraten und mafischen gesteinsbildenden Mineralen.

Sowohl in den Paragneisen als auch in den Metabasiten treten in Pyrrhotin flammenförmige Pentlandit-Entmischungen auf. Randliche Verdrängungen durch Chalkopyrit und Sphalerit sind häufig. Auch Einschlüsse dieser beiden Minerale in Pyrrhotin (und umgekehrt) werden beobachtet. Chalkopyrit-Verdrängungen des Pyrrhotins erfolgen z.T. entlang Subkorn-
grenzen.

Lokal wird Pyrrhotin durch lanzett- oder lagenförmigen Markasit verdrängt. Pyrrhotin ist auch mit jüngerem, saumartig aufgewachsenem Calcit vergesellschaftet (888B3iK, 3628.73 m). Im Paragneis bei 3557.79 m (871E1q) und in einem mobilisat-reichen Granat-Amphibolit (3883.60 m, 955A1a) stellt er eine jüngere Phase in Zwickeln und Rissen in gesteinsbildenden Mineralen dar. In der zuletzt genannten Probe wird der Granat-Amphibolit von zahlreichen mit Pyrit, Pyrrhotin und untergeordnet Chalkopyrit mineralisierten Klüften durchsetzt. Eine Dehnungstektonik äußert sich im mikroskopischen Befund in boudinierten (?) Minerallagen mit Verdrängungen durch Pyrrhotin (Abb. B.5.3). Jüngerer Pyrrhotin entsteht weiterhin (bei Schwefelangebot) aus der Alteration von Ilmenit zu Rutil, Anatas, Leukoxen und Titanit.

Eine deformationsbedingte Verzwilligung des Pyrrhotin zeigt beispielhaft mobilisat-führender Granat-Amphibolit bei 3674.38 m (902F1n).

Eine Probe aus dem Abschnitt mit wechsellagerndem Biotit-Hornblende-Gneis und Granat-Amphibolit bei 3879.50 m (954C1d) wurde mit "Ferrofluid", einem sehr feine Eisenpartikel führendem Kolloid belegt. Es lassen sich durch die variable Aufnahme des Ferrofluids auf der Pyrrhotin-Oberfläche ferrimagnetische und antiferromagnetische Bereiche differenzieren. Da nur der monokline Pyrrhotin ein magnetisches Moment zeigt, kann er durch die Belegung mit Ferrofluid leicht vom hexagonalen Pyrrhotin unterschieden werden (Abb. B.5.4/5). Mikrosonden-Analysen sollen eventuelle Verschiebungen im Fe:S-Verhältnis und damit in der Kristallstruktur der differenzierbaren Domänen aufzeigen.

In einem Ilmenitkorn aus 3721.75 m Teufe (912A4aK I, mobilisatreicher Amphibolit) könnte eventuell eine ältere Pyrrhotin-Pentlandit-Mineralisation konserviert sein. Der hexagonale Kornform zeigende Einschluss (Abb. B.5.6) ist ferrimagnetisch, wie die Belegung mit Ferrofluid gezeigt hat; seine Kristallstruktur ist somit monoklin. Die Entmischung von Pentlandit aus Pyrrhotin kann nach UYTENBOGAARDT & BURKE (1971) zur Umwandlung von hexagonalem zu monoklinem Pyrrhotin führen.

Pyrrhotin-Einschlüsse (auch mit Chalkopyrit verwachsen) in Granat können als Relikte einer älteren, eventuell primären Sulfidgeneration angesehen werden. Sie treten u.a. bei 3580.91 m (876A2f) und bei 3743.14 m (916B1f; Abb. B.5.7) auf.

Chalkopyrit und Sphalerit sind als jüngere Bildungen häufig miteinander verknüpft. Die Vergesellschaftung mit Pyrrhotin und Pyrit in Form von Einschlüssen und Verdrängungen sowie die Verdrängung von gesteinsbildenden Mineralen, durch Chalkopyrit wurde bereits erwähnt. In einem Pyritkorn in Metagabbro (3752.98 m, 918A1c) treten als Einschlüsse neben Chalkopyrit und Sphalerit weiterhin Galenit und Fe-haltiger

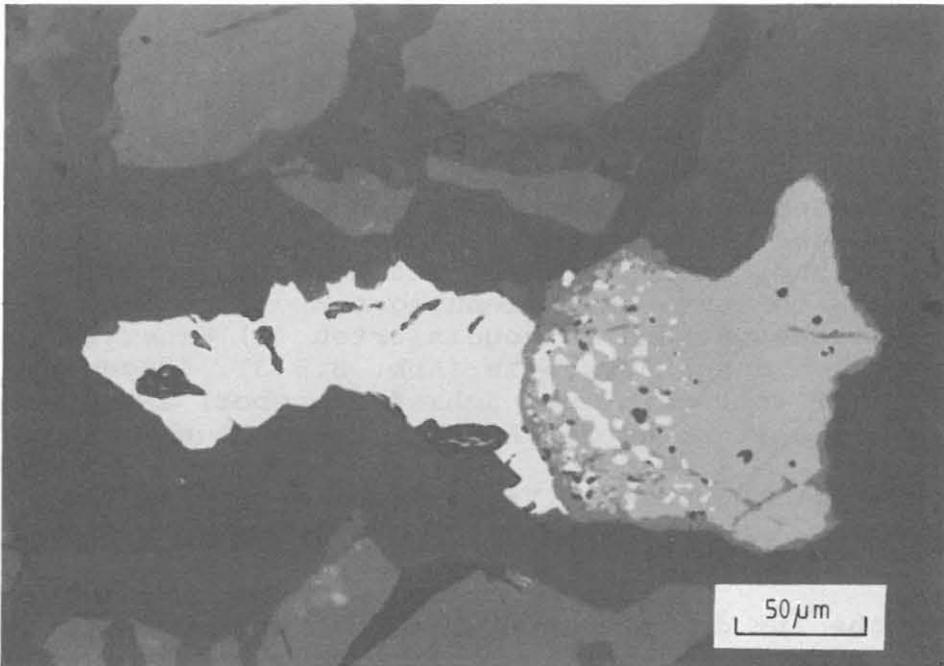


Abb. B.5.2: Ilmenit (hellgrau) mit jüngeren tropfenförmigen Pyrrhotin-Einlagerungen (weiß) und dunkelgrauem, dünnem Titanit Saum, mit randlicher Pyrrhotin-Anlagerung (weiß) in granat-reichem Amphibolit.

(AS 933B1hK, 3818.71 m, // N, Luft)

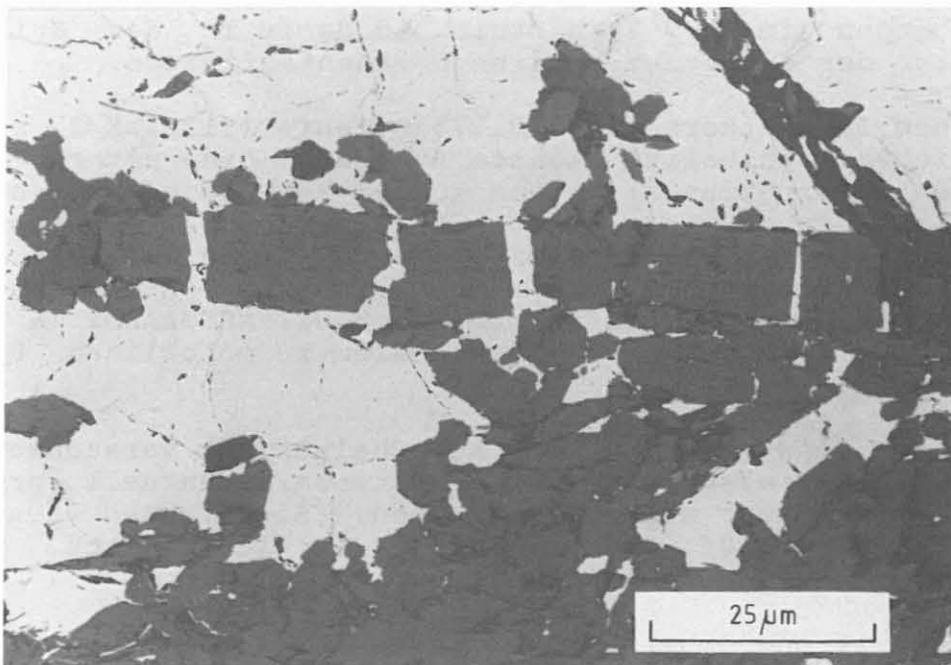


Abb. B.5.3: Pyrrhotin (hellgrau) durchsetzt dunkelgraue, boudinierte(?), silikatische Minerale in Granat-Amphibolit.

(AS 955A1a, 3883.60 m, // N, Luft)

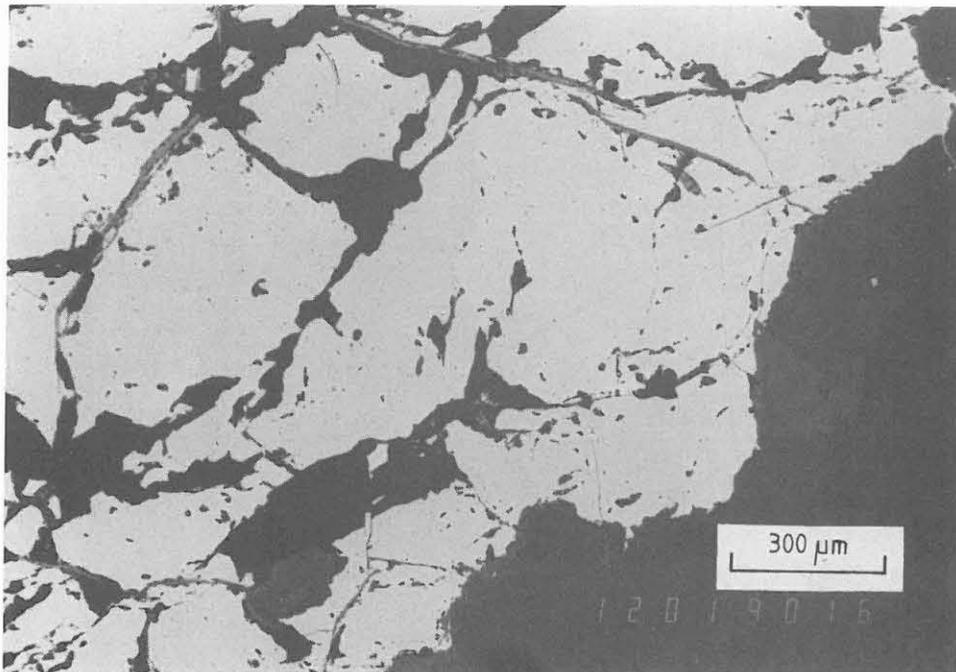


Abb. B.5.4: Große xenomorphe, inhomogene Pyrrhotin-Aggregate werden von sekundären Fe-Oxiden auf Rissen durchsetzt; in Granat-Amphibolit-Hornblendegneis (AS 954C1d, 3879.50 m, // N, Luft)

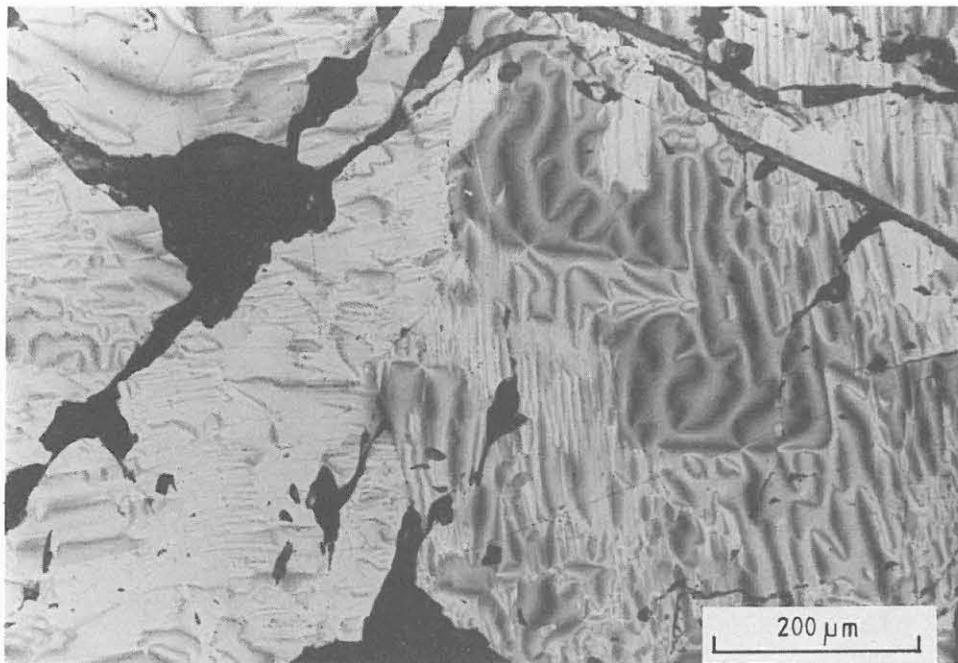


Abb. B.5.5: Ausschnitt aus Abb. B.5.4 mit Ferrofluid belegt, es lassen sich deutlich ferrimagnetische (hell- bis dunkelgrau, schlierige) und antiferromagnetische (helle, schlierenfreie) Bereiche unterscheiden. (AS 954C1d, 3879.50 m, // N, Luft)

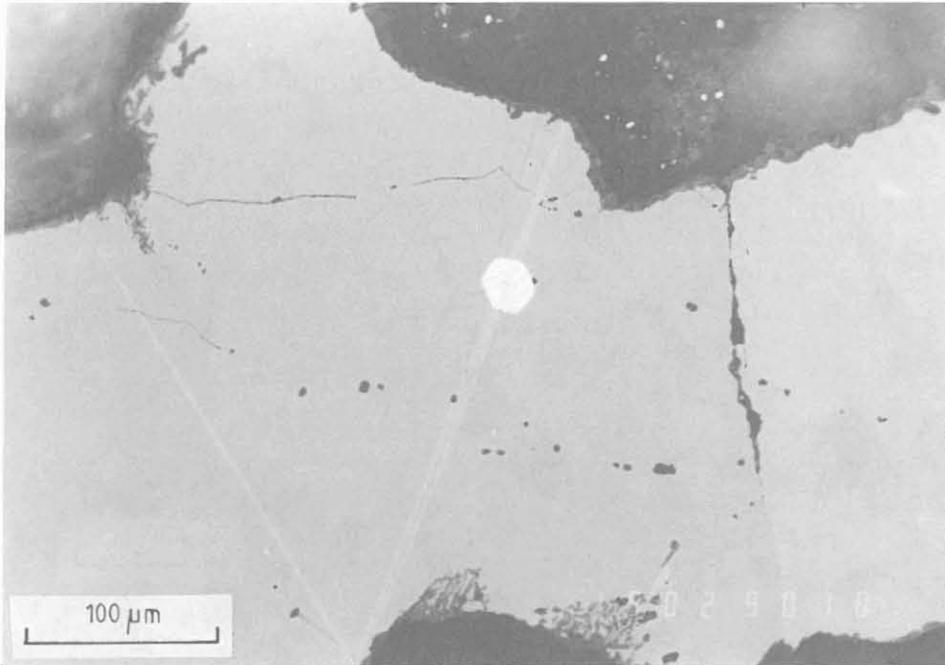


Abb. B.5.6: Sechseckiger Pyrrhotin-Einschluß mit kleiner Pentlandit-Entmischung in Ilmenit, der randlich z.T. symplektitartig von Titanit verdrängt wird; in mittelkörnigem Amphibolit.

(AS 912A4aKI, 3721.75 m, // N, Öl)

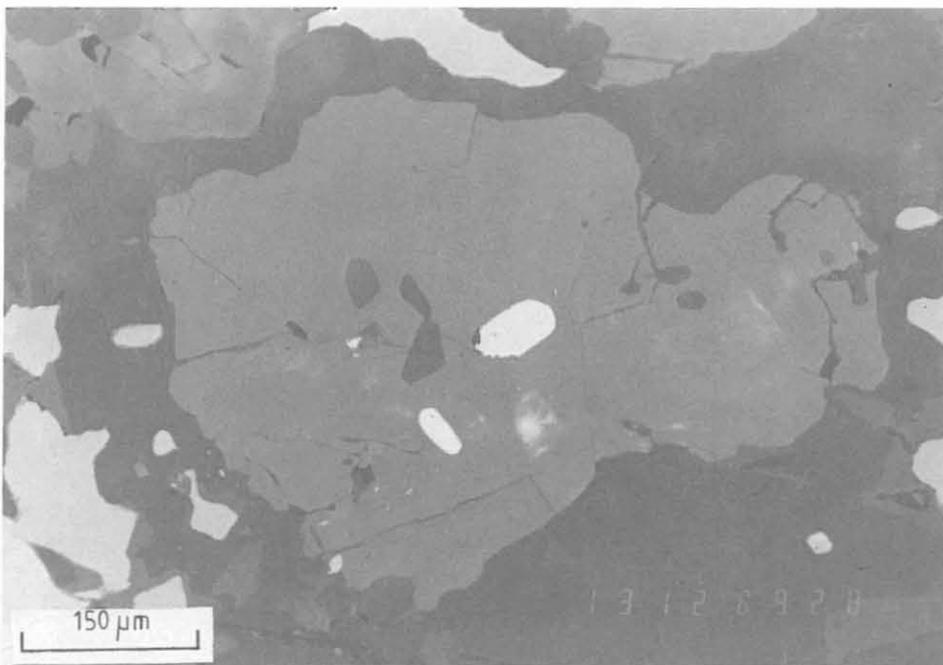


Abb. B.5.7: Rundliche, konservierte(?) Pyrrhotin-Einschlüsse in granat-reichem Amphibolit.

(AS 916B1f, 3743.14 m, // N, Luft)

Siegenit $(\text{Ni}, \text{Co})_3\text{S}_4$ auf. Im gleichen Anschliff zeigt sich eine Verwachsung von Chalkopyrit mit Millerit (NiS). Chalkopyrit und Millerit finden sich bei 941C1cK (3844.43 m) in Pyrit, der von Magnetit umsäumt wird (Abb. B.5.8). Eine ausgeprägte Verdrängung des Chalkopyrits durch skelettartigen Markasit findet sich bei 3634.63 m (889B1d) in einem von chloritisierten Scherbahnen und Gängchen durchsetzten Granat-Amphibolit.

In der Nähe einer foliationsparallelen Scherbahn bei 3573.83 m weist ein Sphalerit-Mobilisat Chalkopyrit-Einschlüsse auf. Diese Einschlüsse könnten eventuell eine Chalkopyrit-ähnliche, Zn-haltige Mischphase ("intermediate solid solution") darstellen (Abb. B.5.9), wie sie von FRIEDRICH et al. (1989) und KONTNY et al. (1990) aus einer linsenförmigen Erzmineralisation bei 396 m beschrieben wurde.

Markasit bildet eine junge Verdrängungsphase, die Pyrrhotin (z.B. VC3850, 3850 m), Pyrit (z.B. 955A1a, 3883.60 m; 884B1e, 3613.40 m) und Chalkopyrit (z.B. 889B1d, 3634.63 m) ersetzen kann. In dem Metagabbro bei 3752.98 m (918A1c), der Ni-Co-Fe-Thiosulfide führt, weist Markasit (wie Pyrit) mit 0.9 Gew.-% erhöhte Ni-Gehalte auf.

Pentlandit bildet in den Metabasiten und auch in den Paragneisen flammenförmige Entmischungen in Pyrrhotin aus. Hypidiomorpher Pentlandit findet sich angrenzend an Chalkopyrit als Einschluß in Pyrrhotin im Gneis bei 3524,85 m (862D3rK, Abb. B.5.10). In dem mobilisatreichen, Turmalinführenden Gneis bei 3546.78 m (867E9g) findet sich in einem glimmerreichen Abschnitt eine komplexe Mineralisation aus kobalt-reichem Pentlandit, Pyrrhotin, Chalkopyrit, Sphalerit und Silberpentlandit (Ag-Pentlandit) (Abb. B.5.11).

In dem Metagabbro bei 3752.98 m (918A1c) wurde erstmal in der Vorbohrung Pentlandit in Paragenese mit Pyrit (ohne Pyrrhotin) und Chalkopyrit angetroffen. Chalkopyrit und Pentlandit bilden einen cogenetischen, zweiphasigen Einschluß in Pyrit (Abb. B.5.12).

Galenit tritt nur untergeordnet auf; er stellt eine jüngere Phase dar und ist häufig mit Chalkopyrit und Sphalerit verknüpft. Galenit bildet selten kleine xenomorphe Einzelkörner in der Grundmasse. Bei 3537.83 m (865F2ac) tritt er in stark alteriertem, leukokratem Sillimanit-Biotit-Gneis mit einer Fe-Ni-Cu-Ag-S-Mischphase in Chalkopyrit auf.

Molybdänit konnte als sehr untergeordnetes Mineral in zahlreichen Präparaten aus Paragneis- und Metabasit-Einheiten bestimmt werden. Er ist stets stengelig, mehr oder weniger gebogen ausgebildet und im Paragneis und in dem hangenden Teil der Metabasit-Serie stets mit Graphit vergesellschaftet. Leistenförmiger Molybdänit findet sich verschiedentlich in Graphitleisten eingeregelt (Abb. B.5.13).

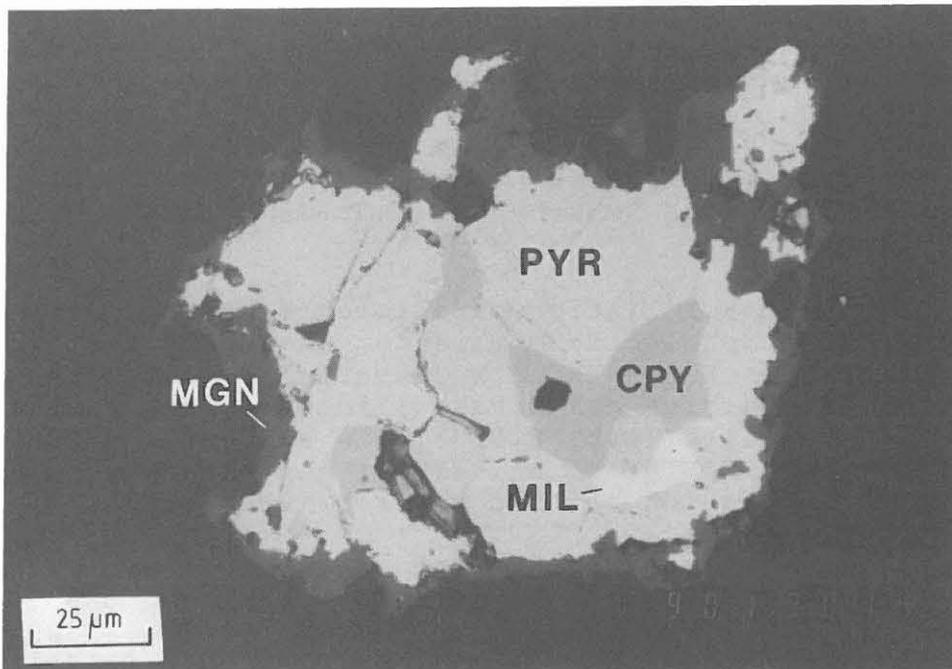


Abb. B.5.8: Millerit (NIS)-Chalkopyrit (CPY)-Einschlüsse in Pyrit (PYR), der randlich von Magnetit (MGN) verdrängt wird; in Biotit-Gneis, der in Wechsellagerung mit feinkörnigem Amphibolit vorliegt.

(AS 941C1cK, 3844.43 m, // N, Öl)

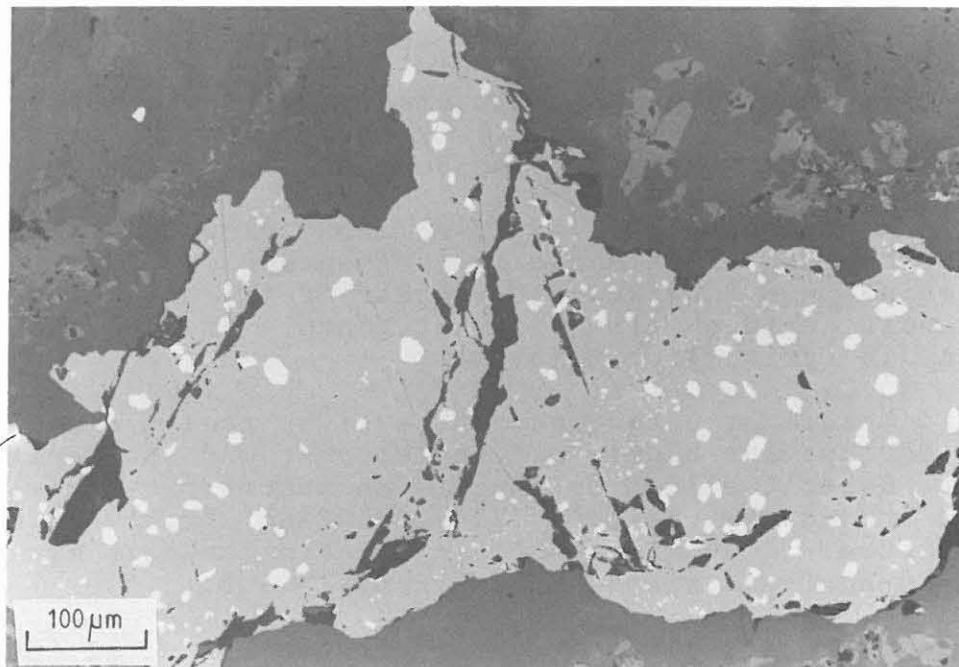


Abb. B.5.9: Rundliche kleine bis sehr kleine, hellgraue Chalkopyrit-Einschlüsse ("ISS"?) in mittelgrauem Sphalerit-Aggregat, in stark alteriertem Sillimanit-Biotit-Gneis entlang einer foliationsdiskordanten Scherbahn.

(AS 865F2ac, 3573.83 m, // N, Luft)

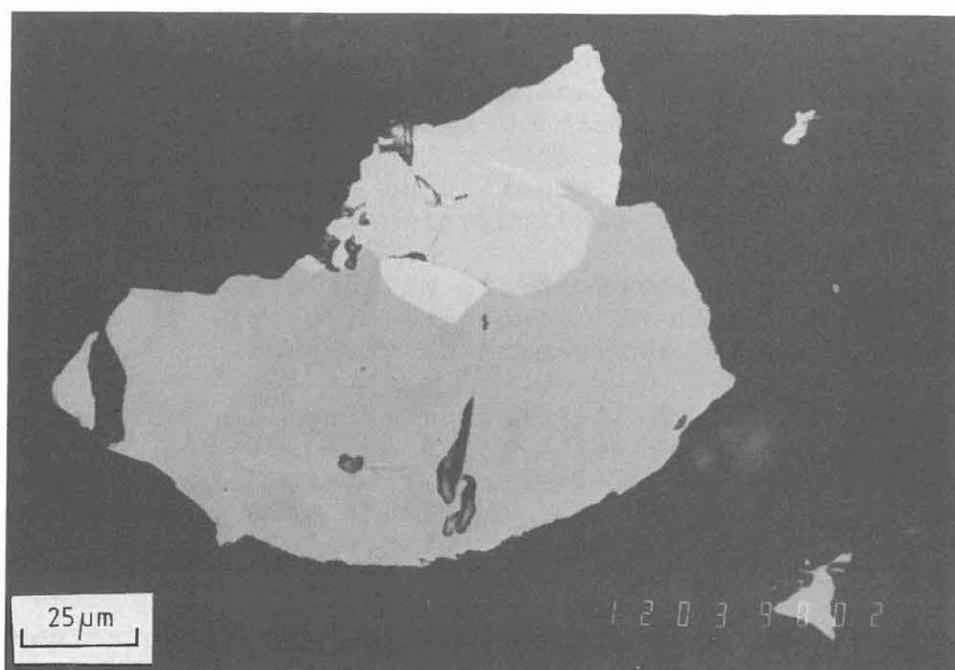


Abb. B.5.10: Verwachsung von Pyrrhotin (grau) und Chalkopyrit (hellgrau), an der Korngrenze ist Pentlandit (weiß) einmal als Flämmchen und einmal als größeres, hypidiomorphes Aggregat eingelagert; in einem feinkörnigen strafflagigen Sillimanit-Biotit-Gneis.

(AS 862D3rK, 3524.84 m, // N, Ö1)

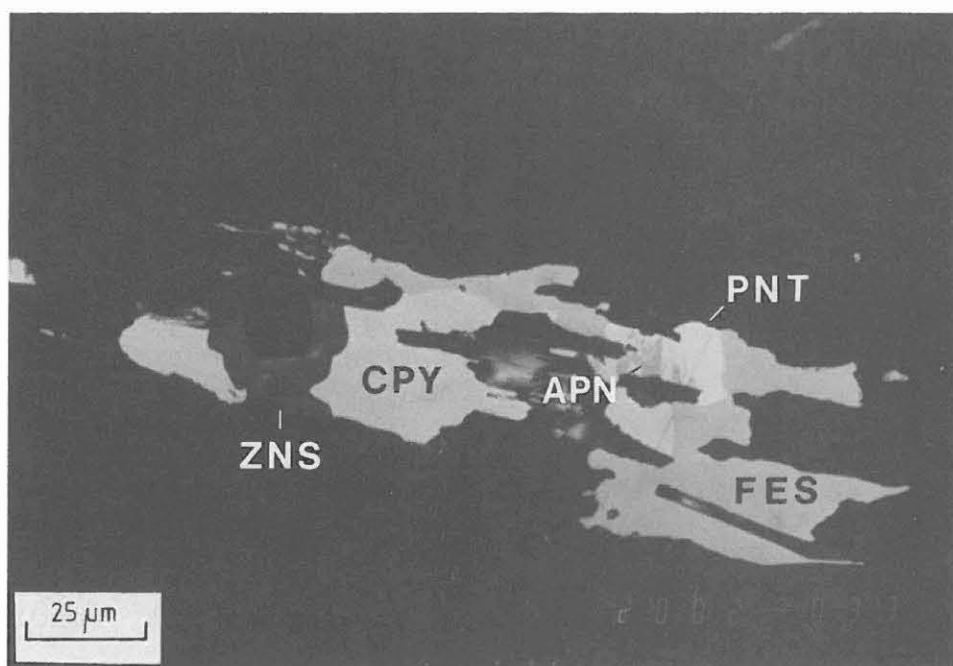


Abb. B.5.11: Komplexes Sulfidaggregat aus Chalkopyrit (CPY), Pyrrhotin (FES) und Sphalerit (ZNS), in das Co-reicher Pentlandit (PNT) und Silberpentlandit (APN) eingelagert sind; in muskovitreichem, mittelkörnigem Gneis.

(AS 867E9G, 3546.78 m, // N, Ö1)

Millerit wurde in diesem Berichtsabschnitt bisher in den Metabasit-Serien unterhalb 3575 m nachgewiesen. Das Nickelsulfid ist in Form von Anlagerungen und Einschlüssen mit Pyrit und/oder Chalkopyrit verknüpft (Abb. B.5.8). In der Cuttingsprobe VC3990 aus 3990 m Teufe sind Millerit (NiS), Violarit (FeNi_2S_4), Chalkopyrit und Ni-Pyrit (6.67 Gew.-% Ni, siehe unter Pyrit) einfach verwachsen (Abb. B.5.1).

In hypidiomorpher Kornform ist Millerit sowohl mit Pyrit (Abb. B.5.14) als auch mit Siegenit $(\text{Ni,Co})_3\text{S}_4$ im Metagabbro bei 3752.98 (918A1c) paragenetisch verknüpft.

Ein hypidiomorphes Kobaltit-Korn in einem leukokraten Mobilisat in Granat-Amphibolit (877F3ad, 3589.74 m) enthält Einschlüsse aus Chalkopyrit und Pyrrhotin (Abb. B.5.15). Im Paragneis tritt das Mineral ebenfalls als hypidiomorphes Einzelkorn in der Nähe von Pyrrhotin mit Pentlandit, Chalkopyrit und Fe-reichem Siegenit auf (862D3rK, 3524.84).

Arsenopyrit wird in einem Mobilisat in den allanit-führenden Gneisen, im Übergang zu den unterlagernden Metabasiten bei 3572.73 (874F1p) vermutet. Er bildet eine einzelne hypidiomorphe Anlagerung an Pyrrhotin. Weitere, nur sehr untergeordnet bestimmte sulfidische Minerale sind Siegenit (918A1c, 3752.98 m) und Polydymit (VC3990, 3990 m).

Die aufgeführten Ni-Co-Fe-(Thio-)Sulfide sind in vielen Anschliffen in der Metabasit-Einheit vorhanden. Sie treten als sehr kleine Anlagerungen und Verdrängungen in Pyrit, häufig in Paragenese mit Chalkopyrit und seltener mit Galenit auf (zum Beispiel 918A1c, 3752.98 m); sie konnten anhand von Mikrosondenanalysen in einigen Proben zweifelsfrei identifiziert werden.

B.5.2 Oxidische Erzminerale

Ilmenit bildet neben Rutil das dominierende Erzmineral in den metabasischen Gesteinen. Während er in den Gneisen als sekundäre Bildung meist kleine ($<30 \mu\text{m}$), leistenförmige Aggregate entlang von Spaltflächen von Glimmern ausbildet, finden sich in den Metabasiten primär gebildete, große, buchtige Individuen und Verwachsungen (meist $>250 \mu\text{m}$). Umwandlungen und Verdrängungen des Ilmenit durch Anatas, Rutil und Leukoxen treten in den Gneisen wie auch in den Metabasiten auf. In den allanit-führenden Übergangsgneisen im Grenzbereich zu den Metabasiten bildet Ilmenit größere ($>250 \mu\text{m}$), stengelige und rundliche Kornformen mit randlichen Titanitaufwachsungen aus (874F1sK, 3573.31 m).

Eine alterationsbedingte, enge Vergesellschaftung des Ilmenits mit Rutil, Titanit und auch mit Sulfiden ist weit verbreitet. Den buchtigen bis tafeligen Ilmenitaggregaten in den metabasischen Gesteinen wächst fast stets ein unter-

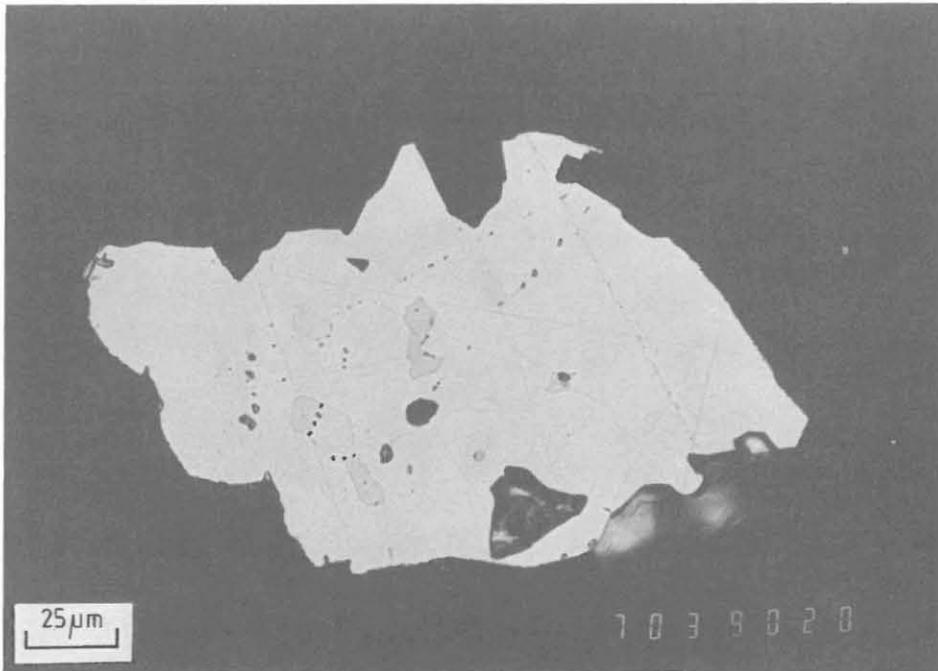


Abb. B.5.12: Größeres Pyrit-Aggregat (weiß) mit cogentischen Pentlandit- (weißgrau) und Chalkopyrit-Einschlüssen (hellgrau) in mittelkörnigem Metagabbro.
(AS 918A1c, 3752.98 m, // N, Öl)



Abb. B.5.13: Stengeliges Graphit-Aggregat (grau) mit ebenfalls stengeligem Molybdänit-Einschluß (hellgrau), in lagigem, körneligem, stark alteriertem Sillimanit-Biotit-Gneis.
(AS 865F2ac, 3537.88 m, // N, Öl)

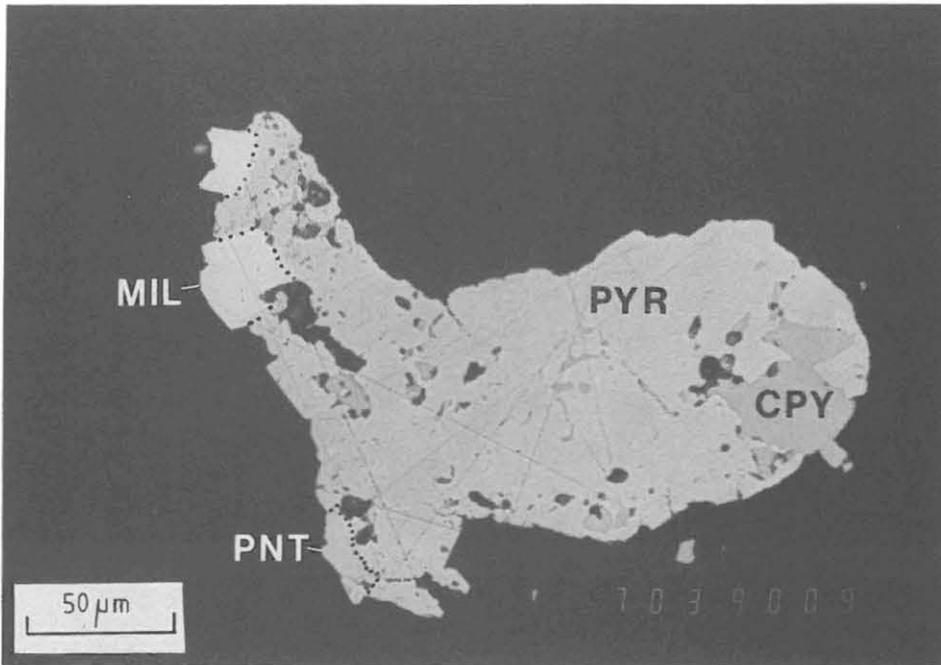


Abb. B.5.14: Pyrit (PYR) mit Anlagerung aus hypidiomorphem Millerit (MIL) und Einlagerung von Chalkopyrit (CPY) und Pentlandit (PNT) in mittelkörnigem Metagabbro.
(AS 918A1c, 3752.98 m, // N, Ö1)

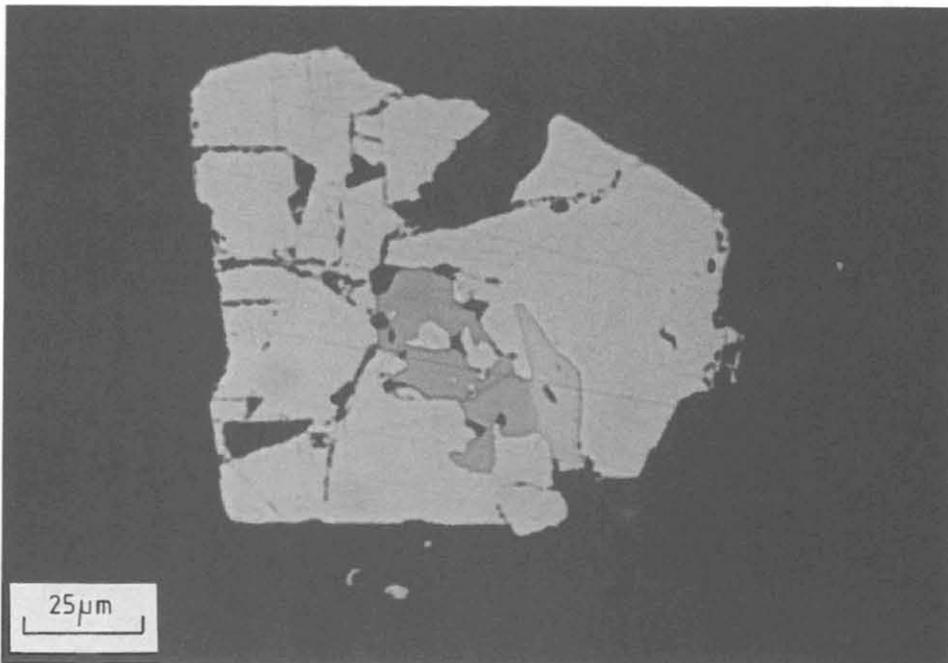


Abb. B.5.15: Hypidiomorpher Kobaltglanz (weiß) enthält Einschlüsse aus Chalkopyrit (hellgrau) und Pyrrhotin (mittelgrau); tritt in einem Mobilisat in Granat-Amphibolit auf.
(AS 877F3ad, 3589.74 m, // N, Ö1)

schiedlich starker Titanitsaum auf. Im Metagabbro bei 3620.16 m (885C3n) werden feine, symplektitartige Titanit-Leukoxen-Ilmenit-Säume an Ilmenit beobachtet (Abb. B.5.16). Bei Ilmenit-Rutil-Kornverwachsungen findet sich dieser Saum ausschließlich an Ilmenit, wohingegen Rutil lediglich einen dünnen Titanitsaum aufweist.

Wenn jüngere Sulfidminerale (Pyrit, Pyrrhotin) zu Ilmenit benachbart auftreten (Abb. B.5.2), finden sie sich auch in einem Ilmenit-(Rutil)-Leukoxen-Titanit-Sulfid-Alterations-saum (888A3c, 3628.00; 9331B1hK 3818.71 m). Im sehr granatreichen Amphibolit bei 3577.21 m (875C21T), nahe dem Kontakt zu den Paragneisen, wird an Ilmenit-Rutil-Verwachsungen angelagerter Pyrrhotin von einem Titanitsaum umgeben. Weiter entfernten Pyrrhotin-Körnern fehlt dieser Saum.

Häufig tritt Ilmenit zusammen mit Titanit auch als Verdränger von größeren Rutilkörnern auf. Zusammengehörende Relikte ehemaliger größerer Rutilkörnern können manchmal durch ihre übereinstimmenden Zwillingslamellen identifiziert werden (875C12T, 3577.51; Abb. B.5.17). Eine stärkere Lamellierung des Ilmenits in einem Metagabbro bei 3613.40 m (884B1e) hängt mit seiner starken kataklastischen Überprägung zusammen (Abb. B.5.18/19).

Jüngere Gangmineralisationen mit Prehnit durchsetzen auch größere Ilmenitindividuen (914A1a I, 3732.90 m) in stark geklüftetem Amphibolit. In der Nachbarschaft zu einer halb-offenen Kluft mit starker Sekundärmineralisation aus Epidot und Calcit nimmt die Alteration großer reliktscher Ilmenite noch zu (Granat-Amphibolit, 926C1g II, 3800.39 m). Hier tritt eine enge myrmekitartige Vergesellschaftung von Ilmenit und Fe- und Ti-reichen Phasen auf, die von Titanitsäumen umgeben werden (Abb. B.5.20).

Ilmenit bildet bei 3639.23 m (890A1c) im Bereich einer flachliegenden kataklastischen Scherbahn ein 1 x 2 cm großes, linsenförmiges Aggregat. Alterationen zu Rutil sowie Titanitsäume sind stets vorhanden. Jüngere Sulfidphasen (Pyrrhotin, Sphalerit, Pyrit) sitzen Titanit auf, der gangförmig den Ilmenit durchschlägt.

Rutil ist in verschiedenen Variationen ausgebildet. Als ältere Phase, die häufig von Ilmenit und Titanit verdrängt wird, bildet er größere Körner mit flächigen, meist gelblich-braunen Innenreflexen und deutlich ausgeprägten Zwillingslamellen. Die jüngere Verdrängung aus Rutil, Leukoxen und Anatas (?), die Ilmenit ersetzt, ist sehr feinkörnig und zeigt weißliche "punkthaufenförmige" Innenreflexe.

Mögliche Hinweise auf eine Rekristallisation unter Gleichgewichtsbedingungen zeigen die 120°-Winkel-Gefüge (Abb. B.5.21) im Rutil bei 3721.88 m (912A4aK II).

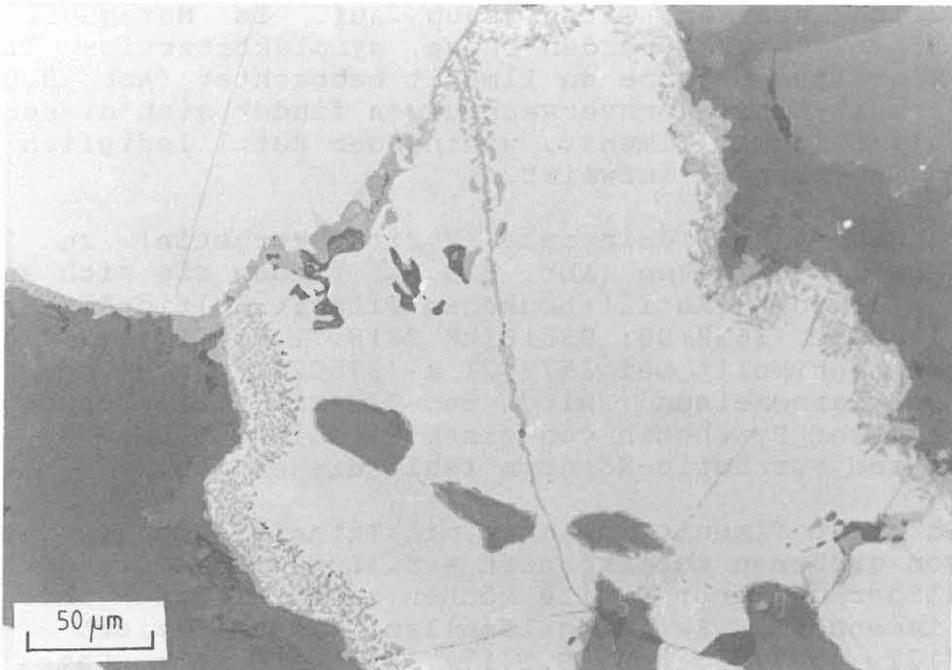


Abb. B.5.16: Ilmenit (zentral) mit randlicher symplektitartiger Verdrängung durch Titanit und Leukoxen; oben links und unten rechts Rutil-Anlagerung mit einfacher randlicher Verdrängung durch Titanit in Metagabbro.
(AS 885C3n, 3620.16 m, // N, Luft)

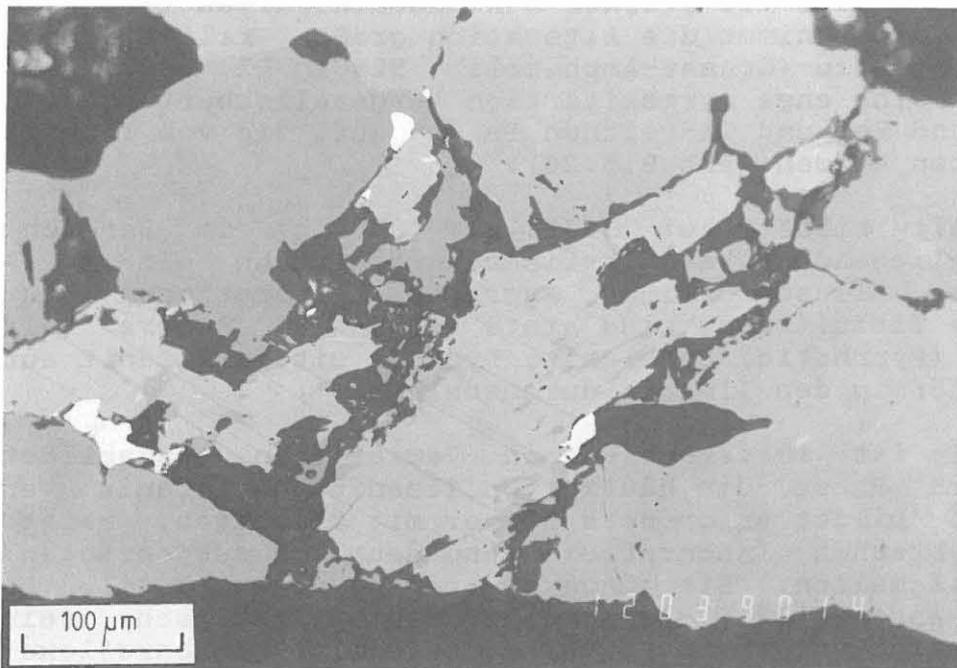


Abb. B.5.17: Reliktischer Rutil mit durchgehenden Zwillingslamellen wird von mittelgrauem Ilmenit (pleochroitisch, homogen) und dunkelgrauem Titanit verdrängt; auf Reaktionssäumen bildet sich Pyrrhotin (weiß) in granat-reichem Amphibolit.
(AS 875C21T, 3577.50 m, // N, Öl)

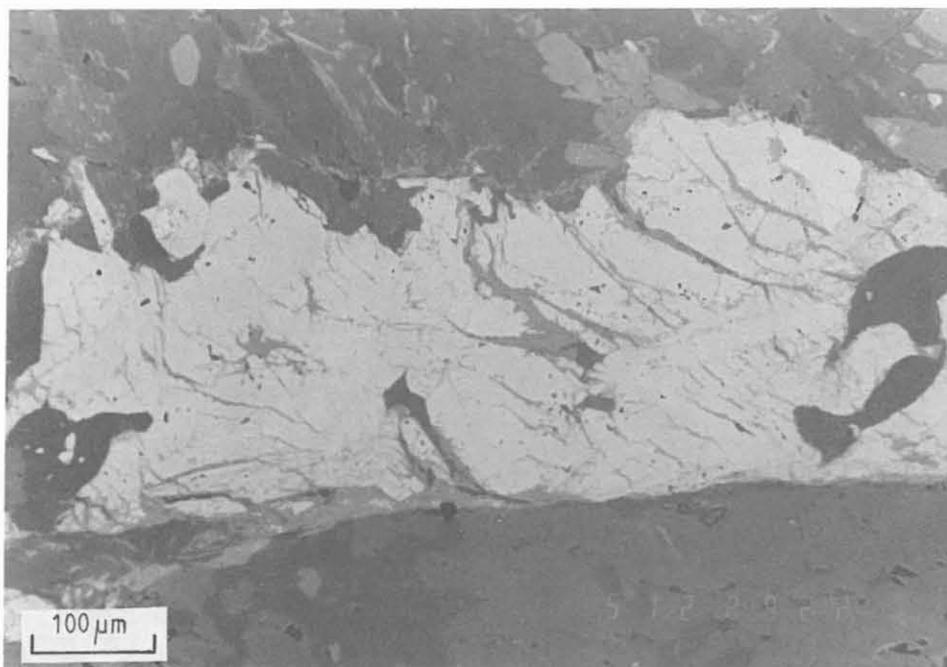


Abb. B.5.18: Stark kataklastisch überprägter, lamellierter Ilmenit in Metagabbro.
(AS 884B1e, 3613.40 m, // N, Luft)



Abb. B.5.19: Wie Abb. B.5.18; bei gekreuzten Nicols wird die engständige, deformationsbedingte Zwillingslamellierung deutlich.
(AS 884B1e, 3613.40 m, + N, Luft)

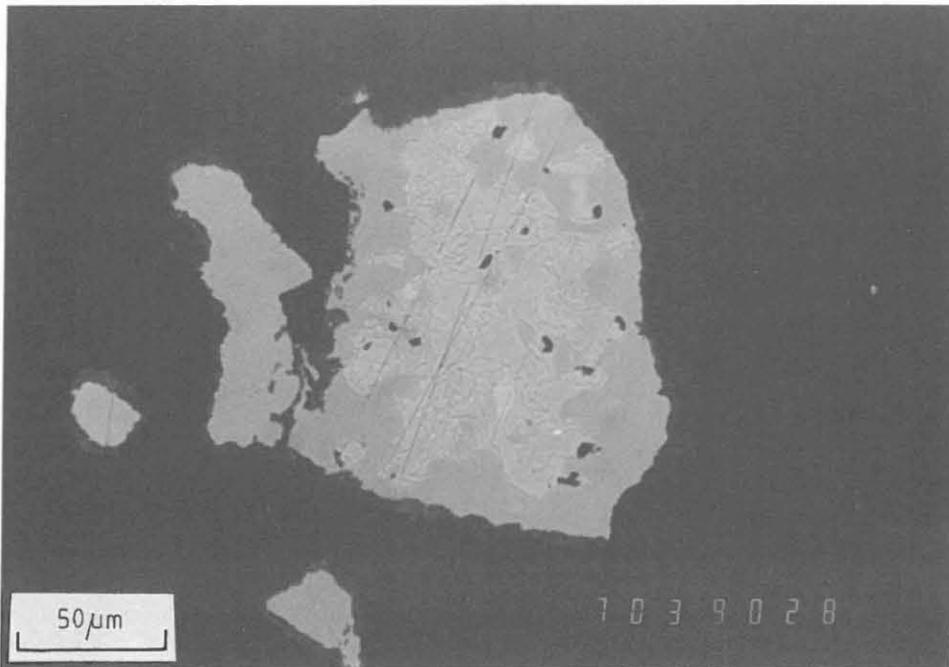


Abb. B.5.20: Ilmenit (homogen, randlich) enthält myrmekit-
artige Verwachsungen aus Fe- und Ti-reichen Phasen (verschie-
dene Grautöne), randliche Verdrängung durch Titanit in Gra-
nat-Amphibolit.
(AS 926C1gII, 3800.39 m, // N, Öl)

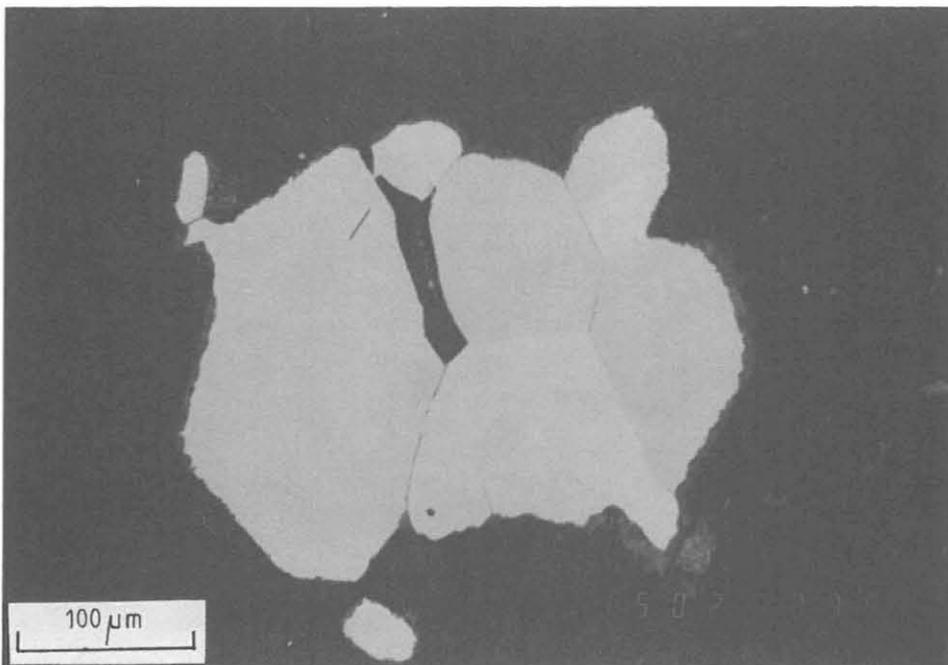


Abb. B.5.21: Rutil mit dünnem Titanit-Saum, zeigt Korngrenzen
mit 120°-Winkeln; im Amphibolit.
(AS 912A4aKII, 3721.88 m, // N, Öl)

Größere, wahrscheinlich ältere Rutil, für die eine Zwillinglamellierung charakteristisch ist, werden lokal von nadeligem Ilmenit durchsetzt. Diese Nadeln sind meistens einheitlich orientiert; sie wachsen vom Kornrand aus in die Rutil hinein, können aber auch separat im Rutilkorn auftreten. Diese Nadeln werden stellenweise (z. B. in sehr granatreichem Amphibolit bei 3577.51 m, 875C21T) durch eine deformationsbedingte Zwillingbildung versetzt (Abb. B.5.22).

Ilmenit und Rutil werden auch als Einschlüsse in Granat beobachtet und stellen so eventuell eine konservierte, frühe Erzmineralbildung dar. Überwiegend <10 µm große rundliche, regellos verteilte Rutileinschlüsse weist Granat im Granat-Amphibolit bei 3605.80 m (882F4aT) auf. Ebenfalls in Granat-Amphibolit, bei 3664.94 (900B7a), sind Rutil- und untergeordnet Ilmeniteinschlüsse schnurartig in Granat orientiert (Abb. B.5.23). Im Sillimanit-Biotit-Gneis bei 3524.84 m (862D2rK) verdrängt Ilmenit in Granat eingeschlossene Rutilstengelchen.

Magnetit wurde in dieser Berichtsstrecke mit dem Übergang in die Meta-Ultramafitite bei 3716.82 m (911B1j) identifiziert. Das Mineral ist in einigen Anschliffen dieser Einheit dominant. Unterhalb 3800 m findet sich Magnetit in vielen untersuchten Anschliffen aus den metabasischen Einheiten.

In der ca. 3 m mächtigen, heterogenen Meta-Ultramafitit-Einschaltung von 3717 bis 3720 m bildet Magnetit kleinere und größere, meist unregelmäßig verteilte, lokal angereicherte, xenomorphe Einzelkörner in der Gesteinsgrundmasse (Abb. B.5.24/25). Es finden sich Assoziationen mit Ilmenit. Bei 3718.65 m (911Elad) treten Magnetit-Einschlüsse in Pyrit und auch Pyrit-Pyrrhotin-Einschlüsse in Magnetit auf.

Bei 3719.51 m (911FlahK) bildet Magnetit zonierte Säume um Spinelle (siehe Abb. B.4.34 in diesem Kapitel und Abb. D.5.5 im Kap. D). Weiterhin umgibt er girlandenförmig gesteinsbildende Minerale. Magnetit bildet schmale, äußere, saumartige Aufwachsungen um Ilmenit und um Sulfide (durch einen silikatischen Saum getrennt. Derartige Magnetitsäume und ihre Bildungsbedingungen beschreibt DILL (1985, 1988) aus Serpentiniten bei Erbdorf und im Randbereich der Münchberger Masse.

Einen Magnetiteinschluß mit hexagonalen Umrissen weist idiomorpher Pyrit in 3872.34 m Teufe (952A3fT) auf. Lokal verdrängt Magnetit den Pyrit.

Unterhalb von 3800 m, im Bereich der Fluidzuflußzonen und in Bereichen starker sekundärer Mineralisationen unter oxidierenden Bedingungen tritt sekundär gebildeter Magnetit zusammen mit den Fe-Oxiden Hämatit, Goethit und mit dem Ca-Fe-Silikat Ilvait als Ein- und Anlagerungen in/an Pyrit auf (Abb. B.5.26/27).

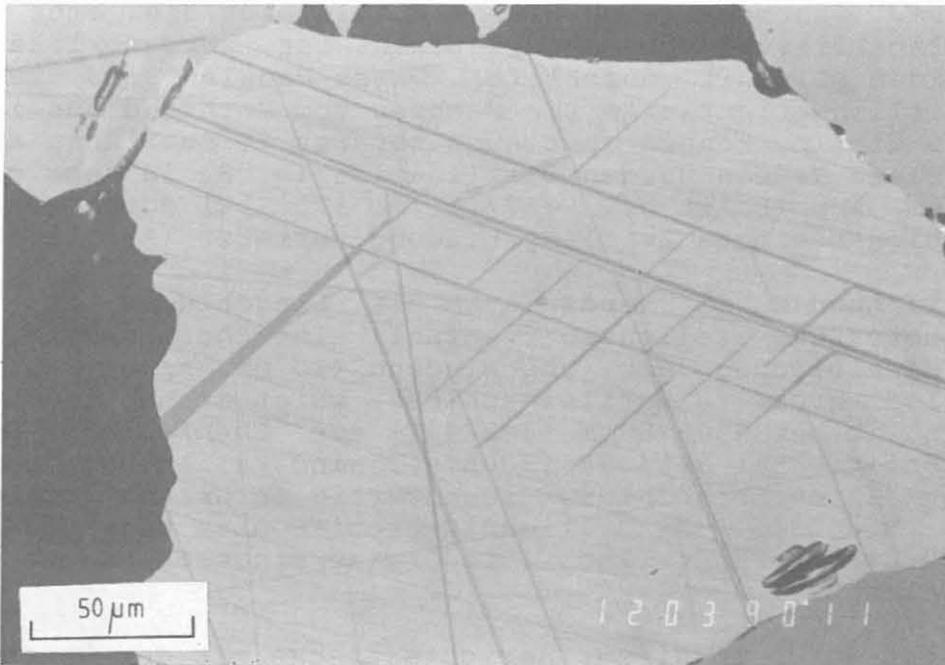


Abb. B.5.22: Großes Rutilkorn (zentral) mit Zwillingslamellen und dunkelgrauen, einheitlich orientierten Ilmenitnadeln; sowohl die Lamellen als auch die Ilmenitnadeln sind deformationsbedingt versetzt; in Granat-Amphibolit: (AS 875C21T, 3577.51 m, + N, Öl)

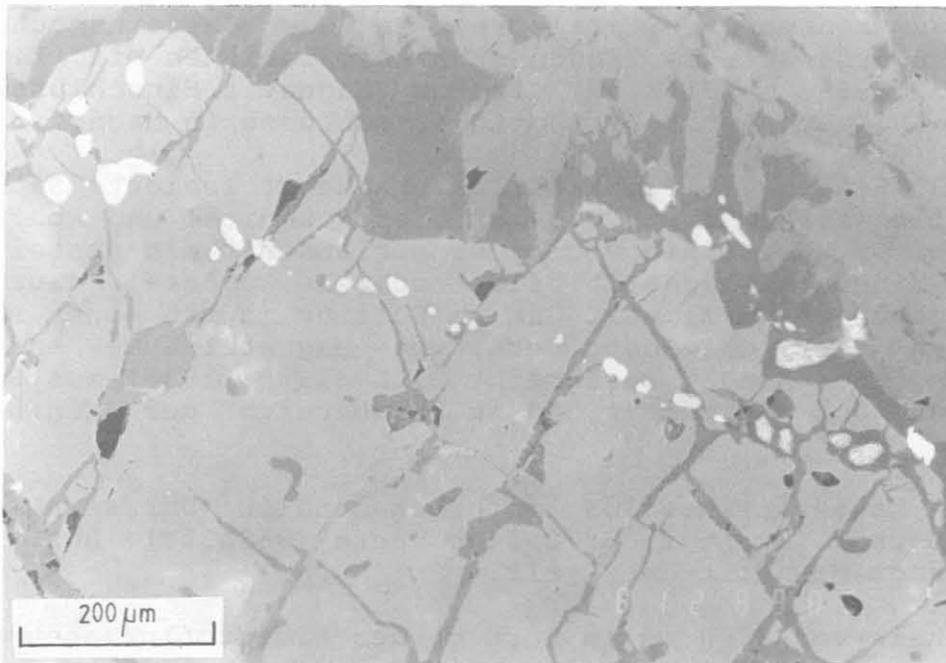


Abb. B.5.23: Schnurartig orientierte Rutil-Ilmenit-Einschlüsse in Granat in einem Granat-reichen Amphibolit. (AS 900B7a, 3664.95 m, + N, Luft)

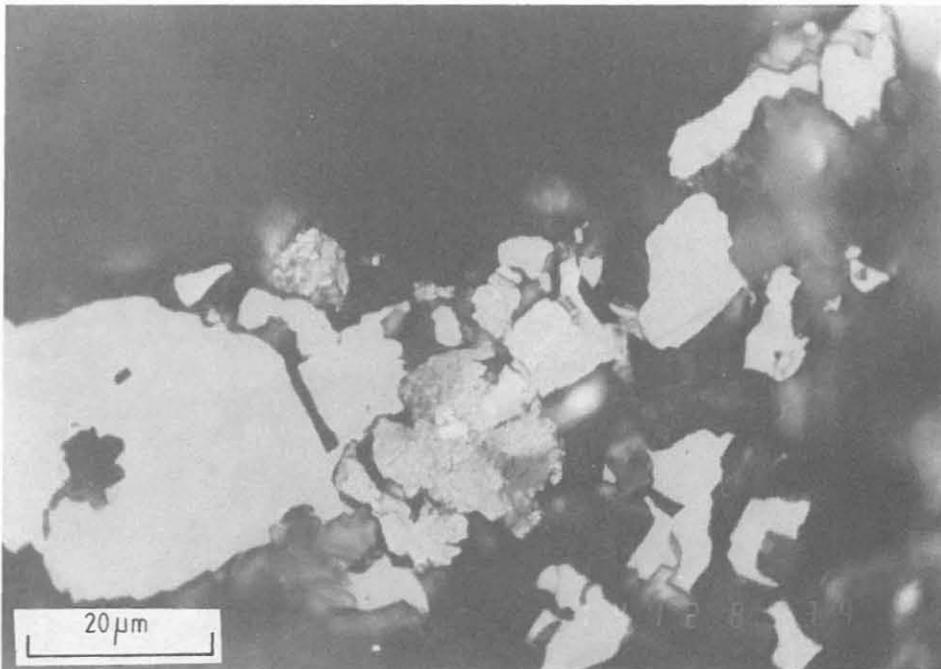


Abb. B.5.24: Magnetit (hellgrau, homogen) mit sphärolitischem Graphit (diffus-grau) verwachsen; in Meta-Ultramafitit.
(AS 911FlahK, 3719.51 m, // N, Öl)

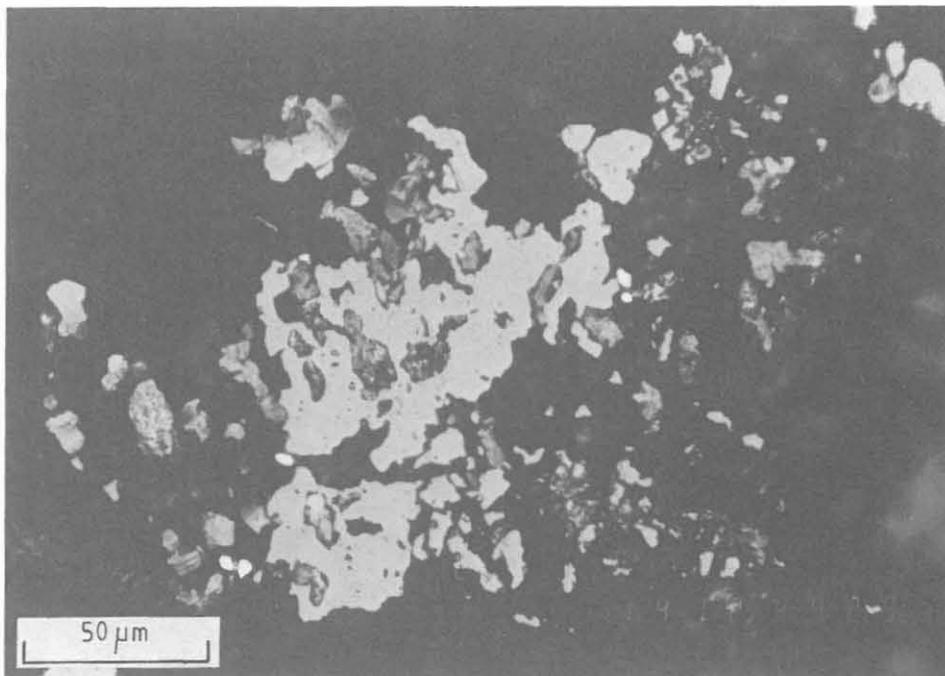


Abb. B.5.25: Magnetit (mittelgrau) innig mit Graphit (diffus-grau) verwachsen und kleine rundliche Pyrit-Körner (weiß); in Meta-Ultramafitit.
(AS 911FlahK, 3719.51 m, // N, Öl)

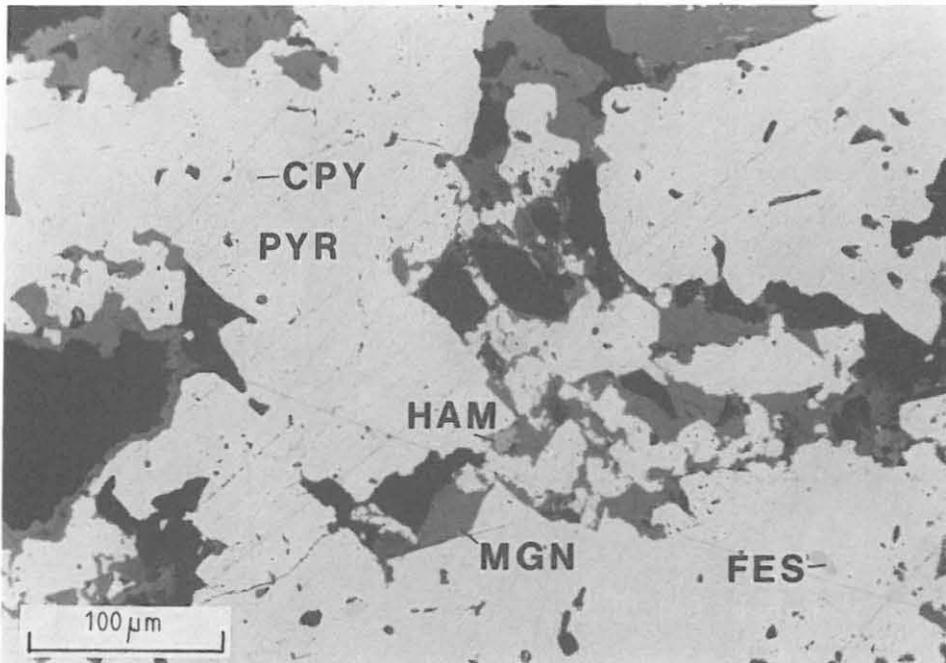


Abb. B.5.26: Inhomogenes, einschlußreiches Pyrit-Aggregat (PYR), das Einschlüsse aus Chalkopyrit (CPY) und Pyrrhotin (FES) enthält und von Hohlräumen, Rändern und Rissen aus durch Magnetit (MGN), Hämatit (HAM) und Goethit (GOE) sowie durch Ilvait (ILV) verdrängt wird; in Granat-Amphibolit nahe bei offener Kluft.

(AS 928E1nK, 3808.74 m, // N, Öl)

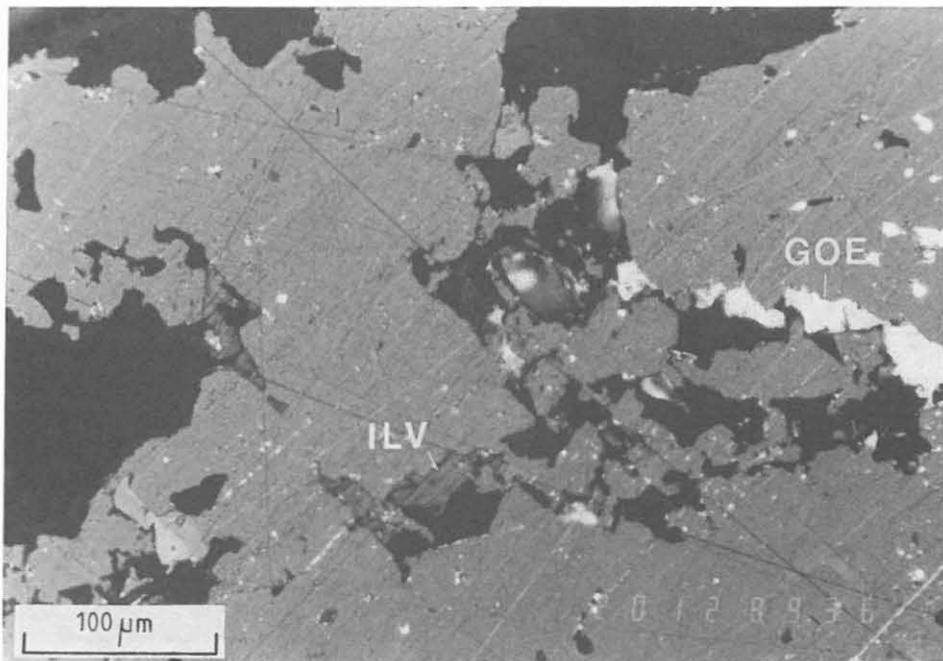


Abb. B.5.27: Wie Abb. B.5.26 aber mit gekreuzten Nicols, deutlich wird der tafelige, flächige Ilvait (ILV), sowie der an Innenreflexen reiche, hier weiß wirkende Goethit (GOE) sichtbar.

(AS 928E1nK, 3808.74 m, + N, Öl)

Hämatit und Goethit bilden sekundäre Phasen, die stets mit Pyrit verknüpft sind und diesen randlich und von Hohlräumen aus verdrängen.

Tafeliger Ilvait ($\text{CaFe}_2\text{Fe}^{3+}(\text{OH/O/Si}_2\text{O}_7)$) ist mit den sekundären Fe-Oxiden assoziiert (Abb. B.26/27). Seine optischen Eigenschaften ähneln denen von Covellin (CuS); Ilvait besitzt jedoch ein geringeres Reflexionsvermögen. Er tritt wie Hämatit und Goethit in oder an Pyrit auf. Das Mineral gilt als metasomatisches Alterationsprodukt Ca-Fe-haltiger Minerale.

Graphit findet sich in den Paragneisen verbreitet. Er ist fast stets stengel- oder leistenförmig foliationsparallel ausgerichtet. In den Metabasiten kommt Graphit, der erratisch in der Grundmasse verteilt ist, wesentlich seltener vor. Er ist vorwiegend an den hangenden Bereich bis 3580 m unmittelbar unterhalb der Gneise gebunden; er tritt jedoch ganz vereinzelt auch noch tiefer auf, allerdings stets in der Gesteinsmatrix, nicht auf Scherflächen.

Feinkörniger, xenomorpher, z.T. beispielhaft sphärolithischer Graphit ist auch ein untergeordneter Bestandteil im Meta-Ultramafitit bei 3719.51 m (911FlahK); er ist rundlich bis stengelig, lokal sphärolitisch ausgebildet und ist mit Magnetit einfach verwachsen (Abb. B.5.24/25). Ebenfalls sphärolithischer Graphit bildet bei 3580.91 m (876A2f) sowohl einen Einschluß in Granat (Abb. B.5.28) als auch eine Anlagerung randlich an Granat (Abb. B.5.29).

Erwähnenswert ist eine Verknüpfung von Molybdänit mit Graphit in den Paragneisen (siehe Abb. B.5.13).

B.6 Kataklyse

Ausführlich wird die Kataklyse im Kap. E dieses Bandes durch ZULAUF beschrieben. Aus diesem Grund erfolgt hier nur eine Darstellung von ergänzenden Einzelbeobachtungen.

Wie im bisherigen Profil der KTB-VB sind kataklastische Deformationen weit verbreitet, wenn auch geringmächtiger. Kataklysehorizonte erreichen im allgemeinen nur Mächtigkeiten im mm- bis cm-Bereich. Größere Mächtigkeiten sind an wenige Horizonte in Amphiboliten gebunden.

Steil einfallende, aufschiebende Knickzonen werden in mittelkörnig-flaserigem Gneis zwischen 3512 und 3515 m beobachtet. Diese Strukturen stellen den Übergang zwischen duktilen und bruchhaften Verformungsgefügen dar.

Neben der Mineralisation mit Chlorit, Graphit, Laumontit und

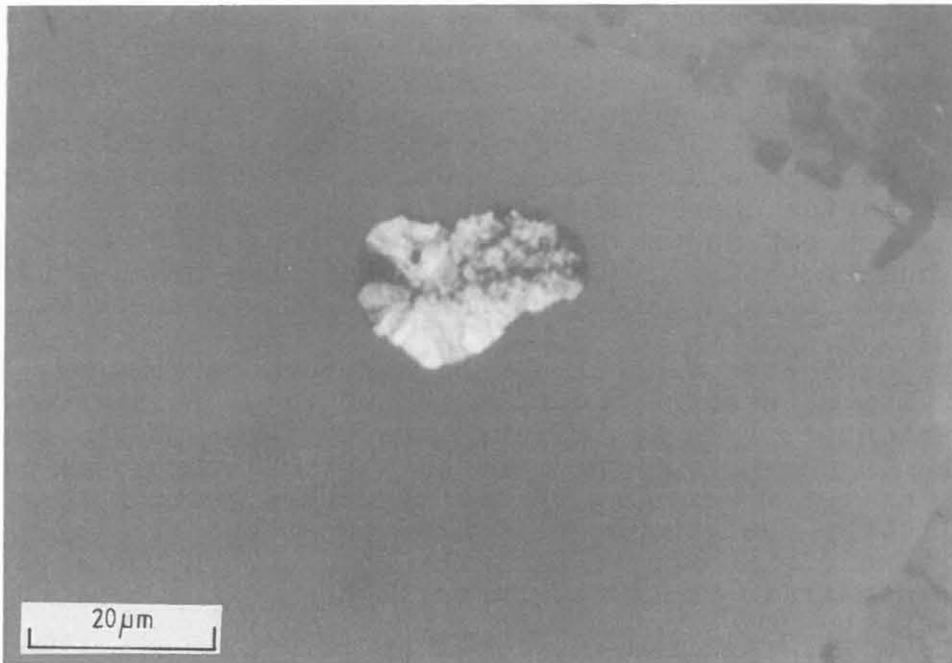


Abb. B.5.29: Radialstrahliger Graphit an Granat in Granat-Amphibolit.
(AS 876A2f, 3580.91 m, // N, Öl)

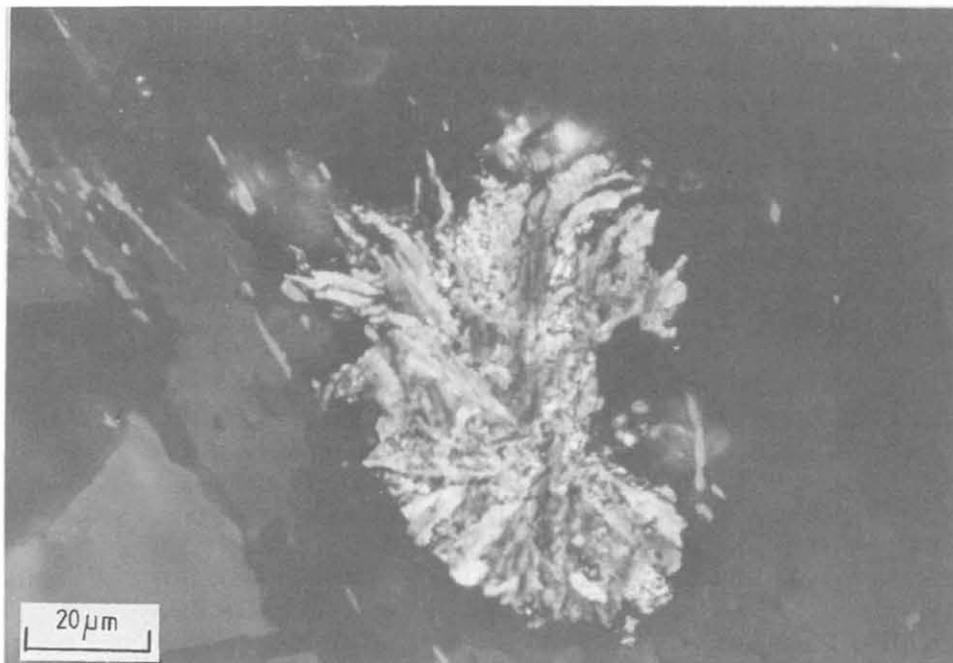


Abb. B.5.28: Sphärolitischer Graphit-Einschluß in Granat in Granat-Amphibolit.
(AS 876A2f, 3580.91 m, // N, Öl)

Prehnit sind die kataklastischen Zonen häufig mit Pyrit und Pyrrhotin vererzt (3872.4 bis 3872.8 m). Ein ausschließlich mit Laumontit mineralisiertes, mit ca. 80° einfallendes Kluftsystem ist bei 3634.6, von 3640 - 3644 sowie von 3756 - 3770 m entwickelt (Abb. B.6.1). Eine altersmäßige Einstufung der Kataklastik und der dazugehörigen Mineralisation erfolgt im Kap. E dieses Reports.

In der Teufe von 3817.1 m ist eine 70° einfallende, bis zu 5 mm geöffnete Kluft erbohrt worden. Sie ist mit einem Quarz-Kristallrasen mineralisiert, auf dem vereinzelt bis zu 3 mm große, klare, rhomboedrische Calcit-Kristalle gewachsen sind (Abb. B.6.2). Diese Kluft kann als Zuflußzone im Bohrloch identifiziert werden (vgl. Kapitel C: Geochemie).

Bei 3798.2 m hat eine steile, halboffene Kluft einen Kristallrasen aus Epidot- und Calcit-Kristallen. Die Epidot-Mineralisation an steilen Klüften setzt sich bis etwa 3810 m fort und tritt noch einmal verstärkt zwischen 3850 und 3873 m auf.

Saiger fallende Trennbrüche ("subaxiale Bruchbildung"), die keine Mineralisation und Bewegungen auf den Trennflächen erkennen lassen, sind nicht das Produkt tektonischer Deformation, sondern wie die "core diking"-Strukturen bohrtechnisch bedingt (Abb. B.6.3, vgl. Kap. D Geophysik).

Bei 3639 m tritt ein 10 cm mächtiges, brekziiertes Band im feinkörnigen Amphibolit auf. Die Bruchstücke sind im Vergleich zum Nebengestein gebleicht und durch Calcit- und Prehnitmineralisation verfestigt (Abb. B.6.4). In einer Teufe von 3679.8 m ist der Amphibolit auf etwa 10 cm Mächtigkeit brekziiert und wieder verfestigt. Ein steiler Hangend- und ein flacher Liegendkontakt begrenzen diesen Horizont. Der liegende Bereich ist auf ca. 60 cm Breite von unregelmäßig verlaufenden, Chlorit-reichen und mm-mächtigen Kataklastebahnen durchzogen.

Ein etwa 40 cm mächtiger Kataklastenhorizont mit hellen Klasten in einer feinkörnig-dichten Matrix durchschlägt den Amphibolit bei 3713.8 m. Auch die benachbarten metaaplitischen Einschaltungen sind stark von unregelmäßig verlaufenden Kataklastebahnen durchzogen.

Bei 3515.2 m wird entlang mm-mächtiger, flachliegender Scherbahnen ein feinkörnig-straflagiger gegen einen mittelkörnig-flaserigen Sillimanit-Biotit-Gneis versetzt, ohne daß sich Aussagen über den Bewegungssinn machen lassen.

Bei 3669.2 m wird im flaserigen Meta-Gabbro ein Hornblende-Granat-führendes, Plagioklas-reiches Gneisband entlang einer etwa 80° einfallenden Abschiebung zerschert. Der Versatz beträgt 4 cm (Abb. B.6.5). Die Trennfläche ist auf 15 cm Länge etwa 0.5 cm geöffnet und mit Chlorit mineralisiert.

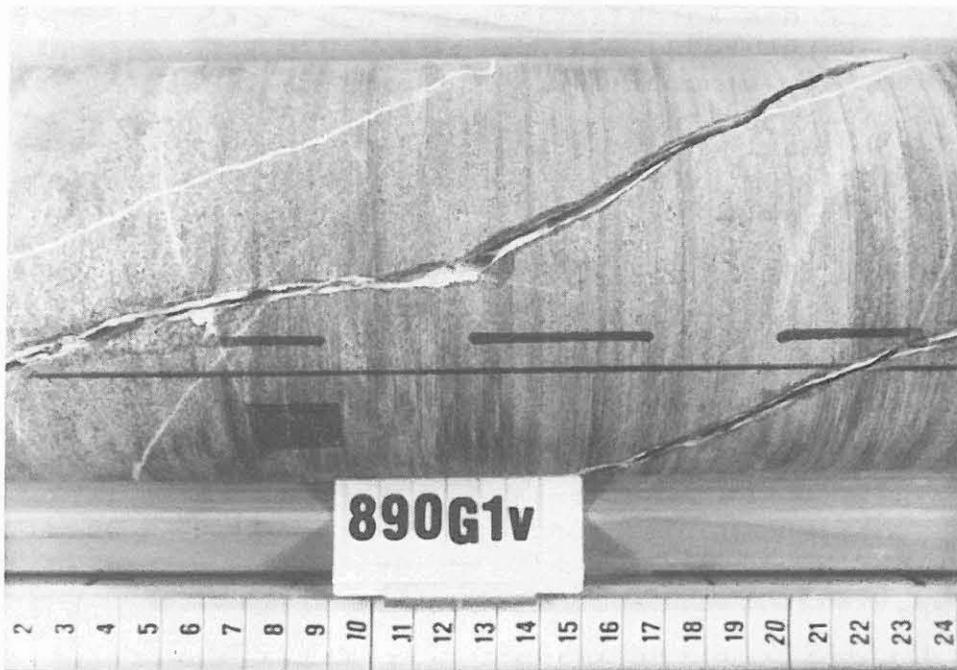


Abb. B.6.1: Steile, mit Laumontit mineralisierte Klüfte, KST 890G1v, 3643.65m.

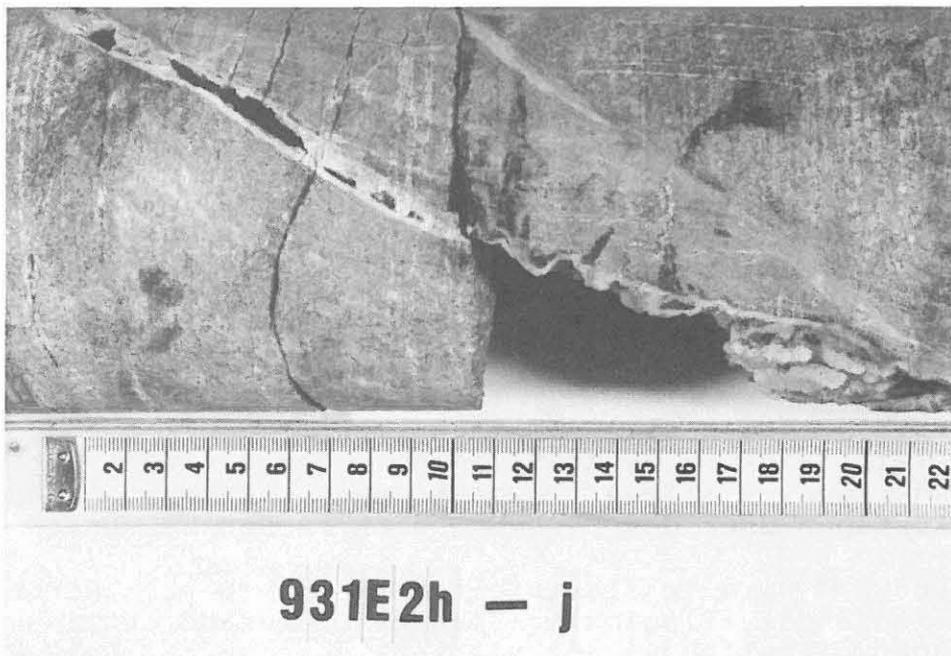


Abb. B.6.2: Mit 70° einfallende offene Kluft, mit Quarz-Kristallrasen und größeren Calcit-Kristallen, KST 931E2hj, 3817.05 m.

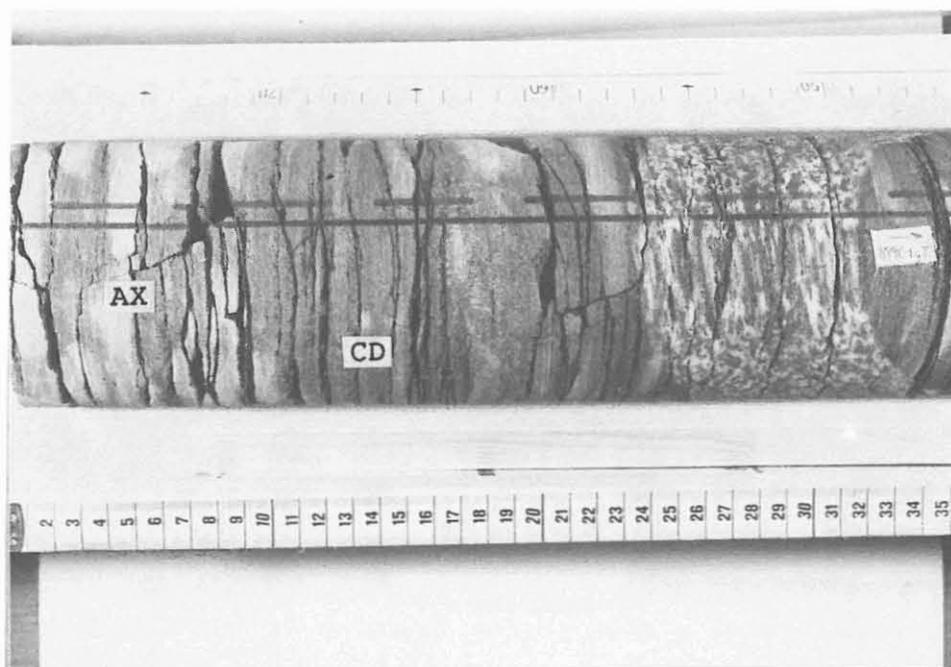


Abb. B.6.3: Core diskings (CD) und subachsiale Brüche (AX) in feinkörnigem Amphibolit und Plagioklas-reichem Gneis (rechts), KST 899C1gT, 3659.19 m.

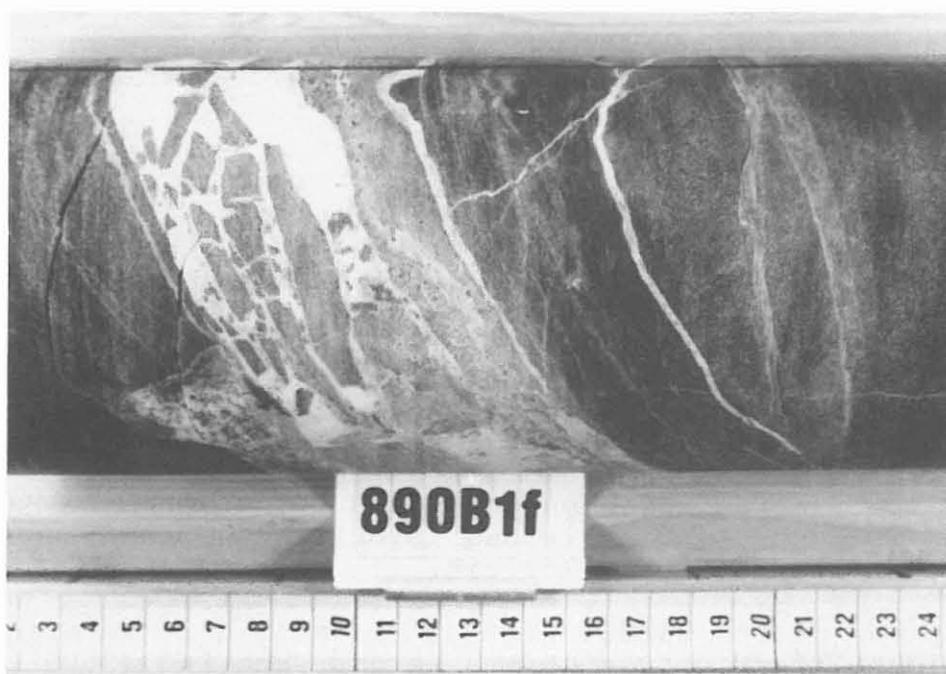


Abb. B.6.4: Kataklastit im Amphibolit, mit Calcit und Prehnit (weiß) mineralisiert, KST 890B1f, 3639.56 m.



Abb. B.6.5: 15 cm lange, etwa 0.5 cm geöffnete und mit Chlorit mineralisierte Kluft, abschiebender Bewegungssinn mit ca. 4cm Versatz, KST 901G2s, 3669.20 m.

B.7 Großstruktur

Ab 3500 m bis zum Übergang in die Metabasit-Abfolge bei 3573.5 m ändert sich die Einfallrichtung der Foliation von SE auf NE. Das Einfallen erhöht sich mit Annäherung an die Metabasite von 30 auf 60°. Die Grenze Gneis/Amphibolit fällt ebenfalls mit ca. 65° ein (Abb. B.3.1).

In der Metabasit-Abfolge ist die Richtung des Einfallens der meist undeutlichen Foliation bis zur Endteufe anhand der Formation-Microscanner-Aufnahmen kaum feststellbar. Das Einfallen kann nach Kernbefund differieren, liegt jedoch überwiegend bei Werten zwischen 40 und 50°. Die markante Hangendgrenze zwischen Amphibolit und Biotit-Hornblende-Augengneis bei 3840 m fällt mit ca. 70° ein.

Im Kap. G dieses Bandes wird der Azimut der Referenzlinie der beiden orientiert gebohrten Kernmärsche 860 (3599 m) und 910 (3712 m) wiedergegeben.

B.8 Bohrung VB1b

Allgemeines

Nach Zapfenbruch bei Teufe VB1a von 3893 m und anschließenden Fangarbeiten wurde die Bohrung bei 3766.9 m (Oberkante des Ablenkkeiles) als VB1b fortgesetzt (vgl. KTB Report 90-1: 17ff). Die Endteufe wurde bei 4000.1 m erreicht. Zur geologischen Bearbeitung standen Dünn- bzw. Anschliffe von der Grobfraktion (> 1 bis max. 3 mm) der Cuttings zur Verfügung, die in Teufenabständen von 2 m bzw. 1 m angefertigt wurden. Zusätzlich konnte bei 11 Meißelmärschen von 3832.1 - 3997.5 m ein Sedimentrohr nahezu durchgehend eingesetzt werden, in dem größere, von der Bohrlochsohle abgelöste Gesteinsbruchstücke unmittelbar oberhalb des Meißels aufgefangen werden (siehe SIGMUND et al. 1990; SIGMUND, J. & DIETRICH, H.-G., Kap. H in diesem Report). Daher standen Proben bis zu einer Größe von 4 cm zur Verfügung, von denen ebenfalls Dünnschliffe hergestellt wurden. Nachfall kann aber auf Grund der Konstruktion des Sedimentrohres nicht ausgeschlossen werden. Des weiteren konnten 26 Seitenkerne unterhalb des Ablenkkeiles im Bereich der VB1b gewonnen werden (RÖHR 1989). Auf Grund der geringen Größe und der nachfolgenden geophysikalischen Messungen an den Seitenkernen wurden dünne, nicht gefügeorientierte Scheibchen für polierte Dünnschliffe abgeseigt.

Korrelation VB1a - VB1b

Nach der vorläufigen Auswertung der Bohrlochmessungen in der VB1a und VB1b konnte im Überlappungsbereich (3766.9 - 3893.0 m) eine horizontale Abweichung der beiden Bohrlöcher von teilweise weniger als einem Meter festgestellt werden. Daher sollte auch bei steiler Lagerung der Foliation, Klüfte und Mineralisationen eine eindeutige, teufenabhängige Korrelation zwischen Bohrkern- (VB1a) und Cuttingsproben (VB1b) möglich sein.

Zum Vergleich der beiden Bohrlöcher können die hornblende-führenden Biotit-Augengneise zwischen 3840 und 3846 m (Kern-teufe VB1a) herangezogen werden, die aufgrund ihrer typischen Meso- und Antiperthite eindeutig auch in den Cuttingsdünn-schliffen erkennbar sind (Abb. B.8.1). Mikrosonden-Analysen aus dem Seitenkern 3847.5 m ergaben für die Plagioklas-Phase des Meso-Antiperthits An₂₅, für die Mikroklin-Phase Or₉₅. Nachfall aus höheren Bohrlochbereichen kann ausgeschlossen werden. Diese Meso- und Antiperthite treten in den Cuttings erstmals bei 3844 m, also ca. 4 m tiefer als im Bohrkern, auf. Möglicherweise sind eine nicht ganz korrekte Bestimmung der Aufstiegszeit (lag-time) der Cuttings oder ein größerer Abstand (ca. 2 m) der beiden Bohrlöcher für die Teufendifferenz verantwortlich, da die Hangendgrenze der Augengneise mit 60 - 70° einfällt.

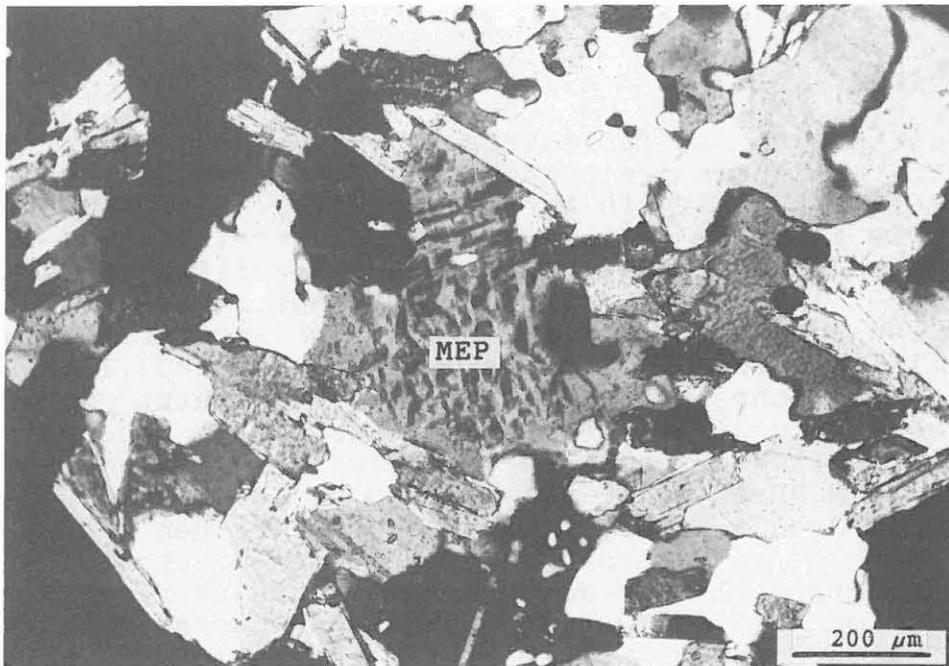


Abb. B.8.1: Meso-Perthit (MEP) in Hornblende-Biotit (BIO)-Augengneis, DS CUT 3846 m, +N.

Lithologie

Bis zum Ende des Überlappungsbereiches bei 3893.0 m ist die Lithologie in den Bohrlöchern gleich und durch den Kerngewinn der VB1a gut dokumentiert. Darunter setzt sich die Wechselfolge aus Amphiboliten, Granat-Amphiboliten (Abb. B.8.2) und Hornblendegneisen (Abb. B.8.3) bis zur Endteufe fort. Meta-Gabbros sind selten, ein Ophitgefüge ist nicht deutlich ausgebildet. Reliktische HP-granulitische Meta-Gabbros, wie sie in Kap. B.4.1.1 beschrieben werden, treten nicht auf. In den Amphiboliten sind die Relikte der hochdruck-granulitfaziellen Metamorphose wie Klinopyroxen-Plagioklas- und Hornblende-Plagioklas-Symplektite sowie Granat-Coronen weit verbreitet (Abb. B.8.4). Eine teufenrichtige Zuordnung der verschiedenen Metabasitgesteine ist aufgrund der Wechselfolge schwierig. Der aus der gekernten Strecke bekannte, engräumige Wechsel zwischen stark und gering amphibolitfaziell überprägten HP-granulitischen Metabasiten setzt sich vermutlich bis zur Endteufe fort.

Die grünschieferfazielle Überprägung der Metabasite wurde bis zur Endteufe beobachtet. Epidot ist zwischen 3930 und 3970 m weit verbreitet und häufig mit Quarz- und Feldspat-reichen Gängchen und Klüften vergesellschaftet. Weiterhin tritt Chlorit auf.

Ab 3989 m sind feinkörnige, Chlorit-reiche Gneise vorherrschend, die z.T. deutlich foliiert sind. Ehemalige Biotite mit Sagenit-Gitter und Amphibole sind vollständig in Chlorit umgewandelt und bilden ein nahezu geschlossenes Teilgefüge.

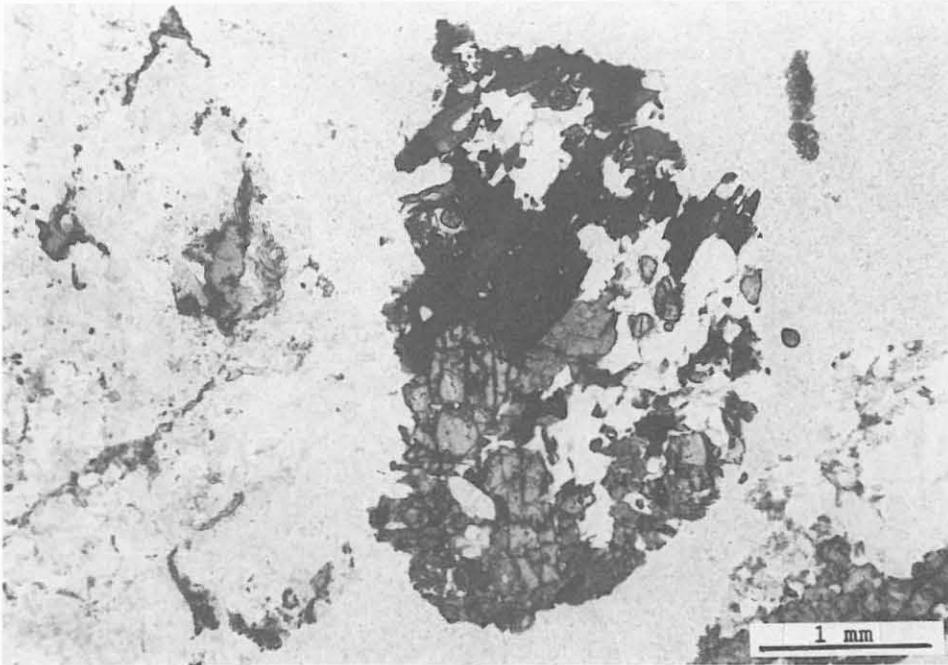


Abb. B.8.2: Granat-Amphibolit (mitte) in Cuttings-Probe, DS CUT 3990 m, //N.

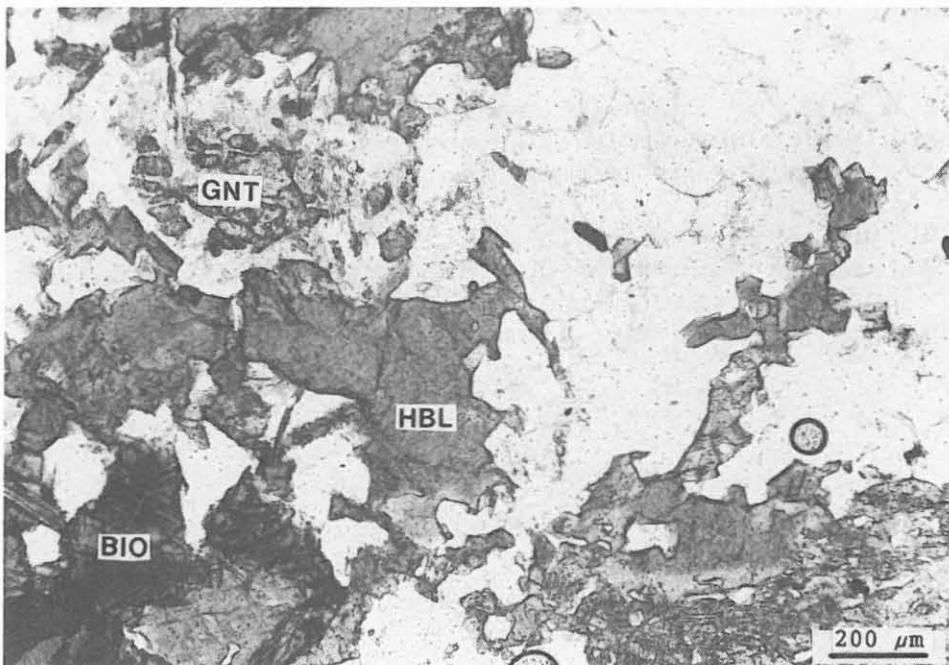


Abb. B.8.3: Granat (GNT)-Biotit (BIO)-Hornblende (HBL)-Gneis, DS CUT 3908 m, //N.

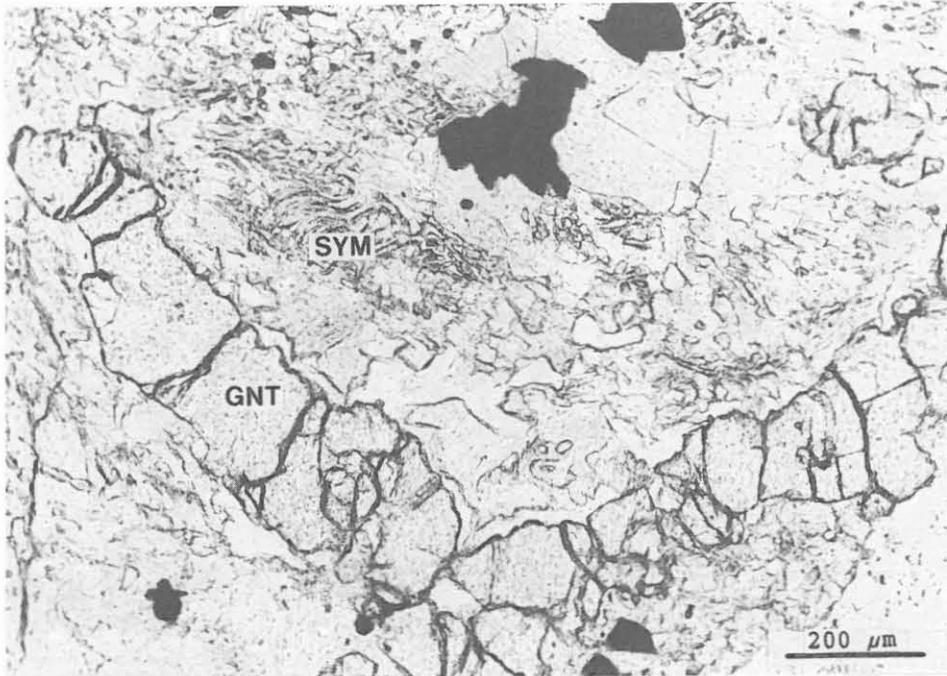


Abb. B.8.4: Granat (GNT)-Corona um Hornblende-Plagioklas-Symplektit (SYM), Hornblende (HBL), DS CUT 3954 m, //N.

Feinkörnige Titanit- und Epidoteinschlüsse ("Krümel") sind charakteristisch. Die Plagioklase sind verzwillingt und häufig serizitisiert und saussuritisiert. Calcit ist lokal in der feinkörnigen Quarz-Feldspat-Matrix vorhanden. An Opakmineralen treten Ilmenit mit Titanitsäumen und seltener Pyrit auf. Diese Gneise wechseln mit geringmächtigen Amphibolitlagen.

Von 3998 m bis zur Endteufe steigt in den Cuttings der Gehalt von Hornblende-Gneisen bis Amphiboliten wieder an, die Chlorit-reichen Gneise nehmen deutlich ab.

Bei 3996 und 3999 m sind in zwei Seitenkernen Quarz-Albit-Gänge mit magmatischem Gefüge erbohrt worden, die epidot-, chlorit- und pyritreich sind. In Tab. B.8.1 sind Mikrosonden-Analysen der Minerale aus diesem Gestein aufgelistet.

Schwermineral-Konzentrat der Cutting-Probe 3887 m

- 13 Ilmenit aus einem Ilmenit-Titanit-Brookit-Aggregat (mit 21 Mol-% Pyrophanit-Komponente!)
- 14 Brookit aus einem Ilmenit-Titanit-Brookit-Aggregat
- 15 Titanit aus einem Ilmenit-Titanit-Brookit-Aggregat
- 16 Epidot (= Fe-Endglied)
- 17 Epidot (= Fe-Endglied)

(In dieser Serie schlechte Gesamtsummen, aber gute Stöchiometrie!)

	13	14	15	16	17
SiO ₂	0.03	0.07	29.88	36.91	37.22
TiO ₂	49.56	91.59	37.67	0.03	0.04
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.21	20.59	20.97
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
FeO	35.90	1.99	0.82	14.11	15.02
MnO	8.92	0.02	0.00	0.05	0.00
NiO	0.03	0.00	0.01	0.00	0.07
ZnO	0.15	0.01	0.03	0.00	0.02
MgO	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.07	0.57	25.18	21.14	21.02
Na ₂ O	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Summe	94.70	94.24	93.82	92.83	94.45

Seitenkern-Probe SK70, 3996.0 m
leukokrates Epidot-Chlorit-Quarz-Albit-Gestein mit magmatischem Gefüge

- 9 grüner Chlorit
- 10 Albit (Ab99.5)
- 11 Epidot (Fe/(Fe+Al)=0.22)

Analyse	9	10	11
SiO ₂	24.87	69.30	38.10
TiO ₂	0.06	0.03	0.06
Al ₂ O ₃	19.26	18.96	24.29
Cr ₂ O ₃	0.05	0.00	0.00
FeO	28.44	0.03	9.64
MnO	0.53	0.00	0.04
NiO	0.00	0.06	0.01
ZnO	0.03	0.00	0.00
MgO	11.68	0.00	0.03
CaO	0.05	0.05	23.17
Na ₂ O	0.00	11.40	0.00
K ₂ O	0.01	0.05	0.00
Summe	84.98	99.87	95.34
Fe ²⁺	5.324	-	-
Fe ³⁺	-	-	0.644
Mg	3.898	-	-
Ti	0.011	-	0.003
Al ^{VI}	2.649	-	2.292
Summe	11.881	-	2.940
Mn	-	-	0.003
Ca	-	-	1.987
Si	5.567	-	3.049
Al ^{IV}	2.433	-	0.000

Tab. B.8.1: Mikrosonden-Analysen von verschiedenen Mineralen von Seitenkern- und Cuttings-Proben aus dem nicht gekernten Bereich der Bohrung VB1b.

B.9 Danksagung

Wir danken Prof. F. Seifert, daß wir einen Teil der Mikrosonden-Messungen am Bayer. Geoinstitut, Bayreuth, durchführen konnten. D. Krauß (Bayreuth) danken wir für seine operative Betreuung an der Mikrosonde und P. O'Brien (Bayreuth) für hilfreiche Diskussionen über das Hochdruck-Metamorphose-Stadium und daß er uns Programme zur Berechnung von Pyroxen, Amphibol und Granat zur Verfügung stellte.

Herrn Prof. Stöckhert, Bochum, Herrn Prof. Weber, Göttingen, Herrn Prof. von Gehlen, Frankfurt, Herrn Prof. Emmermann, Gießen, Frau Dr. J. Vogtmann-Becker, Aachen und Herrn Dr. P. Herzig, Aachen danken wir für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Bei der Ausarbeitung des erzpetrographischen Kapitels waren die intensiven Diskussionen mit S. van Delden sowie seine Unterstützung bei der mikroskopischen Aufnahme sehr hilfreich.

Die Präparationsarbeiten im Feldlabor wurden von S. Lang, O. Leitner, P. Prätoria, X. Spieß und E. Wiendl durchgeführt.

B.10 Schriftenverzeichnis

- DILL, H. (1985): Die Vererzung am Westrand der Böhmisches Masse - Metallogenese in einer ensialischen Orogenzone.- Geol. Jb. D73, 3-461, Hannover
- DILL, H. (1988): Lagerstätten-Typisierung und metallogeneti-sche Entwicklung im Umfeld der Grenzregion Saxothuringi-kum-Moldanubikum (Nordbayern) - ein Überblick.- Geol. Bavarica, 92, 133-150, München
- ELLIS, D.J. & GREEN, D.H. (1979): An experimental study of the effect of Ca upon garnet - clinopyroxene Fe-Mg ex-change equilibria.- Contrib. Mineral. Petrol., 71: 13-22.
- FRIEDRICH, G., KOTNIK, M., VOGTMANN-BECKER, J., HERZIG, P., KONTNY, A. & KEYSNER, S. (1989): Erzpetrologie und Mineralchemie im Kontinentalen Tiefbohrprogramm - Vor-bohrung "VB-Oberpfalz".- 2. Zwischenbericht, DFG Fr 240/45-3, Institut für Mineralogie und Lagerstätten-lehre, RWTH Aachen, 70 S., unveröff.
- GANGULY, J. & SAXENA, S.K. (1984): Mixing properties of aluminosilicate garnets: constraints from natural and experimental data, and application to geothermo-baro-metry.- Amer. Mineral., 69: 88-97.
- GEHLEN, K. von, MATTHES, S. OKRUSCH, M., RICHTER, P., RÖHR, C. & SCHÜSSLER, U. (1990): Metamorphe Kumulat-Gesteine in der KTB Vorbohrung.-In: EMMERMANN, R. & GIESE, P. (Hrsg.): Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. - KTB Report, 90-4 (im Druck).
- HOLLAND, T.J.B. (1980): The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600-1200°C.- Amer. Mineral., 65: 129-134.
- LISTER, G.S. & SNOKE, A.W. (1984): S-C Mylonites. - J. Struct. Geol.; 6(6): 617-638.
- KEYSSNER, S., MASSALSKY, T., MÜLLER, H., RÖHR, C., GRAUP, C. & HACKER, W. (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Er-gebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m: B. Geologie - In: Emmermann, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M. & WÖHRL, Th. (Hrsg.): KTB Report, 88-6: B1-B88, Hannover.

- KOHL, J., HACKER, W., KEYSNER, S., MÜLLER, H., RÖHR, C., SIGMUND, J., STROH, A. & TAPPER, M. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich von 2500 bis 3009.7 m: B. Geologie - In: Emmermann, R., Dietrich, H.-G., Heinisch, M. & Wöhr, Th. (Hrsg.): KTB Report, 89-4: B1-B106, Hannover.
- KONTNY, A., FRIEDRICH, G., HERZIG, P., KEYSNER, S. & VOGTMANN-BECKER, J. (1990): Erzmineralparagenesen und Mineralisationstypen in der KTB Vorbohrung.-In: EMMERMANN, R. & GIESE, P. (Hrsg.): Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. - KTB Report, 90-4 (im Druck).
- MÜLLER, H., HACKER, W., KEYSNER, S., RÖHR, C., SIGMUND, J., KOHL, J., STROH, A. & TAPPER, M. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 3009.7 - 3500 m: B. Geologie - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M. & WÖHRL, Th. (Hrsg.): KTB -Report, 89-5: B1-B94, Hannover.
- NEWTON, R.C. & HASELTON, H.T. (1981): Thermodynamics of the Garnet-Plagioclase- Al_2SiO_5 -Quartz Geobarometer.- In: NEWTON, R.C., NAVROTSKY, A. & WOOD, B.J.: Thermodynamics of Minerals and Melts, Springer-Verlag: 131-147.
- PASSCHIER, C.W. & SIMPSON, C. (1986): Porphyroclast systems as kinematic indicators. - J. Struct. Geol., 8(8): 831-843.
- PLATT, J.P. & VISSERS, R.L.M. (1980): Extensional structures in anisotropic rocks. - J. Struct. Geol., 5(6): 619-622.
- REINHARDT, J. & KLEEMANN, U. (1989): Phasenpetrologische Analyse und Geothermobarometrie der Metapelite in der Zone von Erbdorf-Vohenstrauß (ZEV), Oberpfalz.- Ber. Dtsch. Mineral. Ges. 1: 152.
- RIDLEY, W.I., RHODES, J.M., REID, A.M., JAKES, P., SHIH, C. & BASS, M.N. (1974): Basalts from leg 6 of the deep sea drilling project. J. Petrol., 15: 140-159.
- RÖHR, C. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor. - G. Makroskopische Beschreibung der Seitenkerne aus dem Teufenbereich 0 - 4000 m. - In: Emmermann, R., Dietrich, H.-G., Heinisch, M. & Wöhr, Th. (Hrsg.): KTB Report, 89-4: G1-G10, Hannover.

- RÖHR, C., PATZAK, M. & OKRUSCH, M. (1990): Metamorphose-Entwicklung der Metabasite der KTB Vorbohrung. - In: EMMERMANN, R. & GIESE, P. (Hrsg.): Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. - KTB Report, 90-4 (im Druck).
- ROHRMÜLLER, J. (1988): Die Geologie im Umfeld der KTB-Bohrlokation Windischeschenbach, Oberpfalz. - Geologisch-Petrographisch-Tektonische Untersuchungen im Gebiet zwischen Windischeschenbach, Burggrub und Bach. - Dipl.-Arb., Geol. Inst. LMU München, 241 S. (unveröff.).
- SCHÜSSLER, U. (1987): Petrographie, Geochemie und Metamorphosealter von Metabasiten im KTB-Zielgebiet Oberpfalz.- Diss. Würzburg.
- SIGMUND, J., HACKER, W., KEYSNER, S., KOHL, J., MÜLLER, H. & RÖHR, C. (1990): Cuttingsanalyse in der KTB Vorbohrung. - In: EMMERMANN, R. & GIESE, P. (Hrsg.): Beiträge zum 3. KTB-Kolloquium, Gießen, 28.2. bis 2.3.1990. - KTB Report, 90-4 (im Druck).
- SUGAKI, A., SHIMA, H., KITAKAZE, A. & HARADA, H. (1975): Isothermal phase relations in the system Cu-Fe-S under hydrothermal conditions at 350 °C and 300 °C.- Econ. Geol. 70, 806-823, El Paso
- UYTENBOGAARDT, W. & BURKE, E.A.J. (1971): Tables for microscopic identification of ore minerals.- 2nd. rev. edition, 430 S., Dover Publ., New York
- WEBER, K.; HACKER, W. & KOHL, J. (1989): Beobachtungen zum Deformationspfad der Gesteine aus der KTB-Vorbohrung. - In: EMMERMANN, R. & GIESE, P. (Hrsg.): Beiträge zum 2. KTB-Kolloquium, Gießen, 15. bis 17.3.1989. - KTB Report 89-3: 419.
- WIMMENAUER, W. (1984): Das prävariskische Kristallin im Schwarzwald. - Fortschr. Miner. 62, Bh. 2, 69-86.
- WINCHESTER, J.A. FLOYD, P.A (1976): Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks.- Earth Planet. Sci. Lett., 28: 459-469.
- YUND, R.A. & KULLERUD, G. (1966): Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S-system.- J. of Petrol. 7, 454-488.

B.11 Anhang

Der Anhang umfaßt das detaillierte geologische Profil in graphischer Darstellung (Abb. B.11) und in schriftlicher Form (Tab. B.11).

Erläuterungen zum geologischen Profil (Abb. B.11)

Spalte	Erläuterung
CUTTINGS	<p>Die erbohrten Cuttings werden vor Ort naß gesiebt, getrocknet und die Fraktionen volumetrisch ermittelt. Dargestellt sind die prozentualen Anteile der Fraktionen. Der Graph zeigt:</p> <p>links: grobe Fraktion = > 1 mm mitte: feine Fraktion = 0.063 - 1 mm rechts: feinste Fraktion = < 0.063 mm</p> <p>Diese Spalte wird nur in kernlosen Strecken ausgefüllt. Weiterhin sind technische Angaben enthalten, die die Cuttings beeinflussen: E/A = Ein-/Ausbau des Gestänges, RM = Rollenmeißel, DIA = Diamant-Meißel, Richtbohren = der Meißel wird über einen Untertage-Motor angetrieben und aktiv in eine bestimmte Richtung abgelenkt.</p>
GAMMA-RAY	<p>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.</p> <p>Zum Vergleich mit den Bohrlochmessungen sind die im Fedlabor mit Hilfe der Gamma-Spektrometrie bestimmten Einzelwerte dargestellt (gestrichelte Linie).</p>
KALIBER	<p>Die Kurve KALIBER zeigt den Bohrlochdurchmesser an. Der Außendurchmesser der Bohrkronen beträgt 152 mm (6"). GAMMA-RAY und KALIBER sind Bohrlochmessungen.</p>
LITHOLOGIE	<p>Gesteinsname und seine graphische Darstellung. Abkürzungen siehe unten.</p>
FOLIATION	<p>Das Einfallen der Foliation in Grad ist als Zahl und zur Veranschaulichung als Graph angegeben.</p>
ALTERATION	<p>Nach der Cutting- und Dünnschliffanalyse wurde ein qualitativer Alterationsgrad nach folgen-</p>

dem 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 Störungen 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.2.10 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:

GNT, HBL = Granat, Hornblende	MKO = mittelkörnig
QRZ, PLG = Quarz, Plagioklas	FKO = feinkörnig
KYA, AMF = Kyanit, Amphibol	LIG = lagig
SIL, BIO = Sillimanit, Biotit	MYL = Mylonit
MUS, HGL = Muskovit, Hellglimmer	SFF = straff
ALT = alteriert	LAM = Lamprophyr
GNS = Gneis	
AMP = Amphibolit	
MOB = Mobilisat	
FLS = flaserig	
KKL = kataklastisch, Kataklasit	
E/A = Ein-/Ausbau des Gestänges	
RM = Rollenmeißel	
DIA = Diameißel	

Folgende Seiten:

Abb. B.11: Profildarstellung der geologischen Ergebnisse im Vergleich mit ausgewählten bohrtechnischen Daten und Bohrlochmessungen im Maßstab 1:200.

Mit zunehmender Teufe erhöht sich die Differenz zwischen Logteufe (gamma ray, Kaliber) und Kernteufe (Gestängeteufe). In diesem Profilabschnitt können die Logteufen durchaus 4 m größer sein als die Kernteufen.

Signaturen:



Granat-führender (Sillimanit-Muskovit)-Gneis
feinkörnig (1 mm)

mittelkörnig (1 - 3 mm), flaserig

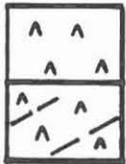
mittelkörnig, lagig



mittelkörniger, granoblastischer Biotit-
Gneis

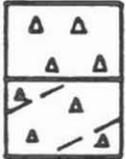
Biotit-Augengneis

(Granat-führender) Biotit-Hornblende-
Gneis



Amphibolit
fein- bis mittelkörnig (<3 mm)

fein- mittelkörnig, foliiert



Meta-Gabbro, fein- bis mittelkörnig
massig

foliiert



Meta-Ultramafitit



Leukokrate Quarz-Feldpat-Gesteine
Meta-Aplite

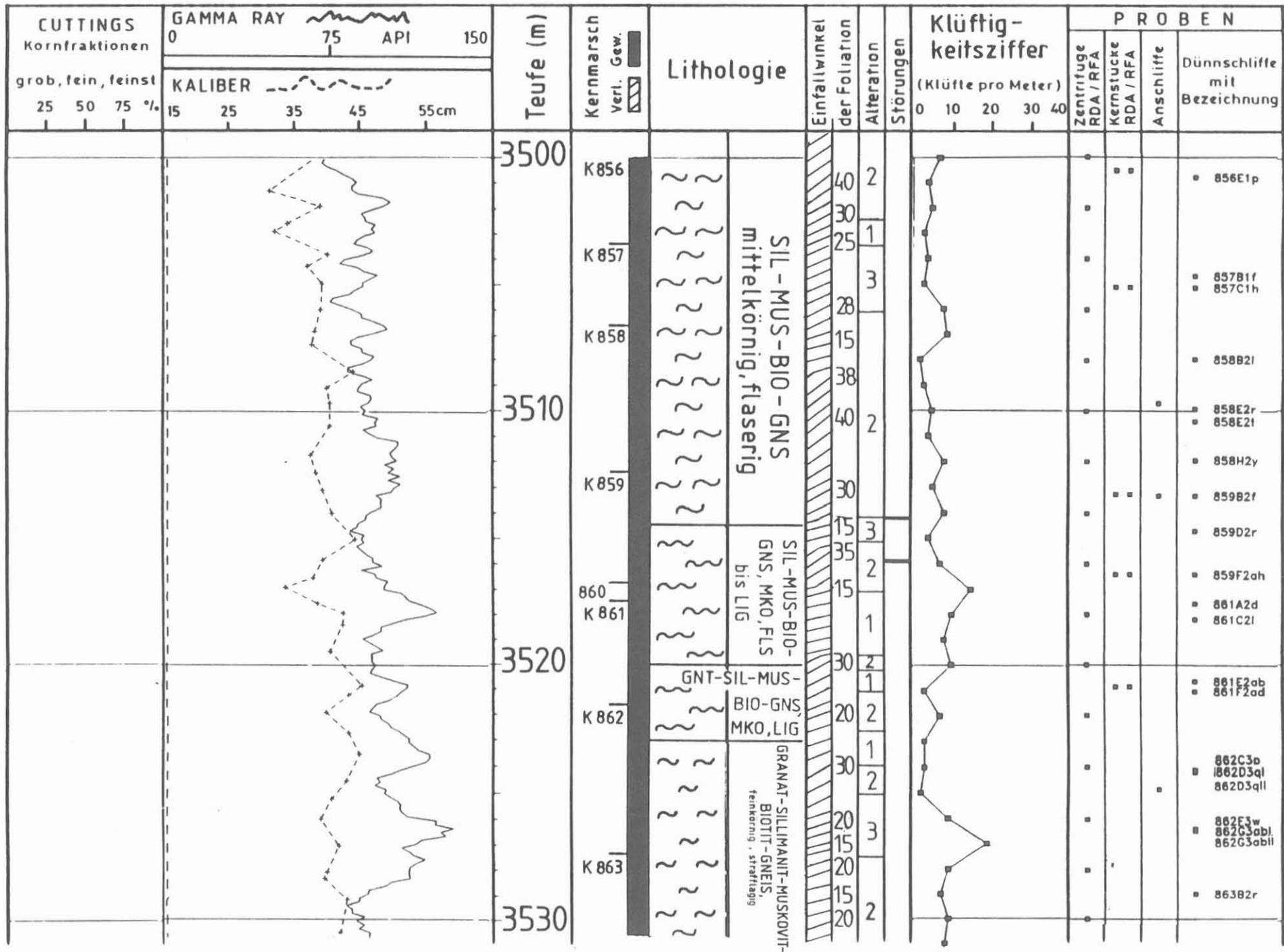
Pegmatoide

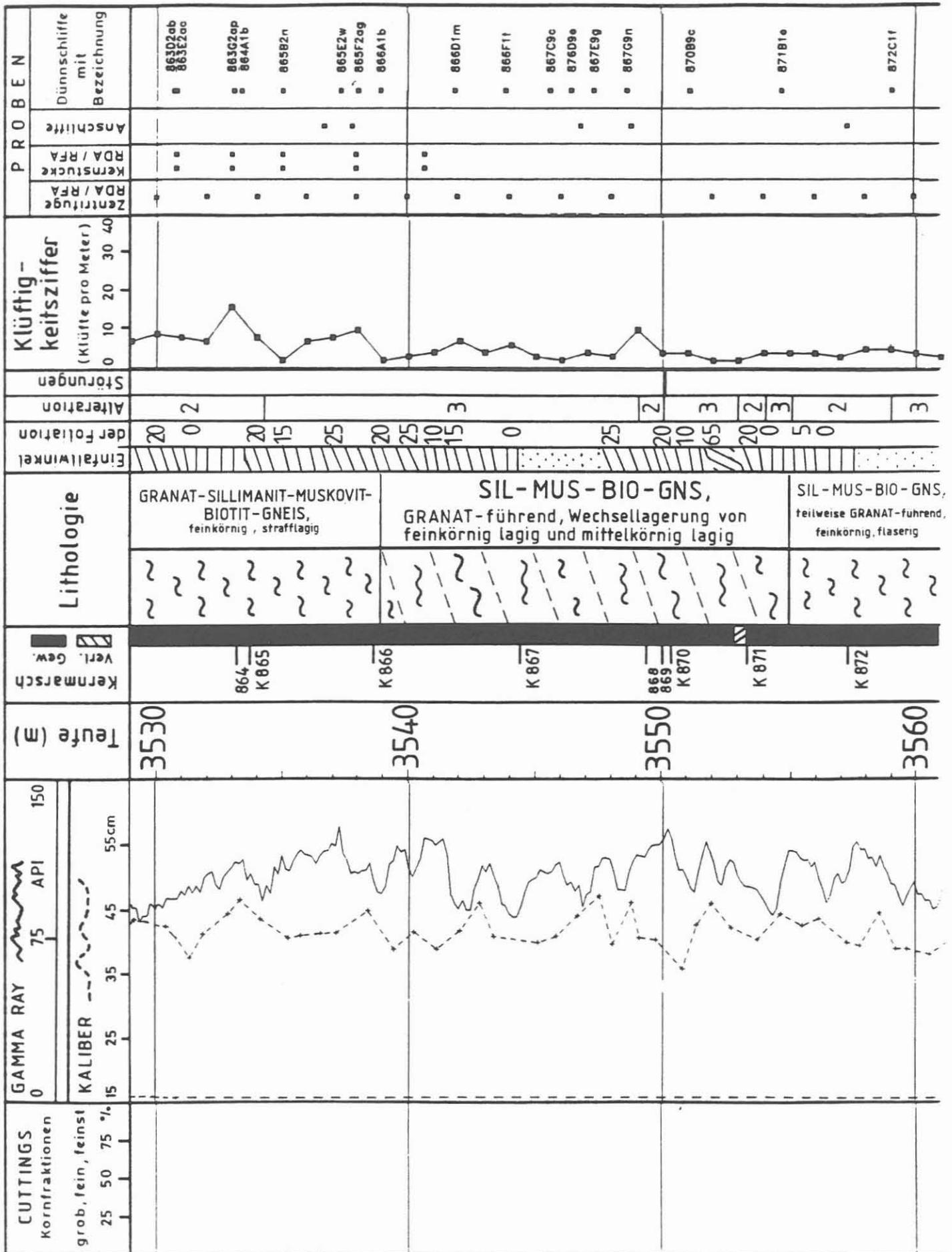


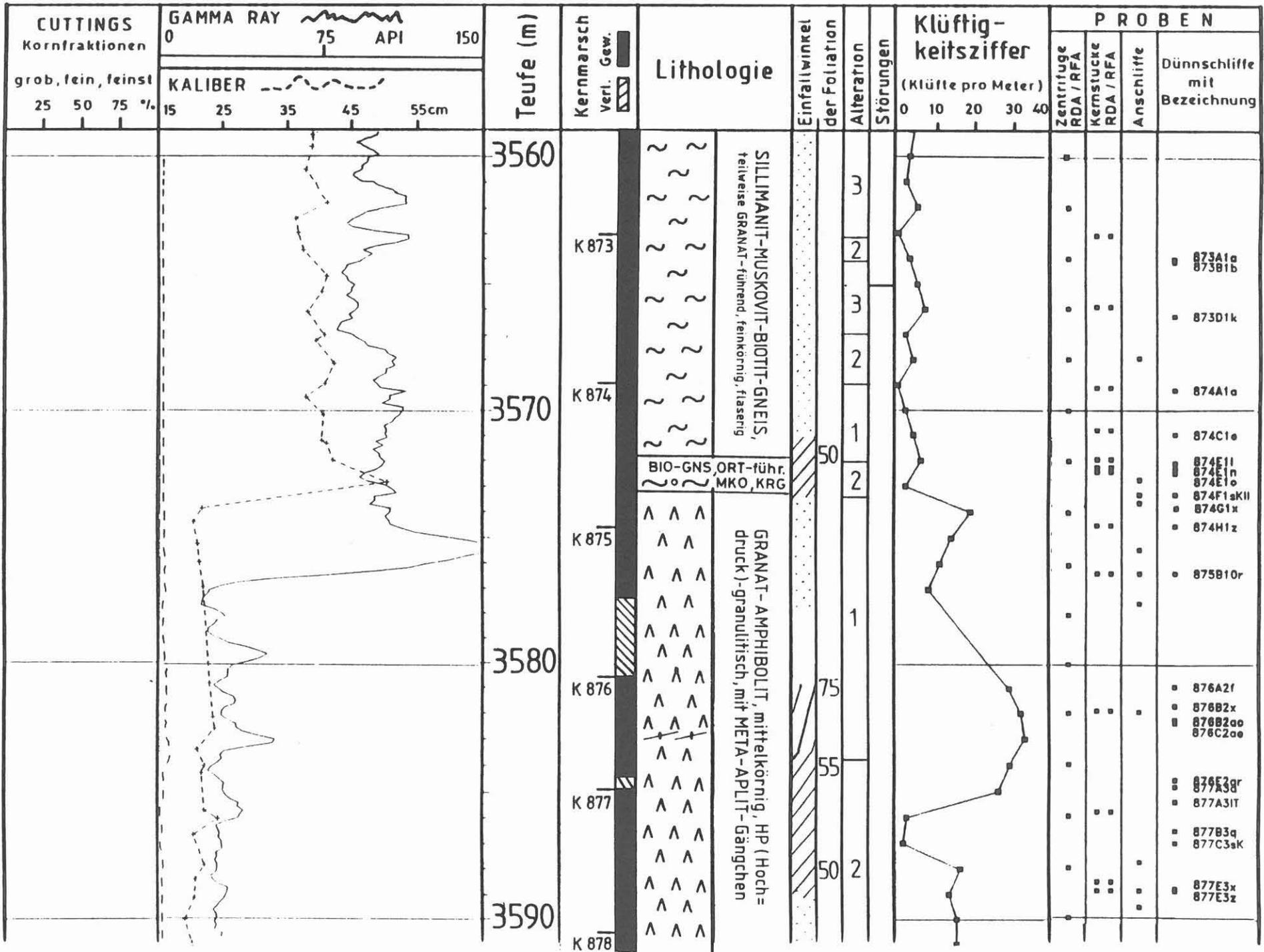
Kataklasit

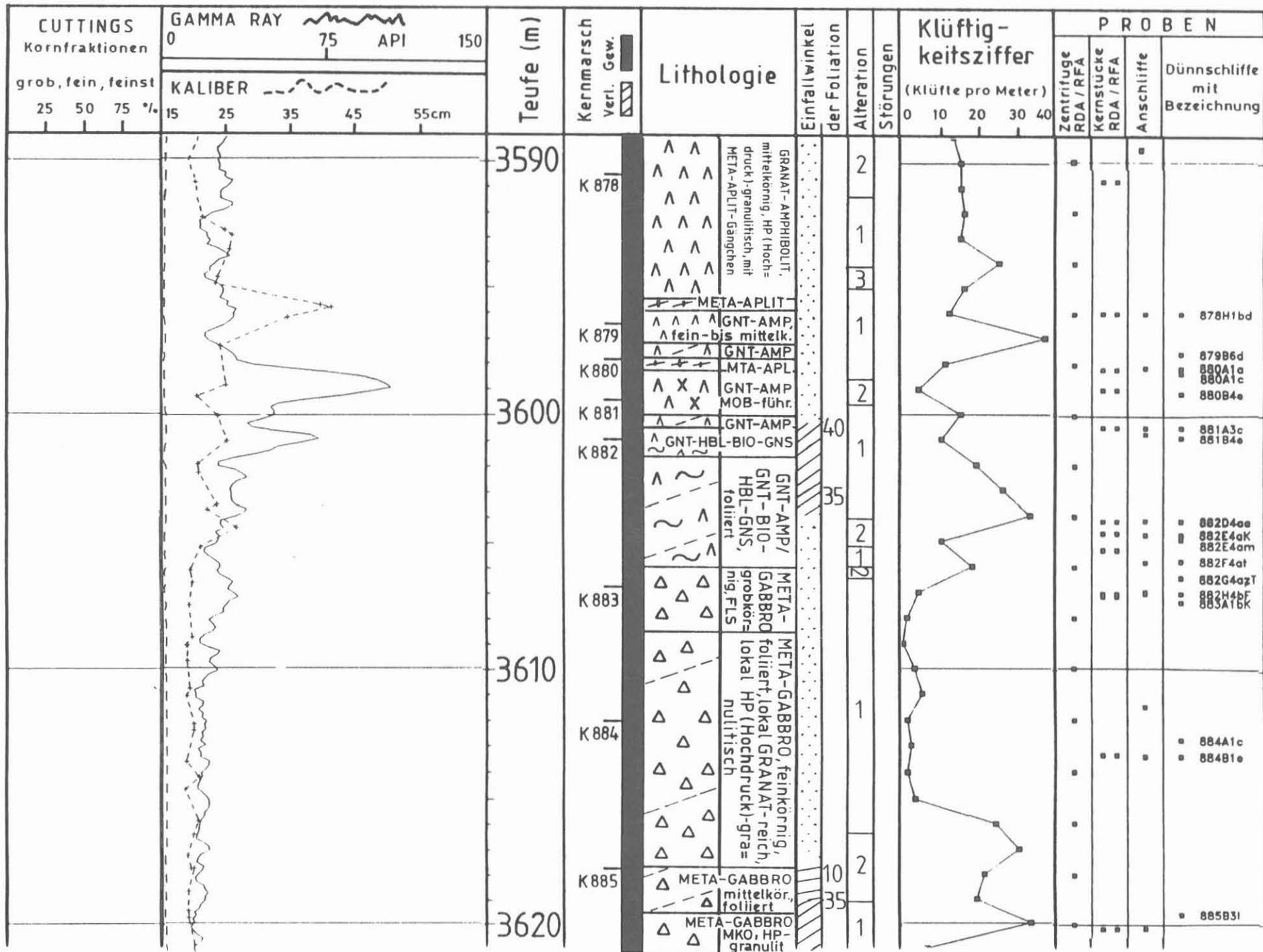


offene Kluft



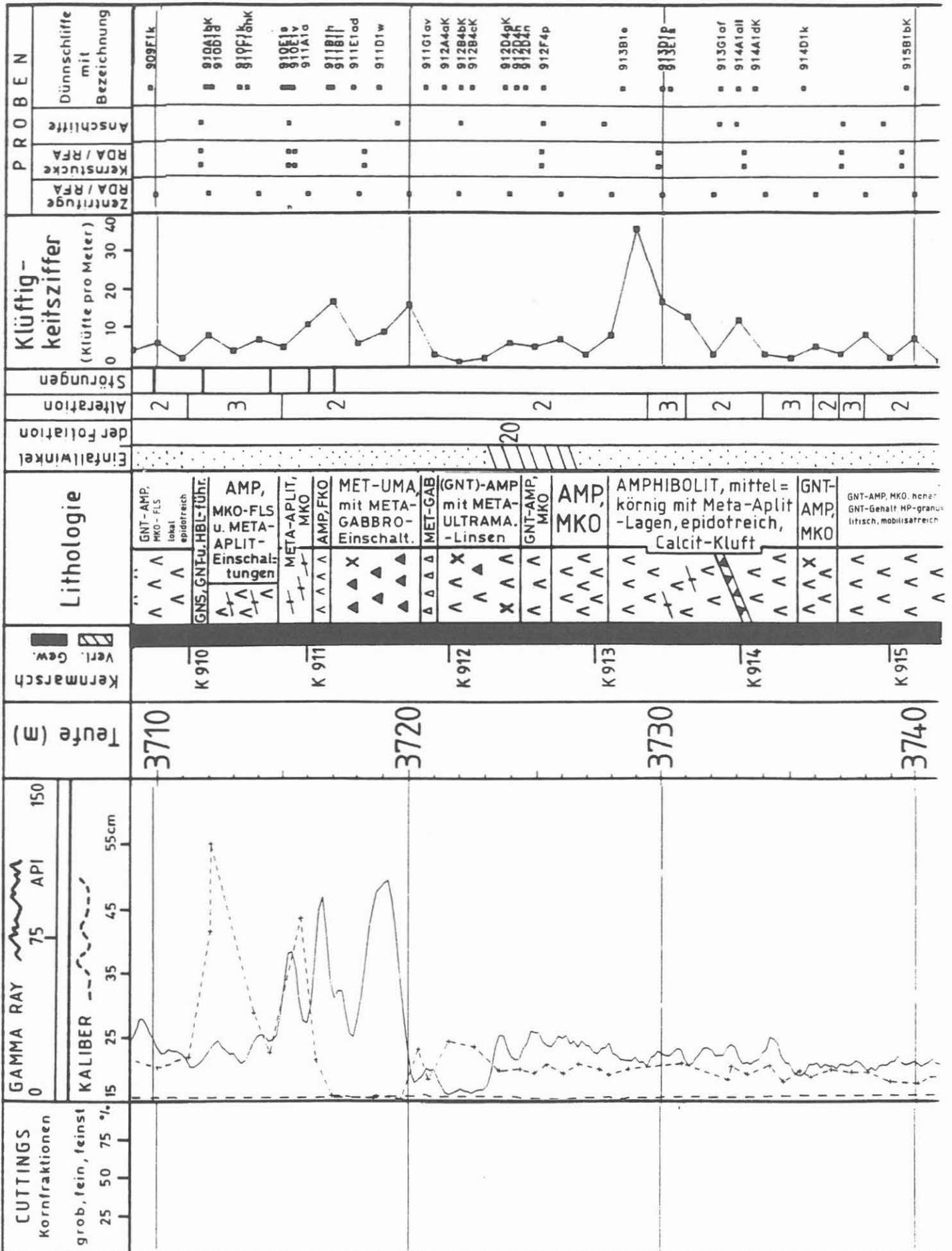


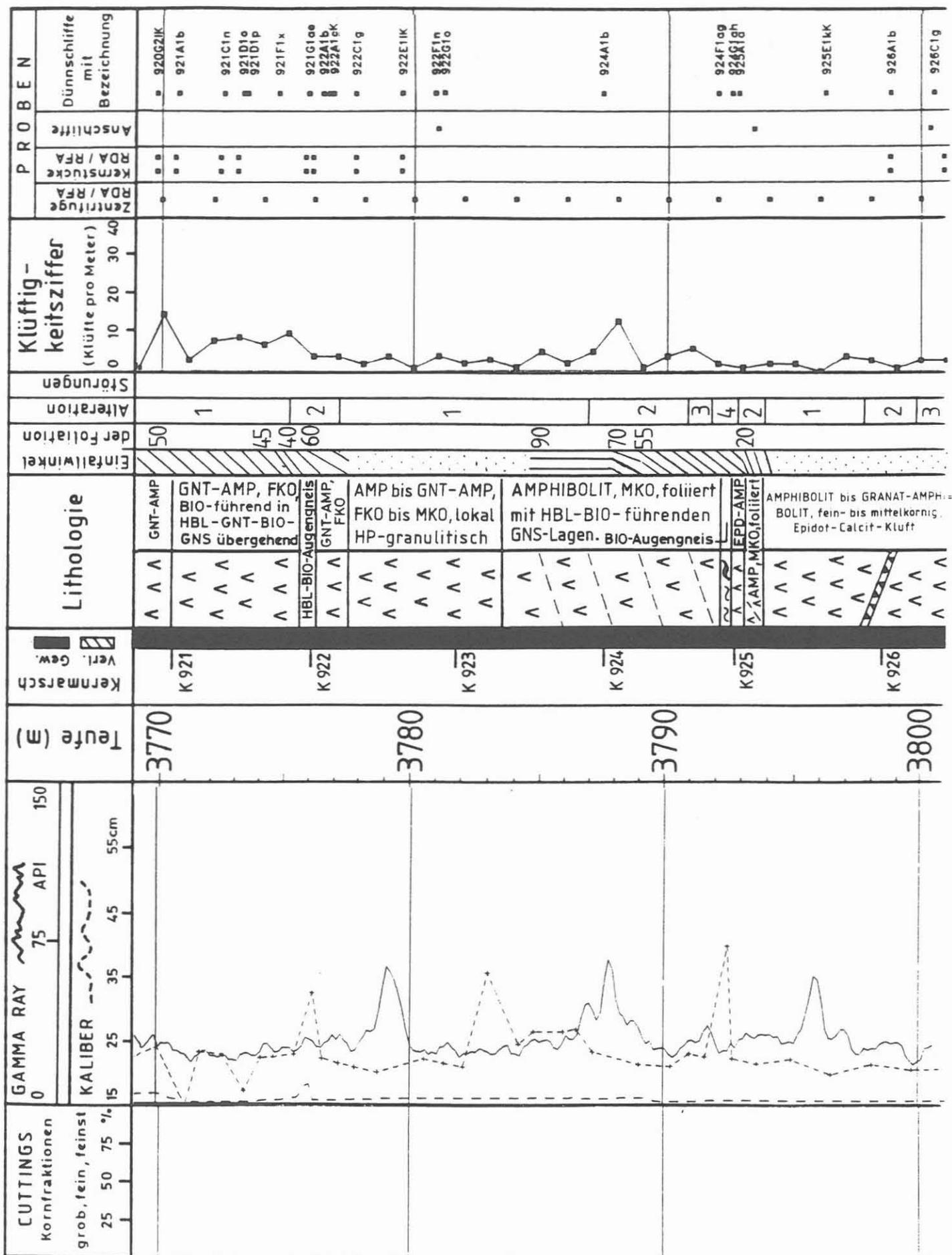


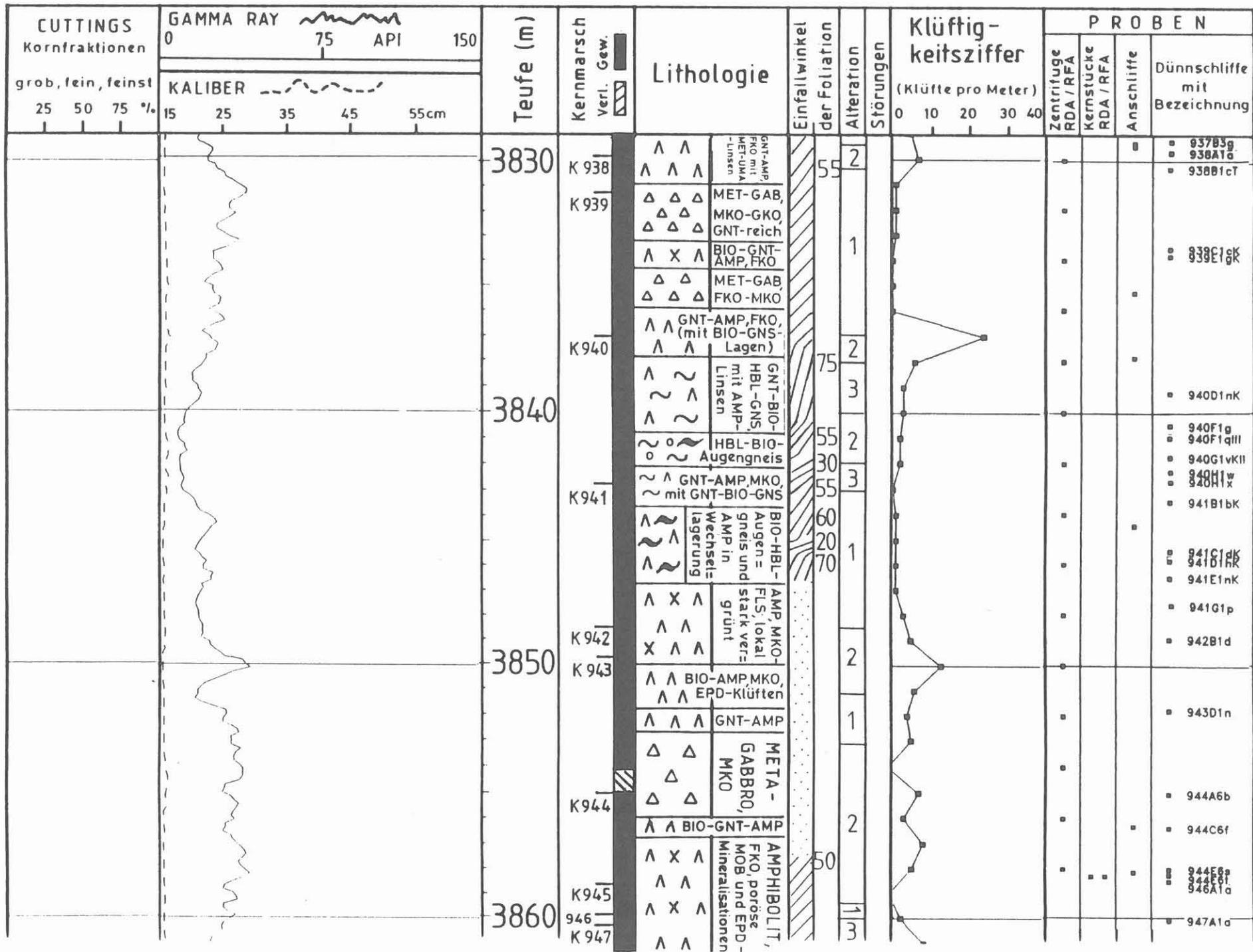


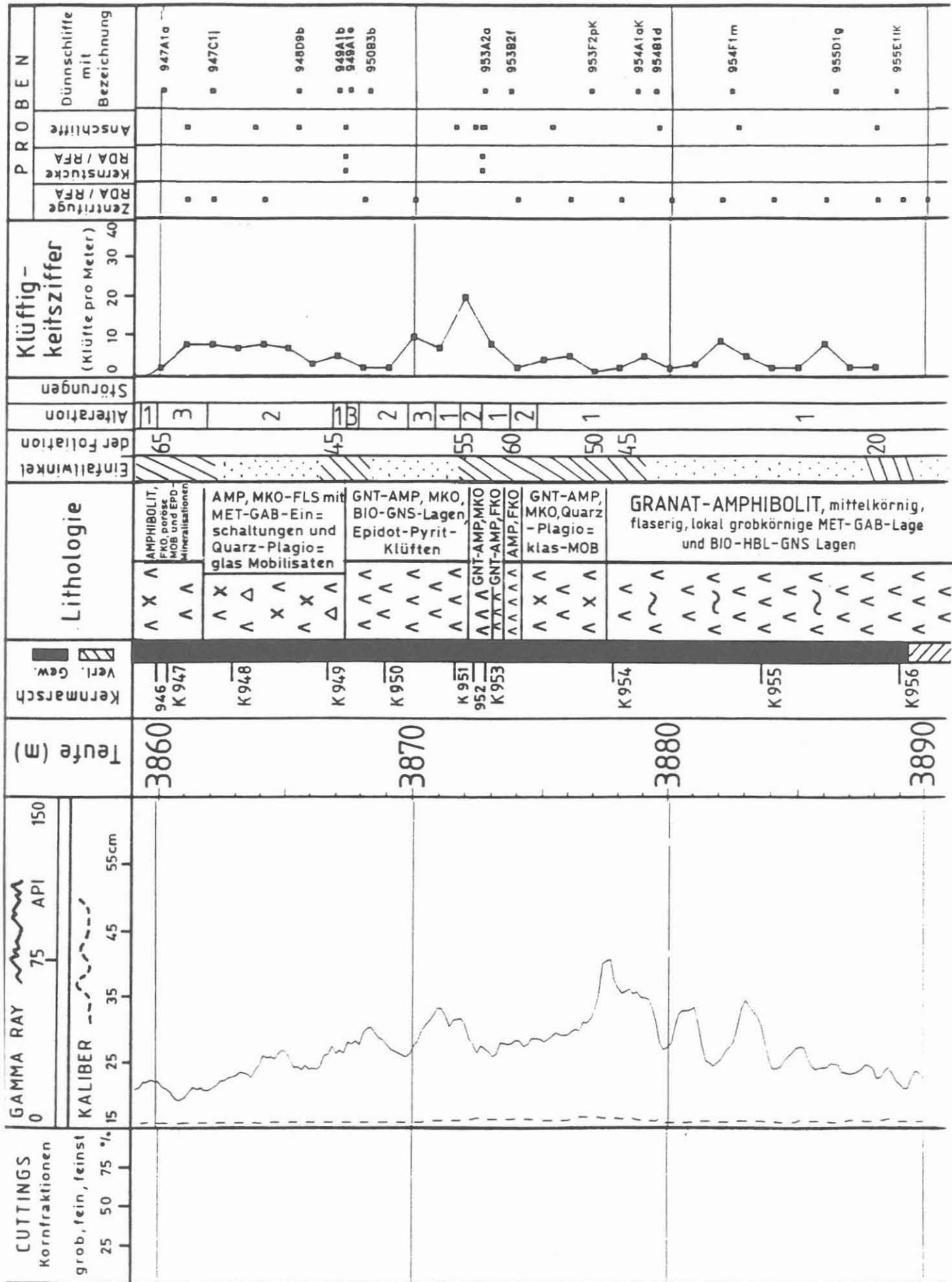
CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 0 75 API 150		Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew.	Lithologie	Einfallswinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	P R O B E N			
	KALIBER 15 25 35 45 55cm									Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung
			3650	K 892 893 894 895 896 897 K 898	GRANAT-AMPHIBOLIT, fein- bis mittelkörnig, lokal HP-granulitisch (mit HBL-GNS-Einschaltungen)	5	2						891F1a 892A2b
			3660	K 899 K 900 K 901	GRANAT-AMPHIBOLIT mittelkörnig, flaserig, alteriert	50 50							898C3f 898E3mK 898G3f 899A1a 899B1e
			3670	K 902 903 K 904	GNT-AMP, MKO-FLS mit Mobilisaten		1						899E1m 899G1f 900A1a 900B7a 901A1a 901A2a 901C2g 901G2s
			3680		AMP, mittelkörnig, flaserig, lokal alteriert mit GNT Relikten		2	1					902B1R 902F1n 903A1a 903A1f 904A1c 904E1hK

CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 0 75 API 150 KALIBER 15 25 35 45 55cm	Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew.	Lithologie	Einfallwinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	P R O B E N				
									Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung	
		3680	K 905	AMP, mittelkörnig, flaserig, lokal alteriert mit GNT Relikten								904E1hK	
				AMP, foliiert									905D4o
		3690		K 906	GNT-AMP, MKO, FLS								906A1c 906B1d
				K 907	GNT-AMP, MKO u. GNT, HBL führen der BIO-GNS in Wechselagerung	50							907A1o
					AMP, FKO								907C1gKII 907D1hKI 907D1hKII
		3700		K 908	AMP-GNT, mittelkörnig, flaserig	70							908B1dK
					AMP, MKO LIG, FLS	40							908E1cKII
					KKL								908G1q 909A1b
		3710		K 909	GRANAT-AMPHIBOLIT, mittelkörnig-flaserig, lokal epidotreich	25 40							909E1k



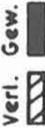






CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 0 75 API 150	Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew. 	Lithologie	Einfallswinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	P R O B E N				
	KALIBER 15 25 35 45 55cm								Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung	
		3890	K956	▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲					•				
		3893		GRANAT-AMPHIBOLIT, mittelkörnig, faserig, lokal grobkörnige MET-GAB-Lage und BIO-HBL-GNS Lagen		1			•				

VB1/VB1a
Zapfenbruch, Fangarbeiten,
Ablenkkeil eingebaut

CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 	Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew. 	Lithologie	Einfallwinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	P R O B E N					
	0 75 API 150								KALIBER 	Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung	
		3750												
		3760												
		3770		Nachfall meist AMPHIBOLIT										
		3780												

VB1 / VB1b
Ablenkpunkt (Tf. 3766.9m)

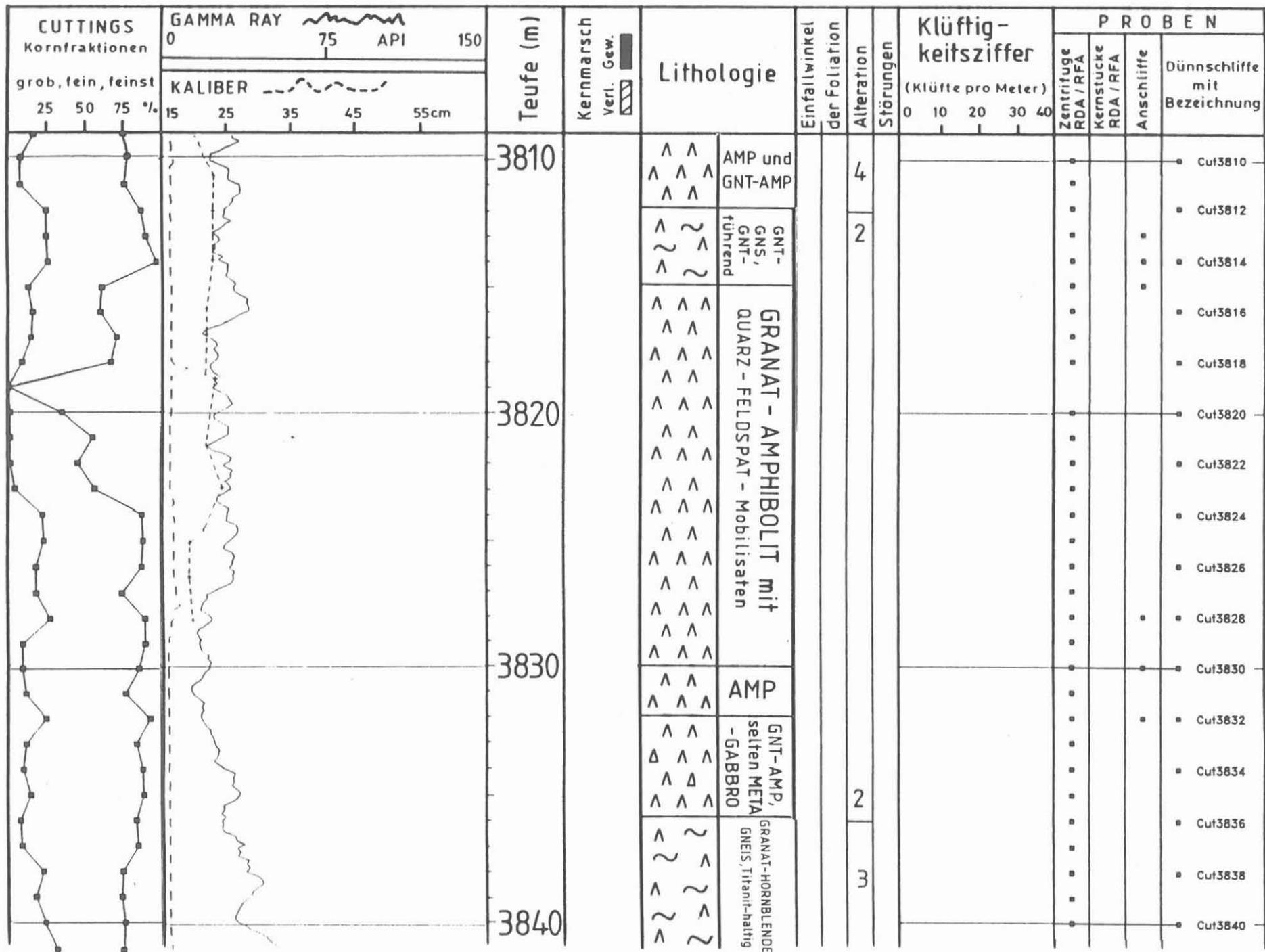
Λ Λ Λ AMP

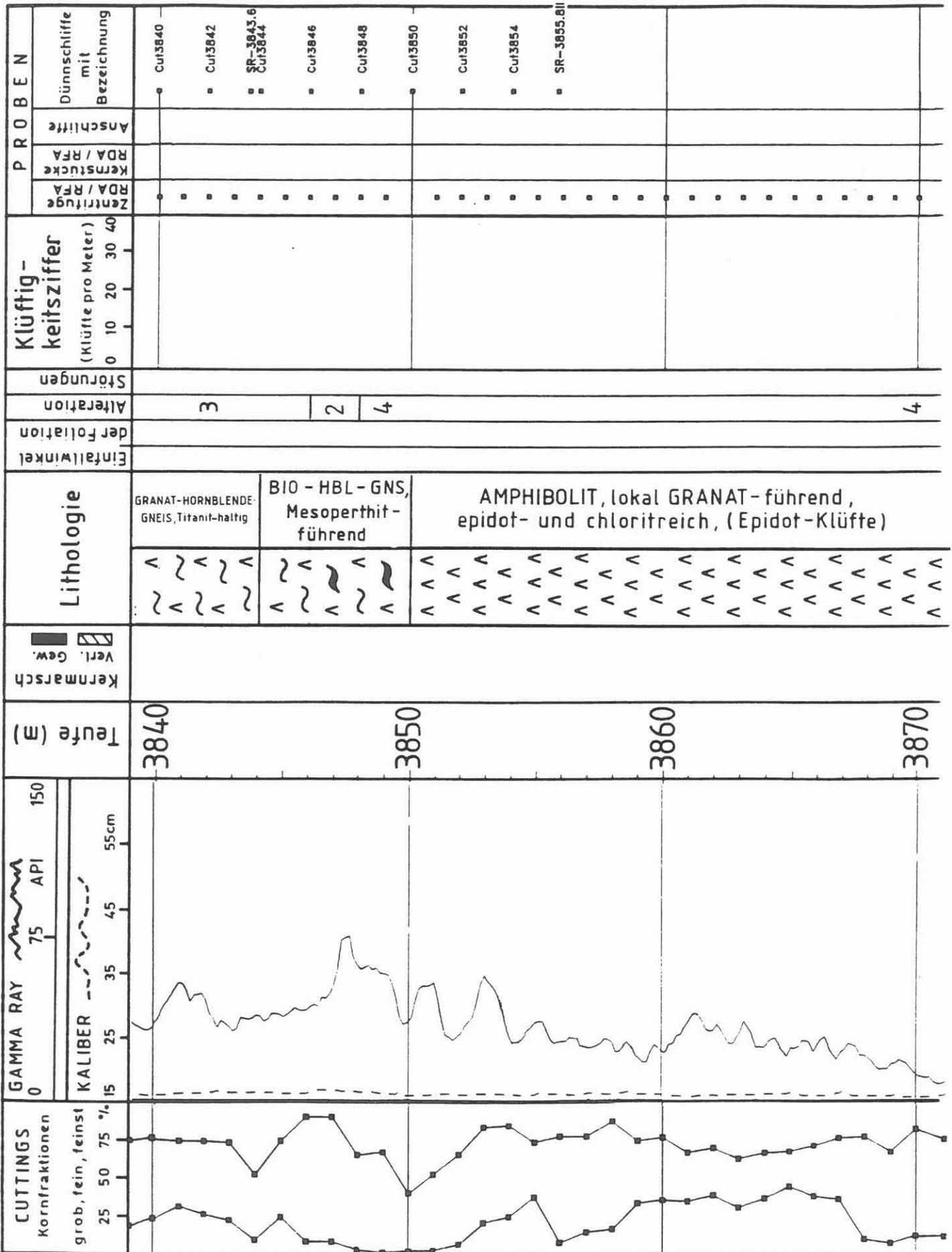
2

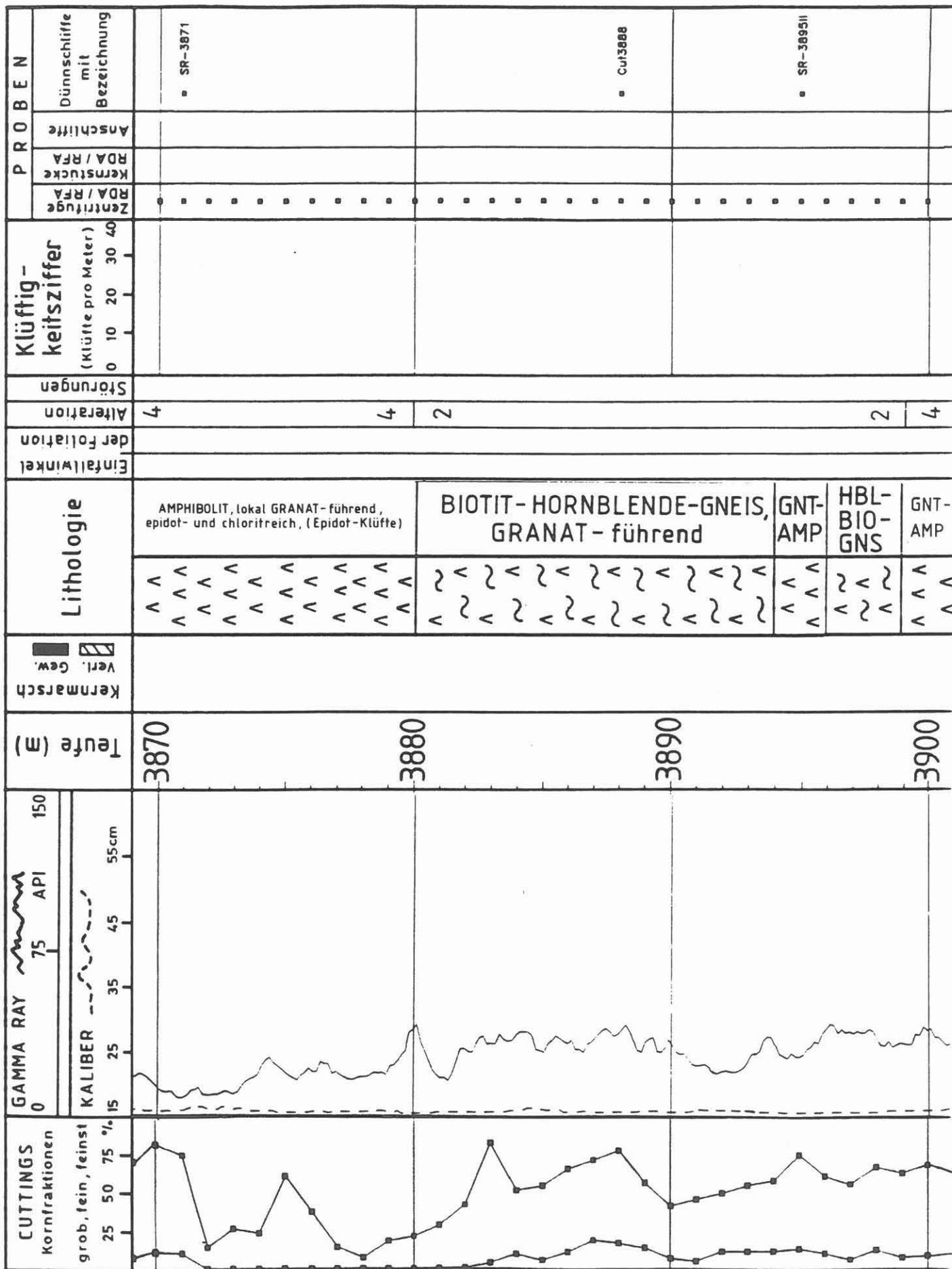
• Cut3770

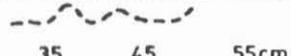
• Cut3775

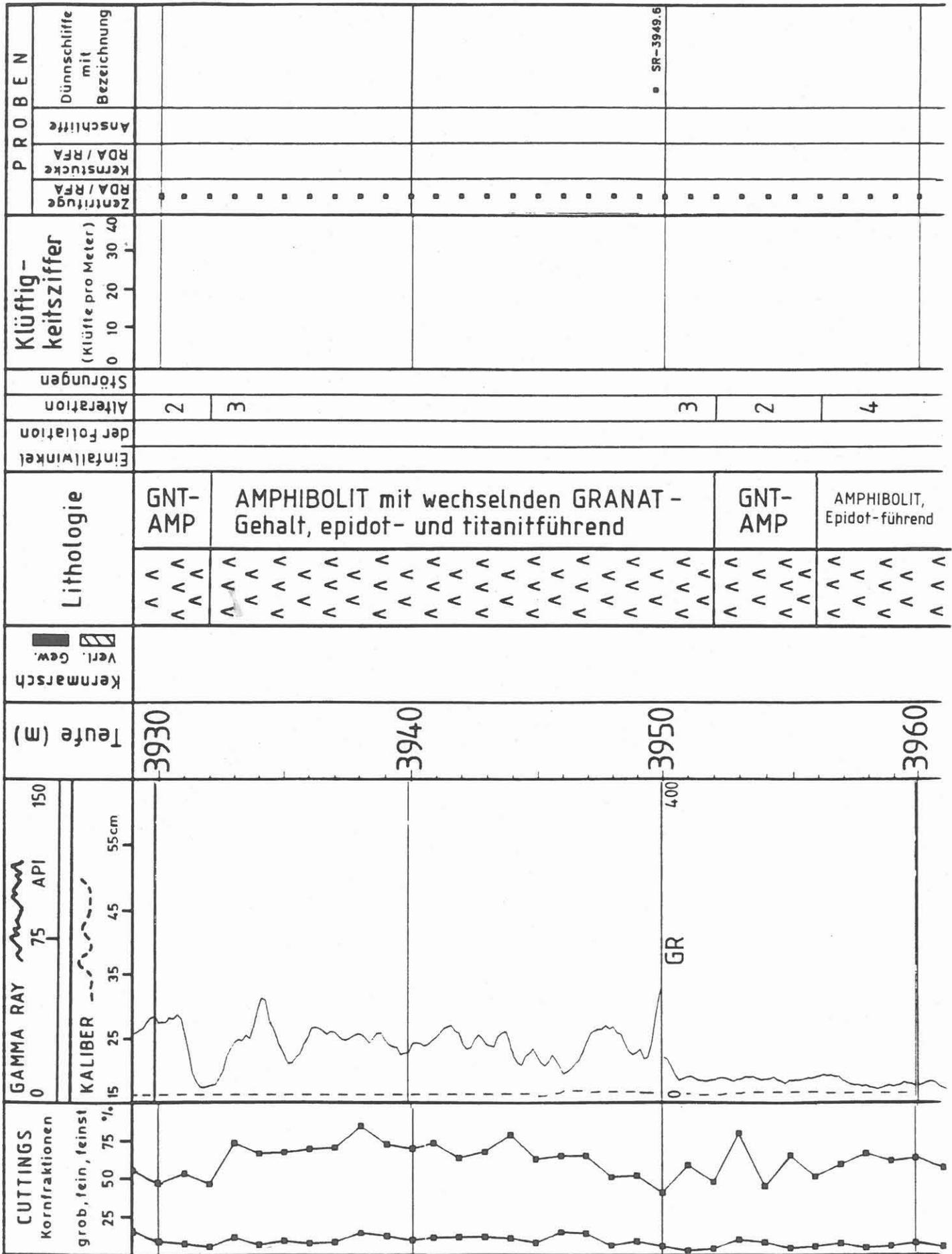
• Cut3780

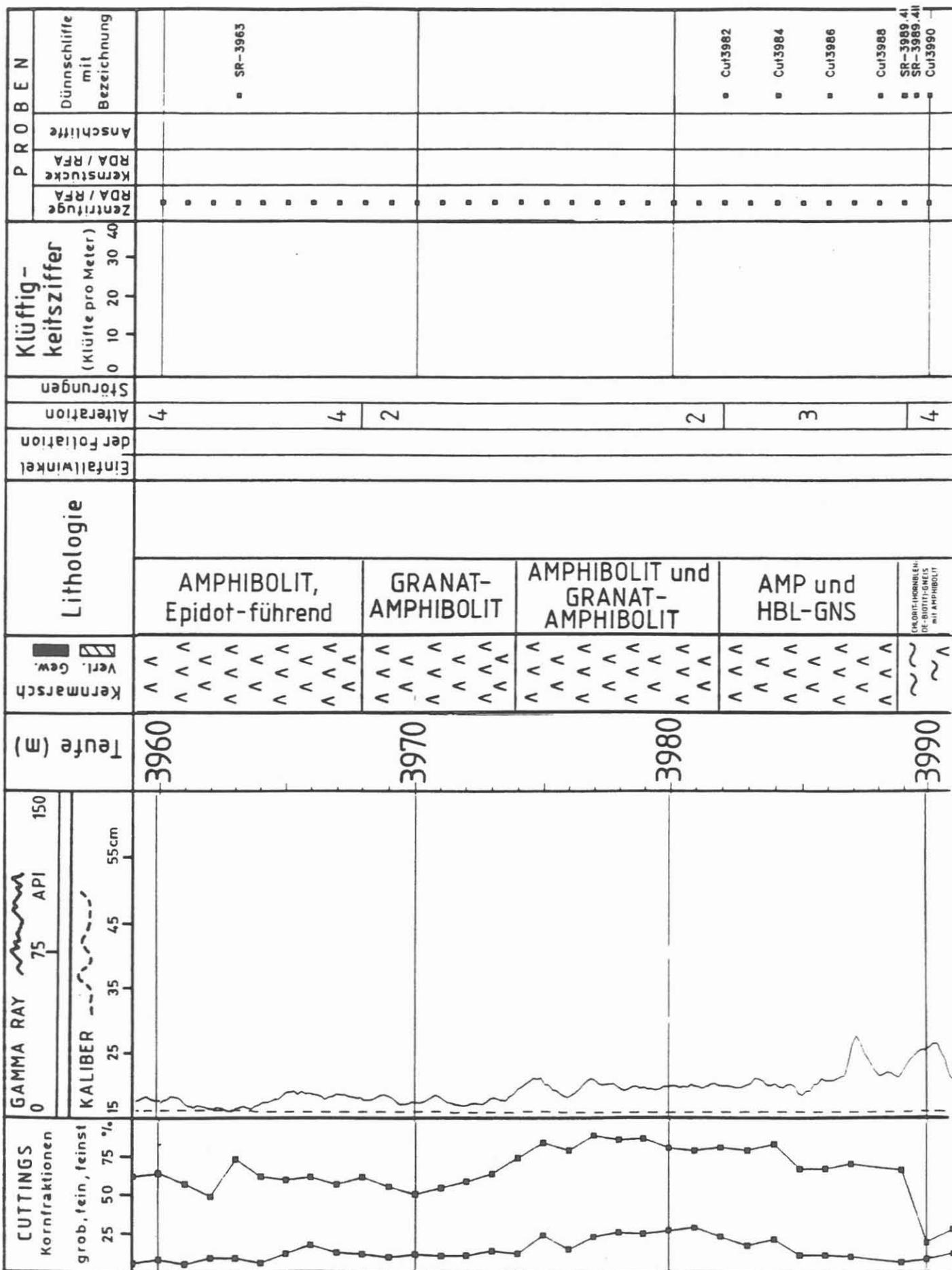






CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY  API 0 75 150		Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew. 	Lithologie	Einfallswinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	P R O B E N						
	KALIBER  15 25 35 45 55cm									Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung			
			3900		GRANAT-AMPHIBOLIT, lokal epidot- und prehnitreich				4							
			3910		HBL- GNS				4							▪ SR-3907.911
					GNT-AMP u. GNT-HBL- GNS				2							▪ SR-3914.6
			3920		AMPHIBOLIT und HORNBLLENDE-GNEIS											
					AMP											
					GNT-HBL- BIO-GNS											▪ SR-3927
			3930		GNT- AMP				2							





CHLORIT-HORNBLEND-
DE-BIOTIT-GNEIS
mit AMPHIBOLIT

CUTTINGS Kornfraktionen grob, fein, feinst 25 50 75 %	GAMMA RAY 0 75 API 150		Teufe (m)	Kernmarsch Verl. Gew.	Lithologie	Einfallwinkel der Foliation	Alteration	Störungen	Klüftig- keitsziffer (Klüfte pro Meter) 0 10 20 30 40	PROBEN			
	KALIBER 15 25 35 45 55cm									Zentrifuge RDA / RFA	Kernstücke RDA / RFA	Anschliffe	Dünnschliffe mit Bezeichnung
			3990		CHLORIT-(HORNBLEN- DE-BIOTIT)-GNEIS mit AMPHIBOLIT		4			•	Cut3990		
										•	Cut3992		
										•	Cut3994		
										•	Cut3996		
										•	Cut3998		
					HBL-GNS bis AMP, alteriert		3			•	Cut4000		
Endteufe 4000,1m			4000										

Tab. B. 11: Profilbeschreibung für den Teufenabschnitt
3500 m - 4000.1 m

A) VB 1a: Kernstrecke 3500 - 3898 m

Teufe Lithologisch-strukturelle Beschreibung
(m)

-
- 3497.7 -----
mittelkörniger, flaseriger Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis; bei 3499.1 m, 3500.6 m und 3501.5 m leukokrat, körnelig; graphitimprägnierte Scherbahn bei 3499.0; cm-große Plagioklas-Porphyroklasten bei 3508 m; ab 3512 m aufschiebende Knickzonen; diskrete, kataklastische Scherflächen und Klüfte sind mit Chlorit, selten mit Calcit mineralisiert
- 3514.5 -----
mittelkörniger Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis mit Übergängen zwischen flaserigem und lagigem Gefüge; bei 3514.7 m ca. 4x6 cm-große Kalksilikat-Linse mit Granat-Kern innerhalb einer mehrere dm mächtigen, stark alterierten kataklastischen Scherzone, aufschiebende Knickzonen bis 3515 m
- 3519.9 -----
mittelkörniger, lagiger Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis, halboffene Falten, z.T. achsenflächenparallel abgeschert
- 3523.0 -----
feinkörniger, strafflagiger Granat-Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis, stark alteriert; fischchenförmige Sillimanit-Aggregate von 3537.3 - 3538.7 m, in Verbindung mit nur mikroskopisch sichtbarem 'ecc'- Gefüge; zwischen 3525 und 3527 m eng verfaltete Quarz-Plagioklas-Mobilisatlagen
- 3538.8 -----
Wechsel zwischen feinkörnigem, flaserigem bis lagigem und mittelkörnig-lagigem, Granat-führendem Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis, lokal mit verfalteten Mobilisat-Bändern, Turmalin-Aggregaten und Sillimanit-Schlieren; bis 3550 m kataklastisch überprägt, Graphit- und Pyrit-Vererzung; 1 cm mächtiges, konkordantes, schwach verfaltetes Meta-Aplit-Gängchen bei 3554.7 m
- 3555.2 -----
feinkörniger, flaseriger Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis, teilweise Granat-führend; bei 3570 m Kyanit-Relikte; Graphit, Chlorit, Pyrit und Laumontit auf Scherflächen und Klüften
- 3572.1 -----
mittelkörniger, körneliger Biotit-Gneis, mit akzessorischem Allanit; eng verfaltete aplitische Gängchen
- 3573.5 -----
mittelkörniger Granat-Amphibolit mit überwiegend richtungslosem Gefüge und lokal erhaltenen Gefügerelikten der HP (Hochdruck)-granulitfaziellen Metamorphose,

- erstmalig über weite Bereiche Core-disking (scheibenartige Zerlegung des Kernes); zwischen 3582.2 und 3582.7 m drei wenige cm-mächtige, meta-aplitische Gängchen; halboffene Kluft mit Prehmit-Rasen bei 3587.5 m, cm-dicker Kluftbelag aus Chlorit und Quarz bei 3587.8 m
- 3595.7 -----
Meta-Aplit mit buchtigem, biotitreichem Liegendkontakt
- 3596.1 -----
fein- bis mittelkörniger, HP-granulitischer Granat-Amphibolit mit Sulfiden in der Matrix, am Hangendkontakt schwach foliiert
- 3597.2 -----
feinkörniger, foliierter Granat-Amphibolit
- 3597.9 -----
feinkörniger, Granat-führender Meta-Aplit
- 3598.2 -----
mittel- bis grobkörniger, HP-granulitischer Granat-Amphibolit mit Quarz-Plagioklas-Mobilisat-Schlieren und -Lagen
- 3600.2 -----
feinkörniger Granat-Amphibolit, schwach foliiert, mobilisatreich
- 3600.6 -----
Granat-Hornblende-Biotit-Gneis mit Übergang in foliierten, Biotit-führenden Amphibolit mit konkordanten Quarz-Plagioklas-Mobilisat-Lagen
- 3602.0 -----
straff foliierter Granat-Amphibolit mit Einschaltungen von gebändertem (Granat)-Biotit-Hornblende-Gneis; halboffene Kluft mit Prehmit-Rasen
- 3606.3 -----
grobkörniger, flaseriger Meta-Gabbro; horizontal liegende Streckungsfaser; bis 3 mm weite halboffene Prehmit-Kluft bei 3607.7 m, Sulfidführung auf Klüften
- 3608.8 -----
feinkörniger, teilweise schwach foliierter, lokal HP-granulitischer Metagabbro, zum Liegenden hin granatreicher; Laumontit auf Klüften; zwischen 3610 m und 3611.5 m cm-mächtige, randlich chloritisierte Quarz-Feldspat-Gängchen
- 3618.1 -----
mittelkörniger, foliierter, HP-granulitischer Meta-Gabbro
- 3620.1 -----
mittelkörniger, richtungslos texturierter, HP-granulitischer Meta-Gabbro mit mm-großen Klinopyroxenen
- 3621.6 -----
mittelkörniger, flaseriger Meta-Gabbro, teilweise alteriert; feinkörnig-straflagig von 3621.6 - 3622.3 m; flach bis steil einfallende Streckungsfaser aus gelängten Plagioklas-Klasten und -Flasern
- 3625.0 -----
feinkörniger, im Hangenden mittelkörniger Granat-Amphibolit, mobilisatreich; steilstehende, mit Laumontit

mineralisierte Klüfte und mit Chlorit belegte Scherbahnen bei 3634.6 m, viele cm-mächtige, z.T. versetzte Chlorit-Gängchen (3634.6 m, 3636.3 m, 3638.4 m); 4 cm mächtiges Quarz-Feldspat-Gängchen bei 3627.0 m, Plagioklas-Klasten und 1 cm mächtige Kataklysebahn mit Nebengesteins-Bruchstücken bei 3631.7 m, drusige Hohlräume bei 3629.7 und 3632.0 m

3638.8 -----

feinkörniger, lagiger Amphibolit; zwei flach einfallende, mit Prehnit und Pyrit mineralisierte Klüfte im Liegenden

3639.3 -----

feinkörnig-dichter, foliierter Amphibolit mit deformierten, feinkörnigen Meta-Gabbro-Einschaltungen bei 3641.5 m; poröses Quarz-Feldspat-Gängchen bei 3659.5 m; 7 cm mächtiger, flachliegender Prehnit-Calcit-Gang mit vergrüntem, eckigen Nebengesteins-Bruchstücken bei 3639.6 m; strafflagige, leukokrate, Granat-, Hornblende- und Biotit-führende Gneis-Lagen und -Schlieren mit flachliegender Streckungsfaser, asymmetrisch verfaltet bei 3639.8 sowie 3640.9 m; steilstehende, mit Laumontit mineralisierte Klüfte

3644.5 -----

feinkörnig-dichter Granat-Amphibolit mit leukokrater Biotit-Gneis-Schliere und Hornblende-führendem Quarz-Plagioklas-Mobilisat; lokal sehr granatreich

3645.1 -----

feinkörnig-dichter, HP-granulitischer Granat-Amphibolit; mit einzelnen, steil einfallenden, cm-mächtigen Mobilisat-Lagen

3647.6 -----

feinkörniger, flaseriger Granat-Amphibolit, im Liegenden sehr granatreich

3648.1 -----

feinkörnig-dichter bis mittelkörniger Granat-Amphibolit, vereinzelt mit HP-granulitischen Mineralrelikten; von 3657.4 - 3657.8 m mittelkörnig-lagig, plagioklas- und granatreich, mit horizontal liegendem Streckungsgefüge; 2 cm mächtige, auskeilende Quarz-Feldspat-Lagen bei 3653.3 sowie 3653.8 m; cm-mächtige Einschaltungen eines leukokraten Plagioklasgesteins mit straff eingeregelt Granat-, Hornblende-Lagen (3652.7 m, 3653.7 m, 3654.6 m), ebenfalls mit horizontal liegender Streckungsfaser; bei 3653.8 m 2 cm mächtiges, grobkörniges, undeformiertes Quarz-Feldspat-Gängchen mit vergrüntem Nebengestein; steilstehende, verheilte Fiederklüfte von 3655.4 - 3656.2 m; steilstehende, subaxiale Brüche von 3656.2 - 3656.8 m

3660.4 -----

mittelkörniger, flaseriger Granat-Amphibolit, alteriert, bereichsweise feinkörnig; durch ungleichmäßig verteilten Plagioklas fleckiges Gefüge; leukokrate, Granat- und Hornblende-führende Gneislage bei 3660.9 m; bei 3663.5 m alterierter, HP-granulitischer Granat-Amphibolit; sehr granatreiche Lagen bei 3665.3 m

- und von 3669.1 bis 3669.2 m, bei 3667.1 m verfaltete Biotit-Gneis-Lage und mit Prehnit-Epidot mineralisierte Scherbahn; von 3669.2 - 3669.6 m steilstehende, mit Chlorit mineralisierte Abschiebung, ebenfalls steilstehende Abschiebung bei 3662.6 m; 10 cm mächtige, kataklastisch überprägte Zone mit flachliegenden, chloritreichen Scherbahnen bei 3666.9 m
- 3671.8 -----
mittelkörniger, flaserig-fleckiger Granat-Amphibolit; mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten, von 3674.5 - 3676.1 m sehr granatreich, an der Basis HP-granulitische Mineralrelikte
- 3677.5 -----
mittelkörniger, flaserig-fleckiger z.T. alterierter Amphibolit mit Granat-Relikten und -Pseudomorphosen, am Liegendkontakt Granat-Amphibolit; Haarrisse und verheilte Scherbahnen bis 3681.0 m; bei 3679.8 m flach einfallender Kataklastithorizont mit schwarzer Scherbahn, darunter ein cm-mächtiger Breccienhorizont, bei 3681.9 m 10 cm mächtige, verheilte, chloritreiche Scherzone; feinkörnig-dichte, steil einfallende Scherbahn bildet den Kontakt zur liegenden Einheit
- 3684.4 -----
feinkörniger, follierter Amphibolit, Streckungsgefüge mit horizontal liegender Streckungsfaser
- 3685.2 -----
mittelkörniger, flaserig-fleckiger Granat-Amphibolit, mit leukokrater Granat-Hornblende-Gneis-Band bei 3687.6 m
- 3689.8 -----
Wechselagerung aus mittelkörnigem, bereichsweise flaserigem Granat-Amphibolit mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten und leukokrater, Granat- und Hornblende-führendem Biotit-Gneis; bei 3690.4 m Klüfte mit Quarz, Feldspat und Pyrit mineralisiert
- 3695.4 -----
feinkörnig-dichter Amphibolit mit strafflagigen, leukokraten Granat-Biotit-Hornblende-Gneis-Einschaltungen; Gneis-Einschaltungen mit unregelmäßig-schlierigen Kontaktflächen zum Amphibolit und horizontal liegender Streckungsfaser; steil einfallende, mit Prehnit mineralisierte Klüfte und Scherzonen
- 3697.1 -----
mittelkörniger, flaserig-fleckiger Granat-Amphibolit, mit leukokrater, granatreicher Gneis-Schliere bei 3697.4 m
- 3700.4 -----
mittelkörniger, lagig-flaseriger Amphibolit; flach einfallendes Streckungsgefüge; steilstehende, kataklastische Scherbahnen, gehäuft am Liegendkontakt, mit Calcit, Chlorit und Laumontit mineralisiert;
- 3702.3 -----
Kataklastit, verfestigt; flach einfallender Hangend-, steil einfallender Liegendkontakt

3702.9 -----

mittelkörniger, flaseriger Granat-Amphibolit, mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; lokal epidotreich, flache bis steile Klüfte und Scherbahnen, mit Calcit, Chlorit und Laumontit mineralisiert; von 3703.4 - 3704.5 m mittelkörnige, flaserige, leukokrate, HP-granulitische Granat-Amphibolit-Lagen, maximal 20 cm mächtig; bei 3703.8 m flach einfallender, 4 cm mächtiger Katakklasehorizont; bei 3706.9 m steil einfallende Katakklasebahn

3711.3 -----

mittelkörnig-flaseriger, leukokrater, Granat- und Hornblende-führender Gneis; mit zwei jeweils mehrere cm mächtigen, mittelkörnigen Quarz-Feldspat-Mobilisaten; von zahlreichen flachliegenden Klüften und Katakklasebahnen durchzogen

3711.8 -----

mittelkörniger, undeutlich flaseriger Amphibolit mit mittelkörnigen, leukokraten, körneligen bis lagigen Meta-Aplit-Einschaltungen von 3711.8 bis 3712.4 m und von 3713.1 bis 3713.3 m; von flachliegenden Katakklasehorizonten durchzogen, z.B. 3713.4 m; 45 cm mächtiger Katakklasehorizont von 3713.8 - 3714.4 m

3714.8 -----

mittelkörniger, leukokrater Meta-Aplit, körnelig

3716.1 -----

feinkörniger, flaseriger Amphibolit, liegender Bereich mylonitisch-straflagig; lokal epidotreich; feine, mit Prehnit, Laumontit, Chlorit und Calcit mineralisierte, steilstehende Klüfte

3716.7 -----

feinkörnig-dichter Meta-Ultramafitit (spinellführender Chlorit-Hornblende-Fels = Meta-Pyroxenit), hellgrün mit dunklen Flecken, lokal mit bis zu 1 cm großen Klinopyroxenen; von 3717.5 bis 3717.8 m grobkörnige Meta-Gabbro-Einschaltung

3720.2 -----

follierter, grobkörniger Meta-Gabbro, reich an lagigen und schlierigen, Hornblende-führenden Quarz-Plagioklas-Mobilisaten

3720.7 -----

mittelkörniger, flaseriger Amphibolit, ab 3722.9 m Granat-führend; im Liegenden lokal HP-granulitische Granat-Amphibolite, mit schlierigen Mobilisaten und pegmatoiden Quarz-Feldspat-Lagen; cm-große Meta-Ultramafitit-Lagen und -Linsen bei 3722.4 und 3724.0 m; flach einfallende, mineralisierte Klüfte

3724.2 -----

mittelkörniger, flaseriger, HP-granulitischer Granat-Amphibolit; zum Liegenden hin zunehmender Granatgehalt; horizontal liegende Streckungsfaser

3725.4 -----

mittelkörniger Amphibolit, lokal mit Quarz-Plagioklas-Mobilisaten

- 3727.2 -----
mittelkörniger, epidotreicher Amphibolit; mit mehreren mittelkörnigen, epidotreichen Meta-Aplit-Lagen, meist mit steil einfallenden Kontakten, am Kontaktbereich z.T. cm-große Hornblende-Kristalle; die ganze Einheit ist stark geklüftet (Calcit-Epidot-Mineralisation); halboffene Kluft mit Calcit-Kristallrasen bei 3733.4 m
- 3735.1 -----
mittelkörniger Granat-Amphibolit mit Quarz-Plagioklas-Mobilisat-Schlieren
- 3736.7 -----
mittelkörniger, leukokrater, HP-granulitischer Granat-Amphibolit mit sehr hohem Granat-Gehalt, schwach foliiert, mobilisatreich; lokal besonders granatreiche Lagen und Schlieren
- 3744.5 -----
mittelkörniger, schwach foliierter, biotitreicher Granat-Amphibolit, Mobilisat-Schlieren bei 3745.6 m; cm-große, hellgrünliche Ultramafitit-Schlieren (Klinopyroxen-Hornblende-Gestein) bei 3748.4 m; foliationsparallel eng verfaltete
- 3748.6 -----
mittelkörniger, foliierter Granat-Amphibolit, mobilisatreich; Epidot-Quarz-Feldspat-Gang mit Sulfiden bei 3750.5 m
- 3751.4 -----
mittelkörniger Meta-Gabbro bis Amphibolit mit 5 bzw. 10 cm mächtigen, grobkörnigen Meta-Aplit-Lagen und Nestern bei 3754.4 und 3755.0 m
- 3756.1 -----
mittelkörniger, richtungslos texturierter Amphibolit bis Granat-Amphibolit; lokal HP-granulitische Biotit-Granat-Amphibolite, sehr granatreiche, 15 cm bzw. 10 cm mächtige Lagen bei 3762.9 und 3763.5 m; zahlreiche, zum Teil lagige Quarz-Plagioklas-Mobilisate; steilstehende, mit Laumontit mineralisierte Klüfte; flache Prehnit-Kluft bei 3767.7 m
- 3770.5 -----
sehr feinkörniger, Biotit-führender Granat-Amphibolit, massig, zum Liegenden ab 3773.2 m in (z.T. Klinopyroxen-führenden) Hornblende-Granat-Biotit-Gneis übergehend, mit stark gestreckten Plagioklas-Klasten bei horizontal liegender Streckungsfaser und teilweise verfalteten plagioklasreichen Lagen
- 3775.6 -----
strafflagiger, Granat-führender Hornblende-Biotit-Augengneis; deutliches Streckungsgefüge der Plagioklase mit horizontal liegender Streckungsfaser, Allanit-führend
- 3776.3 -----
feinkörniger, mobilisatfreier Granat-Amphibolit
- 3777.6 -----
feinkörniger, mit zunehmender Teufe mittelkörniger Amphibolit bis Granat-Amphibolit; lokal Mineralrelikte der HP-granulitfazielle Metamorphose; straff foliier-

tes, steil einfallendes Gneis-Band bei 3780.8 m; flach einfallende Chlorit- und Biotit-führende Quarz-Feldspat-Gänge bei 3781.8 und 3783.0 m

3783.6 -----

mittelkörniger, foliierter Amphibolit mit cm-mächtigen, leukokraten, Hornblende- und Biotit-führenden Gneis-Lagen; steilstehende bis saiger fallende Quarz-Kluft von 3784.3 bis 3785.0 m

3792.3 -----

mittelkörniger, flaseriger Biotit-Augengneis, Allanit-führend

3792.6 -----

feinkörniger Epidot-Amphibolit mit wechselnden Granat-Gehalten

3793.3 -----

mittelkörniger, bereichsweise foliierter Amphibolit, mobilisatreich, z.T. alteriert; mit horizontal liegendem Streckungslinear

3794.0 -----

fein- bis mittelkörniger Amphibolit bis Granat-Amphibolit, lokal stärker alteriert, vereinzelt HP-granulitische Mineralrelikte erhalten; mehrere mit Feldspat mineralisierte, mm-mächtige Klüfte; bei 3798.0 m cm-mächtige Epidot-Plagioklas-Kluft; bei 3798.2 m steil einfallende, halboffene Kluft mit Kristall-Rasen aus Epidot und Calcit; ab 3799.9 m lokal stark vergrünt durch Epidot-Klüfte oder -Kluftscharen

3805.9 -----

feinkörniger, vollständig alterierter und chloritisierter (Hornblende-Biotit)-Gneis mit vereinzelt Quarz-linsen, titanit- und epidotreich; steile und flache Kataklysebahnen mit Epidotmineralisation

3806.6 -----

mittelkörniger, lokal foliierter, lokal HP-granulitischer Granat-Amphibolit mit Mobilisaten, am Hangendkontakt stark geklüftet und mit Epidot verheilt; lokal granatreiche Lagen; zwischen 3807.4 und 3808.2 m, sowie bei 3811.9 m grobkörnige Quarz-Feldspat-Gänge; zwischen 3811.2 m und 3812.4 m diskordante Bleichungs-zonen; zwischen 3817.1 und 3817.3 m eine ca. 5 mm weit geöffnete Kluft mit Quarz-Kristallrasen und vereinzelt, bis 3 mm großen, klaren Calcit-Rhomboedern, verbunden mit dem Zufluß salinarer Formationswässer

3822.6 -----

feinkörnig-dichter Granat-Amphibolit, teilweise granatreich, stellenweise Biotit-führend; mit dm-mächtigen Einschaltungen von Granat-führendem, mittelkörnigem Amphibolit; lokal Mineralrelikte der HP-granulitischen Metamorphose erhalten; kataklastische, chloritreiche Scherzone bei 3799.8 m, Einheit reich an schlierigen Mobilisaten; sehr steil einfallender, zerscherter, grobkörniger Quarz-Feldspat-Gang mit Pyrit und Chlorit; sehr steil bis saiger stehende subaxiale Klüfte, mit Chlorit und vereinzelt mit Pyrit mineralisiert

3827.5 -----

- feinkörnig-dichter, HP-granulitischer Granat-Amphibolit; sehr granatreich bei 3830.1 und 3831.5 m ; reich an schlierigen Mobilisaten; von 3830.1 - 3830.6 m pegmatoide Einschaltung mit Titanit, Biotit-Rosetten und Hornblende; bei 3830.9 m ein cm-mächtiger, feinkörniger Meta-Ultramafitit mit dunklem, buchtigem Salband; cm-große, feinkörnige Meta-Ultramafitit-Linse bei 3831.0 m
- 3830.9 -----
mittel- bis grobkörniger, granatreicher Meta-Gabbro; wenige schlierige Mobilisate, Streckungsgefüge mit horizontal liegender Streckungsfaser
- 3833.0 -----
feinkörniger, flaseriger, HP-granulitischer Biotit-Granat-Amphibolit; ab 3833.1 m feinkörnig-dicht, bei 3833.6 m mittelkörniger Quarz-Plagioklas-Gang
- 3834.1 -----
fein- bis mittelkörniger, granatreicher Meta-Gabbro; einzelne, schlierige Quarz-Plagioklas-Mobilisate
- 3835.7 -----
feinkörniger, richtungslos texturierter Granat-Amphibolit mit steil einfallender Biotit-Gneis-Lage
- 3837.6 -----
fein- bis mittelkörniger, flaseriger Granat-Biotit-Hornblende-Gneis, mit horizontal liegender Streckungsfaser; 4 cm mächtige, leukokrate, feinkörnige Biotit-Gneis-Lage am Top, diskordant von steilstehendem, pegmatoidem Hornblende-Quarz-Feldspat-Gang durchschlagen; im Hornblende-Gneis ab 3839.7 m vier dm-lange, feinkörnige, richtungslos texturierte Amphibolit-Linsen; an der Liegendgrenze ein 4 cm mächtiges, richtungslos-feinkörniges Amphibolit-Band, diskordant zur Gneisfoliation liegend
- 3840.8 -----
mittelkörniger, flaseriger Hornblende-Biotit-Augengneis, verfaltet, mit ausgewalzten Plagioklas-Klasten und flach einfallender Streckungsfaser bis 3841.3 m
- 3842.1 -----
mittelkörniger, richtungsloser, HP-granulitischer Granat-Amphibolit, bereichsweise Übergang in stark vergrüneten, mittelkörnigen, lagig-flaserigen Granat-Biotit-Gneis, kontinuierlicher Übergang zur liegenden Einheit
- 3843.7 -----
verfaltete Wechsellagerung aus mittelkörnigem Biotit-Hornblende-Augengneis und feinkörnigem Amphibolit; Augengneis Mikroklin- und Klinopyroxen-führend, mit gestreckten Plagioklas-Klasten und flach einfallender Streckungsfaser, zum Liegenden hin zunehmende Augentextur im Gneis; sehr steil bis saiger fallende subaxiale Brüche; an der Liegendgrenze mit Epidot mineralisierte Haarrisie
- 3846.7 -----
mittelkörniger, flaseriger Amphibolit mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; feinkörnig-dicht und

stark vergrünt von 3848.9 - 3849.6 m, Granat-führend von 3849.6 - 3849.8 m ; bei 3847.5 m Biotit-führender Quarz-Plagioklas-Gang, pegmatoides Quarz-Feldspat-Band bei 3847.6 m, Meta-Gabbro-Linse bei 3848.2 m, Biotit-Gneis-Lage bei 3848.5 m

3850.0 -----

mittelkörniger, richtungslos texturierter Biotit-Amphibolit, mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; saigere Klüfte z.T mit Epidot, steil einfallende Klüfte mit Quarz und Feldspat mineralisiert

3851.6 -----

mittelkörniger, massiger, HP-granulitischer Granat-Amphibolit, granatreiche Lage bei 3852.2 m

3852.5 -----

mittelkörniger, richtungslos texturierter, HP-granulitischer Meta-Gabbro, zwei lagige Mobilisate bei 3855.0 m

3855.8 -----

mittelkörniger, richtungslos texturierter Biotit-Granat-Amphibolit, zum Liegenden hin feinkörnig werdend; mit drei lagigen Mobilisaten

3856.6 -----

feinkörnig-dichter, Granat-führender Amphibolit; liegende Partien vergrünt und mit Pyrit in der Matrix; bei 3858.1 m deformiertes Quarz-Plagioklas-Mobilisat mit horizontal liegender Streckungsfaser; grobkörnige, poröse MobilisatLagen und Epidot-Mineralisation zwischen 3860.1 und 3861.6 m

3861.7 -----

mittelkörniger, flaseriger, HP-granulitischer Amphibolit mit Meta-Gabbro-Einschaltungen, u.a. bei 3864.8 und 3866.8 m; leukokrate, mittelkörnige Biotit-Gneis-Lage bei 3862.7 m, mit schlierigen, Titanit-führenden Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; bei 3866.6 m isoklinal verfaltete Feldspathbändchen

3867.2 -----

mittelkörniger, richtungslos texturierter Granat-Amphibolit, sehr granatreich; mit schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; dm-mächtige, leukokrate Biotit-Gneis-Einschaltung bei 3872.0 m; feine, mit Epidot und Pyrit mineralisierte Klüfte, steil einfallend oder saiger stehend

3872.2 -----

mittelkörniger, richtungslos texturierter Granat-Amphibolit, mit schlierigen bis lagigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; von 3872.4 bis 3872.8 m steil einfallende, kataklastische Scherzone, mit Epidot, Chlorit und Pyrit mineralisiert

3873.2 -----

feinkörnig-dichter Granat-Amphibolit, reich an schlierigen Quarz-Plagioklas-Mobilisaten; steil einfallende, mit Quarz und Feldspat mineralisierte Kluft

3873.5 -----

feinkörniger Amphibolit bis Granat-Amphibolit, vergrünt; mit lagigen Mobilisaten und zwei Biotit-Gneis-

Lagen; kataklastische Scherbahn an der Liegendgrenze, mit Prehnit mineralisiert; sehr granatreiche Linse bei 3873.6 m

- 3874.3 -----
mittelkörniger, richtungslos texturierter, bereichsweise feinkörnig-dichter Granat-Amphibolit, stellenweise sehr granatreich, mit schlierigen Mobilisaten bis 3876.0 m; bei 3877.3 m Quarz-Plagioklas-Mobilisat mit cm-großen, idiomorphen Hornblenden; steilstehende Klüfte, grobkörniger Quarz-Feldspat-Gang bei 3877.0 m
- 3877.5 -----
mittelkörniger, flaserig-fleckiger Granat-Amphibolit, von 3877.5 bis 3877.9 m sehr granatreich; grobkörnige Meta-Gabbro-Lagen von 3878.0 - 3878.4 m und von 3879.0 - 3879.2 m; leukokrate, flaserige Biotit-Hornblende-Gneis-Lage von 3879.2 - 3879.5 m, leukokrate Granat-Biotit-Hornblende-Gneis-Lagen von 3879.7 - 3879.9 m und von 3880.3 - 3880.4 m; Mobilisat bei 3888.8 m; viel Pyrit und Magnetkies auf Klüften
- 3889.2 ----- Endteufe VB 1a

B) VB 1b: Meißelstrecke (Cuttings) 3766.9 - 4000.1 m

Die in der Vb 1a beschriebenen Relikte der HP-granulitischen Metamorphose treten bis zur Endteufe auf. Eine genaue teufenabhängige Darstellung der Relikte ist anhand der Cuttings nicht möglich. Daher wurde bei den Gesteinsnamen auf den Zusatz "HP-granulitisch" verzichtet.

- 3766.9 -----
Ablenkkeil (whip-stock)
- 3772 -----
Nachfall in den Cuttings, meist Amphibolit, Sillimanit-Biotit-Gneis und Quarz-Körner (vom Sandstrahlen mit hydro-jet-tool)
- 3780 -----
Amphibolit und selten Metagabbro, mit Quarz-Feldspat-Mobilisaten, teilweise Nachfall z.B. Lamprophyr bei 3782 m
- 3785 -----
Hornblende-Gneis und Amphibolit, granatführend, lokal epidotreich (3800.0 m)
- 3800 -----
Amphibolit und Granat-Amphibolit, epidot- und prehnitreich (3804.0 - 3812.0 m)
- 3812 -----
granatführender Hornblende-Gneis, epidotreich (3814 m)
- 3815 -----
Granat-Amphibolit mit Quarz-Feldspat-Mobilisaten, lokal epidotführend
- 3830 -----
Amphibolit

- 3832 -----
Granat-Amphibolit und selten Metagabbro
- 3836 -----
Granat-Hornblende-Gneis, titanithaltig
- 3846 -----
Biotit-Hornblende-Gneis, mit "Meso"- und "Anti"-Perthiten, grünen Biotiten und Titanit
- 3850 -----
Amphibolit, teilweise granatführend, epidot- und chloritreich, Epidot-Klüfte
- 3880 -----
Biotit-Hornblende-Gneis, granatführend, selten Epidot
- 3894 -----
Granat-Amphibolit
- 3896 -----
Hornblende-Biotit-Gneis
- 3899 -----
Granat-Amphibolit, lokal epidot- und prehnitreich
- 3910 -----
Hornblende-Gneis, mit blau-grünen Hornblenden
- 3912 -----
Granat-Amphibolit und Granat-Hornblende-Gneis
- 3916 -----
Amphibolit und Hornblende-Gneis
- 3924 -----
Amphibolit
- 3926 -----
Granat-Hornblende-Biotite-Gneis
- 3928 -----
Granat-Amphibolit
- 3932 -----
Amphibolit mit wechselnden Granat-Gehalten, epidot- und titanitführend, bei 3950 m kataklastischer Epidot-Quarz-Feldspat-Gang
- 3952 -----
Granat-Amphibolit
- 3956 -----
Amphibolit, epidotführend
- 3968 -----
Granat-Amphibolit, selten Metagabbro
- 3974 -----
Amphibolit und Granat-Amphibolit
- 3982 -----
Amphibolit und Hornblende-Gneis
- 3989 -----
feinkörniger epidotreicher Gneis mit vollständig chloritisierten Biotiten und Hornblenden im Wechsel mit feinkörnigem Amphibolit, bei 3996 m magmatischer quarz- und plagioklasreicher Gang mit Chlorit und Epidot
- 3998 -----
alterierter Hornblende-Gneis bis Amphibolit, epidotführend, bei 3999 m gleichartiger Gang wie 3996 m, pyritreich
- 4000.1 ----- Endteufe Vb 1b

C. Geochemie

KTB Oberpfalz VB –
Röntgenanalytik
Spülnungsanalytik
Gasanalytik

H.-J. Heinschild
A. Stroh
M. Tapfer
M. Wittenbecher



KTB Report	90-2	C1-C64	27 Abb.	Hannover 1990
------------	------	--------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor - Teufenbereich von 3500 bis 4000.1 m:

C.Geochemie

H.-J. Heinschild, A.Stroh, M. Tapfer und M. Wittenbecher *)

Inhaltsverzeichnis:	Seite
Zusammenfassung.....	C 2
Abstract.....	C 3
C.1 Einleitung.....	C 4
C.2 Probenahme und Probenaufbereitung.....	C 5
C.3 RFA/RDA-Analytik.....	C 5
C.3.1 Allgemeines.....	C 5
C.3.2 Ergebnisse an Bohrmehlproben	C 6
C.3.3 Bestimmung der Gesteinsdichte mit RDA.....	C 18
C.4 Spülungsanalytik.....	C 21
C.4.1 Allgemeines.....	C 21
C.4.2 Ergebnisse und Diskussion.....	C 21
C.4.3 Fluid Sampler.....	C 22
C.5 Gasanalytik.....	C 26
C.5.1 Allgemeines.....	C 26
C.5.2 Ergebnisse	C 26
C.5.2.1 Kontinuierliche Gasanalytik.....	C 26
C.5.2.2 Esterzusatz - Methanquelle !	C 35
C.5.2.3 Bohrlochzirkulationen.....	C 36
C.5.3 Fluid Sampler.....	C 39
C.6 Vergleich der Ergebnisse von VB 1a und VB 1b...	C 41
C.7 Schriftenverzeichnis.....	C 45
C.8 Danksagung.....	C 46
C.9 Anhang.....	C 47
Tiefenlogs aller Ergebnisse (1:1000)	
Zusammenstellung sämtlicher Spülungseinleitungen	

*) Anschrift der Autoren:
KTB Feldlabor
8486 Windischeschenbach

Zusammenfassung

In diesem Arbeitsbericht werden die Ergebnisse der chemisch/mineralogischen Bohrungsbearbeitung des Bohrungsabschnittes 3500 bis Endteufe bei 4000.1 m zusammengefaßt. Dieser Abschnitt gliedert sich in zwei Strecken: 1. den letzten Abschnitt der Bohrung VB1a (3500-3893 m) und 2. die Ablenkbohrung VB1b (3766.9-4000.1m).

In der Bohrung VB1a können anhand der Analysen von Bohrmehlproben im Bereich 3500- 3574 m unterschiedliche Gneistypen registriert werden sowie im Bereich 3574-3893 m eine Mafiteinheit i.w.S., die aus Amphiboliten, Granat-Amphiboliten, Ultramafititen, Gabbros und zwischengelagerten geringermächtigen Hornblendegneisen besteht.

Bei der Ablenkbohrung VB1b konnten die ersten 33 m wegen einer bohrtechnisch verursachten Kontamination des Bohrmehls mit Quarzsand nur bedingt interpretiert werden. Von 3800m bis zur Endteufe der KTB Vorbohrung bei 4000.1 m läßt sich die durchteufte Strecke anhand der Bohrmehlproben jedoch untergliedern. Die weitaus häufigsten Gesteine sind Amphibolite und Granat-Amphibolite, die mit weniger mächtigen Hornblendegneisen und Biotitgneisen wechsellagern. Die Granat-Gehalte in den Amphiboliten erreichen Werte bis über 30 Gew.%.

Die Analyseergebnisse erlauben weiterhin die Abgrenzung mehrerer mächtiger epidotisierter Zonen, die stellenweise mit anormal hohen Spurenelementkonzentrationen von Y und Zr verbunden sind. Zum Teil zeigen sie erhöhte Klüftigkeiten, die vereinzelt mit Zuflüssen von Formationswässern korrespondieren. In der VB1b treten bei 3996 m erhöhte Thoriumkonzentrationen (> 30 ppm) auf.

Im Überlappungsbereich der Bohrungen VB1a und VB1b (3766.9-3893 m) ist die Lithologie annähernd gleich. In der VB1b wurden im Vergleich zur VB1a starke Anreicherungen in den Sr-, CaO-, P₂O₅- und Epidot-Gehalten im Bereich 3850-3880 m festgestellt.

Die Dichtewerte, die von jeder RDA Analyse berechnet werden, korrelieren gut mit den Dichtewerten geophysikalischer Meßmethoden. Die mittlere Dichte der Gneise schwankt um 2.74 g/cm³ und steigt in den Metabasiten auf > 3.20 g/cm³ an.

Mit den Ergebnissen der Spülungsanalytik können vier Zuflußhorizonte nachgewiesen werden. Im Teufenbereich 3817 m in der VB1a und der VB1b (offene Kluft in VB1a), in Teufe 3875 m nur in der VB1a. In der Bohrung VB1b wird zwischen 3980 und 4000.1 m der stärkste Zufluß in der gesamten VB detektiert. Chemisch können diese Wässer als Ca-Cl-reich charakterisiert werden.

Die kontinuierliche Gasanalytik zeigt in den Teufenbereichen 3817 m, 3860-3880 m sowie 3980-4000 m erhöhte Methan- und

Heliumgehalte. Im überlappenden Bereich von VB1a und VB1b treten diese Anreicherungen in den gleichen Teufenbereichen auf.

Während der KTB VB1b konnte erstmals ein kontaminationsfrei (ohne Atmosphären-Luft) arbeitendes Degassersystem unter Bohrbedingungen getestet werden.

Abstract

This eighth KTB field laboratory report presents preliminary results of the geoscientific investigations on drilling site of the pilot well KTB Oberpfalz VB from 3500- 4000 m. Because of the rupture of a drill pipe male connection at 3893m depth a whip stock was installed at 3766 m depth. Therefore the intersected section is separated into two parts:

- 1: the end of KTB VB1a 3500- 3893 m depth
- 2: the side tracking operation KTB VB1b from the kick off point at 3766 m depth down to the end of pilot well KTB VB at 4000.1 m depth

From the results of the chemical and mineralogical analysis of rock flour material it is possible to differentiate various kinds of paragneises in the upper section from 3500 - 3574 m. The deeper part from 3574 m - 3893 m final depth of the pilot well VB1a exists mainly of metamafic rocks, which could be classified as amphibolites, garnet-rich amphibolites and metagabbros. Small domains of hornblende bearing gneisses are sometimes intercalated below 3574 m.

The first 33 meters of the side-tracking operation (VB1b) are extremely contaminated with quartz-sand. Therefore a classification of the intersected rocks based on mineralogical and chemical data is not possible in this section. From 3800 to the final depth 4000,1 m for the pilot well, the dominant rock types are amphibolites and garnet-rich amphibolites partly with garnet contents over 30 wt.%. Locally occur small layers of hornblende gneisses.

Epidotisation of the amphibolites is common, partly coupled with anormal high concentrations of trace elements (Sr, Y, Zr) and a higher number of joints or fractures together with an influx of saline formation waters. At 3996 m depth a Th-anomalie of over 30 ppm was detected.

Both wells, VB1a and VB1b show nearly identically lithologies in the overlap-range of 126.1 m (3776,9 - 3893 m) . Strong differences are found between 3850 m and 3880 m. Hole VB1b shows huge enrichments in Sr, CaO, and epidote contents.

Densities, calculated from mineral composition, show a good agreement with the values obtained by physical methods (e.g. buoyancy method). The mean densities of the drilled rocks are 2,74 g/cm³ and 2,96 g/cm³ for gneisses and amphibolites, respectively. In garnet rich amphibolites the highest values were observed, reaching up to 3,20 g/cm³.

The analysis of the drilling fluid reveals four horizons with influx of formation waters, at 3817 m in both wells VB1a and VB1b (open fissure) and at 3875 m only in well VB1a. In the bottom area of well VB1b (3980 - 4000,1 m) the strongest influx of formation waters during the total pilot hole VB1 was observed. Chemical analysis proved these waters to be Ca-Cl-rich.

The continuous analysis of the liberated gases from the drilling mud shows enrichments of methane and helium at 3817 m, 3860 - 3880 m, and 3980 - 4000,1 m. In the overlapping section of well VB1a and VB1b the increase of the methane and helium contents are mainly observed in hole VB1a.

During the side tracking operation VB1b, a degasser-system working without air contamination could be tested for the first time.

C.1 Einleitung

In diesem Teil des achten Arbeitsberichtes werden die Ergebnisse der chemisch/mineralogischen Bearbeitung des Teufenbereichs 3500 m bis 4000.1 m vorgestellt und diskutiert. Der Bohrungsabschnitt läßt sich in zwei Strecken gliedern:

1. in den letzten Abschnitt der Bohrung VB1a 3500- 3893 m und
2. in eine zweite Ablenk/Richtbohrung VB1b 3766.9- 4000.1 m, was gleichzeitig die Endteufe der KTB Vorbohrung VB darstellt.

Für die Charakterisierung der Feststoffe wurden kontinuierlich Bohrmehlproben im Abstand von 2 m auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung analysiert. Während der gesamten kernlosen VB1b wurde der Analysenabstand auf 1 m verringert. Mit den Analyseergebnissen des Bohrkleins wurde ein vorläufiges Litho-Profil erarbeitet und dem Kernprofil gegenübergestellt. Die chemisch/mineralogische Zusammensetzung ausgewählter Kernstücke ist im Teil B.(Geologie) dieses Arbeitsberichtes zusammen mit den Ergebnissen der petrographischen Bearbeitung dargestellt.

Die während des Bohrens verwendete Bohrspülung wurde kontinuierlich chemisch analysiert. Die Beprobungsdichte der Kat-

ionenanalysen beträgt 2 m, die der Anionenanalysen 4 m.

Gelöste Gase wurden mit einer Gasfalle aus der Bohrspülung freigesetzt und on line auf ihre Komponenten untersucht.

Fluidträchtige Horizonte wurden mit Fluid-Samplern beprobt und die Proben auf ihre Kationen-, Anionen- und Gasgehalte analysiert.

C.2 Probennahme und Probenaufbereitung

Probennahme und Probenaufbereitung entsprechen den Verfahren, die im KTB Feldlabor erarbeitet und in Heinschild et al. (1988 a), Heinschild et al. (1988 b), Stroh et al. (1988), Homann et al. (1988) sowie bei Tapfer & Stroh (1988) beschrieben wurden.

C.3 RFA/RDA-Analytik

C.3.1 Allgemeines

Die Bestimmung der Haupt- und Spurenbestandteile der Bohrmehlproben erfolgt mittels RFA. Die Bestimmung des quantitativen Mineralbestandes wird röntgendiffraktometrisch (RDA) an denselben Proben durchgeführt.

Da die Vorbohrung des KTB Projektes zum weitaus größten Teil gekehrt wurde, bestand hier die Möglichkeit Ergebnisse von Bohrmehlproben und Kernproben aus gleichen Teufen miteinander zu vergleichen. Das an den Kernen erarbeitete geologische Profil dient als Referenz für ein aus RFA/RDA Daten von Bohrmehlproben erarbeitetes Litho-Log. Diese Untersuchungen werden im Hinblick auf die überwiegend ungekehrte Hauptbohrung des Projektes durchgeführt.

Die Ergebnisse aller untersuchten Bohrmehlproben aus dem beschriebenen Bohrabschnitt sind in Teufenlogs im Anhang dargestellt (Anhang C.9.1 und C.9.2). Neben diesen chemisch/mineralogischen Ergebnissen ist zum Vergleich das geologische Übersichtsprofil abgebildet.

C.3.2 Ergebnisse von Bohrmehlproben

Bohrstrecke 3500-3893m (VB1a)

Die durchteufte Strecke läßt sich anhand der Ergebnisse der RFA/RDA-Analysen von Bohrmehlproben in unterschiedliche Gesteinseinheiten gliedern (vergl. Anhang C.9.1 und C.9.2, Abb.C.3.1).

Die Konzentration von SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Sr und Rb erlauben die eindeutige Ansprache einer Gneissequenz im Hangenden und einer Mafiteinheit i.w.S im Liegenden, wobei der Übergang bei Teufe 3574 m liegt. Die Gneiseinheit ist gekennzeichnet durch SiO_2 -Gehalte zwischen 60 und 69 Gew.%, TiO_2 -Gehalte zwischen 0.5 und 1 Gew.%, MgO -Gehalten um 2 Gew.%, CaO - Gehalten um 1.5 Gew.% und Rb - Gehalten > 60 ppm. Davon läßt sich die Mafiteinheit durch geringere SiO_2 - (50 Gew.%), K_2O - (< 1 Gew.%) und Rb -Konzentrationen sowie durch höhere MgO - (4 - 8 Gew.%), CaO - (5 - 8 Gew.%), und Sr - (> 200 ppm) Gehalte unterscheiden (Abb.C.3.1).

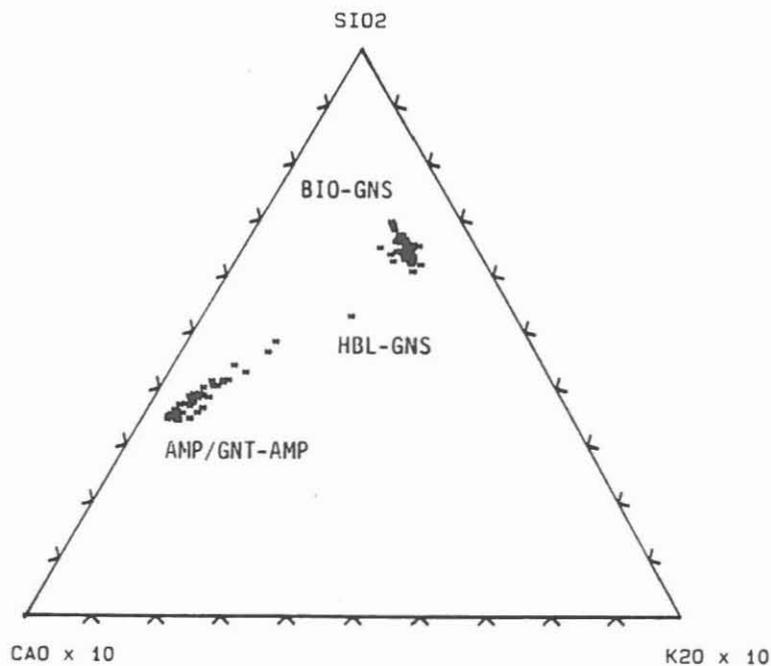


Abb. C.3.1: SiO_2 - CaO - K_2O -Diagramm zur vorläufigen Unterscheidung der Gesteinstypen

Die Konzentrationen der oben genannten Oxide und Elemente sowie die Gehalte der gesteinsbildend wichtigen Mineralphasen variieren innerhalb der Gneis- respektive der Metamafit-Einheit deutlich. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die beiden Bereiche jeweils weiter zu gliedern. Dafür werden die relativen Konzentrationsänderungen innerhalb der jeweiligen Haupteinheit verwendet (Tab.C.3.1). Es können dabei im wesentlichen folgende Gesteinstypen unterschieden werden:

- 1) Biotit- Gneise
- 2) Amphibolite
- 3) Granat- Amphibolite (z.T. > 30 Gew.% Granat)
- 4) Epidot- Amphibolite (z.T. > 50 Gew.% Epidot)
- 5) Meta- Gabbros (meist MgO- reicher als Amphibolite)
- 6) Bio- Hbl- Gneise
- 7) Meta- Aplite (?)

Die jeweilige Veränderung der einzelnen zur Charakterisierung verwendeten Parameter ist für die verschiedenen Gesteinstypen in Tab. C.3.1 zusammengefaßt. Die Tabelle berücksichtigt nicht die lokale Mächtigkeit der Gesteinspakete, sondern zeigt nur relativiert welche charakteristischen Parameter zunehmen bzw. abnehmen.

In Abb.C.3.3 ist das lithologische Bohrmehlprofil der VB1a im Vergleich zum geologischen Kernprofil dargestellt.

Stellenweise wurden hohe Gehalte an TiO_2 , MnO und Yttrium gemessen die sich recht gut mit den Granatgehalten der Mafite korrelieren lassen (Abb.C.3.2).

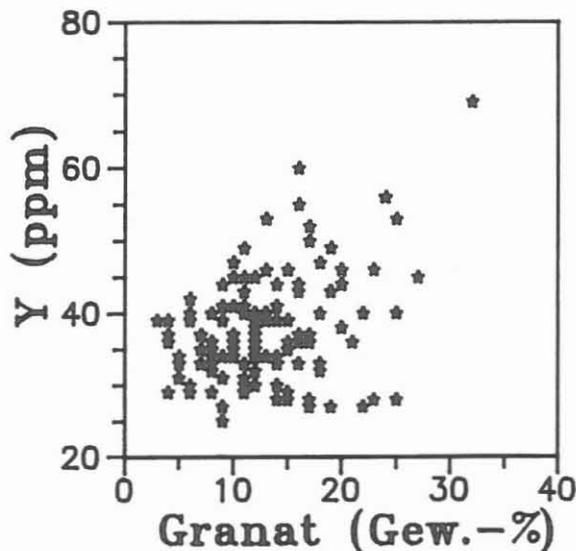


Abb.C.3.2: Korrelation der Yttrium- und Granatgehalte in der VB1a 3500-3893 m

LITHOLOG VB1a

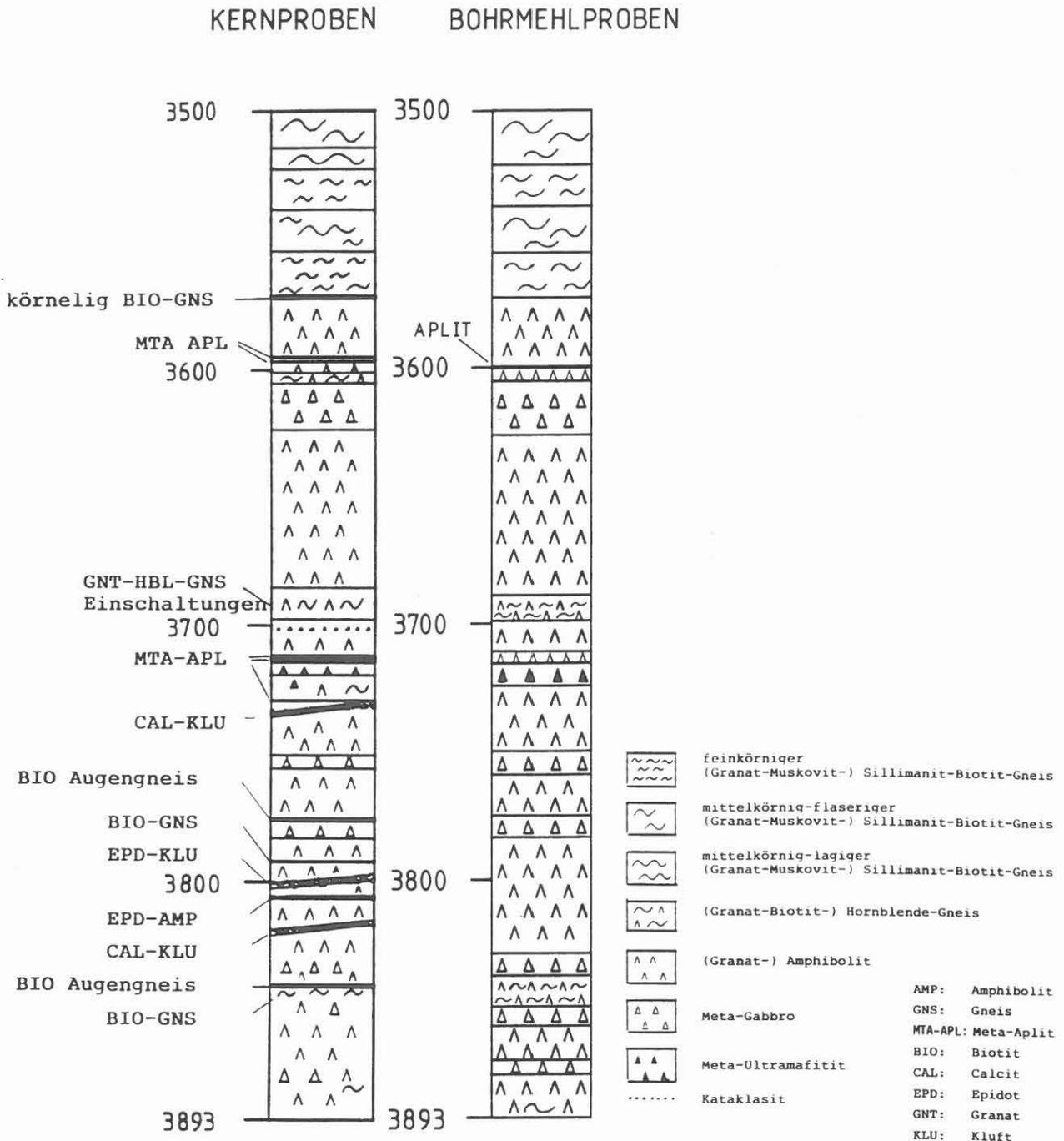


Abb.C.3.3: Lithologisches (Kern-) Profil VB1a im Vergleich mit dem Profil, das aus den Ergebnissen der RDA/RFA-Bohrmehlanalysen erstellt wurde.

Die ab 3814m extrem erhöhten Ni-Werte (> 500 ppm) sind auf eine Kontamination durch den Bohrbetrieb zurückzuführen. In Teufe 3813.9 war die Matrix einer Bohrkronen im Loch verblieben und mußte zerfräst werden. Ni und Cr zeigen danach erhöhte (kontaminierte) Werte bis zum Festwerden des Bohrstranges bei 3893m und können daher nicht zur geochemischen Charakterisierung des Bohrmehls verwendet werden. Gleiches gilt mit Einschränkungen für die Fe₂O₃-Werte.

Bohrstrecke 3766.9-4000.1m (VB1b)

Nachdem der Bohrstrang in der VB1a bei 3893m fest wurde, mußten für den Beginn der VB1b Fang- und Ablenkarbeiten durchgeführt werden. Der detaillierte Verlauf der Arbeiten ist in den Tagesberichten dokumentiert. Mit whip-stock-Technik wurde der Bohrstrang bei 3766.9m (kick-off-point) aus der VB1a abgelenkt und die VB1b als Meißelstrecke bis 4000.1m niedergebracht. Der Bereich von 3766.9- 3800 m ist erheblich (bis max. 60 Gew.%) durch Quarzsand kontaminiert. Dieser Sand stammt vom Einsatz eines Hydro- jet- Sandstrahlers, mit dem der verkeilte Bohrstrang der VB1a gekappt wurde (vgl. Anhang C.9.1, C.9.2, Abb.C.3.5). Wird auf den QRZ- Gehalt unterhalb 3800 m normiert, entspricht die mineralogische Zusammensetzung einem schwach alterierten granatführenden Amphibolit.

Die am häufigsten vertretenen Gesteine der KTB VB1b sind:

- 1) Amphibolite (granatführend) und
- 2) Granat- Amphibolite,

in die in den Teufenbereichen 3836- 3852 m, 3878- 3885 m, 3895- 3900 m und 3984- 3991 m, Bio-Hbl- Gneise eingeschaltet sind.

Die chemischen Daten der Amphibolite und Granat- Amphibolite betragen: SiO₂ 48 - 53 Gew.%, MgO 6 - 8.5 Gew.%, CaO 7 - 12.5 Gew.% und K₂O fast durchweg < 1 Gew.%. In den Bio-Hbl- Gneisen nehmen dagegen SiO₂ und Alkalien zu, die mafischen Komponenten ab. Mineralogisch unterscheiden sich diese Typen durch Qrz-, Amph- und Gnt- Gehalte. Die Spurenelementdaten von Yttrium (30-65 ppm), Zirkonium (200-450 ppm) und vor allem Strontium (200-1250 ppm) sowie die Gehalte der Hauptbestandteile CaO (8-12 Gew.-%), Na₂O (3-4.5 Gew.-%) und vor allem P₂O₅ (0.2- >1.2 Gew.-%) variieren extrem, vor allem in epidotisierten Bereichen. Stellenweise konnte auch Kalifeldspat nachgewiesen werden.

Im Teufenbereich 3848- 3878 m wurden häufig epidot- und chloritreiche Partien angetroffen. Das Mineral Epidot konnte bis über 50 Gew.% nachgewiesen werden, wobei es sich anscheinend z.T. auf Kosten der Amphibole bildet (Abb.C.3.4). In einer Tiefe von 3936- 3964 m tritt ebenfalls verbreitet Epidot auf. Epidot und Granat kommen alternierend vor. Im Dünnschliff

konnten Pseudomorphosen von Chlorit und Epidot nach Granat beobachtet werden.

Die jeweilige Veränderung der einzelnen zur Charakterisierung verwendeten Parameter ist für die verschiedenen Gesteinstypen in Tab.C.3.2 zusammengefaßt.

Tab.C.3.2: Variationen des stofflichen Bestandes von Bohrmehlproben in der KTB VB1b 3766-4000 m.

Bohrmehlproben - chemisch/mineralogische Parameter										
Teufenbereich	MgO	CaO	K ₂ O	Rb	Sr	QRZ	HGL	BIO	CHL	AMPH
3800m- 3818m alt.BIO-führ. GNT-AMPH	█	█	█	█	█	█		█	█	█
3818m- 3836m AMPH (GNT nicht nachweisbar)	█	█	█	█	█	█		█	█	█
3836m- 3852m BIO-HBL-GNS	█	█	█	█	█	█		█	█	█
3852m- 3860m Amphibolit EPD- führend	█	█	█	█	█	█			█	█
3860m- 3878m EPD-AMPH (50Gew.% EPD)	█	█	█	█	█				█	█
3878m- 3885m BIO-HBL-GNS	█	█	█	█	█	█		█		█
3885m- 3895m Granat- Amphibolit	█	█	█	█	█	█				█
3895m- 3900m BIO-HBL-GNS	█	█	█	█	█	█		█	█	█
3900m- 3936m Granat- Amphibolit	█	█	█	█	█	█				█

Tab.C.3.2: Fortsetzung

Bohrmehlproben - chemisch/mineralogische Parameter										
Teufenbereich	MgO	CaO	K ₂ O	Rb	Sr	QRZ	HGL	BIO	CHL	AMPH
3936m- 3964m EPD-AMPH EPD- reich	■	■	■	■	■	■			■	■
3964m- 3984m Granat- Amphibolit	■	■	■	■	■	■			■	■
3984m- 3991m CHL-HBL-GNS	■	■	■	■	■	■			■	■
3991m-4000.1m EPD-AMPH EPD- reich	■	■	■	■	■	■			■	■

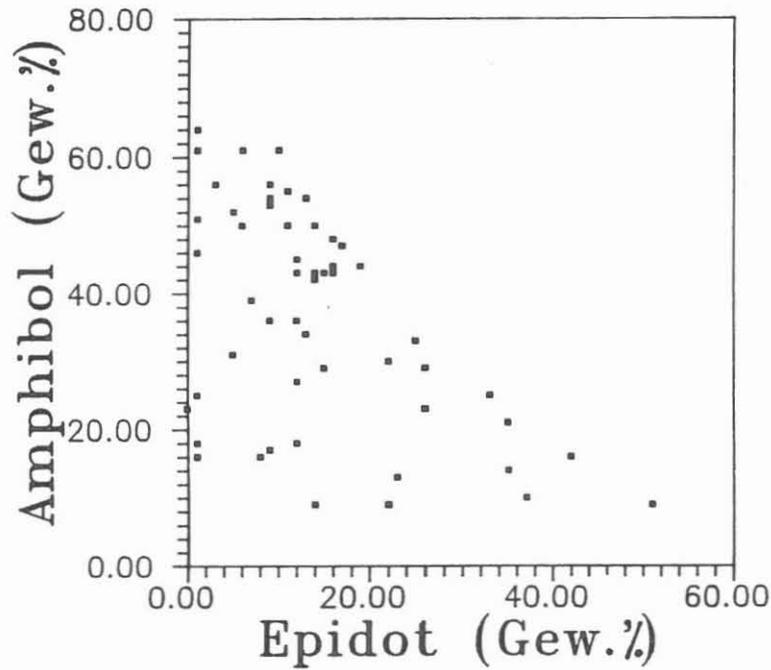


Abb.C.3.4: Epidot- und Amphibolgehalte von Bohrmehlproben in der KTB VB1b 3840-4000 m

Das lithologische Bohrmehlprofil ist zusammen mit dem geologischen Cuttingsprofil in Abb.C.3.5 verglichen.

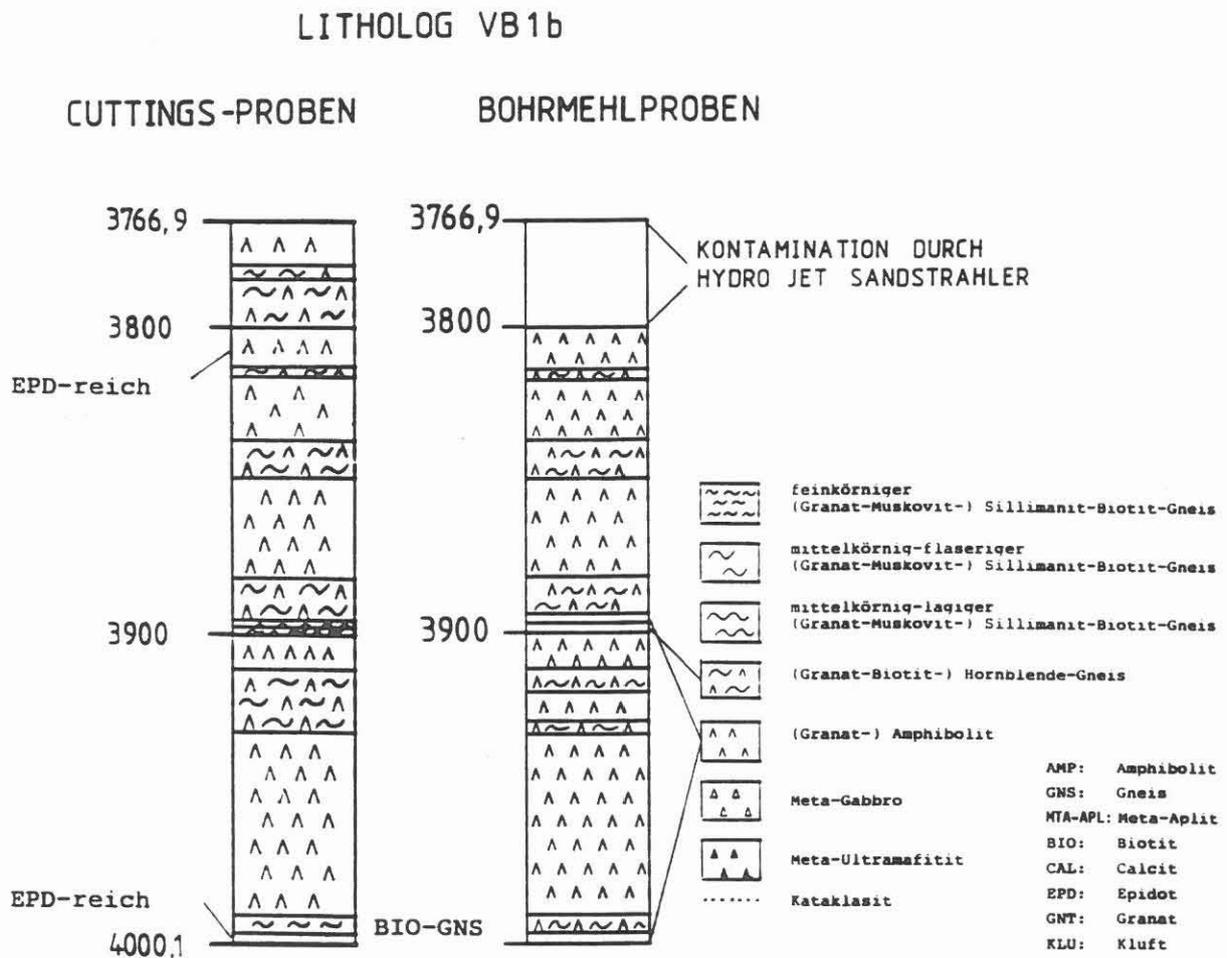


Abb.C.3.5: Lithologisches (Cuttings-) Profil VB1b, im Vergleich mit dem Profil, das aus den Ergebnissen der RDA/RFA-Bohrmehluntersuchungen abgeleitet wurde.

Die extrem erhöhten Sr- Werte sind an die hohe Epidotführung gebunden. Der Ionenradius des Sr läßt in diesem Zusammenhang eine Substitution für Ca erwarten (SHANNON 1976). Eine Möglichkeit Epidot (Ca-Mineral) in den gemessenen Konzentrationen zu bilden, ist 1. Saussuritisierung (Zerfall der Anorthit-Komponente der Plagioklase) und 2. die autopneumatolytische bis autohydrothermale Bildung auf Klüften und in Hohlräumen. Es wurde zwar keine wesentliche Veränderung der PLG-Gehalte gemessen, da aber die primären PLG-Gehalte dieser Gesteine nicht bekannt sind, kann eine Saussuritisierung hier nicht ausgeschlossen werden. Wie in Abb.C.3.4 dargestellt ist, bildet sich Epidot auch auf Kosten der Amphibole.

Unmittelbar unterhalb der Bereiche der Epidotisierung tritt eine Zr- und Y-Anreicherung auf (Abb.C.3.6). Die Y- und Zr-Konzentrationen erreichen hier die höchsten Werte in der gesamten VB1b (60 ppm bzw. 400 ppm). Die Konzentrationen der Mineralphasen Amphibol sowie Chlorit gehen hier zurück, z.T. bis unter die Nachweisgrenze.

Im Intervall von 3996m bis zur Endteufe der VB1b bei 4000.1m kommen erneut stark erhöhte Zr-, Y- und Sr- Werte in Verbindung mit Epidotgehalten bis 20 Gew.-% vor, (Zr >400 ppm, Y >60 ppm, Sr >400 ppm, vergl. Abb.C.3.6).

Aus dem KTB-Umfeld ist bekannt, daß das Vorkommen epidotisierteter Gängchen und Klüfte mit der Annäherung an die Marginalbereiche von Granitintrusionen zunimmt und mit wachsendem Abstand von den Kontaktbereichen gänzlich verschwindet (z.B. Aufschluß Steinbruch Rupprecht, frdl. pers. Mittl. G. Zulauf). Die Epidotisierung in der KTB Vorbohrung könnte also ebenfalls durch die benachbarten Granitstöcke initiiert worden sein.

Die Konzentrationen von Th, gemessen an Bohrmehlproben, der VB1b sind in Abb.C.3.7 dargestellt. Die Gehalte liegen überwiegend im Bereich < 5 ppm. Ab 3985 m sind diese Werte jedoch auffällig erhöht. Thorium zeigt um Teufe 3997 m ein Maximum von 30 ppm, bei einem Th/U- Verhältnis zwischen 10 und 13.5. Dies ist für gewöhnliche Metamorphite sehr hoch. Nach WEDEPOHL 1969 erreichen lediglich Biotit-Hornblende-Gneise (Schwarzwald) mit Th-Werten von 27 ppm und Th/U-Verhältnissen von 13.5 ähnliche Konzentrationen. Die Zusammensetzung einer Schwermineralfraktion (Fraktion > 3.34 g/ccm), die aus einer Cuttingsprobe aus 3996.5 m gewonnen wurde, ist in Tab. C.3.3 dargestellt. Die Th-Gehalte sind möglicherweise an Epidot gebunden, da dieses Mineral von WEDEPOHL (1969) nach Monazit als Hauptthoriumträger in Frage kommt.

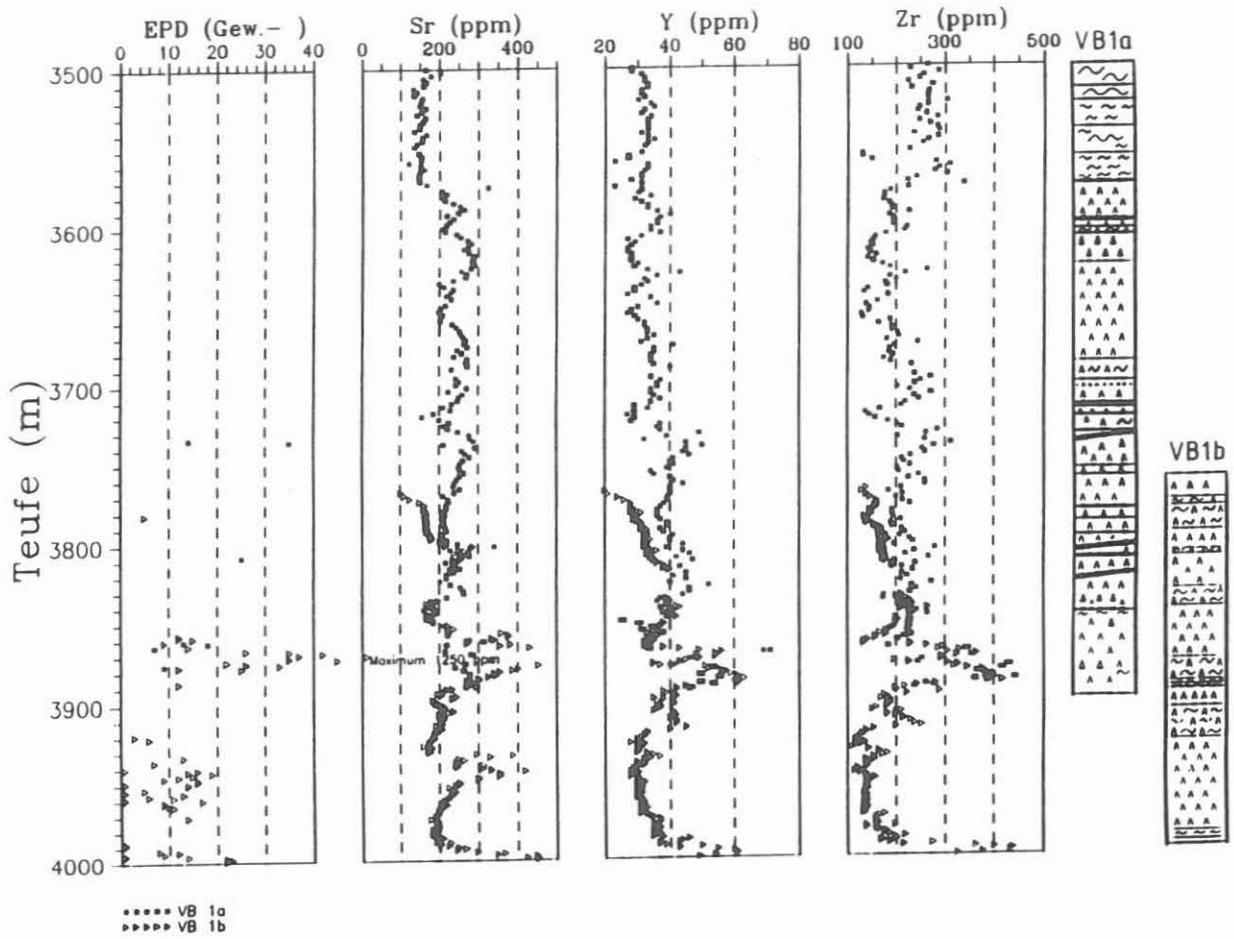


Abb.C.3.6: Mineral- und Elementverteilung in epidotisierten ? Bereichen der VB1b.

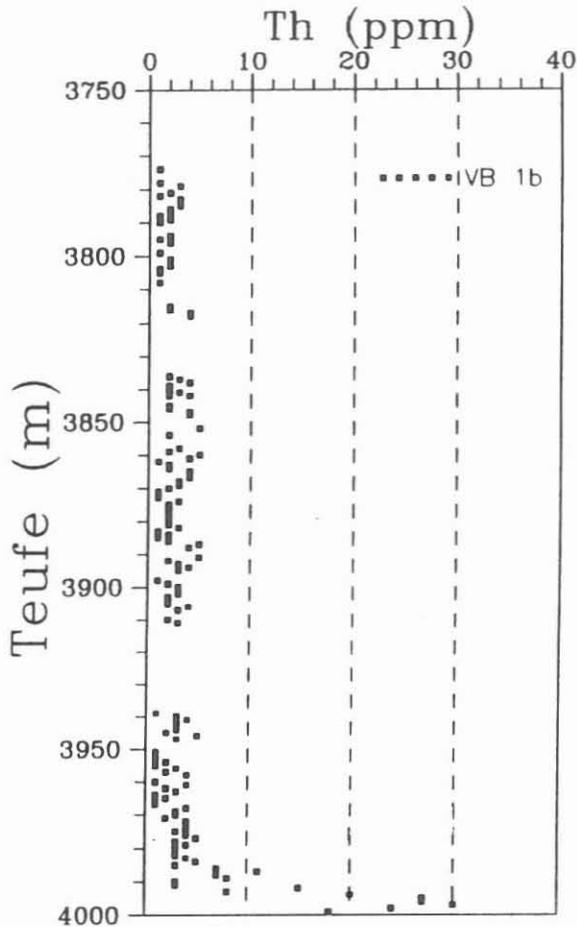


Abb.C.3.7: Thoriumkonzentrationen in der VB1b.

An Cuttingsproben aus den Teufen 3887 m und 3890 m wurden ebenfalls Schwerminerale separiert und mit der RDA analysiert, um Erkenntnisse über die mineralspezifische Spurenelementverteilung von Zr und Y zu erhalten. Das Element Y ist im Granat angereichert. Da kein Zirkon nachgewiesen wurde muß Zirkonium in anderen Schwermineralen eingebaut worden sein. Als Zirkoniumträger in den Metamafiten kommt in Abwesenheit von Sphen überwiegend Rutil in Frage, mit durchschnittlichen Zirkoniumgehalten von 0.48 Gew.% (vergl. WEDEPOHL 1969). Die Ergebnisse der RDA-Analysen sind in der Tab.C.3.3 zusammengefaßt.

Tab.C.3.3: RDA Analysen der Schwermineralfraktion von Cuttingsproben, Fraktion > 3.34 g/ccm, alle Ergebnisse in Gew.-%

Teufe	3887 m	3890 m	3996.5 m
Granat	26	34	19
Amphibol	25	40	19
Epidot	39	21	45
Biotit	6	-	-
Chlorit	5	5	12

C.3.3 Bestimmung der Gesteinsdichte mit RDA

Die im Feldlabor angewendete Methode der Gesteinsdichtebestimmung mit RDA ist bei HOMANN et al. (1988) beschrieben.

In Abb.C.3.8 und Abb.C.3.9 sind die Dichtedaten von Cuttings, Kernen und Bohrmehlproben in Abhängigkeit von der Teufe dargestellt. Am rechten Rand dieser Abbildungen sind die Profile der VB1a und der VB1b abgebildet. Die lithologischen Grenzen wurden dabei anhand der RDA/RFA Ergebnisse von Bohrmehluntersuchungen festgelegt. In Abb.C.3.9 sind die Ergebnisse der RDA Dichtebestimmung (XRHO) von Bohrmehl aus VB1a und VB1b sowie RDA Dichtebestimmungen von Kernen abgebildet. Die Abbildung C.3.8 zeigt die Ergebnisse der RDA Dichtebestimmung von Bohrmehlproben (Z-Proben) sowie die nach dem Archimedisches Prinzip und die mit einem Pyknometer bestimmten Dichten von Kernen bzw. Cuttings (siehe Teil Geophysik D1. Dichte).

Die Gneise von 3500-3574 m heben sich mit Dichten von 2.68 bis >2.80 g/ccm (Mittel 2.74 g/ccm) deutlich von der im Liegenden folgenden Metamafit-Einheit mit Dichtewerten von 2.80 bis >3.20 g/ccm (Mittel 2.96 g/ccm) ab.

Zwischen 3574 und 4000m ist die Variabilität der gemessenen Dichtewerte groß. Die größten Dichtewerte werden im Bereich 3870- 3890 m erreicht, in dem Granat-Amphibolite mit bis über 30 Gew.% Granat auftreten.

Die mit verschiedenen Methoden untersuchten Probenarten zeigen untereinander gut übereinstimmende Ergebnisse. Stark nach oben oder unten abweichende Kernstück-Dichten lassen sich geringmächtigen Gneis- oder Aplit-Einschaltungen (z.B. bei ca. 3600, 3700 m) zuordnen. Im Bohrklein sind solche Bereiche mit dem Nebengestein vermischt.

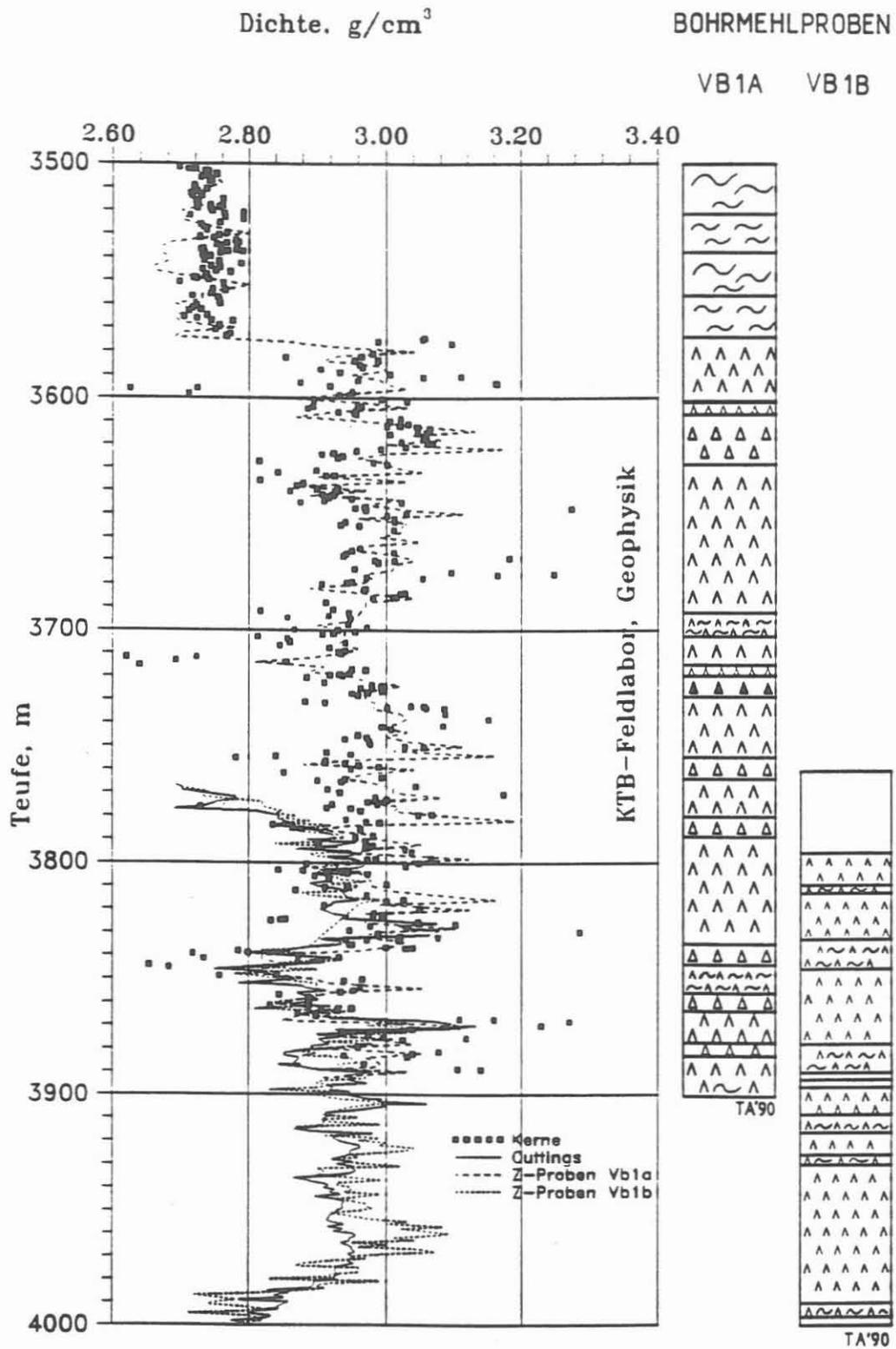
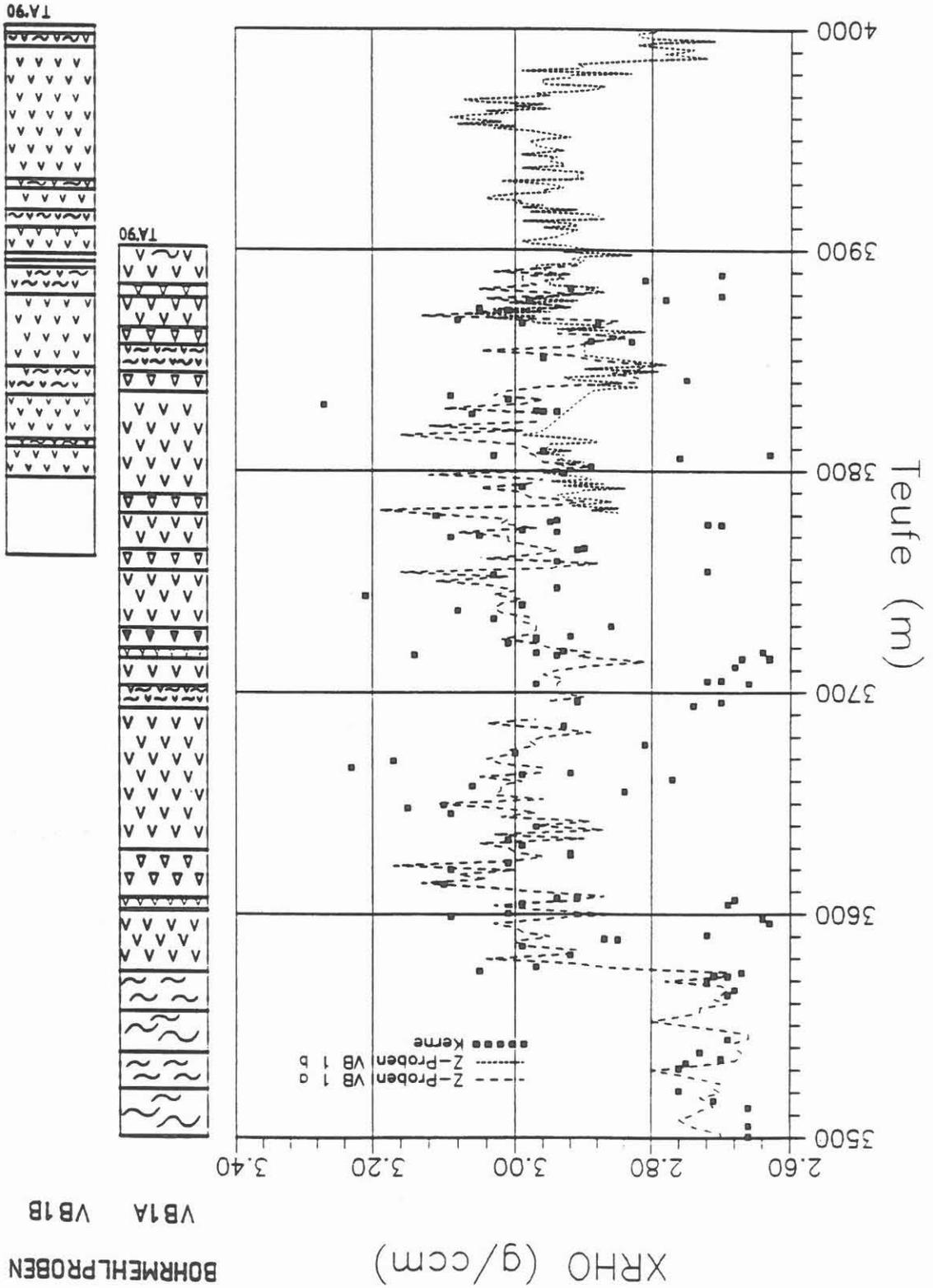


Abb.C.3.8: Ergebnisse der verschiedenen Dichtebestimmungsmethoden an unterschiedlichen Proben.

Abb.C.3.9: Ergebnisse der RDA-Dichtebestimmungen von Kernen und Bohrmehlproben.



C.4 Spülungsanalytik

C.4.1 Allgemeines

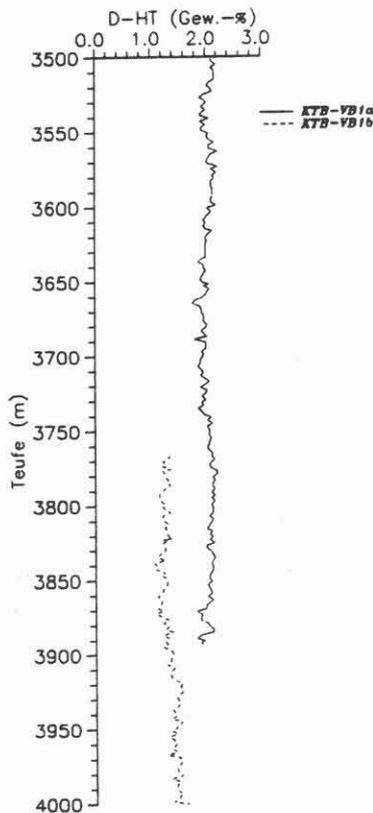
Im Teufenbereich 3500.0 - 4000.1 m wurde die Bohrspülung in Abständen von 2 bzw. 4 m auf ihre Gehalte an den Kationen Na, Ca, K, Li, Sr, Ba, Fe, Mg, Mn, Zn, Si und Al (ICP-AES) sowie den Anionen Cl^- und SO_4^{2-} (IC) untersucht.

Eine Liste der Spülungseinleitungen sowie die als Teufenlogs dargestellten Ergebnisse befinden sich im Anhang. An den Teufenlogs ist die aktuelle Bohrlochteufe zu Beginn der Spülungseinleitungen aufgetragen.

C.4.2 Ergebnisse und Diskussion

VB1a:

Der Li-Gehalt der in der VB 1a eingesetzten Bohrspülung variiert zwischen 55 und 65 ppm. Dies entspricht einem D-HT-Gehalt von ca. 1.8 - 2.2 Gew.-% (Abb.4.1). Gegenüber einer frischen Ansatzspülung gleicher D-HT-Konzentration zeigt die Bohrspülung bereits zu Beginn dieses Teufenabschnittes deutlich höhere Konzentrationen an Na, K, Sr, Ba, Fe und Mn. Bis auf Zusätze von NaOH wurden der Spülung keine weiteren Verbindungen der genannten Elemente zugesetzt, so daß deren Gehalte, mit Ausnahme des Na, im wesentlichen auf Austauschprozesse zwischen durchteuftem Gestein und Spülung zurückgeführt werden können.



Ab ca. 3810 m ist eine Zunahme an Na, Ca, Sr und Cl^- zu verzeichnen, deren Gehalte nach Erreichen eines Plateaus ab etwa 3870 m weiter zunehmen. Bei 3875 m wird ein Maximum von ca. 600 ppm Cl^- erreicht.

Abb.C.4.1: D-HT-Konzentration der Bohrspülung

Als mögliche Zuflußhorizonte salinärer Wässer zeigt der Kernbefund eine offene Calcit-Kluft bei ca. 3817 m sowie eine poröse, epidotisierte Zone bei ca. 3860 m.

VB1b:

Die eingesetzte Bohrspülung weist einen Variationsbereich im Li-Gehalt von 35 - 45 ppm entsprechend einem D-HT-Gehalt von 1.2 - 1.5 Gew.-% (siehe Abb.4.1) auf. Der Spülung wurden aus technischen Gründen zu Beginn der VB1b erstmals Wasserglas und Ester zugesetzt.

Die kontinuierliche Zunahme des Na-Gehaltes geht überwiegend auf NaOH-Zugaben zur pH-Wertsteuerung der Bohrspülung zurück. Eine Zunahme an Elementen, die als Indikatoren für saline Zuflüsse dienen, ist in der VB1b nur schwach ausgeprägt. So deuten sich nur anhand der Chlorid-Gehalte der Bohrspülung zwei Zuflußbereiche und zwar 3817 m und ca. 3990 m an. Nach Abschluß der Bohrung wurden bei Zirkulations-, Absenk- und Injektionstests sowie durch Bohrlochmessungen allerdings saline Zuflüsse im Bereich der Bohrlochsohle festgestellt.

C.4.3 Fluid Sampler

In Tabelle C.4.1 sind Ergebnisse von Fluid Sampleranalysen im Vergleich mit der Zusammensetzung der letzten aktuellen Spülungsprobe vor der Fluidprobennahme (Bezugsprobe) aufgeführt.

Die während des Bohrbetriebs zwischen dem 14.12.88 und 17.01.89 (Teufen siehe Tab.C.4.1) gewonnenen Proben zeigen nur geringe Anreicherungen an Ca, Sr und Cl⁻, wobei das letztgenannte Element den empfindlichsten Indikator darstellt. Demgegenüber zeigen die Proben vom 12.05.89 bis 17.05.89, also nach Abschluß der Bohrung und einem längeren Spülungsstillstand, aus den Teufen 3930 m, 3985 m sowie 3995 m, die nach einem Absenkttest genommen wurden, deutliche Anreicherungen an Na, Ca und Sr mit bis zu 3 Gew.-% Cl⁻. Die in Tab. C.4.2 dargestellten Extremwerte von Elementverhältnissen der zu charakterisierenden Fluide wurden nach der in WITTENBECHER et al. (1989) beschriebenen Methode berechnet. Die aus den Teufen 3930 m, 3985 m sowie 3995 m entnommenen Proben zeigen eine im Fehlerbereich identische Zusammensetzung bezüglich ihrer Na/Ca- und Ca/Sr-Verhältnisse.

Aufgrund von Leitfähigkeitsmessungen wurde am 01./02.06.89 ein Multifluidsampler eingesetzt, d.h. die Bohrspülung wurde in verschiedenen Teufen bei einer Sondeneinfahrt beprobt. Die Ergebnisse sind in Abb.C.4.2 dargestellt. Sie belegen einen deutlichen Anstieg der Na-, Ca-, Sr- und Cl⁻-Gehalte mit zunehmender Teufe. Dieser Effekt beruht auf der Vermischung zwischen dem aus dem Bohrlochsohlenbereich zutretenden Fluid und der im Bohrloch stehenden Bohrspülung.

Tabelle C.4.1.: Analysenergebnisse der Fluid Samplerproben im Vergleich zur letzten aktuellen Spülungszusammensetzung vor der Fluidprobennahme (Bezugsprobe). Alle Angaben in ppm.

Fluid Sampler	Teufe (m)	Na	Ca	K	Sr	Cl ⁻
Geocom 14.12.88	3567	730	140	110	1.6	150
Bezug 14.12.88	3624	760	120	130	1.1	66
Geocom 03.01.89	3736	950	320	120	2.9	260
Bezug 02.01.89	3803	880	160	100	1.1	55
Geocom 14.01.89	3801	1130	450	110	5.4	740
Bezug	3849	920	200	80	1.9	170
Geocom 17.01.89	3740	1000	300	90	3.2	410
	3799.5	970	200	80	2.0	240
	3817.2	970	210	80	2.0	230
Bezug	3849	920	200	80	1.9	170
Geocom 12.05.89	3985	6100	14700	210	240	31000
Geocom 13.05.89	3930	6000	13900	210	220	30000
Geocom 17.05.89	3995	5800	14100	200	230	33000
Geocom 17.05.89	3930	6100	14400	210	240	29000
Bezug		1400	150	70	1.3	200

Fluid Sampler	Teufe (m)	Na	Ca	K	Sr	Cl ⁻
Multifluid Sampler	3830	4200	7600	160	137	21000
MSST	3730	2400	1600	100	36	6100
01.06./02.06.89	3730	2400	1490	100	34	6400
	3700	2040	400	80	12	3400
	3675	1850	70	60	2.5	2600
	3650	1620	40	50	0.5	2000
	3625	1470	40	60	0.4	1400
	3600	1220	30	40	0.2	850
	3500	970	30	40	0.3	330
Bezug MSST	528	1060	60	50	0.8	230

Tab. C.4.2 : Elementverhältnisse

Fluid Sampler	Teufe (m)	Na/Ca	Ca/Sr
Geocom 12.05.89	3985	0.32 - 0.41	61
Geocom 13.05.89	3930	0.33 - 0.43	63
Geocom 17.05.89	3995	0.32 - 0.41	61
Geocom 17.05.89	3930	0.33 - 0.42	60

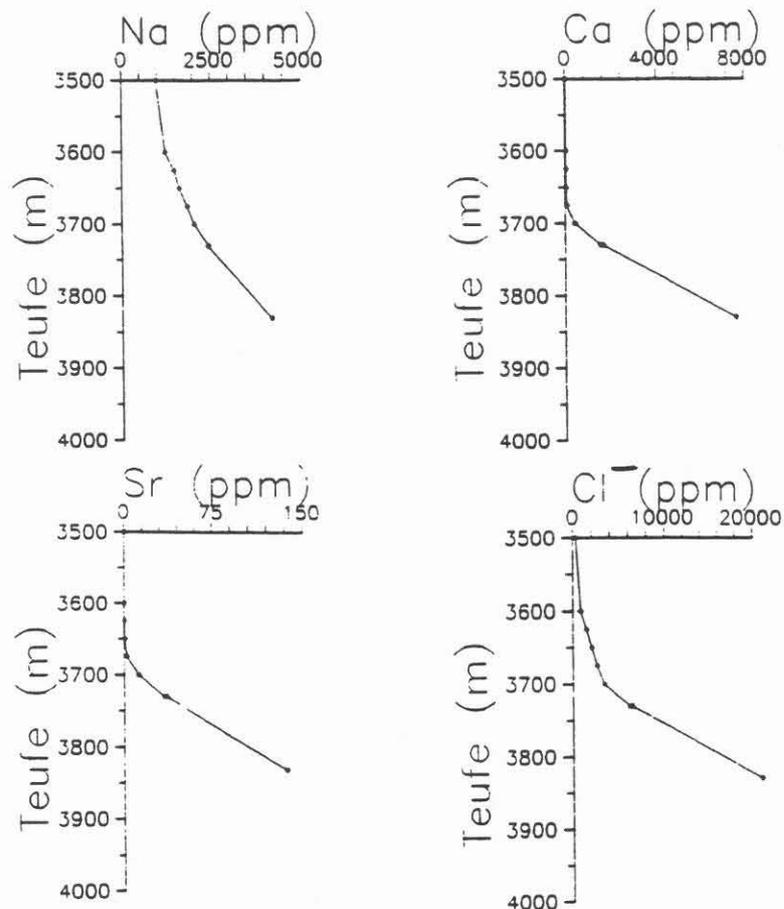


Abb.C.4.2.: Darstellung des beprobten "Salinitätsgradienten" beim Einsatz des Multifluid-Samplers vom 01. und 02.06.89 am Beispiel der Na-, Ca-, Sr- und Cl⁻-Gehalte im Teufenbereich von 3500 - 4000 m.

Zirkulation am 13.06.89

Bei der am 13.06.89 durchgeführten Zirkulation wurde die Spülung durch den Ringraum in das Bohrloch gepumpt, so daß sie durch das Gestänge wieder zu Tage trat ("linksherum" zirkulieren lassen). Die Ergebnisse sind in Abb C.4.3 gegen die Zeit aufgetragen, da eine Teufenzuordnung nur indirekt über das Bohrlochvolumen und die Pumprate möglich ist. Die Bohrspülung wurde am Auslauf zu konstanten Zeiten beprobt. Die Bohrspülungsproben von ca. 16³⁰ bis 16⁴⁵ zeigen deutliche Anreicherungen an Na, Ca, Sr und Cl⁻. Dieser Zeitabschnitt entspricht etwa der Endteufe von 4000.1 m (16³⁰) bis hoch zu 3800 m (16⁴⁵), womit die Anreicherungen an den genannten Elementen Zuflüssen in diesem Teufenbereich zugeordnet werden können, die bereits während der kontinuierlichen Spülungsanalytik in der VB 1a detektiert (dieser Bericht Seite C21) und mit Hilfe von Fluid Samplern in der VB1a und VB1b beprobt und charakterisiert werden konnten.

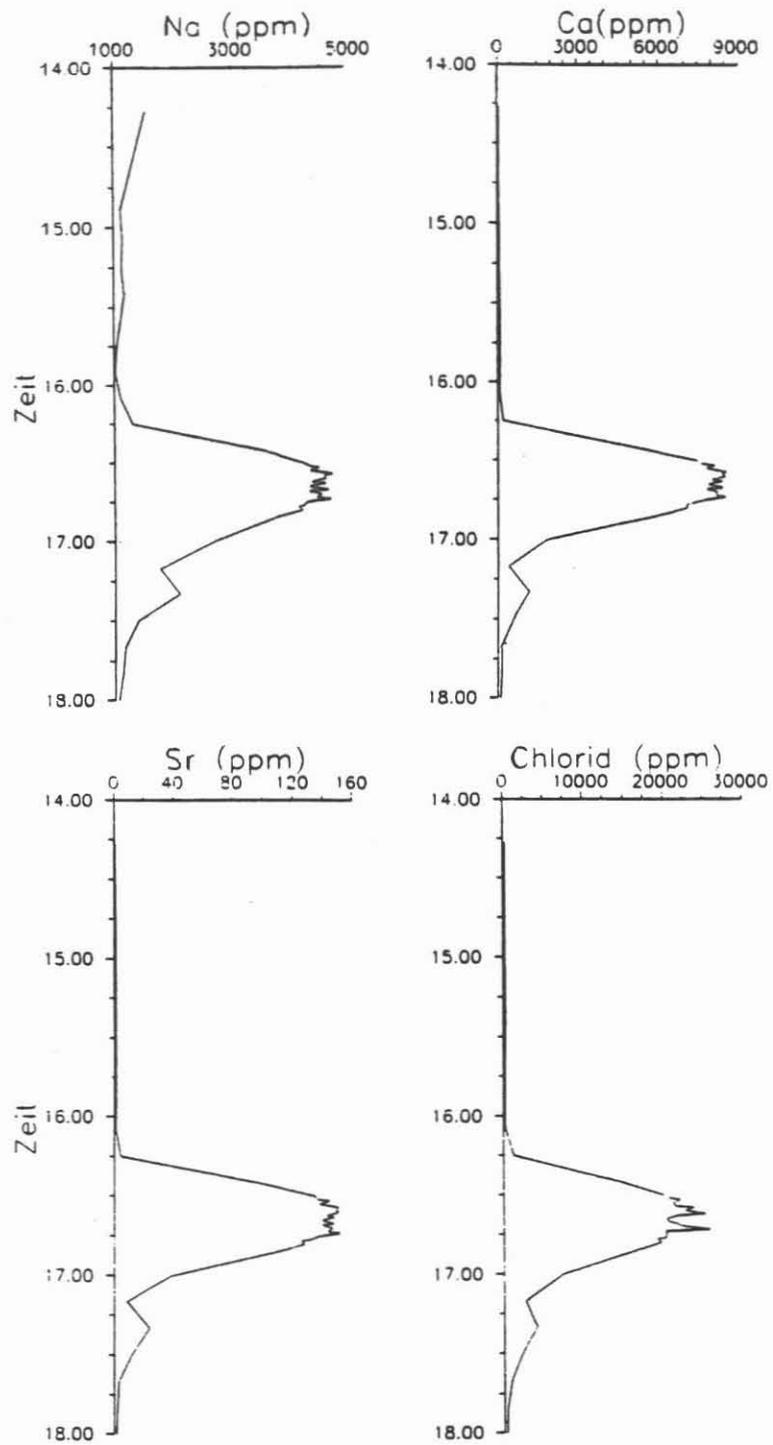


Abb. C.4.3: Ergebnisse der Zirkulation am 13.06.89

C.5. Gasanalytik

C.5.1 Allgemeines

Im Teufenbereich 3500 - 4000 m (KTB VB1a und VB1b) wurden die mit einem Quirlentgaser aus der Bohrspülung freigesetzten Gase kontinuierlich auf ihre Gehalte an Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Helium, Kohlendioxid, Methan sowie Wasserstoff massenspektrometrisch analysiert.

Für Übersichtslogs erfolgte eine Glättung der Meßwerte über ein 30 m langes Intervall.

In diesem Berichtszeitraum wurde ein kontaminationsfrei arbeitendes Bohrspülungs-Degassersystem der Firma NL-BAROID über mehrere Tage während des Bohrbetriebes (Rotary-Bohrverfahren) erprobt. Die Ergebnisse dieser Erprobungsphase sind unter Kapitel x. in diesem Report zusammengefaßt.

C.5.2. Ergebnisse

C.5.2.1 Kontinuierliche Gasanalytik

Im Teufenbereich der KTB VB1a (3500 - 3893 m) und der VB1b (3767 - 4000.1 m) lassen sich einzelne Zonen mit deutlich ausgeprägten Methan- bzw. Heliumanreicherungen (3800 - 3820 m, 3860 - 3880 m und 3980 - 4000 m) abgrenzen (siehe Abb. C.5.1 und C.5.2).

Die Methangehalte zeigen für die VB1a und die VB1b im Teufenbereich der Überschneidung einen identischen Kurvenverlauf. Die Methangehalte der VB1b sind in den Anreicherungs-zonen jedoch jeweils niedriger als die der VB1a. Die räumliche Nähe beider Bohrlöcher könnte die Ursache für diesen Unterschied sein. Es ist vorstellbar, daß der genannte Teufenbereich schon während des Durchteufens der VB1a zum Teil "entgast" ist.

In Abb. C.5.2 sind die Heliumgehalte der KTB-VB1a mit an Bohrkernen festgestellten offenen bzw. mineralisierten Klüften dargestellt. Zum Teil läßt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Auftreten von Klüften und der Anreicherung von Helium in der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase aufzeigen. Demnach stellen diese Klüfte die Wegsamkeiten für Helium in diesem Teufenbereich dar. Infolge der Helium-Methan-Korrelation muß diese Aussage auch für Methan gültig sein.

Die KTB VB1b wurde mit dem Rotary-Bohrverfahren bis zur Endteufe von 4000.1 m abgeteuft; dabei wurde nicht gekernt, so daß die oben aufgezeigte Abhängigkeit zwischen den Klüften und Helium für diesen Teufenbereich nicht überprüft werden kann. Anhand von Abb. C.5.2 ist ersichtlich, daß die Klüfte häufig mit Epidot mineralisiert sind. Für den Teufenbereich der KTB VB1b wurde daher versuchsweise als Kluftindikator der mit der RDA an Bohrmehlproben nachgewiesene Epidot gewählt.

Auffällig ist, daß wieder eine recht gute Übereinstimmung zwischen der Methan- bzw. Heliumanreicherung und dem Auftreten von Epidot besteht, so daß auch in der VB1b die Gaszutritte vorwiegend an epidotreiche (klüftige?) Zonen gebunden sind (vgl. Abb.C.5.3).

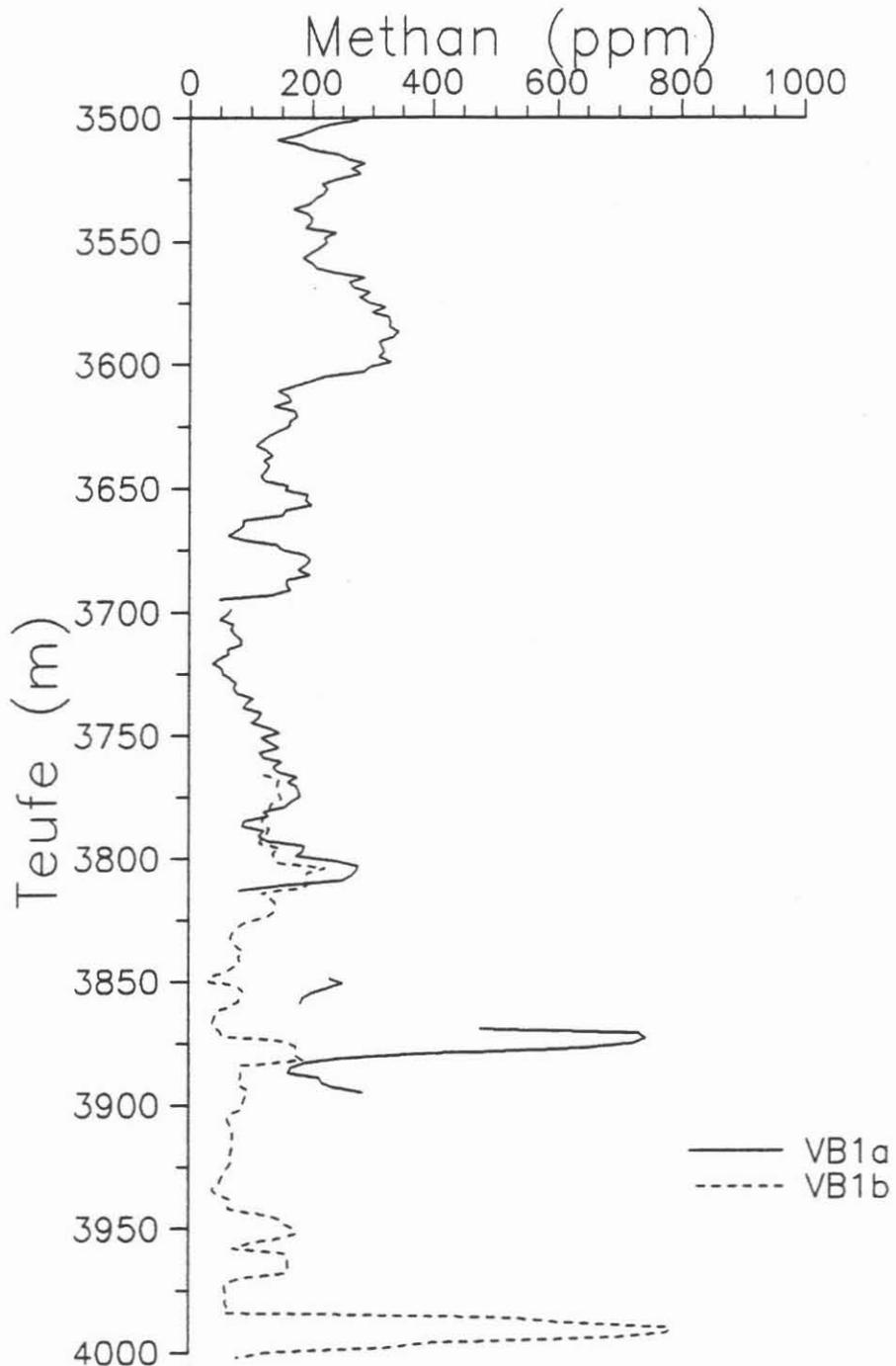


Abb. C.5.1: Methangehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase (Meßwerte sind geglättet)
Datenlücken in der VB1a entstanden durch Degasser-Testphasen

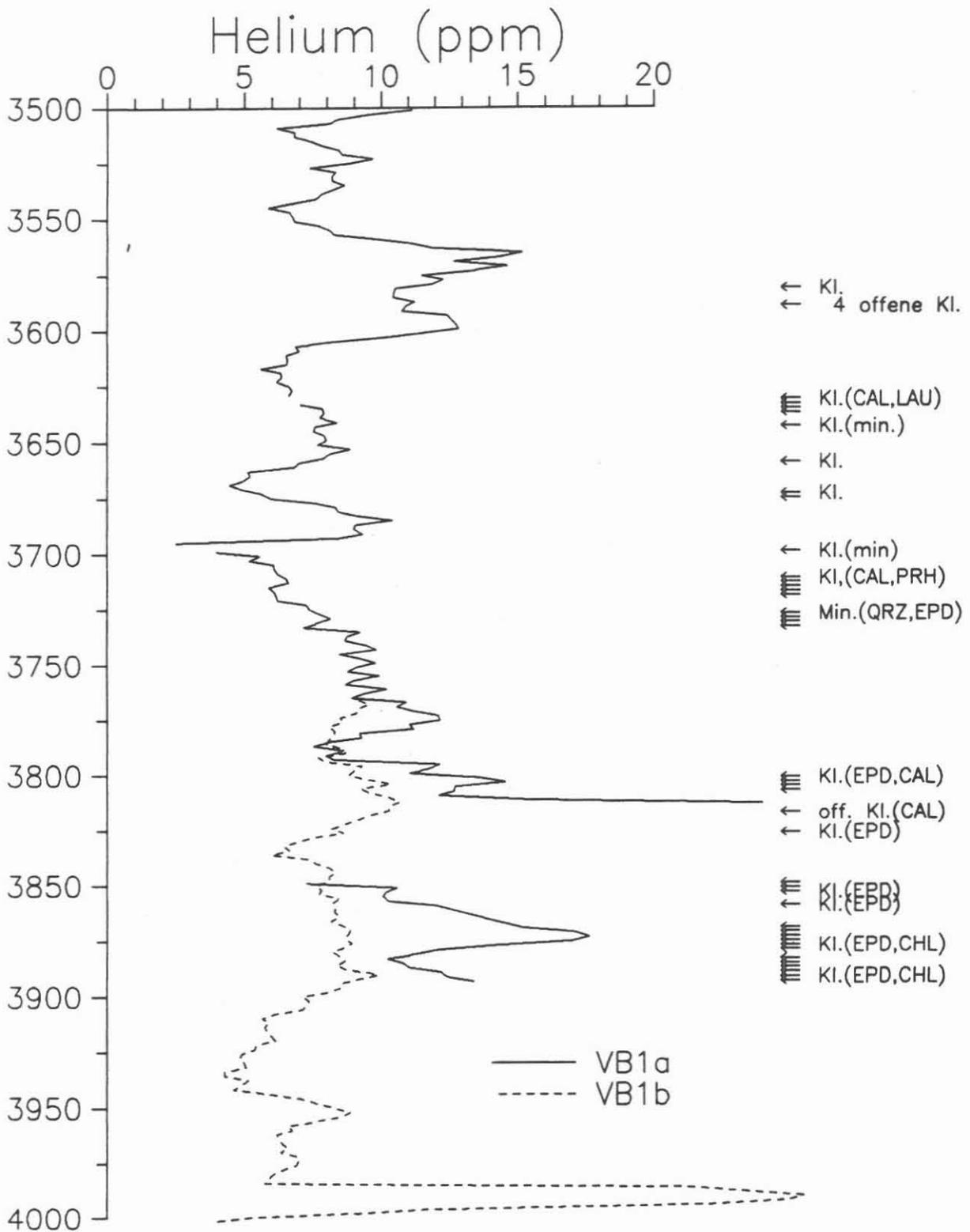


Abb. C.5.2: Beziehung zwischen Heliumgehalten (geglättet) der Bohrspülung und offenen bzw. mineralisierten Klüften
Datenlücken in der VB1a entstanden durch Degasser-Testphase

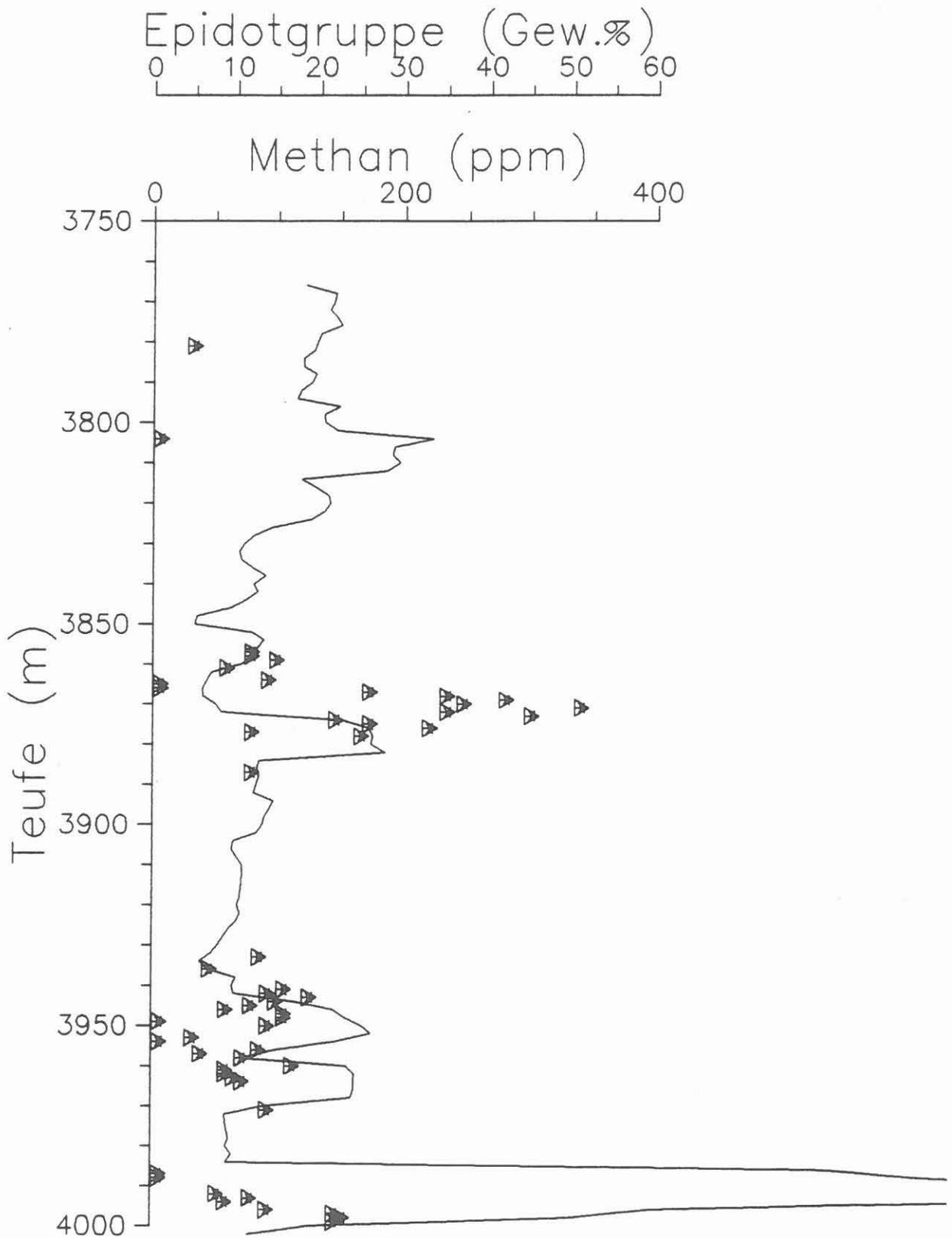


Abb. C.5.3: Abhängigkeit zwischen dem Auftreten von Epidot (RDA-Analysen von Bohrmehlproben) und dem Methan-gehalt (geglättet) der aus der Bohrspülung frei-gesetzten Gasphase der KTB-VB1b

Die Wasserstoffgehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase sind in Abb.C.5.4 für die KTB-VB1a und VB1b zusammen dargestellt.

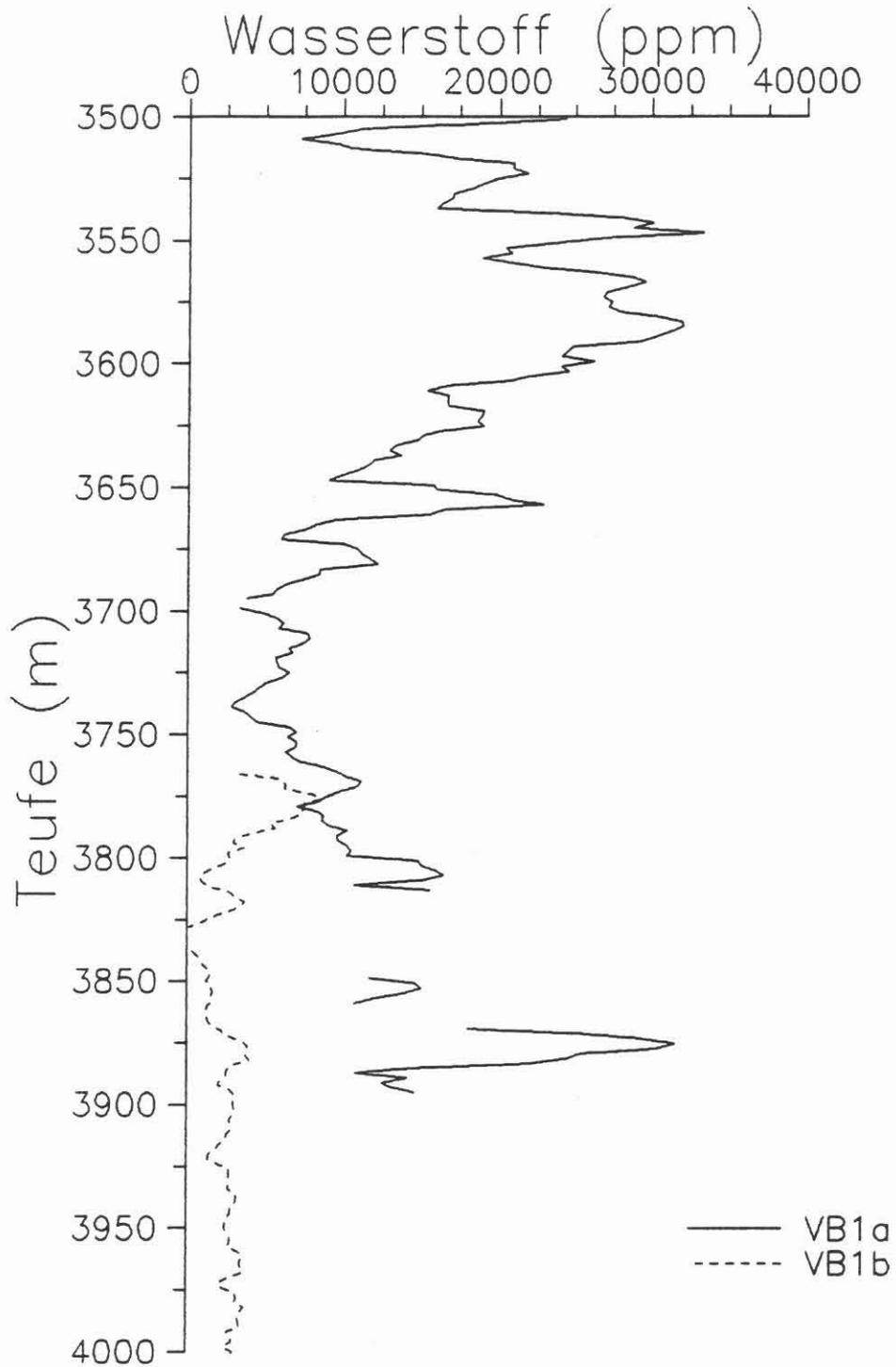


Abb. C.5.4: Wasserstoffgehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase (Meßwerte sind geglättet)
Datenlücken in der VB1a entstanden durch Degasser-Testphase

Bei dem Vergleich der Wasserstoffgehalte der KTB VB1a und der VB1b kann ein deutlicher Konzentrationsunterschied zwischen beiden Ästen der Vorbohrung aufgezeigt werden. Diese Differenz kann auf das eingesetzte Bohrverfahren zurückgeführt werden. So wurde in dem dargestellten Teufenbereich bei der VB1a die Seilkerntechnik mit schnell drehenden, schmallippigen, imprägnierten Diamantbohrkronen eingesetzt, während die VB1b mit Rollenmeißeln und dem Rotary-Bohrverfahren abgeteuft wurde. Da die Wasserstoffgehalte je nach eingesetzten Bohrwerkzeugen und bohrtechnischen Parametern von < 0.01 bis > 10 Vol.% variieren und das scheinbar unabhängig von der durchteuften Lithologie, wird eine überwiegend künstliche Bildung für Wasserstoff angenommen.

Ab 3500 m ist auffällig, daß die Wasserstoffgehalte bis auf einige Ausnahmen mit den Methangehalten korrelieren (vgl. Abb. C.5.1 und C.5.4). In Abb. C.5.5 und C.5. sind die Methan- bzw. Heliumgehalte gegen die Wasserstoffkonzentrationen aufgeführt.

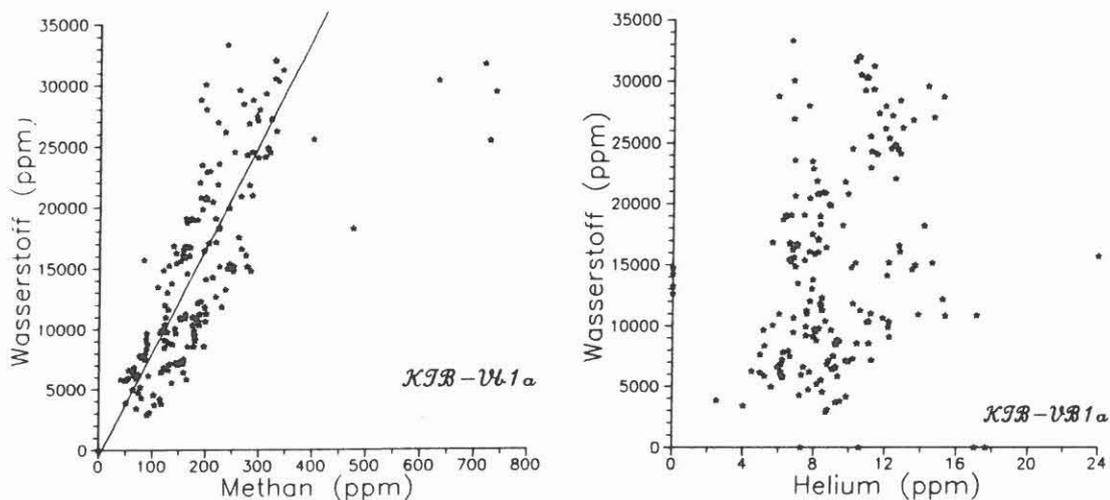


Abb. C.5.5: Methan- bzw. Helium/Wasserstoff-Diagramm KTB VB1a (3500 - 3893 m)

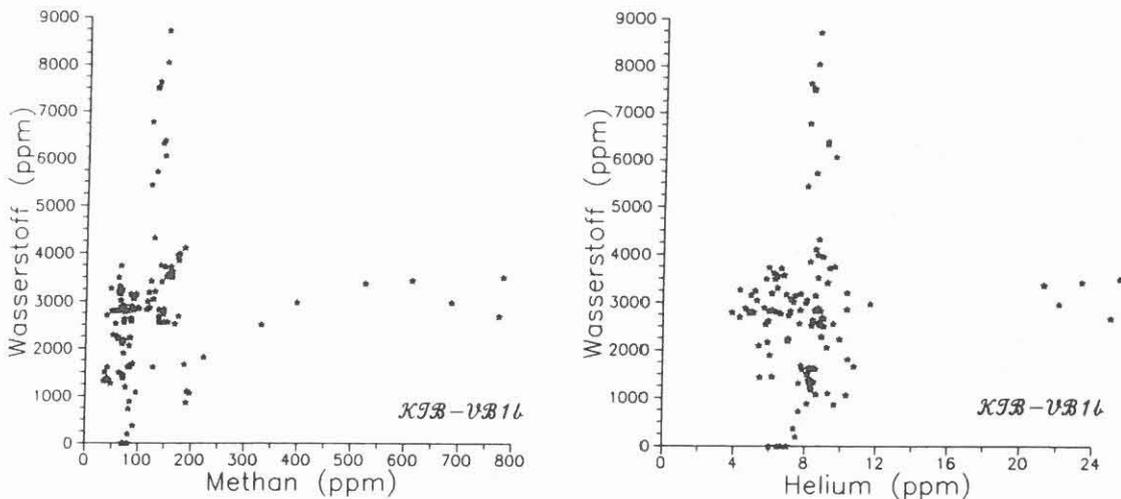


Abb. C.5.6: Methan- bzw. Helium/Wasserstoff-Diagramm KTB VB1b (3767 - 4000.1 m)

In Abb. C.5.5 ist eine Abhängigkeit zwischen den Methan- und Wasserstoffgehalten bis auf einige wenige Wertepaare klar ersichtlich. Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, müßte analog zur Wasserstoffbildung ebenfalls eine Methanbildung beim Bohrprozeß mit Diamantbohrkronen auftreten. Demnach weisen die Methandaten, die außerhalb der Trendlinie liegen, auf Methanzutritte hin. Für Helium kann natürlich kein Trend aufgezeigt werden. In der KTB VB1b läßt sich, bedingt durch das schon erwähnte Rotarybohrverfahren, der o.a. Methan-Wasserstoff-Trend nicht mehr in dieser Form nachweisen. Es kann keine Beziehung zwischen Helium und Wasserstoff für die VB1b nachgewiesen werden.

Ist der Bohrprozeß für die Wasserstoffbildung verantwortlich, so sollte eine Abhängigkeit zwischen den Wasserstoffgehalten und den Mineralphasen der durchteuften Lithologie bestehen, da z.B. die Mineralhärte und die Spaltbarkeit neben bohrtechnischen Parametern einen Einfluß auf die beim Bohrprozeß auftretende Reibung besitzt. Die mögliche Abhängigkeit wurde an Bohrmehlproben des Teufenbereichs 3500 - 3893 m untersucht, da diese Proben, bedingt durch ihren Mischprobencharakter im dm-Bereich, das ideale Probenmaterial für diesen Vergleich darstellen (vgl. Kapitel C.3). Der Probenabstand des analysierten Bohrmehls beträgt durchschnittlich 2 m. Die Wasserstoffgehalte wurden für diesen Vergleich nicht geglättet. In der folgenden Abbildung C.5.7 sind einige aus-

gewählte Mineralphasen (Quarz, Granat, Amphibol, Chlorit) gegen die Wasserstoffgehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase dargestellt. So nehmen die Wasserstoffgehalte der Bohrspülung beim Durchteufen von quarz- und granatreichen Gesteinen (Ritzhärte der Minerale > 6) zu, während sie bei amphibol- und chloritreichen Gesteinen (Härte < 6) den entgegengesetzten Trend aufzeigen.

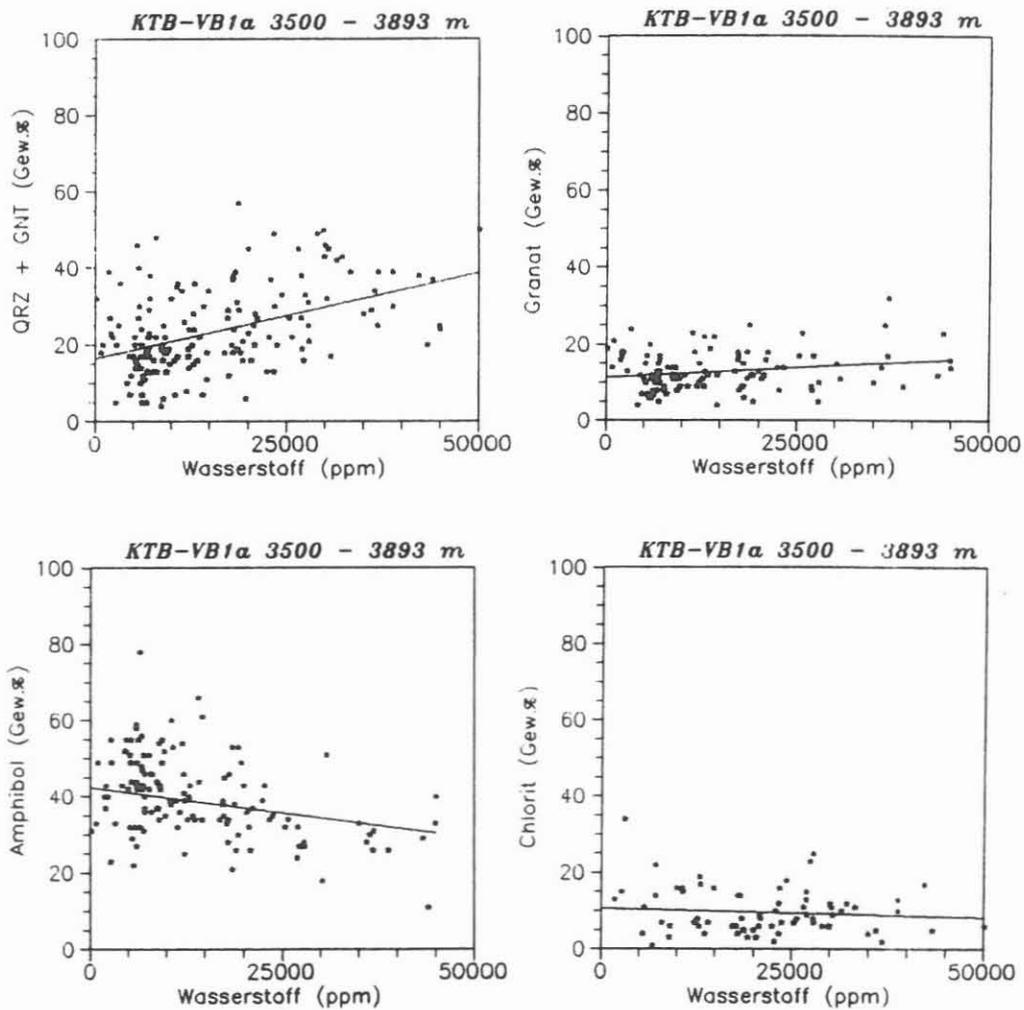


Abb. C.5.7: Wasserstoffgehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der durchteuften Lithologie (RDA-Analysen von Bohrmehlproben)

Für Interpretationen der Methan/Helium-Verhältnisse in den freigesetzten Gasphasen muß gewährleistet sein, daß es sich nicht um künstliches, während des Bohrprozeß gebildetes, Methan handelt. Der deutliche Unterschied in den Methankonzentrationen, je nach eingesetzten Bohrwerkzeugen (vgl. Abb. C.5.1 KTB VB1a und VB1b) sowie die Korrelation der Methan- und Wasserstoffgehalte sprechen für die Existenz von artifiziellem Methan. Isotopen-Untersuchungen an Gasen der KTB-Vorbohrung belegen ebenfalls die Existenz von künstlich gebildeten Kohlenwasserstoffen (FABER & WHITICAR 1989).

In den Abb. C.5.8 und C.5.9 sind die Methan/Helium-Verhältnisse von Gasphasen ausgewählter Teufenbereiche dargestellt. Diese Teufenbereiche zeichnen sich durch Gasanreicherungen und z.T. auch durch Fluidzutritte aus, so daß für diese Gasphasen der Anteil artifiziellem Methans vernachlässigbar sein sollte. Zum Vergleich sind die Gasphasen des Teufenbereichs 3570 bis 3890 m der VB1a mit Heliumkonzentrationen ≥ 15 ppm ebenfalls aufgeführt (vgl. Abb. C.5.8 und C.5.9).

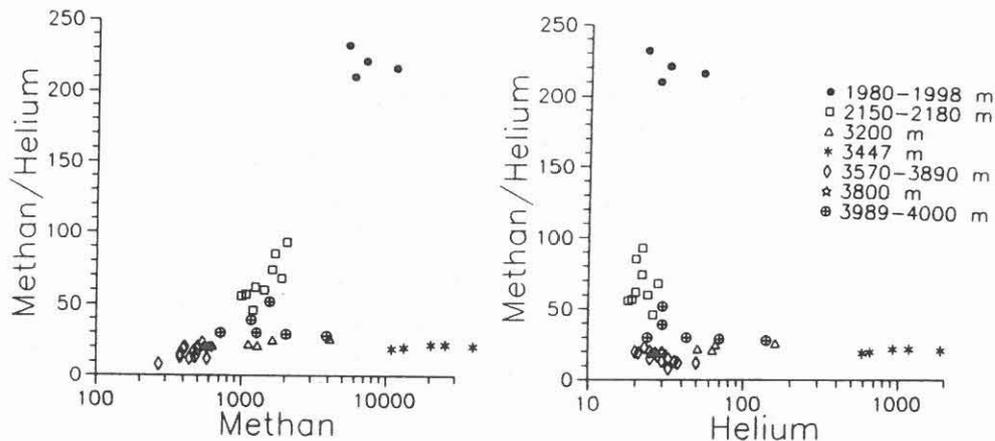


Abb. C.5.8 und C.5.9: Methan/Heliumverhältnisse ausgewählter Teufenbereiche

Wie schon in WITTENBECHER et al. 1989 beschrieben, lassen sich einzelne Gasphasen nach ihren Methan/Helium-Verhältnissen voneinander abgrenzen.

Auffällig ist z.B., daß die Gasphase der Zone zwischen 3980 und 4000 m im Vergleich zu 3202 m und 3447 m wieder höhere Methan/Heliumverhältnisse aufweist.

C.5.2.2 Esterzusatz - Methanquelle!

In der KTB VB1b wurde der Bohrspülung ein Ester (Terradrill 451 der Fa. HENKEL) zur Herabsetzung der Gestängereibung zugesetzt.

Nach dem Start der VB1b traten Änderungen in der Gaszusammensetzung der aus der Bohrspülung freigesetzten Gase im Vergleich zur VB1 und Vb1a auf: Bei Beginn einer Bohrspülungszirkulation wurde nun sofort Methan ohne eine gleichzeitige Heliumanreicherung gefunden. Abb. C.5.10 zeigt beispielhaft dieses Phänomen (mit T markiert) nach einem Gestängeaus- und -einbau.

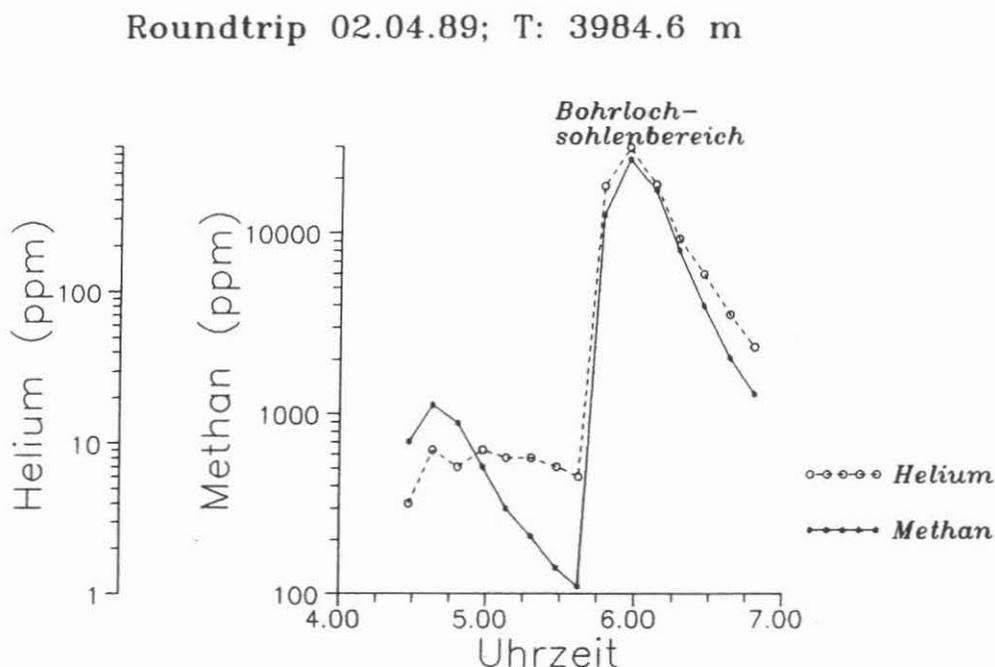


Abb. C.5.10: Helium- und Methangehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase nach einem Gestängeaus- und -einbau (KTB VB1b)

Um ca. 4⁰⁰ Uhr wurde die Zirkulation gestartet und kurze Zeit später stieg die Methankonzentration auf über 1000 ppm an, während für Helium keine Konzentrationsänderungen auftraten (vgl. Abb. C.5.10). Die Bohrspülung aus dem Bohrlochsohlenbereich wies wie üblich eine Methan- und Heliumanreicherung auf. Bis zum Beginn der VB1b wurden keine Methananreicherungen ohne einen gleichzeitigen Heliumkonzentrationsanstieg verzeichnet. Deshalb ist es wahrscheinlich, daß die Methananreicherung bei Zirkulationsbeginn artifiziellen Ursprungs ist.

C.5.2.3 Bohrlochzirkulationen

Einen Tag nach Erreichen der Endteufe wurde die Bohrspülung neu konditioniert. Während der dabei notwendigen Bohrspülungszirkulation wurden die in der Spülung gelösten Gase freigesetzt und wieder kontinuierlich analysiert. Die Ergebnisse dieser Zirkulation sind in der nachfolgenden Tab.C.5.1 sowie in der Abb.C.5.11 zusammengefaßt.

Tab.C.5.1: Helium-, Wasserstoff- und Methangehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase während der Spülungszirkulation vom 04.04.1989

	Helium ppm	Wasserstoff ppm	Methan ppm
Zirkulationsbeginn (Spülung aus der Verrohrung)	8	7500	800
Spülung aus dem Bohrlochsohlenbe- reich	160	5000	5500

Auffällig ist dabei wieder die zu Beginn der Zirkulation (vgl. Abb. C.5.11; Start = 18⁰⁰ Uhr) auftretende Methananreicherung ohne gleichzeitige Änderung der Heliumgehalte. Die Methan- und Heliumanreicherung um 19¹⁵ Uhr stellt die in der Bohrspülung gelöste bzw. freigesetzte Gasphase aus dem Bohrlochsohlenbereich dar. Deutlich wird, daß der Kurvenverlauf für die Methan- und Helium- Anreicherungen einen identischen Verlauf besitzen. Dahingegen läßt sich für die Wasserstoffgehalte ein anderer Trend aufzeigen. Im Bohrlochsohlenbereich wurde keine Anreicherung festgestellt, während nach Zirkulationsbeginn eine Wasserstoffanreicherung auftrat. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied könnte eine im Bohrloch stattgefundene Gasfraktionierung sein, da Wasserstoff sehr mobil ist. Dann müßte sich aber auch Helium von Methan abtrennen und dürfte nicht den identischen Kurvenverlauf im unteren Bereich zeigen.

Vielmehr ist eine wie auch immer geartete Methanbildung aus

dem Ester (unter einer Wasserstoffaufzehrung ?) denkbar. Der Wasserstoff entsteht z.B. auch beim Gestängeeinbau durch Wasserzersetzung am Bohrgestänge. Deshalb nehmen die Wasserstoffgehalte nach einer anfänglichen Anreicherung (= Bildung am Gestänge) mit zunehmender Zirkulationsdauer (= keine Anreicherung in der Spülung aus dem Bohrlochsohlenbereich) ab.

Am 11.05.1989 wurde ein sogenannter Absenkttest (= Zuflußttest) durchgeführt. Durch die Reduzierung der Spülungssäule wurden Zuflüsse initiiert (ca. 9 m³, siehe KESSELS et al. 1989). Der deutlichste Zufluß erfolgte im Bohrlochsohlenbereich. Dieser Bereich wurde mehrmals mit Fluid Samplern beprobt (vgl. Kap. C.4 und C.5.3). Eine erneute Bohrlochzirkulation erfolgte am 13.06.89. In Tab.C.5.2 und Abb. C.5.12 ist eine Auswahl der gemessenen Gase aufgeführt.

Tab.C.5.2: Helium-, Wasserstoff- und Methangehalte der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase während der Spülungszirkulation vom 13.06.1989

	Helium ppm	Wasserstoff ppm	Methan ppm
Zirkulationsbeginn (Spülung aus der Verrohrung)	10	< 1000	220000
Spülung aus dem Bohrlochsohlenbe- reich	3800	160000	230000

Abgesehen von den Absolutgehalten kann für Methan, Helium und Wasserstoff der gleiche Trend, wie bei der Zirkulation vom 02.04.1989, aufgezeigt werden. Für Methan wurden Maximalgehalte von 23 Vol.%, für Helium 0.38 Vol.% und für Wasserstoff bis zu 16 Vol.% erreicht. Die Änderung der Stickstoff/Argon-Verhältnisse belegt, daß das zugetretene Fluid neben Methan und Helium auch Stickstoff enthielt. In der aus der Bohrspülung freigesetzten Gasphase konnte bis zu 10 Vol.% Kohlendioxid nachgewiesen werden. Da die freisetzbare Kohlendioxidmenge vom pH-Wert der Bohrspülung abhängt, entspricht der Verlauf der Kohlendioxid-Kurve der des pH-Wertes (vgl. Kap. C.4). Der pH-Wert nahm von Werten um 10 auf 5 im Bereich der größten Kohlendioxidanreicherung ab.

Zirkulation 04.04.89; T: 4000.1 m

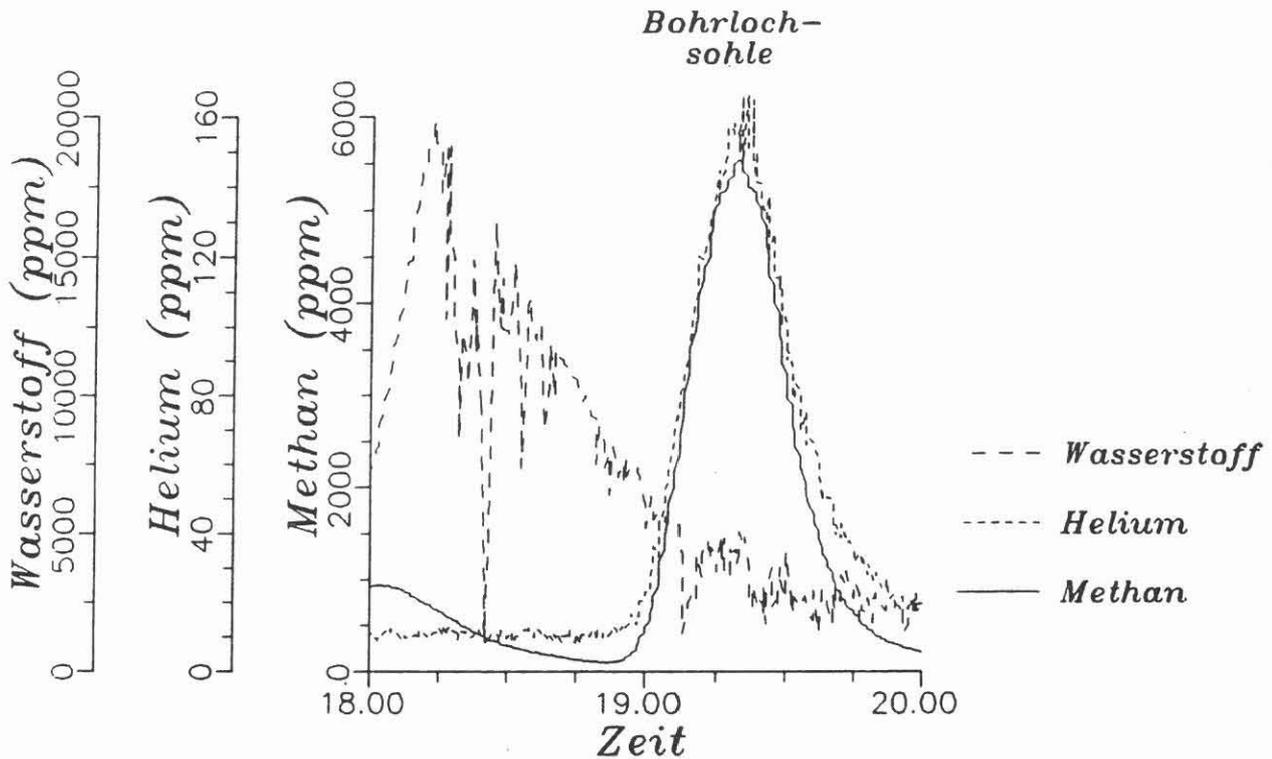


Abb. C.5.11: Ergebnisse der Bohrlochzirkulation vom 04.04.89

Zirkulation nach Absenkttest (13.06.89); T: 4000.1 m

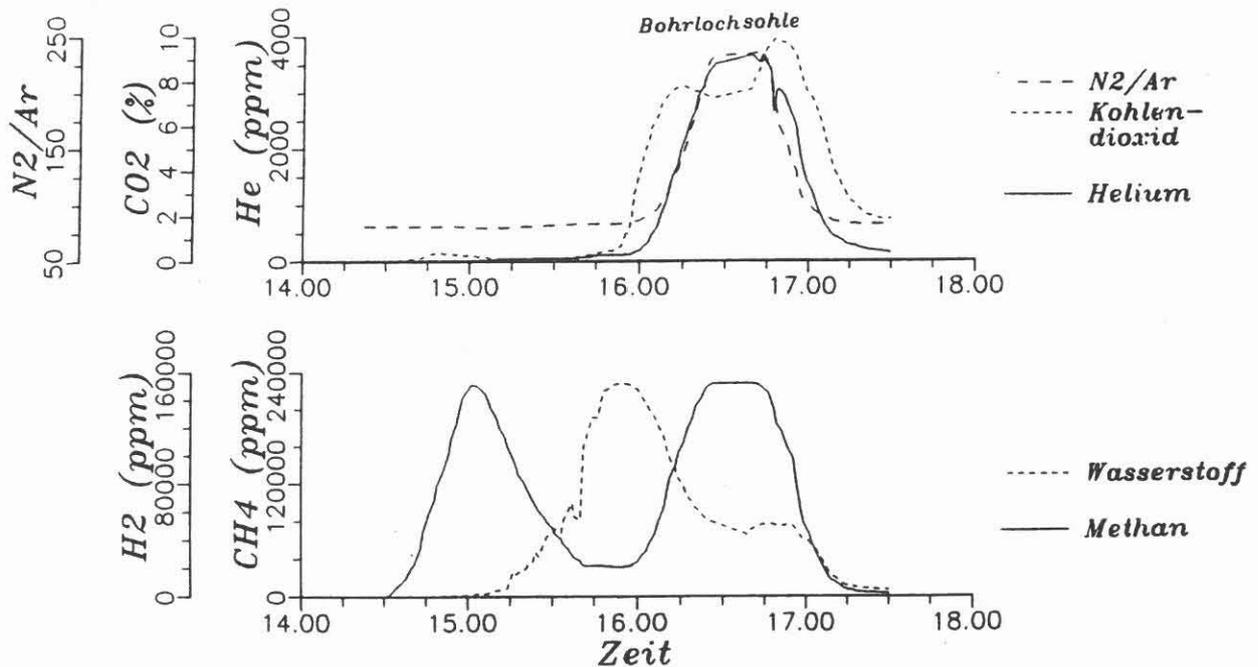


Abb. C.5.12: Ergebnisse der Bohrlochzirkulation vom 13.06.89

C.5.3 Fluid Sampler

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Horizonte, die sich durch Gasanreicherungen (Methan und Helium), Änderungen der Bohrspülungszusammensetzung (Kationen und Anionen) sowie Änderungen von physikalischen Größen, wie elektrischer Widerstand der Bohrspülung, auszeichneten, mit Fluid Samplern beprobt. Die gewonnenen Proben wurden entgast und mit dem Massenspektrometer gemessen. Je nach freisetzbarer Gasmenge kann die Gasphase über 50 Vol.% Wasser enthalten. Die Meßergebnisse sind daher auf wasserfreie Basis korrigiert. Die Sauerstoffgehalte werden als Luftkontamination definiert und sind ebenfalls korrigiert.

In den Tabellen C.5.3 bis C.5.5 sind sämtliche eingesetzten Fluid Sampler im Teufenbereich > 3500 m aufgeführt (Stand Nov.1989).

Tab. C.5.3: Zusammensetzung der Gasphasen, die durch eine Entgasung der durch Einsatz von Fluid Samplern gewonnenen Fluidproben erzielt wurden

	Datum	14.12.88	03.01.89	14.01.89	17.01.89
Teufe (m)		3567.0	3736.0	3801.0	3817.2
Sampler		Geocom	Preussag	Geocom	Geocom
Stickstoff (Vol.%)		53.60	78.90	67.0	93.24
Argon (Vol.%)		0.68	1.00	1.01	1.97
Kohlendioxid (Vol.%)		0.09	0.36	2.77	0.04
Methan (Vol.%)		1.40	9.18	19.40	0.39
Wasserstoff (Vol.%)		44.10	10.60	9.57	1.89
Helium (Vol.%)		0.07	0.20	0.35	0.01
	Datum		17.01.89	17.01.89	
	Teufe (m)		3799.5	3740.0	
	Sampler		Geocom	Geocom	
Stickstoff (Vol.%)			90.01	78.90	
Argon (Vol.%)			1.09	1.00	
Kohlendioxid (Vol.%)			0.08	0.36	
Methan (Vol.%)			1.26	9.18	
Wasserstoff (Vol.%)			7.50	10.60	
Helium (Vol.%)			0.04	0.20	

Nach Beendigung der Absenkttestphase wurde der Teufenbereich der sich im Spülungswiderstandslog durch eine Abnahme auszeichnete, mit Fluid Samplern beprobt. Zum Einsatz kamen der

Geocom-Probennehmer (12.05., 13.05. und 17.05.1989) und ein Multi-Fluid Sampler (MSST; 01.06. bis 02.06.1989). Die Meßergebnisse der entgasten Geocom-Proben sind in Tabelle C.5.4 und die des Multi-Fluid Samplers in Tab.C.5.5 zusammengefaßt.

Tab. C.5.4: Meßergebnisse der Geocom-Proben des Absenkttestes

Datum	12.05.89	13.05.89	17.05.89	17.05.89
Teufe (m)	3985.0	3930.0	3930.0	3995.0
Sampler	Geocom	Geocom	Geocom	Geocom
Stickstoff (Vol.%)	61.89	54.48	56.31	33.61
Argon (Vol.%)	0.18	<0.10	0.02	0.07
Kohlendioxid (Vol.%)	1.78	2.11	2.58	7.48
Methan (Vol.%)	35.59	42.57	40.01	57.46
Wasserstoff (Vol.%)	0.11	0.32	0.48	0.94
Helium (Vol.%)	0.44	0.53	0.61	0.45

Die gewonnenen Proben zeichneten sich erstmals durch sehr starke Gasanreicherungen aus. So konnte durch die Entgasung der 3 l-Probe aus einer Tiefe von 3985 m ca. 1800 cm³ Gas gewonnen werden. Das entspricht pro l Fluid 150 cm³ Methan sowie 1 cm³ Helium.

Tab. C.5.5: Meßergebnisse der MSST-Proben

Teufe (m)	528	3625	3675	3700	3830
Kohlendioxid (Vol.%)	0.57	4.85	14.57	15.41	5.96
Methan (Vol.%)	0.68	0.19	0.16	0.21	2.92
Wasserstoff (VOL.%)	0	1.65	1.08	1.56	1.70
Helium (Vol.%)	0	0.008	0.01	0.02	0.29

Auch anhand Tabelle C.5.3 kann wieder das "Methan-Phänomen" aufgezeigt werden. Unterhalb 3600 m ist die Bohrspülung mit dem durch den Absenkttest initiierten Zufluß versetzt (Methan- und Heliumanreicherung sowie Kationen- und Anionenzunahme, vgl. Kap.C.4.x).

C.6 Vergleich der Ergebnisse von VB1a und VB1b

Die beiden Bohrlöcher VB1a und VB1b überlappen sich im Bereich 3766.9-3893m (Überlappung 126.1m). Bohrlochmessungen mit magnetischer Orientierung (BGT) ergaben eine horizontale Abweichung der beiden Bohrlöcher von stellenweise wenigen Dezimeter bis maximal 1- 1.5 Meter.

Bei einem Vergleich der beiden Äste 1a und 1b ergeben sich auf den ersten Blick annähernd identische Lithologien (Abb.C.6.2). Eine eindeutige Identifizierung gabbroider Relikte und teufenmäßige Zuordnung ist anhand von Bohrmehlproben aufgrund der höheren Pumpraten beim Richtbohren (stärkere Bohrkleinvermischung) nicht mehr eindeutig möglich. Nach dem Cuttings-Dünnschliffbefund sind Meta-Gabbros in der VB1b ohnehin weniger stark vertreten als in der VB1a und sind unterhalb von 3900 m nicht mehr zu beobachten.

Chemisch und mineralogisch ist der überlappende Bereich bis auf eine Zone von 3850- 3880 m recht einheitlich. Dieser Abschnitt der KTB VB1b unterscheidet sich von der VB1a durch Konzentrationsveränderung mehrerer Parameter (Abb.C.6.3). In der VB1b steigen die Sr-Gehalte von ca. 220 ppm (VB1a) auf ein Maximum von ca. 1250 ppm an, die P_2O_5 -Werte steigen auf über 1 Gew.-%. Verstärkt tritt Epidot auf, der Werte bis zu über 50 Gew.% erreicht. Y- und Zr- Daten durchlaufen unmittelbar nach dem Maximum der Epidotisierung in beiden Ästen ein Maximum.

In den Dichtedaten von Kernen der VB1a und Bohrklein der VB1b ergeben sich ebenfalls erhebliche Unterschiede. Während die Kerndichten in der VB1a in diesem Bereich z.T. bis auf Werte von 2.65 g/cm³ sinken, erreichen sie in der VB1b nur etwa 2.80 g/cm³ als Minimaldichte. Ob diese Differenz der beiden Äste in ihren Dichtedaten auf eine verminderte Porosität in der VB1b schließen läßt oder auf die verstärkte Epidotisierung (Epidot 3.25 g/cm³ - 3.45 g/cm³, BOENIGK 1983) zurückzuführen ist, kann hier nicht mit Sicherheit geklärt werden. Die starke Epidot-Mineralisation könnte jedoch ein weiterer Hinweis darauf sein, daß die offenen Klüfte, wie sie in der VB1a beobachtet wurden, in der VB1b trotz des geringen Abstandes (wenige dm - max. 2 m) der beiden Äste von einander bereits verheilt sind. Die Ergebnisse der Spülungsanalytik können diese Vermutung teilweise belegen. Während in der VB1a noch Fluidzutritte nachgewiesen wurden, ist die VB1b dagegen in diesem Teufenbereich "trocken".

Mit Hilfe der kontinuierlich durchgeführten Spülungsanalytik können zwei Zuflußhorizonte im Überlappungsbereich nachgewiesen werden. Der Zuflußhorizont im Teufenbereich um 3817 m kann in beiden Ästen der Vohrbohrung nachgewiesen werden, wenn auch der Fluidzutritt während der VB1b nur noch sehr schwach ausgeprägt ist. Bei ca. 3875 m konnte nur in der VB1a ein Zufluß salinarer Wasser festgestellt werden. Das Fehlen

oder stark verminderte Auftreten von Zuflußindikatoren (wie z.B. Chlorid Abb.C.6.1) kann dahin interpretiert werden, daß die Zuflußbereiche entweder schon entleert oder durch Spülung abgedichtet sind. Bei 3875 m deuten dagegen die chemischen und mineralogischen Daten auf eine verminderte Permeabilität bzw. verheilte Klüftigkeiten hin.

In dem Überlappungsbereich der VB1a und VB1b zeichnen sich die oben beschriebenen Zonen durch Methan- und Heliumanreicherungen in der Bohrspülung aus. Für die VB1b sind diese Anreicherungen analog zum Chlorid weniger stark ausgeprägt. Das deutet ebenfalls darauf hin, daß die Zone bei 3817 m bereits beim Durchteufen der VB1a z.T. entgast ist, während der Bereich um 3875 m in der VB1b anscheinend weniger permeabel ist.

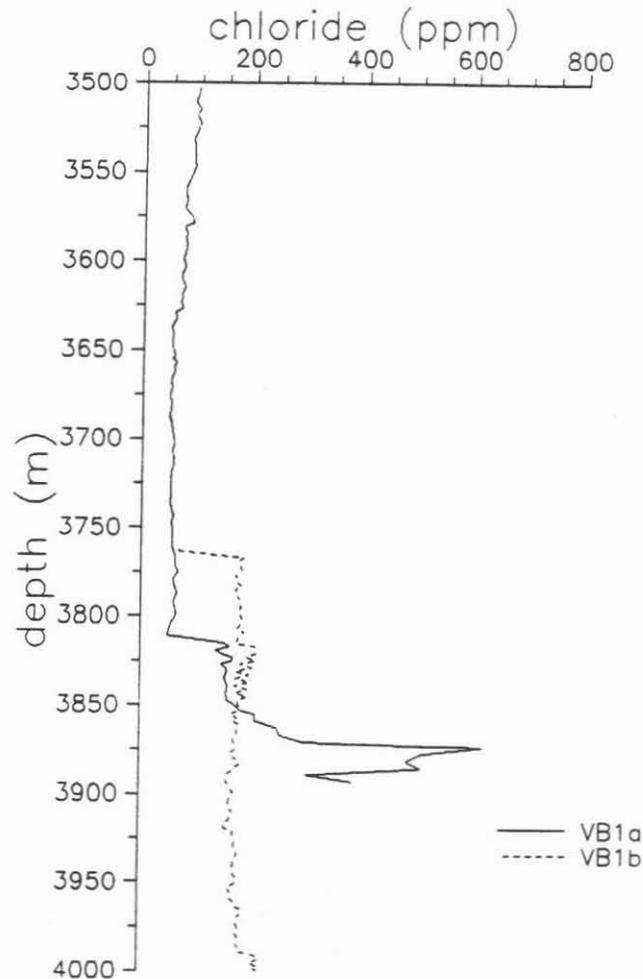


Abb.C.6.1: Chlorid-Konzentrationen in VB1a und VB1b mit den markanten Anstiegen im Bereich von Zuflüssen.

Abb.C.6.2: RDA/RFA Bohrmehlfprofil der VB1a und VB1b

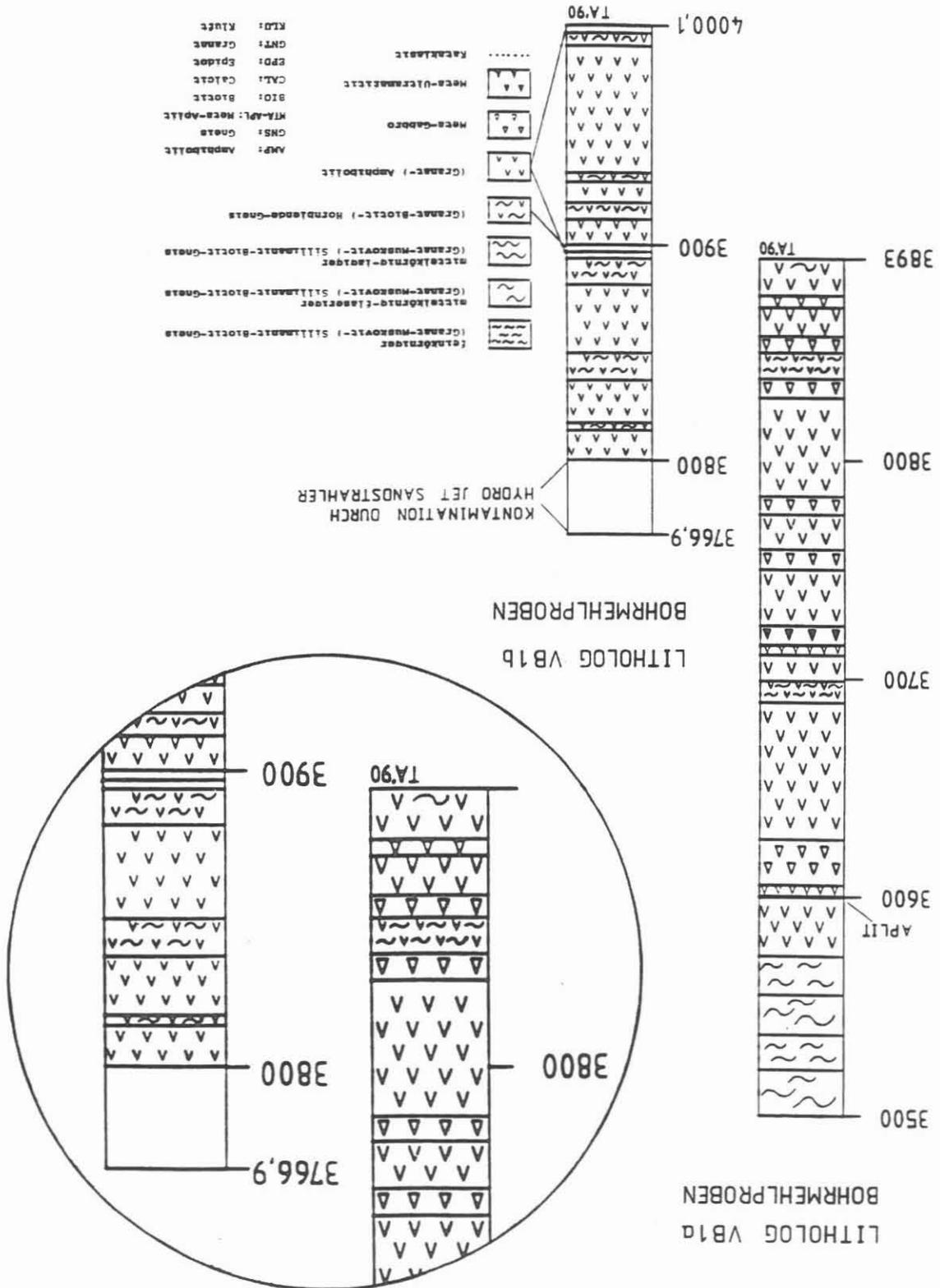
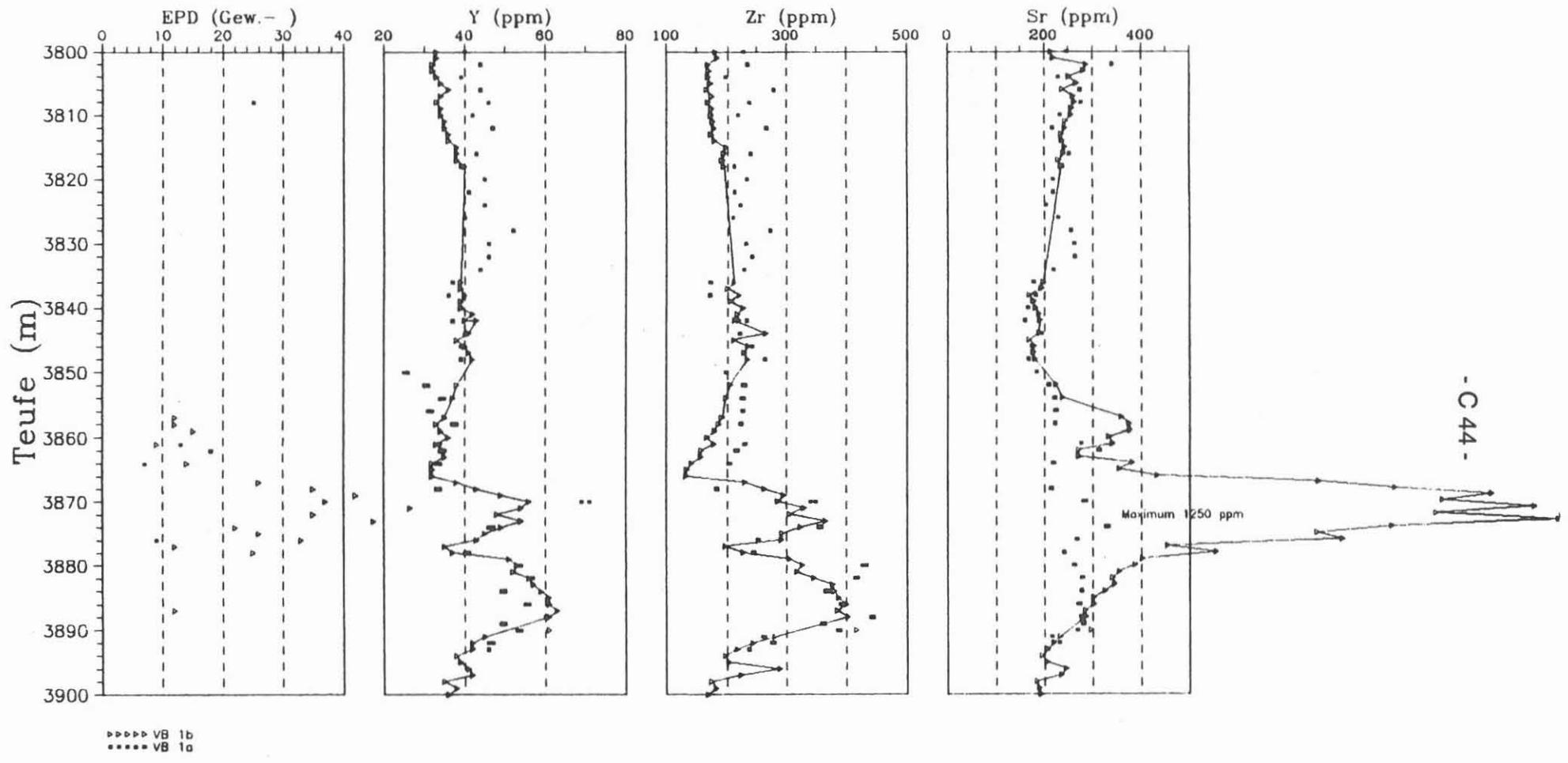


Abb. C.6.3: Epidot-, Sr-, Y- und Zr-Konzentrationen in VB1a und VB1b.



C. 7. Literaturübersicht

BOENIGK, W. (1983) : Schwermineralanalyse
Enke Verlag, Stuttgart

HEINSCHILD, H.J., HOMANN, K.D., STROH, A. & TAPPER, M. (1988):
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 0 - 480 m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-1: C1-C73, Hannover.

HEINSCHILD, H.J., HOMANN, K.D., STROH, A. & TAPPER, M. (1988):
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 480 bis 992 m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-2: C1-C107, Hannover.

HOMANN, K.D., HEINSCHILD, H.J., STROH, A. & TAPPER, M. (1988):
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 1530 bis 1998m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-9: C1-C88, Hannover.

HOMANN, K.D. und MÜLLER, H. (1989): Wechselwirkung zwischen Dehydril HT-Bohrspülung und Gesteinsmehl.
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 1709 bis 2500m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 89-2: F1-F45, Hannover.

FABER, E. & WHITICAR, W.I. (1989): C- and H-Isotope in leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen der KTB-Vorbohrung. - Vortrag 2. Kolloquium des DFG-Schwerpunktprogramms KTB, Gießen 15.-17.03.1989

KESSELS, W., ZOTH, G. & KÜCK, J. (1989): Erste Ergebnisse eines Absenk- und Injektionstestes in der KTB-Oberpfalz VB, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, Projektgruppe KTB

SHANNON, R. B. (1976): Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides.
Acta Cryst., A32, 751-767, 1976

STROH, A., HEINSCHILD, H.J., HOMANN, K.D. & TAPPER, M. (1988): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH, H.-G., HEINISCH, M., WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report, 88-6: C1-C109, Hannover.

WEDEPOHL, K. H. (ex. ed., 1969): Handbook of Geochemistry
J.J.W. Rogers and J.A.S. Adams, Vol. II
Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, N.Y.

C. 8 Danksagung

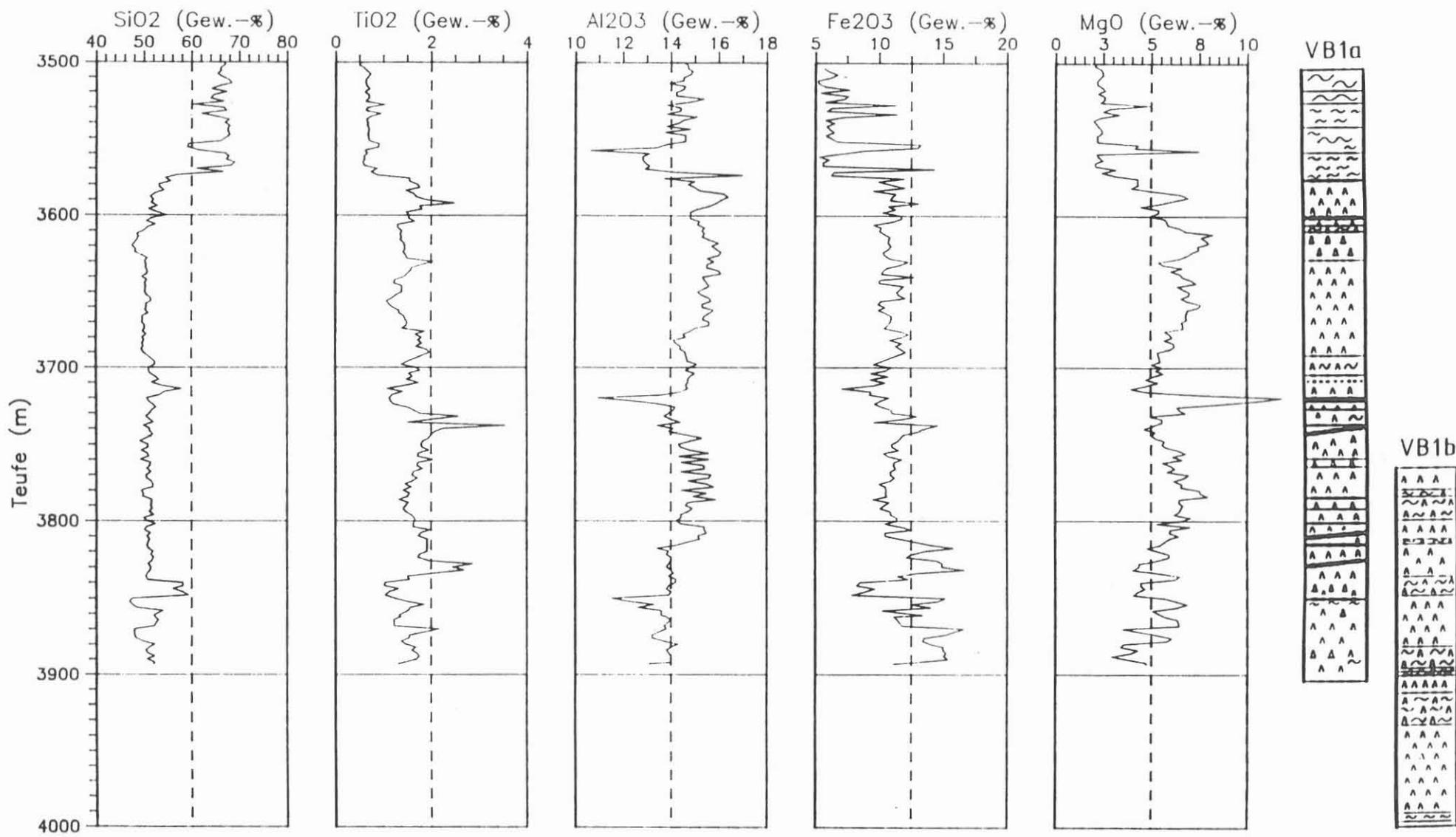
Unser Dank gilt den technischen Mitarbeitern der Geochemiegruppe im Feldlabor, Frau A. Heinschild, Herrn H. Kamm, Herrn R. Lippert, Herrn S. Merz, Frau B. Weber. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danken wir Herrn Prof. Dr. K. H. Wedepohl, Herrn Prof. Dr. R. Emmermann, Frau Dr. H. Müller und Herrn Dr. Lauterjung.

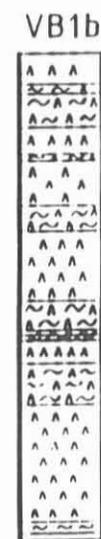
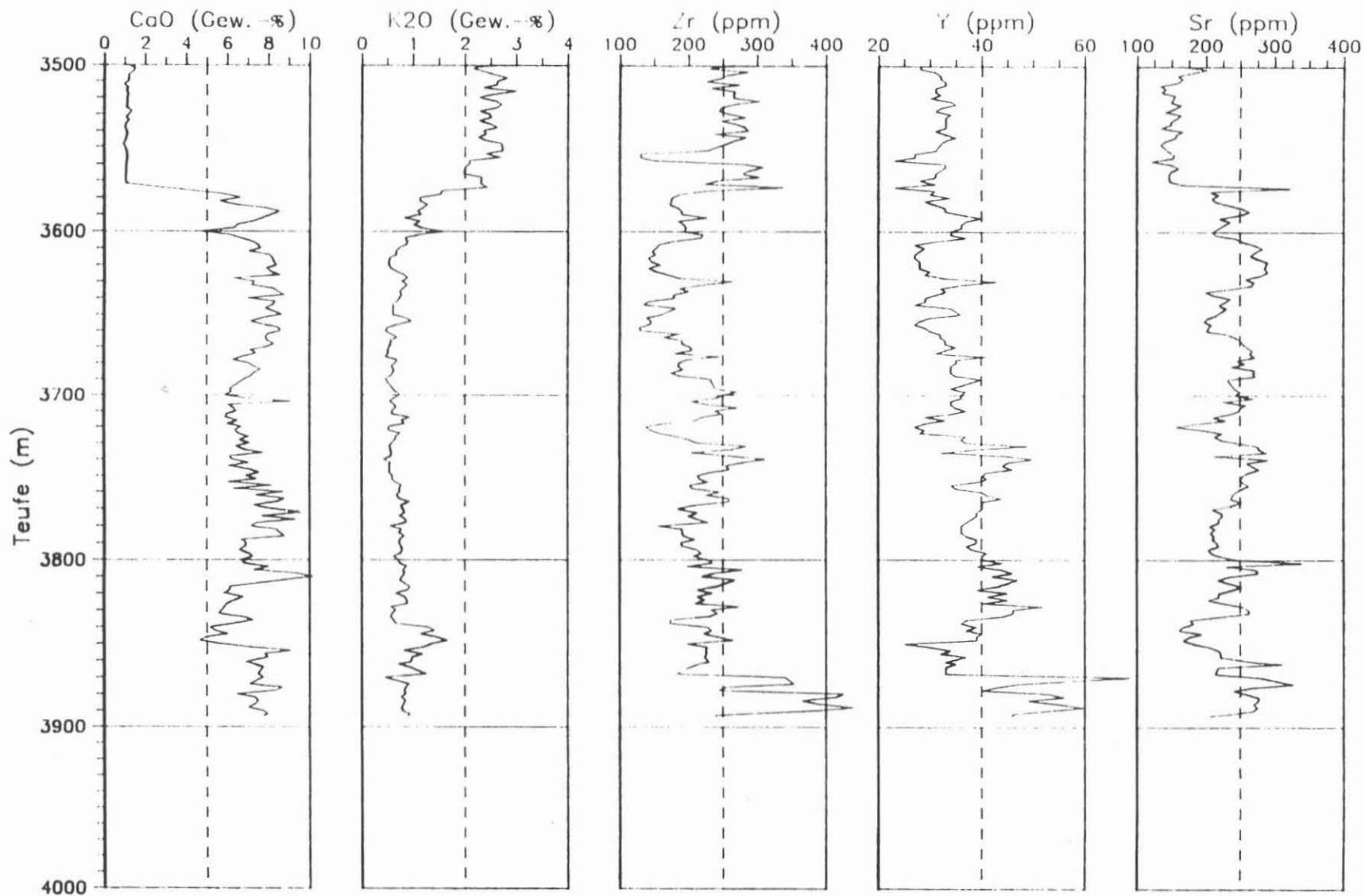
C.9 Anhang

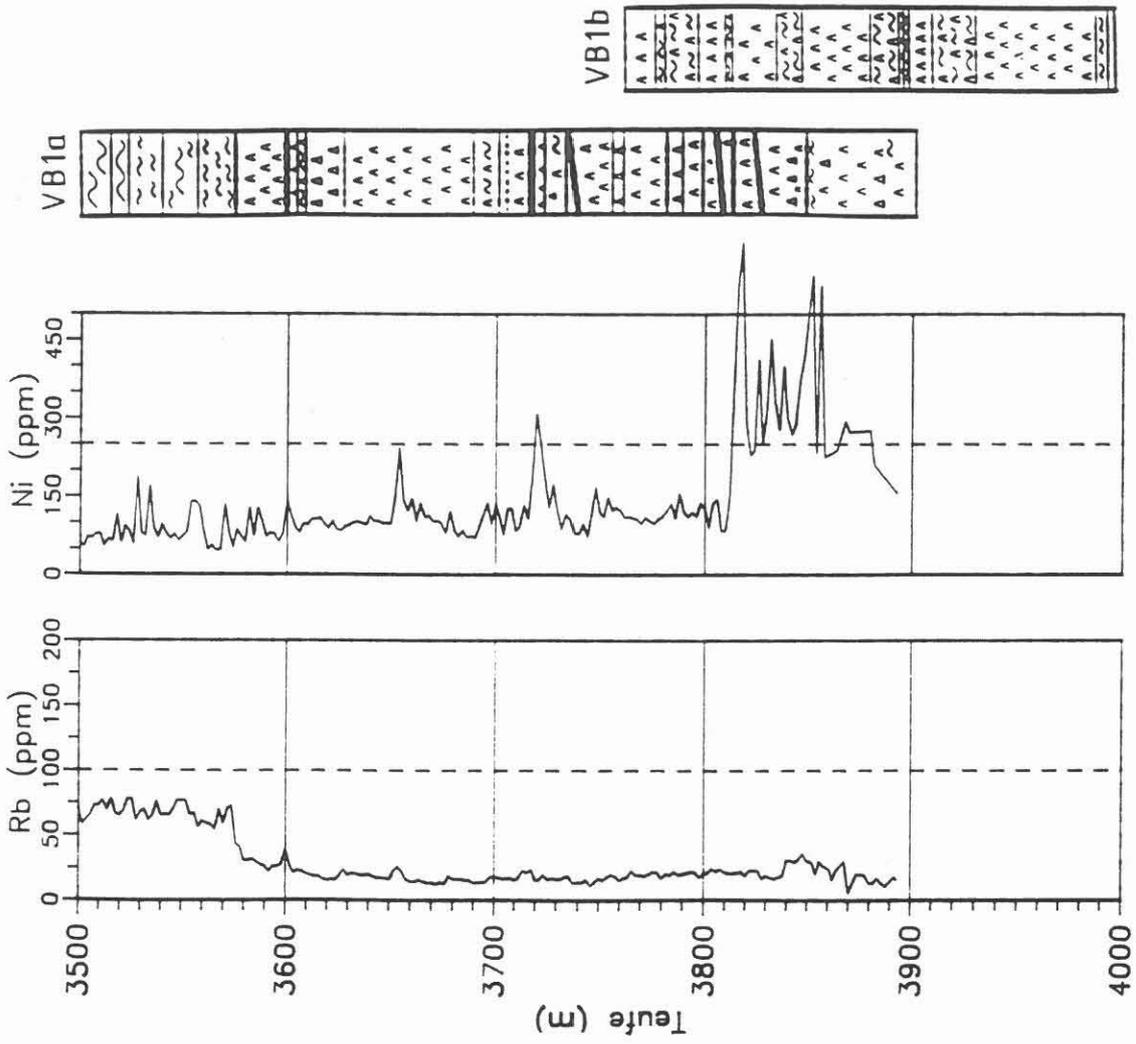
- C.9.1 Tiefenlogs RFA Analysen VB 1a
- C.9.1.1 Tiefenlogs RFA Analysen VB 1b
- C.9.2 Tiefenlogs RDA Analysen
- C.9.3 Tiefenlogs der Kationen-, Chlorid- und Sulfatgehalte der Bohrspülung
 - C.9.3.1 Zusammenfassung der Spülungseinleitungen der VB 1a im Teufenbereich 3503.3 - 3893 m
 - C.9.3.2 Zusammenfassung der Spülungseinleitungen der VB 1b im Teufenbereich 3766 - 4000.1 m

C.9.1

Tiefenlogs RFA Analysen VB 1a

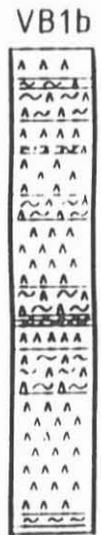
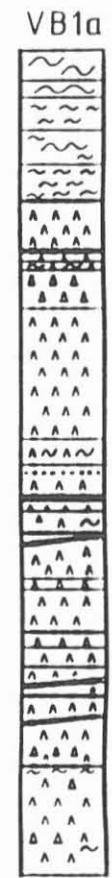
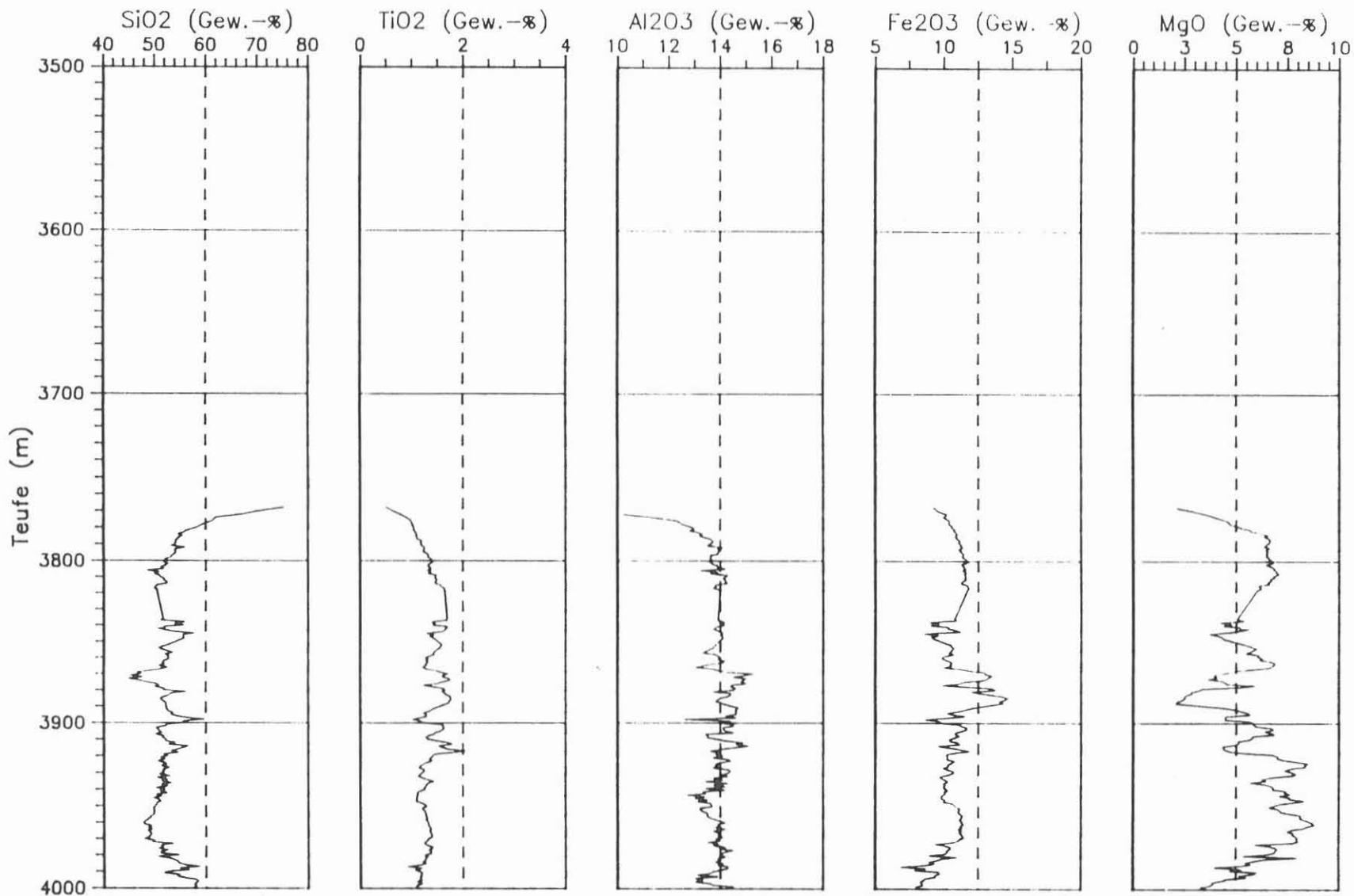


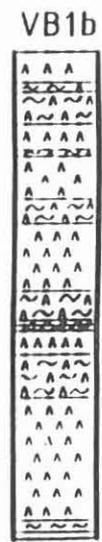
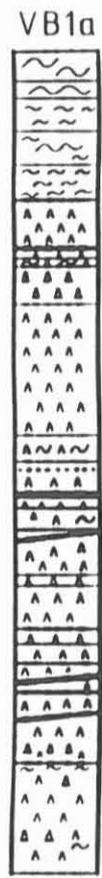
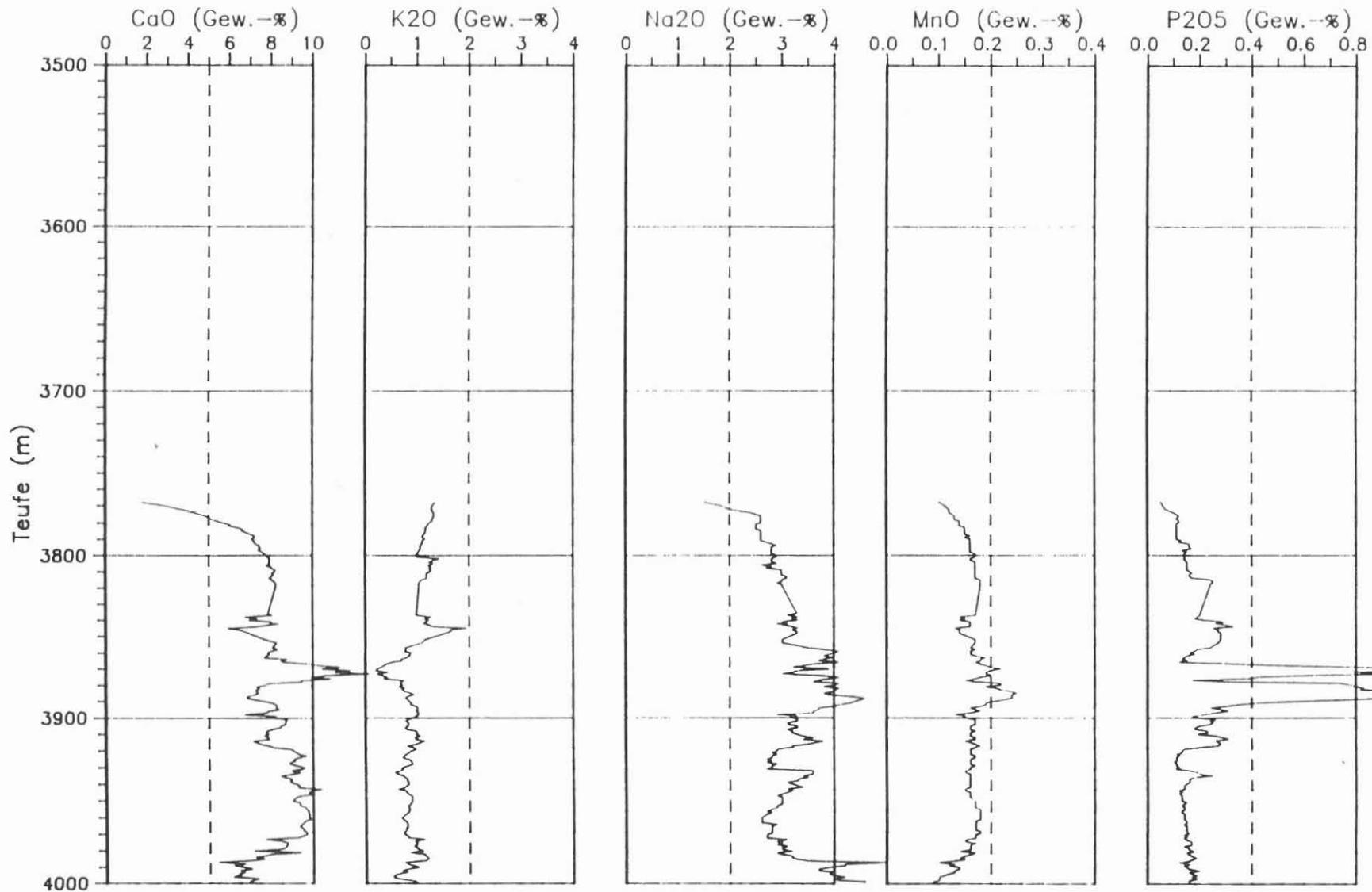


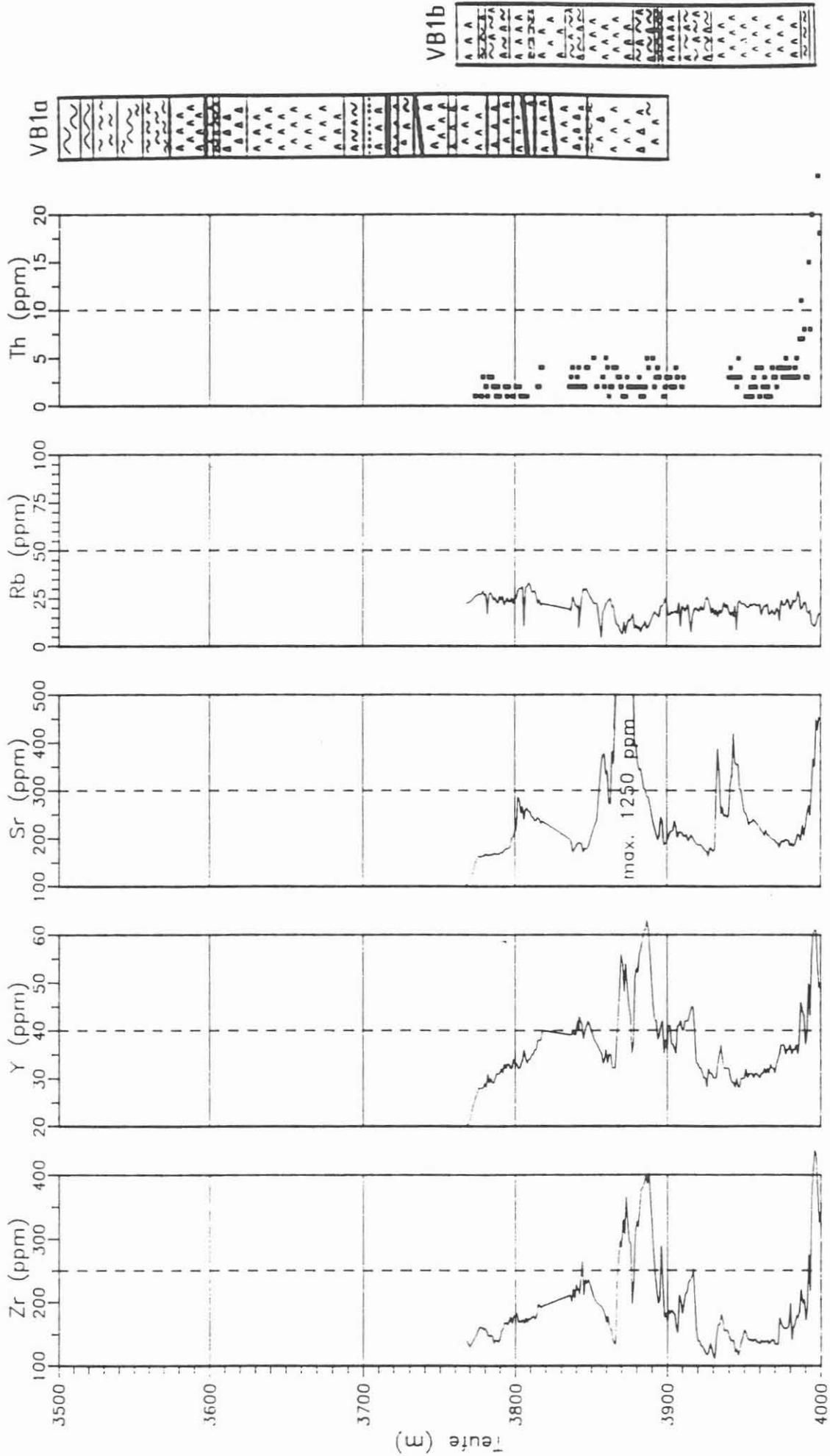


C.9.1.1

Tiefenlogs RFA Analysen VB 1b

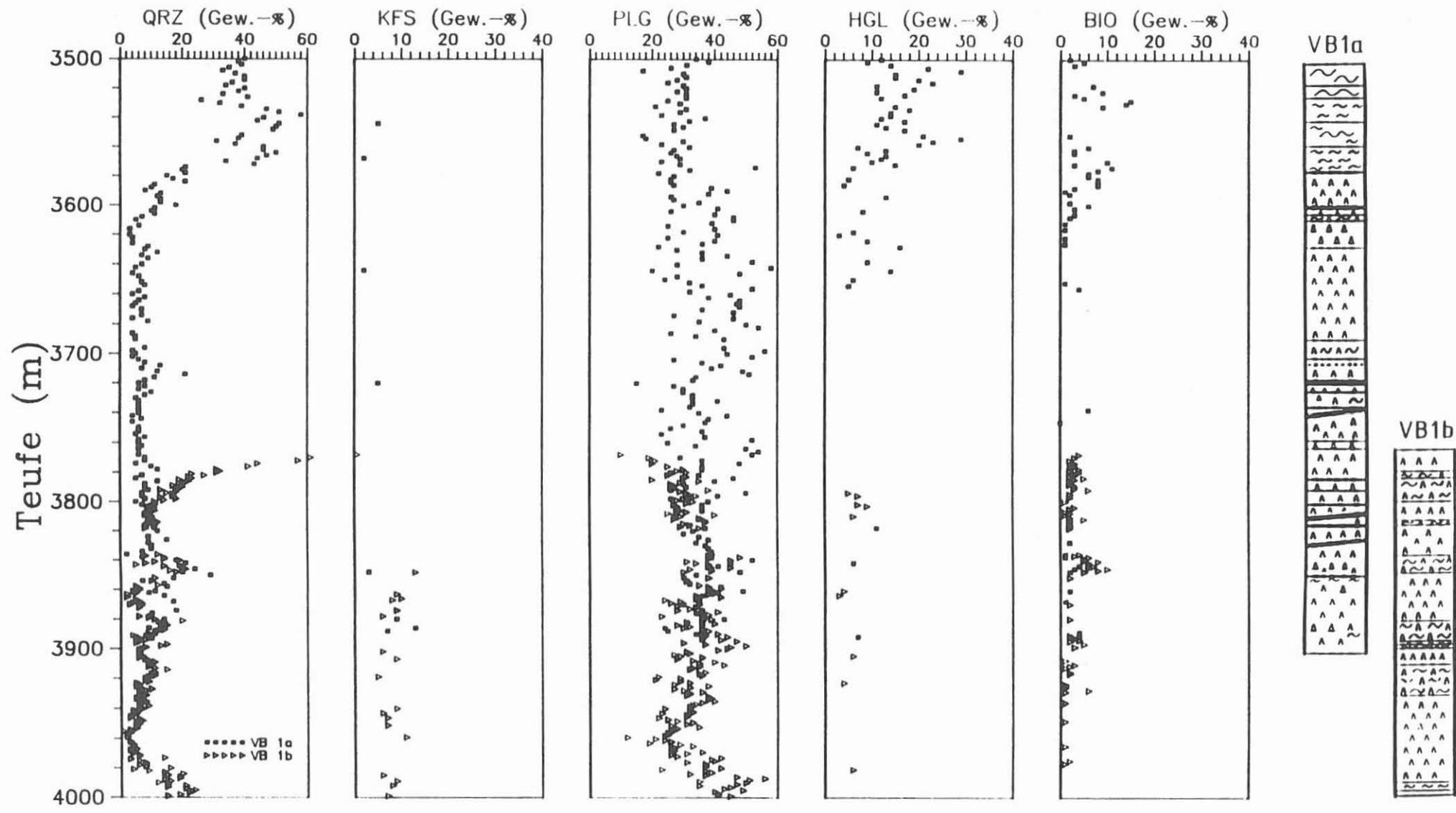


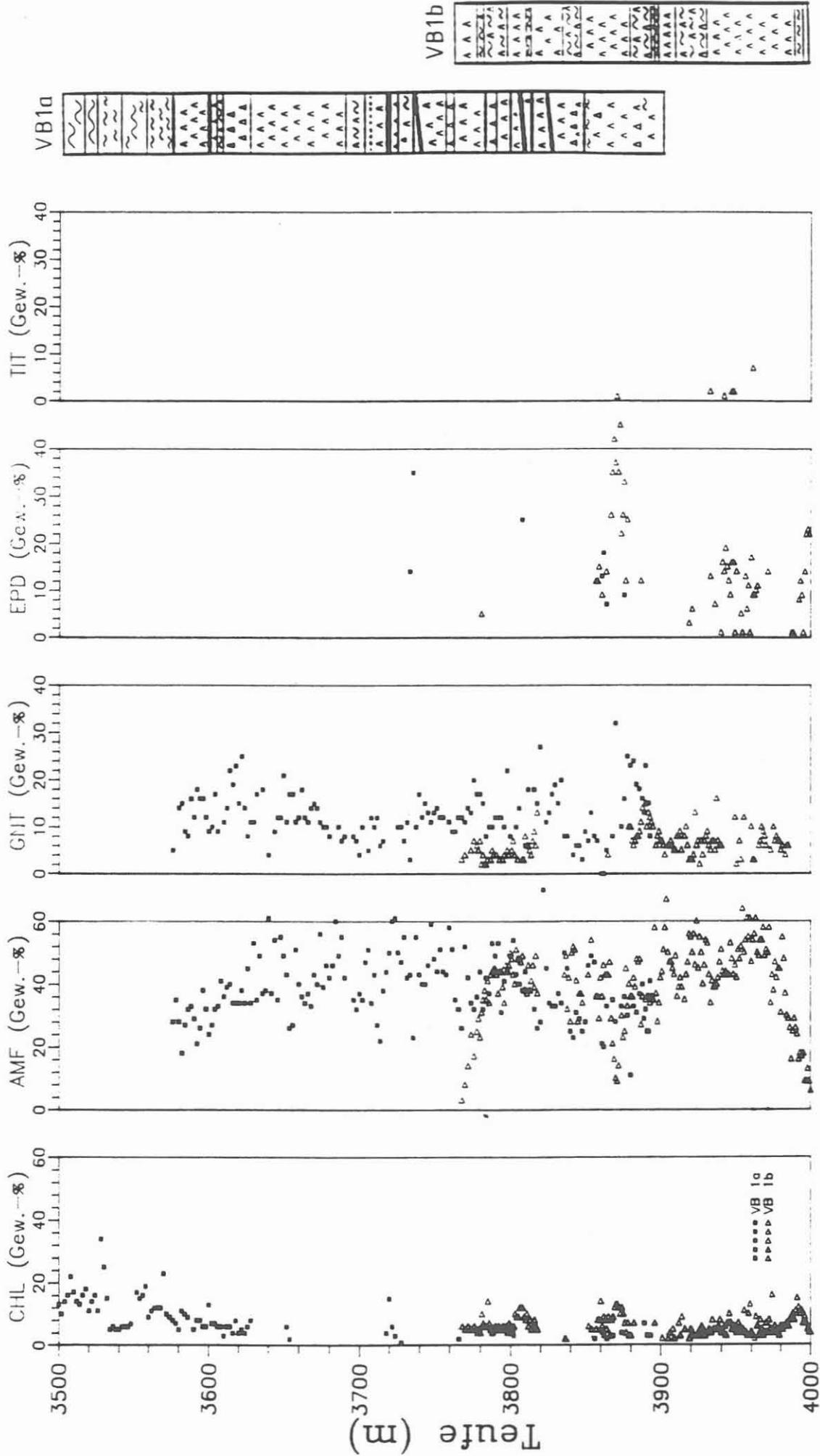




C.9.2

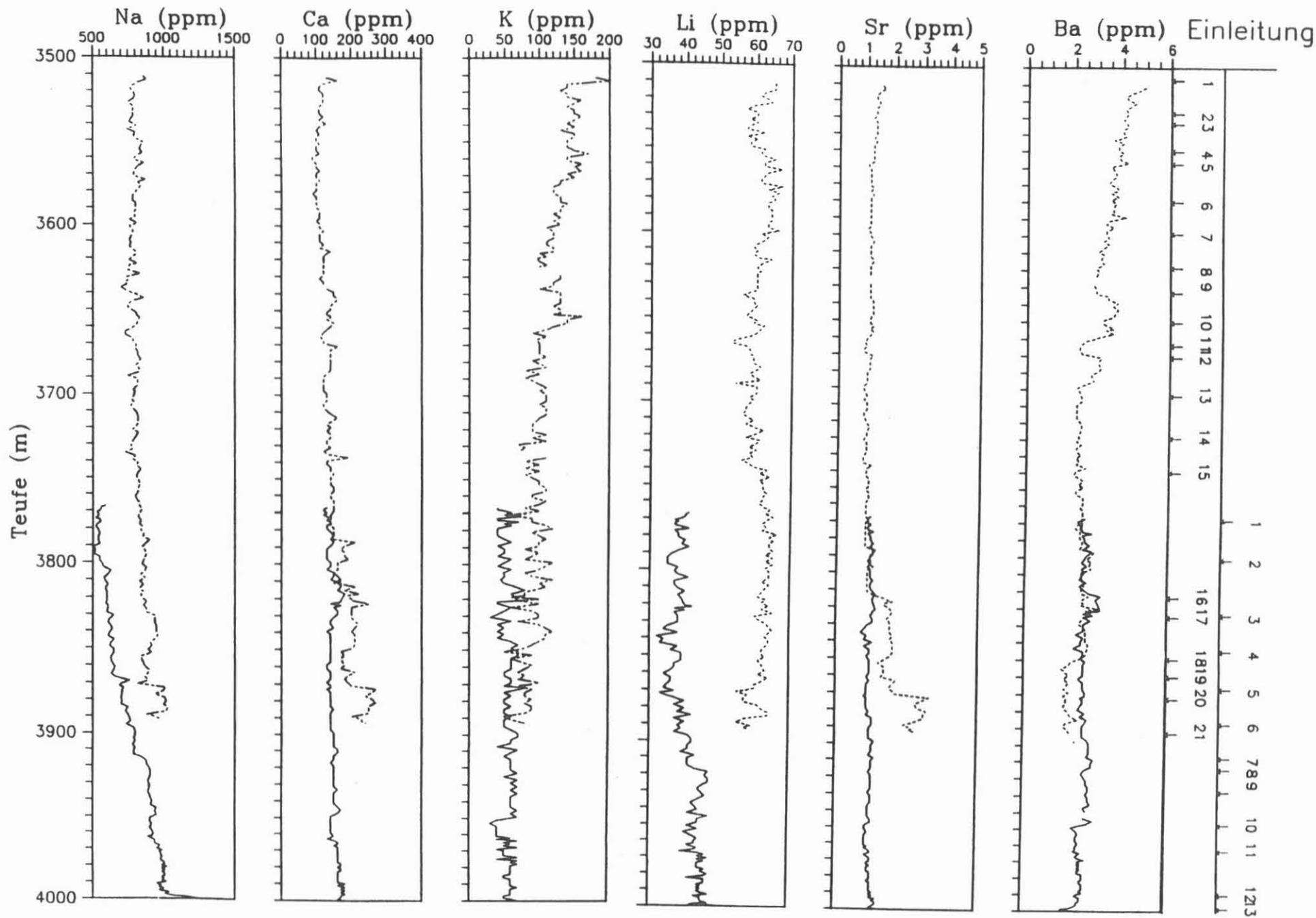
Tiefenlogs RDA Analysen (1:2000)



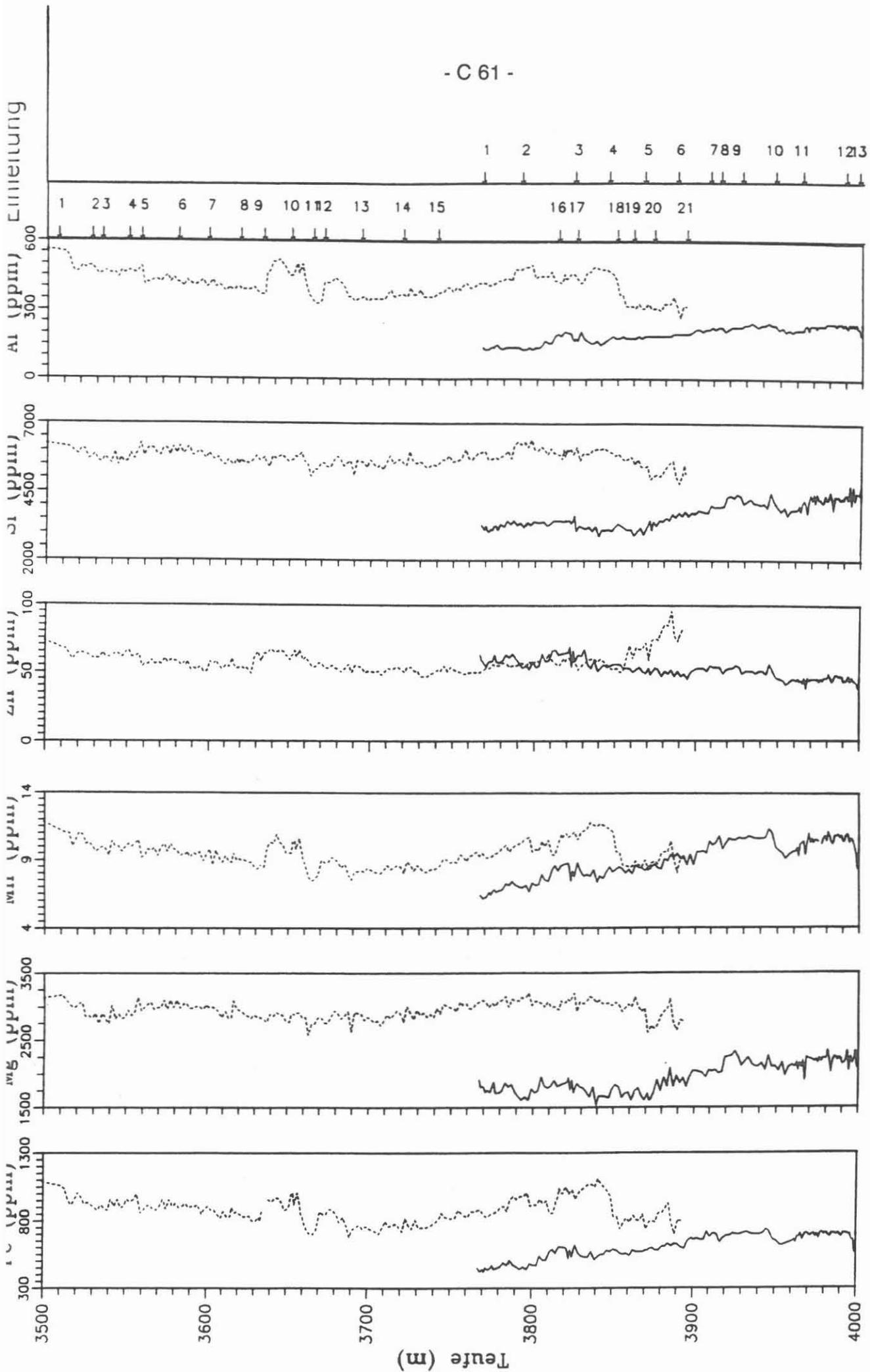


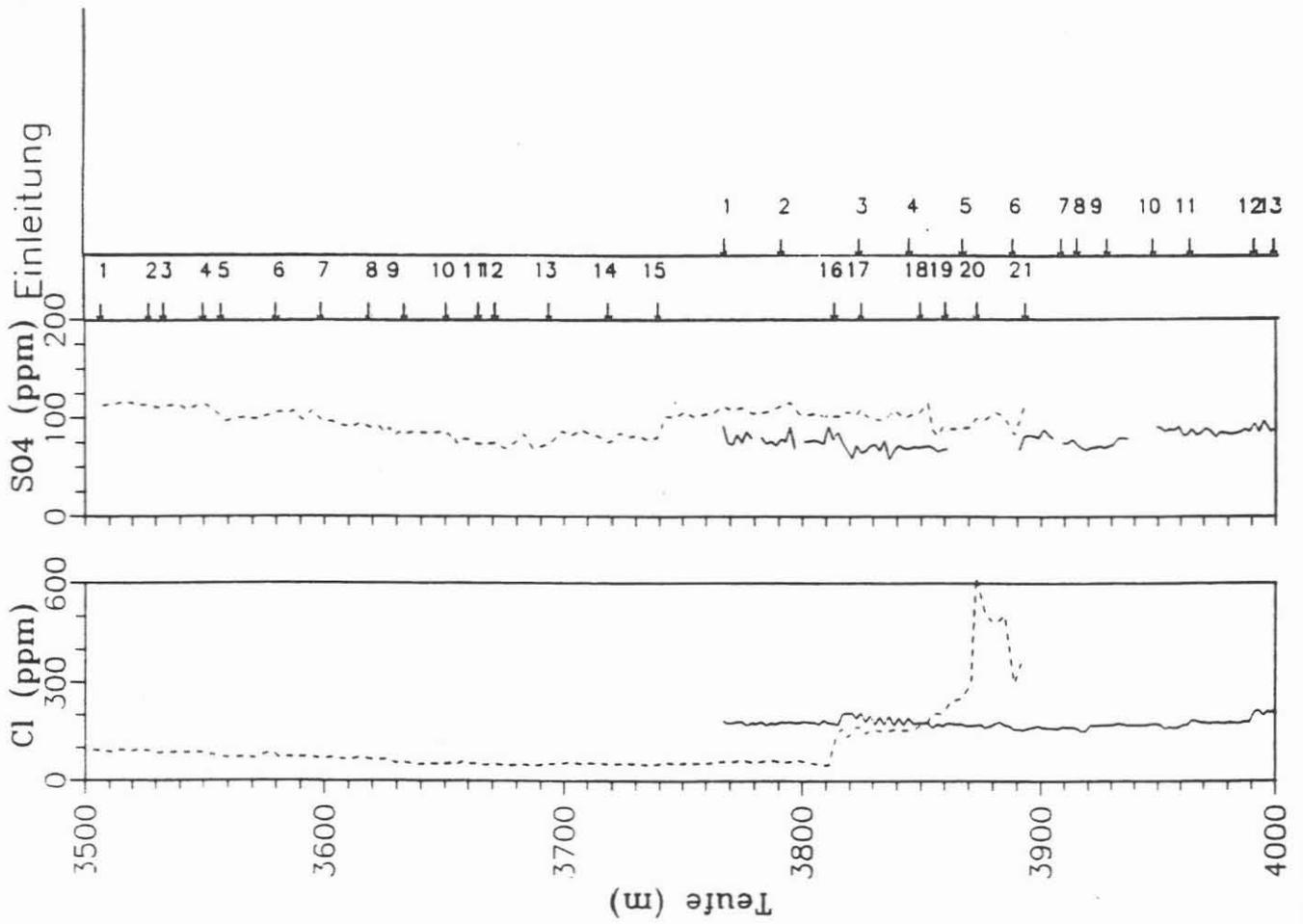
C.9.3

Tiefenlogs der Kationen- und
Anionenanalysen (1:2000)



- C 61 -





**C.9.3.1: Zusammenfassung der Spülungseinleitungen der VB1a im
Teufenbereich von 3503.3 m - 3893 m.**

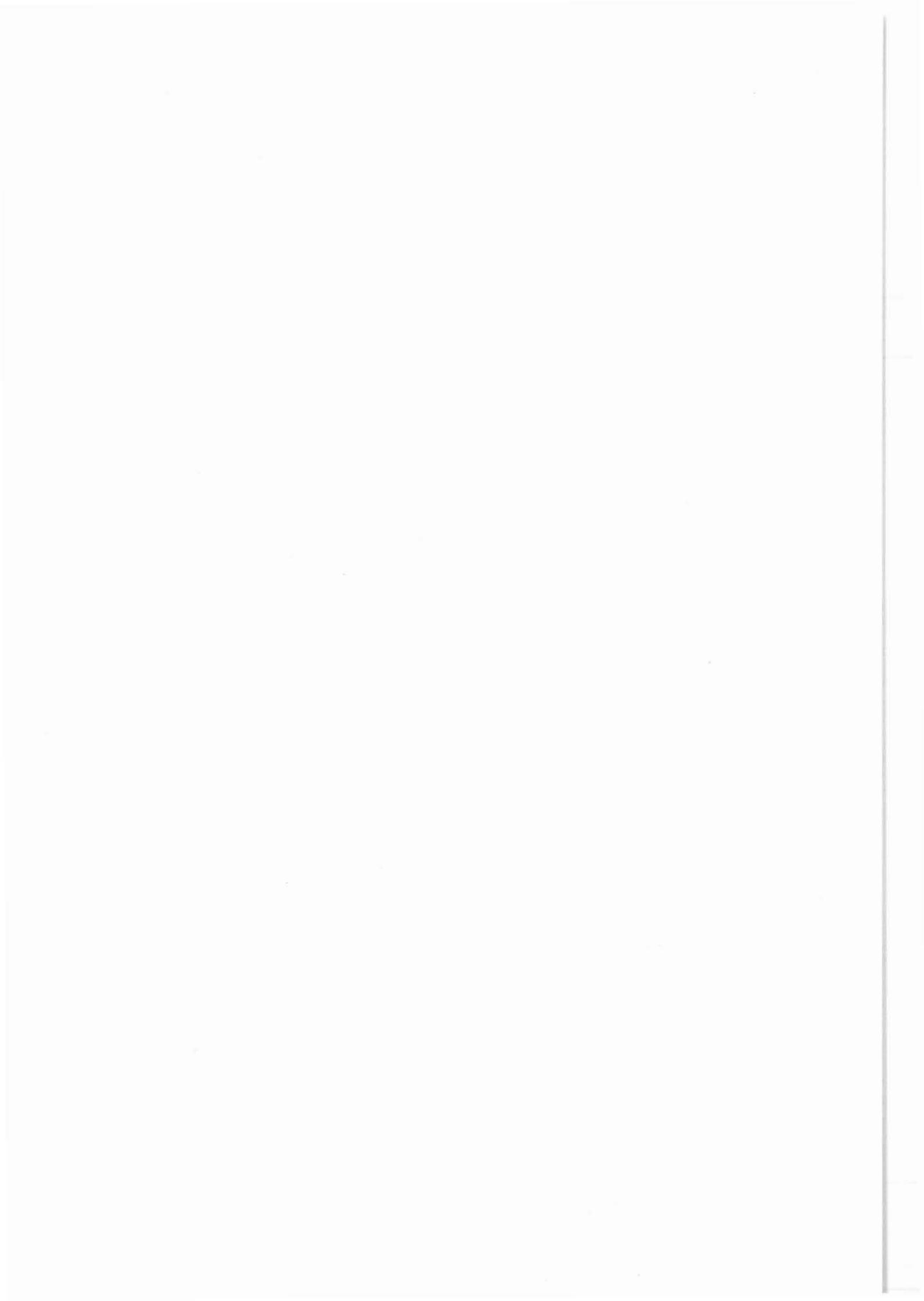
Nr.	Datum	Teufe (m)	Technische Einleitungen	TCV (m ³)	pH-Wert
1	10.11.88	3507.2	9 m ³ 2.3% D-HT 10 kg NaOH	101.8	10.0
2	13.11.88	3527.4	10 kg NaOH	92.8	10.3
3	15.11.88 16.11.88	3533.7	5 m ³ 2.5% D-HT 3 m ³ 2.5% D-HT	98.3 100.6	10.2 10.1
4	17.11.88 18.11.88 19.11.88 23.11.88	3550 3550.6 3553.5 3553.5	3 m ³ 2.5% D-HT 10 kg NaOH 5 m ³ 2.5% D-HT 5 m ³ 2.5% D-HT	100.1 100 98.6 99.8	10.1 10.5 10.4 10.3
5	24.11.88 25.11.88	3557.5 3557.5	10 m ³ 2.5% D-HT 7 m ³ 2.2% D-HT	93.1 99.8	10.2 10.2
6	28.11.88	3580.6	9 m ³ 1.67% D-HT 10 m ³ 1.75% D-HT	102.7	10.1
7	01.12.88	3598.8	10 m ³ 2.0% D-HT	97.7	10.0
8	03.12.88	3618.9	10 m ³ 1.0% D-HT 10 kg NaOH	100.7	10.0
9	04.12.88 14.12.88	3628 3633.5	7 m ³ H ₂ O 10 m ³ 1.75% D-HT 5 m ³ 2.5% D-HT	101.5 97.7	10.1 10.0
10	15.12.88 18.12.88	3650.8 3658	9 m ³ 1.9% D-HT 10 kg NaOH 10 m ³ 2.0% D-HT 10 kg NaOH	99.1 99.1	10.0 10.1
11	19.12.88	3664.4	6 m ³ 2.0% D-HT 4 m ³ 2.2% D-HT 10 kg NaOH	102.1	10.1
12	20.12.88	3671.4	4.5 m ³ 2.2% D-HT	101	10.2
13	22.12.88	3694	10 m ³ 2.2% D-HT 10 kg NaOH	102.4	10.5
14	28.12.88	3719.3	9 m ³ 2.2% D-HT	103.3	10.4
15	29.12.88	3740.1	6 m ³ 2.5% D-HT	105	10.4

C.9.3.1: Fortsetzung

Nr.	Datum	Teufe (m)	Technische Einleitungen	TCV (m³)	pH-Wert
16	04.01.89	3813.9	6 m³ 2.5% D-HT	103.7	10.0
	05.01.89	3813.9	10 m³ 2.5% D-HT	105.6	9.9
	07.01.89	3814.2	10 kg NaOH 6 m³ H ₂ O	105.6	10.0
17	10.01.89	3825.3	10 kg NaOH	101.6	9.9
	11.01.89	3829.6	6 m³ 2.5% D-HT	101.4	10.1
			10 kg NaOH		
18	14.01.89	3849.6	10 m³ 2.5% D-HT	108	9.8
			10 kg NaOH		
			6 m³ 2.5% D-HT		
	21.01.89	3849.6	10 m³ 2.25% D-HT	102	10.0
	25.01.89	3854.7	10 m³ 2.0% D-HT	103.1	10.2
		10 m³ 1.9% D-HT			
19	26.01.89	3859.8	10 m³ 1.5% D-HT	107.3	10.1
			10 m³ 1.0% D-HT		
20	01.02.89	3872.8	8 m³ 1.25% D-HT	105	10.0
			3 m³ 1.0% D-HT		
21	04.02.89	3888.5	8 m³ 1.5% D-HT	107	10.0
	05.02.89	3893.0	10 kg NaOH 3 m³ 1.0% D-HT	107	9.9

C.9.3.2: Zusammenfassung der Spülungseinleitungen der VB1b im Teufenbereich von 3767 m - 4000.1 m.

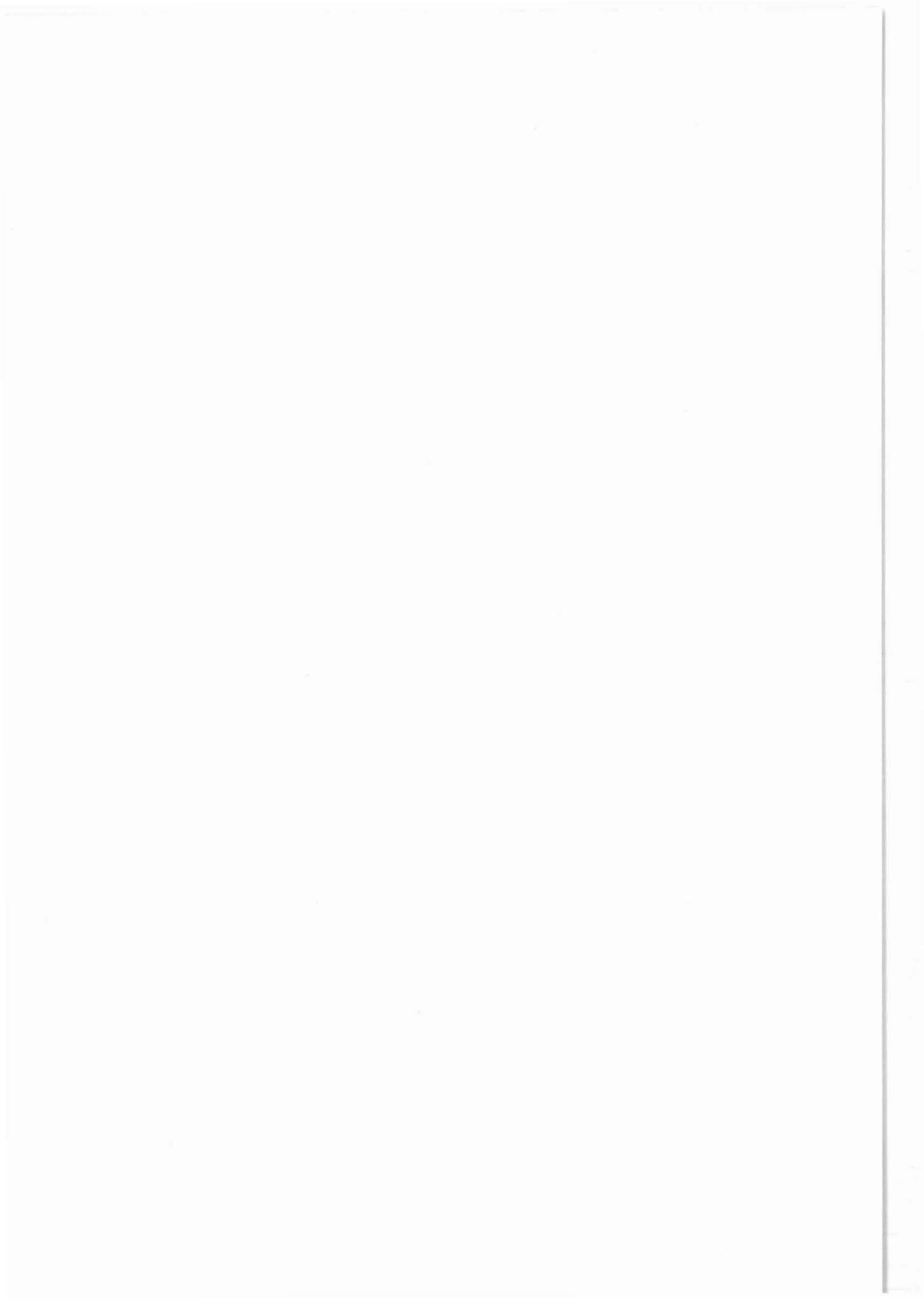
Nr.	Datum	Teufe (m)	Technische Einleitungen	TCV (m³)	pH-Wert
1	03.03.89	3768.2	2 m³ Esteröl	90	9.5
2	06.03.89	3791.7	8 m³ 2.2% D-HT 5 Faß Petrofree 10 kg NaOH	104.2	9.7
3	11.03.89	3824.2	10 kg NaOH	100.2	9.3
	12.03.89	3824.4	8 m³ 2.5% D-HT 3 Faß Petrofree 50 kg NaOH	105	10.0
4	15.03.89	3845.2	6 m³ 2.5% D-HT 5 kg NaOH	104.6	9.6
5	17.03.89	3867.2	10 kg NaOH	101.9	9.4
	18.03.89	3871.0	8 m³ 2.5% D-HT mit 8% Esteröl 10 kg NaOH	105	9.5
6	20.03.89	3887.6	10 kg NaOH	102	9.6
7	23.03.89	3907.8	10 kg NaOH	103.3	9.2
8	24.03.89	3914.6	8 m³ 2.5% D-HT mit 8% Esteröl	106	9.4
9	26.03.89	3927.6	10 kg NaOH	102	9.3
10	28.03.89	3947	6 m³ 2.5% D-HT 5 m³ H₂O 3 Faß Petrofree 10 kg NaOH	106.5	9.6
	29.03.89	3949.6	4 m³ 2.5% D-HT 6 m³ H₂O	108	9.6
11	31.03.89	3963.2	10 kg NaOH	108	9.5
12	02.04.89	3989.6	6 m³ 1.25% D-HT 4 Faß Petrofree 20 kg NaOH 6 m³ 2.5% D-HT	110	9.6
13	03.04.89	3997.9	10 m³ ausgeschert mit 100 L D-TA und 20 kg NaOH wieder zugesetzt	109	10.1
	04.04.89	4000.1	10 m³ ausgeschert mit 50 L D-TA und 10 kg NaOH wieder zugesetzt	107	10.3



D. Geophysik

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB
Ergebnisse der geowissenschaftlichen
Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor
(Windischeschenbach)
Teufenbereich: 3500 - 4000.1 m

A. Rauen
E. Huenges
Ch. Bucker
K. E. Wolter
J. Wienand



KTB-Report	90-2	D1..D64	53 Abb.	Hannover 1990
------------	------	---------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 3500 bis 4000.1 m:

D. Geophysik

A. Rauen, E.Huenges, Ch. Bücken, K.E. Wolter & J. Wienand *)

Inhaltsverzeichnis :

D.1	Dichte.....	D 2
D.2	Ultraschallseismik.....	D 5
D.3	Natürliche Radioaktivität.....	D14
D.4	Wärmeleitfähigkeit.....	D23
D.5	Natürliche Remanente Magnetisierung (NRM)....	D28
D.6	Magnetische Suszeptibilität.....	D34
D.7	Elektrische Leitfähigkeit.....	D38
D.8	Entspannungsdeformation und akustische Emission.....	D44
D.9	Permeabilität.....	D57
D.10	Porosität.....	D60
D.11	Literatur.....	D62
D.12	Danksagung.....	D64

*) Adresse der Autoren: KTB - Feldlabor
Postfach 67
D - 8486 Windischeschenbach

D.1 Dichte

D.1.1 Allgemeines

Die Dichte der Bohrkerne (3500 - 3889 m) wurde an 408 Kernen nach dem Archimedischen Prinzip bestimmt (siehe KTB-Report 88-1, BÜCKER et al. 1988). Die Dichtebestimmung der Cuttings (3767 - 4000) erfolgte mit dem Pyknometer nach dem im KTB-Report 88-6 (RAUEN et al. 1988) beschriebenen Verfahren. Dargestellt sind die Dichtedaten in Abhängigkeit von der Teufe in Abb. D.1.1. Ebenfalls sind in der Abb D.1.1 die Dichtewerte der Zentrifugenproben dargestellt, die aus der Mineralphasenanalyse (RDA) berechnet wurden (siehe KTB-Report 88-9, HOMANN et al 1988).

D.1.2 Dichte der Bohrkerne

Im Bereich bis 3574 m beträgt die mittlere Dichte $2.74 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$. Bis zu dieser Teufe setzt sich die homogene Abfolge von Gneisen fort, die schon im KTB-Report 89-5 (WIENAND et al. 1989) beschrieben wurde. Die Schwankungsbreite reicht von 2.7 g/cm^3 , gemessen an einem Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis aus einer Teufe von 3501 m, bis zu 2.79 g/cm^3 , gemessen an einem Sillimanit-Biotit-Gneis aus einer Teufe von 3521 m. Unterhalb von 3574 m ist eine starke Heterogenität in den Dichtewerten erkennbar. Lithologisch handelt es sich hier um eine Abfolge von Metabasiten mit Einschaltungen verschiedener Gneise mit einer mittleren Dichte von $2.96 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$. Die Schwankungsbreite reicht von 2.62 g/cm^3 , gemessen an einem mittelkörnigen, undeutlich flaserigen Amphibolit mit mittelkörnigen, leukokraten, körneligen bis lagigen Meta-Apliten bis 3.29 g/cm^3 gemessen an einem Granat-Biotit-Hornblende-Gneis mit Amphibolit-Linsen.

Im Abbildung D.1.2 ist die Häufigkeitsverteilung der Dichtewerte dargestellt. In der Häufigkeitsverteilung deutlich zu erkennen sind die zwei verschiedenen Gesteinsarten, die sich durch die zwei Maxima bei 2.7 g/cm^3 (Gneise) und bei 2.9 g/cm^3 (Metabasite) abzeichnen.

D.1.3 Dichte der Cuttings

Cuttings fielen ab 3767 m (Beginn der VB1b) an. Ab hier wurde die Dichte der Cuttings kontinuierlich jeden Meter bestimmt. Die mittlere Dichte beträgt $2.91 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$. Die niedrigste Dichte (2.69 g/cm^3) wurde an einem Gemisch aus Amphibolit, Sillimanit-Biotit-Gneis und Quarz aus einer Teufe von 3777 m und die höchste Dichte (3.11 g/cm^3) wurde an Amphibolit aus einer Teufe von 3871 m gemessen. Bei den Cuttings ist ab 3980 m ein deutlicher Abfall der Dichtewerte erkennbar. Lithologisch läßt sich dies mit einer epidotreichen Störungszone erklären.

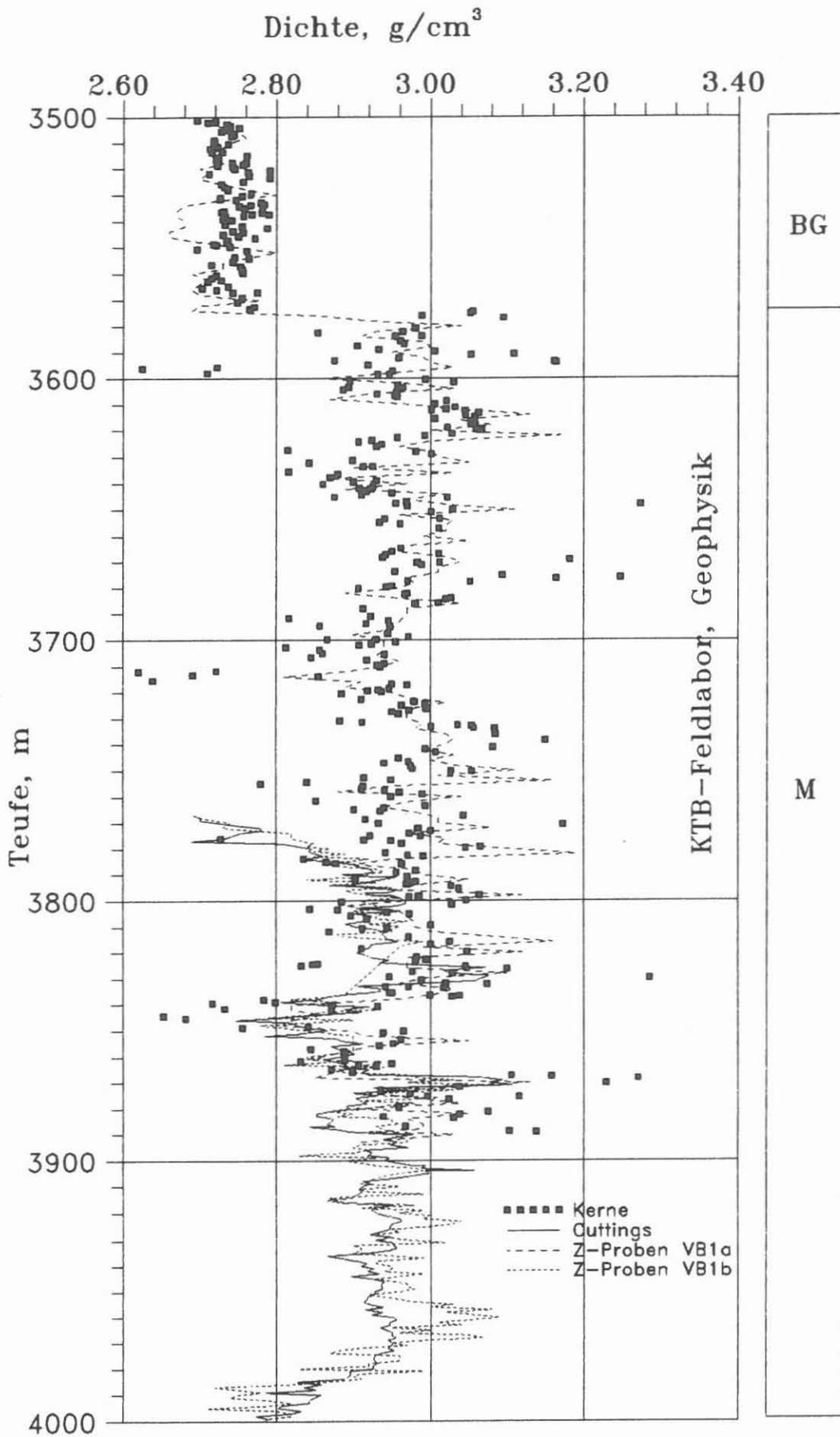


Abb. D.1.1: Teufenlog der Dichte

Vergleicht man die Dichtewerte der Cuttings und der Kerne, so stellt man eine recht gute Übereinstimmung fest. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die Kerne aus der VB1a und die Cuttings aus der VB1b stammen. In Abbildung D.1.3 ist die Häufigkeitsverteilung der Dichtewerte der Cuttings dargestellt.

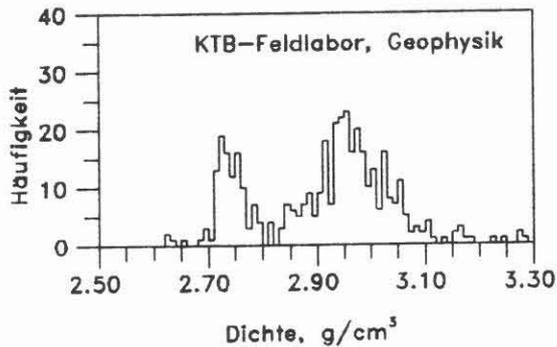


Abb. D.1.2: Häufigkeitsverteilung der an Kernen gemessenen Dichten

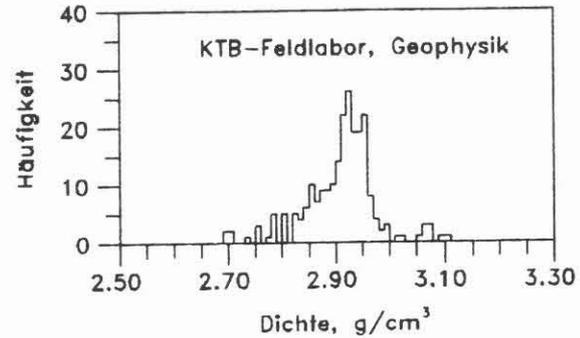


Abb. D.1.3: Häufigkeitsverteilung der an Cuttings gemessenen Dichten

D.1.4 Dichte der Zentrifugenproben

Vergleicht man in Abb. D.1.1 die Dichten der Zentrifugenproben mit denen der Kerne (VB1a), so läßt sich eine gute Übereinstimmung feststellen. Diese Übereinstimmung tritt auch beim Vergleich der Zentrifugenproben mit den Cuttings (VB1b) auf.

D.2 Ultraschallseismik

D.2.1 Einführung

Die Daten der p- und s-Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen wurden mit der am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München entwickelten Apparatur ermittelt (Huenges et al. 1989).

Das auffallendste Ergebnis im vorliegenden Teufenbereich ist eine starke Zunahme der Geschwindigkeiten bei 3575 m, bei gleichzeitigem Anwachsen der Dichte und dem Wechsel der Lithologie von Sillimanit-Gneis zu Granat-Amphibolit. Im Gegensatz zu anderen Parametern zeigen die Wellengeschwindigkeiten jedoch einen eher kontinuierlichen Übergang an.

D.2.2 Ergebnisse

Die dargestellten Daten aller Abbildungen umfassen alle Meßwerte, d.h. sowohl Werte, die direkt nach Entnahme der Bohrkerne erfaßt wurden, als auch solche, die zur Untersuchung zeitabhängigen Verhaltens später gemessen wurden.

Die Abbildungen D.2.1 bis D.2.4 zeigen die maximalen und mittleren radialen (d.h. senkrecht zur Kernachse gemessenen) p-Wellengeschwindigkeiten, ihre Anisotropie sowie die axialen (d.h. parallel zur Kernachse gemessenen) p- und s-Wellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Teufe.

In Abbildung D.2.1 ist ein allmählicher Anstieg der maximalen radialen p-Wellengeschwindigkeit von etwa 5900 m/s auf etwa 6500 m/s in einem Teufenbereich von 3540 bis 3580 m zu erkennen. Die axialen Geschwindigkeiten v_p und v_s (Abb. D.2.4) steigen ebenfalls allmählich von 5200 m/s auf ca. 6000 m/s bzw. 2800 m/s auf 3300 m/s an.

Bei den mittleren radialen p-Wellengeschwindigkeiten (Abb. D.2.2) hingegen ist ein fast sprungartiger Anstieg bei einer Teufe von 3575 m zu erkennen. Die Anisotropie (Abb. D.2.3) nimmt mit einem Mittelwert von 5% im Amphibolit kleinere Werte als im Gneis an. Die Streuung der gemessenen Werte ist in allen vier Logs unterhalb von 3575 m erheblich größer als darüber, was vorwiegend auf vorhandene Gneis-Einschaltungen im Amphibolit zurückzuführen sein dürfte.

Die Abbildungen D.2.5 und D.2.6 zeigen 6 Histogramme der mittleren radialen p-Wellengeschwindigkeit und der Dichte. Die im oberen Teil erkennbaren zwei Maxima sind, wie die im mittleren und unteren Teil erfolgte Aufteilung (bezüglich der Teufe) zeigt, durch das Vorherrschen von Gneis oberhalb und von Amphibolit unterhalb von 3575 m bedingt. Die Mittelwerte beider Gruppen stimmen mit 5765 m/s und 6284 m/s gut mit den Mittelwerten für Gneis und Amphibolit in geringeren Teufenbereichen der Vorbohrung überein. Die Histogramme für den Teufenbereich 3575m - 3900 m sind relativ breit, was in Anbe-

tracht des lithologischen Befundes dadurch zu erklären ist, daß in diesem Teufenbereich neben dem dominierenden Amphibolit auch untergeordnet Gneis auftritt.

Die Korrelation zwischen den maximalen radialen bzw. axialen Geschwindigkeiten mit den Dichten (Fig. D.2.7 und D.2.8) ist schwach ($r = 0.64$ bzw. $r = 0.57$). Bei einer Aufteilung in die Teufenbereiche 3500 m - 3575 m und 3575 m - 3900 m ist innerhalb dieser Gruppen praktisch gar keine Korrelation zu erkennen ($r=0.13$ bzw. $r=0.44$ und $r=0.06$ bzw. $r=0.42$). Überraschenderweise liefert aber eine Regressionsanalyse zwischen Dichte und maximaler radialer p-Wellen-Geschwindigkeit mit

$$v_p = (1636 * \text{Dichte} + 1587) \text{ m/s}$$

einen Zusammenhang, der praktisch deckungsgleich mit dem Ergebnis einer gleichartigen Analyse für den Teufenbereich 2500 m - 3000 m ist. Für den Zusammenhang zwischen der axialen p-Wellengeschwindigkeit und der Dichte ergibt sich dagegen ein davon stark abweichendes Ergebnis (Fig. D.2.8). Die Ursache dürfte darin zu sehen sein, daß die axialen p-Wellengeschwindigkeiten stärker als die maximalen radialen p-Wellengeschwindigkeiten (die i.a. parallel zur Foliation gemessen wurden) durch Effekte der Druckentlastung und Gefügauflockerung beeinflußt werden.

Generell sind Regressionsanalysen zwischen Dichten und Geschwindigkeiten wegen der großen Restvarianzen nur von geringem prognostischem Wert. Sie sollten nicht als eindeutige Zusammenhänge mißverstanden werden.

Die Geschwindigkeitsanisotropie der untersuchten Kerne variiert sehr stark (Fig. D.2.3) und ist im Mittel in den Gneisen deutlich größer als in den Amphiboliten. Eine Gegenüberstellung von mittlerer radialer p-Wellengeschwindigkeit und zugehöriger Anisotropie (Fig. D.2.9) zeigt, daß sowohl der Mittelwert wie auch die Varianz der Anisotropie mit zunehmender mittlerer Geschwindigkeit abnehmen. Das ist verständlich, denn große Anisotropie ist mit relativ kleinen mittleren Geschwindigkeiten verknüpft und umgekehrt lassen hohe mittlere Geschwindigkeiten keine großen Anisotropien zu, da die maximalen Geschwindigkeiten begrenzt sind. Die Gneise liegen in Fig. D.2.9 überwiegend bei kleineren Geschwindigkeiten und die Amphibolite überwiegend bei hohen Geschwindigkeiten. Bei den ganz rechts liegenden Punkten handelt es sich um Messungen an relativ homogenen isotropen Amphiboliten, deren Geschwindigkeiten durch Effekte der Druckentlastung nur wenig beeinflußt wurden.

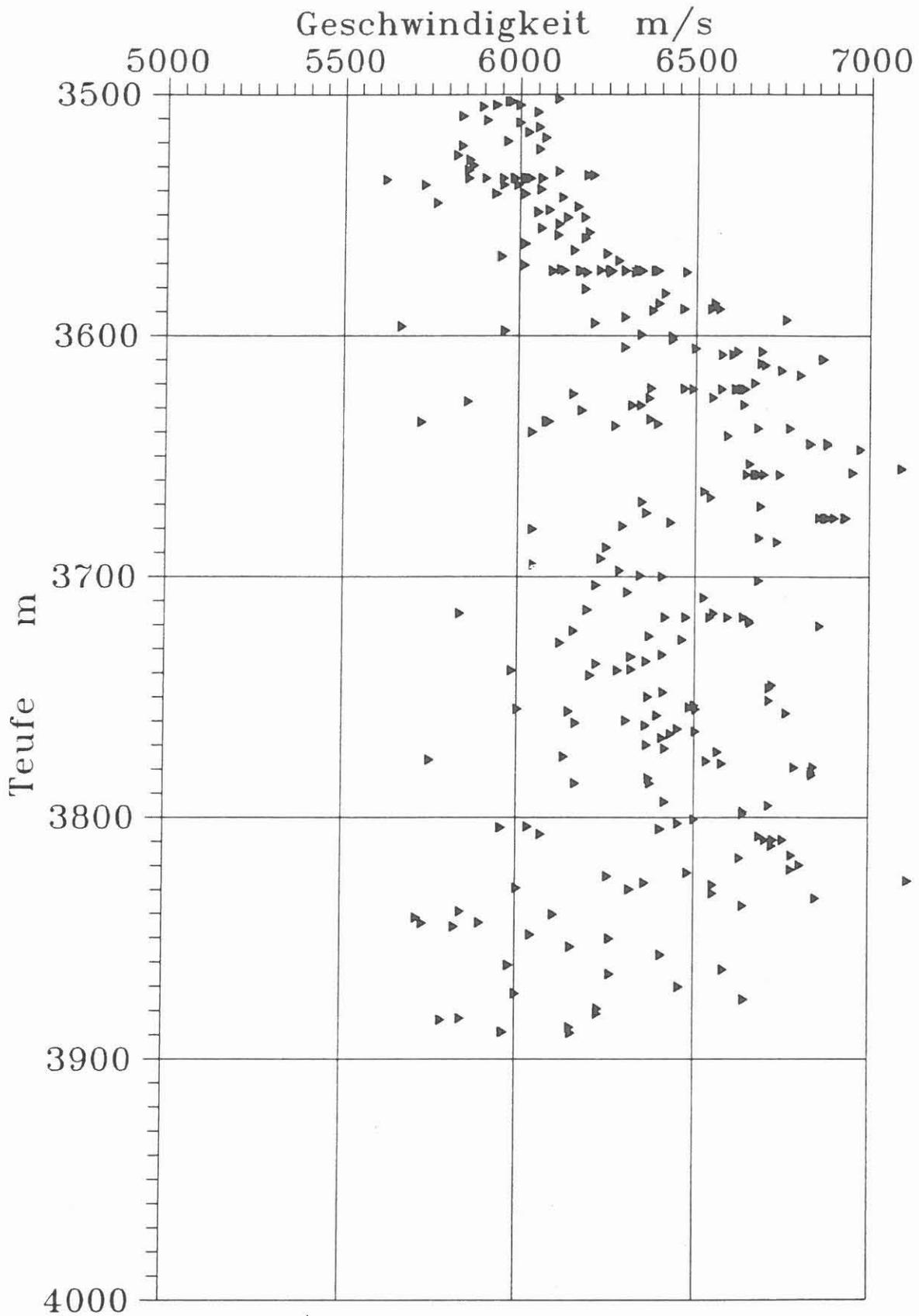


Abb. D.2.1: Log der maximalen radialen p-Wellengeschwindigkeit.

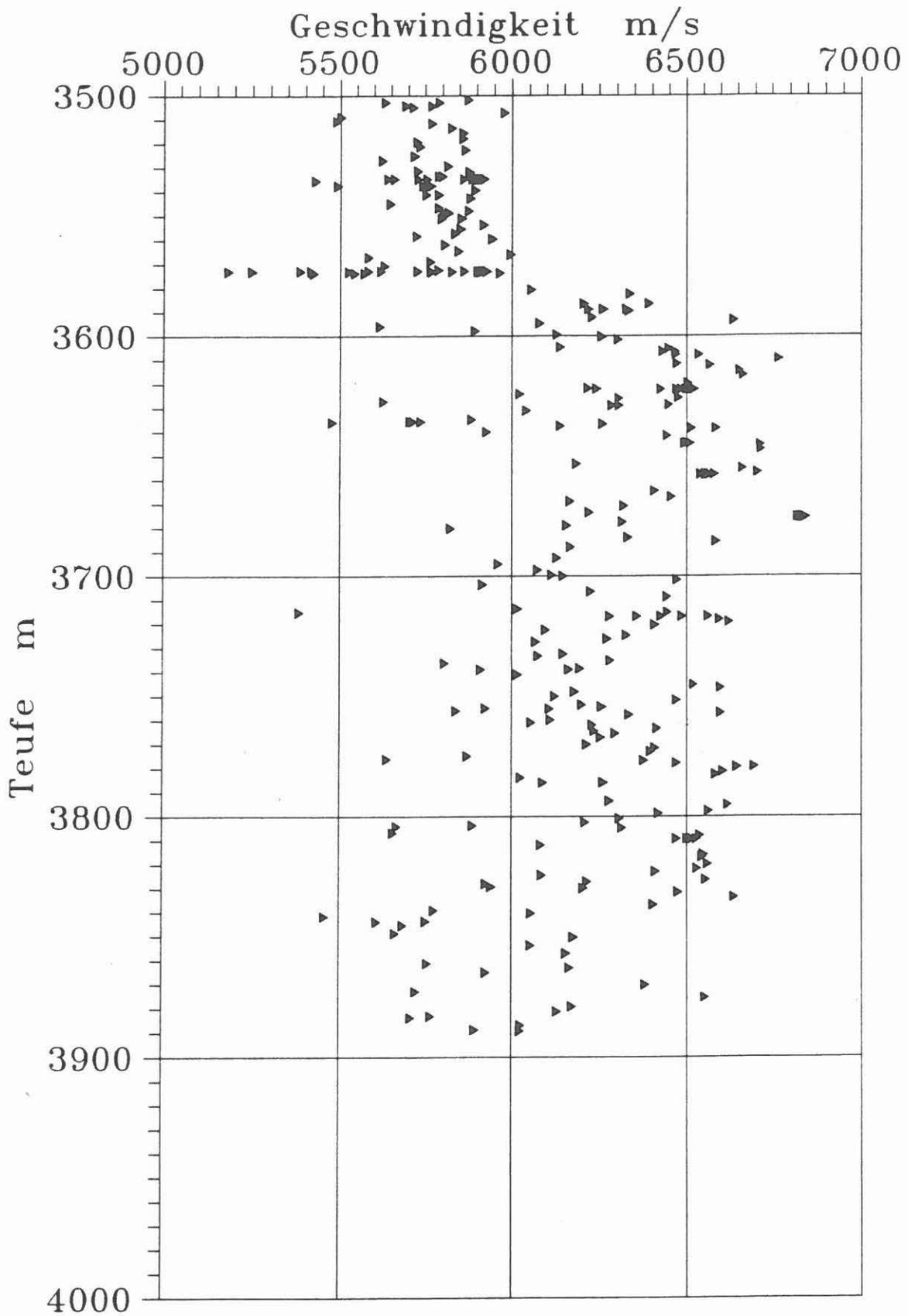


Abb. D.2.2: Log der mittleren radialen p-Wellengeschwindigkeit.

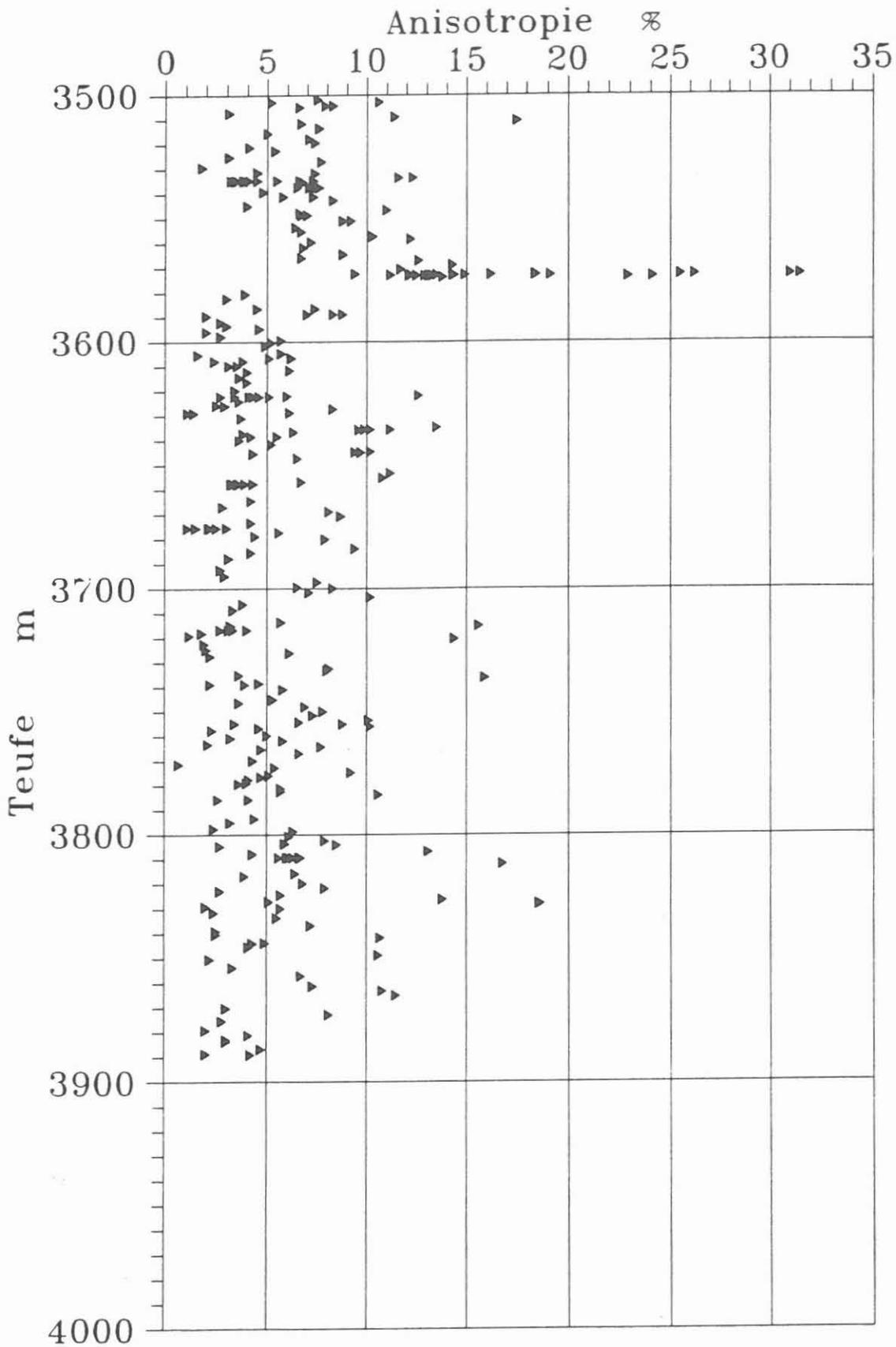


Abb. D.2.3: Log der Anisotropie radialer p-Wellengeschwindigkeiten. Streuung und lokale Maxima sind teilweise bedingt durch zeitabhängige Effekte die bei Wiederholungsmessungen hervortreten.

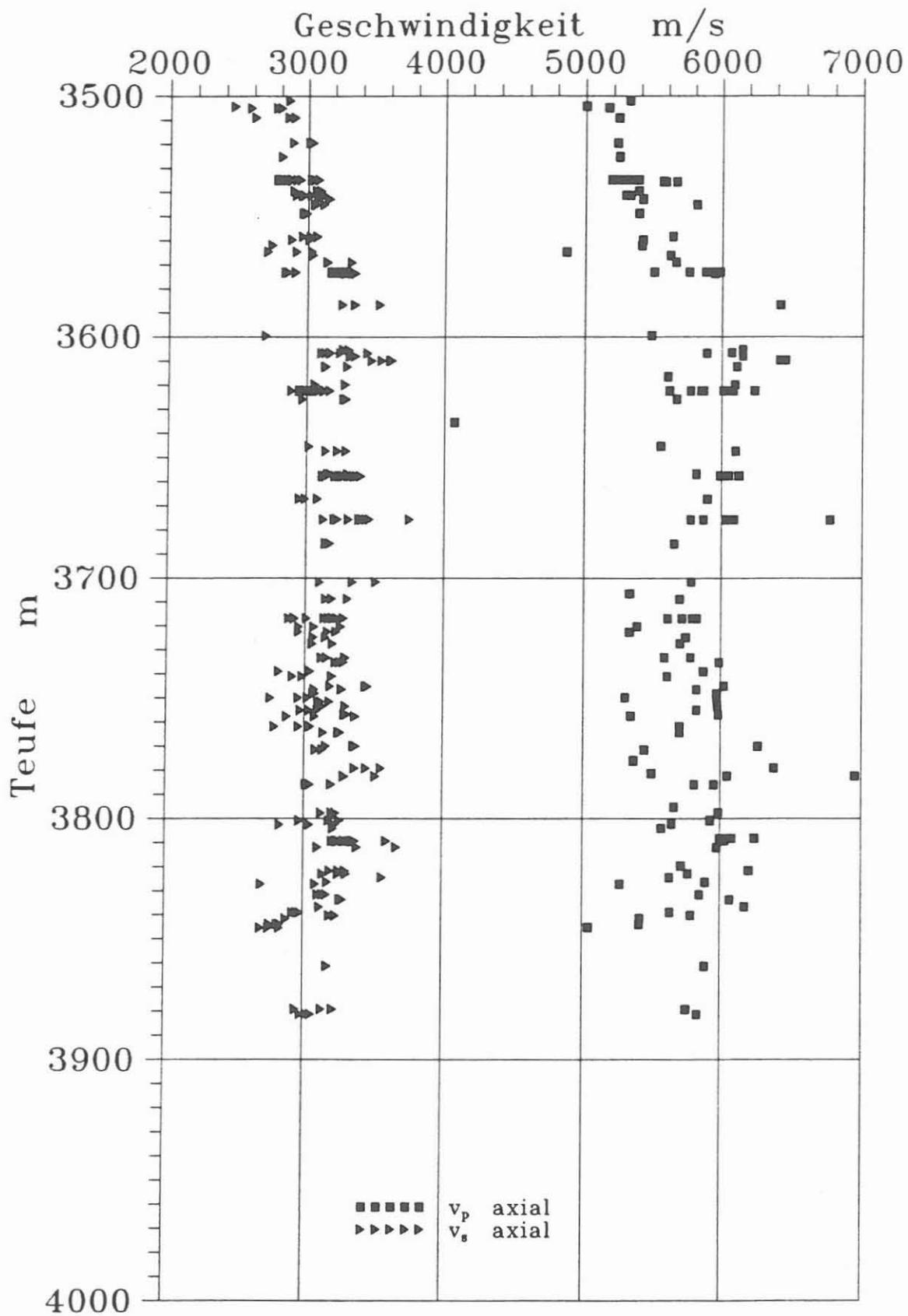


Abb. D.2.4: Logs der axialen p- und s-Wellengeschwindigkeiten.

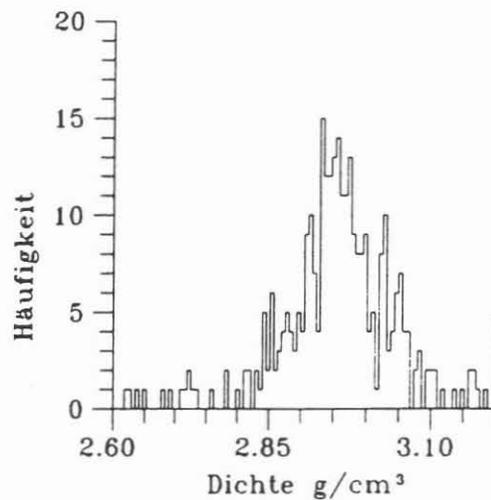
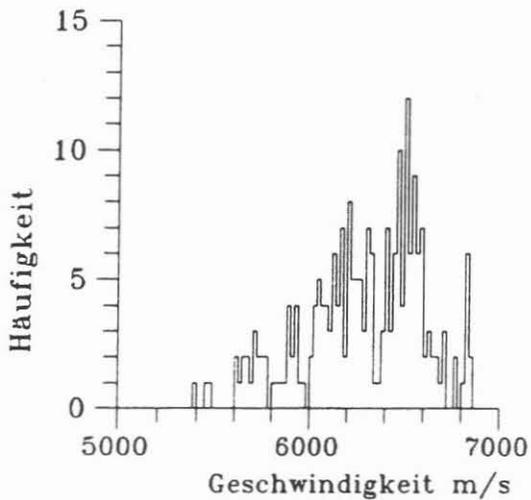
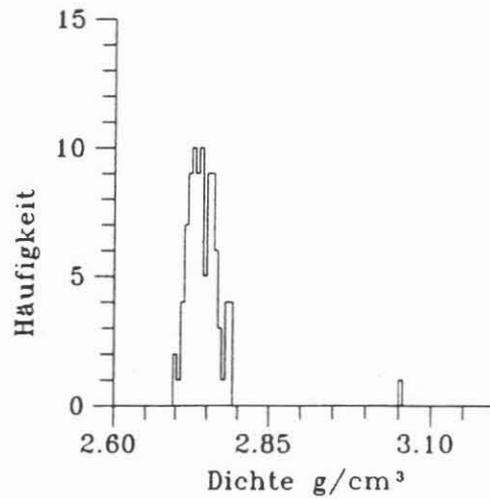
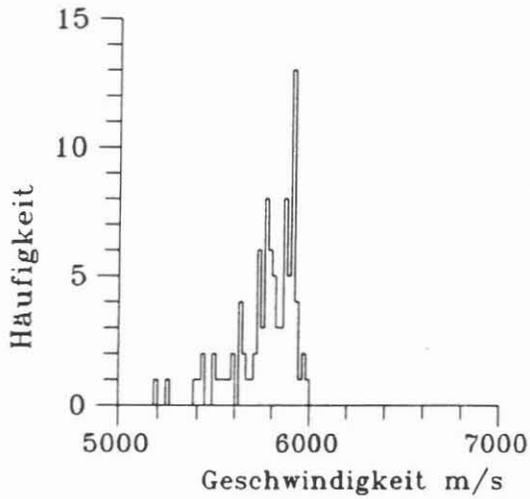
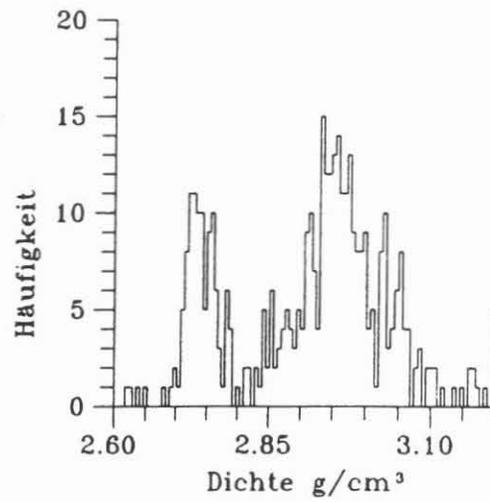
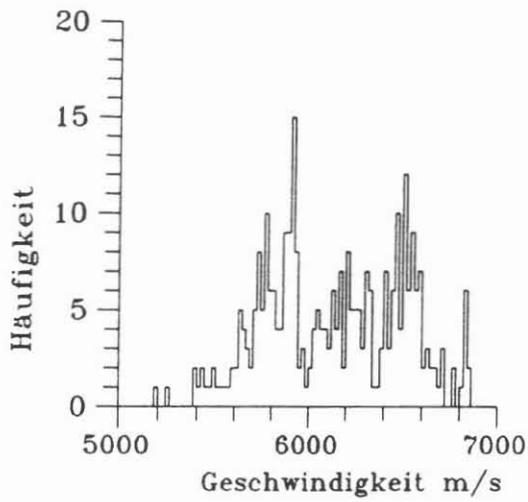


Abb. D.2.5: Histogramm der mittl.
rad. p-Wellengeschwindigkeit
Oben : 3500 m bis 3900 m
Mitte : 3500 m bis 3575 m
Unten: 3575 m bis 3900 m

Abb. D.2.6: Histogramm der
Gesteinsdichte
Oben : 3500 m bis 3900 m
Mitte : 3500 m bis 3575 m
Unten: 3575 m bis 3900 m

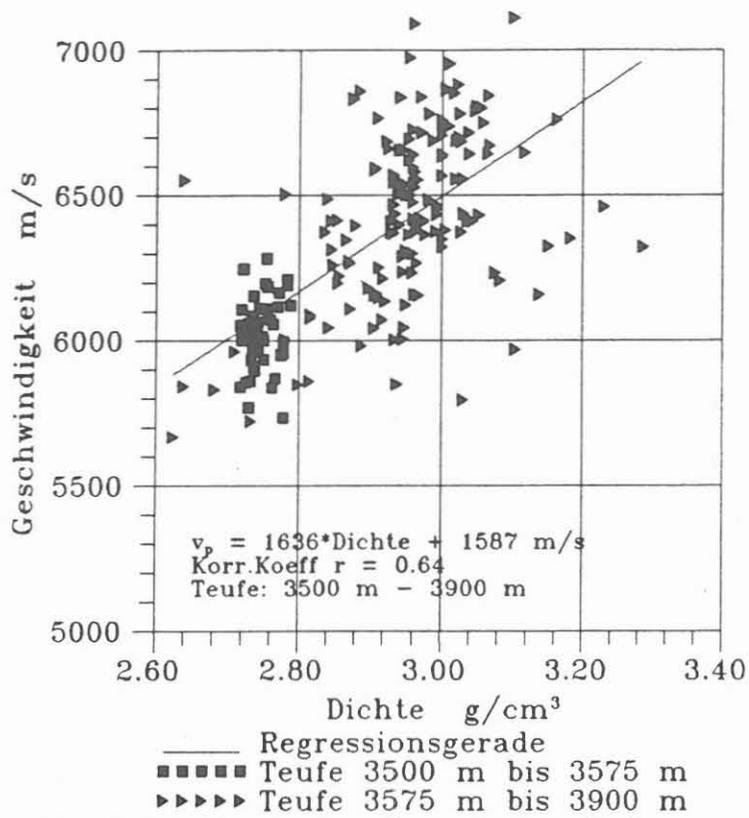


Abb. D.2.7: Diagramm der max. radialen p-Wellengeschwindigkeit gegen Dichte

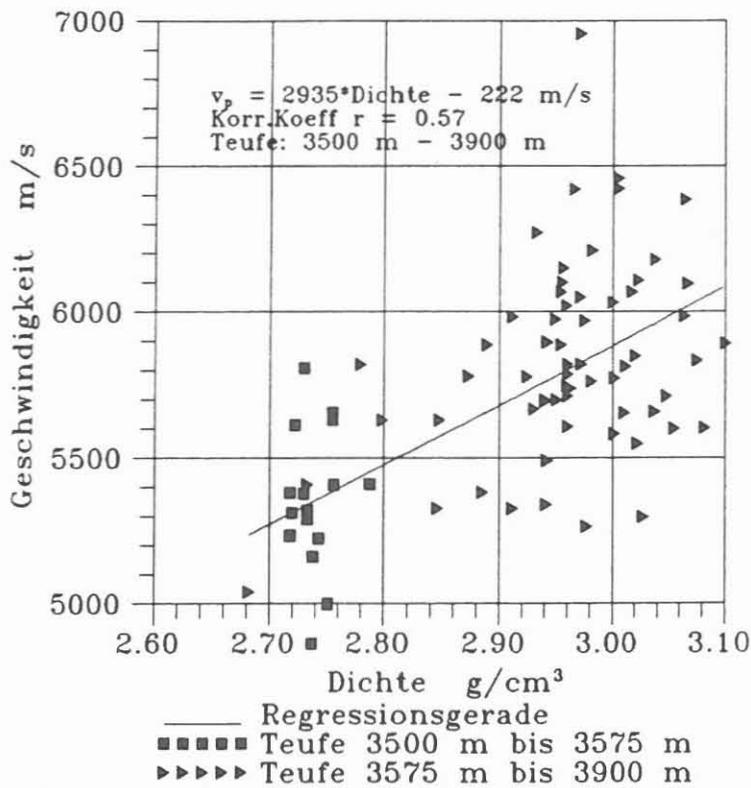


Abb. D.2.8: Diagramm der axialen p-Wellengeschwindigkeit gegen Dichte

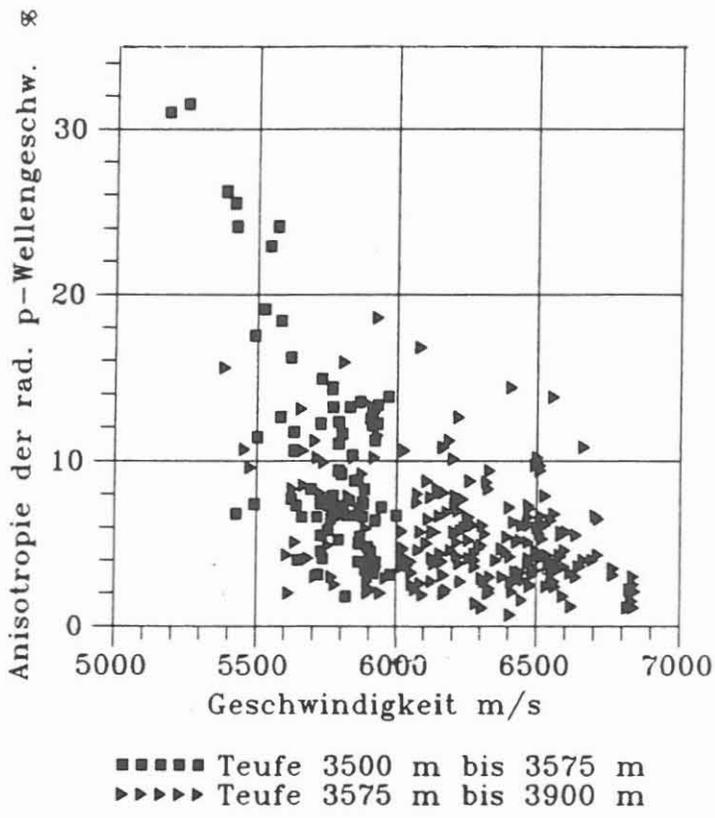


Abb. D.2.9: Diagramm der radialen p-Wellen-
geschwindigkeitsanisotropie gegen die
mittlere radiale p-Wellengeschwindigkeit

D.3 Natürliche Radioaktivität

D.3.1 Natürliche Radioaktivität der Bohrkerne

Die natürliche Radioaktivität der Bohrkerne im Teufenbereich von 3500 - 3893 (KTB-VB 1a) wurde an 491 Kernstücken mit der bei WIENAND et al. (1990) beschriebenen Methode gemessen. Dieser tiefste gekernte Bereich der KTB VB wurde möglichst dicht vermessen, auch mit dem Hintergrund, den Teufenversatz zwischen Bohrlochmessungen und Bohrkernen mit dem bei BÜCKER & ZIMMERMANN (1990) beschriebenen Verfahren möglichst genau bestimmen zu können. Im Mittel wurde alle 0.8 m ein Kernstück vermessen.

In Abb. D.3.1 ist das Teufenlog der natürlichen Gamma-Strahlungsaktivität der Bohrkerne wiedergegeben. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Aktivität bei dem Lithologiewechsel von Gneisen zu Metabasiten bei 3575 m von etwa 75 c/s auf etwa 15 c/s. Innerhalb der Gneise schwanken die Werte zwischen 50 und 100 c/s (vgl. a. Abb. D.3.2, Häufigkeitsverteilung), der körnelige Biotit-Gneis im Übergang zu den Metabasiten bei 3575 m fällt durch Werte über 100 c/s auf. Die Peaks zu höheren sowie zu niedrigeren Werten innerhalb der Metabasitstrecke unterhalb von 3575 m können lithologisch erklärt werden: die Meta-Aplite bei 3596 m und 3718 m sowie der Biotit-Augengneis bei 3862 weisen besonders hohe Werte der Gamma-Strahlung auf (80 - 120 c/s), während die Zählraten des Meta-Ultramafitits bei 3717 m und die des Granat-Amphibolitits bei 3771 m nahe der Nachweisgrenze liegen (kleiner als 5 c/s). Die drei Peaks bei 3775 m - 3795 m sind den Biotit-Augengneisen bzw einem Quarz-Feldspat-Gang zuzuschreiben. Der Biotit-Augengneis bei 3845 m fällt ebenfalls durch Werte von über 40 c/s in der Metabasitstrecke auf.

Die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Gammastrahlungswerte (Abb. D.3.2) zeigt die Metabasite im Bereich von 0 - 40 c/s mit einer schmalen Halbwertsbreite und die Gneise und Meta-Aplite um 75 c/s mit einer etwas größeren Halbwertsbreite.

Der Zusammenhang der Zählrate mit der Dichte der Bohrkerne ist in Abb. D.3.3 dargestellt. Wie bereits bei WIENAND et al. (1990) für den Teufenabschnitt 3000 - 3500 m beschrieben, zeigen die Gneise im Dichtebereich von 2.68 - 2.78 g/cm³ auch im Teufenabschnitt von 3500 - 3893 m eine schwache positive Korrelation mit der Zählrate. Bei den Metabasiten mit Dichten über 2.78 g/cm³ und Zählraten unter 40 c/s ist eine solche Korrelation nicht erkennbar.

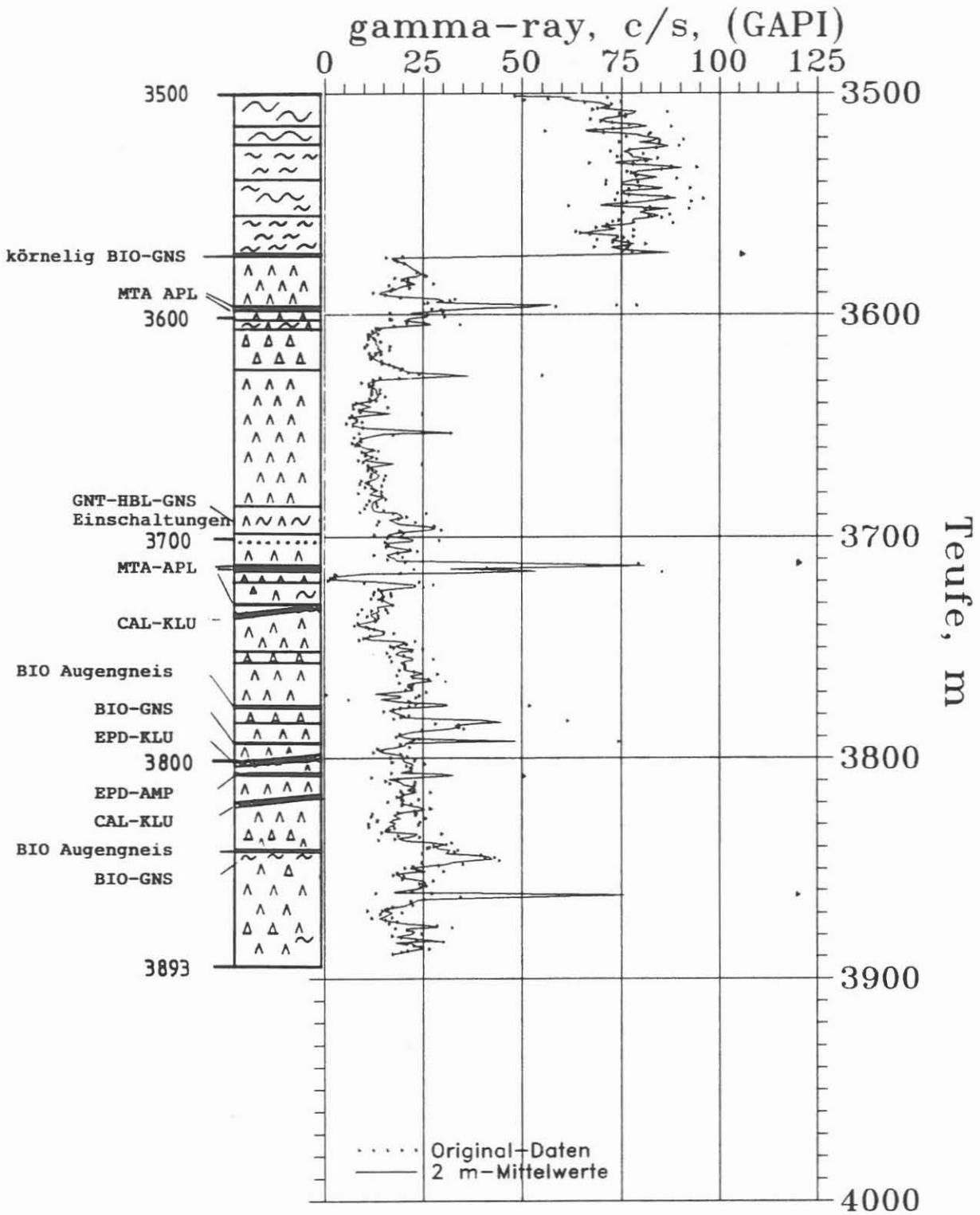


Abb. D.3.1: Teufenlog der natürlichen Gamma-Strahlungsaktivität der Bohrkern

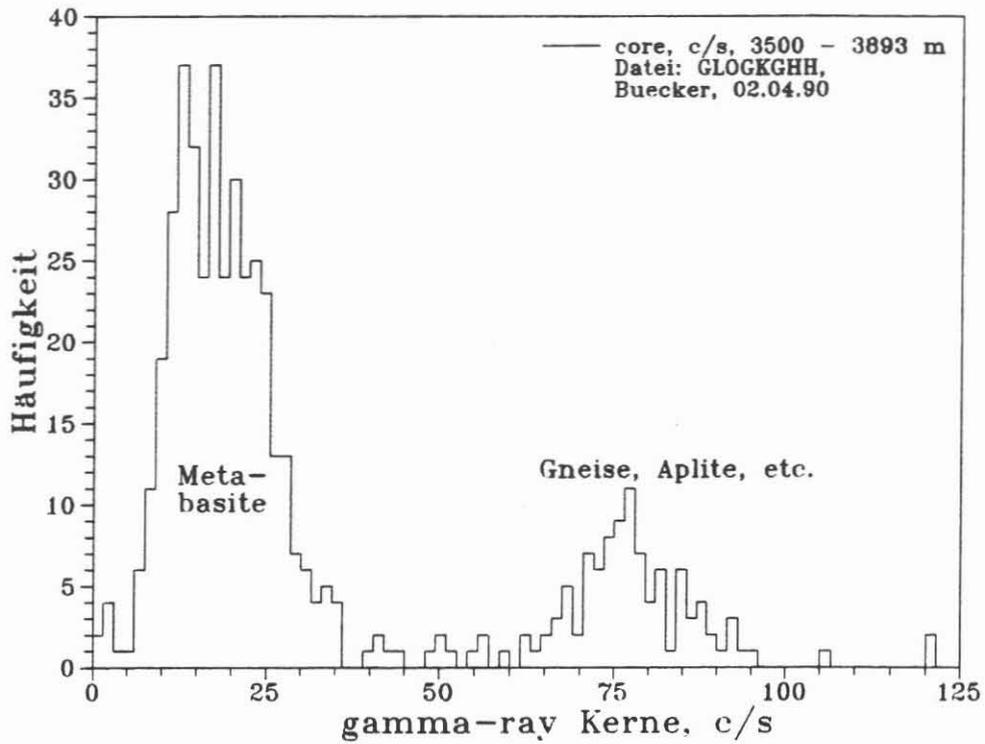


Abb. D.3.2: Häufigkeitsverteilung der Gammastrahlungswerte der Bohrkerne im Tiefenbereich 3500 - 3893 m. Die zwei Maxima sind den Metabasiten bzw. Gneisen zuzuschreiben.

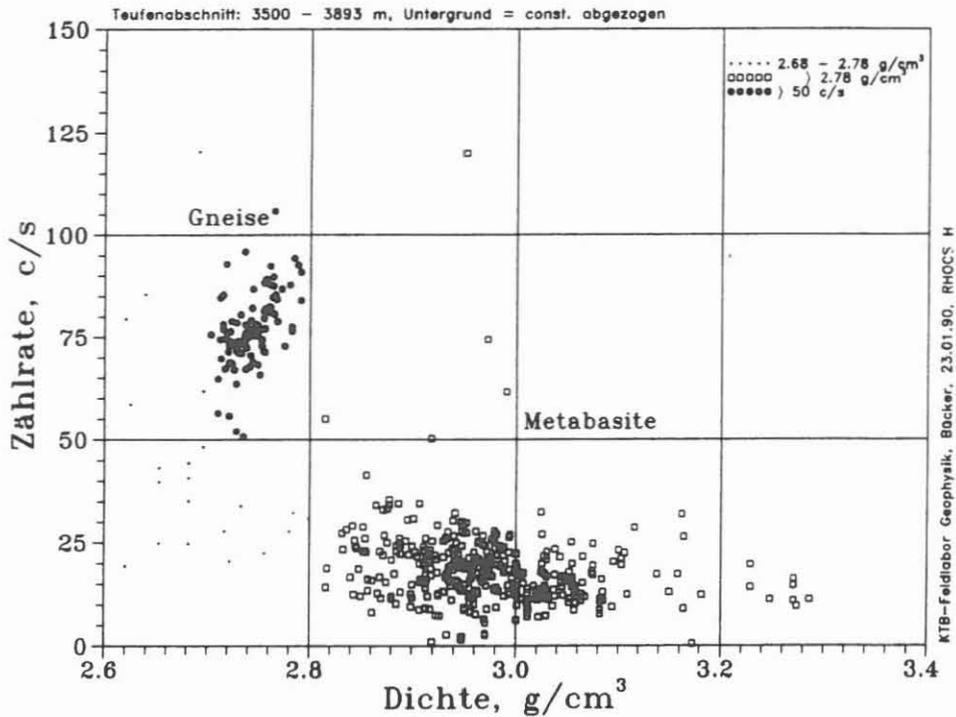


Abb. D.3.3: Zusammenhang der Dichte mit der Zählrate der Bohrkerne. Im Dichtebereich der Gneise ($2.68 - 2.78 \text{ g/cm}^3$) ist eine schwache positive Korrelation zwischen Dichte und Zählrate erkennbar.

D.3.2 Natürliche Radioaktivität des Bohrkleins

Die KTB VB 1B wurde ab dem Ablenkpunkt bei 3766 m nicht gekernt. Die natürliche Radioaktivität des Bohrkleins wurde jeden Meter (jeweils etwa 300 g Trockenmasse) mit dem bei HUENGES et al. (1989) beschriebenen Verfahren gemessen. Die Messungen sind aufgrund der langen Meßzeiten noch nicht abgeschlossen. Die gemessenen Gamma-Spektren wurden hinsichtlich der Gesamtstrahlungs-Aktivität (in c/s) und der Kalium-, Uran- und Thorium-Gehalte ausgewertet.

In Abb D.3.4 ist die Gesamtzählrate der Bohrlochmessungen (in der Einheit GAPI) zusammen mit der an die Bohrlochmessungen angeglichenen Zählrate der Cuttings im Teufenbereich 3900 - 4000 m dargestellt. Für diesen Vergleich wurden die Cuttings-Zählraten mit einem empirisch ermittelten Faktor von 27.7 multipliziert. Aufgrund der unterschiedlichen Meßgeometrien bei den Bohrloch- bzw. Cuttings-Messungen können die jeweils ermittelten Gesamtzählraten, wie bereits bei WIENAND et al. (1990) für die Kernmessungen beschrieben, nicht direkt verglichen werden.

Unterhalb von 3900 bis 3992 m liegen die Zählraten, wie für die hier erbohrten Granat-Amphibolite zu erwarten, durchweg niedrig zwischen etwa 20 und 40 GAPI (zur Einheit GAPI s.a. WIENAND et al., 1990). Ab 3992 m steigen die Werte stark an und erreichen bei 3996 m bei den Bohrlochmessungen die höchsten in der KTB VB gemessenen Werte von über 300 GAPI. Die angeglichenen Cuttings-Messwerte weichen mit über 200 GAPI in diesem Abschnitt deutlich ab. Lithologisch wird dieser tiefste Bohrlochabschnitt durch vollständig chloritisierte und epidotreiche Biotitgneise beschrieben (s.a. Abschnitt B in diesem Report). Der Grund für die Differenz der GAPI-Werte zwischen Bohrloch- und Cuttings-Messungen in diesem Teufenbereich muß noch näher untersucht werden. Die Teufendifferenz zwischen Bohrlochmessungen und Cuttings kann aus Abb. D.3.4 bei 3990 bei dem Anstieg der GAPI-Werte zu etwa 2 m entnommen werden.

Unterhalb von 3998 m scheinen die Meßwerte wieder leicht abzunehmen. In Zusammenhang mit der starken Gamma-Strahlungsanomalie ist interessant, daß diese mit einer Dichte-Abnahme von 2.95 g/cm³ auf 2.8 g/cm³ einhergeht.

Zur Verdeutlichung der Ursachen für die Anomalie sind in der Abb. D.3.5 die Kalium-, Uran- und Thorium-Gehalte sowie die daraus und mit der Dichte ermittelte Wärmeproduktionsraten mit der Formel nach RYBACH (1976) gegen die Teufe aufgetragen. Von 3920 m bis 3985 m sind die K-, U- und Th-Gehalte relativ konstant mit nur kleinen Schwankungen; K liegt zwischen 0.5 % und 1 %, der U-Gehalt ist fast durchweg kleiner 1 ppm und der Th-Gehalt liegt zwischen 2 ppm und 8 ppm. Unterhalb von 3985 m nimmt der U-Gehalt zunächst auf 3 ppm zu, fällt dann wieder ab und liegt auf den letzten 4 m der

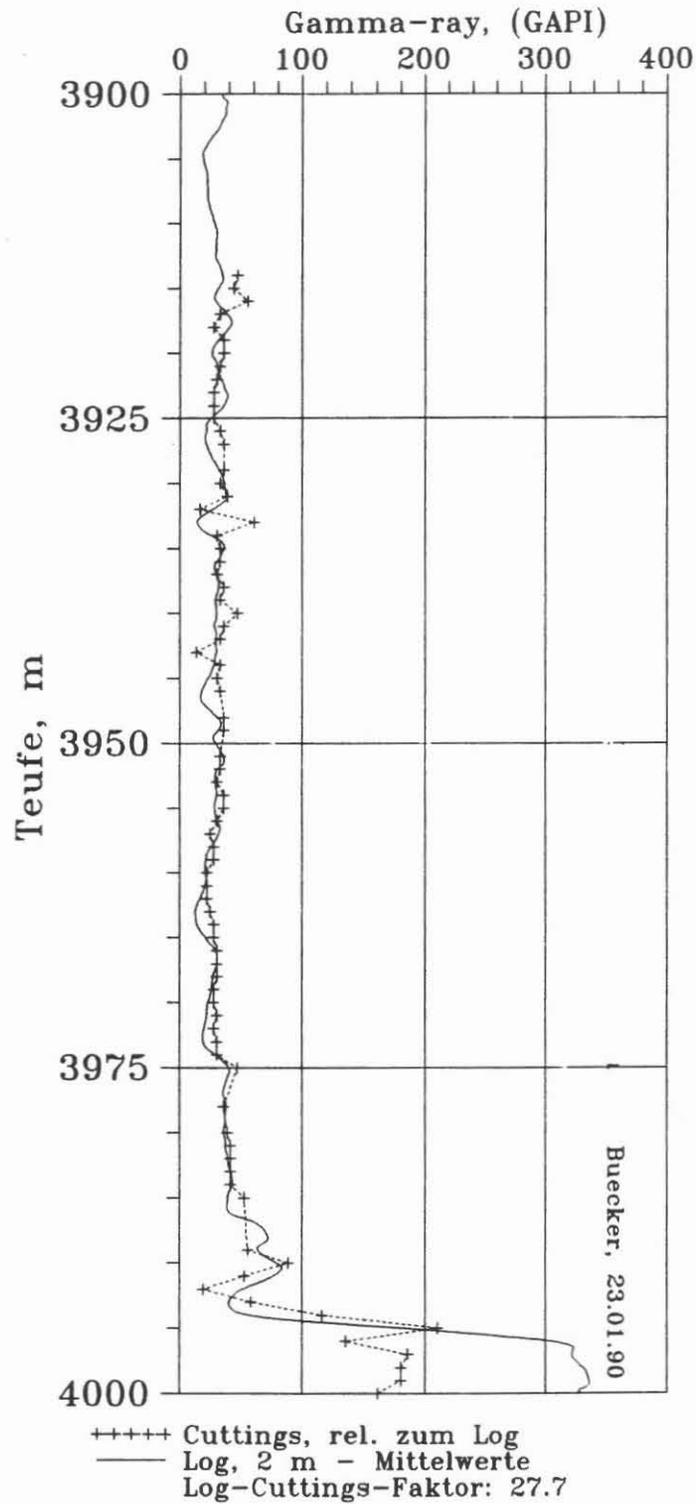
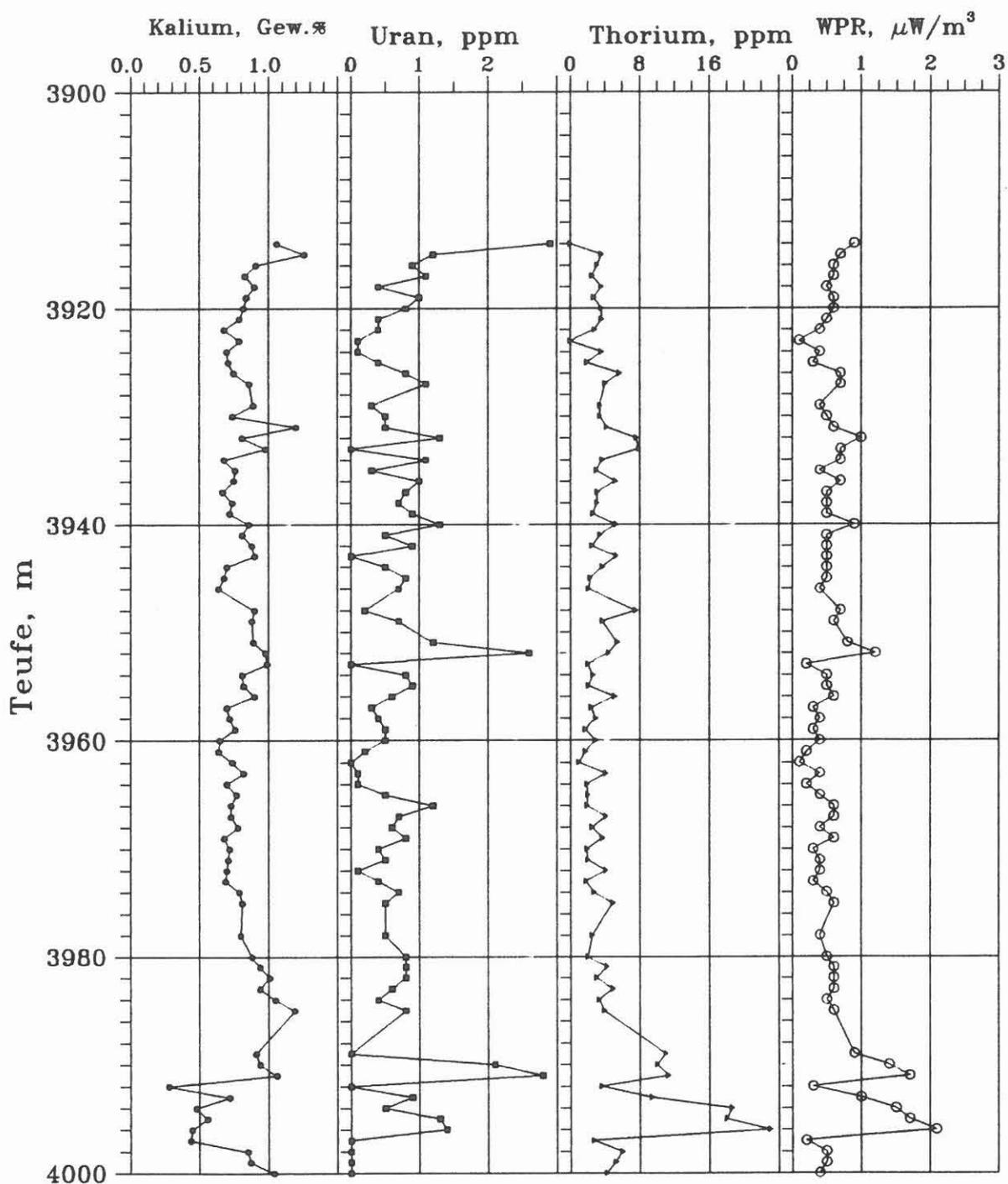


Abb. D.3.4: Gamma-ray Log (KTB-Referat Bohrlochmessungen) und an die Bohrlochmessungen angegliche Gesamtzählrate der Cuttings-Messungen. Unterhalb von 3985 ist die stärkste in dieser Bohrung gemessene Gamma-Strahlungsanomalie zu erkennen.



Cuttings, preliminary results
KTB-Feldlabor Geophysics
File: GAM%CUTH, 14.12.89

Abb. D.3.5: Kalium-, Uran- und Thorium-Gehalte der Cuttings im Tiefenbereich von 3920 - 4000 m. Die Gamma-Strahlungsanomalie unterhalb von 3985 wird hauptsächlich durch eine Thorium-Anreicherung verursacht.

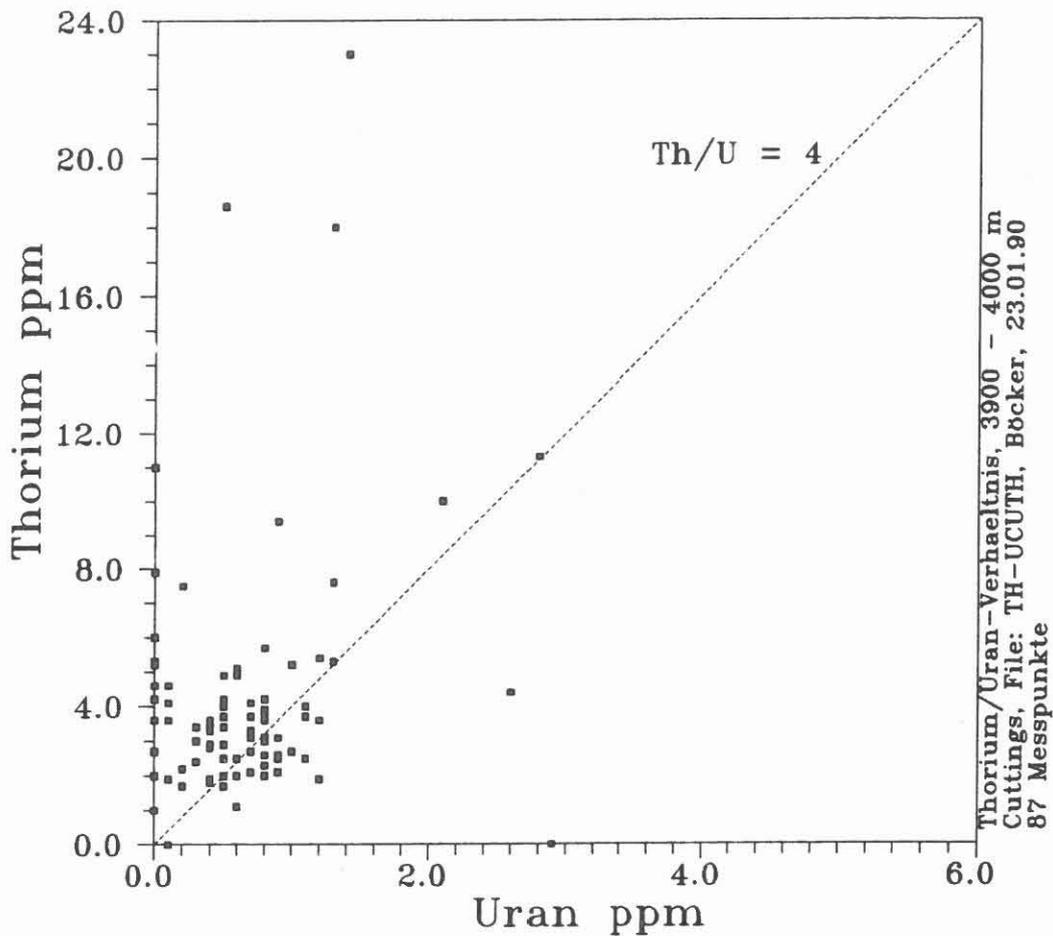


Abb. D.3.6: Darstellung des Thorium/Uran-Verhältnisses für die Cuttings-Messungen aus dem Teufenbereich von 3920 - 4000 m. Die meisten Messwerte liegen oberhalb der Geraden, die das Verhältnis von $Th/U = 4$ kennzeichnet.

Bohrung unter der Nachweisgrenze. Der Th-Gehalt nimmt in diesem Teufenbereich demgegenüber stark zu bis über 20 ppm und ist unterhalb 3996 m wieder bei 6 ppm. Der K-Gehalt liegt zwischen 3992 m und 3997 m bei 0.5 % und steigt im Bohrlochtiefsten wieder auf 1 % an. Diese Ergebnisse stimmen gut mit den RFA-Messungen überein (vgl. Abschnitt C in diesem Report). Die Wärmeproduktionsrate hat bei 3996 m ein Maximum von über $2 \mu W/m^3$ und ist auf den letzten 4 m wieder bei $0.5 \mu W/m^3$. Insgesamt läßt sich festhalten, daß die Gamma-Strahlungsanomalie unterhalb von 3985 m im wesentlichen durch eine starke Thorium-Anreicherung verursacht wird. Dies spiegelt sich auch in dem Thorium/Uran-Verhältnis

wider, das in Abb. D.3.6 dargestellt ist. Die meisten Meßwerte liegen oberhalb der Geraden, die ein Verhältnis von $\text{Th}/\text{U} = 4$ kennzeichnet.

Zum Vergleich mit der oben beschriebenen Gammastrahlungs-Anomalie bei 3990 m sind in Abb. D.3.8 die K-, U- und Th-gehalte sowie Wärmeproduktionsraten der Cuttings aus der KTB VB 1 im Teufenabschnitt von 1900 - 2000 m dargestellt. Die Lithologie ist hier durch Biotit-Sillimanit-Gneise gekennzeichnet, in dem ebenfalls eine erhöhte Gammastrahlungs-Aktivität gemessen wurde. In diesem Teufenbereich wird die Anomalie allerdings hauptsächlich durch eine Uran-Anreicherung ab 1980 m verursacht. Zusammen mit der Uran-Anreicherung wurden auch starke Graphitisierungen (vgl. MASSALSKY et al., 1989) und hohe Helium-Gehalte festgestellt (vgl. HOMANN et al., 1989). Die Th- und K-Gehalte bleiben mehr oder weniger konstant. Uran-Gehalt und Wärmeproduktionsrate zeigen bei 1994 m ein Maximum und fallen danach wieder ab. Erhöhte Helium-Gehalte konnten auch unterhalb von 3985 m festgestellt werden (vgl. Abschnitt C in diesem Report). Es liegt die Vermutung nahe, daß die erhöhten Helium-Gehalte in diesen Teufenabschnitten mit den α -Teilchen aus den Uran- bzw. Thorium-Zerfallsreihen in Zusammenhang stehen.

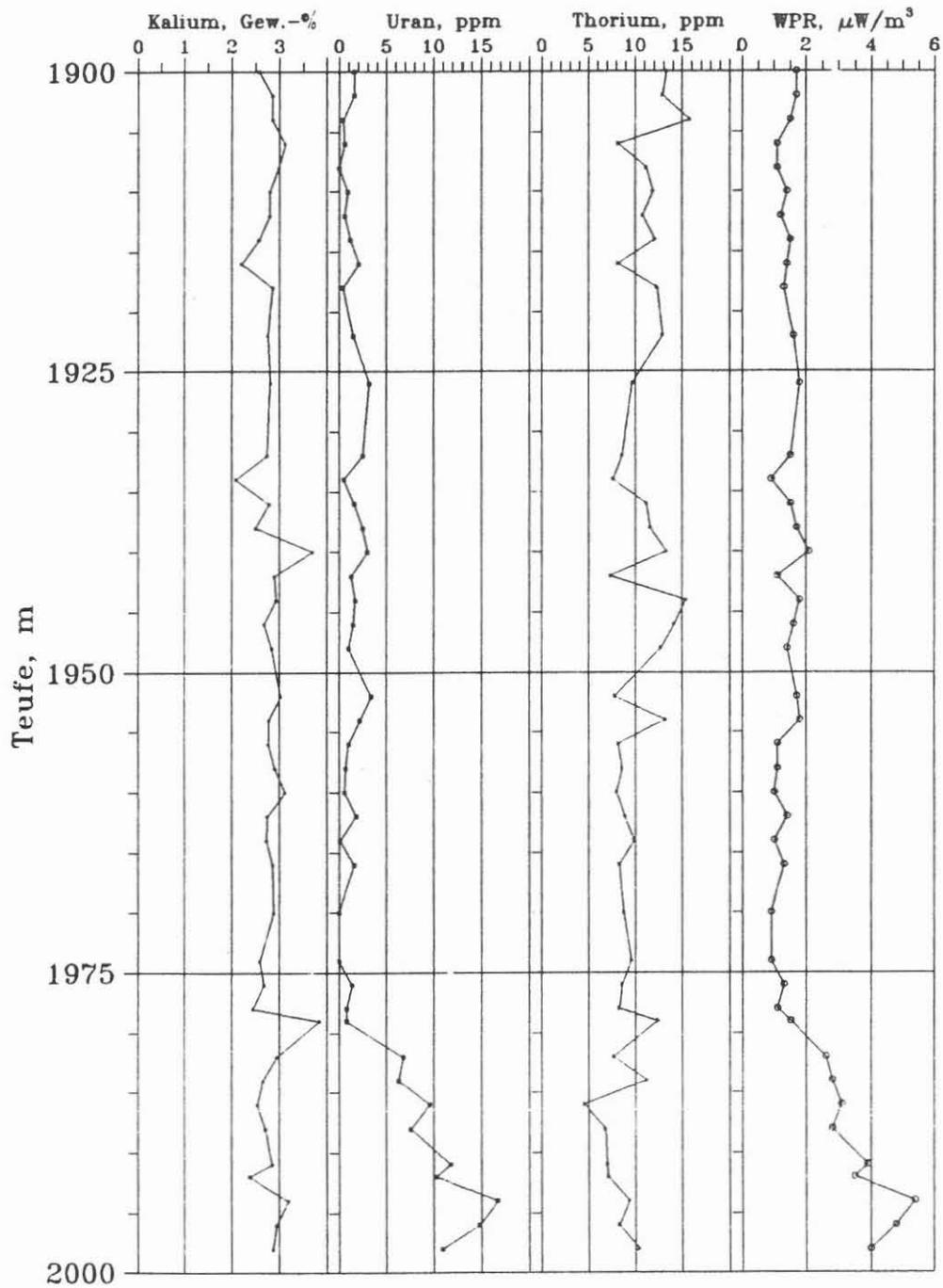


Abb. D.3.7: Kalium-, Uran- und Thorium-Gehalte der Cuttings im Teufenbereich von 1900 - 2000 m. Die Gamma-Strahlungsanomalie unterhalb von 1980 m wird hauptsächlich durch eine Uran-Anreicherung verursacht.

D.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit und deren Anisotropie wurden ca. alle 5 m an Bohrkernen der Strecke zwischen 3500 und 3893 m mit dem bei HUENGES et al. (1989 a) beschriebenen Verfahren gemessen und bestimmt. Abb. D.4.1 zeigt die Meßdaten, ermittelt mit der Orientierung der Halbraum-Linien-Quelle in 3 senkrecht zueinander stehenden Richtungen auf den Bohrkernen. Erkennbar ist der Übergang von den Gneisen zu den Metabasiten bei 3575 m mit einer Änderung der mittleren Wärmeleitfähigkeit von 3.4(3) W/m K auf 2.6(3) W/m K (siehe auch die Häufigkeitsverteilung der Werte in Abb. D.4.2). Innerhalb der Metabasitabfolge unterhalb 3575 m treten einige geringmächtige Einschaltungen von Meta-Apliten bei 3596 und 3718 m, einem Biotit-Augengneis bei 3862 m und einem erzureichen Meta-Ultramafitit bei 3717 m (siehe Abb. D.6.1), die auch höhere Wärmeleitwerte als die übrigen Metabasite besitzen.

In Abb. D.4.1 sind die aus der Modalanalyse des Bohrkleins berechneten Wärmeleitwerte (siehe HUENGES et al. 1989 b) eingezeichnet. Die hier berechneten Werte wurden mit dem aus dem Vergleich aller in der KTB VB gemessenen und berechneten Wärmeleitwerten ermittelten Faktor von 1.2 kalibriert. Man erkennt abgesehen von den oben erwähnten geringmächtigen Einschaltungen eine gute Wiedergabe der Tiefenstruktur der gemessenen Werte. Der Mittelwert für die Gneise in o.g. Teufenbereich beträgt 3.25(8) W/m K und für die Metabasite 2.6(3) W/m K. Man ist also in der Lage, auf den nicht gekernten Teufenbereich zu extrapolieren. Interessant ist dabei, daß die Wärmeleitfähigkeit auf den letzten 50 m ein Maximum von ca 2.8 W/m K durchläuft.

Um die Frage der Anisotropie zu beleuchten, wurden an ausgewählten Gesteinen Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit von der Lage der Linienquelle auf der Stirnfläche gemessen. Dabei wurde der Poreninhalt wie folgt variiert: 1.) Probe im Ofen bei 80° C und im Vakuum getrocknet und in der Umgebungsluft gemessen; 2.) Probe evakuiert, unter Vakuum destilliertes Wasser eingesogen und unter Wasser gemessen.

Abb. D.4.3 zeigt die Messung an einem Gneis mit steiler Foliation aus 1908.70 m. Man erkennt die starke Anisotropie, die auch nicht verringert wurde, wenn die Luft in den Rissen durch das um mehr als eine Größenordnung besser wärmeleitende Wasser ersetzt wurde. Das kann so interpretiert werden, daß mehr die Mineralzusammensetzung als die Mikrorißbildung die Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit der Gneisprobe verursacht.

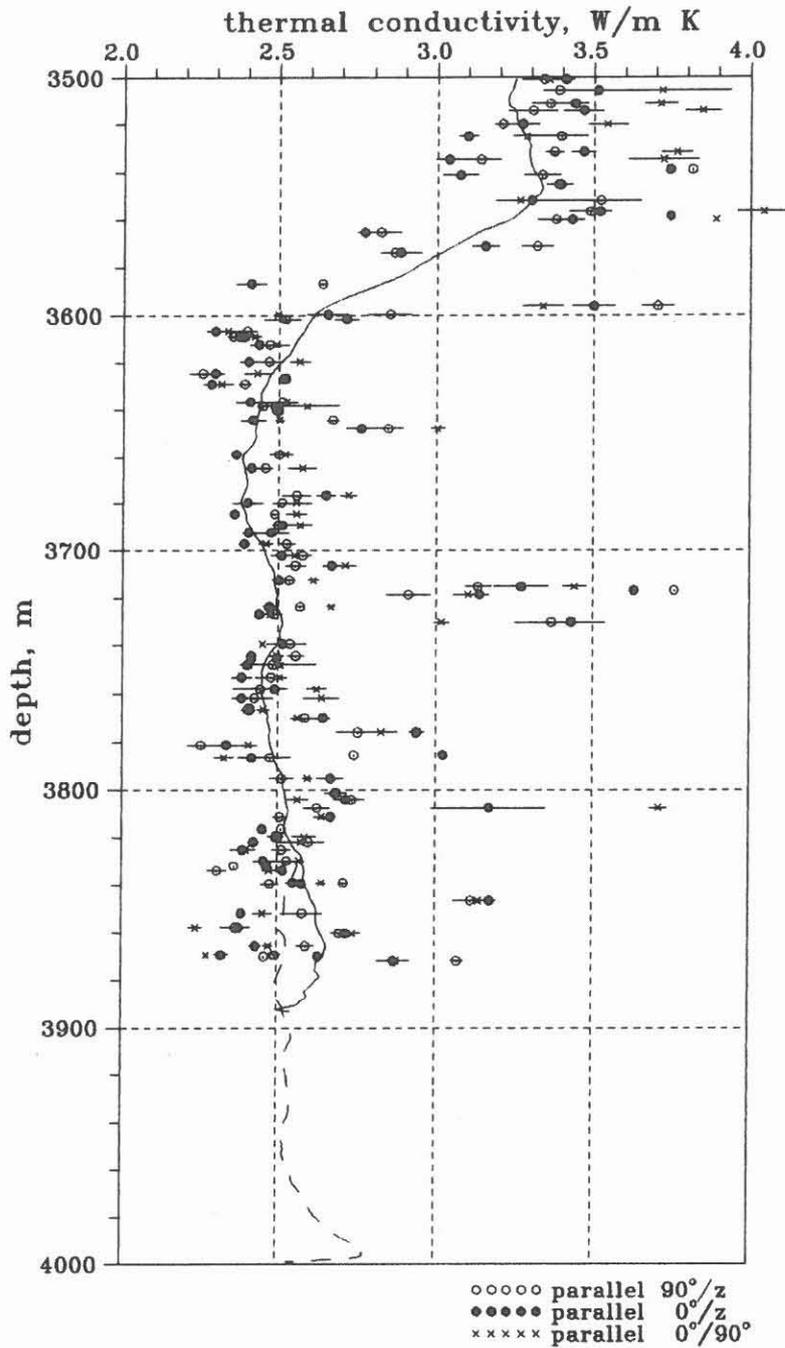


Abb. D.4.1

Wärmeleitfähigkeit von KTB-VB-Kernen. Die Signaturen geben jeweils einen Mittelwert mit mittlerem Fehler aus 5 Wiederholungsmessungen in einer Ebene an. Diese wird mit den sie aufspannenden 2 Richtungen bezeichnet (0°, 90° zur Referenzlinie in der Horizontalen oder z = Bohrkernachse). Eingetragen ist die aus der Modalanalyse berechnete Wärmeleitfähigkeit (siehe Text; durchgezogen: Bohrklein aus KTB VB1a; gestrichelt: Bohrklein aus KTB VB1b) jeweils über 50 m gleitend gemittelt.

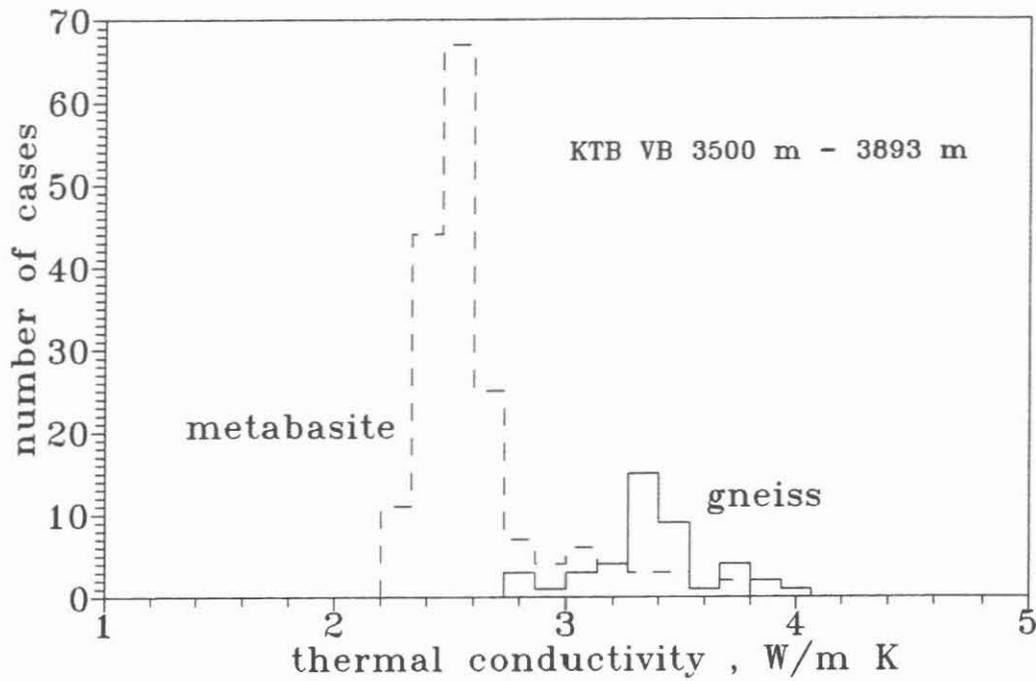


Abb. D.4.2 Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten (gestrichelt: Metabasite aus dem Teufenbereich 3575 m bis 3893 m; durchgezogen: Gneise aus dem Teufenbereich 3500 m bis 3575 m).

Aus der Tatsache, daß innerhalb der Metabasitserie die 3 Messungen parallel $90^\circ/z$, parallel $0^\circ/z$ und parallel $0^\circ/90^\circ$ nicht streuen (siehe Abb. D.4.1), kann man in erster Näherung eine Isotropie der Wärmeleitfähigkeit der Metabasite ableiten. Dagegen zeigt Abb. D.4.3 doch noch eine Anisotropie mit kleiner Amplitude bei einem Amphibolit aus 3839.50 m Tiefe. Diesmal hat die Wassersättigung den Effekt, daß die Amplitude kleiner wird. D.h. eine Interpretation als mikrorißverursachte Anisotropie ist möglich.

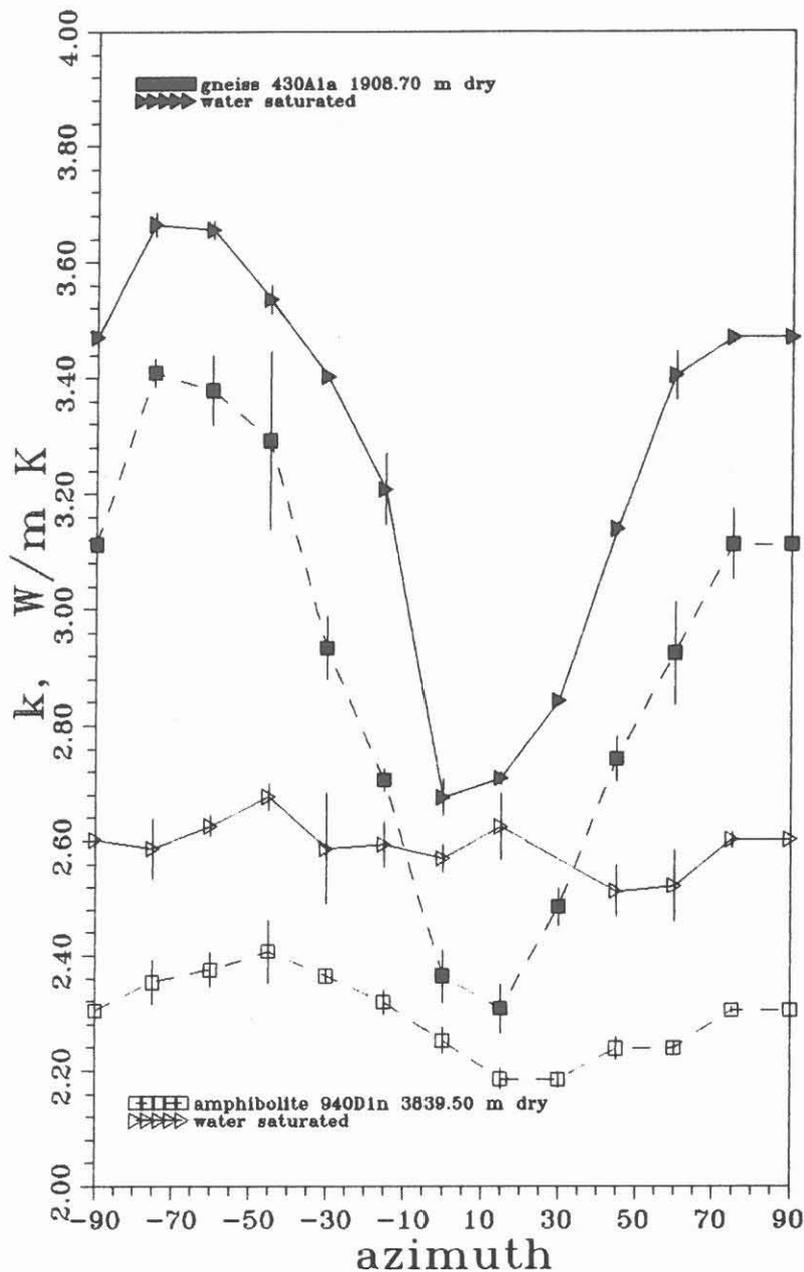


Abb. D.4.3 Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Azimut der Lage der Linienquelle auf der Stirnfläche bei verschiedenen Porenfüllungen: oben Gneis mit steiler Foliation, Kernstück 430A1a aus 1980.7 m Tiefe; unten Amphibolit 940D1n aus 3839.5 m Tiefe.

Zur Aufnahme einer Sättigungskurve wurde die Probe 430A1a nachdem sie längere Zeit der Umgebungsluft ausgesetzt war, eine bestimmte Anzahl von Stunden in Leitungswasser gelegt und in der Umgebungsluft gemessen. Die Routinemessung der Wärmeleitfähigkeit im Feldlabor wird ausgeführt, nachdem die Probe mindestens 24 Stunden in Leitungswasser gelegen hat. Abb. D.4.4 zeigt diese Sättigungskurve ermittelt über die Gewichte der Probe. Man erkennt, daß der Einfluß der Dauer der Wassersättigung gering ist. Schon nach einer Stunde im Wasser erhält man Werte, die sehr nahe den Messungen an

vollständig wassergesättigten Proben liegen. Es ist jedoch eine Streuung zu beobachten, die auch Werte oberhalb des Wertes der wassergesättigten Probe beinhalten. Es muß berücksichtigt werden, daß keine besonderen Vorkehrungen getroffen wurden, das Austrocknen der Probe während einer Messung und damit eine zusätzliche Abkühlung, die eine höhere Wärmeleitfähigkeit vortäuscht, zu verhindern. Ferner ist offen, wie das Wasser in der Probe verteilt ist. Diese Effekte liegen jedoch innerhalb der für diese Messungen angegebenen Genauigkeit von 5 %.

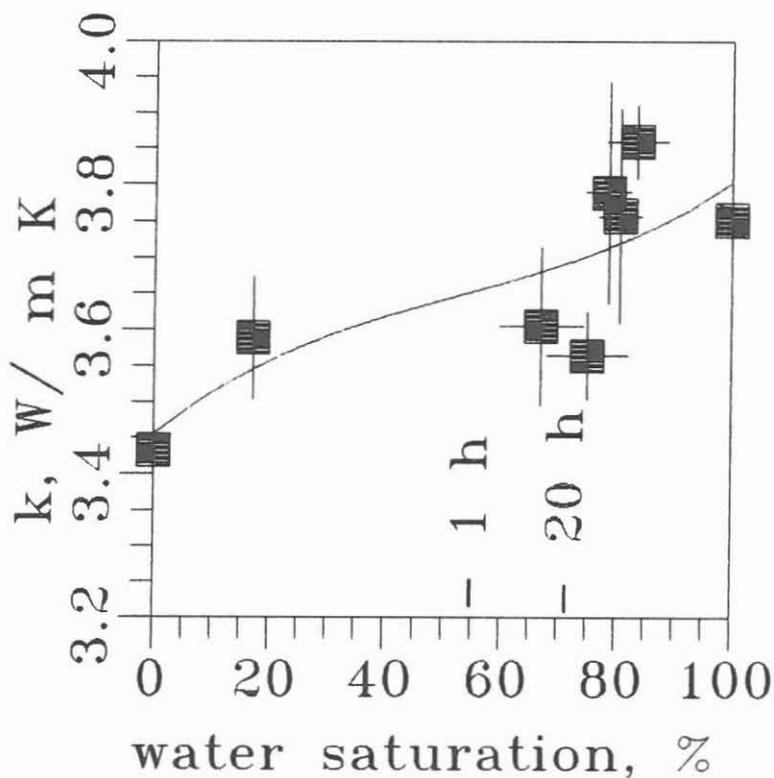


Abb. D.4.4

Sättigungskurve der Wärmeleitfähigkeit von Kernstück 430A1a aus 1980.7 m Tiefe beim Azimut der Lage der Linienquelle bei -75° auf der Stirnfläche (siehe Abb. 4.3). Markiert sind die Zeitdauern der Lage der Probe in Leitungswasser.

D.5 Natürliche remanente Magnetisierung NRM

D.5.1 Allgemeines

Im Teufenbereich von 3503 m bis 3889 m konnten Messungen der NRM an 248 Kernstücken durchgeführt werden. Davon waren 240 Messungen auswertbar mit Magnetisierungen > 1 mA/m. 117 Kerne zeigten Magnetisierungen > 10 mA/m. Das Meßprinzip ist bei BÜCKER et al. (1988) beschrieben.

D.5.2 Ergebnisse

Das Teufenlog sowohl der Totalintensität der NRM als auch der Inklination (2 Meßwerte pro Kernstück) ist in Abb. D.5.1 dargestellt. Grob lassen sich drei Bereiche unterschiedlicher remanenter Magnetisierung unterscheiden. Von 3500 m bis 3572 m wurden relativ geringe Werte der NRM im Bereich von 1 mA/m bis 400 mA/m gemessen. Die Inklinationen liegen größtenteils steil, sowohl bei $+90^\circ$ als auch bei -90° . In diesem Abschnitt wurden Gneise erbohrt. Im anschließenden Teufenbereich bis etwa 3690 m (Amphibolit) ist die NRM höher (um 100 mA/m) mit relativ geringer Streuung und es wurden meist positive Inklinationen gemessen. Ab 3690 m bis Endteufe der gekernten Vorbohrung streuen die NRM-Werte stärker zwischen 1 mA/m und 5000 mA/m. Hier treten wieder sowohl positive als auch negative Inklinationen auf. Es wurde Amphibolit erbohrt mit Einschaltungen von Gneisen und einigen Klüften. Das herausragende Maximum der NRM von 175 A/m wurde im Meta-Ultramafitit bei 3719.5 m angetroffen. Diese magnetische Anomalie ist unter Punkt D.5.3 ausführlicher dargestellt.

In Abb. D.5.2 ist die Inklination der NRM der Totalintensität gegenübergestellt. Es fallen meist steile Inklinationen um $\pm 90^\circ$ auf. Flachere Inklinationen beider Vorzeichen treten eher bei schwachen Remanenzen auf. Mit steigender NRM scharfen sich die gemessenen Inklinationen immer mehr um $+90^\circ$. Auch die Inklination der stärksten Anomalie (175 A/m) liegt bei $+90^\circ$. Die auffallende Häufung der steilen Inklinationen könnte durch den Bohrprozess bedingt sein und damit nicht der in-situ Remanenz entsprechen (DIRM $\hat{=}$ drilling induced remanent magnetization, siehe RAUEN et al., 1988).

Die Häufigkeitsverteilung der NRM in logarithmischer Skalierung ist in Abb. D.5.3 gezeigt. Es zeichnen sich zwei Maxima ab (um etwa 6 mA/m und um etwa 100 mA/m).

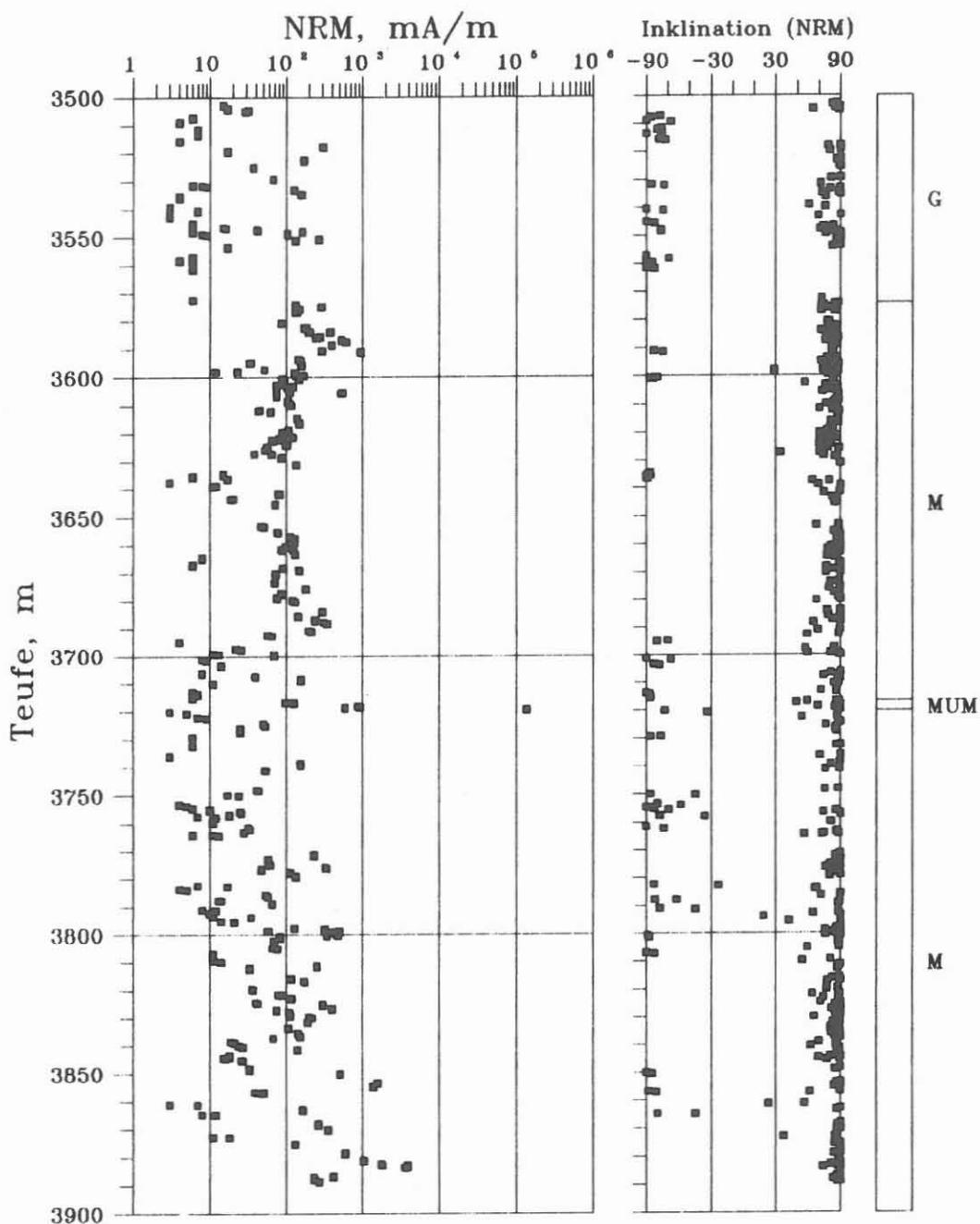


Abb. D.5.1 : Teufenlog der Totalintensität der NRM (links) und der Inklination der NRM. Zwei Messungen pro Kernstück sind gezeigt. Magnetisierungen < 1 mA/m sind nicht berücksichtigt. Rechts stark vereinfachtes Litho-Profil (G=Gneise, M=Metabasite, MUM=Meta-Ultramafitit).

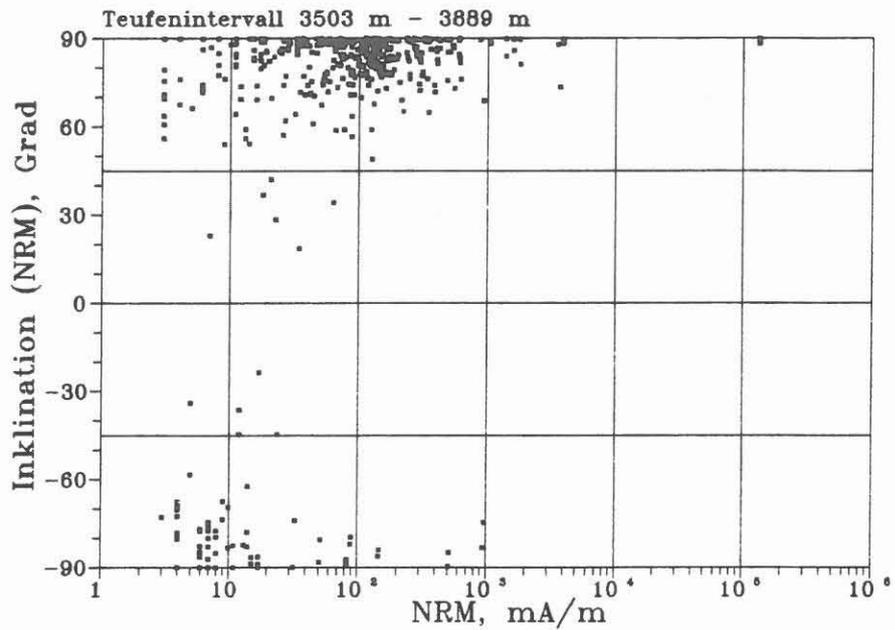


Abb. D.5.2 : Gegenüberstellung von Totalintensität der NRM und Inklination der NRM.

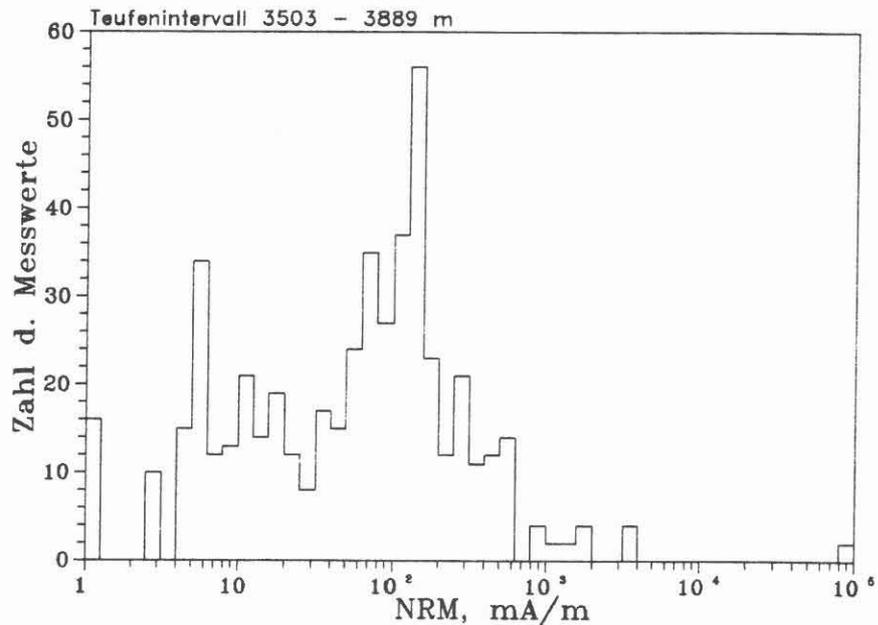


Abb. D.5.3 : Häufigkeitsverteilung der Totalintensität der NRM. Die Logarithmen der Meßwerte zwischen 1 mA/m und 100 A/m sind in 50 gleiche Intervalle geteilt. Die Anzahl der Meßwerte pro Intervall wurde berechnet.

D.5.3 Die magnetische Anomalie bei 3719.5 m Teufe

In der Abb. D.5.4 sind die Messungen der Horizontalkomponente der NRM und die der Suszeptibilität (aufgrund des Meßprinzips in Achsenrichtung, siehe auch Abschnitt D.6 im gleichen KTB-Report) gegen die Teufe im Bereich von 3716 m bis 3720.5 m dargestellt. Beide magnetische Parameter zeigen in diesem Bereich die höchsten Werte in der KTB-Vorbohrung.

Wie aus dem Vergleich der Lithologie (schematisiert am rechten Rand) und der lückenlos gemessenen Suszeptibilität zu sehen ist, ist die magnetische Anomalie eng an das Vorkommen des Meta-Ultramafitit gebunden. So liegen im oben und unten angrenzenden Amphibolit die Suszeptibilitäten um $0.6 \cdot 10^{-3}$ SI (eine für Amphibolit eher geringe Suszeptibilität, wie aus der Häufigkeitsverteilung der Suszeptibilität im Kapitel D.6 sichtbar wird), während im Meta-Ultramafitit die Suszeptibilität bis auf 0.167 SI ansteigt.

Abb. D.5.5 zeigt einen Anschliff aus dem Bereich der stärksten Magnetisierung. Der Träger der Magnetisierung ist Magnetit (siehe auch Kapitel "B" und Abschnitt D.6 im gleichen Band).

Die H-Komponente der NRM konnte nicht an jedem Kernstück bestimmt werden. Trotzdem fällt eine sehr gute Korrelation zwischen beiden magnetischen Parametern auf. Das absolute Maximum beider Messungen befindet sich jeweils exakt bei 3719.45 m Teufe. Die Messung der Horizontalkomponente der NRM erlaubt eine detailliertere Auflösung, wie z.B. am Minimum der NRM bei 3719.67 m zu sehen ist. Dieses Minimum paust sich bei der Suszeptibilität nur als Plateau durch. Das Minimum der Suszeptibilität bei 3718.45 m zeigt bei der NRM sogar noch eine Feinstruktur durch ein zusätzliches relatives Maximum. Dieser 'Tiefpaß-Effekt' wird durch die integrierende Messung der Suszeptibilität hervorgerufen (BÜCKER et al., 1988).

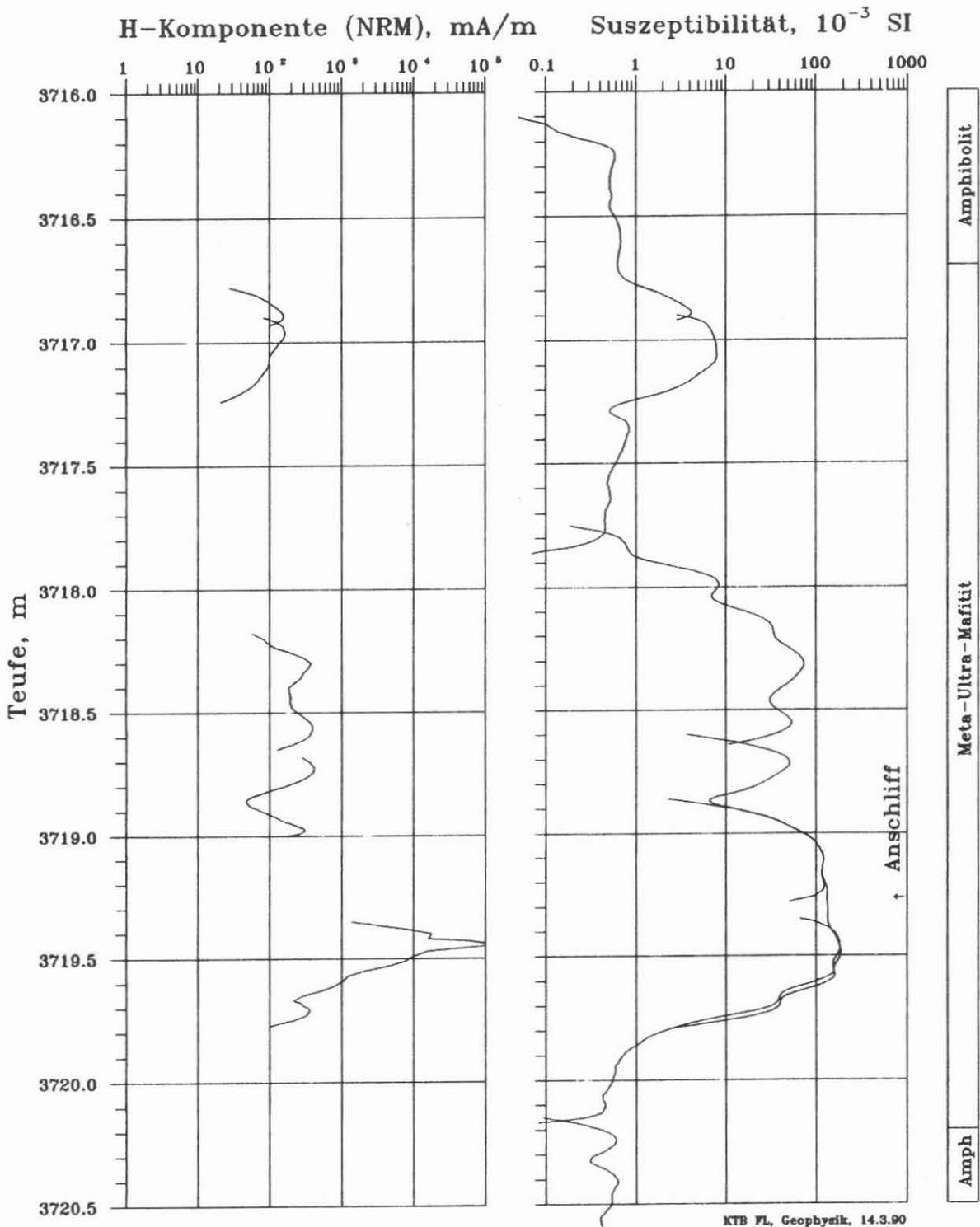


Abb. D.5.4 : Teufenlog der H-Komponente der NRM und der Suszeptibilität (in z-Richtung gemessen). Jede durchgezogene Linie stellt die zusammenhängende Messung an einem Kernstück dar. Das Abfallen der Meßwerte an den Enden der Kernstücke ist durch Randeffekte bedingt. Rechts zur Verdeutlichung ein vereinfachtes Litho-Profil. Bei 3719.51 m wurde eine Anschliff-Probe entnommen.

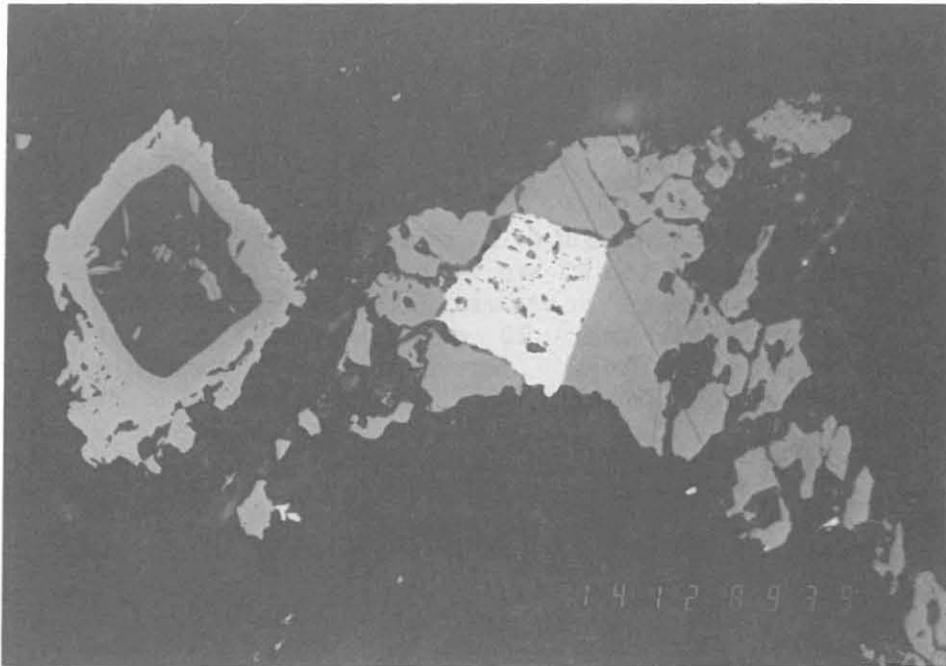


Abb. D.5.5 : Anschliff aus dem Bereich der in Abb. D.5.4 gezeigten magnetischen Anomalie (Kernstück 911FlahK, Teufe 3719.51 m). Man erkennt im linken Bereich einen Spinell mit Magnetitsaum. Rechts umgibt Magnetit ideomorphen Pyrit. Lange Bildkante 0.25 mm, Öl, 1 Nicol.

D.6 Magnetische Suszeptibilität

D.6.1 Allgemeines

Im Teufenintervall von 3500 m bis 3893 m (=Ende der VB1a) wurde die Suszeptibilität an Bohrkernen mit einer Datendichte von 1 Messung/cm bestimmt. Aus diesen Rohdaten wurden arithmetische Mittel über 20 cm dargestellt. Cuttings aus VB1b (3767 m bis 4000 m) wurden mit 1 Messung/m registriert. Zusätzlich konnten 25 Seitenkerne aus dem Teufenbereich 3658.7 m (Seitenkern Nr. 44) bis 3999.8 m (Nr. 72) in der Cuttings-Probenhalterung vermessen werden. Die Meß- und Auswerteverfahren sind bei BÜCKER et al. (1988) beschrieben.

D.6.2 Ergebnisse

In Abb. D.6.1 ist das Teufenlog der magnetischen Suszeptibilität, gemessen an Bohrkernen (VB1a), Seitenkernen (VB1a und VB1b) und Cuttings (VB1b) dargestellt. In vergleichbaren Teufen liegen die Cuttings-Meßwerte auf höherem Niveau als die an Bohrkernen oder an Seitenkernen gewonnenen Werte. Dies mag durch einen erhöhten Gehalt an metallischem Abrieb im Cuttingsmaterial begründet sein (siehe z.B. RAUEN et al. 1988, WOLTER et al. 1989). Unmittelbar vor der Endteufe der VB1b (von 3997 m auf 3998 m Teufe) ist ein Anstieg in der Suszeptibilität der Cuttings zu verzeichnen, was möglicherweise auf einen Gesteinswechsel hindeutet. Dieser Anstieg zeichnet sich jedoch nicht in der Suszeptibilität der Seitenkerne ab. Die Ursache hierfür könnte in einem Teufenversatz zwischen Seitenkern-Teufe ($\hat{=}$ Log-Teufe) und Bohrkern-Teufe ($\hat{=}$ Bohrmeister-Teufe) zu suchen sein.

In den Kerndaten ist bei ca. 3575 m der Übergang von Gneis (geringere Suszeptibilität) zu Amphibolit zu sehen. Insgesamt repräsentieren die Kerndaten einen weiten Wertebereich von $0.07 \cdot 10^{-3}$ SI (Meta-Aplit aus Quarz und Feldspat, 3715.14 m) bis $167 \cdot 10^{-3}$ SI (Meta-Ultramafitit, um 3719 m). Wie im Log zu sehen ist, konnten auf kurzen Distanzen von wenigen Metern große Änderungen der Suszeptibilität registriert werden.

Die stärkste Suszeptibilitäts-Anomalie in der KTB-Vorbohrung um 3719 m ist zusammen mit der Anomalie der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM) im Abschnitt D.5 detailliert dargestellt. Diese magnetische Anomalie ist an einen Meta-Ultramafitit gebunden. Nach erzmikroskopischen Untersuchungen (siehe Anschliff-Photo Abb. D.5.5 im Abschnitt D.5 (NRM) und Abschnitt "B" im gleichen Report) konnten Magnetit

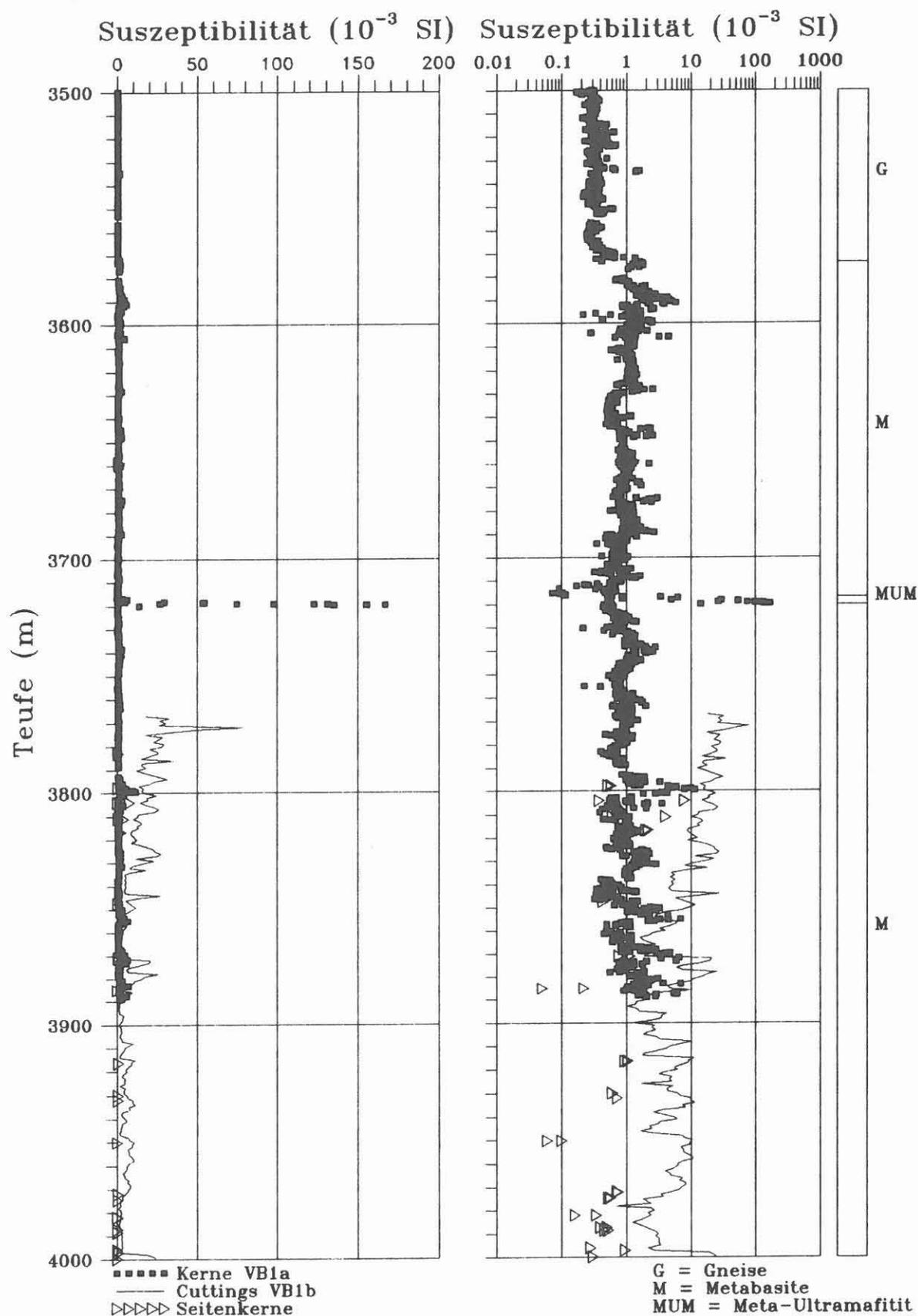


Abb. D.6.1 : Teufenlog der magnetischen Suszeptibilität. Rechts vereinfachtes lithologisches Profil.

und Graphit nachgewiesen werden, jedoch kein Pyrrhotin. Eine ähnlich starke Suszeptibilitäts-Anomalie (bis $151 \cdot 10^{-3}$ SI) konnte bei 115.7 m Teufe ermittelt werden, auch hier wurde Magnetit als Träger der Magnetisierung bestimmt (BÜCKER et al. 1988).

Abb. D.6.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kern-Suszeptibilitäten. Es überlagern sich zwei annähernd logarithmische Normalverteilungen mit Häufigkeitsmaxima bei $0.3 \cdot 10^{-3}$ SI und, stärker vertreten, bei $0.9 \cdot 10^{-3}$ SI. Die Zuordnung dieser Verteilungen zu den zwei Haupteinheiten in diesem Teufenbereich (Gneise, um $0.3 \cdot 10^{-3}$ SI und Amphibolite, um $0.9 \cdot 10^{-3}$ SI) verdeutlicht Abb. D.6.3.

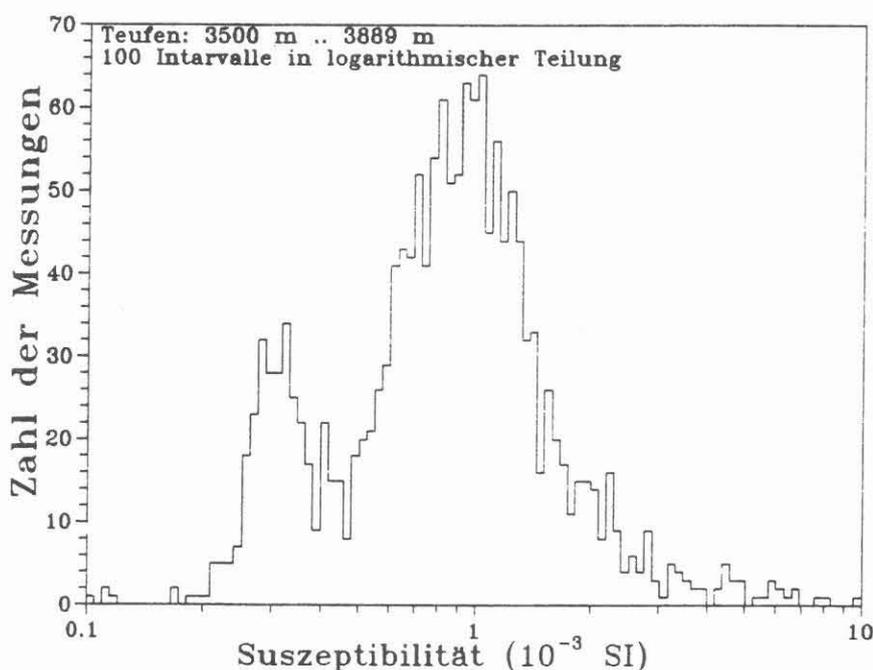


Abb. D.6.2 : Häufigkeitsverteilung der magnetischen Suszeptibilität von Bohrkernen im Bereich von 3500 m bis 3889 m. Es sind zwei annähernd logarithmische Normalverteilungen zu erkennen. Suszeptibilitäten um $0.3 \cdot 10^{-3}$ SI entsprechen Gneisen, solche um $0.9 \cdot 10^{-3}$ SI Amphiboliten (siehe auch Abb. D.6.3) Ein trennendes Minimum zwischen beiden Verteilungen liegt bei $0.47 \cdot 10^{-3}$ SI.

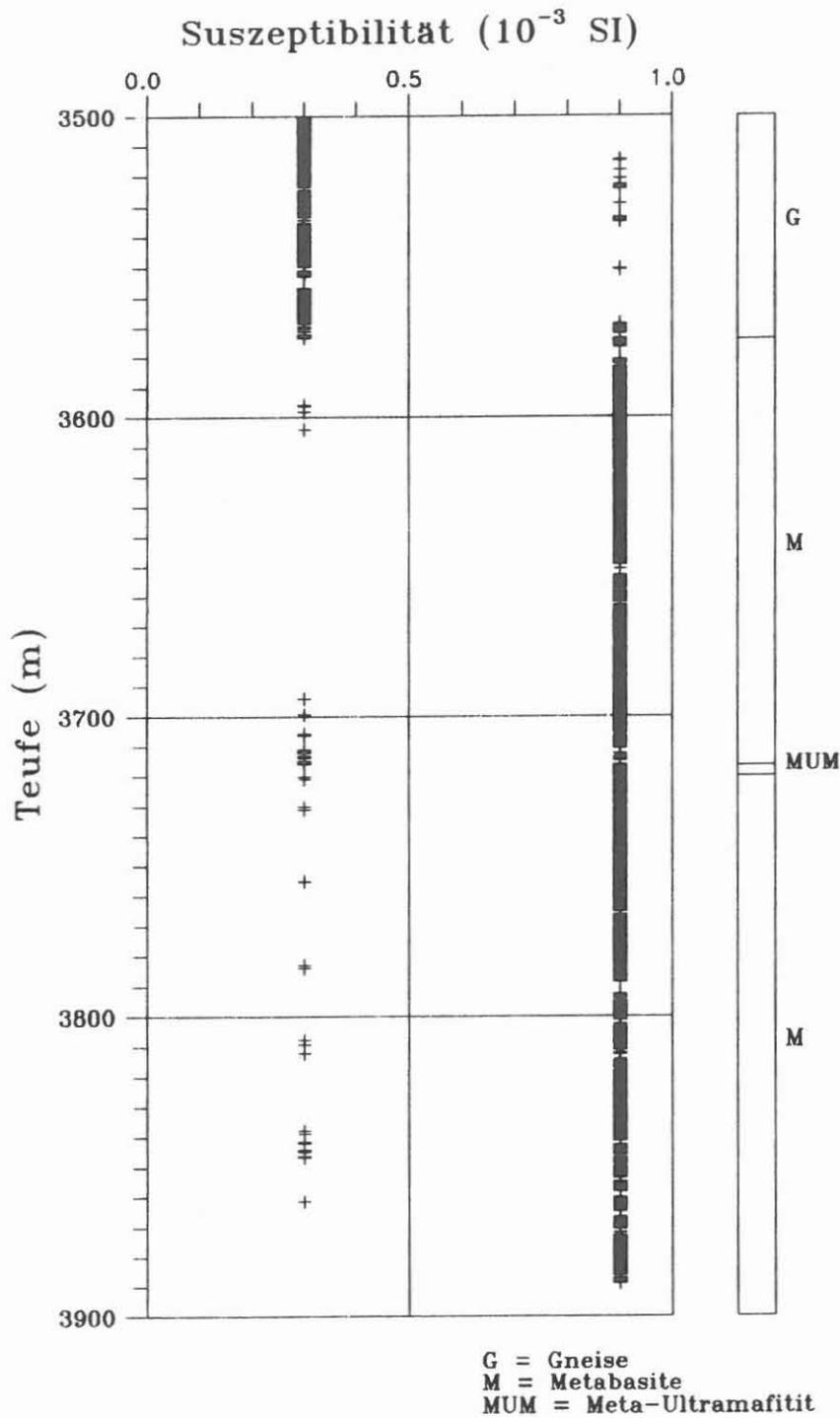


Abb. D.6.3 : Suszeptibilitäten $\geq 0.47 \cdot 10^{-3}$ SI (Minimum aus der Häufigkeitsverteilung, Abb. D.6.2) wurden einem Mittelwert von $0.9 \cdot 10^{-3}$ SI zugeordnet, solche $< 0.47 \cdot 10^{-3}$ SI einem Mittelwert von $0.3 \cdot 10^{-3}$ SI. Aus der Teufenverteilung lassen sich die höheren Suszeptibilitäten den Amphiboliten zuordnen, die geringeren den Gneisen (siehe nebenstehendes stark vereinfachtes lithologisches Profil).

D.7 Elektrische Leitfähigkeit

D.7.1 Allgemeines

Es konnten 218 Messreihen an Bohrkernen durchgeführt werden. Pro Meßreihe wurden im Schnitt 12 Einzelmessungen mit einer 4-Elektroden-Anordnung (linear, Elektrodenabstand jeweils 2 cm, auf Kernmantelfläche unbehandelter Kerne) parallel zur Bohrkernachse bei 150 Hz Frequenz ausgeführt. Aus diesen Einzelmessungen wurde über den arithmetischen Mittelwert der (scheinbare) spezifische Widerstand bestimmt und zusammen mit minimalem und maximalem Widerstand pro Kernstück gespeichert. Jedes Kernstück wurde vor der Messung für 24 Stunden in Leitungswasser eingelegt. Näheres zur Meßapparatur, zur Probenbehandlung und zur Auswertung findet sich bei HUENGES et al. (1989).

Im Kapitel D.7.2 sind die Ergebnisse der Widerstandsmessungen dargestellt und im Kapitel D.7.3 folgt ein erster Vergleich dieser Meßergebnisse mit elektrischen Bohrlochmessungen.

D.7.2 Ergebnisse

In Abb. D.7.1 wird das Teufenlog des spezifischen elektrischen Widerstandes gezeigt. Ebenso sind die geglätteten Meßergebnisse (gleitendes Mittel über 10 m) eingezeichnet.

Die Widerstände liegen größtenteils im Bereich von 1000 Ω m bis 10000 Ω m. Der kleinste Widerstand beträgt 16.6 Ω m, gemessen an einem Sil-Bio-Gneis ('865B2n') aus 3535.35 m Teufe mit einer Graphit-belegten Störungsfläche. Der maximale Widerstand wurde mit 69900 Ω m an einem Meta-Gabbro ('883D1g', 3609.8 m) bestimmt. In 3730.21 m Teufe konnte ein weiterer niedriger Widerstand an einem Meta-Aplit ('913E1s') ermittelt werden. Das Nebengestein ist Amphibolit, der in diesem Bereich stark geklüftet ist.

Wie bereits bei WIENAND et al. (1989) für den Teufenbereich 3000 m bis 3500 m erläutert, sind die Daten auch im Teufenabschnitt 3500 m bis 4000 m nicht normalverteilt. Die Logarithmen der Widerstände folgen dagegen in etwa einer Normalverteilung, wie in der Abb. D.7.2 gezeigt ist. Man erkennt ein breites Häufigkeitsmaximum im Bereich von 2000 Ω m bis 7000 Ω m. Alle Meßergebnisse zusammengenommen ergeben einen logarithmischen Mittelwert von 3086 Ω m (zur Berechnung des logarithmischen Mittelwertes siehe WIENAND et al., 1989).

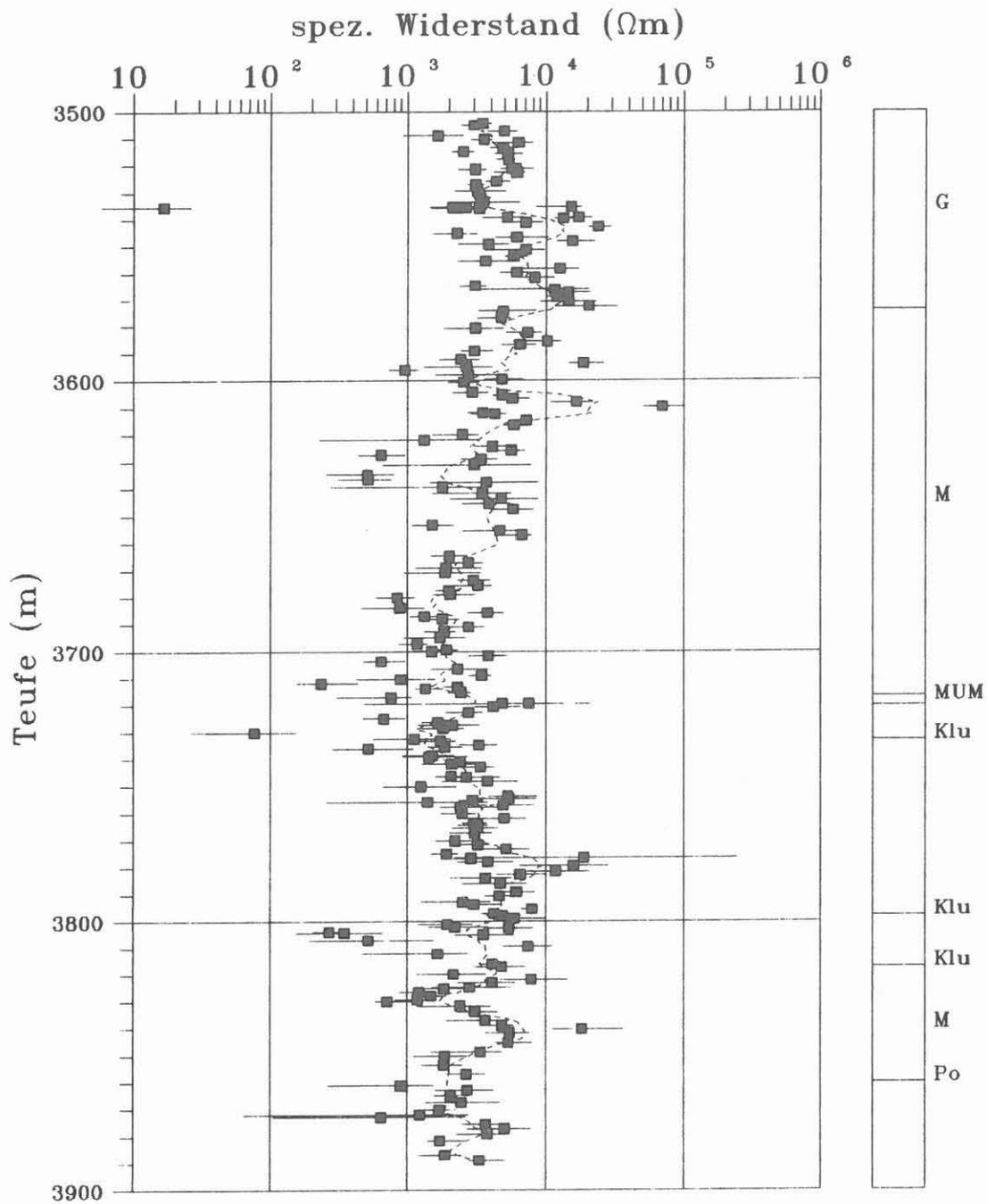


Abb. D.7.1 : An Bohrkernen bestimmte (scheinbare) spezifische elektrische Widerstände. Die Daten wurden mit einer linearen 4-Pol-Anordnung bei 150 Hz Meßfrequenz ermittelt und zeigen den in-Phase-Anteil des komplexen Widerstandes. Dargestellt sind der Mittelwert aus meist 12 Einzelmessungen und der Wertebereich vom kleinsten zum größten Meßwert. Gestrichelte Linie: gleitendes Mittel über 10 m-Intervalle. Rechts das stark vereinfachte lithologische Profil (G=Gneise, M=Metabasite, MUM=Meta-Ultramafitit, Klu=Kluft, Po=poröse Zone). Bei 3535 m Graphitvorkommen.

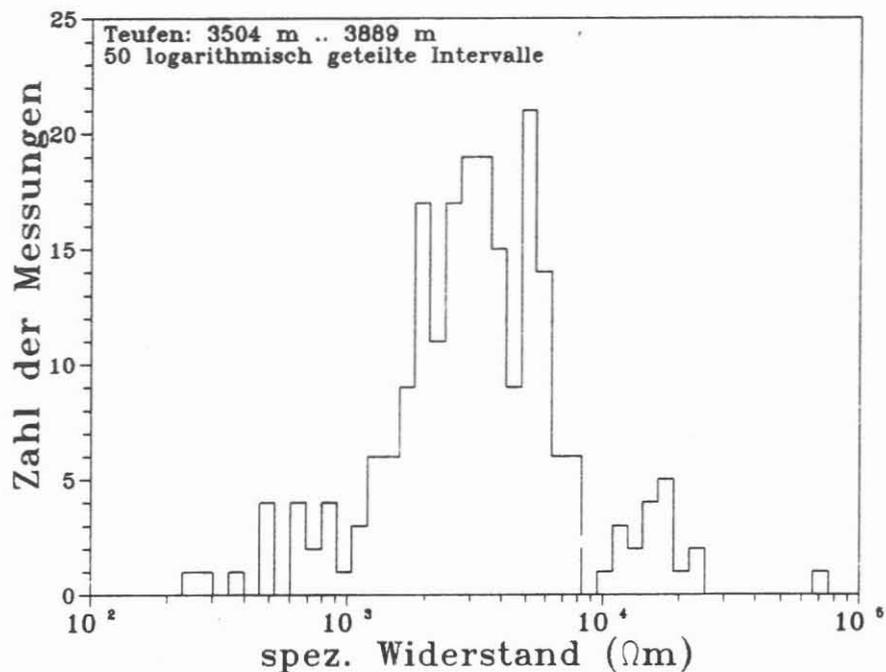


Abb. D.7.2 : Häufigkeitsverteilung der spezifischen Kernwiderstände. Das Widerstandsintervall von 100 Ωm bis 100000 Ωm wurde logarithmisch in 50 gleiche Intervalle geteilt. 218 Kernmessungen wurden berücksichtigt.

D.7.2 Vergleich Kernmessungen - Bohrlochmessungen

Für einen Vergleich standen die folgenden Bohrloch-Logs zur Verfügung (mit freundlicher Genehmigung der Fachgruppe Bohrlochmessungen, zu den Meßprinzipien siehe HÄNEL, 1987): MSFL (Micro Spherically Focussed Log) mit 'geringer' Eindringtiefe in das umgebende Gebirge, LLD (Latero Log Deep) mit 'hoher' Eindringtiefe und LLS (Latero Log Shallow) mit 'mittlerer' Eindringtiefe. Die Leitfähigkeitsmessungen mit induzierenden Verfahren (Induction Logs IDPH und IMPH) lieferten aufgrund des hohen Gebirgswiderstandes keine brauchbaren Ergebnisse. LLD und LLS-Ergebnisse waren sehr ähnlich, so daß zu Kernvergleichszwecken die MSFL und LLS-Messungen (also die beiden mit den geringeren Eindringtiefen) herangezogen wurden.

Abb. D.7.3 zeigt diese 2 Logs zusammen mit den Kernmessungen nebeneinander. Man erkennt bei den Bohrlochmessungen einen sehr viel größeren Wertebereich. Bei 3767 m Teufe zeigen beide Bohrlochmessungen einen deutlich erniedrigten Widerstand, der sich auf den metallischen Ablenkkeil an der Grenze VB1a und VB1b zurückführen läßt, der niedrige Gebirgs widerstände vortäuscht. Bei 3535 m Teufe konnte am Kern eine Graphit-belegte Störung gemessen werden (Abschnitt D.7.2), welche auch im Bohrloch deutlich wird.

Um einen leichteren Vergleich der Daten zu ermöglichen, wurden sie für Abb. D.7.4 geglättet (gleitendes Mittel über 10 m). Auch hier ist der Ablenkkeil in den Bohrlochmessungen zu sehen.

Es ergibt sich im oberen Bereich, in dem Gneise erbohrt wurden (bis ca. 3575 m), eine gute Übereinstimmung aller 3 Meßverfahren. Unterhalb etwa 3575 m, mit dem Einsetzen der Metabasite, korrelieren nur noch Labor- und MSFL-Messungen bis etwa 3620 m. In diesem Bereich sind demzufolge die Bohrkernkerne und der bohrlochnahe Bereich des Gebirges (wegen der geringeren Eindringtiefe des MSFL gegenüber dem LLS) elektrisch ähnlich, während sich in weiterer Entfernung von der Wand ein wesentlich erhöhter Widerstand zeigt. Deutlich wird auch ein Teufenversatz zwischen Kern-Log und MSFL, wobei das MSFL etwa 2-3 m tiefer liegt.

Im weiteren Verlauf fallen einige Minima der Bohrloch-Logs auf, die oft in beiden Logs an gleichen Teufen auftreten (3640m, 3809 m, 3875m, 3888 m und um 3945 m). Diese Minima wurden in den Kernmessungen nicht beobachtet. Eine Erklärung hierfür könnte sein: klüftige Bereiche im Gebirge erniedrigen den Widerstand durch eindringende Bohrspülung mit geringem spezifischem Widerstand (einige Ω m). Aus diesen klüftigen Bereichen sind kompakte Kerne nicht erhalten und damit liegen auch keine Kernmessungen vor.

Weiterhin liegen unterhalb von ca. 3650 m Teufe (bis auf die angesprochenen klüftigen(?) Bereiche in der Bohrlochwand) Kernmessungen systematisch unter dem MSFL und dieses Log unter dem LLS. Dies könnte erklärt werden durch Risse, die im Kern bevorzugt, aber auch im nahen Umfeld um die Bohrlochwand entstehen. Weitere Arbeiten zu diesem Thema, auch im Hinblick auf Core-Disking, laufen derzeit noch im Feldlabor.

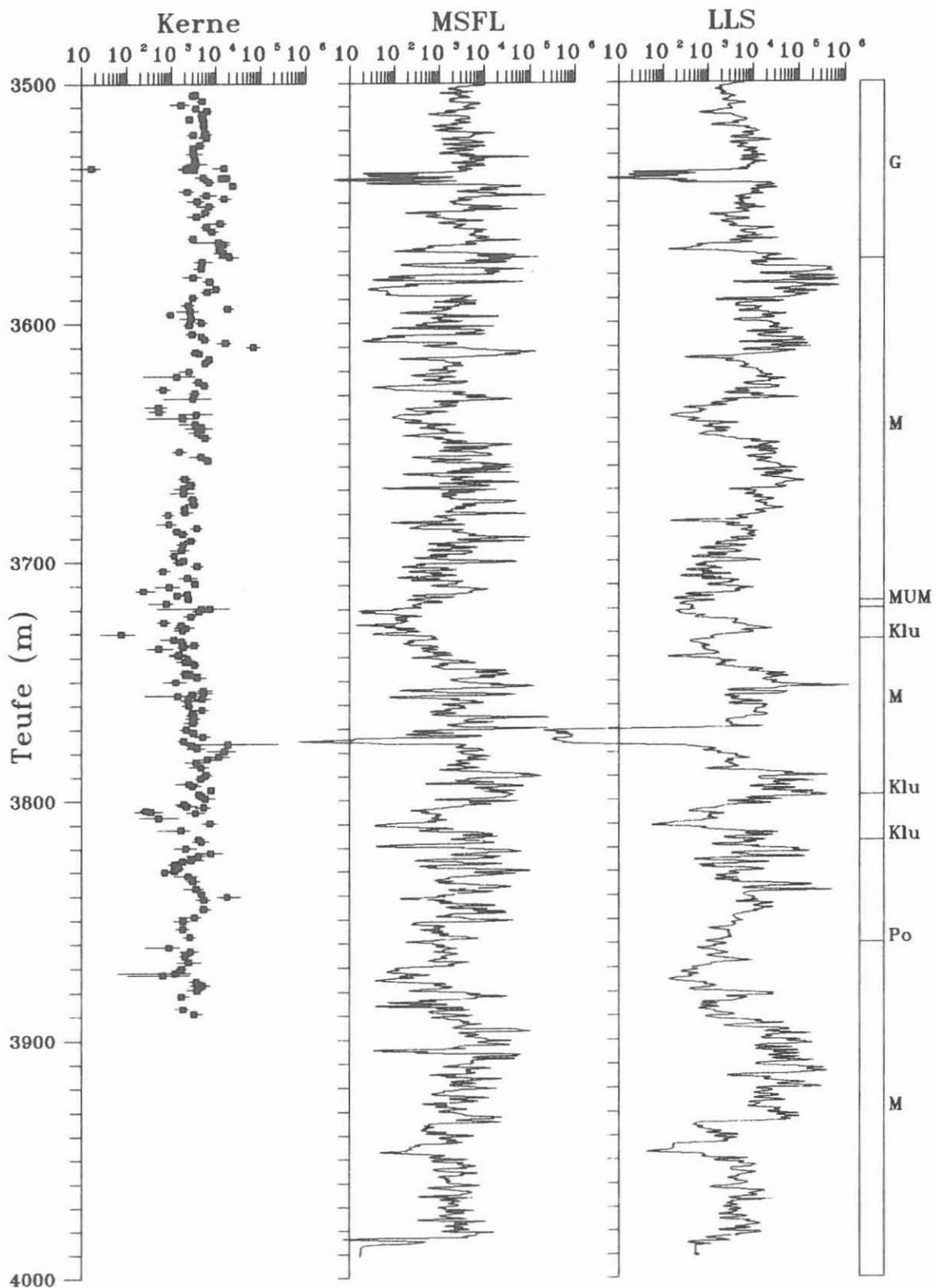


Abb. D.7.3 : Widerstandslogs dreier Meßverfahren: Labormessung (Kerne) und 2 Bohrlochmessungen (MSFL, kleinere Eindringtiefe und LLS, größere Eindringtiefe). Rechts stark vereinfachtes Litho-Profil (Legende bei Abb. D.7.1)

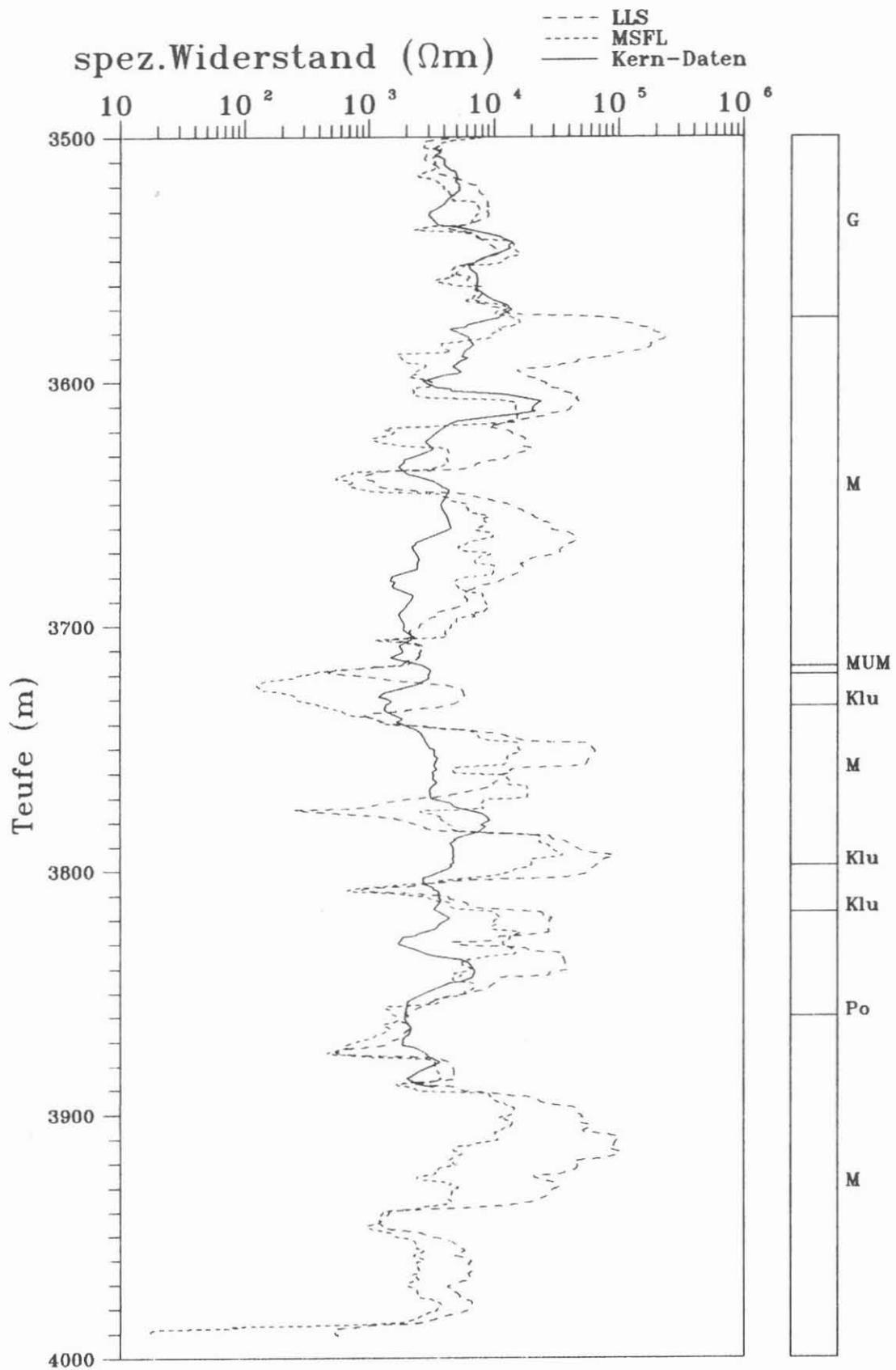


Abb. D.7.4 : Widerstandslogs aus Abb. D.7.3, jeweils geglättet durch Anwendung eines gleitenden Mittelungsfensters über 10 m (Legende des lithologischen Profils bei Abb. D.7.1).

D.8 Retardierte Entspannungsdeformation und akustische Emission

D.8.1 Allgemeines

Der vorliegende Bericht ist schwerpunktmäßig in drei Teile gegliedert. Der Abschnitt D.8.2 beinhaltet die Ergebnisse der retardierten Entspannungsdeformation und die der Messung der akustischen Emissionen. Der Abschnitt D.8.3 stellt die Ergebnisse einer qualitativen Analyse akustischer Emissionen bezüglich deren Charakteristik des Ersteinsatzes dar. Der Berichtsabschnitt D.8.4 beschreibt eine Extrapolation der Beträge der zeitabhängigen Entspannungsdeformation zurück zu dem Zeitpunkt, zu dem der Bohrkern aus dem Gebirge herausgebohrt wurde.

D.8.2 Meßergebnisse der retardierten Entspannungsdeformation und der akustischen Emission.

Im Teufenbereich zwischen 3500 - 3857 m wurden an neun Bohrkernproben Messungen der Entspannungsdeformation und der akustischen Emission (AE) durchgeführt. Die Versuchsdurchführung dieses Relaxationsexperimentes ist in WOLTER et al. (1988) und WOLTER & BERCKHEMER (1989) beschrieben. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um petrographisch unterschiedliche Materialien, deren Teufe und Petrographie aus der Tab. D.8.1 zu entnehmen ist. Mit Ausnahme der stark foliierten Gneis-Proben (865E2zK und 874G1vK) handelt es sich um einen Ultramafitit und um Amphibolite, die nur teilweise eine Foliation aufweisen.

Probe	Teufe [m]	Petrographie
865E2zK	3537.6	Sil-Bio-Gneis, feinkörnig, foliiert
874G1vK	3573.5	Sil-Bio-Gneis, mittelkörnig, foliiert
877F3aeK	3589.8	GNT-Amphibolit, mittelkörnig
889G1pK	3638.4	GNT-Amphibolit, feinkörnig
902G1wK	3675.6	Amphibolit, mittelkörnig
909F1nK	3709.3	GNT-Amphibolit, schwach foliiert
911E1adK	3719.2	Ultramafitit, feinkörnig
928E1pK	3808.0	GNT-Amphibolit, feinkörnig
944D6rK	3857.5	Amphibolit, mittelkörnig, foliiert

Tab. D.8.1: Petrographie der untersuchten Bohrkernproben

In der Tab. D.8.2 sind die erzielten Meßergebnisse aufgeführt. e_1 , e_2 , e_v sind die Beträge der Hauptdeformationen, α ist die Orientierung der maximalen radialen Hauptdeformation (e_1) bezogen auf die Feldlabor-Referenzlinie (WOLTER et al.

1988), Θ ist die Absolutorientierung der radialen Hauptdeformation e_1 , τ_s ist die durchschnittliche Relaxationszeit der Retardation (LIPPMANN et al. 1988, WOLTER & BERCKHEMER 1989), τ_{AE} ist die Relaxationszeit der akustischen Emissionen und $AE(n)$ ist die Anzahl der akustischen Signale, die während des vollständigen Retardationsprozesses registriert wurden.

Probe	e_1 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	e_2 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	e_v [$\mu\text{m}/\text{m}$]	α [$^\circ$]	Θ [N $^\circ$ E]	τ_s [h]	τ_{AE} [h]	AE [n]
865E2zK	260	152	284	21	-	37	32	6752
874G1vK	126	98	113	131	-	15	-	-
877F3aeK	50	21	50	178	-	40	-	-
889G1pK	41	13	19	141	-	29	-	-
902G1wK	41	22	40	61	-	40	32	407
909F1nK	17	12	13	173	-	5	5	468
911E1adK	9	7	8	150	-	1	-	92
928E1pK	64	54	58	83	-	36	32	3913
944D6rK	225	32	70	148	-	37	-	1113

Tab. D.8.2: Meßergebnisse der Entspannungsdeformation und der akustischen Emission

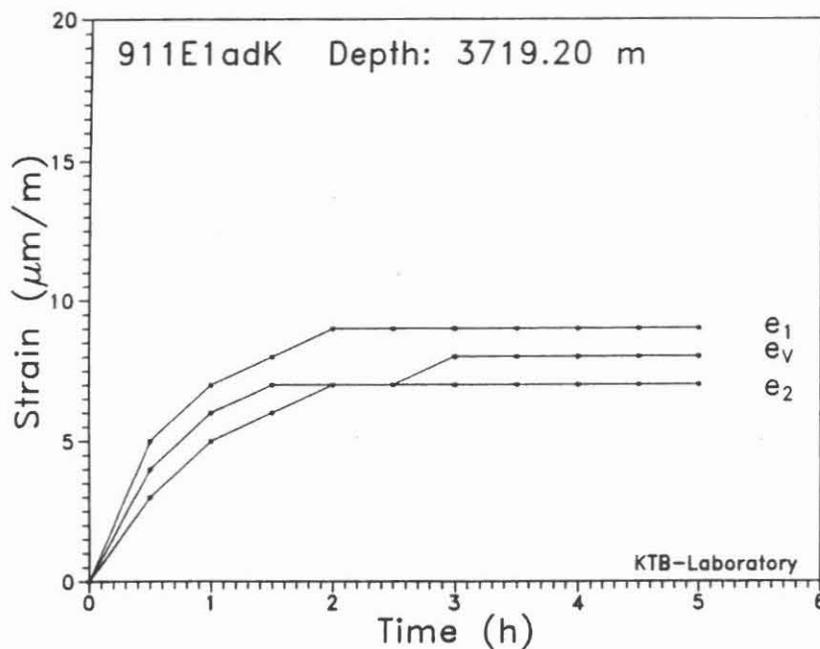


Abb. D.8.1: Zeit-Deformationsverlauf der Ultramafitit-Probe

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Retardationsmessungen (Tab. D.8.2) ist für die beiden Bohrkernproben 909F1nK und 911E1adK zu entnehmen, daß ungewöhnlich niedrige Beträge der

zeitabhängigen Entspannungsdeformation und sehr kurze Relaxationszeiten von 5 h bzw. 1 h erzielt wurden. In Abb. D.8.1 ist der Zeit-Deformationsverlauf der Ultramafitit-Probe 911E1adK dargestellt. Das Diagramm zeigt deutlich, daß der Retardationsprozeß schon nach 2-3 h abgeschlossen war.

Derart niedrige Ergebnisse der Retardation wurden bisher an keiner Bohrkernprobe aus der KTB-Vorbohrung ermittelt. Die Ursache hierfür dürfte nicht darin liegen, daß die in situ Spannung in diesem Teufenbereich relativ niedrig ist, sondern daß die Materialeigenschaften (Elastizität und Bruchfestigkeit) der Gesteine möglicherweise einen nicht unerheblichen Einfluß auf den Retardationsprozeß haben. Bei den beiden oben erwähnten Bohrkernproben handelt es sich um Materialien mit sehr hohen E-Moduli. In der Tab. D.8.3 sind für verschiedene Gesteine die im einaxialen Druckversuch statisch bestimmten E-Moduli ($E_{(stat)}$), Bruchfestigkeiten (σ_U) und die Poissonzahl (ν_{stat}) aufgeführt (RÖCKEL & NATAU 1989). Weiterhin enthält die Tab. D.8.3 die aus V_p - und V_s -Daten errechneten dynamischen E-Moduli ($E_{(dyn)}$) und die Poissonzahl (ν_{dyn}). Aus der Tab. D.8.3 ist zu entnehmen, daß die Probe 909F1k einen sehr hohen E-Modul aufweist, der deutlich über den E-Moduli der anderen Gesteinen liegt. Der Elastizitätsmodul eines Materials ist umso größer, je weniger dieses den formverändernden Kräften nachgibt. Möglicherweise ist der Anteil der zeitabhängigen Entspannungsdeformation bei Gesteinen mit hohem E-Modul und hoher Bruchfestigkeit kleiner als bei Gesteinen mit niedrigem E-Modul und geringer Festigkeit.

Kern-Nr.	Gesteinstyp	Teufe [m]	$E_{(stat)}$ [GPa]	$E_{(dyn)}$ [GPa]	σ_U [MPa]	ν_{stat}	ν_{dyn}
307D1f	GNT-Amph	1471.6	44.5	-	84.5	-	-
468G1p	Lamprophyr	2050.7	72.2	-	151.1	0.40	-
526G2u	Lamprophyr	2231.5	68.7	-	77.4	0.35	-
603C1eK	HBL-Gneis	2478.5	41.1	57.6	62.7	-	0.31
652A1a	BIO-Gneis	2698.3	9.6	67.0	9.2	-	0.25
909F1k	Amphibolit	3709.0	90.0	73.8	167.3	0.33	0.26
911E1af	Ultramafitit	3719.2	-	76.9	-	-	0.28

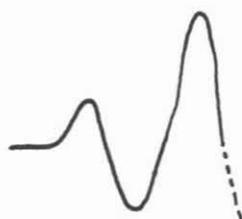
Tab. D.8.3: Gesteins-Parameter verschiedener Gesteinstypen (statisch bestimmte E-Moduli und Bruchfestigkeiten aus RÖCKEL & NATAU 1989).

Es sind vorläufig noch keine Orientierungsdaten unterhalb 3500 m vorhanden, sodaß über die Strain-Orientierungen der Bohrkernkerne derzeit keine Aussage gemacht werden kann. Die Ermittlung der Absolutorientierung der Bohrkernkerne aus der Vorbohrung VB1a ist nur möglich bis in eine Teufe von 3766 m (Kernmarsch 920). Unterhalb dieses Punktes liegen aus der VB1a keine FMST-Daten vor, die als Grundlage für die Kernorientierung herangezogen werden.

D.8.3 Analyse akustischer Signale

Eine statistische Auswertung von 153 akustischen Signalen, die während des zeitabhängigen Entspannungsprozesses petrographisch unterschiedlicher Bohrkernproben digital gespeichert wurden, soll einen qualitativen Überblick geben über die Charakteristik des Ersteinsatzes sowie der Maximal-Amplitude. Es ist dies eine Erweiterung der von BERCKHEMER (1989) im Tätigkeitsbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Be299/63-5 dargestellten "Bemerkungen zur Physik der Entspannungsrisse". Die einzelnen vorliegenden Signale wurden unterschieden in Kompressionssignale und Dilatationssignale (Abb. D.8.2), wobei die Dauer der ersten Halbschwingung und die Dauer bis zum Erreichen der Maximal-Amplitude bestimmt wurden. Typische akustische Signale, wie sie während des Relaxationsvorganges über ein Oszilloskop aufgezeichnet wurden, sind in der Abb. D.8.3 (Kompressionssignal) und in der Abb. D.8.4 (Dilatationssignal) dargestellt. Die Auswertung ergab folgende prozentuale Verteilung des Vorzeichens des Ersteinsatzes:

58% Kompression
21% Dilatation
21% unbestimmbar



Kompressionssignal



Dilatationssignal

Abb. D.8.2: Skizze unterschiedlicher Ersteinsätze

Eine eindeutige Zuordnung der einzelnen akustischen Signale zu einem entsprechenden Bruchmechanismus kann nicht vorgenommen werden, da aufgrund der apparativen Ausstattung (Signalaufnahme erfolgt nur über einen Sensor) eine Auswertung nach der Art der Herdflächenlösung nicht möglich ist. In der Abb. D.8.5 ist die Abstrahlungs-Charakteristik von akustischen Signalen durch einen Trennbruch in einer einfachen Skizze wiedergegeben. Man ersieht daraus, daß ein Trennbruch nur P-Impulse vom Kompressionstyp abstrahlt. Scherbrüche strahlen, wie aus der Seismologie wohl bekannt, im räumlichen Mittel mit gleicher Wahrscheinlichkeit Kompressions- und Dilatationsimpulse ab. Aus der beobachteten Häufigkeitsverteilung der Kompressionen und Dilatationen folgt daher, daß Trennbrüche und Scherbrüche etwa mit gleicher Häufigkeit auftreten.

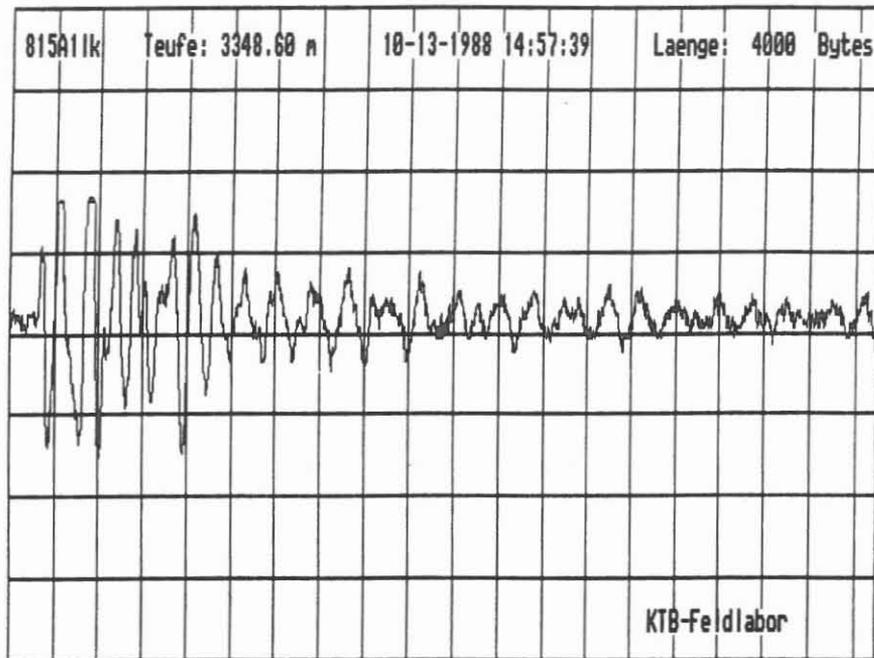


Abb. D.8.3: Kompressionssignal (eine Gittereinheit auf der Zeitscala sind 10µsec)

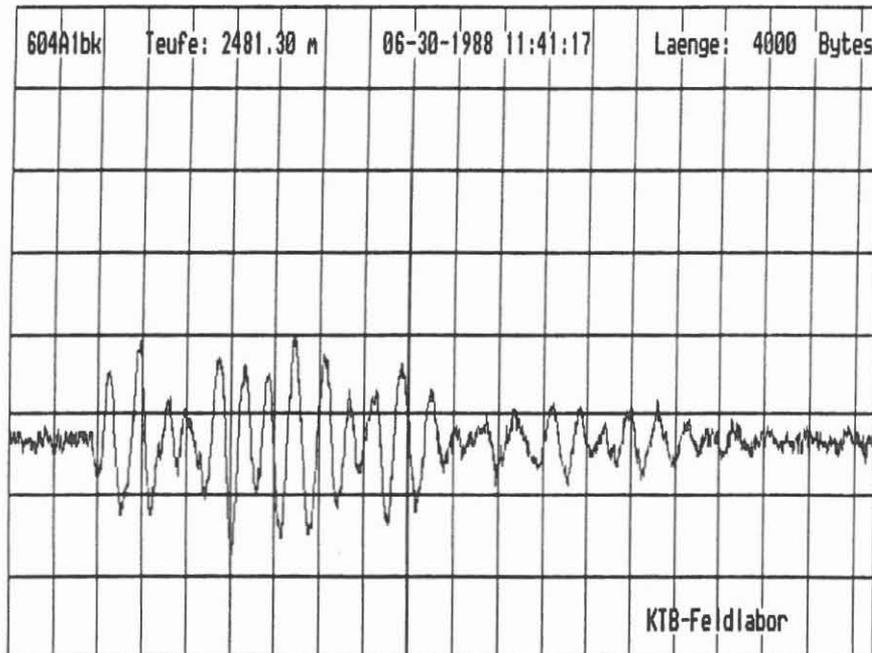


Abb. D.8.4: Dilatationssignal (eine Gittereinheit auf der Zeitscala sind 10µsec)

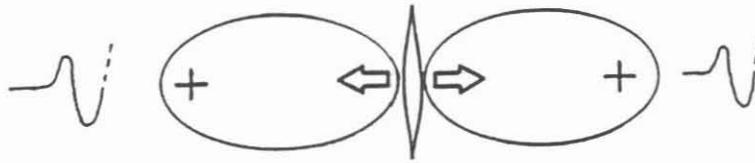


Abb. D.8.5: Abstrahlungs-Charakteristik eines Trennbruches

Die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Dauer und Amplitude der ersten Halbschwingung der akustischen Emissionen ist in Abb. D.8.6 und Abb. D.8.7 dargestellt. Die Dauer der ersten Halbschwingung liegt bei 53% der Signale bei 2µsec. Die Amplitudenstärke ist in relativen Einheiten angegeben. Ein deutliches Häufigkeitsmaximum für die Amplitude der ersten Halbschwingung liegt bei der Stärke 7.

Der ziemlich gleichmäßige Abfall der Ereigniszahl (Abb. D.8.7) mit zunehmender Amplitude oberhalb des Maximums entspricht etwa der Gutenberg'schen Magnituden-Häufigkeitsverteilung bei Erdbeben. Ob der steile Abfall hin nach kleinen Amplituden allein durch die Triggerschwelle des Transientenrecorders bedingt ist, wäre noch zu klären.

In der Abb. D.8.8 ist die Dauer der ersten Halbschwingung gegen deren Amplitude aufgetragen. Aus dem Diagramm läßt sich jedoch keine Charakteristik erkennen, die eine Abhängigkeit der Dauer von der Amplitude der ersten Halbschwingung anzeigt. Die Häufigkeitsverteilung der Zeitdauer bis zum Erreichen der Maximal-Amplitude ist in der Abb. D.8.9 dargestellt.

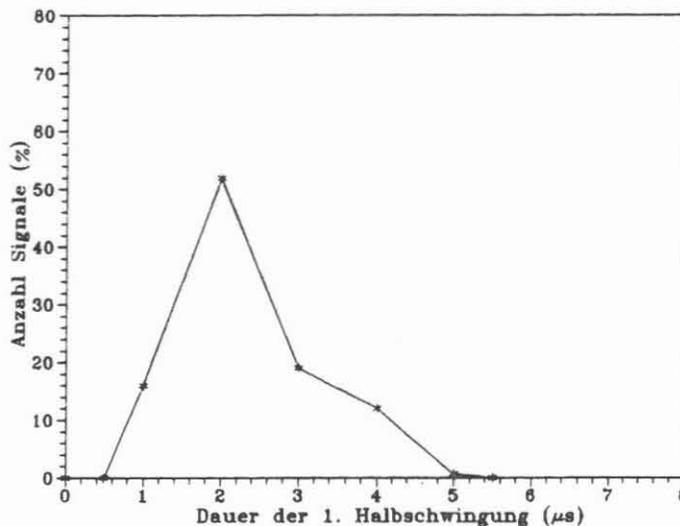


Abb. D.8.6: Häufigkeitsverteilung der Dauer der ersten Halbschwingung

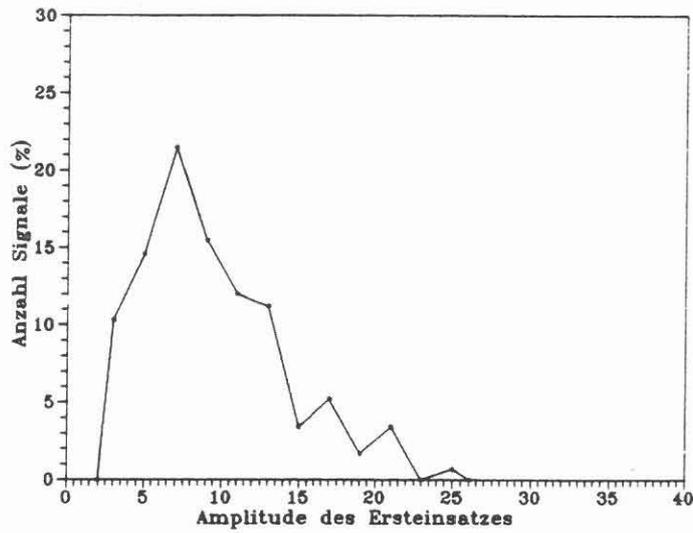


Abb. D.8.7: Häufigkeitsverteilung der Amplitude der ersten Halbschwingung

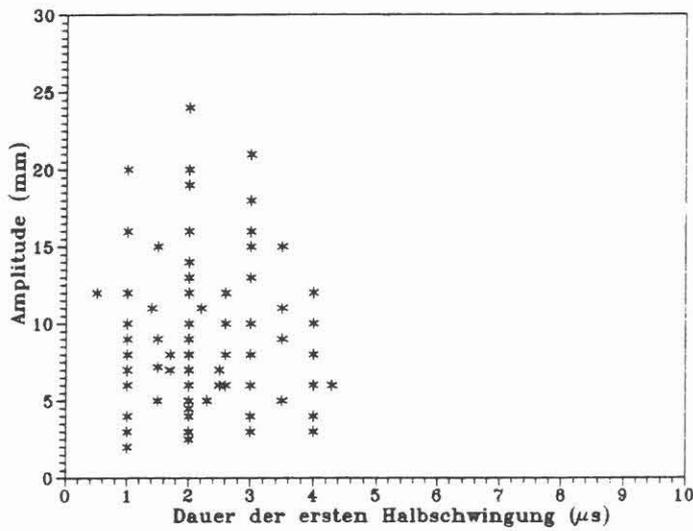


Abb. D.8.8: Dauer gegen Amplitude der ersten Halbschwingung

Die gesamten Daten der AE-Analyse befinden sich im Kapitel D.8.6: Anhang. Eine quelldynamische Interpretation der Daten ist Untersuchungen im Institut für Meteorologie und Geophysik in Frankfurt vorbehalten.

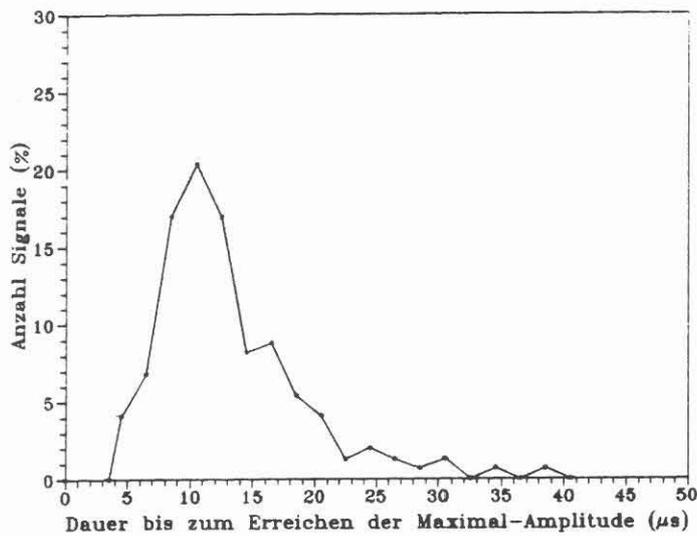


Abb. D.8.9: Häufigkeitsverteilung der Maximal-Amplitude

D.8.4 Extrapolation der Deformationsbeträge

Die Zeitdauer, die zwischen dem Herausbohren des Bohrkerns (Zeitpunkt: T_B) und dem Beginn der Messung (Zeitpunkt: T_M) liegt, beträgt ca. 5 h. In dieser Zeit vollzieht sich ein bestimmter Anteil der zeitabhängigen Entspannungsdeformation. Mit Hilfe einer Extrapolation (freundl. Mitt. A. Zang 1989) erfolgt eine Abschätzung des Anteils, der sich in dieser Zeit ($\Delta t=5h$) ereignet. Die Skizze in Abb. D.8.10 zeigt in halblogarithmischer Darstellung die Restdeformation $e'(t)$, d.h. die Differenz von gemessener Enddeformation $e_{(max)}$ und der aktuellen Deformation $e(t)$ für einen einfachen viskoelastischen Körper.

Die bisherige Erfahrung zeigt, daß die Entspannungsdeformation der Kerne in guter Näherung durch einen solchen einfachen Relaxationsprozeß beschrieben werden kann (WOLTER & BERCKHEMER 1989).

Nach dem Relaxationsgesetz gilt:

$$e'(t) = e_{(max)} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad \tau = \text{Relaxationszeit} \quad (8.1)$$

Die Relaxationszeit (τ) ist die Zeit, in der $1 - 1/\exp(1) \approx 63\%$ der maximalen Entspannungsdeformation erreicht werden.

Als Datengrundlage für die Rückwärts-Extrapolation dienen die Meßwerte der ersten 10h nach Beginn der Retardationsmessung.

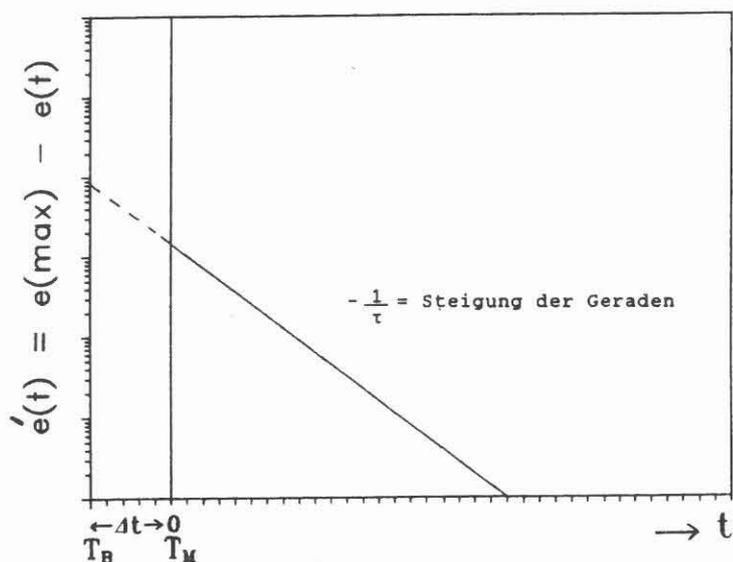


Abb. D.8.10: Skizze des Zeit-Deformationsverlaufes für den zu extrapolierenden Zeitraum $\Delta t=5h$

Abb. D.8.11 und Abb. D.8.12 sind zwei Darstellungen der Extrapolation des Deformationsverlaufes zweier petrographisch unterschiedlicher Bohrkerne mit deutlich unterschiedlichen Relaxationszeiten.

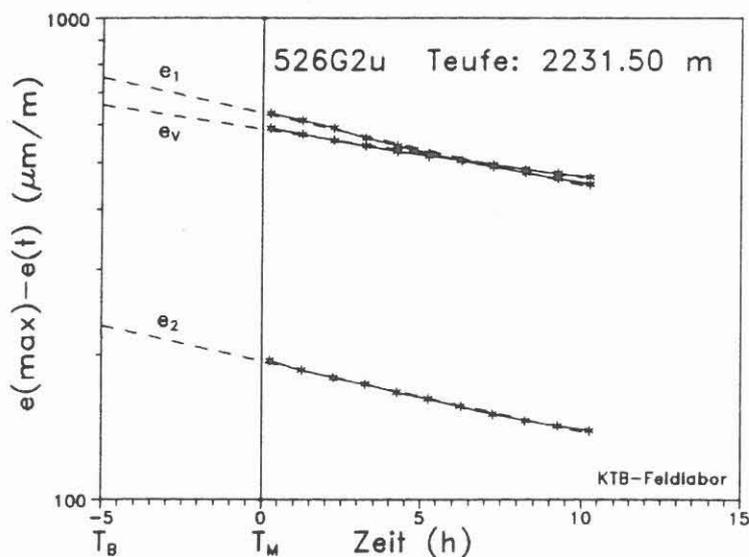


Abb.D.8.11: Extrapolierter Zeit-Deformationsverlauf der Lamprophyprobe (526G2u)

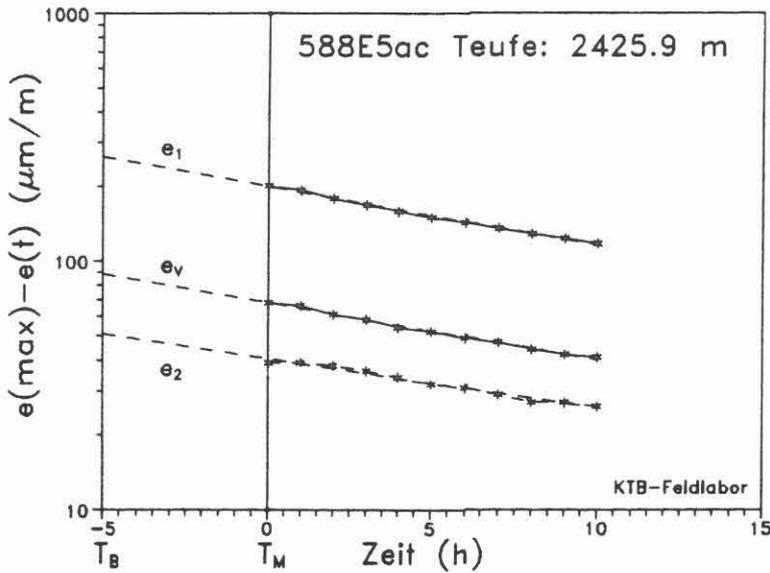


Abb.D.8.12: Extrapolierter Zeit-Deformationsverlauf der Paragneisprobe (588E5ac)

Tab. D.8.4 beinhaltet die gemessenen Maximaldeformationen $e_{i(max)}$, die extrapolierten Maximal-Deformationsbeträge $e_{i(extr)}$ für den Zeitpunkt T_B sowie die Relaxationszeiten τ_i ($i=1,2,v$) für die zeitabhängigen Hauptdeformationen e_i ($i=1,2,v$) verschiedener Bohrkernproben. Weiterhin sind die Quotienten q_i ($i=1,2,v$) angegeben.

$$q_i = e_{i(extr)} / e_{i(max)} \quad (8.2)$$

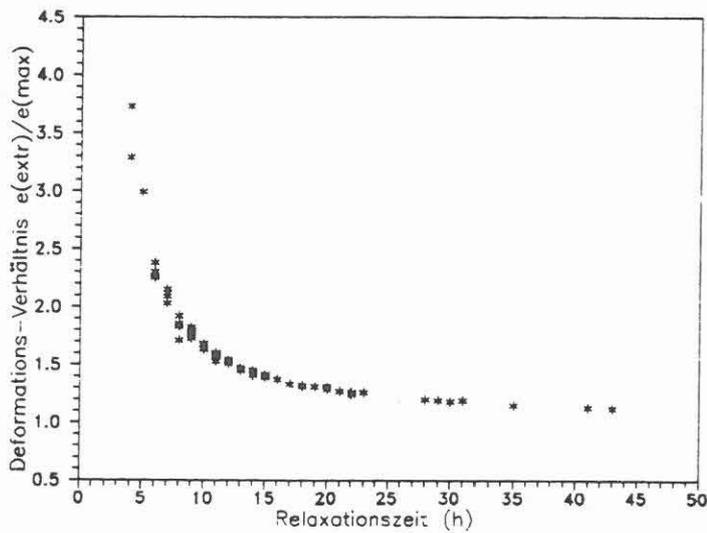


Abb.D.8.13: Abhängigkeit des Anteils der nicht erfaßbaren Deformation von der Relaxationszeit

Der relative Anteil der Deformation, der sich in den 5 h zwischen dem Herausbohren des Kerns und dem Beginn der Messung ereignet, ist abhängig von der Relaxationszeit. Diese Abhängigkeit wird in der Abb. D.8.13 dargestellt. Je kürzer die Relaxationszeit, desto größer der Retardationsanteil, der nicht erfaßt werden kann.

Kern-Nr.	τ_1	τ_2	τ_v	$e_1(\max)$			$e_1(\text{extr})$			$e_1(\text{extr})/e_1(\max)$		
				e_1	e_2	e_v	e_1	e_2	e_v	q_1	q_2	q_v
			[h]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]			[$\mu\text{m}/\text{m}$]					
464B1g	11	10	9	233	63	188	373	106	337	1.6	1.7	1.8
468G1r	11	14	9	287	94	128	451	136	222	1.5	1.5	1.7
526G2u	29	30	43	637	197	593	757	233	666	1.1	1.2	1.1
588E5ac	18	22	19	201	39	68	265	49	89	1.3	1.3	1.3
604B1g	9	8	8	22	7	12	40	12	22	1.8	1.7	1.8
632G1r	12	11	15	60	30	27	91	46	38	1.5	1.5	1.4
638D2j	12	11	4	106	22	11	163	35	41	1.5	1.6	3.7
656G1p	41	29	30	133	57	87	150	68	103	1.1	1.2	1.2
699H2xK	18	18	15	111	71	92	147	94	128	1.3	1.3	1.4
753G1wK	5	35	7	67	41	94	200	47	191	3.0	1.2	2.0
789F1xK	14	11	13	345	175	680	496	277	988	1.4	1.6	1.5
797F1aeK	9	9	6	47	20	34	83	35	81	1.8	1.8	2.4
802F1tK	16	18	13	35	29	121	48	38	177	1.4	1.3	1.5
810D1oK	10	8	7	72	53	94	120	98	196	1.7	1.9	2.1
830H1acK	4	6	6	42	10	11	138	23	25	3.3	2.3	2.3
855C2nK	14	13	15	50	30	34	71	44	48	1.4	1.5	1.4
865E2zK	17	15	14	260	152	284	347	213	401	1.3	1.4	1.4
874G1vK	21	18	18	126	98	113	160	129	149	1.3	1.3	1.3
877F3aeK	22	31	28	49	21	50	61	25	60	1.2	1.2	1.2
889G1pK	20	20	23	41	13	19	53	17	24	1.3	1.3	1.3
909F1nK	7	8	7	17	12	13	36	23	28	2.1	1.9	2.2
928E1pK	12	12	10	105	89	100	161	137	164	1.5	1.5	1.6
944D6rK	12	6	10	323	89	127	489	200	207	1.5	2.3	1.6

Tab. D.8.4: Daten der Extrapolation für verschiedene Bohrkernproben

D.8.5 Zusammenfassung

Bei den Ergebnissen der zeitabhängigen Entspannungsdeformation der Bohrkerne zwischen 3500-3857 m fallen zwei Bohrkernproben durch niedrige Deformationsbeträge und kurze Relaxationszeiten auf. Beide Proben zeichnen sich aus durch hohe E-Moduli und hohe Bruchfestigkeiten. Es wird vermutet, daß die Elastizität und Bruchfestigkeit der Bohrkernprobe einen Einfluß auf die zeitabhängige Entspannungsdeformation hat und zwar in folgender Form: Je höher der E-Modul und die Bruchfestigkeit desto geringer der zeitabhängige Deformations-Anteil.

Die qualitative Analyse von 153 akustischen Emissionen ergab, daß 58% der Signale Kompressionssignale sind, die vermutlich zum großen Teil durch Trennbrüche verursacht werden. Eine quantitative Analyse des Bruchmechanismus ist, bedingt durch den Versuchsaufbau, nicht möglich. Das Maximum in der Häufigkeitsverteilung für die Dauer der ersten Halbschwingung liegt bei 2 μ sec.

Die Extrapolation der zeitabhängigen Deformation für den Zeitraum ($\Delta t=5h$) zwischen dem Herausbohren des Kerns und dem Beginn der Messung verdeutlicht die Abhängigkeit dieses Deformationsanteils von der jeweiligen Relaxationszeit. Je kürzer die Relaxationszeit eines Materials, desto größer ist der Retardationsanteil, der in den ersten 5 h vor Meßbeginn stattfindet und somit für die Messung verloren ist. Im Mittel werden etwa 60% der gesamten zeitabhängigen Entspannung durch die Messung erfaßt. Dies beinhaltet nicht die momentane elastische Entspannung, die sofort nach dem Herausbohren des Bohrkerns auftritt und der Messung nicht zugänglich ist.

D.8.6 Anhang: Daten der AE-Analyse:

Kern-Nr.	Richt.	τ_s [μ s]	Ampl.	τ_{max} [μ s]					
579D1q	+	2.6	6	30	874G1vK	+	2	16	9
	+	3.5	5	31		-	3	8	28
	+	2.6	8	22		o	-	-	20
	+	1.7	8	24		-	2	8	13
583A1h	+	1.7	7	12		+	3	16	10
	-	4.3	6	10		-	3	10	12
	+	3	6	8		-	2	24	8
	+	3.5	15	16		-	2	12	10
	-	1	9	38		+	2	6	9
	+	1	9	10		-	3	10	10
588E5ac	-	2.2	11	20	877F3aeK	+	2	13	7
	-	1.5	9	11		-	4	10	10
	o	-	-	14		+	2	8	8
	o	-	-	15		+	2	7	6
	+	3.5	11	25	889G1pK	+	2	2.5	5
	+	2.5	7	25		+	2	4	10
599E1m	+	1.4	11	8	889G1pK	o	-	-	14
	-	1	7	8		+	2	4	6
	+	1.5	15	5		+	3	6	11
	-	1	8	16	902G1w	+	2	4	10
	-	1	10	12		+	1	2	10
604A1b	-	2.6	10	10		+	2	3	17
	-	2.6	12	12		o	-	-	16
	+	3.5	9	8		-	2	3	15
	+	1.5	5	10		-	3	3	8
638D2j	+	2	14	13		o	-	-	8
	o	-	-	-		+	2	3	20
	+	2	9	14		o	-	-	25
	o	-	-	-	909F1agK	+	1	4	10
	+	2	9	12		o	-	-	16
	o	-	-	-		+	4	3	10
656G1p	-	2.5	6	10		+	1	4	16
	+	3	6	17		o	-	-	10
	+	3	6	8		+	4	10	35
	+	4	8	8		o	-	-	18
	+	2.6	6	7	911E1adK	+	1	10	4
	+	3	6	6		+	2	3	10
	-	2	5	11		+	4	6	6
699E2x	-	1.5	7.2	15		+	3	4	11
	o	-	-	7		+	2	3	4
	o	-	-	11		+	1	3	4
	o	-	-	9		+	2	5	13
753G1w	+	2	5	10		+	2	5	8
	+	3	8	16	928E1pK	+	4	4	25
	+	2.3	5	10		+	1	16	17
	o	-	-	-		-	4	12	20
789F1x	+	3	18	8		o	-	-	15
	+	-	-	10	928E1pK	+	2	12	14
	+	-	-	18		+	3	6	14
	+	-	-	13		-	2	4	13
	+	2	3	15		o	-	-	10
	-	1	7	13		+	2	6	11
	-	2	7	12		+	2	10	18
802F1t	+	2	10	12		+	1	6	8
	+	1	12	16		o	-	-	12
810D1o	+	2	13	11		+	2	4	18
	o	-	-	16		o	-	-	18
	o	-	-	20		-	2	4	13
	o	-	-	21		+	2	6	10
	-	2	16	19		+	2	4	11
815A11K	+	2	16	12	944D6rK	+	4	6	10
	+	1	16	5		+	2	13	10
	+	-	-	9		+	4	3	8
	+	1	8	18		o	-	-	12
	+	-	-	-		+	2	4	17
855C2n	+	2	12	13		+	2	4	9
	+	3	8	8		-	2	4.5	12
	+	1	20	6		+	2	7	11
	-	2	20	12		+	2	5	8
	-	2	19	13					
	+	2	20	6					
	-	3	21	9					
	o	-	-	-					
	+	3	15	12					
865E2zk	-	3	13	10					
	+	2	8	10					
	+	0.5	12	16					
	+	4	10	17					
	+	2	12	12					
	+	1	6	8					
	+	1	10	7					
	+	1	9	8					

Richt.:
+ Ersteinsatz positiv
- Ersteinsatz negativ
o unbestimmbar

τ_s : Dauer der ersten Halbschwingung

Ampl.: Relative Amplitude des Ersteinsatzes

τ_{max} : Zeitdauer bis zum Erreichen der Maximal-Amplitude

D.9 Permeabilität

Im Teufenbereich von 3329 - 3719 m wurde die Permeabilität nach d'Arcy mit dem im KTB-Report 89-5 (WIENAND et al. 1989) beschriebenen Permeameter gemessen. Ergänzt wurden Daten aus dem Teufenbereich von 1500 - 2604 m, die als Auftragsmessungen am "Mineralogischen Institut" der Universität Bonn bestimmt wurden. Die Messungen erfolgten mit einem Druckausgleichsverfahren bei verschiedenen äußeren Druckstufen mit der bei HUENGES (1987) beschriebenen Meßapparatur.

In Abb. D.9.1 sind die Permeabilitätswerte mit einem vereinfachten lithologischen Profil dargestellt. Ohne auf Details in der Abbildung einzugehen, ist festzustellen daß die Daten, die sowohl an Gneis- als auch an Metabasitproben ermittelt wurden, im μd -Bereich streuen, unabhängig von der Lithologie. Messungen an unmittelbar benachbarten Proben zeigen, daß der Durchfluß parallel zur Foliation (offene Symbole) deutlich stärker ist als senkrecht dazu (geschlossene Symbole).

Die Druckausgleichsmessungen wurden bei variablen Drücken mit dem Manteldruck gleichen uniaxialen Druck auf die zylindrische Probe durchgeführt. Zwecks übersichtlicher Darstellung wurden Messungen bei verschiedenen Manteldrücken in die Klassen von 50 bar; 100 - 200 bar und 300 - 900 bar zusammengefaßt. Meßwerte gleicher Proben bei unterschiedlichen Drücken sind mit einer Linie verbunden. Wichtig ist eine Untersuchung, ob diese Änderung der Permeabilität mit dem Druck foliationsabhängig ist. Das Beispiel in Abb. D.9.2 zeigt parallel zur Foliation keine stärkere Druckabhängigkeit als senkrecht dazu. D. h. der Anisotropiefaktor, der bei 50 bar ca. 1000 beträgt, wird mit zunehmendem Druck nicht verringert.

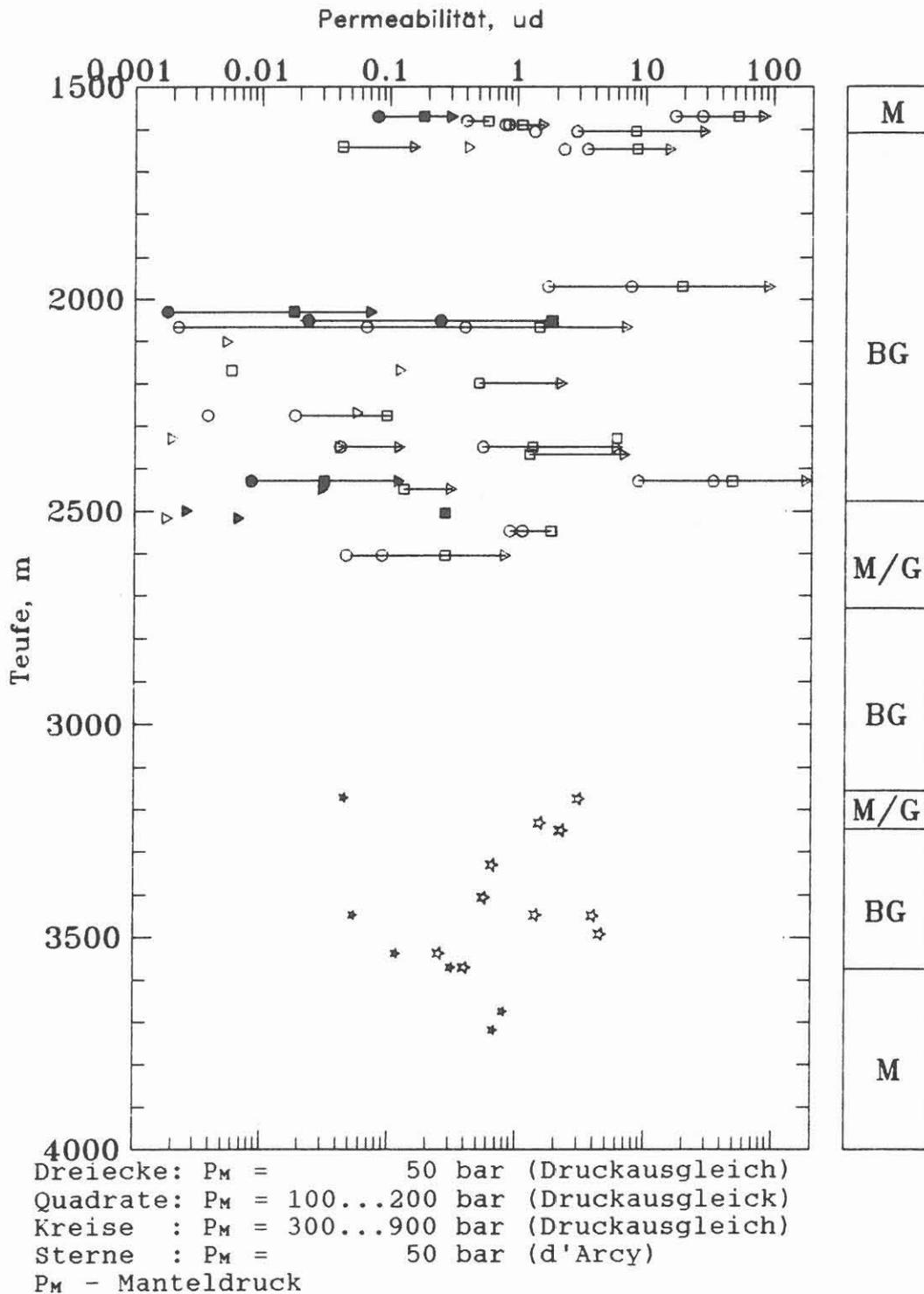


Abb. D.9.1: Permeabilität von Bohrkernproben ($\phi=30$ mm; $l=10 \dots 50$ mm) in Abhängigkeit von der Teufe. Die Symbolform gibt den in der jeweiligen Apparatur eingestellten Manteldruck gemäß Legende wieder. Mit geschlossenen Symbolen sind senkrecht zur Foliation und mit offenen Symbolen parallel zur Foliation erbohrte Proben gekennzeichnet. Meßwerte gleicher Proben bei unterschiedlichen Drücken sind mit einer Linie verbunden.
 Rechts: Vereinfachtes lithologisches Profil (M=Metabasite; BG=Biotit-Gneis)

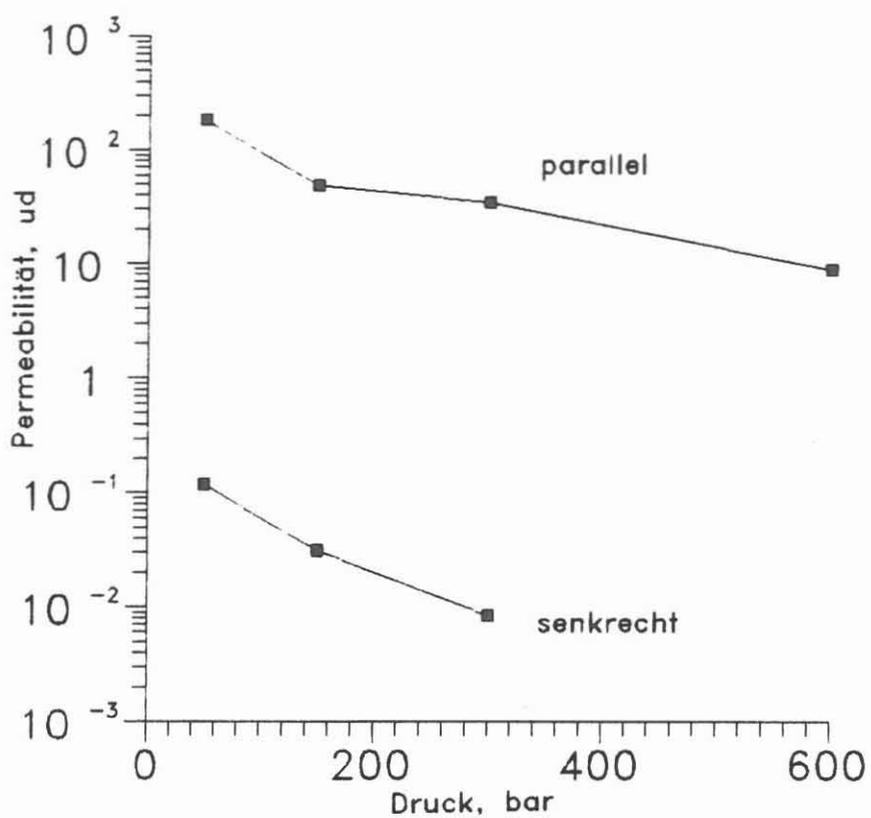


Abb. D.9.2: Permeabilität in Abhängigkeit vom Druck parallel und senkrecht zur Foliation eines Gneises aus 2429 m (Kernstück 591B2bK)

D.10 Porosität

D.10.1 Allgemeines

Im Bereich von 3303 - 3889 m wurde die Porosität an 278 Miniplugins bestimmt. Die Porositätsbestimmung erfolgte nach dem "Archimedischen Prinzip" (HUENGES et al. 1989).

D.10.2 Porosität der Miniplugins

Bei den Miniplugins ergab sich eine mittlere Porosität von 0.75 %. Die Schwankungsbreite der Porosität reicht von 0.2 %, gemessen an einem feinkörnigen, lagigen Amphibolit aus einer Teufe von 3638.87 m, bis zu 6.0 %, gemessen an einem fein- bis mittelkörnigen Amphibolit aus einer Teufe von 3632.02 m. In Abb. D.10.1 ist die lineare Häufigkeitsverteilung der Porositäten und in Abb. D.10.2 ist die logarithmische Häufigkeitsverteilung der Porositäten dargestellt.

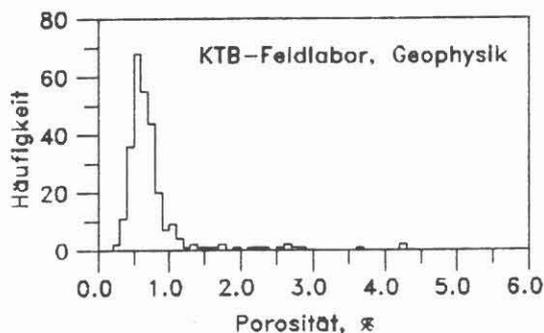


Abb. D.10.1: lineare Häufigkeitsverteilung der Porositäten

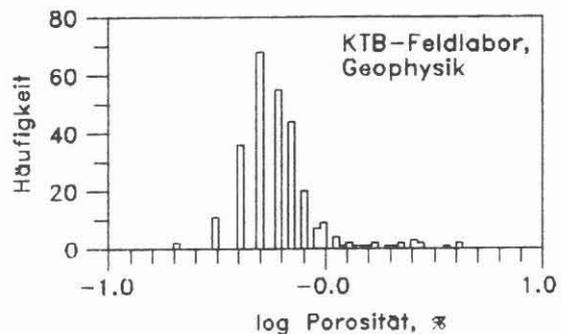


Abb. D.10.2: logarithmische Häufigkeitsverteilung der Porositäten

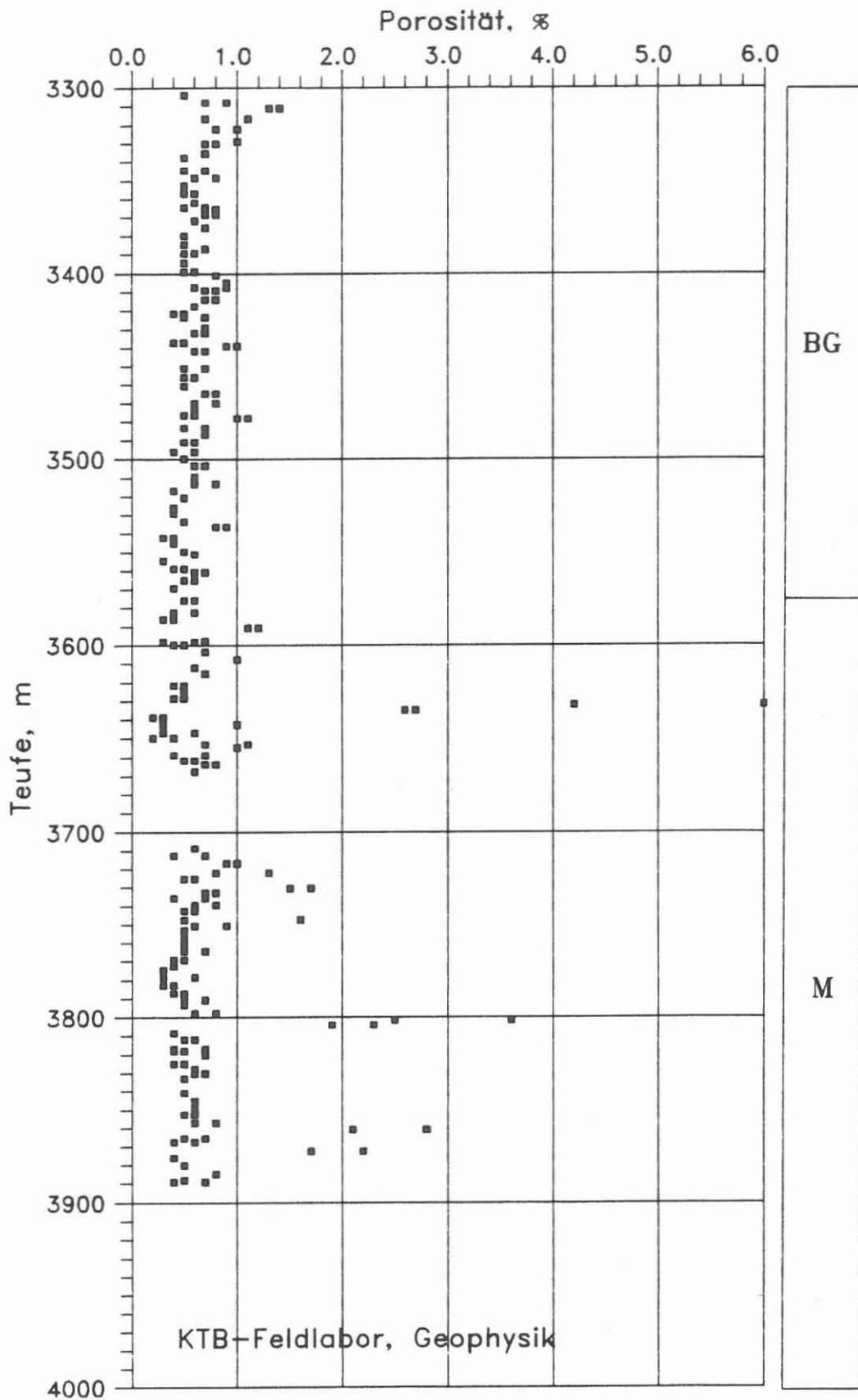


Abb. D.10.3: Teufenlog der Porosität

D.11 Literatur

- BERCKHEMER, H. (1988): Bemerkung zur Physik der Entspannungsrißbildung.- Tätigkeitsbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Be 299/63-5,II, (unveröffentl.).
- BÜCKER, CH., 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.
- BÜCKER, C. & G. Zimmermann (1989): Vergleichende Untersuchung der Gamma-ray-Messungen (GR) im Bohrloch und an Bohrkernen im Teufenbereich 3000-3500 m. - KTB-Report 89-5, E1-E9, Hannover.
- HÄNEL, R. (1987): Arbeitsprogramm KTB-Bohrlochgeophysik sowie Bohrlochmessprogramm KTB-Oberpfalz VB (1.9.87). KTB-Report 87-3, S. 93 ff., Hannover.
- HOMANN, K.D., HEINSCHILD, H.-J., STROH, A. & M. TAPPER (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 1530-1998 m: C. Geochemie.- KTB-Report 88-9: C1-C88, Hannover.
- HOMANN, K.D. & H. MÜLLER (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor: F. Wechselwirkung zwischen Dehydril HT-Bohrspülung und Gesteinsmehl.- KTB-Report 89-2: F1-F33, Hannover.
- HUENGES, E. (1987): Messung der Permeabilität von niedrigpermeablen Gesteinsproben unter Drücken bis 4 kbar und ihre Beziehung zu Kompressibilität, Porosität und komplexem elektrischem Widerstand. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- HUENGES, E., BÜCKER, Ch., WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A. & E. LIPPMANN (1989, 1989a): Deep Drilling KTB-Oberpfalz VB, Results of the Geoscientific Proceedings in the KTB-Laboratory; Depth Interval: 1709 - 2500 m: D. Geophysik.- KTB-Report 89-2, D1-D83, Hannover.
- HUENGES, E., REIBELT, M. & LAUTERJUNG, J. (1989b): Vergleich der an Kernen gemessenen Wärmeleitfähigkeit mit der aus den Modalanalysen berechneten Wärmeleitfähigkeit. KTB-Report 89-5, F1-F9, Hannover.

- LIPPMANN, E., HUENGES, E., BÜCKER, Ch., WIENAND, J., WOLTER, K.E. & A. RAUEN (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 1530 bis 1998 m: D. Geophysik. - KTB-Report 88-9: D1-D60, Hannover.
- MASSALSKY, T., H. MÜLLER, C. RÖHR, G. GRAUP, W. HACKER, S. KEYSSNER & J. KOHL (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 1530 bis 1998 m: B. Geologie.- KTB-Report 88-9: B1 - B66, Hannover.
- RAUEN, A., LIPPMANN, E., HUENGES, E., BÜCKER, Ch., WIENAND, J. & K.E. WOLTER (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 992 bis 1530 m: D. Geophysik.- KTB-Report 88-6: D1-D60, Hannover.
- RÖCKEL, T. & O. NATAU (1989): Erste Ergebnisse der felsmechanischen Indexversuche im Teufenbereich von 2000-3000 m. - in: Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, (Hrsg.) Emmermann, Dietrich, Heinisch, Wöhrle, KTB-Report 89-5, H1-H13, Hannover.
- RYBACH, L. (1976): Radioactive heat production, a physical property determined by the chemistry of rocks. In: R.G.J. Strens (ed.): "The Physics and Chemistry of Minerals and Rocks", Wiley & Sons, London.
- WIENAND, J., RAUEN, A., HUENGES, E., BÜCKER, C. & WOLTER, K.E. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 3000 - 3500 m: D. Geophysik. KTB-Report 89-5: D1-D50, Hannover.
- WOLTER, K.E., AULBACH, E. & H. BERCKHEMER (1988): Spannungsnachwirkungsuntersuchungen: Messung der Retardation und der akustischen Emission: D. Geophysik.- KTB-Report 88-6: D47-D60, Hannover.
- WOLTER, K.E. & H. BERCKHEMER (1989): Time Dependent Strain Recovery of Cores from the KTB-Deep Drill Hole. - Rock Mech. and Rock Eng., Vol. 22, 273-287, Springer.
- WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A., LIPPMANN, E., HUENGES, E. & BÜCKER, C. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 2500 - 3009 m: D. Geophysik. KTB-Report 89-4: D1-D39, Hannover.

D.12 Danksagung

Unser Dank gilt den technischen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Geophysik im Feldlabor, Frau M. Jäger, Frau A. Kick, Herrn R. Fürnrohr und Herrn H. Köstler.

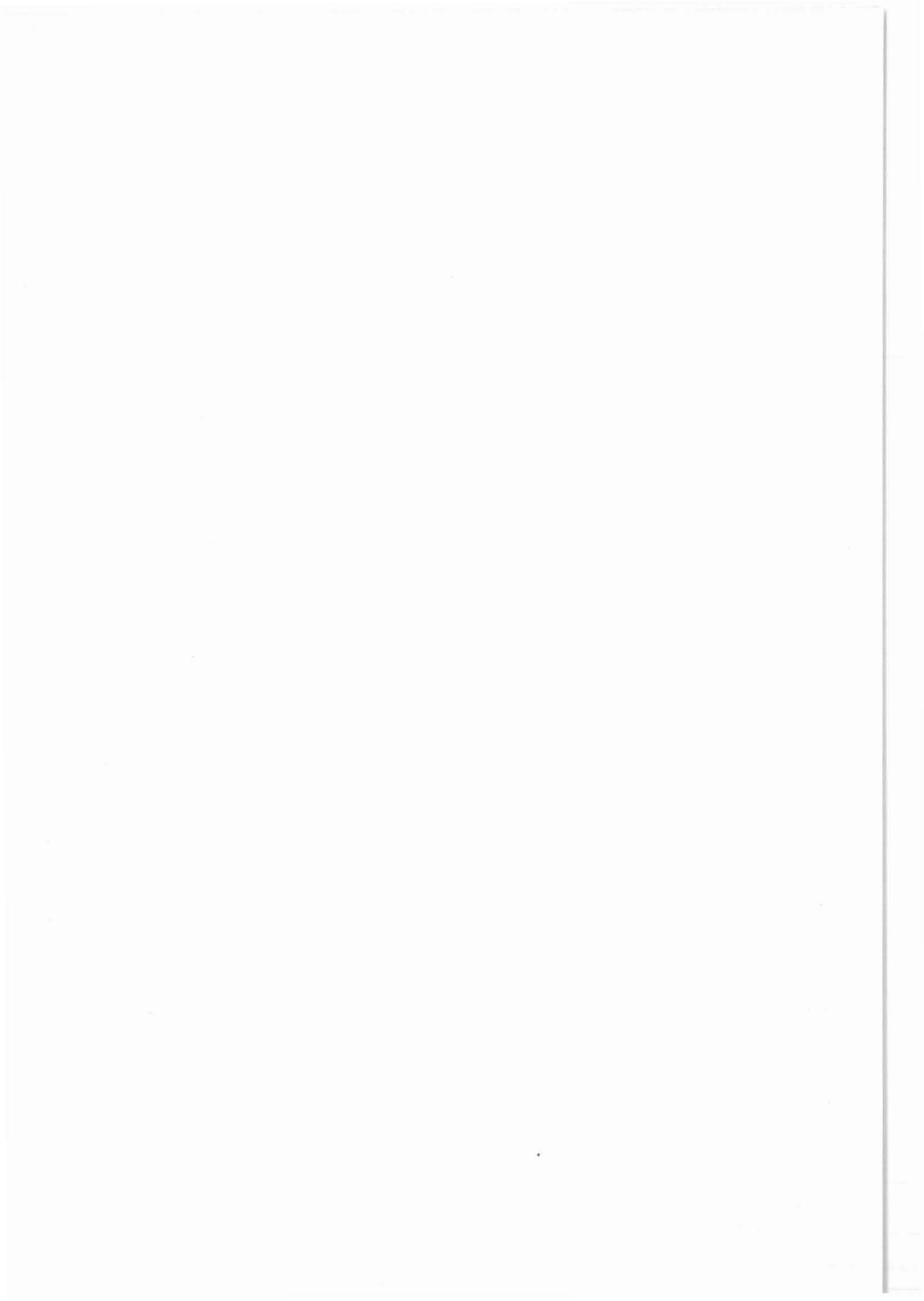
Herrn A. Zang (Geophysikalisches Institut, Frankfurt) sei gedankt für die Mitarbeit bei der Erstellung der Extrapolation der Bohrkern-Entspannungsdeformation.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danken wir Frau Dr. H. Müller, Herrn Prof. H. Berckhemer, Herrn Prof. Dr. R. Emmermann und Herrn Prof. Dr. H. Soffel.

E. Gefüge und Deformation

Kontinuierliche makroskopische Aufnahme
der duktilen Verformung und
kinematischer Markierungen an KTB-Kernen
(480 m - 2004 m)

A. Zadow
H. Heinisch
J. H. Behrmann
S. Lich
A. Volp



KTB Report	90-2	E1-E21	10 Abb.	Hannover 1990
------------	------	--------	---------	---------------

Kontinuierliche makroskopische Aufnahme der duktilen Verformung und kinematischer Markierungen an KTB-Kernen (480m - 2004m).

E. Gefüge und Deformation

A. Zadow¹, H. Heinisch¹, J.H. Behrmann², S. Lich² & A. Volp²

Inhaltsverzeichnis:

Seite

E.1	Fragestellung	E 2
E.2	Methodik	E 2
E.3	Ergebnisse und Interpretation	E 5
E.4	Schriftenverzeichnis	E 12
E.5	Anhang: Datenliste der aufgenommenen Scherkriterien von 480m bis 2004m.	E 13

Anschrift d. Autoren: Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Univ. München¹, IGL, Univ. Giessen²

E.1 Fragestellung

Schersinn-Kriterien sind Strukturen, die Informationen über die rotationalen Eigenschaften einer plastischen Deformation enthalten. Mit ihrer Hilfe läßt sich koaxiale von nicht koaxialer Verformung unterscheiden. Bei letzterer ist eine Bestimmung der Bewegungsrichtung des tektonisch Hangenden relativ zum Liegenden möglich. Eine auf derartige kinematische Markierungen basierende strukturgeologische Analyse liefert wichtige Informationen zur Verifizierung tektonischer Modelle für die saxothuringisch-moldanubische Kruste. Von den beiden Arbeitsgruppen wurden kinematische Markierungen aus der Zeit der Bildung der ältesten sichtbaren Foliation ("metamorpher Lagerbau", mylonitische Foliation" sensu WEBER & VOLLBRECHT 1987) in den Gesteinen der ZEV analysiert. Damit soll ein Beitrag zur Klärung von Teilbewegungspfaden der tektonischen Dislokation in der frühen Orogenesegegeschichte geleistet werden. Um mögliche Gradienten und Sprünge im Deformationsverhalten der durchteuften Gesteine erfassen zu können, wurde eine kontinuierliche Aufnahme der gesamten Kernstrecke an noch unzerstörten Kernen angestrebt.

E.2 Methodik

Die Aufnahme fand in mehreren Aktionen unter Einsatz von Teams beider Arbeitsgruppen im Feldlabor statt. Die Arbeit erwies sich als sehr zeitaufwendig: in Abhängigkeit von der Lithologie wurde ein Arbeitsfortschritt von ca. 33m pro Mann und Tag erreicht. Eine Übersicht zum Aufnahmezustand gibt folgende Tabelle:

Teufenmeter	Anzahl der Markierungen	Arbeitsgruppe
480m - 1250m	588	Heinisch/Zadow (München)
1250m - 1650m	46	Behrmann (Giessen)
1650m - 2432m	660	Behrmann (Giessen)
2432m - 3000m	---	fehlt *
3000m - 3500m	1490	Heinisch/Sprenger (München)
3500m - 4000m	---	fehlt *

* Die Aufnahme der noch ausstehenden 1000m Kernstrecke ist für März 1990 von Heinisch & Sprenger (München) geplant, falls die

Projektmittel ausreichen. Dieser Bericht beinhaltet die Daten und eine vorläufige Interpretation für den Abschnitt von 480m bis 2004m.

KST Nr.	Merkmal Nr.	Skizze	Scherkrit.	Blickrichtung relativ zur Referenzlinie	Fällrichtung	o. Teufe KST	Schersinn / Bemerkungen
164A1a	1		F	180°	70°	789,20	dd
164A1f	1		S	80°	335°	789,35	dd
164A1g	1		G	220°	115°	789,42	dd
	2		G F	40°	295°	---	dd

KTB-Oberpfalz VB
 KTB-Feldlabor: " Makroskopische Aufnahme " hier : Duktile Deformation / Schersinn
 Marsch: 164
 Obere Teufe: 789,10m
 Sektion: A (F)
 Datum: 2 / 8 / 1988
 Bearbeiter: Alexander Zöschner

Abb. E.2.1: Beispiel einer Seite des Archivierungsformblattes.

Um eine kontinuierliche und detaillierte Aufnahme zu gewährleisten, wurde jedes einzelne Kernstück aus der Kernkiste entnommen und jede kinematische Markierung archiviert. Zu diesem Zweck wurde ein Formblatt "Makroskopische Aufnahme - duktile Deformation/Schersinn" entworfen (Abb. E.2.1). Neben einer Skizze des Indikators wird hierbei seine Größe, seine Position auf dem Kern (Abb. E.2.2) sowie sein Schersinn (up-dip = Aufschiebung der Hangendscholle; down-dip = Abschiebung der Hangendscholle; symm. = symmetrische Markierung) notiert. Zusätzliche Angaben zur Verlässlichkeit des Indikators sollen eine spätere sinnvolle Klassifizierung in Bereiche mit einheitlicher Scherrichtung bzw. einheitlichem Deformationsverhalten ermöglichen.

Mit den vom Feldlabor gelieferten Orientierungsdaten konnten die Indikatoren später in ihre wahre Raumlage rückorientiert werden. Die Rohdaten stehen dem Feldlabor und interessierten Arbeitsgruppen als dBASE III+ Datenbankfile zur Verfügung. Eine Auflistung der Daten befindet sich im Anschluß an diesen Bericht.

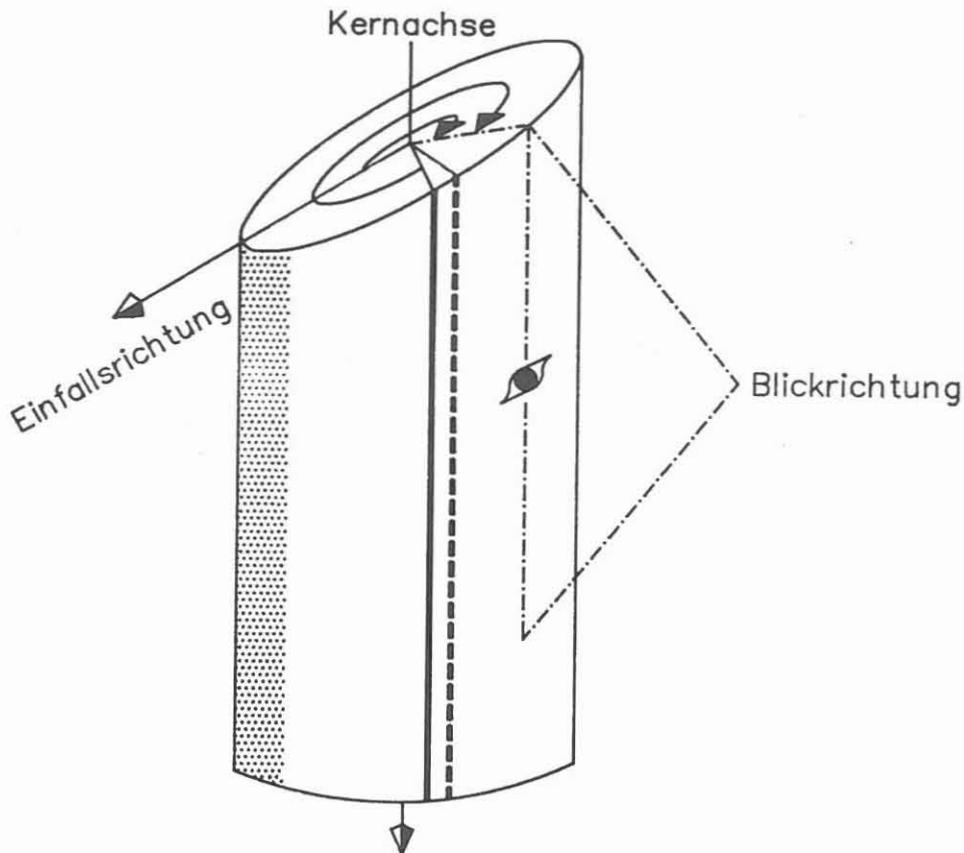


Abb. E.2.2: Festlegung der Position des Indikators auf dem Kernstück; die Angabe erfolgt sowohl relativ zur Einfallrichtung der Foliation als auch zur Markierungsline.

Folgende Scherkriterien (Abb. E.2.3) wurden identifiziert:

- (a) Porphyroklasten-Systeme
- (b) Scherbänder
- (c) Asymmetrie von Schleppfalten der Foliation
- (d) Kinematik von "bookshelf sliding" in rigiden Mineralen

(c) und (d) benötigen zur Bildung mechanische Instabilitäten und sind daher eigentlich mit Vorsicht zu interpretieren (vgl. SIMPSON & SCHMID 1983; COBBOLD et al. 1987). Die Kontrolle durch unmittelbar benachbarte, eindeutige Klasten zeigt jedoch eine extrem hohe Zuverlässigkeit der Falten als Schersinnindikatoren. Die Bestimmung des Schersinnes an der Kernoberfläche liefert scheinbare Richtungen (2D-Schnitte durch das Teilbewegungsfeld). Markierungen mit deutlich asymmetrischer Ausbildung sollten jedoch in guter Näherung die tatsächliche Scherrichtung anzeigen, während bei zunehmender Winkeldifferenz zur Scherrichtung die Asymmetrie abnimmt und sich der Zustand nahezu koaxialen plastischen Fließens einstellt. Im Extremfall

zeigt ein 90° zur tatsächlichen Scherrichtung angeschnittener, asymmetrischer σ -Klast eine vollkommen symmetrische Ausbildung (vgl. PASSCHIER & SIMPSON 1986). Bei spitzen Winkeln schräg zur Scherrichtung sind die Asymmetrien noch interpretierbar. Diese geometrisch bedingte Streuung in der Richtungsangabe der Scherrichtung kann durch eine hohe Anzahl an Beobachtungen genügend kompensiert werden, was die deutlich ausgebildeten Scherrichtungs-Maxima der asymmetrischen und symmetrischen Marker zeigen (vgl. Abb. E.3.7).

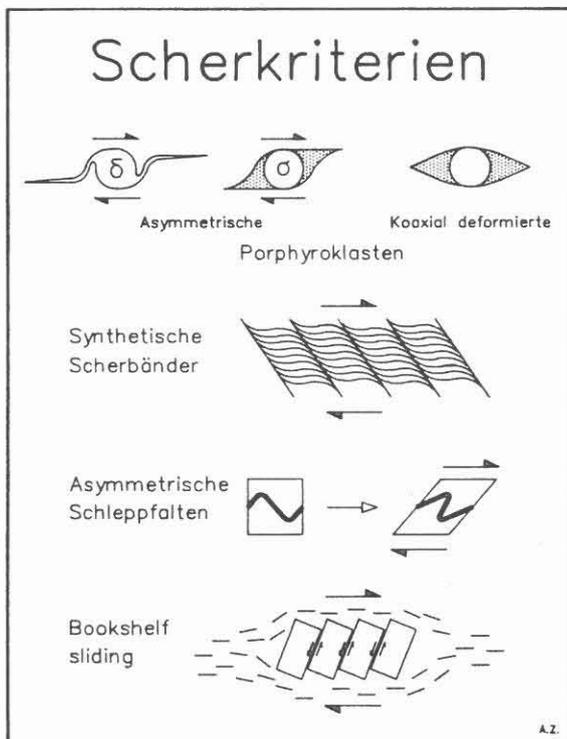


Abb. E.2.3:
Cartoon der aufgenommenen Indikatoren und ihre kinematische Interpretation.

E.3 Ergebnisse und Interpretation

Es wurden zwischen 480m und 2004m ca. 1000 Scherindikatoren registriert. Bei weitem die häufigsten Typen sind mit etwa 65% die σ -Klastensysteme (Abb. E.3.1; Abb. E.3.2), seltener treten δ -Klasten (Abb. E.3.3) und Schleppfalten auf. Vereinzelt werden primäre δ -Klasten von einer späteren σ -Bildung überprägt (Doppelausbildung, Abb. E.3.4).

Aus den hier dokumentierten Daten lassen sich drei Ergebnisse ableiten:

- a) eine alternierende Umkehr der Scherrichtung
- b) die Richtung der Scherbewegung
- c) die Polarität der Scherrichtung

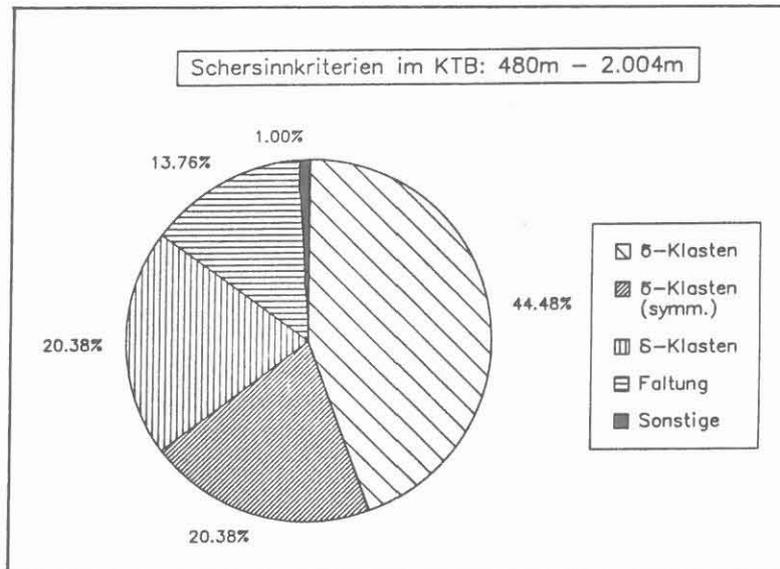


Abb. E.3.1: Prozentualer Anteil der verschiedenen Indikatortypen am Gesamtinventar; unter "Sonstige" fallen makroskopische S-C-Gefüge, Scherbänder, 'Bookshelf-Structures'.



Abb. E.3.2: σ -Klast, Kernstück 95C1m (Teufe 540.97m), $\phi \approx 0.7\text{cm}$; Schersinn down-dip (sinistral).

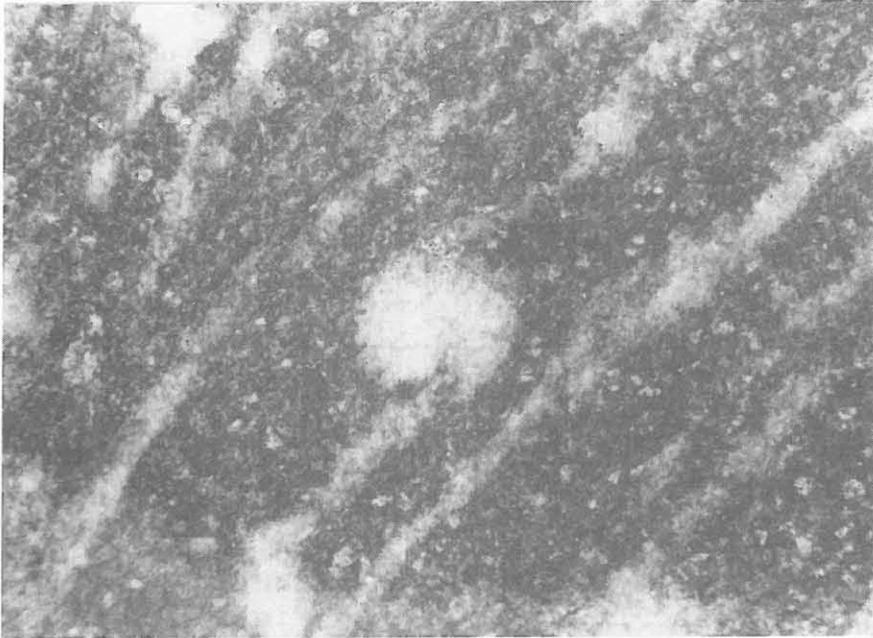


Abb. E.3.3: δ -Klast, Kernstück 79B1e (Teufe 497.00m), $\varnothing \approx 0.5\text{cm}$; Schersinn down-dip (sinistral).



Abb. E.3.4:
Primärer δ -Klast mit
sekundärer σ -Überprä-
gung, Kernstück 81A1g
(Teufe 503.77m), $\varnothing \approx 0,4\text{cm}$; Schersinn up-dip
(dextral); Versatz an
Bruchfläche von $\approx 0.5\text{cm}$.

zu a) Umkehr der Scherrichtung:

Die einzelnen Indikatoren wurden mit ihrem Schersinn (vgl. Abb. E.3.5) auf ein Bohrprofil aufgetragen und in Homogenbereiche zusammengefaßt. Bei 75% Richtungsidentität konnten so Domänen von up-dip, down-dip und symmetrischer Deformation abgetrennt werden. Wie aus Abb. E.3.5 ersichtlich, erfolgt recht häufig eine Umkehr der Scherrichtung. Der Teufenabstand der Umkehrpunkte variiert in der Größenordnung von 8m bis 50m.

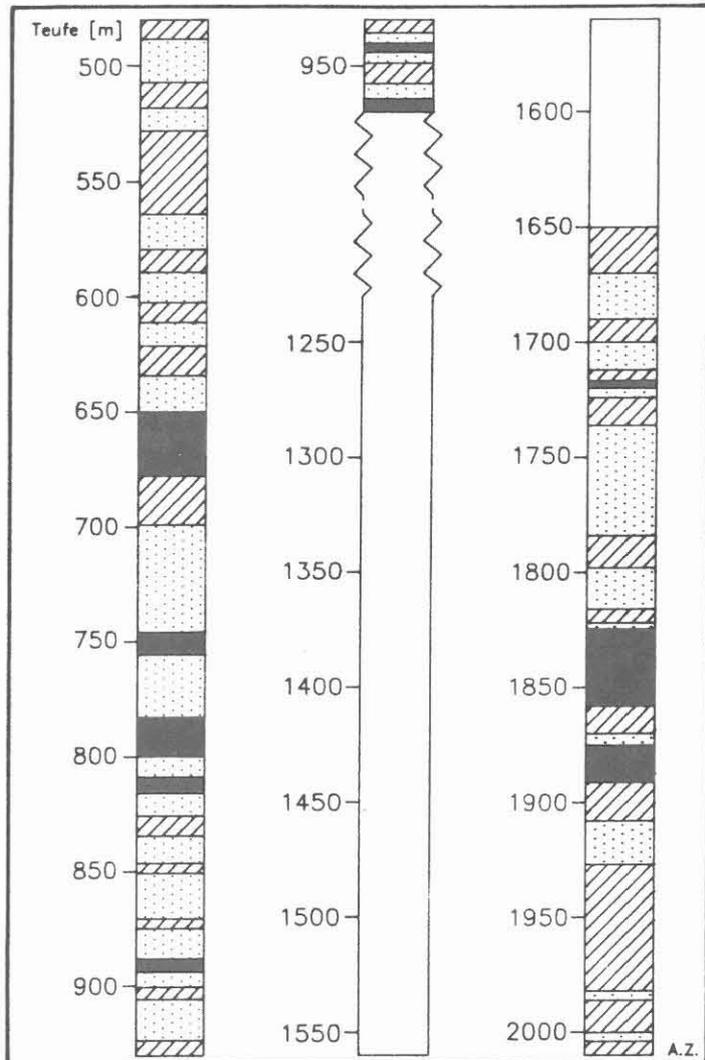


Abb. E.3.5:
Scheinbarer Schersinn im Teufenabschnitt 480m bis 2004m. Bewegung des tektonisch Hangenden in Einfallsrichtung der Foliation (down-dip): Schraffur; gegen die Einfallsrichtung der Foliation (up-dip): Punktsignatur; Domänen koaxialen Fließens: schwarz. Keine Angaben möglich: weiß.

Mit Verfallung der Foliation kann zumindest ein Teil der Umkehrungen des scheinbaren (d.h. im Einzelfall durch Anschnitt-Effekte in seiner Richtungsangabe eingeschränkten) Schersinns erklärt werden. Diese Umkehrungen sind scharf definiert. Weiterhin finden sich diskrete Zonen koaxialer Deformation. Umkehrungen waren bisher in keinem Fall an das Auftreten von Kataklysezonen gebunden. Geometrisch gesehen erfolgt Umkehrung

bei Vertikaldurchgang der Foliation (Abb. E.3.6a); dies trifft hauptsächlich im tieferen Teil der in diesem Bericht behandelten Kernstrecke zu. Akkordeon-artige Knickfaltung in der ZEV (Abb. E.3.6b) mit zentral gelegenen Scherbändern ist eine weitere mögliche Erklärung. Eine Umkehrung des Schersinns entsteht geometrisch auch bei monoklinaler Faltung: entweder werden die vorher angelegten Klasten um Achsenlagen parallel zur Scherrichtung gefaltet (Abb. E.3.6c) oder sie entstehen gleichzeitig mit den Scherfalten durch Kompetenzkontrasten der Grenze Klast/Matrix und mechanische Instabilitäten in den Faltenschenkeln (Abb. E.3.6d).

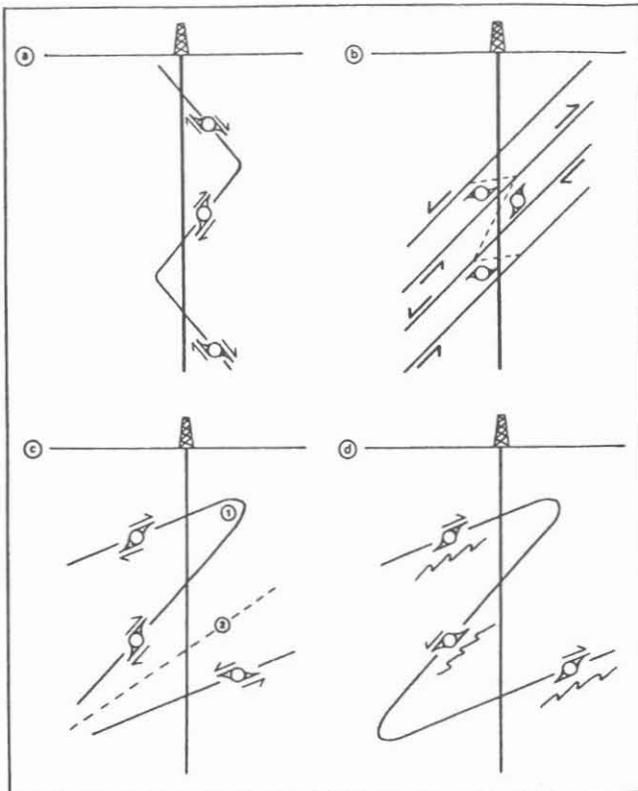


Abb. E.3.6:
Interpretative Modelle zur Umkehrung des Schersinns: a) Vertikaldurchgang der Foliation durch Verfaltung um horizontale Achsenebenen. b) Knickfaltung der Foliation (gestrichelt). c) Monoklinale Verfaltung der Foliation. Bei Verfaltung senkrecht zur Scherrichtung (1) erfolgt keine Umkehrung, bei Verfaltung parallel zur Scherrichtung (2) erfolgt eine Umkehrung des Schersinns. d) Gemeinsame Bildung von 'similar folds' und asymmetrischen Klasten durch plastisches Fließen in den Faltenschenkeln.

zu b) Richtung der Scherbewegung:

Nach Reorientierung der Kerne wurde das Azimut der Klastenposition (Blickrichtung) am Kern statistisch ausgewertet. Zunächst ist davon auszugehen, daß Klasten mit deutlicher Asymmetrie bevorzugt in Winkeln nahe 90° zur Scherrichtung am Kernstück auftauchen. Dies war aufgrund geometrischer Überlegungen zur Klastenform (vgl. PASSCHIER & SIMPSON 1986) eine plausible Arbeitshypothese.

Die Richtungsanalyse der daraus ableitbaren Scherrichtungen (Klastenposition $\pm 90^\circ$) ergab - aufgeteilt in asymmetrische und symmetrische Indikatoren - Richtungsrosen mit einem Vektormittel des in die Horizontale projizierten Azimuts bei 27° bzw 31° und einem relativ schwachen vektoriellen Regelungsgrad von 52% bzw. 58% (Abb. E.3.7). Das vektorielle Mittel der

Streckungsrichtung symmetrischer und asymmetrischer Klatten zeigt jeweils nahezu identische Azimute (Abweichung 4°). Dadurch ist nachgewiesen, daß die symmetrischen Klatten wirklich koaxial deformiert wurden und kein Anschnitteffekt (vgl. Kap. 1) vorliegt.

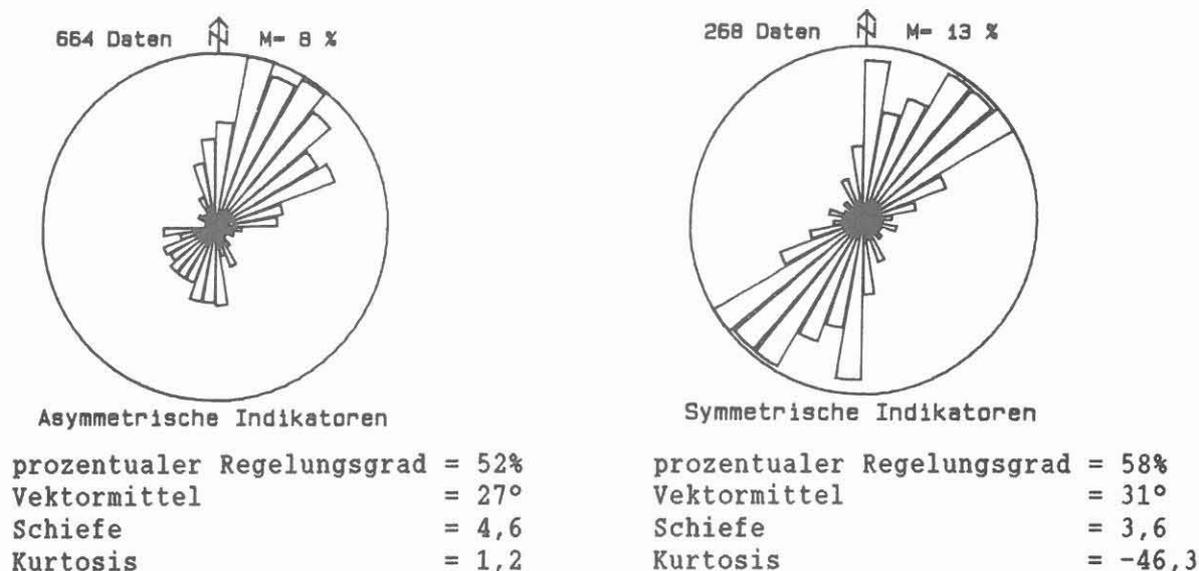


Abb. E.3.7: Richtungsrosen und vektorielle Statistik der im Feldlabor aufgenommenen Schersinn-Indikatoren; Markierungen mit zweifelhafter Aussage wurden nicht berücksichtigt.

Nach den bisher vorliegenden Daten ist, mit den genannten methodischen Einschränkungen, von einer Scherdeformation der Gesteine (vor ihrer Wiederfaltung und Aufrichtung in steile Foliationslage) in NNE/SSW-Richtung auszugehen.

zu c) Polarität der Scherrichtung:

Der prozentuale Anteil der verschiedenen Domänen an der bisher untersuchten Teufe stellt sich wie folgt dar:

	480m - 970m	1.250m - 2.004m	480m - 2.004m
up-dip :	53%	40%	47%
down-dip:	31%	46%	40%
koaxial :	16%	14%	13%

Die hier dargestellte Gesamtteufe wurde versuchsweise in zwei Großbereiche unterteilt. Die Trennung ist einerseits durch die Richtbohrstrecke vorgegeben, in der keine Kerne vorliegen (992m bis 1229m). Andererseits ist sie auch lithologisch durch eine mächtige Metabasit-Abfolge mit extrem geringer Anzahl von Schersinn-Indikatoren bedingt (1160m bis 1610m). Betrachtet man die nicht entzerrten Rohdaten, so deutet sich im

prozentualen Anteil der Indikatoren ein Wechsel von einem up-dip- in ein down-dip-Regime an. Der Trend ist allerdings nicht sehr deutlich. Bei Mittelwert-Bildung über die gesamte betrachtete Strecke überwiegen leicht die Bereiche mit up-dip-Indikatoren.

Im Hangenden der Metabasite fällt die Foliation im Mittel steil (60°) nach SSW. In der Liegendfolge ist häufig ein Pendeln der Foliation um die Vertikalstellung mit WNW-ESE-Streichen festzustellen (KOHL et al. 1989). Mögliche Zusammenhänge zwischen diesen Vertikaldurchgängen und der Schersinn-Umkehr sind Gegenstand laufender Untersuchungen in enger Zusammenarbeit mit dem Feldlabor.

Insgesamt wurde in den beiden betrachteten Gneisfolgen offensichtlich eine Sequenz mit kleinräumigen Scherfalten durchteuft, die eine ausgeprägte Vergenz und ausgeprägte Lang-Kurz-Beziehungen der Faltenschenkel aufweisen. Nach den vorliegenden Daten ist es unwahrscheinlich, daß hangendes und liegendes Gneispaket korrespondierende Schenkel einer asymmetrischen Großfalte mit Metabasiten im Faltenkern darstellen.

Im betrachteten Abschnitt zwischen 480m und 2004m überwiegt insgesamt der Anteil der kinematischen Markierungen, die eine Aufschiebung des jeweiligen tektonisch Hangenden anzeigen (vgl. Tab.). Bezogen auf die Horizontalkomponente der Partikelbewegung ergäbe sich eine Hauptbewegungsrichtung nach NNE. Der Anteil der koaxial deformierten Klasten ist hoch.

Für eine Interpretation dieser Daten hinsichtlich möglicher Deckentransporte in der frühen Orogengeschichte der ZEV oder die Festlegung des Teilbewegungspfades in der tieferen kontinentalen Kruste (Anlage der mylonitischen Foliation) ist die gesamte spätere Deformationsgeschichte zu berücksichtigen. Die untersuchten kinematischen Markierungen sind bezüglich aller späteren tektonischen Phasen als transportierte Gefüge zu betrachten und sind daher palinspastisch rückzuorientieren. Besonders wichtig ist hierfür, welches Modell man für die Entstehung der steilen Raumlage der Foliation annehmen möchte (Primär angelegte steile Raumlage?, Rotation im duktilen pT-Regime, evtl. im Zusammenhang mit den Granit-Intrusionen?, Schleppung an der Fichtelnaab-Störung im Zusammenhang mit Spröddeformation und Knickfaltung?, großräumige Blockrotationen an kataklastischen Störungen?). Eine abschließende Interpretation der Daten kann daher nur nach Kenntnis der gesamten Kernstrecke und nach intensiver Diskussion mit anderen Arbeitsgruppen, insbesondere dem Feldlabor, erfolgen.

E.4 Schriftenverzeichnis

- COBBOLD, P.R. & GAPAIS, D. (1987): Shear criteria in rocks: an introductory review.- J. Struct. Geol., 9, 521-778.
- KOHL, J., HACKER, W. & SIGMUND, J. (1989): Geowissenschaften im KTB-Feldlabor - Geologie - Geologische Strukturen in Gesteinen und KTB-Vorbohrung.- KTB Report 89-3, 467, Hannover.
- PASSCHIER, C.W. & SIMPSON, C. (1986): Porphyroclast systems as kinematic indicators.- J. Struct. Geol., 8, 831-843.
- SIMPSON, C. & SCHMID, S.M. (1983): An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks.- Geol. Soc. Am. Bull., 94, 1281-1288.
- WEBER, K. & VOLLBRECHT, A. (1987): Ergebnisse der Vorerkundungsarbeiten Lokation Oberpfalz.- 2. KTB-Kolloquium Seeheim/Odenwald, 186 S., ohne Impressum.

E.5 Anhang: Datenliste der aufgenommenen Scherkriterien von 480m bis 2004m.

TEUFE [m]	KERN-MARSCH	KERN-STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
482	75	E15d	—/85	σ	— dd
		E17e	—/85	δ	— dd
		E17f	—/80	F	— dd
486	76	C3k	—/80	F	— dd
488	77	B17a	—/80	σ (\pm symm)	— ?ud
		D18c	—/80	SZ	— ud
497	79	B1e2	—/45	δ	— ud
			—/45	δ	— ud
504	81	A1g	—/55	δ (p) σ (s)	— ud
			—/55	σ	— ud
512	83	C6h	—/60	δ	— dd
			—/60	F	— dd
520	86	B1m	—/60	σ (\pm symm)	— ?ud
523	87	A1a	—/60	σ	— ud
		C7b	—/80	δ /F	— ud
529	91	A1m	—/72	σ	— ud
		B1r	—/90	δ	— dd
		B1s	—/90	δ	— dd
540	95	B1j	—/52	σ	— ud
			—/52	σ (\pm symm)	— ?ud
			—/70	σ	— ud
541	96	C1s	—/62	σ /F	— dd
544	97	B2g	—/60	σ	— dd
548	98	A3b	—/47	S-C	— dd
553	100	B2d	—/60	σ	— dd
555	101	A1c	—/60	σ	— ud
			—/60	σ	— ud
557	102	C1ae	—/45	σ	— dd
			—/45	σ	— dd
			—/45	δ	— dd
559	103	A1a	—/50	σ	— dd
			—/63	δ	— dd
			—/42	σ (\pm symm)	— ?ud
563	104	C4d	—/55	F	— dd
565	105	C1q	—/45	σ (symm)	—
			—/45	σ (\pm symm)	— ?dd
			—/50	σ /Bk	— ud
			—/50	σ	— ud
			—/50	σ	— ud
569	106	B2e(a)	—/50	σ	— ud
			—/50	σ	— ud
573	107	C3aa	—/45	δ	— ud
			—/45	F	— ud
			—/45	σ	— ud
577	108	A1d	—/60	σ	— ud
			—/60	σ (\pm symm)	— ?ud
			—/60	σ	— ud
583	109	C10e	200/52	σ	185 dd
			200/52	SB	— dd
			200/52	σ	195 dd
			200/65	σ (symm)	170 —
			200/65	σ (symm)	190 —
588	110	B2g	200/65	σ (symm)	180 —
			200/65	σ	80 ud
			200/65	σ (symm)	210 —
			210/65	σ	60 ud
			210/65	σ (\pm symm)	10 ?ud
		B2h	210/65	δ	65 ud

TEUFE [m]	KERN-MARSCH	KERN-STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
588	110	B2i	210/65	δ	75 ud
			210/65	δ	10 ud
			210/65	σ	20 ud
			210/65	σ (\pm symm)	325 ?ud
595	111	E2r	190/47	σ	65 ud
			180/55	σ (symm)	190 —
			200/62	σ	340 ud
			200/65	δ /F	5 ud
			200/57	σ	0 ud
598	112	A1g	220/60	σ	40 ud
			220/70	σ (symm)	230 —
			220/70	σ (symm)	260 —
603	113	C1m	220/70	σ	240 —
			220/70	σ	25 ud
			220/70	σ (symm)	180 —
			200/62	σ (symm)	245 —
			200/62	σ (symm)	150 —
			210/62	σ	255 dd
			210/62	? δ (p) σ (s)	145 ?dd
			210/62	σ	190 dd
			210/62	σ /SB	180 dd
			210/62	σ	205 dd
610	115	A1e	200/63	σ	150 dd
			200/63	σ	155 dd
			200/60	σ	350 ud
			200/60	σ	50 ud
612	116	F3bg	200/60	σ	25 ud
			200/62	σ (\pm symm)	350 ?ud
617	117	A1k	190/60	σ (\pm symm)	220 ?dd
			190/60	σ	10 ud
623	118	A1e	190/60	σ	140 dd
			190/60	σ (\pm symm)	220 ?dd
			190/60	σ (\pm symm)	200 ?dd
			190/70	σ	190 dd
			190/70	σ (\pm symm)	190 ?dd
629	119	E1ad	200/65	δ	190 dd
			200/65	σ	260 dd
			200/60	σ (\pm symm)	50 ?ud
			200/40	σ (\pm symm)	340 ?ud
			200/40	σ	10 ud
639	120	B1e	210/55	σ (\pm symm)	80 ?dd
			200/55	σ	340 ud
			200/60	σ (symm)	205 —
			200/60	σ (symm)	145 —
			210/70	σ (\pm symm)	175 ?dd
640	124	D1q	210/60	σ (symm)	160 —
			210/60	σ (symm)	230 —
643	125	A4e	210/60	σ (symm)	230 —
			200/65	σ (symm)	265 —
			200/65	σ	40 ud
647	126	B4k	200/65	σ	175 dd
			200/50	σ (symm)	350 —
			210/60	σ	10 ud
			210/75	σ	60 ?ud
			210/60	σ	40 ud
		I1ak	210/60	σ (symm)	235 —

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
653	127	A1c	200/70	F	60 ud	685	135	B1e	210/70	σ (symm)	210 —
		B1h	200/70	σ (symm)	195 —			C1l	200/80	σ (symm)	170 —
		B1n	200/70	σ	15 ud			E2g	200/60	σ (symm)	190 —
		C1w	200/70	F	320 ud				200/60	σ	250 dd
		D1aa	200/70	σ	345 ud			E2k	200/60	σ	180 ud
659	128	H5a	200/65	σ (symm)	185 —				200/60	σ (symm)	25 —
		A1c	190/50	σ (symm)	150 —				200/60	σ (tsymm)	200 ?dd
		B1d	200/50	σ (tsymm)	20 ?ud	690	136	A1d	190/82	F	20 ?ud
			200/50	σ (tsymm)	45 ?ud			A1e	190/82	σ (tsymm)	240 ?dd
			200/50	δ	65 ud			C4c	200/57	σ (tsymm)	290 ?ud
			200/50	σ	55 ud				200/57	σ (symm)	230 —
			200/50	σ (symm)	165 —	694	137	B1l	190/67	σ	200 dd
			200/50	σ	10 ud			B1p	190/67	σ	230 dd
			200/50	σ	20 ud			B1q	190/67	σ (symm)	230 —
		C1h	210/62	σ (symm)	150 —	700	138	D1k	220/65	σ	265 ud
	210/62	σ (symm)	220 —	D1t	220/65			σ (tsymm)	50 ?ud		
C1l	210/62	σ	10 ud	706	140	B1e	210/67	σ (tsymm)	10 ?ud		
Flac	210/70	σ (symm)	230 —	707	141	C1u	200/65	σ (symm)	220 —		
662	129	A1b	200/65	σ	180 dd			C1y	200/65	σ	260 dd
		A1f	200/65	σ (tsymm)	155 ?dd	711	142	A1e	210/65	σ (symm)	90 —
		B1n	200/52	σ (symm)	150 —						210/65
		B1o	200/52	σ (symm)	205 —				210/65	σ (symm)	180 —
			200/52	σ (symm)	220 —				210/65	σ (symm)	200 —
		C1ae	210/55	σ (symm)	180 —			A1g	210/65	σ (tsymm)	40 ?ud
		D2c	210/72	σ (symm)	170 —			B1o	210/72	σ	55 ud
		E4e	210/65	σ (symm)	210 —				210/72	σ	60 ?ud
		E4f	210/65	σ (symm)	185 —	716	143	B2s	190/72	σ (symm)	180 —
		F4h	210/65	σ (symm)	240 —						190/75
			210/65	σ (symm)	280 —			B2v	190/75	σ (symm)	195 —
		G4t	210/75	σ (symm)	245 —	727	146	B1e	200/75	σ (symm)	210 —
		A1a	210/70	σ (tsymm)	70 ?ud			D1l	190/85	σ (symm)	195 —
A1b	210/70	σ (symm)	170 —	730	147	E3r	210/52	σ	60 ud		
B1m	210/60	σ	100 ud			E3s	210/52	σ	30 ud		
	210/60	σ (tsymm)	340 ?ud			F3aa	210/60	σ	50 ud		
C3c	200/65	σ	40 ud	736	148	B1p	200/53	σ	40 ud		
C3d	200/65	σ (tsymm)	20 ?ud			C1s	200/65	σ (tsymm)	10 ?ud		
C3f	200/65	σ (tsymm)	340 ?ud	740	149	B4e	190/62	σ	40 ud		
D3m	200/65	σ (symm)	270 —			C4k	190/57	σ (symm)	65 —		
D3o	200/65	σ (symm)	150 —				190/57	σ	220 ud		
676	132	A1a	200/67	σ (symm)	220 —	C4l	190/57	σ (symm)	15 —		
			200/67	σ (symm)	220 —				190/57	σ (tsymm)	205 ?ud
		A1c	200/67	σ (symm)	250 —			D6h	180/60	σ	20 ud
			200/67	σ (symm)	225 —			F6ad	200/62	σ	35 ud
			200/67	σ (symm)	170 —			F6z	200/62	σ (symm)	235 —
		A1h	200/67	σ (symm)	190 —	746	150	G6ah	200/50	σ (symm)	180 —
			200/67	σ (symm)	180 —			A2b	200/60	σ (symm)	230 —
		A1i	200/67	σ (symm)	200 —			A2d	200/60	σ (symm)	170 —
		B1n	200/70	σ (symm)	— —			B2k	190/65	σ (tsymm)	165 ?dd
		677	133	A1o	200/50	σ	50 ud			C2v	200/60
A1q	200/60			σ (symm)	245 —			F2af	200/70	δ	20 ud
	200/60			σ (tsymm)	45 ?ud			F2ag	200/70	σ (symm)	190 —
B1ai	200/70	σ (symm)	195 —	751	151	B1g	200/52	σ (symm)	220 —		
C6k	200/70	σ (tsymm)	10 ?ud			C1p	200/60	σ (symm)	240 —		
	200/70	σ (symm)	180 —			E4k	200/67	σ (symm)	235 —		
679	134	D8b	190/55	σ (symm)	240 —				200/67	σ (symm)	170 —
		F9b	190/65	δ	150 dd			F4l	200/70	σ (symm)	195 —
			190/65	σ (tsymm)	20 ?ud	756	152	A1a	190/55	σ	130 ?dd
			190/65	σ (tsymm)	155 ?dd						190/55
685	135	B1e	210/60	σ (symm)	240 —			B1k	190/50	F	315 ud

TEUFE [m]	KERN-MARSCH	KERN-STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN-MARSCH	KERN-STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN		
759	153	A1b	190/52	σ	20 ud	789	164	C1t	200/65	σ	30 ud		
		A1d	190/52	σ (\pm symm)	225 ?dd			200/65	F	50 ud			
		B1h	200/47	σ (\pm symm)	160 ?dd			D1ab	200/62	σ	40 ud		
		B1k	200/47	δ	60 ud			D1ac	200/62	σ (symm)	220 —		
		C1n	200/45	σ	350 ud				200/62	F	30 ud		
		C1p	200/45	F	60 ud				200/62	σ (symm)	210 —		
		D3a	200/52	F	80 ud			D1ag	200/62	F	10 ud		
		D3b	200/52	σ /F	40 ud				200/62	σ (symm)	200 —		
			200/52	F	55 ud			E1ai	210/42	σ (\pm symm)	110 ?ud		
			190/55	F	0 ud			B1h	190/60	σ (symm)	230 —		
762	154	A1c	190/55	F	0 ud	793	165	A1d	190/55	σ	40 ud		
765	155	B6i	210/72	F	50 ud	796	166	A1e	190/55	F	70 ud		
		B6o	210/72	σ (symm)	220 —	A1f		190/55	F	— —			
768	156	C6t	210/70	σ	10 ud	798	167	B2b	190/60	σ (\pm symm)	170 ?dd		
		A3b	200/60	σ	60 ud			B2c	190/60	F	350 ud		
		A3e	200/60	σ	340 ud	800	168	A1b	200/60	F	230 dd		
B10b	210/62	F	30 ud	A1c	200/60	F		230 dd					
770	157	B7c	200/65	σ	55 ud				200/60	F	180 dd		
773	158	B2k	210/62	σ (\pm symm)	70 ?ud			D1n	200/55	F	30 ud		
775	159	A1e	210/60	F	60 ud			E1u	200/60	F	0 ud		
		A1g	210/60	F	70 ud	804	169	A3a	200/42	F	230 dd		
		B1k	210/60	F	— ud	A3f		200/42	F	60 ud			
779	161	B1l	220/47	σ (symm)	210 —	B3p	200/45	F	230 dd				
			220/47	σ (symm)	180 —	B3q	200/45	F	160 dd				
782	162	C1q	210/55	σ	75 ud	805	170	C4aa	200/45	F	20 ?ud		
		D1s	210/40	F	60 ud			C4ac	200/42	F	80 ud		
		D1x	210/40	σ	30 ud	C4ad	200/42	F	50 ud				
		B2c	200/65	σ (symm)	200 —	D4an	190/40	F	240 dd				
		C2g	210/62	F	30 ud		190/40	σ	240 dd				
			210/62	σ (symm)/ δ	0 ud	808	171	A3k	210/40	σ	60 ud		
		C2l	210/62	δ	30 ud	B3o		210/65	σ	65 ud			
		D2r	210/60	σ	25 ud	B3p	210/50	F	10 ud				
		D2t	210/60	σ /F	25 ud	C1ad	200/25	σ	30 ud				
			210/60	σ (symm)	235 —		200/25	σ	30 ud				
	200/42	σ (symm)	220 —	818	176	A1e	200/62	σ	30 ud				
E2aa	200/42	σ (symm)	180 —	819		177	B3q	200/57	σ	30 ud			
	200/42	σ (symm)	230 —		200/57		σ	30 ud					
	200/40	F	70 ud	821	178	C3al	210/60	σ (symm)	180 —				
F2ab	200/40	F	10 ud	827		181	C3w	210/60	σ	235 dd			
	200/40	F	350 ud				C1i	180/47	σ	0 ud			
	200/40	F	60 ud	829	182	C1j	180/47	σ (\pm symm)	30 ?ud				
F2ae	200/40	F	60 ud				A1a	200/30	σ	50 ud			
786	163	A1l	210/50	σ	60 ud				200/30	σ	85 ud		
			210/50	σ (p)/ δ (s)	30 ud			B1c1	200/52	F	220 dd		
			210/50	σ (symm)	210 —			B1c2	200/52	δ	195 dd		
		A1n	210/50	δ	20 ud	832	183	A1e	210/75	σ (\pm symm)	250 ?dd		
			210/50	σ	80 ud					210/75	F	190 dd	
			210/50	σ	80 ud						210/57	F	150 dd
			210/50	σ	30 ud			A1f-g	210/57	F	180 dd		
		B1q	200/57	σ (symm)	150 —			B1n	210/62	F	180 dd		
		B1r	200/57	σ (\pm symm)	330 ?ud				210/62	σ (symm)	180 —		
		B1s	200/57	σ (\pm symm)	330 ?ud			B1q	210/62	σ (\pm symm)	180 ?dd		
D1ak	210/62	F	35 ud			C1v	210/60	σ	180 dd				
D1al	210/62	SB	210 sin				210/60	σ	180 dd				
789	164	A1a	200/62	F	180 dd	834	184	A1i	210/50	σ (\pm symm)	0 ?ud		
		A1f	200/62	δ	265 dd	A1k		210/50	σ (symm)	260 —			
		A1g	200/62	σ	225 dd	A1l		210/50	F	170 dd			
		B1l	200/65	σ	350 ud			210/50	σ (\pm symm)	190 ?dd			
			200/65	F	95 ud			210/47	F	30 ud			
		B1o	200/65	F	60 ud								
		C1s	200/65	F	10 ud								

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
834	184	B1n	210/47	σ (\pm symm)	90 ?ud	867	198	A1d	220/45	σ (\pm symm)	30 ?ud
835	185	A1d	200/45	σ	350 ud			B1g	220/35	σ (\pm symm)	10 ?ud
			200/45	σ (\pm symm)	90 ?ud				220/35	σ (symm)	280 —
		A1g	200/45	F	10 ud			B1h	220/35	σ	270 dd
			200/45	σ (\pm symm)	50 ?ud				220/35	σ	260 dd
		A1j	200/45	F	70 ud			B1k	220/35	F	290 dd
			200/45	δ	30 ud	869	199	C2n	220/42	σ	240 dd
		B1s	190/47	F	40 ud	870	200	A1f	220/40	σ	220 dd
837	186	A3d	200/42	F	30 ud			A1k	220/40	σ	195 dd
			200/42	σ	30 ud			B1l	220/50	σ /F	160 dd
		A3l	200/42	σ (\pm symm)	40 ?ud			C1ah	220/45	σ (\pm symm)	230 ?dd
		B3t	210/45	Bk	110 ?ud	873	201	A1e	220/45	σ /S-C	40 ud
839	187	A1c	200/40	σ (\pm symm)	40 ?ud			C1o	210/57	σ	350 ud
		A1d	200/40	σ (\pm symm)	10 ?ud	875	203	A5c	210/55	σ	180 dd
		A1e	200/40	σ	25 ud	878	204	C1o	200/57	σ	20 ud
		B1p	210/45	σ	35 ud			E1aa	210/62	σ	30 ud
		C1u	210/55	σ (\pm symm)	20 ?ud				210/62	F	80 ud
		E1ak	210/50	σ	5 ud			Flaf	200/62	σ (\pm symm)	10 ?ud
		Flaq	220/50	σ (symm)	180 —				200/62	F	355 ud
843	188	A3a	210/52	σ	10 ud			Flag	200/62	σ	60 ud
		A3b	210/52	σ	60 ud			G1am	210/40	σ (symm)	220 —
		A3c	210/52	σ (symm)	185 —	883	205	A1e	200/42	σ	355 ud
		A3d	210/52	σ (symm)	230 —				200/42	σ	0 ud
		C3p	220/50	σ (symm)	230 —			A1g	200/42	σ (\pm symm)	350 ?ud
		D3aa	210/52	σ	65 ud	885	206	A1d	200/42	δ	40 ud
			210/52	σ	40 ud				200/42	δ	320 ud
		D3x	210/65	σ (symm)	215 —			B1e	210/45	σ	235 dd
847	189	A2a	200/57	σ (\pm symm)	40 ?ud				210/45	σ	245 dd
		B2k	200/60	σ	355 ud			B1f1	210/45	σ	175 dd
		B2r	200/60	σ	0 ud			C1g	200/30	σ	15 ud
		D2ah	210/50	σ (\pm symm)	190 ?dd	886	207	A4c	210/47	σ	75 ud
		D2aq	210/50	σ	265 dd			B4f	200/42	σ (symm)	110 —
		D2ar	210/50	σ (\pm symm)	45 ?ud			C1j	200/40	F	— ud
852	191	A5a	200/50	σ (symm)	240 —	890	210	A1a	220/47	σ	225 dd
		A5b	200/50	σ	160 dd			A1e	220/47	σ (\pm symm)	330 ?ud
			200/50	σ	210 dd			A2a	220/47	σ (symm)	170 —
		B5d	210/45	σ	25 ud	892	211	A4bE	220/60	σ (symm)	240 —
			210/45	F	20 ud	893	212	A4a	210/60	σ (symm)	190 —
		C5j	210/60	σ (\pm symm)	50 ?ud			A4b	210/60	σ (symm)	220 —
			210/60	σ	50 ud	894	213	A1b	200/55	σ	10 ud
		E5ax	210/45	σ	350 ud				200/55	δ	340 ud
856	192	B1l	210/62	σ	60 ud				200/55	σ (\pm symm)	150 dd
			210/62	σ (symm)	200 —			A1t	200/55	σ	100 ud
		D1aa	210/42	σ	40 ud			C1g	180/47	σ	0 ud
			210/42	σ (\pm symm)	340 ?ud				180/47	σ (\pm symm)	0 ?ud
		D1ac	210/42	σ (symm)	160 —			D1j	190/42	F	30 ud
860	193	A2a	220/45	F	20 ud				190/42	F	10 ud
		B2f	220/50	F	90 ud			E1l	210/42	σ (\pm symm)	330 ?ud
		C2h	220/50	σ	40 ud				210/42	σ (\pm symm)	30 ?ud
		C2k	220/50	F	20 ud			Flm	210/42	σ (symm)	190 —
			220/50	σ	110 ud				210/40	σ	50 ud
		D2o	210/52	σ (symm)	210 —				210/40	σ	40 ud
			210/52	σ (symm)	200 —			Fln	210/40	σ /Bk	60 ud
		E2t	210/60	F	10 ud			G1o	220/45	σ (symm)	110 —
863	194	A2b	210/55	F	60 ud				220/45	σ	250 ud
			210/55	F	0 ud	900	214	B1e	210/55	σ (symm)	190 —
865	197	A2b	210/35	σ (\pm symm)	10 ?ud				210/55	σ	190 dd
			210/35	σ (\pm symm)	40 ?ud				210/55	σ (\pm symm)	250 ?dd
		A2f	210/35	σ	0 ud			D1k	220/47	Bk	210 dd

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN				
900	214	E1m	210/47	Bk	240 dd	955	240	A1q	210/80	σ	155 dd				
		H1r	210/42	σ (±symm)	20 ?ud			Faf	210/65	σ	345 ud				
		I1m	210/60	σ	180 dd			C1m	230/65	σ	80 ud				
908	216	A1c	200/57	F	30 ud	965	242	C1o	230/65	σ	50 ud				
		910	217	A1d	210/52			σ	25 ud	968	243	B1e	210/70	σ	75 ud
		A1e		210/52	σ (symm)			235 —	B1m	210/70		σ (±symm)	115 ?ud		
914	218	A1b	220/50	σ	95 ud	969	244	C1f	200/60	σ	0 ud				
			220/50	σ (symm)	210 —			B1m	200/67	σ (symm)	215 —				
			220/40	δ	50 ud			C1aa	210/70	σ	60 ud				
915	219	B2d	240/40	F	65 ud	972	245	D1ad	210/60	σ	40 ud				
		917	220	A1b	220/40			F	70 ud	E1an	200/72	σ (symm)	200 —		
		C1g		210/40	F			50 ud	200/72	σ (symm)	205 —				
919	221	D9r	210/47	σ	175 dd	982	248	A1	210/70	σ	5 ud				
		922	222	A4g	210/47			δ	230 dd	E3r	220/52	σ (symm)	215 —		
		B4k		210/47	σ (symm)			200 —	220/52	σ (symm)	250 —				
923	223	B1h	220/60	σ	55 ud	984	249	F3ag	220/62	σ (symm)	210 —				
			220/60	σ	60 ud			220/62	σ (symm)	195 —					
			220/60	σ	60 ud			G3ag	210/62	σ (symm)	180 —				
925	225	A3c	210/55	σ (±symm)	125 ?dd	987	250	210/62	σ (symm)	195 —					
			210/55	δ	160 dd			210/62	σ (symm)	210 —					
			210/52	F	120 dd			G3ak	210/62	σ (symm)	250 —				
928	227	A2	210/45	R	— dd	947	246	A2a	220/65	σ (symm)	245 —				
			929	228	A1d			210/40	σ	250 dd	220/65	σ (symm)	235 —		
			D1p		210/47			σ (symm)	220 —	220/67	σ (symm)	195 —			
933	229	A1c	210/40	σ (symm)	225 —	982	248	B2h	220/67	σ (symm)	155 —				
			210/47	F	205 dd			C2ad	220/67	σ (symm)	190 —				
			210/52	σ (symm)	295 —			A2m-p	210/60	σ (symm)	200 —				
935	230	A1a	210/52	σ (symm)	280 —	984	249	C1f	210/65	σ (±symm)	240 ?dd				
			220/62	σ (symm)	80 —			987	250	C1n	200/62	σ (±symm)	200 ?dd		
			220/62	σ	80 ud					E1ac	210/60	σ (±symm)	10 ?ud		
220/62	σ	240 ud	E1ad	210/60	σ (±symm)	140 ?dd									
940	233	A1a	210/60	σ (symm)	205 —	990	251	A3e	200/55	σ (symm)	215 —				
			210/65	δ	25 ud			200/55	σ	350 ud					
			210/65	σ	30 ud			A3f	200/55	σ (±symm)	20 ?ud				
942	234	A1a	210/57	σ	355 ud	992	252	B3m	200/55	σ	185 ud				
			210/60	σ	170 dd			200/55	σ (symm)	170 —					
			210/60	σ	350 ud			B3q	200/70	δ	95 ud				
944	235	A1b	210/62	σ (symm)	205 —	1177	253	A1b	200/70	σ	340 ud				
			210/65	σ (symm)	200 —			1288	268	C1g	210/80	σ (±symm)	80 ?ud		
			210/60	σ	25 ud					D1h	200/55	δ	80 ud		
210/60	σ	40 ud	G2ee	145/55	σ (symm)	105 —									
947	236	D1h	210/62	σ (±symm)	50 ?ud	1333	280	A2a	145/55	δ	235 ud				
			210/62	σ (±symm)	340 ?ud			1345	282	G1e	240/50	σ	235 dd		
			210/65	σ	90 —					240/50	δ	305 dd			
210/65	σ	85 ud	240/50	σ (symm)	280 —										
949	237	A1	210/65	σ	230 ud	1351	283	240/50	σ	250 dd					
			210/60	σ	175 dd			240/50	δ	250 dd					
			200/67	σ (symm)	205 —			240/50	σ	250 dd					
951	238	A2c	200/67	σ	180 dd	1357	284	G1m	240/50	σ	250 dd				
			220/47	σ	215 —			240/50	σ	240 dd					
			220/47	σ (symm)	180 —			240/50	δ	10 ud					
953	239	B7e	200/62	σ (±symm)	20 ?ud	1434	298	G1e	150/60	σ	300 ud				
			220/67	σ (±symm)	40 ?ud			1446	300	C6d	200/75	σ (symm)	130 —		
			220/70	σ (±symm)	220 ?dd					A1a	80/45	δ	330 ud		
220/70	σ/F	280 dd	1457	302	A1c	20/40	δ			125 ud					
220/70	δ	260 dd			20/40	δ	285 ud								
220/70	δ	250 dd			B1f	30/65	σ (symm)	90 —							
955	240	A1o	220/70	δ	250 dd	1461	305	B1h	30/65	σ (symm)	35 —				
			210/80	F	270 dd			30/65	F	50 dd					
			210/80	σ (±symm)	210 ?dd										

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
1514	316	F1j	30/70	δ	100 ud
1541	323	C1f	275/50	δ	115 ud
1564	327	D1ac	280/50	σ	10 ud
1623	338	A1d	230/80	σ (symm)	250 —
1626	339	B1c	230/90	σ (symm)	280 —
		C1g	230/80	σ	10 ud
1627	340	B1h	230/80	σ	220 dd
		C1e	230/80	σ (symm)	310 —
1630	341	C4m	190/75	σ (symm)	225 —
		D4n	190/75	σ	15 ud
		E4g	200/70	F	20 ud
1633	342	C2a	200/70	σ	215 dd
			200/70	σ (symm)	195 —
1636	343	A1c	210/80	σ (symm)	210 —
		A1e	210/80	σ (symm)	225 —
		B1g	210/80	δ	45 ud
			210/80	σ	50 ud
			210/80	σ	45 ud
1639	344	C1m	200/80	σ (symm)	255 —
1642	345	C2h	200/85	δ	335 ud
			200/85	F	80 ud
		D2o	205/85	σ (symm)	190 —
1646	346	A1c	210/85	σ	350 ud
		D1y	210/85	σ	20 ud
		E1an	210/85	σ (symm)	243 —
			210/85	δ /F	0 ud
			210/85	σ	0 ud
		F1ao	210/85	F	0 ud
1650	347	D3w	210/85	δ	240 dd
		D3x	210/85	σ	19 ud
		E3z	210/85	σ (symm)	209 —
		F3ab	210/85	σ (symm)	40 —
			210/85	δ	340 ud
		F3ac	210/85	σ	50 ud
			210/85	δ	50 ud
		G3ad	210/85	σ (symm)	40 —
1656	348	C2h	210/85	δ	240 dd
		F2p	210/85	δ	185 dd
			210/85	σ	170 dd
1660	349	F1ad	200/85	δ	195 dd
1665	350	A2f	200/40	σ (symm)	200 —
1669	351	E1aa	210/68	σ	50 ud
		F1ac	210/68	F	40 ud
			210/68	σ	10 ud
1674	352	A1d	210/70	σ	30 ud
1676	353	A2b	210/70	σ	40 ud
		B2h	210/70	Bk	180 dd
1682	355	B1f	200/75	δ	0 ud
			200/75	σ	10 ud
		C1o	200/75	σ	0 ud
1687	358	A2d	200/70	δ	30 ud
1690	360	A2a	210/80	δ	200 dd
		A2f	210/80	δ /F	75 ud
1699	367	A2b	210/70	σ	60 ud
		B2w	210/70	σ	50 ud
1700	368	A2a	210/65	F	40 ud
		C2j-m	210/65	F	30 ud
1712	374	A2a	170/85	δ	210 dd
		A2d	170/85	σ	160 dd

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
1714	375	A1a	185/80	σ	200 dd
		E3o	185/80	δ	5 ud
		E3q	185/80	δ	35 ud
1719	376	B2d	210/80	σ	30 ud
		C2e	210/80	σ (symm)	180 —
		D3a	210/80	σ (symm)	210 —
		E2a	210/80	σ (symm)	200 —
1723	378	C2j	210/75	F	30 ud
1729	382	D1k	200/85	σ	200 dd
1734	383	B2h	200/75	σ	205 dd
			200/75	σ	230 dd
		C2k	200/75	σ	10 ud
1738	385	A2a	200/70	σ (symm)	210 —
		C2g	200/70	σ	350 ud
			200/70	F	20 ud
			200/70	σ	70 ud
		C2h	200/70	σ	350 ud
			200/70	F	10 ud
		D2k	200/70	σ	35 ud
1743	386	A1b	210/70	σ (symm)	220 —
		B1h	210/70	σ	50 ud
			210/70	δ	20 ud
1748	387	A2d	210/70	δ	65 ud
		B2e	210/70	δ	230 dd
		C2f	210/70	σ	30 ud
			210/70	σ	35 ud
1756	390	D2h	210/75	σ	50 ud
1759	391	B4c	220/78	F	330 ud
			220/78	δ	130 ud
			220/78	δ	120 ud
1765	393	B1g	210/65	σ	70 ud
		C1l	210/65	δ	40 ud
		C1i	210/70	σ	40 ud
1775	399	A1h	200/55	δ	170 dd
		D1r	200/55	δ	185 dd
		E1ae	200/55	δ	170 dd
			200/55	δ	175 dd
			200/55	F	180 dd
1780	400	A1e	200/65	σ (symm)	55 —
		A1f	200/65	σ	0 ud
1782	401	C1i	190/70	σ	175 dd
			190/70	σ	205 dd
		D1k	190/70	F	110 dd
		E1o	190/70	σ (symm)	165 —
1786	402	C6b	190/65	δ / σ	180 dd
		G6g	190/65	σ	40 ud
1792	403	A1c	195/70	σ	205 dd
		B1d	195/70	δ	5 ud
			195/70	σ	10 ud
		D1l	195/70	δ	195 dd
1796	404	B1g	210/65	δ /F	30 ud
		C1h	210/75	F	30 ud
			210/75	F	20 ud
			210/75	σ	90 ud
			210/75	F	10 ud
		D1i	210/70	F	220 dd
			210/70	F	190 dd
			210/70	δ	260 dd
			210/70	σ	185 dd

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
1801	405	A1a	260/70	δ	310 dd	1844	417	F2aa	210/75	σ (symm)	140 —
		F1z	260/70	σ (symm)	80 —				210/75	σ (symm)	180 —
		G1w	260/70	σ	40 ud			1849	418	C1t	210/75
1802	409	A1d	230/80	F	30 ud	Elal	220/75			SB	— —
			230/80	F	335 ud		220/75			SB	— —
1807	407	B1i	240/80	F	20 ud	1853	419	H1k	210/75	δ	190 dd
			240/80	F	40 ud			A1a	220/75	σ (symm)	210 —
1807	410	B1g	230/80	σ	80 ud	1856	420	B1l	220/75	σ	70 ud
		E1v	230/80	σ	40 ud			B1i	220/75	σ	45 ud
1812	411	A1a	220/70	δ	70 ud				220/75	σ (symm)	210 —
		C2d	220/60	σ	220 dd	D1p	210/75	σ	205 dd		
			220/60	σ	180 dd	D1r	210/75	F	175 dd		
1813	408	F2o	220/60	δ/F	30 ud			Flg	220/75	δ	215 dd
		A1b	240/80	Bk	70 ud			G1aa	220/75	σ (symm)	220 —
		B1d	240/80	σ	0 ud			G1ab	220/75	σ (symm)	210 —
1818	412	G1w	210/80	F	20 ud	1862	421	A1a	220/75	σ	220 dd
			210/80	F	20 ud			F1p	220/82	F	215 dd
			210/80	F	25 ud				220/82	F	190 dd
1823	413	B1g	230/75	σ	280 dd			G1r	200/85	F	210 dd
		C1m	230/70	σ	260 dd				200/85	F	210 dd
		D2f	230/85	σ (symm)	230 —				200/85	σ	165 dd
			230/85	σ (symm)	200 —			H1t	200/75	F	170 dd
		E2n	230/85	δ/F	200 dd				200/75	F	160 dd
			230/85	σ (symm)	235 —			J1ac	200/75	F	345 ud
		E2o	230/85	σ (symm)	235 —				220/75	F	210 dd
			230/85	σ (symm)	220 —				200/75	σ	0 ud
		F2q	230/85	σ (symm)	230 —			K1ad	220/75	σ (symm)	240 —
			230/85	σ (symm)	215 —	1867	422	B1f	220/75	σ (symm)	180 —
A1f	220/80	σ (symm)	240 —	F1s	220/75			F	350 ud		
1828	414	C1n	220/80	σ (symm)	190 —			G1u	220/75	F	20 ud
			220/80	σ	355 ud	1873	423	A2b	210/70	σ (symm)	210 —
		D1o	220/80	σ (symm)	230 —			B2e	210/70	σ (symm)	180 —
		E1q	220/80	σ (symm)	200 —				210/70	σ (symm)	235 —
			220/80	σ (symm)	210 —	C2i	210/70	σ	170 dd		
			220/80	σ (symm)	190 —				210/70	σ	170 dd
			220/80	σ (symm)	235 —			C2m	220/82	σ (symm)	185 —
			220/80	σ (symm)	220 —			D2m	220/82	σ (symm)	185 —
			220/80	σ (symm)	220 —			F2x	220/82	σ (symm)	170 —
			220/80	σ (symm)	170 —	1878	424	G2al	220/82	σ (symm)	230 —
	220/80	σ (symm)	170 —	E1h	220/82			σ (symm)	210 —		
1833	415	A1a	200/75	σ (symm)	200 —			220/82	σ (symm)	210 —	
1838	416	E1a	210/80	σ (symm)	230 —			220/82	σ (symm)	215 —	
		A1a	210/75	σ (symm)	230 —			F1j	220/82	σ (symm)	215 —
			200/75	σ (symm)	220 —	1884	425	B1f	210/85	σ	30 ud
		200/75	σ (symm)	240 —	C1g			210/85	σ (symm)	180 —	
		200/75	σ (symm)	180 —	1889	426	B1fK	200/85	σ (symm)	230 —	
		200/75	σ (symm)	155 —				200/85	σ (symm)	220 —	
		200/75	σ (symm)	220 —			D1nK	200/85	σ	170 dd	
		E1h	200/75	σ (symm)	230 —			200/85	σ	220 dd	
		F1i	200/75	σ (symm)	210 —			200/85	F	240 dd	
			200/75	σ (symm)	230 —			200/85	σ	240 dd	
	200/75	σ (symm)	200 —			200/85	σ	240 dd			
	200/75	σ (symm)	200 —	1893	427	A1bK	200/85	σ	30 ud		
	200/75	σ (symm)	205 —			C1fK	200/85	σ	250 dd		
1844	417	G1l	210/75	σ (symm)	200 —			200/85	σ (symm)	230 —	
			210/75	σ (symm)	210 —			E1k	200/85	σ (symm)	180 —
		B2da	210/75	σ (symm)	235 —			F1p	200/85	Bk	170 dd
		B2e	200/75	σ (symm)	180 —			H1t	200/85	δ	10 ud

TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN	TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN		
1893	427	H1t	200/85	δ	10 ud	1923	433	E5k	220/65	σ	55 ud		
		H1z	200/85	δ	15 ud			1930	435	A1c	220/65	δ	30 ud
		J1ad	200/85	δ	190 dd					B1l	220/65	δ	100 ud
J1af	200/85	σ (symm)	225 —	1932	436	C1i	220/65			δ	70 ud		
1898	428	A1bf	220/90			σ (symm)	270 —			220/65	δ	110 ud	
			220/90	σ (symm)	310 —	1934	437	C2h	220/60	δ	260 dd		
		C1hf	220/90	σ (symm)	310 —			1938	438	A1a	220/55	σ	70 ud
	220/90	δ	260 dd				220/55			δ	15 ud		
1903	429	G1y	220/90	δ	310 sin			B1c	220/55	δ	210 dd		
		A2b	220/90	δ	130 dex	1939	439	C1m	220/55	δ	190 dd		
		B2c	220/75	δ	265 dd			A1b	220/62	δ	180 dd		
			220/75	δ	230 dd	B1f	220/62	σ	265 dd				
		C2d	220/75	δ	160 dd				220/62	σ	260 dd		
			220/75	δ	260 dd			B1k	220/62	δ	170 dd		
		D2e	220/75	σ (symm)	220 —				220/62	σ	180 dd		
			220/75	σ	40 ud			D1tK	220/62	δ	45 ud		
			220/75	σ (symm)	255 —				220/62	δ	10 ud		
			220/75	σ (symm)	255 dd			F1w	220/62	δ	25 ud		
1909	430	E2h	220/75	F	235 dd				220/62	σ	35 ud		
			220/75	F	180 dd	1945	440	B2m	190/68	σ	80 ud		
		F2m	220/75	σ (symm)	255 —						190/68	δ	350 ud
		A1a	220/72	δ	230 dd				190/68	δ	315 ud		
		B1b	220/72	σ (symm)	260 —			C2r	190/68	δ	210 dd		
			220/72	σ (symm)	295 —	1948	441	A1j	190/70	F	170 dd		
		C1g	220/72	δ	245 dd						190/68	δ	340 ud
			220/72	σ	45 ud			C1a	190/70	δ	350 ud		
		C1i	220/72	δ	245 dd			C1s	190/70	δ	25 ud		
			220/72	δ	290 dd				190/70	σ	340 ud		
	220/72	σ (symm)	295 —			D1w	190/70	δ	10 ud				
1914	431	G1ai	220/72	σ (symm)	295 —				190/70	σ	310 ud		
		B1c	210/85	σ	300 sin			E1x	190/70	σ	35 ud		
		C1h	210/85	σ	300 sin				190/70	δ	35 ud		
		D1K	210/85	σ	300 sin	1953	442	B2c	200/85	σ	65 ud		
		D1l	210/85	δ	300 sin						200/85	σ	0 ud
			210/85	δ	300 sin			B2d	200/85	δ	45 ud		
		F1u	210/85	σ	190 dd			C2k	200/85	δ	60 ud		
			210/85	σ	185 dd			D2n	200/85	δ	355 ud		
		F1v	210/85	σ	130 dex			D2o	200/85	δ	350 ud		
			210/85	σ	130 dex	1959	443	D2m	240/78	δ	255 dd		
	210/85	δ	300 sin						240/78	σ	260 dd		
1920	432	C3d	200/85	δ	345 ud			E2n	240/78	σ	80 ud		
		C3h	200/85	σ	170 dd				240/78	δ	70 ud		
		D3l	200/85	σ (symm)	210 —			F2g	240/78	σ	240 dd		
1923	433	B5a	220/65	δ	0 ud				240/78	σ	260 dd		
			220/65	δ	10 ud	1964	444	E1w	240/79	σ	85 ud		
		B5b	220/65	σ (symm)	310 —					A1a	60/80	σ (symm)	100 —
			220/65	δ	130 dex	1968	445	B1e	60/80	σ	75 dd		
			220/65	δ	310 sin					C1g	60/80	σ (symm)	150 —
		B5c	220/65	δ	310 sin	1972	446	A2c	50/85	σ	60 dd		
			220/65	δ	310 sin						50/85	σ	75 dd
		C5d	220/65	σ	65 ud	1977	447	A2b	50/85	δ	60 dd		
			220/65	σ	— sin						50/85	σ	90 dd
			220/65	δ	65 ud				50/85	σ (symm)	45 —		
C5f	220/65	σ (symm)	240 —			A2c	50/85	σ	70 dd				
	220/65	δ	200 dd			B2g	50/85	δ	50 dd				
D5g	220/65	δ	0 ud				50/85	δ	70 dd				
	220/65	δ	10 ud				50/85	δ	10 dd				
	220/65	F	60 ud	1980	448	C4k	40/85	σ (symm)	75 —				
D5j	220/65	σ	40 ud					D4p	40/85	σ (±symm)	45 ?dd		
	220/65	σ	350 ud										

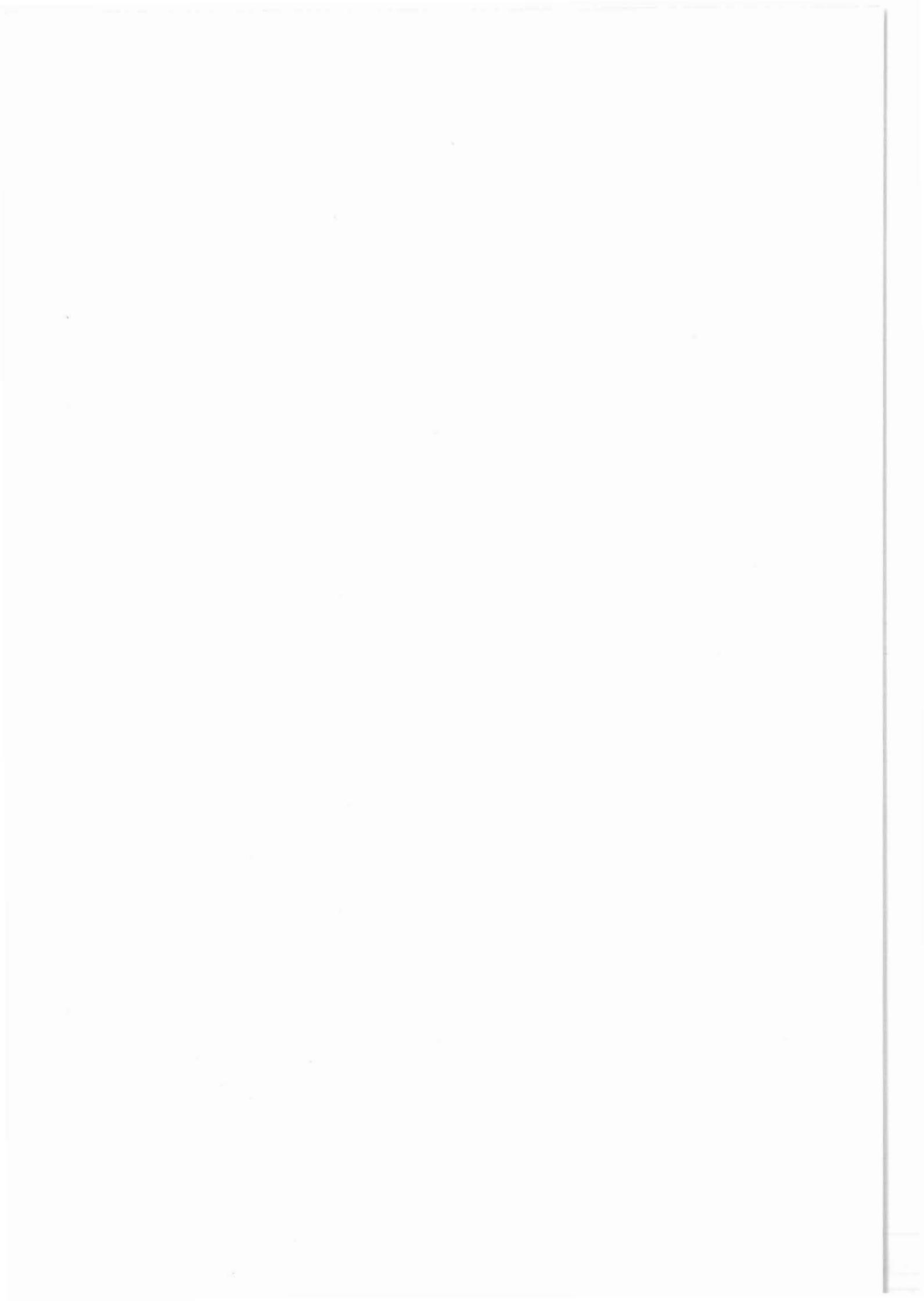
TEUFE [m]	KERN- MARSCH	KERN- STÜCK	SF (FMST)	KRITERIUM	SCHERSINN
1980	448	D4p	40/85	σ	60 —
1983	449	A2a	30/80	σ	300 ud
			30/80	σ	140 ud
		B2d	30/80	δ	210 ud
			30/80	σ	220 ud
		E4c	30/80	σ	5 dd
1988	450	C2b	220/80	σ (symm)	265 —
		E2d	220/80	σ	140 dd
1993	451	B1d	40/80	σ	35 dd
			40/80	σ	35 dd
		D1f	40/80	σ	130 sin
1999	452	H1o	40/80	σ (symm)	40 —
			40/80	δ	245 ud
		A1a	40/72	σ	345 dd
		B1c	40/72	σ	220 ud
		C1d	40/72	δ	10 dd
		D1j	40/72	σ (symm)	180 —
		D1m	40/72	σ (symm)	190 —
		G1a	40/72	δ	175 ud
		H1v	40/72	σ	20 dd
		40/72	σ	20 dd	

Legende: SF (FMST) = Reorientierte Raumlage der Foliation;
 σ = Sigma-Klast; δ = Delta-Klast; symm = symmetrisch; F =
 Faltung; (p) = primär; (s) = sekundär; SB = Scherbänder;
 Bk = Bookshelf Structures; S-C = S-C-Gefüge; ud = up-dip
 (Bewegung des tektonisch Hangenden gegen die Einfallsrich-
 tung der Foliation); dd = down-dip (Bewegung des tektonisch
 Hangenden in Einfallsrichtung der Foliation).



F. Ergänzende Untersuchungen

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB
Bruchtektonik im Teufenbereich
von 2500 bis 3893 m



KTB-Report	90- 2	F1 - F26	13 Abb.	Hannover 1990
------------	-------	----------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Bruchtektonik im Teufenbereich von 2500 bis 3893 m:

F. Ergänzende Untersuchungen

G. Zulauf *)

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
F.1 Einleitung	F 2
F.2 Ergebnisse der Untersuchungen	F 3
F.2.1 Kinematik, Raumlage und Ausbildung der spröden Verschiebungszonen	F 3
F.2.1.1 Aufschiebungen	F 3
F.2.1.2 Abschiebungen	F 8
F.2.2 Mineralisation auf den Verschiebungsflächen	F 9
F.2.3 Extensionsrisse	F 18
F.2.4 Altersabfolge der bruchhaften Gefüge	F 21
F.3 Schlußfolgerung	F 23
F.4 Schriftenverzeichnis	F 25
F.5 Danksagung	F 26

*) Anschrift des Verfassers: Geologisch-Paläontologisches Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Senckenberganlage 32-34, 6000 Frankfurt a.M.

F.1 Einleitung

Die folgenden Untersuchungsergebnisse beziehen sich lediglich auf den untersten Teil der Bohrung VB 1a (2500 bis 3893 m). Die Ablenkbohrung VB 1b (3766,9 bis 4000,1 m) wurde nicht gekernt, so daß auf die Untersuchungen im tiefsten Abschnitt der KTB-Vorbohrung verzichtet werden mußte.

Die lithologische Abfolge des untersuchten Teufenbereichs beginnt bei 2500 m mit Biotit-Hornblende-Gneisen, in die vereinzelt Paragneise (vor allem +/- granatführende Sillimanit-Biotit-Gneise) und Amphibolite eingeschaltet sind (Tab. F.1.; vgl. KOHL et al. 1989). Unterhalb dieser Biotit-Hornblende-Gneise folgen ab 2690 m Paragneise, die im oberen Bereich (ca. 2690 bis 3010 m) vorwiegend aus +/- granatführenden Sillimanit-Biotit-Gneisen, im unteren Teil (ca. 3010 bis 3573 m) hauptsächlich aus +/- granatführenden Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneisen aufgebaut werden (vgl. KOHL et al. 1989; MÜLLER et al. 1989). In die Paragneise sind an zahlreichen Stellen geringmächtige Lamprophyre eingedrungen. Der unterste Teufenabschnitt (3573 bis Endteufe) besteht aus einer Metabasitserie, die sich vor allem aus Granat-Amphibolit und Metagabbro zusammensetzt (SIGMUND et al. 1990).

Die lithologischen Grenzen der oben aufgeführten Gesteinsabfolge sind häufig "primären", das heißt entweder sedimentären oder metamorphen Ursprungs. An einigen Stellen jedoch erfolgt der lithologische Wechsel entlang spröder Verschiebungszonen, so z.B. am Kontakt von Sillimanit-Biotit-Gneis zu Amphibolit bei 2506 m (Abb. F.1.1).

Die ab 2450 m festgestellte Abnahme der Kataklastezonen (ZULAUF 1989) setzt sich bis 3893 m deutlich fort. Der Volumenanteil an kataklastischem Gestein, dessen Matrixgehalt makroskopisch mehr als 50 % einnimmt (Kataklastit im engeren Sinne; vgl. SIBSON 1977), beläuft sich auf weniger als 1 %, gemittelt auf 50 m Kernstrecke. Oberhalb 2450 m beträgt der Anteil an Kataklastiten (im engeren Sinne) häufig mehr als 1 %. Einen auffällig geringen Anteil an spröder Deformation zeigen die feinkörnigen Metabasite im tiefsten Abschnitt der Bohrung (ca. 3600 bis 3900 m). Die Fülle an kinematischen und mineralogischen Daten (vor allem Harnischlineare und -stufen, Harnischbeläge), wie sie aus den oberen Teufenbereichen bekannt sind, nimmt dementsprechend stark ab. Darüber hinaus sind die vorhandenen Kataklastite in den Metabasiten in der Regel stark verfestigt, so daß es nur selten zum Bohrkernzerfall entlang der spröden Verschiebungsflächen kam und sich diese somit der Beobachtung entziehen.

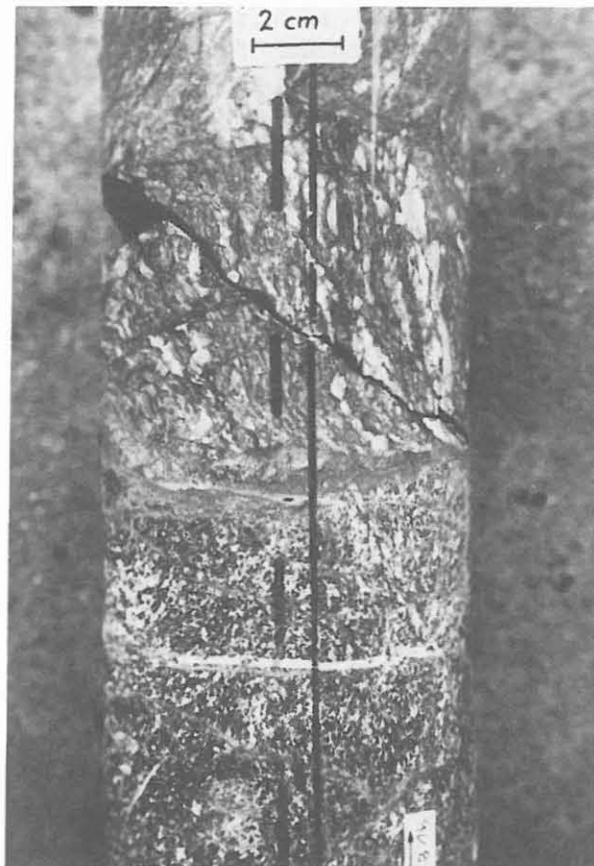


Abb. F.1.1: Katataklastischer Kontakt von Sillimanit-Biotit-Gneis zu Amphibolit. Kst.-Nr. 612B1b, ca. 2506 m.

F.2 Ergebnisse der Untersuchungen

F.2.1 Kinematik, Raumlage und Ausbildung der spröden Verschiebungszonen

Ähnlich wie in den oberen Teufenabschnitten nehmen Aufschiebungen den größten Anteil der Verschiebungszonen ein. Als Schersinnindikatoren dienten Stufen auf Harnischflächen (nur mineralisierte Harnische), Versatzrichtung und Schleppung (Foliation, Gänge) sowie Riedel (R1)-Scherflächen. Es konnten so ca. 400 Aufschiebungen nachgewiesen werden, welche etwa 80 % der gesamten spröden Scherzonen ausmachen. Die restlichen 20 % umfassen vornehmlich Abschiebungen. Die Vermutung, daß Abschiebungen mit zunehmender Teufe gänzlich verschwinden (ZULAUF 1989), bestätigte sich somit nicht. Blattverschiebungen konnten nur sehr selten auf foliationsparallelen Verschiebungszonen beobachtet werden.

F.2.1.1 Aufschiebungen

Makroskopisch lassen sich an den Bohrkernen zwei Generationen von Aufschiebungen unterscheiden. Wie in den oberen Teufenabschnitten sind die ältesten Aufschiebungen in den Gneisen

unter anderem mit Graphit mineralisiert und wesentlich häufiger als die jüngeren graphitfreien Aufschiebungen. Die bereits im mittleren Teufenbereich (bis 2500 m) beobachtete Mächtigkeitsreduzierung der Graphitkataklasite setzt sich bis zur Endteufe fort. Häufig beobachtet man diskrete, weniger als 1 mm breite graphitgeschwärmte Verschiebungsflächen, die in Abständen von 0,5 bis 3 cm folgen (Abb. F.2.1). Nur selten treten dickere, bis zu 2 cm breite Graphitkataklasite in den Gneisen auf (Abb. F.2.2.). Die mittlere Mächtigkeit der graphitreichen Scherzonen beträgt ca. 2 mm, gemittelt auf jeweils 50 m Kernstrecke. Mit der Abnahme der Scherzonenmächtigkeit hat sich auch der Durchmesser der Porphyroklasten in den Graphitkataklasiten erheblich verringert. Die Graphitkataklasite liegen deshalb häufig als Ultrakataklasite vor, deren maximaler Porphyroklastendurchmesser in der Regel weniger als 1 mm beträgt. Die Begrenzungen der graphitreichen Ultrakataklasite zum Nebengestein sind an einigen Stellen deutlich suturiert (z.B. Kernstück 655E1jk, ca. 2730 m), was auf syn- bis postkinematische Drucklösungsprozesse hindeutet.

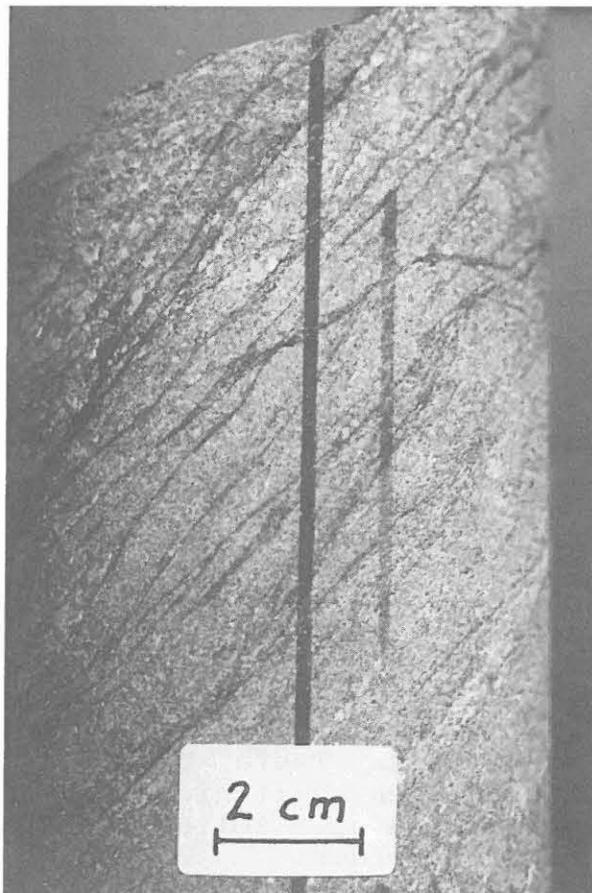


Abb. F.2.1: Diskrete, für den Untersuchungsabschnitt typische graphitreiche Scherzonen, die +/- parallel zur Foliation verlaufen. Kst.-Nr. 741B1d, ca. 3028 m.

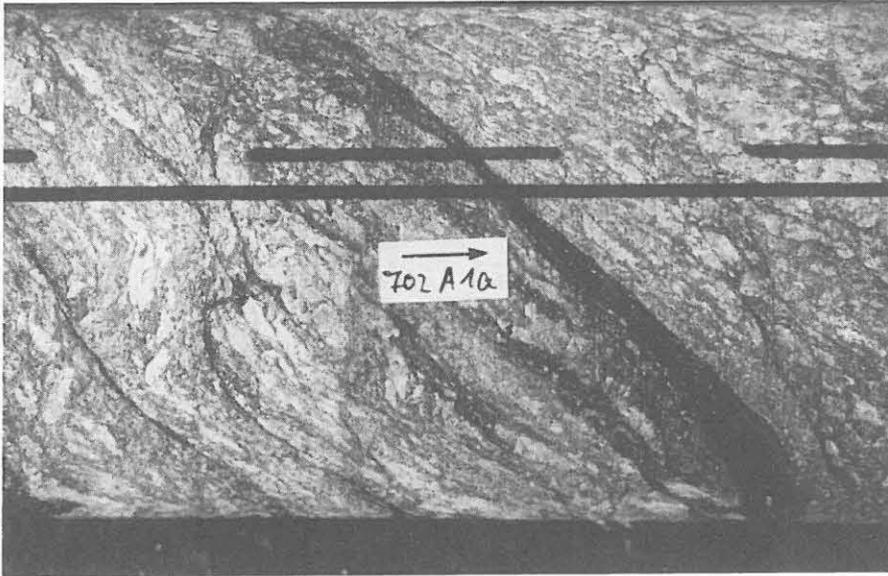


Abb. F.2.2: Relativ breite, für den Untersuchungsabschnitt eher untypische graphitreiche Kataklastesezone im Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis. Kst.-Nr. 702A1a, ca. 2870 m. Länge des Etiketts: 2 cm.

In den Metabasiten des untersten Teufenabschnitts beobachtet man an einigen Stellen erheblich breitere aufschiebende Scherzonen. Die Porphyroklastendurchmesser betragen hier bis zu 1 cm. Aufgrund des fehlenden Graphitgehaltes kann jedoch nicht entschieden werden, ob es sich hierbei um die ältere oder jüngere Generation von Aufschiebungen handelt. Auffällig ist, daß die breiten Aufschiebungen bevorzugt entlang der Kontaktzonen zu granitoiden Gängen auftreten. Im Gegensatz zu den Gneisen sind konjugierte, meist flache Aufschiebungen in den Metabasiten häufiger zu beobachten (z.B. Kernstück 908G1q, ca. 3704 m).

Die Lamprophyre zeigen lediglich diskrete, wenige mm breite Aufschiebungen, die durch den Versatz von älteren, meist reichlich vorhandenen präkinematischen Gängchen sichtbar werden (Abb. F.2.3). Die Kontakte zum Nebengestein stellen bei den postintrusiven spröden Bewegungen Schwächezonen dar. Sie sind häufig intensiv vergrünt und kataklastisch überprägt (vgl. auch KOHL et al. 1989).

Innerhalb der Paragneise erfolgten die Aufschiebungen häufig entlang der Foliation (Tab. F.1; Abb. F.2.4). Das Umbiegen der Foliation von SW/SSW nach vorwiegend E bei ca. 3050 m hat offensichtlich einen wesentlichen Einfluß auf die Raumlage der Aufschiebungen. Anhand der ersten Rückorientierungsdaten war es möglich, einem geringen Anteil der gemessenen Störungen, Harnischflächen und -lineare die wahre Raumlage zuzuordnen (siehe auch MÜLLER et al. 1989: Abb. B.6.4 u. B.6.5). Im Teufenintervall von 2500 bis 3050 m (Foliation fällt nach SW/SSW) fallen ca. 70 % der Aufschiebungen nach SSW bis WSW.



Abb. F.2.3: Diskrete flache Aufschiebungen im Lamprophyr versetzen die reichlich vorhandenen, z.T. fiederspaltentartigen Gängchen, die meist aus Calcit bestehen. Kst.-Nr. 732C1f, ca. 2989 m.

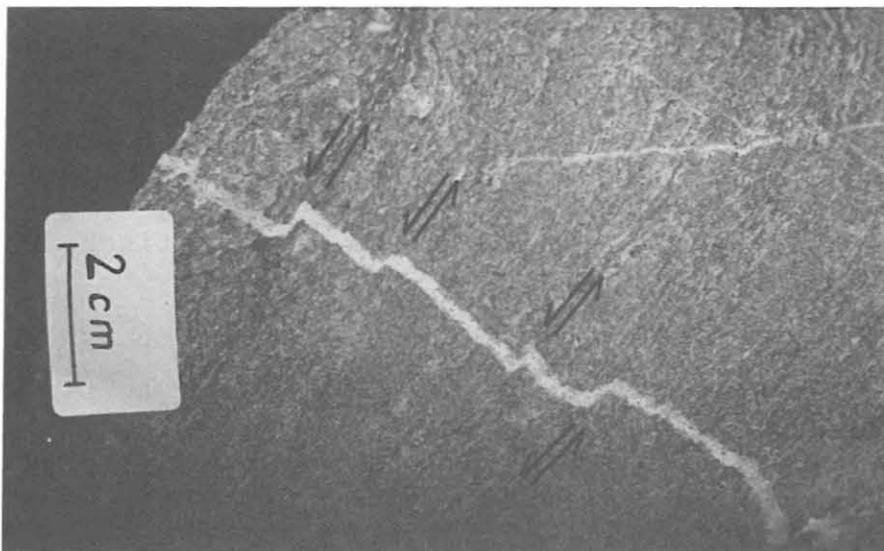


Abb. F.2.4: Foliationsparallele Aufschiebungen versetzen präkinematischen Quarz-Feldspat-Gang im fein- bis strafflagigen granatführenden Sillimanit-Biotit-Gneis. Kst.-Nr. 689F1s, ca. 2825 m.

Nur wenige Flächen fallen in die entgegengesetzte Richtung, nach NE. Der größte Teil der Aufschiebungen hat annähernd "dip-slip"-Charakter, das heißt, daß Fläche und Bewegungslineare etwa die selbe Einfallrichtung besitzen und somit keine nennenswerte Schrägverschiebungskomponente vorliegt.

Zwischen 3050 und 3700 m fällt der größte Anteil der Aufschiebungen nach ENE bis ESE. Die Bewegungslineare dieser Flächen fallen zum einen nach NE (meist Schrägverschiebungen), zum anderen nach E. Lediglich ein geringer Anteil der Flächen fällt nach N bzw. S (SSW). Die hierzu gehörigen Bewegungslineare zeigen N-S gerichtete aufschiebende Bewegungen an.

In phyllosilikatreichen Gneisen gehen die Aufschiebungen häufig in Knickzonen und Falten über (Abb. F.2.5). Die Achsen der Falten und Knickzonen weisen in solchen Fällen häufig das selbe Streichen wie die Aufschiebungen auf.

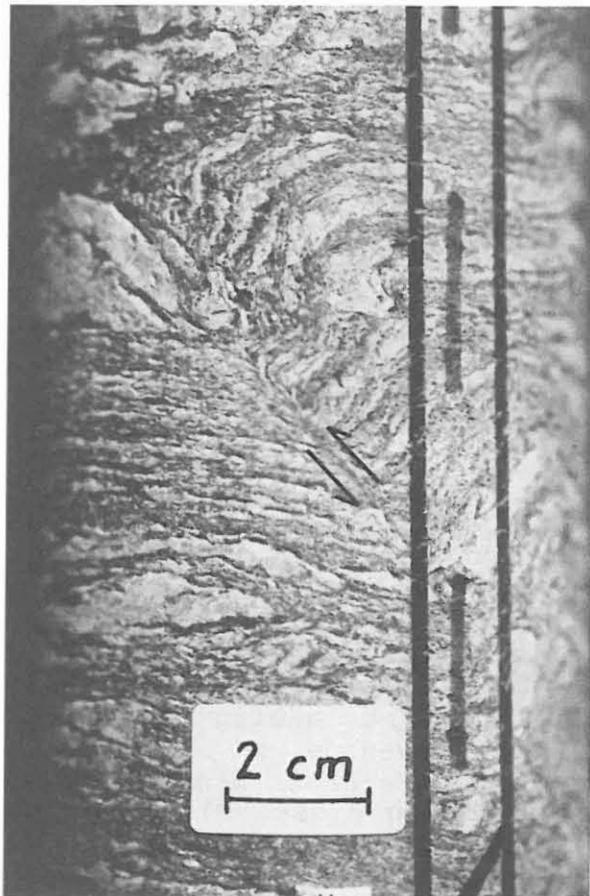


Abb. F.2.5: Übergang von Faltenstrukturen in diskrete Aufschiebungen im Granat-Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis. Kst.-Nr. 751E3g, ca. 3067 m

F.2.1.2 Abschiebungen

Nachdem abschiebende Bewegungszonen ab 1610 m nur noch gelegentlich beobachtet wurden (ZULAUF 1989), treten sie ab 3150 m wieder verstärkt auf (vgl. Tab. F.2.1). Es handelt sich meist um nach E einfallende Verschiebungsflächen, welche die älteren Aufschiebungen versetzen (Abb. F.2.6).

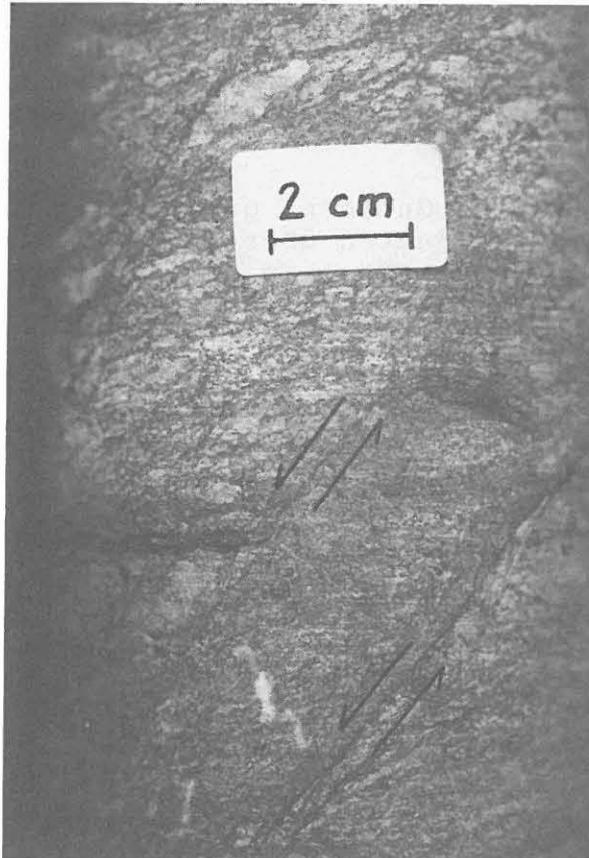


Abb. F.2.6: Eine flach liegende, graphitreiche Katakklasezone wird entlang jüngerer Abschiebungen versetzt. Man beachte die Schleppungsstrukturen entlang der Abschiebungen. Kst.-Nr. 769F3t, ca. 3150 m.

Die wenigen rückorientierten Meßwerte ergeben überwiegend einen nach NE bzw. E gerichteten Bewegungsvektor. Die abschiebenden Bewegungen sind häufig entlang der Foliation sowie entlang diskreter, wenige mm breiter Katakklasezonen erfolgt, deren meßbarer Versatz mindestens 7 cm beträgt (Abb. F.2.6). Selten treten diese als steile konjugierte Systeme auf, wie z.B. im Kernstück 813Elpk (ca. 3341 m). Neben den diskreten Abschiebungen können an einigen Stellen jedoch breite, bis zu mehrere cm mächtige Abschiebungen beobachtet werden. Im Gegensatz zu den älteren Aufschiebungen sind sie stark entfestigt (Abb. F.2.7). Das mehr oder weniger intakte Nebengestein ist häufig mit bis zu 2 mm breiten subvertikalen Gängchen durchsetzt (Abb. F.2.7). Die auffälligste dieser Abschiebungen wurde zwischen 3195 und

3200 m im Kernmarsch 782 A beobachtet (siehe auch MÜLLER et al. 1989: Abb. B.5.8). Es handelt sich hierbei um eine 30 cm breite Störung, die sehr steil (mit 75°) nach E einfällt und stark entfestigt ist. Die Porphyroklasten sind bis zu 1 cm groß. Obwohl Versatz- oder Schleppungsstrukturen sowie Harnische mit Stufen als kinematische Indikatoren fehlen, gibt es Indizien, die auf eine abschiebende Bewegung hinweisen. Zum einen fällt die Verschiebungsfläche - genau wie die zugehörigen Bewegungslineare - sehr steil ein, was eher bei Abschiebungen als bei Aufschiebungen zu erwarten ist (z.B. PRICE 1981: 58). Zum anderen treten im mehr oder weniger intakten Nebengestein diskrete Scherflächen vom Typus Riedel (R1-Flächen, vgl. z.B. RUTTER et al. 1986) auf, die einen abschiebenden Schersinn anzeigen (vgl. auch MÜLLER et al. 1989).

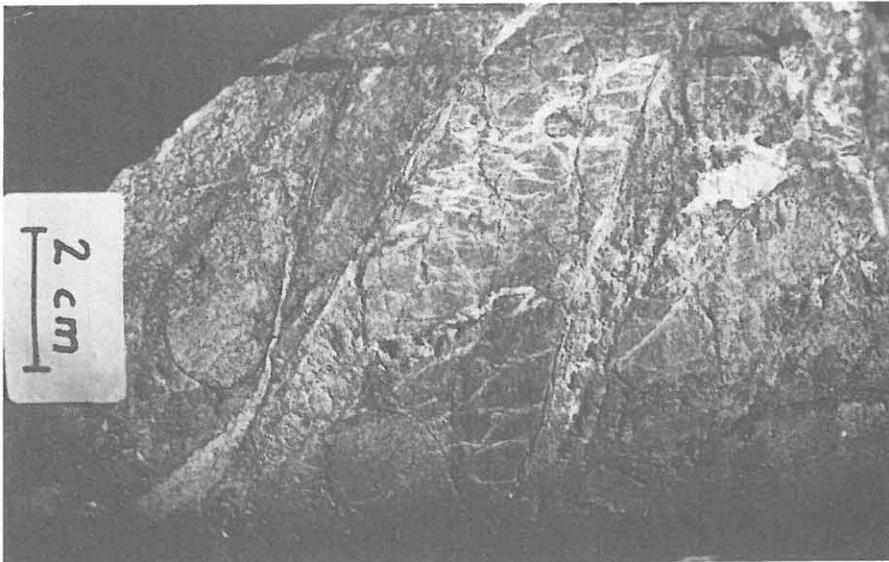
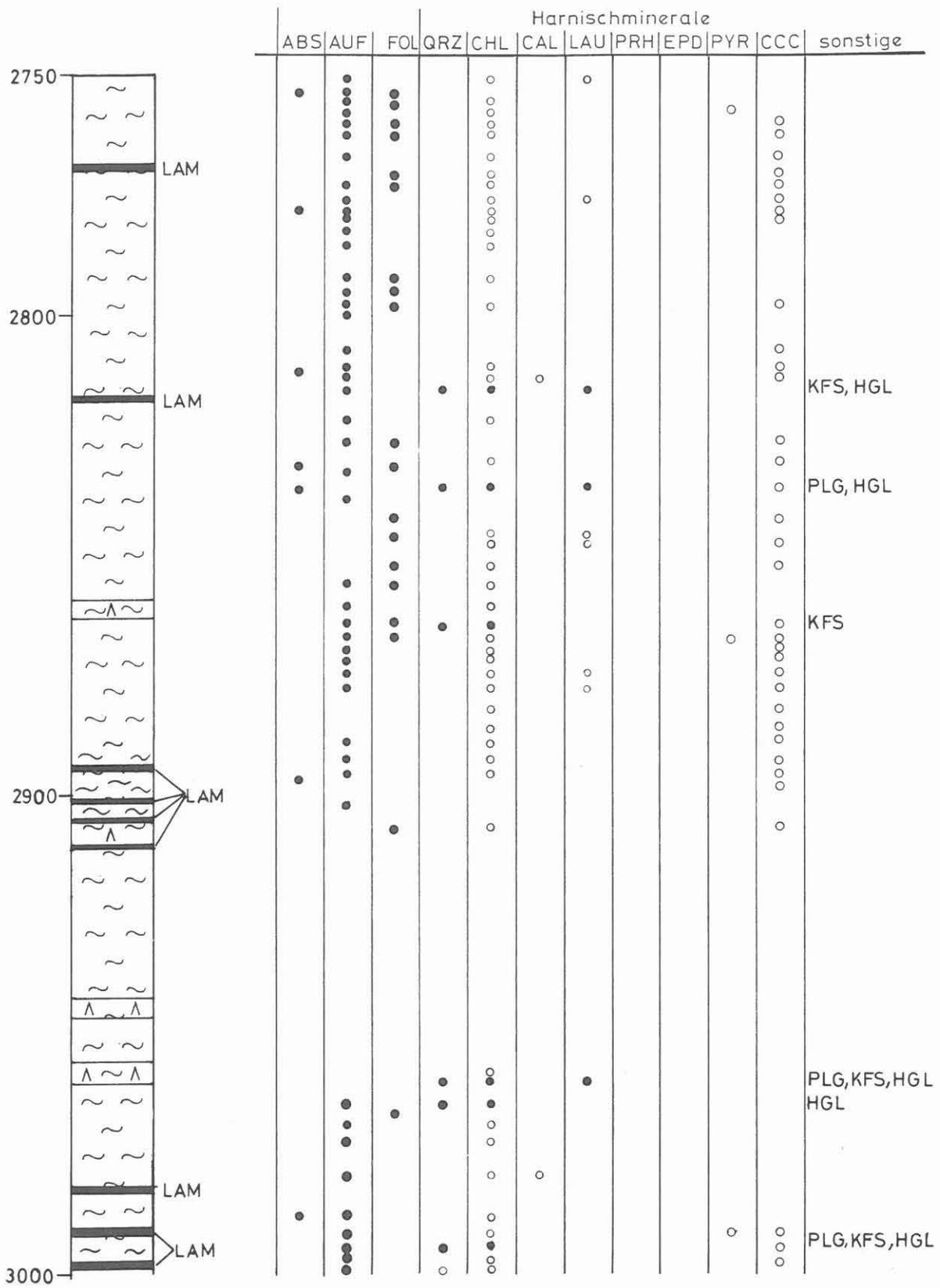


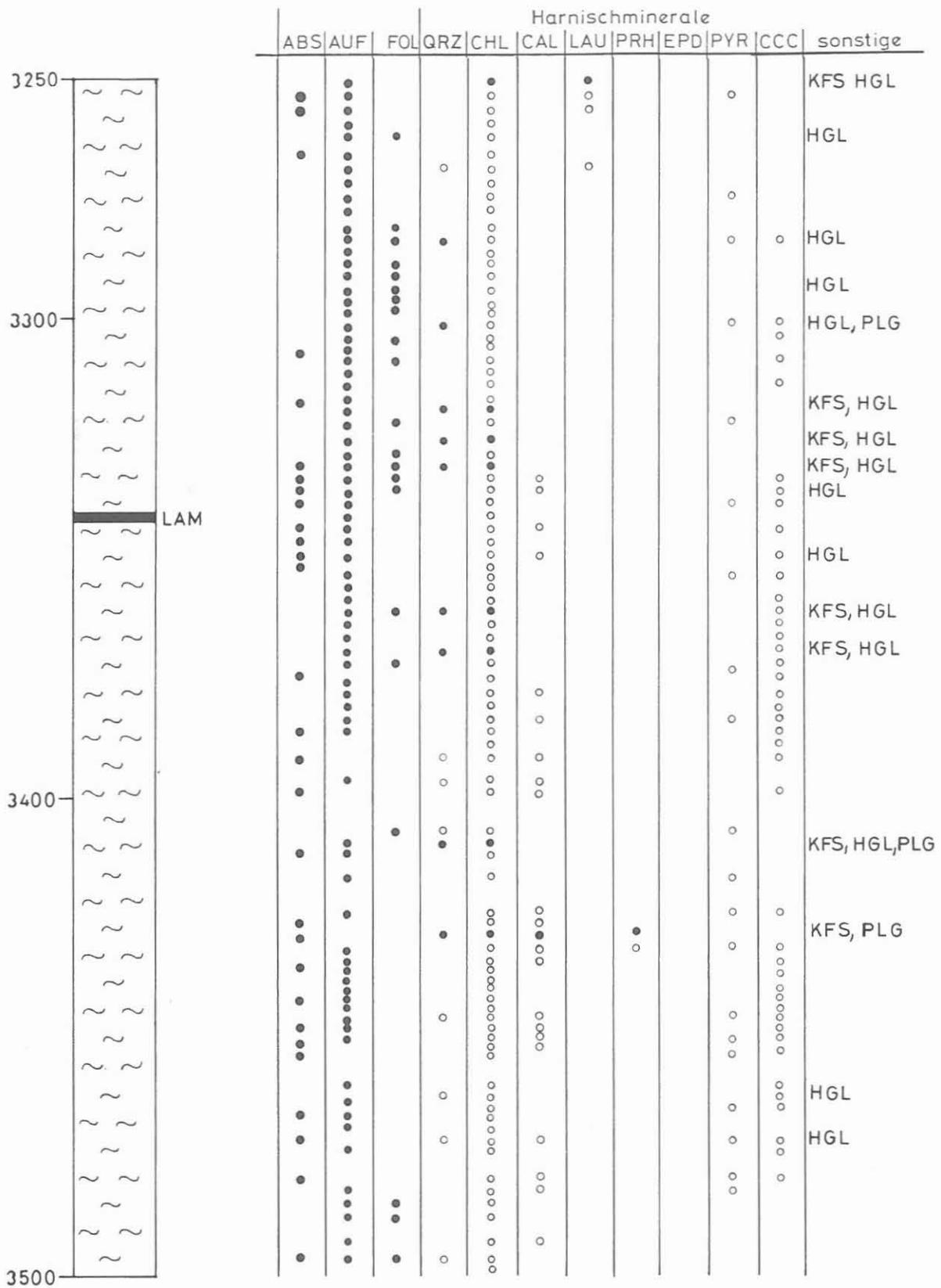
Abb. F.2.7: Abschiebende, stark entfestigte Kataklysezone im Sillimanit-Muskovit-Biotit-Gneis. Subvertikale, fiedrig angeordnete präkinematische Gängchen sind, wie die Scherzonen, mit Laumontit mineralisiert. Kst.-Nr. 873E1p, ca. 3567 m.

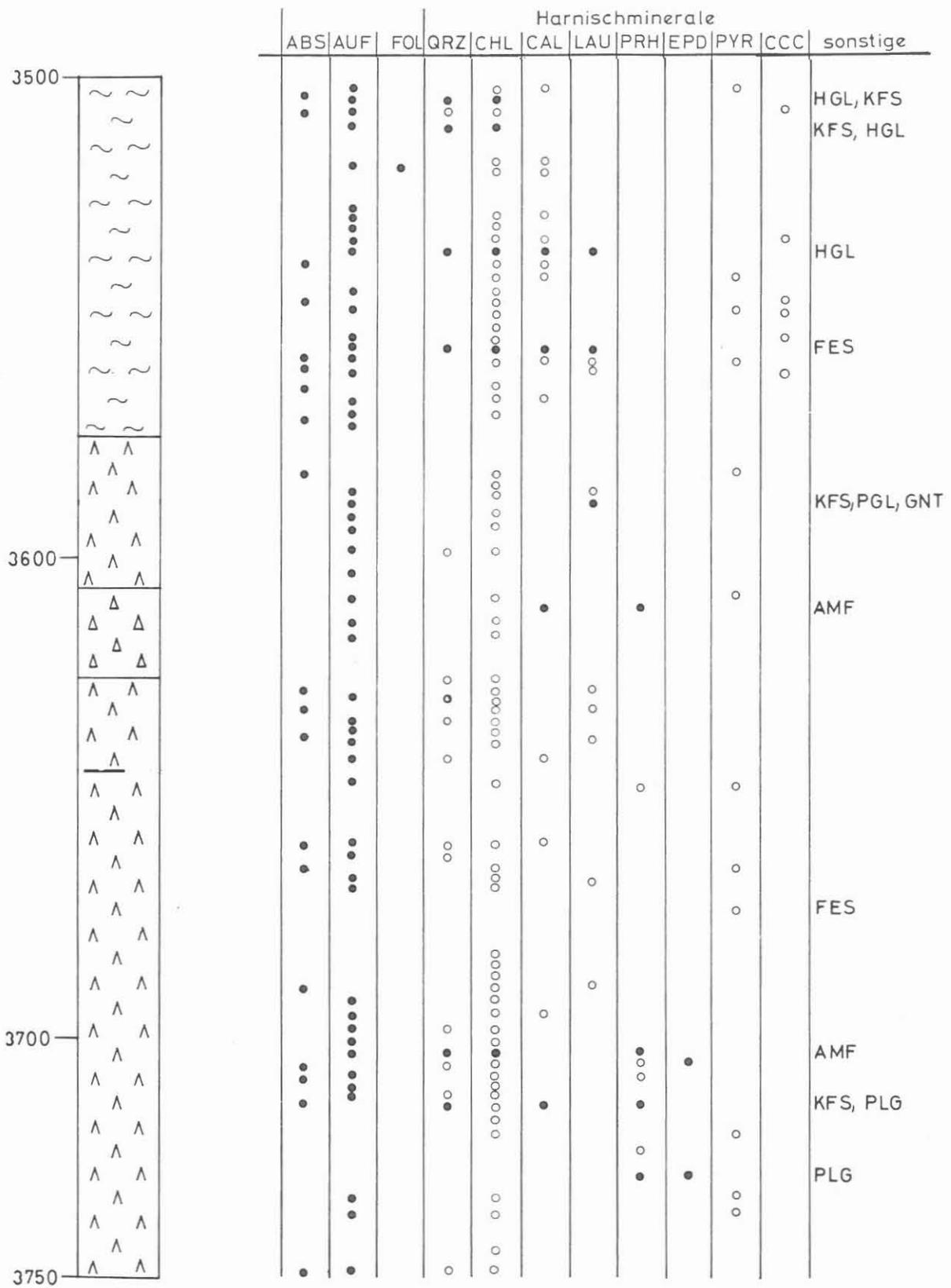
F.2.2 Mineralisation auf den Verschiebungsflächen

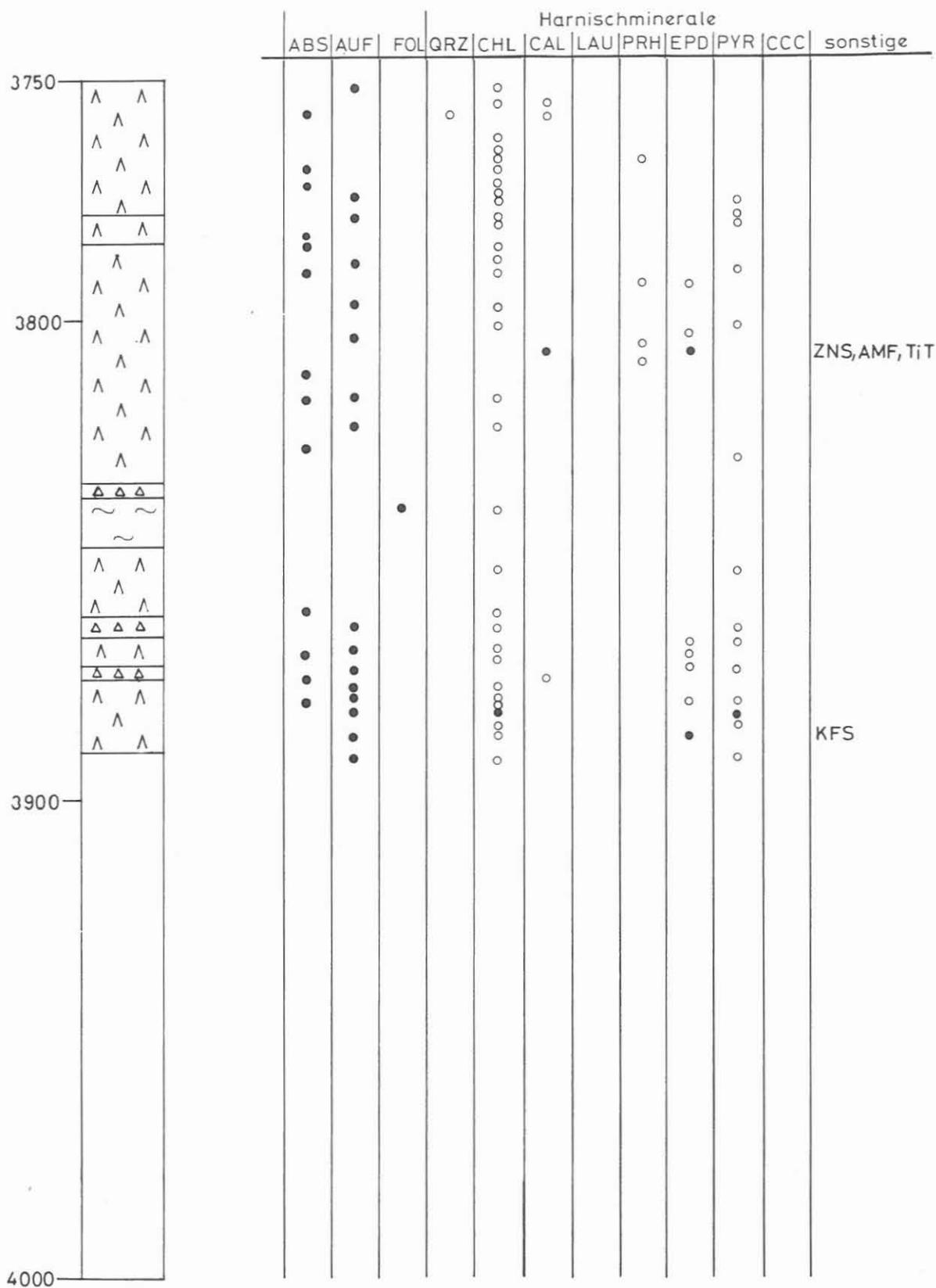
Aus Tab. F.1 kann man entnehmen, daß Chlorit das weitaus häufigste, auf den kataklastischen Scherflächen neugebildete Mineral darstellt. Mit Ausnahme einiger epidot- und prehnit-

Tab. F.2.1: Teufenabhängiges Auftreten von Abschiebungen (ABS), Aufschiebungen (AUF), foliationsprerparallelen Verschiebungen (// FOL) und der Harnischmineralisation. Ausgefüllte Kreise = durch RDA nachgewiesene Minerale. Vereinfachtes lithologisches Profil nach KOHL et al. (1989), MÜLLER et al. (1989) und SIGMUND et al. (1990). Die Abkürzungen der Mineralnamen entsprechen den Vorschriften aus GRAUP et al. (1988).









reicher Katakklasezonen in den Metabasiten und hornblendeführenden Gneisen findet man Chlorit auf fast allen spröden Verschiebungsflächen. Eine auffällig starke Anreicherung beobachtet man zwischen 3635 und 3670 m entlang von jungen steilen Abschiebungen im Granatamphibolit. Hier kam es zur Bildung von bis zu 2 cm langen "pull-apart"-artigen Mineralisationen (Abb. F.2.8), die nach röntendiffraktometrischen Analysen ausschließlich aus Chlorit bestehen. Ob es sich hierbei um durch "crack-seal" entstandene Strukturen (shear fibre veins, vgl. RAMSAY & HUBER 1983: Abb. 13.32) handelt, müssen Dünnschliffuntersuchungen zeigen. In der bei 3199,4 m vorliegenden auffällig breiten Abschiebung besteht ein 0,5 cm breiter Ultrakataklasit aus 50-60% Chlorit (MÜLLER et al. 1989).

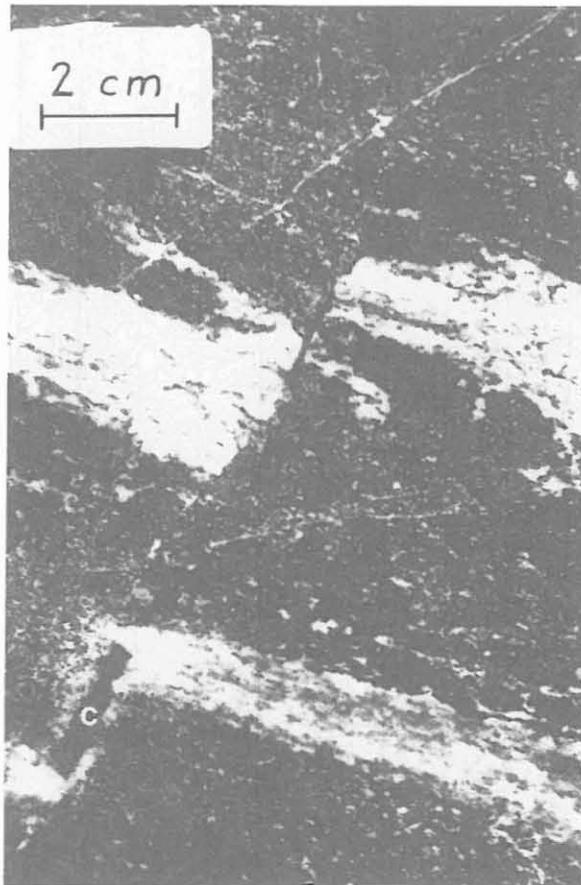


Abb. F.2.8: Junge Abschiebung mit einer "pull-apart"-artigen Mineralisation aus monomineralischem Chlorit (C, linke untere Bildecke). Kernstück 889G1qk, ca. 3639 m.

Insbesondere in den Paragneisen findet man neben Chlorit gehäuft Graphit, zu dem sich in der Regel auch Pyrit gesellt. Graphitmineralisation ist jedoch auf die ältesten, nach SSW bis WSW bzw. ENE bis ESE fallenden Aufschiebungen beschränkt. Hierbei läßt sich an einigen Stellen beobachten, daß sehr feinkörniges graphitreiches Matrixmaterial von den Scherzonen aus in Risse des mehr oder weniger intakten Nebengesteins

eingedrungen ist. Daneben stellt man häufig eine schwache Dunkelfärbung des Nebengesteins an Kontakten zu den graphitreichen Kataklasiten fest, die auf eine diffuse Einwanderung des Graphits (bzw. des Kohlenstoff führenden Mediums) in das Nebengestein schließen läßt.

Wie in den oberen Teufenabschnitten werden hinsichtlich der Harnischmineralisation 70 bis 100 m mächtige graphitreiche durch bis zu ca. 30 m breite graphitarmer Paragneispartien getrennt. Zudem tritt Graphit auf den Verschiebungsflächen der Paragneise mit zunehmender Annäherung an den bei 3573 m beginnenden Metabasitkomplex auffällig zurück. Eine ähnlich starke Verminderung des Graphitgehaltes wurde bereits auf den Harnischflächen der Paragneise zwischen 1620 und 1730 m - ebenfalls im Kontaktbereich zum hangenden Metabasitkomplex - festgestellt (ZULAUF 1989: Tab. E.2.1). Selteneres Auftreten von Graphit beobachtet man auch in den ältesten aufschiebenden Kataklastezonen der hornblendeführenden Gneise.

Vollständig frei von Graphit sind die Harnischflächen der Metabasite (Amphibolite und Metagabbros) und der eingeschalteten Lamprophyre. Pyrit findet man jedoch in fast gleicher Intensität als Harnischmineral in den Metabasiten, wobei idiomorphe, meist wenige mm große würfelige Aggregate keine Seltenheit sind.

Quarz tritt sowohl auf den Verschiebungsflächen der Paragneise als auch auf den Harnischen der Metabasite auf. Es kann davon ausgegangen werden, daß Quarz in Tab. F.2.1 im Gegensatz zu den restlichen Mineralen unterrepräsentiert ist, da die makroskopische Ansprache häufig schwierig ist. In den Metabasiten kommt Quarz nur im obersten Abschnitt vor.

Ein auf den Verschiebungsflächen der Paragneise häufig vorkommendes Mineral ist Hellglimmer, der vor allem durch röntgendiffraktometrische Analysen nachgewiesen wurde. Da die Paragneise zum Teil primären Muskovit führen (MÜLLER et al. 1989), kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich bei den Phyllosilikaten auf den Verschiebungsflächen diese primären Muskovite neben neugebildeten Hellglimmern beteiligen. Eine exakte Unterscheidung zwischen beiden wird erst durch Dünnschliffuntersuchungen möglich sein.

In den Paragneisen kommt Hellglimmer häufig zusammen mit Kalifeldspat und/oder Plagioklas vor. Diese beiden Feldspäte wurden darüber hinaus auf den Verschiebungsflächen der Metabasite nachgewiesen.

Calcit ist als Harnischmineral in den Paragneisen zwischen ca. 3150 und 3570 m sowie in den Lamprophyren zu beobachten. In den darüber liegenden Paragneisen (2500 bis 3150 m) sowie in den darunter folgenden Metabasiten kommt Calcit nur sehr untergeordnet vor. Zum Teil beobachtet man ihn in hypidiomorpher bis idiomorpher Ausbildung als postkinematisch gebildetes Mineral auf den Verschiebungsflächen.

In meist idiomorpher Form findet man auch **Laumontit**, der sowohl in den Gneisen als auch in den Metabasiten vorkommt. Zwischen 3150 und 3300 m tritt er in den Paragneisen gehäuft auf. Ab 3690 m wurde auf den Scherzonen kein Laumontit mehr beobachtet. Gleichzeitig stellt man ein gehäuftes Auftreten von **Prehnit** und **Epidot** fest, welche zwischen 2500 und 3700 m in den Gneisen nur gelegentlich beobachtet wurden. Beide Minerale sind vor allem entlang kataklastisch überprägter Grenzflächen von granitoiden Einschaltungen zum Nebengestein zu beobachten. Eine mit Epidot "durchtränkte", ca. 10 cm breite Kataklastikzone liegt bei ca. 3873 m vor (Kernstücke 953 A2a und 953 A2b). Prehnit wurde an wenigen Stellen auch als idiomorphe, postkinematische Bildung auf den Bewegungsflächen beobachtet (z.B. Kernstück 619 D1fk, ca. 2548 m).

Sphalerit, der bereits bei 1940 m auf den Verschiebungsflächen nachgewiesen wurde, kommt bei 2550 m zusammen mit Prehnit und Kalifeldspat im Hornblende-Biotit-Gneis vor. Man findet Sphalerit des weiteren auf den Harnischen der Metabasis bei 3810 m, zusammen mit Epidot und Calcit. **Pyrrhotin** wurde bei 3560 m neben Chlorit, Quarz, Calcit und Laumontit nachgewiesen.

Bei den an wenigen Stellen durch röntgendiffraktometrische Analysen nachgewiesenen Mineralen Granat und Amphibol handelt es sich vermutlich nicht um neugebildete Minerale, sondern um primäre, in die Scherzone eingearbeitete Minerale des Nebengesteins. Ob es sich bei den Amphibolen eventuell um neugebildeten Aktinolith handelt, müssen die weiteren Untersuchungen zeigen.

F.2.3 Extensionsrisse

Im untersuchten Teufenabschnitt lassen sich mehrere Generationen von Extensionsrissen unterscheiden. Je nach Lithologie und Altersstellung weisen diese unterschiedliche Mineralisationen auf.

Wie in den oberen Teufenbereichen lassen sich als älteste bruchhafte Bildungen **subvertikale Extensionsrisse** nachweisen (vgl. ZULAUF & KOHL 1989; ZULAUF 1989). Diese haben sich am häufigsten in den Metabasiten gebildet und sind hier, wie im Metabasitkomplex zwischen 1152 und 1610 m, mit Prehnit und Epidot mineralisiert. Im Kernstück 928B1f (ca. 3807 m) konnte zudem Klinozoisit durch röntgendiffraktometrische Analyse innerhalb der steilen Gänge nachgewiesen werden.

In den hornblendeführenden Gneisen sind die subvertikalen Extensionsrisse häufig mit Epidot (am Rand) und Calcit (in Gangmitte) verfüllt. Die Gänge werden an zahlreichen Stellen entlang aufschiebender, z.T. graphitreicher Störungszonen versetzt (z.B. Kernstück 619G11; vgl. auch Abb. F.2.9). Im Kernstück 622B1h (ca. 2564 m) konnte neben Epidot und Calcit zusätzlich Flußspat in einem präkataklastischen steilen Gang

röntgenographisch nachgewiesen werden.

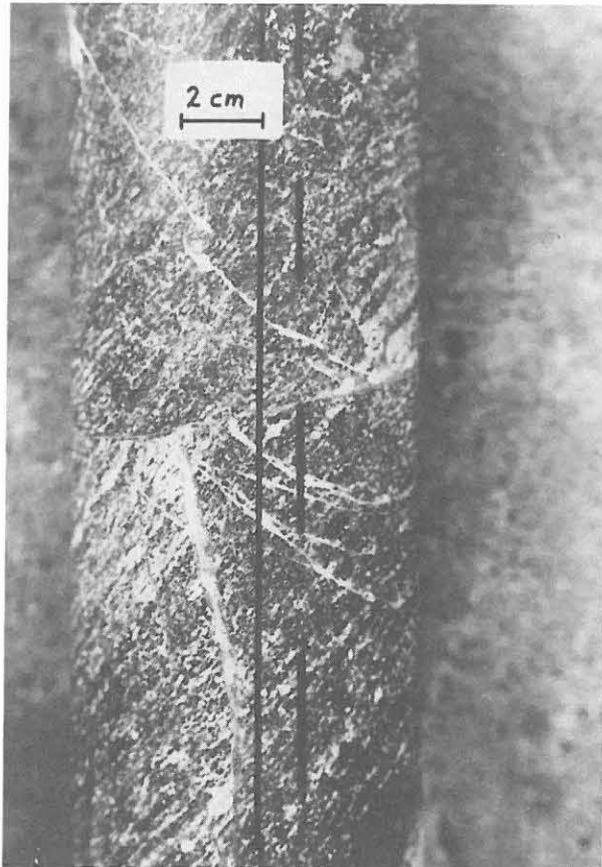


Abb. F.2.9: Der mit Epidot und Calcit mineralisierte, fast vertikal verlaufende Gang, wird zusammen mit den mittelsteil einfallenden schmälere Gängchen entlang einer flachen Aufschiebung versetzt. Kst.-Nr. 620F1m, ca. 2555 m.

Innerhalb der in die Paragneise eingeschalteten geringmächtigen Granatamphibolite und Hornblendegneise wurde in den steilen Gängen Quarz, Epidot, Calcit und Prehnit vorgefunden (z.B. Kernstück 770E1ad; ca. 3156 m).

In den Paragneisen selbst treten die subvertikalen Gangbildungen wesentlich seltener auf als in den Metabasiten und hornblendeführenden Gneisen. Sie sind in der Regel mit Feldspat und Quarz verfüllt, wobei an mehreren Stellen Mikroklin durch röntgendiffraktometrische Analysen nachgewiesen werden konnte. Ein typischer Gang dieser Art befindet sich im Kernstück 821E3p (ca. 3366 m) im Paragneis. Er besteht aus 70 % Quarz, 25 % Mikroklin und 5 % Calcit und wird entlang foliationsparalleler Aufschiebungen versetzt.

Die jüngeren, **subhorizontalen Extensionsrisse** sind in der Regel postkinematisch in bezug zur ältesten aufschiebenden Graphitkataklase. So beobachtet man vielfach weniger als 1 mm breite subhorizontale Gängchen, welche die Graphitkataklase

durchschlagen (z.B. Abb. F.2.10). Diese Gängchen sind meist mit Quarz, Feldspat, Chlorit oder Calcit mineralisiert.

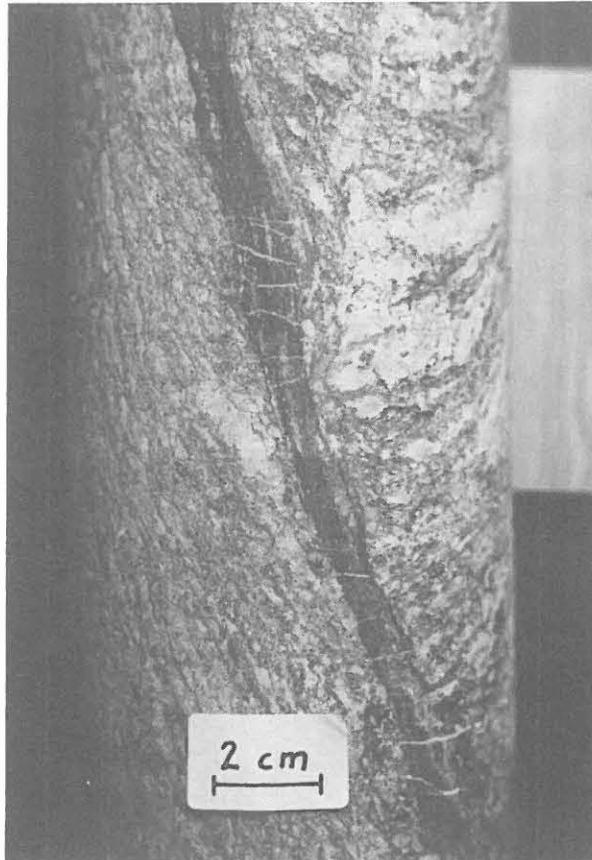


Abb. F.2.10: Eine relativ steile, graphitführende Kataklastosezone wird von subhorizontalen Gängchen durchsetzt. Kst.-Nr. 823Fluk, ca. 3375 m.

Die Graphitkataklastite müssen bei der Bildung der Gänge bereits intensiv verfestigt gewesen sein, da sie sonst nicht in dieser Weise durch spröden Bruch reagiert hätten. In den Metabasiten kann man das jüngere Alter der subhorizontalen Gängchen daran ablesen, daß sie die älteren subvertikalen Gängchen durchschlagen und z.T. auch um geringe Beträge versetzen (Abb. F.2.11). Im Gegensatz zu den flachen Gängen der oberen Metabasitfolge (1152 bis 1610 m), welche vornehmlich mit Laumontit mineralisiert sind, treten hier meist Prehnit und Epidot als Gangfüllung auf.

Die jüngsten Gangbildungen, die sowohl in steiler als auch flacher Raumlage vorliegen, zeichnen sich durch starke Entfestigung aus. Im Gegensatz zu den älteren Gängen fungieren sie deshalb als Sollbruchstellen. Oft findet man sie als bis zu 1 mm breite Gängchen, die als postkinematische Bildungen auch in niedriger Ausbildung in kataklastisch vorgeprägten Regionen vorkommen können. Die Mineralisation dieser jungen Extensionsrisse ist ebenfalls vom Nebengestein abhängig. In

den Metabasiten findet man häufig Laumontit in idiomorpher meist nadeliger Form. In den Paragneisen beobachtet man neben Laumontit häufig Calcit neben Quarz, Feldspat, Chlorit und Hellglimmer (siehe auch MÜLLER et al. 1989: Tab. B.4.2). Offene Klüfte in den Gneisen sind mit Calcit und Tonmineralen (Kaolinit, Smectit) mineralisiert (vgl. MÜLLER et al. 1989). In den Metabasiten findet man auf offenen Klüften Epidot und Prehnit.

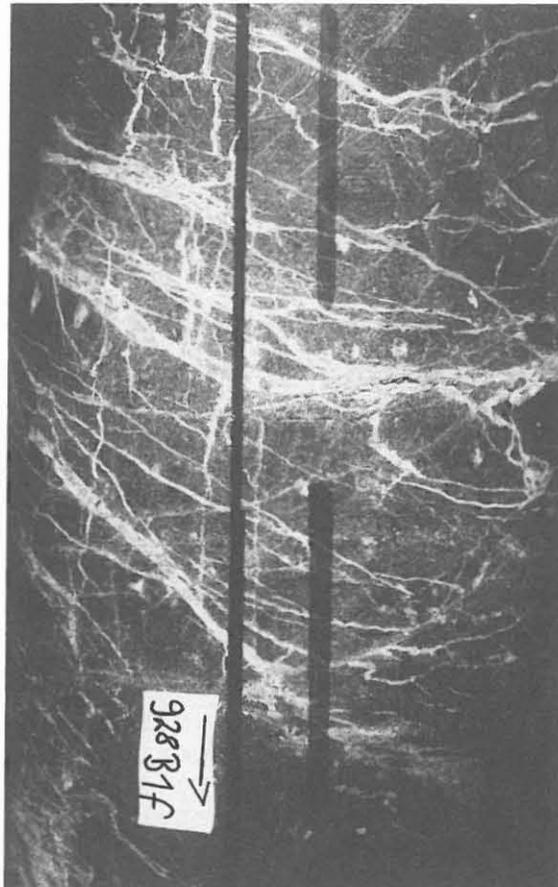


Abb. F.2.11: Eine ältere, subvertikal verlaufende Gangschar wird von einer jüngeren, subhorizontal verlaufenden Gangschar durchschlagen. Die älteren Gängchen bestehen aus Prehnit. Die jüngeren, meist breiteren Gängchen sind mit Epidot neben wenig Prehnit und Klinozoisit mineralisiert. Kst.-Nr. 928B1f, ca. 3806 m. Länge des Etiketts = 2 cm.

F.2.4 Altersabfolge der bruchhaften Gefüge

Der bisher dargelegte, aus Untersuchungen bis 2500 m abgeleitete spröde Deformationspfad (vgl. ZULAUF 1989) wird durch die Untersuchungen bis 3893 m weitgehend bestätigt. Ab ca. 3050 m jedoch tritt zu den bisher vorgefundenen Aufschiebungen (bisher 2 Generationen) eine dritte älteste hinzu. Der Deformationspfad ist in Abb. F.2.12 dargestellt. Er läßt

sich folgendermaßen gliedern:

- 1) Spätvariszische Bildung von subvertikalen Extensionsrissen während metamorpher Bedingungen der Prehnit-Aktinolith-Fazies (vgl. LIOU et al. 1987).
- 2) Erste spätvariszische aufchiebende Katakklase unter E-W-Einengung und metamorphen Bedingungen der Prehnit-Aktinolith-Fazies (nur unterhalb ca. 3050 m nachweisbar). Bildung von graphitreichen Katakklasiten
- 3) Zweite spätvariszische aufchiebende Katakklase unter NE-SW-Einengung und metamorphen Bedingungen der Prehnit-Aktinolith-Fazies. Bildung von graphitreichen Katakklasiten.
- 4) Dritte postvariszische (? kreidezeitliche) aufchiebende Katakklase unter N-S-Einengung und metamorphen Bedingungen der Zeolith-Fazies (vgl. LIOU et al. 1987). Im untersten Teufenbereich findet vermutlich Übergang zur Prehnit-Aktinolith-Fazies statt. Bildung von subhorizontalen Extensionsrissen.
- 5) Bildung von (? kreidezeitlichen) Blattverschiebungen unter N-S bis NW-SE-Einengung und metamorphen Bedingungen der Zeolith-Fazies.
- 6) Bildung von Abschiebungen unter N-S und NE-SW-Extension im oberen Teufenbereich und E-W-Extension im tieferen Teufenbereich (Zeolith-Fazies).
- 7) Junge Klufthbildungen während jüngster schneller Heraushebung.

Argumente für das spätvariszische Alter der präkinematischen subvertikalen Extensionsrisse (1) und der Graphitkatakklase (2) und (3) sind bereits dargelegt worden (ZULAUF 1989).

Für den älteren Teil der spröden Verformungsgeschichte läßt sich eine Drehung der größten kompressiven Hauptnormalspannung (σ_1) entgegen dem Uhrzeigersinn verfolgen. Diese Drehung reicht von den ältesten Aufschiebungen bis zu den Blattverschiebungen. Den ältesten, nur im tiefsten Teil der Bohrung vorhandenen Aufschiebungen (E-W-Einengung) folgen Aufschiebungen mit NE-SW-Einengung. Man kann dies anhand von sich überschneidenden Harnischlinearen in vielen Fällen feststellen. Auf den im tieferen Teil der Bohrung nach E fallenden Verschiebungsflächen werden "dip-slip"-Lineare (E-W-Kompression) von Schrägverschiebungslinaren (NE-SW-Einengung) überprägt. Andererseits werden die bis 3050 m vorkommenden, meist nach SW fallenden Harnischflächen mit "dip-slip"-Linearen (NE-SW-Einengung) von Schrägverschiebungslinaren (N-S-Einengung) überprägt.

Unter anhaltender N-S-Einengung wurde dann die kleinste gegen die mittlere Hauptnormalspannung vertauscht ($\sigma_3 \leftrightarrow \sigma_2$), so daß es zur Bildung von Blattverschiebungen kommen konnte. Die Blattverschiebungen sind im Umfeld der KTB-Lokation wesentlich häufiger als in der Vorbohrung. Man findet sie in Gesteinen der Erbdorfer Grünschieferzone, in der ZEV und im Falkenberger Granit. Sie sind ebenfalls polyphas und vermitteln zwischen den älteren Aufschiebungen und den jüngeren Abschiebungen (siehe hierzu MANDL 1988: 16). Daß die Blatt-

verschiebungen sowie ein Teil der Abschiebungen offensichtlich noch vor dem Tertiär entstanden sind, wurde bereits diskutiert (ZULAUF 1989).

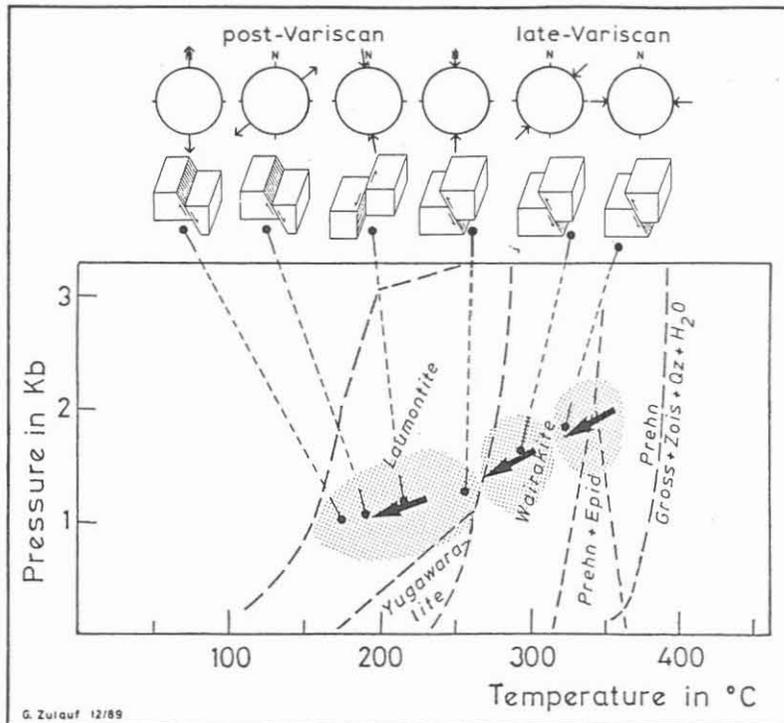


Abb. F.2.12: Beziehungen zwischen den spröden Deformationsphasen und den zugehörigen metamorphen Bedingungen. Stabilitätsfeld von Laumontit nach LIOU et al. (1987). Die Pfeile im oberen Bildteil geben bei den Auf- und Blattverschiebungen die Richtung der größten, bei den Abschiebungen die Richtung der kleinsten Hauptnormalspannung an.

F.3 Schlußfolgerung und Aussichten

Durch die kontinuierliche Erfassung der die kataklastischen Scherzonen betreffenden Daten (Raumlage von Verschiebungsflächen und -linearen, Schersinnindikatoren, Mineralisation) ist es möglich geworden, das Grundgerüst für die Rekonstruktion des sehr komplexen polyphasen spröden Deformationspfades zu erarbeiten. Die vollständige Rekonstruktion wird erst nach Abschluß der Dünnschliffuntersuchungen möglich sein.

Unter Zuhilfenahme der sehr zuverlässig erscheinenden Kernorientierungsdaten ist es möglich, die einzelnen Störungsflächen bestimmten Populationen zuzuordnen, welche ein jeweils anderes Spannungsfeld reflektieren. Sich hieraus

ergebende grundsätzliche Trends bezüglich der Lage der Paläospannungstensoren wurden bereits dargelegt. Die Darstellung im einzelnen erfolgt nach Abschluß der Arbeiten (weitestgehend vollständige Rückorientierung und numerische Paläospannungsanalyse). Für die Frage, ob unweit unterhalb der Endteufe (4000 m) die prognostizierte Grenze von ZEV zur Erbdorfer Grünschieferzone folgt (potentielles master décollement), könnten die ab 3050 m erstmals erscheinenden Aufschiebungen mit E-W-Einengung relevant sein. In der näheren Umgebung von größeren Störungen findet im allgemeinen eine merkliche Rotation der Hauptnormalspannungen statt. So beobachtet man beispielsweise im Umfeld der San Andreas Störung eine Drehung der horizontalen Spannungsrichtungen um 50 bis 60° (vgl. ZOBACK et al. 1989). In diesem Zusammenhang muß außerdem auf einen in Erbdorf (Araltankstelle) gelegenen Bauaufschluß hingewiesen werden, wo Ultrabasite (u.a. Talk-Chlorit-Schiefer) der Erbdorfer Grünschieferzone unter ESE-WNW-Einengung auf Gneise der ZEV aufgeschoben werden. In den übrigen Aufschlüssen der ZEV, der Erbdorfer Grünschieferzone sowie im Falkenberger Granit wurden hingegen nirgendwo Harnische und Störungen vorgefunden, die mit E-W bzw. ESE-WNW-Einengungen in Zusammenhang stehen.

Neben der durch röntgendiffraktometrische Analysen unterstützten makroskopischen Ansprache der Harnisch- und Störungsmineralisation werden Dünnschliffuntersuchungen zur Identifizierung der Art der Mineralisation in bezug zum jeweiligen Deformationsstadium (prä-, syn- und postkinematisch) herangezogen. Die Dünnschliffuntersuchungen sind bis zur Teufe von 3000 m fortgeschritten. Sie sind weiterhin für die Aussage wichtig, ob die Art der Verformung bezüglich der Graphitkataklase im tieferen Teil der KTB-Vorbohrung vom spröden in den spröd/duktilen Übergangsbereich wechselt. Die starke Reduktion der Scherzonenmächtigkeit (nur Graphitkataklasite) weist zusammen mit der im Dünnschliff z.T. beobachteten beginnenden Quarzrekristallisation auf zunehmende kontrollierte Rißausbreitung neben gesteigerter kristallplastischer Deformation hin. Dünnschliffuntersuchungen müssen zudem die zwischen 3600 m und 3700 m vorliegende potentielle Übergangszone Zeolith-Fazies/Prehnit-Aktinolith-Fazies näher beleuchten. Offensichtlich betrifft dieser Wechsel die jüngeren graphitfreien Aufschiebungen, die unter N-S-Einengung entstanden sind.

Eine bis zur Endteufe der KTB-Vorbohrung verfolgbare Erscheinung ist das Fehlen von Graphit in den Scherzonen der Metabasite, obwohl die zur Graphitkataklase gehörenden Störungen auch in den Metabasiten vorhanden sind.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß sich fast alle Deformationsstadien vom Beginn des Bohrloches bis zur Endteufe verfolgen lassen. Zudem hat sich gezeigt, daß mit zunehmender Teufe hinsichtlich der spröden Deformation viele Veränderungen auftreten. Mit der Hauptbohrung wird die Möglichkeit gegeben sein, diese Veränderungen mit fortgesetzter

Teufe weiter zu verfolgen, zumal die Hauptbohrung die in der nördlichen Oberpfalz reichlich vorhandenen Störungssysteme sicherlich nicht unberührt lassen wird. Die wichtigsten Fragestellungen an die Hauptbohrung bezüglich der Kataklyse und spröden Verformung sind:

- 1) Lassen sich die ab 3050 m erstmals auftretenden Aufschiebungen mit E-W-Einengung tatsächlich auf eine in fortgesetzter Teufe vorhandene Mega-Scherzone zurückführen?
- 2) Verschwindet Laumontit gänzlich auf den Scherzonen, was den angenommenen Übergang von der Zeolith-Fazies zur Prehnit-Aktinolith-Fazies (in bezug zur jüngeren aufschiebenden Deformationsphase) unterstützen würde.
- 3) Was passiert mit den graphitreichen Kataklysezonen in größerer Tiefe? Ein Übergang zu Myloniten ist aufgrund der gesteigerten Kristallplastizität von Quarz in der Hauptbohrung zu erwarten.
- 4) Trifft man in der Hauptbohrung auf einen Graphitlieferanten?

F.4 Schriftenverzeichnis

- 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.
- KOHL, J., HACKER, W., KEYSSNER, S., MÜLLER, H., RÖHR, C., SIGMUND, J., STROH, A. & TAPFER, M. (1989): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich von 2500 bis 3009.7 m: B. Geologie. - KTB Report 89-4: B1-B106, 78 Abb.; Hannover.
- LIU, J.G., MARUYAMA, S. & CHO, M. (1987): Very low-grade metamorphism of volcanic and volcanoclastic rocks - mineral assemblages and mineral facies. - in: FREY, M. (ed.): Low temperature metamorphism. - 351 S.; New York (Chapman & Hall).
- MANDL, G. (1988): Mechanics of tectonic faulting, models and basic concepts. - 407 S. (Elsevier).
- MÜLLER, H., HACKER, W., KEYSSNER, S., RÖHR, C., SIGMUND, J., KOHL, J., STROH, A. & TAPFER, M. (1989): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB 1a, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 3009,7 bis 3500 m. - KTB Report 89-5: B1 - B94; Hannover.
- PRICE, N. J. (1981): Fault and joint-development in brittle and semi-brittle rock. - 176 S.; New York (Pergamon Press).
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1983): The techniques of modern structural geology, volume 1: strain analysis. - 307 S.; London (Academic Press).
- RUTTER, E.H., MADDOCK, R.H., HALL, S.H. & WHITE, S.H. (1986): Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. - Pure and Applied Geophysics, 124: 3-30.

- SIBSON, R.H. (1977): Fault rocks and fault mechanisms. - J. geol. Soc. London, 133: 191-213.
- SIGMUND, J., KOHL, J., MÜLLER, H., HACKER, W., KEYSSNER, S., RÖHR, C., STROH, A. & TAPPER, M. (1990): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB 1a, VB 1b, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von 3500 bis 4000,1 m. - KTB Report (dieser Band).
- ZOBACK, M.L., ZOBACK, M.D., ADAMS, J., ASSUMPCAO, M., BELL, S., BERGMAN, E.A., BLÜMLING, P., BRERETON, N.R., DING, J., FUCHS, K., GAY, N., GREGERSEN, S., GUPTA, H.K., GVISHIANI, A., JACOB, K., KLEIN, R., KNOLL, P., MAGEE, M., MERCIER, J.L., MÜLLER, B.C., PAQUIN, C., RAJENDRAN, K., STEPHANSSON, O., SUAREZ, G., SUTER, M., UDIAS, A., XU, Z.H. & ZHIZHIN, M. (1989): Global patterns of tectonic stress. - Nature, 341: 291-298.
- ZULAUF, G. (1989): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Bruchtektonik im Teufenbereich von 1530 bis 2500 m: E. Ergänzende Untersuchungen. - KTB Report, 89-4: E1-E22, 11 Abb.; Hannover.
- ZULAUF, G. & KOHL, J. (1989): Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Bruchtektonik im Teufenbereich von 1177 bis 1530 m. - KTB Report, 89-2: E1-E14; Hannover.

F.5 Danksagung

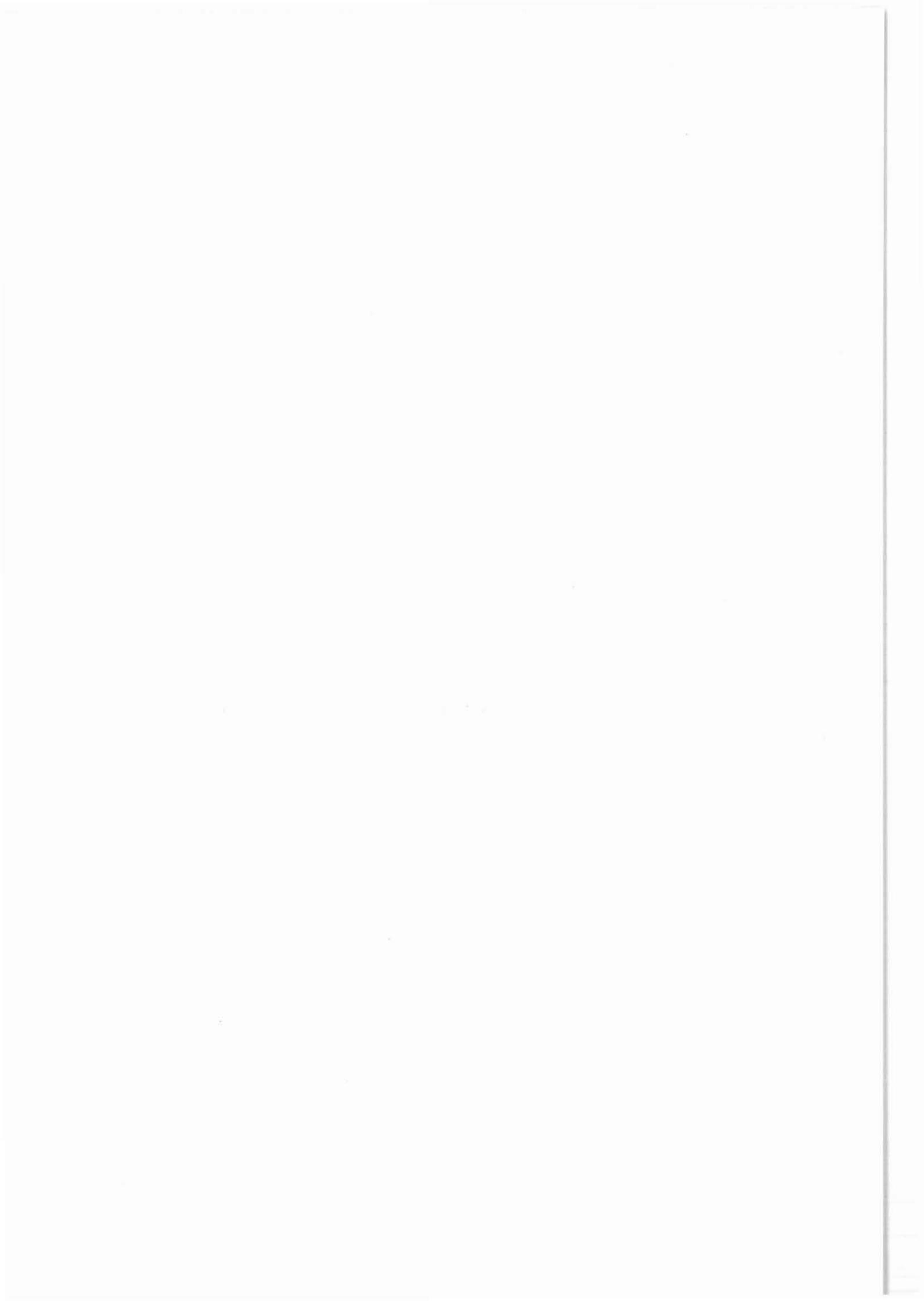
Ich danke der Arbeitsgruppe Geochemie im KTB-Feldlabor für die röntgendiffraktometrische Bestimmung der Harnischminerale. Ein Teil der Messdaten aus dem Teufenbereich von 3000 bis 3893 m wurde mir von der Arbeitsgruppe Geologie/Petrologie im KTB-Feldlabor überlassen, wofür ich mich ebenfalls herzlich bedanke.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung (A.Z.: Kl 429/7-2).

G. Kernorientierung in der KTB-VB
- aktueller Stand -

KTB Oberpfalz VB1a
Ergebnisse der geowissenschaftlichen
Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor

J. Kohl
D. Schmitz
C. Röhr



KTB-Report	90-2	G1 - G5	2 Tab.	Hannover 1990
------------	------	---------	--------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB1a, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor

G. Kernorientierung in der KTB-VB - aktueller Stand

J. Kohl*, D. Schmitz** und C. Röhr*

Von 576.80 - 1292.71 m sowie von 3002.20 - 3503.3 m sind die Kerne inzwischen nach der "indirekten" Methode kontinuierlich orientiert (vgl. SCHMITZ et al. 1989).

Außerdem wurden insgesamt 13 Kernmärsche zwischen 2256.2 m und 3715.8 m "direkt" orientiert gebohrt (vgl. KESSELS 1988), von denen 9 Kernmärsche auswertbare Daten lieferten.

Die Ergebnisse der indirekten Methode sind in Tab. G.1, die der direkten Methode in Tab. G.2 aufgeführt. Der Azimut der Feldlabor-Referenzlinie ist in dem jeweils angegebenen Kernstück- bzw. Teufenintervall gültig. Es ist zu beachten, daß die hier angegebenen Bohrmeisterteufen nach wie vor unkorrigiert sind. Eine eindeutige Probenzuordnung muß deshalb mit der Bohrmeisterteufe und der Kernstück-Nummer erfolgen.

Die Zuverlässigkeit der direkten Methode wurde inzwischen anhand der Formation Micro Scanner Tool-Logs (FMST) überprüft. Für die anpaßbaren Strecken der orientierten Kernmärsche 712, 785, 802 und 806, die detailliert überprüft wurden, kann eine insgesamt gute Übereinstimmung festgestellt werden, wenn man die Meß- und Ablesefehler beider Methoden, die sich im ungünstigsten Fall zu etwa 30° addieren können, berücksichtigt (Mitt. Hirschmann, Hannover).

Ausnahmen stellen die Kernstrecken der orientierten Kernmärsche 656 und 773 dar. Bei generell ähnlichem Kurvenverlauf sind die Meßwerte um 180° bzw. 165° gedreht. Die Ursache dieser Unstimmigkeit ist bisher nicht bekannt; es wird kein Azimut angegeben.

Berichtigung zum KTB-Report 89-5, Tab.G.2:

Der anpaßbare Bereich des Kernmarsches 837 erstreckt sich von Kernstück 838Ala bis Kernstück 839Fln und nicht wie angegeben bis Kernstück 840GlP. Der Azimut des direkt orientierten Kernmarsches 773 weicht von der sichereren indirekten Auswertung ab (s.o.). Der in Tab.G.1 angegebene Wert ist korrekt.

Anschrift der Verfasser: * KTB-Feldlabor,
8486 Windischeschenbach
** DMT, 4630 Bochum

Tab. G.1: Nach der indirekten Methode N-orientierte Bohrkernbereiche (Daten von Schmitz, DMT Bochum); der Azimut der Referenzlinie ist jeweils für den Bereich zwischen dem angegebenen obersten (ersten) und untersten (letzten) Kernstück gültig. In den nicht aufgeführten Zwischenbereichen ist aufgrund von Kernverlust oder stark zerbrochenem Kern keine Orientierung möglich:

Erstes Kernstück	Letztes Kernstück	Obere unkorrig. Teufe	Untere Teufe	Azimut Referenzlinie	(±σ)
108A	- 108D	576.80	- 579.30	290	20
109F	- 109H	586.07	- 588.01	204	13
110	- 110	588.42	- 593.77	26	15
111	- 112C	594.40	- 600.59	200	12
113D	- 113F	604.62	- 607.80	208	8
114A	- 114D	607.18	- 609.10	293	22
114E	- 114F	609.61	- 610.50	350	10
115A	- 115A	610.00	- 610.87	278	4
115B	- 115B	610.87	- 611.37	235	7
116	- 116	612.06	- 616.39	124	9
117A	- 117E	616.70	- 620.55	354	14
117F	- 117I	620.51	- 622.70	8	10
118	- 118	622.70	- 628.50	282	13
119	- 120	628.68	- 634.52	168	10
121	- 123	634.50	- 639.45	42	9
124	- 124	640.00	- 642.90	211	15
125	- 126	643.04	- 651.96	111	9
127A	- 127A	652.50	- 653.40	139	0
127B	- 129	653.22	- 667.84	112	10
130	- 131C	668.00	- 674.63	308	16
131D	- 131D	674.63	- 675.21	310	0
132A	- 134C	675.40	- 680.66	109	0
134D	- 134F9	680.87	- 682.44	84	5
134F9b	- 134G	682.41	- 684.18	55	6
135	- 135	684.60	- 689.36	111	8
136	- 138	689.90	- 703.26	105	15
139	- 140	703.80	- 706.90	120	7
141	- 143A	706.90	- 716.73	109	11
143B	- 143C	716.66	- 718.29	94	5
143E	- 143E	718.81	- 719.77	77	6
143F	- 145C	719.74	- 725.87	108	12
145D	- 146A	725.81	- 727.86	87	6
146B	- 146C	727.84	- 728.98	58	10
146D	- 146D	728.92	- 729.65	110	0
146E	- 147D	729.65	- 733.23	127	8
147E	- 148	733.15	- 740.18	108	10
149	- 154B	740.64	- 763.71	104	11
154C	- 154C	763.71	- 764.48	80	7
154D	- 156	764.48	- 768.74	115	6
157	- 160	770.47	- 778.63	129	8
161	- 161	779.00	- 782.00	304	12
162A	- 162C	782.00	- 783.91	138	4
162D	- 163	783.81	- 789.19	110	12
164	- 164	789.20	- 792.77	130	4

Erstes Kernstück	Letztes	Obere unkorrig.	Untere Teufe	Azimet Referenzlinie	($\pm\sigma$)
165	- 170	792.90	- 807.76	107	11
171	- 172B	808.11	- 811.67	112	9
172C	- 173A	811.47	- 813.05	92	11
173B	- 173B	813.05	- 813.99	83	6
173C	- 173C	813.99	- 814.60	50	0
174	- 187D	814.50	- 841.58	111	9
187E	- 187F	841.57	- 842.97	76	9
188	- 195	843.33	- 863.55	111	11
196	- 199A	864.50	- 869.27	127	9
199B	- 202	869.27	- 876.77	115	11
203	- 204	876.90	- 882.30	137	12
205	- 207	882.50	- 890.00	105	10
210	- 216A	890.00	- 908.69	118	11
216B	- 216B	908.62	- 909.51	132	7
216C	- 233	909.41	- 941.12	116	10
234	- 235	941.38	- 946.40	131	10
236	- 238	946.34	- 952.31	120	13
239A	- 239A	952.30	- 953.24	135	5
239B	- 240	953.19	- 961.60	118	11
241	- 243B	961.40	- 967.92	133	13
243B	- 246	968.63	- 979.15	115	10
247	- 247	979.40	- 981.50	144	6
248A	- 248A	981.47	- 982.17	111	5
248B	- 249	982.16	- 986.64	137	6
250	- 252	986.90	- 991.82	118	6
253A	- 253H	1177.00	- 1183.00	304	23
254A	- 255D	1228.80	- 1232.40	315	15
256A	- 256J	1232.40	- 1238.40	277	11
257A	- 257F	1238.40	- 1242.06	359	9
257G	- 257H	1243.00	- 1243.50	300	10
258A	- 259A	1244.20	- 1245.50	340	14
260A	- 262A	1245.50	- 1251.76	300	14
262B	- 262G	1252.00	- 1256.28	110	19
262H	- 262I	1256.28	- 1267.60	350	0
263B	- 263B	1258.40	- 1259.30	325	7
263C	- 263I	1259.22	- 1263.20	11	19
264A	- 264C	1263.60	- 1265.67	120	17
264D	- 264H	1265.86	- 1269.60	159	11
265A	- 265B	1269.60	- 1270.73	137	6
265D	- 265G	1271.19	- 1273.92	265	12
265H	- 266H	1273.92	- 1281.55	349	14
267A	- 267G	1281.60	- 1286.65	115	8
268A	- 268B	1286.65	- 1287.94	263	6
268C	- 268I	1287.97	- 1292.71	319	14
734A01a	- 735B01c	3002.20	- 3003.49	122	9
736A01a	- 738C04h	3003.60	- 3014.95	112	10
739A01a	- 740H01y	3013.45	- 3026.78	138	10
741A01a	- 744G01w	3026.75	- 3048.02	118	13
745A01a	- 745G01ak	3048.40	- 3053.90	314	11
746A02b	- 749C03g	3054.60	- 3063.40	343	13
751A1a	- 751B	3063.70	- 3065.50	328	10

Erstes Kernstück	Letztes	Obere unkorrig.	Untere Teufe	Azimut Referenzlinie	(<u>±</u>) o
751C	- 751F	3065.54	- 3068.27	132	10
752A01a	- 752H02b	3068.25	- 3074.32	141	11
753A01a	- 756H01ao	3074.30	- 3092.30	344	13
757A01a	- 758G01ad	3092.36	- 3102.62	178	15
759A01a	- 760A02a	3102.70	- 3108.00	1	12
760B02b	- 760F02r	3108.76	- 3112.80	94	16
761A06a	- 762G12r	3112.97	- 3122.39	294	18
763A02a	- 763F02t	3122.65	- 3126.95	195	12
763G02u	- 764C01j	3127.26	- 3129.89	241	12
764C01k	- 764H01ag	3129.89	- 3134.16	42	15
765A01a	- 765H01aa	3134.15	- 3140.20	253	14
767A03a	- 767H03ab	3140.50	- 3146.17	357	12
768A01a	- 768A01a	3146.20	- 3146.45	210	14
769A03a	- 769D03l	3146.51	- 3149.06	331	17
769D03m	- 769H03ak	3149.06	- 3152.11	279	13
770A01a	- 770E01ag	3152.10	- 3156.03	14	14
771A01c	- 771B01s	3155.97	- 3157.23	50	20
773A02a	- 775B02e	3162.72	- 3171.50	332	11
776A01a	- 776G01ad	3171.60	- 3177.40	175	15
777A01a	- 778A01e	3177.40	- 3182.68	296	10
778B07a	- 781H01ag	3183.18	- 3199.03	351	13
782A3a	- 782B3d	3199.98	- 3200.40	152	13
783A6a	- 783F6bl	3203.29	- 3208.33	120	10
784A2a	- 784G2ab	3208.62	- 3214.16	337	10
785A3a	- 785G	3214.26	- 3220.00	56	12
786A	- 787E1t	3220.20	- 3226.80	121	15
788A1a	- 788G1an	3226.80	- 3232.75	134	12
789A1a	- 789G	3232.60	- 3238.40	33	11
790A	- 790H1ad	3238.40	- 3243.72	16	14
791A5a	- 791C5k	3244.37	- 3246.09	0	11
791D	- 791D	3246.20	- 3246.61	150	0
792A2a	- 794E1ac	3246.70	- 3259.70	325	13
795A1a	- 799G1ax	3259.70	- 3279.99	342	15
800A1b	- 804G1ae	3280.00	- 3302.45	357	10
805A5a	- 810E	3302.48	- 3330.90	2	9
811A	- 815G1ad	3330.90	- 3353.23	356	9
816A1a	- 817B1fd	3353.80	- 3357.40	321	10
818A1a	- 820A1f	3357.40	- 3362.63	6	9
821A3a	- 824H1ad	3362.82	- 3382.84	332	10
825A1a	- 825F1v	3382.80	- 3386.92	4	9
826A1a	- 826D2l	3387.46	- 3389.93	191	18
827A4a	- 827G4o	3390.26	- 3395.00	333	13
828A1a	- 830H1af	3395.30	- 3406.45	22	13
831A3a	- 837G1z	3406.65	- 3429.02	0	11
838A1a	- 839F1n	3429.00	- 3433.71	38	10
840A1a	- 841A1e	3433.90	- 3439.85	327	13
842A1a	- 843G1af	3440.00	- 3450.76	79	15
843G1ah	- 844E1nf	3450.85	- 3454.85	155	14
845A1a	- 846G1y	3455.00	- 3464.19	3	10
847A1a	- 847G1av	3464.60	- 3470.07	75	10
848A1a	- 848F1u	3470.10	- 3475.43	46	9
848F1v	- 851A1c	3475.43	- 3478.00	269	17

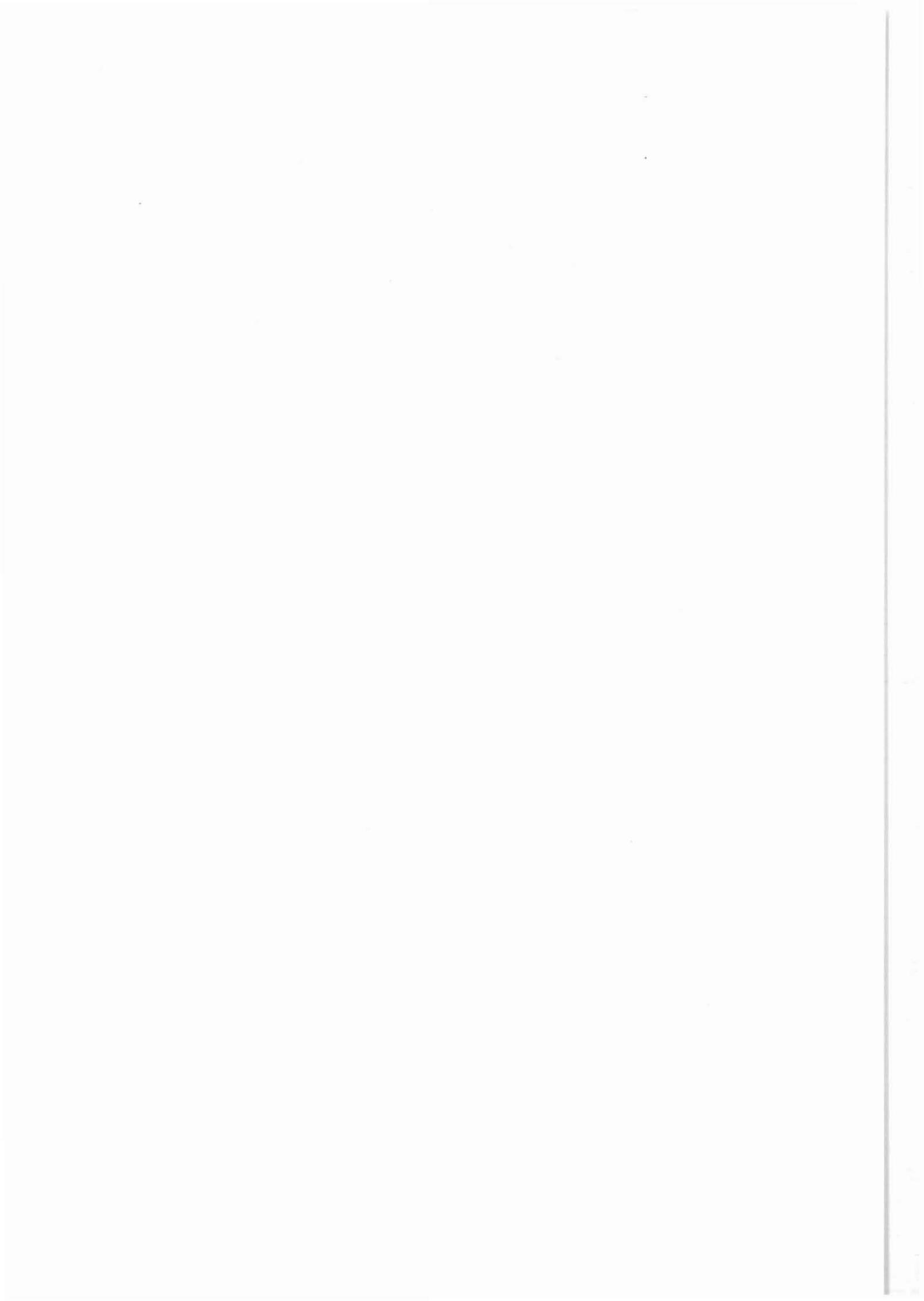
Erstes Kernstück	Letztes	Obere unkorrig. Teufe	Untere Teufe	Azimet Referenzlinie	(<u>±</u> o)
851A2b	- 853D2ab	3478.10	- 3489.82	44	10
854A2a	- 854G2ag	3489.90	- 3494.78	66	14
855A2a	- 856H	3495.30	- 3503.30	20	9

Tab. G.2: Nach der direkten Methode N-orientierte Bohrkernbereiche; der Azimet der Referenzlinie ist jeweils für den Bereich zwischen dem angegebenen obersten (ersten) und untersten (letzten) Kernstück gültig. Diese orientierten Bereiche umfassen in der Regel durch Anpassen darüber bzw. darunter liegender Kernstrecken größere Teufenbereiche als der in der Spalte Kernmarsch angegebene, eigentliche orientiert gebohrte Kernmarsch. ¹⁾ jeweils geringfügiger Versatz in der Referenzlinie, ²⁾ Bereich über Ausrichtung der Foliation anpaßbar:

Erstes Kernstück	Letztes	Obere unkorrig. Teufe	Untere Teufe	Azimet Referenzlinie	Kern- marsch
709A2b	- 715B1e	2888.30	- 2917.63	102	712
785A3a	- 786A1a	3214.26	- 3220.04	61	785
799G3a	- 804G1ae	3280.09	- 3302.45	344	802
806A1a	- 807D1g	3305.18	- 3313.43	19	806
807E1h	- 808C1l	3313.38	- 3318.22	24	806 ¹
808C1nK	- 815G1ad	3318.22	- 3353.45	20	806 ¹
835A1a	- 837G1z	3416.45	- 3429.02	9	837
838A1a	- 839F1n	3429.00	- 3438.94	49	837 ²
859A2a	- 860A1a	3512.26	- 3516.77	63	860
860A1b	- 860A1c	3516.76	- 3516.95	75	860 ¹
907G2a	- 911H1az	3699.30	- 3721.17	206	910

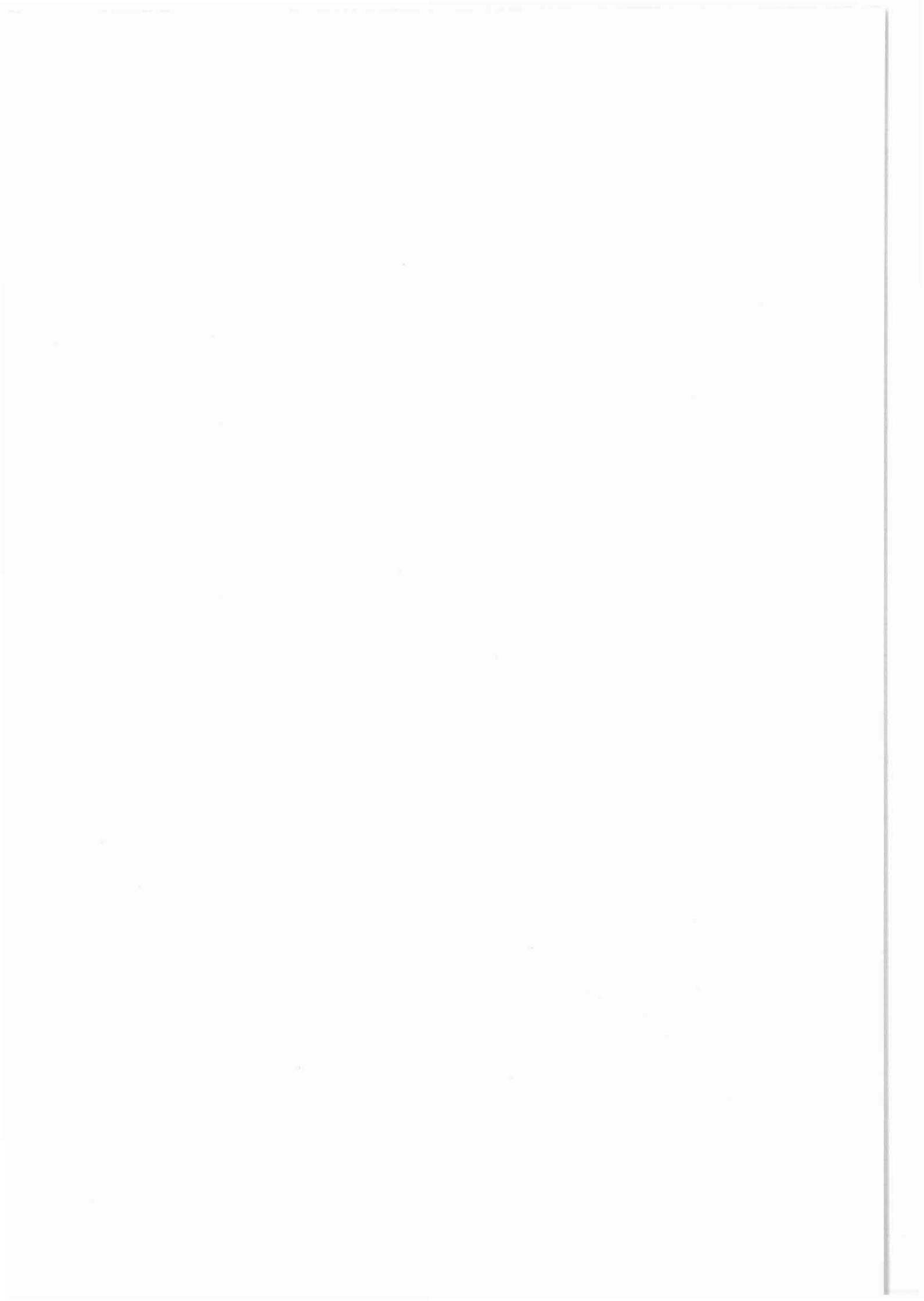
KESSELS, W. (1988): Die orientierte Kernentnahme unter Verwendung eines Neigungs- und Richtungsrekorders am Innenkernrohr. - In: DRAXLER, J.K. und Hänel, R. (Hrsg.): KTB Report 88-7: 157-161.

SCHMITZ, D., HIRSCHMANN, G., KOHL, J., RÖHR, C. & DIETRICH, H.-G. (1989): Die Orientierung der Bohrkern in der KTB-Vorbohrung. In: EMMERMANN, R. und GIESE, P. (Hrsg.): KTB-Report 89-3, 100-110.



H. Sedimentrohr-Proben
in der KTB-Vorbohrung VB1b

J. Sigmund
H.-G. Dietrich



KTB-Report	90-2	H1-H9	12 Abb.	Hannover 1990
------------	------	-------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich: 3500 - 4000.1 m

H. Sedimentrohr-Proben in der KTB-Vorbohrung VB1b

Sigmund, J. & Dietrich, H.-G. *

In der KTB-Vorbohrung VB1b wurde ab 3824.2 m ein Sedimentrohr (Abb.H.1) zur Bergung von Bohrwerkzeugresten (Abb.H.2, Tab.H.1) eingesetzt. Zusätzlich konnten mit diesem Gerät Gesteinsbruchstücke (siehe Tab.H.1) gewonnen werden. Die Bearbeitung und Analyse dieser Gesteinsbruchstücke erfolgt analog zur Cuttingsanalyse (siehe Sigmund et al. 1990). Dabei bilden die kontinuierlich am Schüttelsieb genommenen Cuttingsproben die Grundlage für das geologische Detailprofil, während die Probenahmen mit dem Sedimentrohr eine "kumulative" Beprobung darstellen. Die aus dem jeweiligen Bohrloch-tiefsten stammenden Sedimentrohr-Proben liefern aufgrund ihrer Größe von z.T. über 4 cm (Abb.H.3 - H.8) gegenüber den Cuttingsproben (max. Korngröße einige mm) zusätzliche Informationen über die erbohrten Gesteine.

Zur Abschätzung der mittleren Korngröße wurden bei den Proben aus dem Teufenbereich 3832.1 bis 3927.6 m, die im wesentlichen nur größere Gesteinsbruchstücke enthielten, die größte und kleinste Achse vermessen. Daraus ergibt sich, daß die durchschnittliche Korngröße zwischen 1.29 und 1.62 cm variiert. Der Median der Kornsummenkurven erreicht Werte von 1.05 bis 1.30 cm. In den untersten, nicht im Detail vermessenen Proben nimmt die durchschnittliche Korngröße bei gleichzeitiger Zunahme der absoluten Probenmenge (Tab.H.1) deutlich ab (vergleiche Abb.H.6 u. H.8).

*) Adresse der Autoren: KTB-Feldlabor
Postfach 67
D-8486 Windischeschenbach

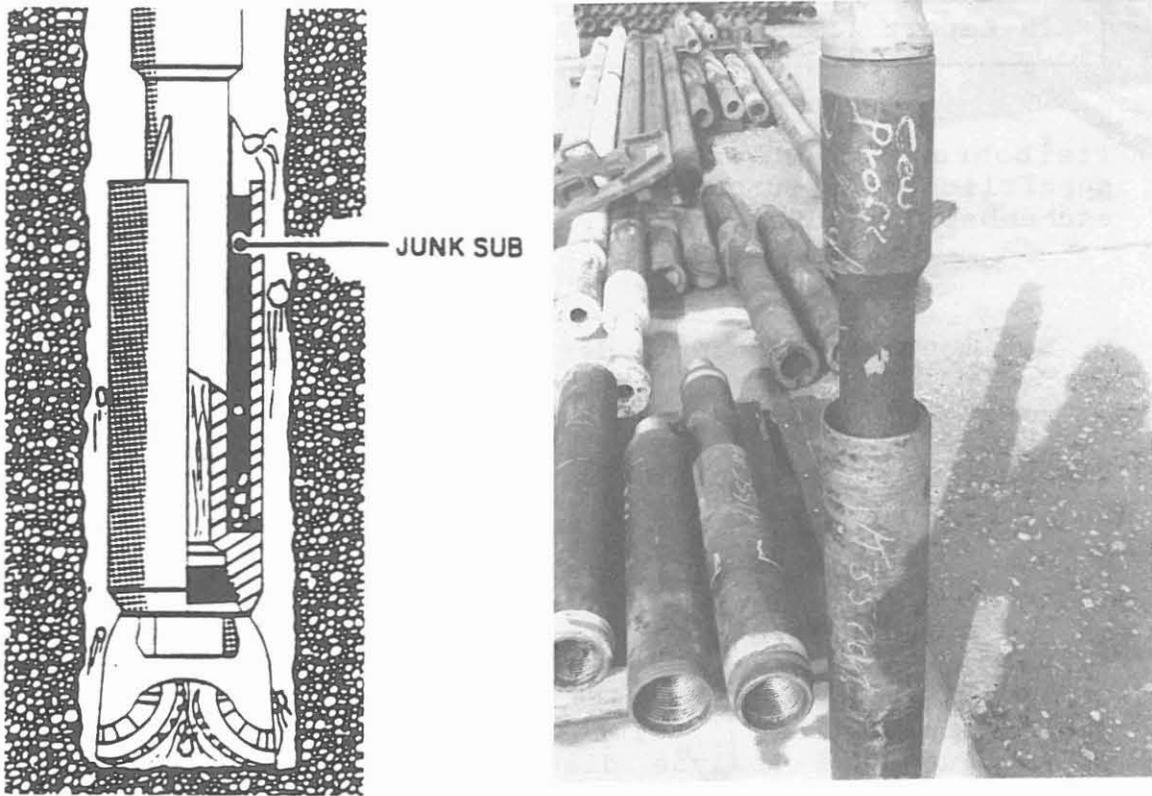


Abb.H.1: Schema (links - aus Whittaker 1985) und Foto (rechts) des verwendeten Sedimentrohres.

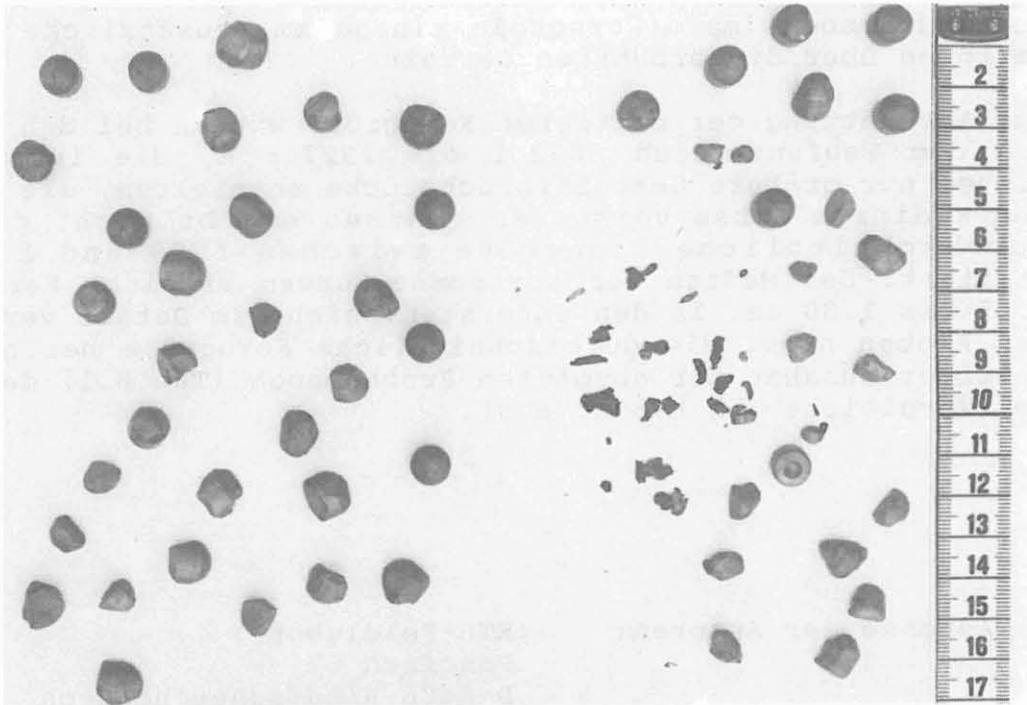


Abb.H.2: Bohrwerkzeugreste von einem Rollenmeißel aus Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3895.5 - 3907.9 m.

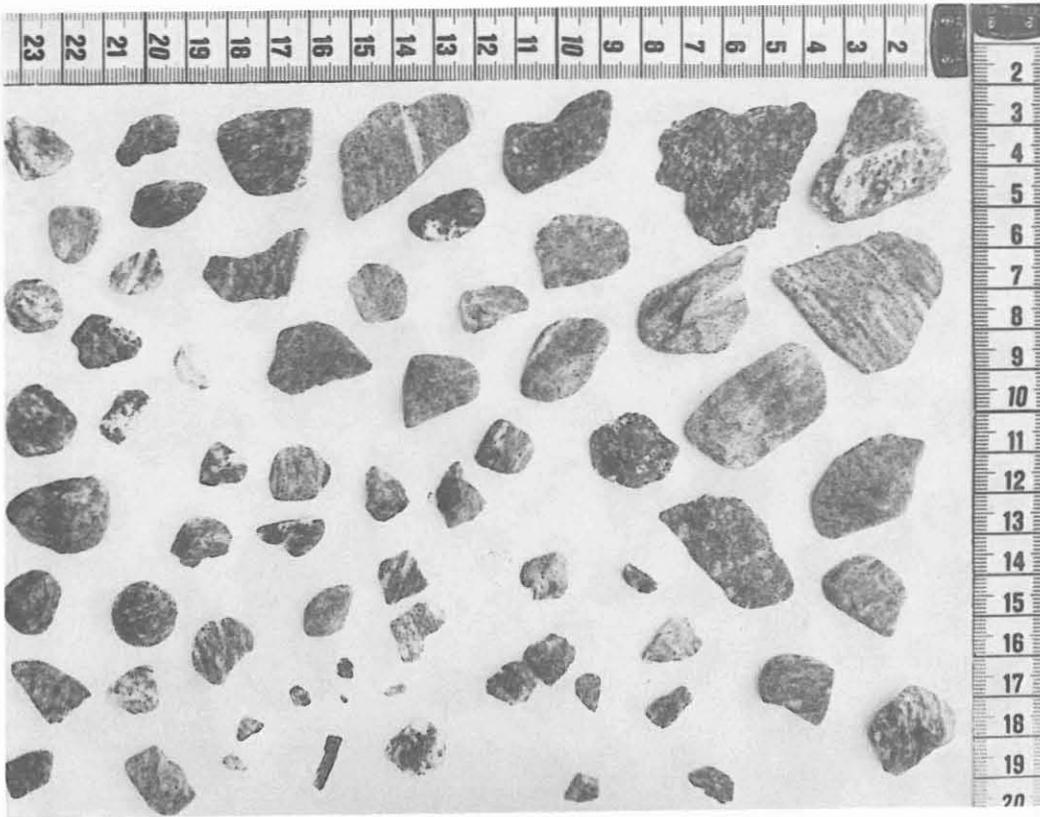


Abb.H.3: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3832.1 - 3843.6 m.

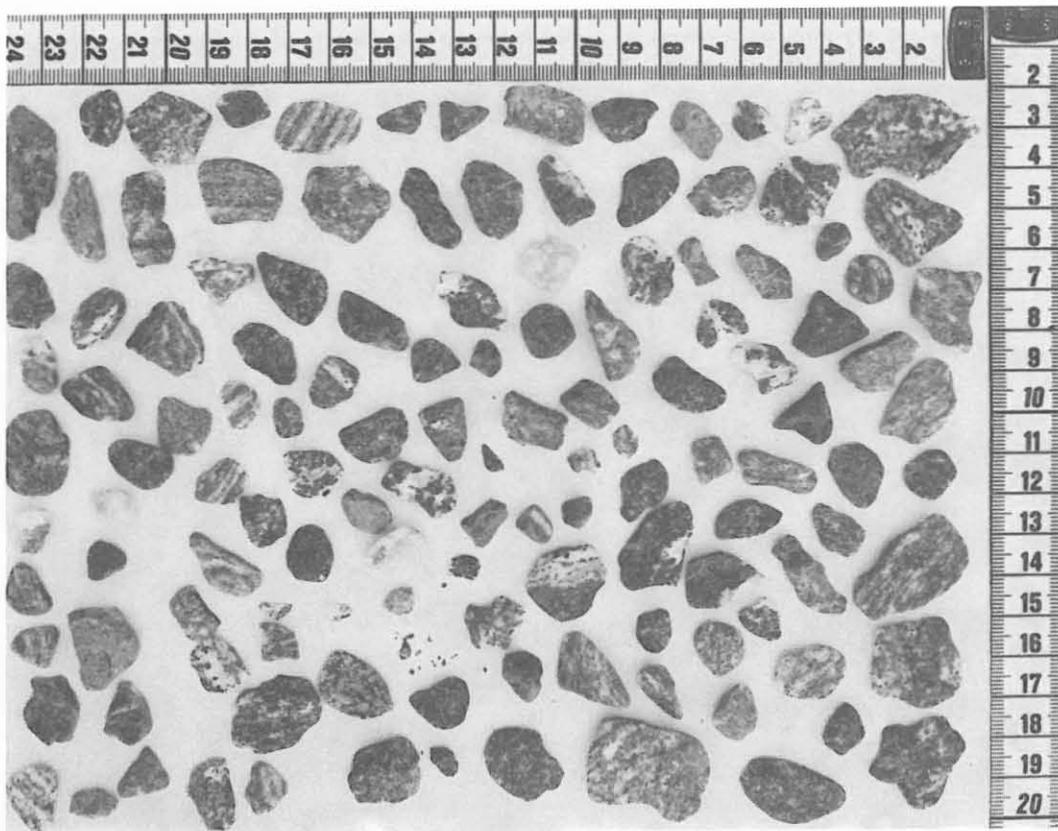


Abb.H.4: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3843.6 - 3855.8 m.

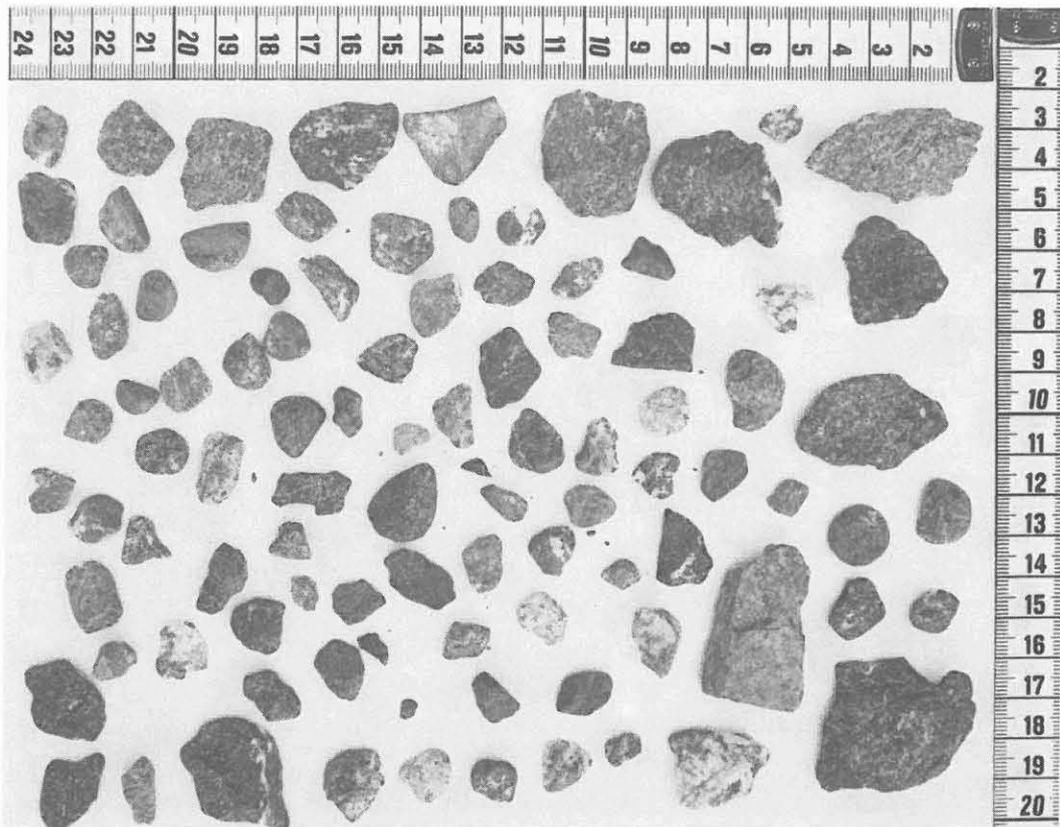


Abb.H.5: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3855.8 - 3871.0 m.

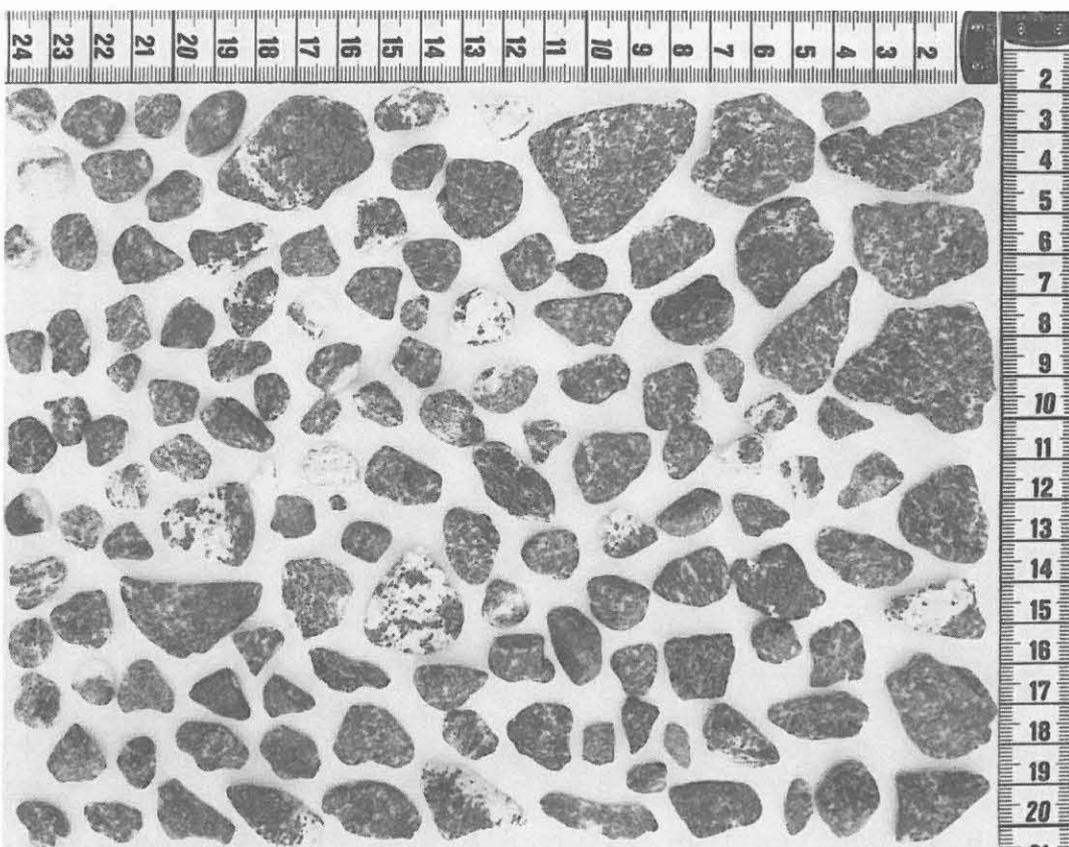


Abb.H.6: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3895.5 - 3907.9 m.

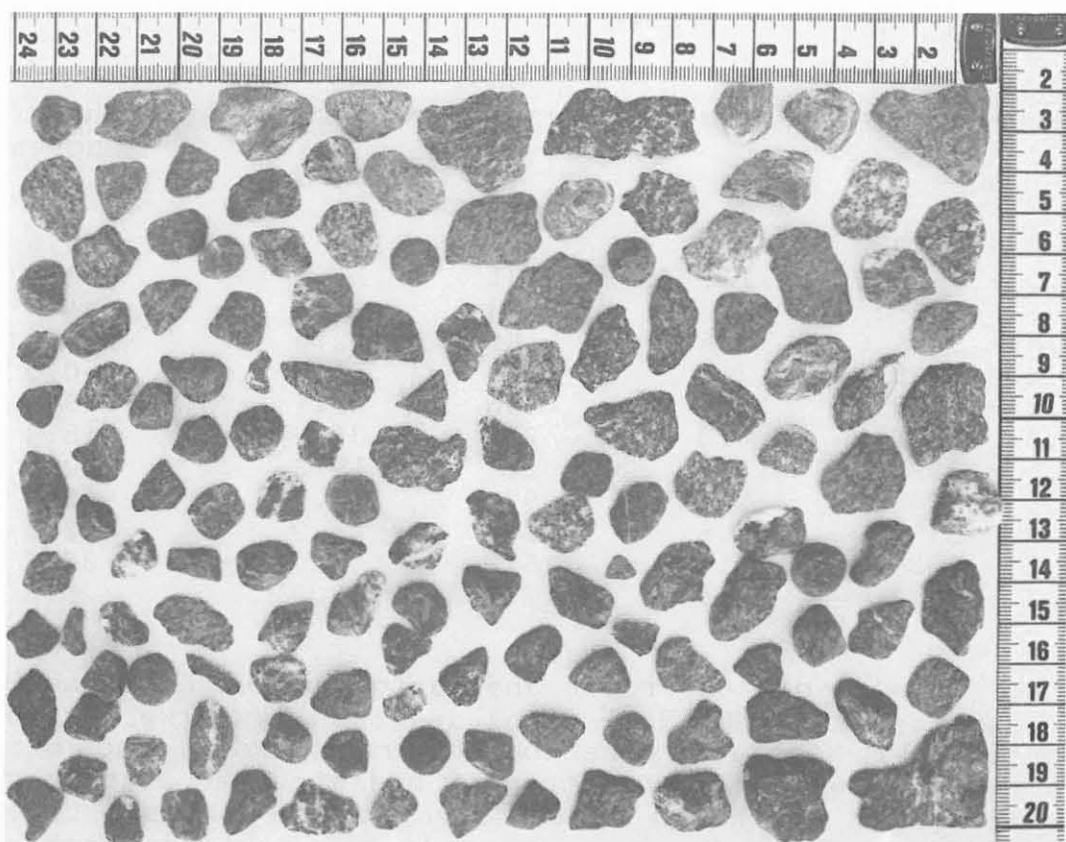


Abb.H.7: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3914.6 - 3927.6 m.

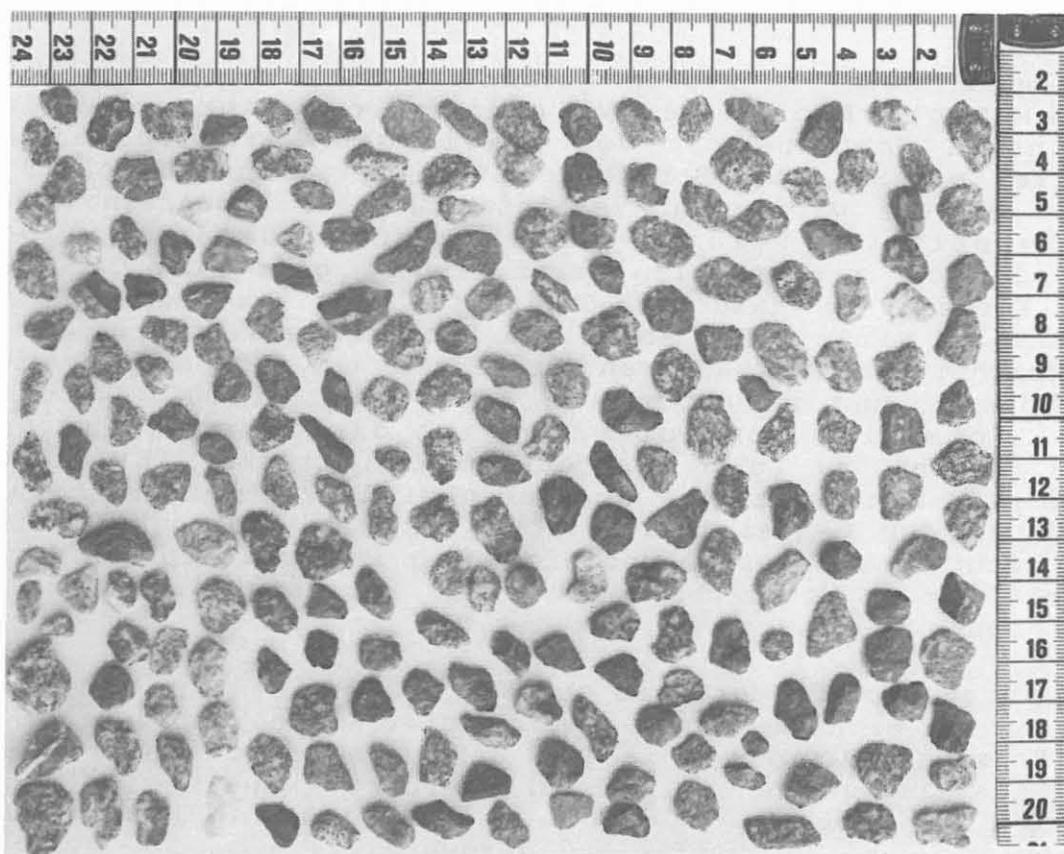


Abb.H.8: Sedimentrohr-Probe KTB VB1b 3989.6 - 3997.5 m.

Tab.H.1: Sedimentrohr-Proben

Teufenbereich	Länge	Gesteinsbruchstücke		Bohrwerk- zeugreste
m	m	g	g/m	g
3824.2 - 3824.4	0.2	-	-	44.6
3832.1 - 3843.6	11.5	131	11.4	58.5
3843.6 - 3855.8	12.2	174	14.3	-
3855.8 - 3871.0	15.2	182	12.0	-
3877.4 - 3895.2	17.8	83	4.7	50.3
3895.2 - 3907.8	12.6	266	21.1	288.1
3907.8 - 3914.6	6.8	258	38.0	15.4
3914.6 - 3927.6	13.0	247	19.0	20.8
3947.0 - 3949.6	2.6	978	376.1	29.3
3949.6 - 3963.2	13.6	1182	86.9	12.8
3963.2 - 3989.4	26.2	1679	64.0	80.2
3989.4 - 3997.9	8.5	1258	148.0	25.8

Nachfall kann in diesen Proben aber aufgrund der Konstruktion des Sedimentrohres (Abb.H.1) nicht ausgeschlossen werden. Die eindeutig als Nachfall erkennbaren Bruchstücke sind meist grobkörniger, weniger kantengerundet und nicht so plattig wie die tatsächlich erbohrten Gesteinsbruchstücke. Dieser Unterschied läßt sich durch eine geringere bis fehlende mechanische Beanspruchung des Nachfalls erklären, wenn sich z.B. beim Ausbau des Gestänges Gesteinsbruchstücke von der Bohrlochwand lösen und in das Sedimentrohr gelangen.

Zur Abschätzung des realen Nachfallanteils wurden von vier Sedimentrohr-Proben der VB1b die Gewichtsprozentage der gewonnenen Gesteine mit der jeweiligen Kernstrecke des parallel verlaufenden Bohrloches VB1a verglichen (Abb.H.9 - H.12). Hierbei wurden zur Vereinfachung der Auswertung bei der Kernstrecke Volumen-Prozentage zugrunde gelegt. Der Vergleich der prozentualen Darstellung ergibt eine durchweg gute Korrelation zwischen Sedimentrohr-Strecke (VB1b) und Kernstrecke (VB1a). Der Anteil an Nachfall aus höheren Bohrlochabschnitten mit anderen Gesteinen und Lithologien ist meist gering und beträgt max. 5 % (z. B. Abb.H.10 - GNT-BIO-GNS). Schwierig und aufwendig ist die Abschätzung des Mobilisatgehaltes in der erbohrten Kernstrecke (VB1a), der daher hier nur qualitativ angegeben wird. Die Ansprache und Zuordnung der Gesteinsbruchstücke aus dem Sedimentrohr ist dann nicht immer einfach und eindeutig im Vergleich zum Kernmaterial (z.B. Metagabbro), wenn die Bruchstücke z.B. nicht groß genug sind.

Im unteren Bereich der VB1b ab 3895.2 m konnten die Sedimentrohr-Proben nicht mehr mit Kernmaterial korreliert werden, da der Bohrungsabschnitt VB1a bei 3893.0 m endet. Daher wurde nur eine Komponentenanalyse durchgeführt, soweit die Lithologie dies erlaubte, d. h. nicht zu homogen war. Die Ergebnisse sind in Tabelle H.2 dargestellt.

Abb.H.10: Vergleich der Lithologie von Sedimentrohr VB1b und Kernstrecke Vb1a im Teufenbereich 3843.6 - 3855.8 m.

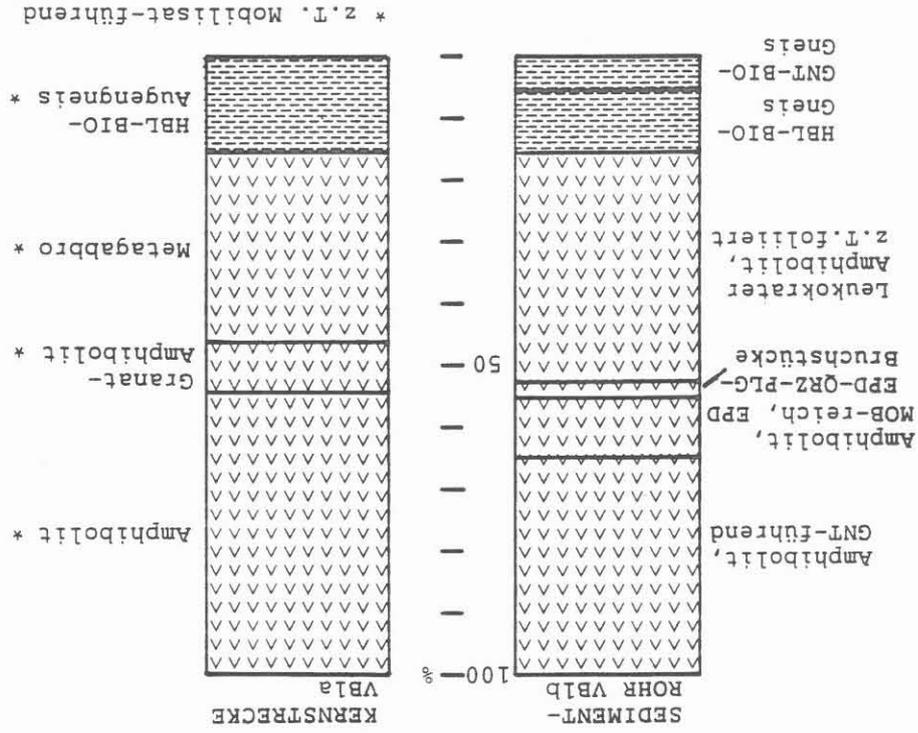


Abb.H.9: Vergleich der Lithologie von Sedimentrohr VB1b und Kernstrecke Vb1a im Teufenbereich 3832.1 - 3843.6 m.

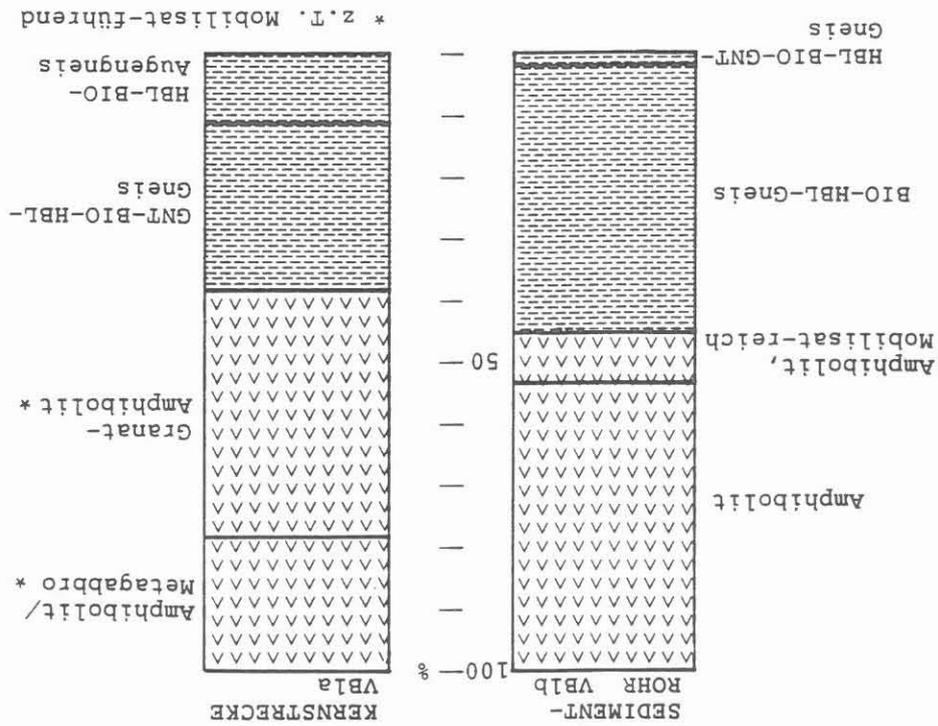


Abb.H.12: Vergleich der Lithologie von Sedimentrohr VB1b und Kernstrecke Vb1a im Tiefenbereich 3877.4 - 3895.2 m.

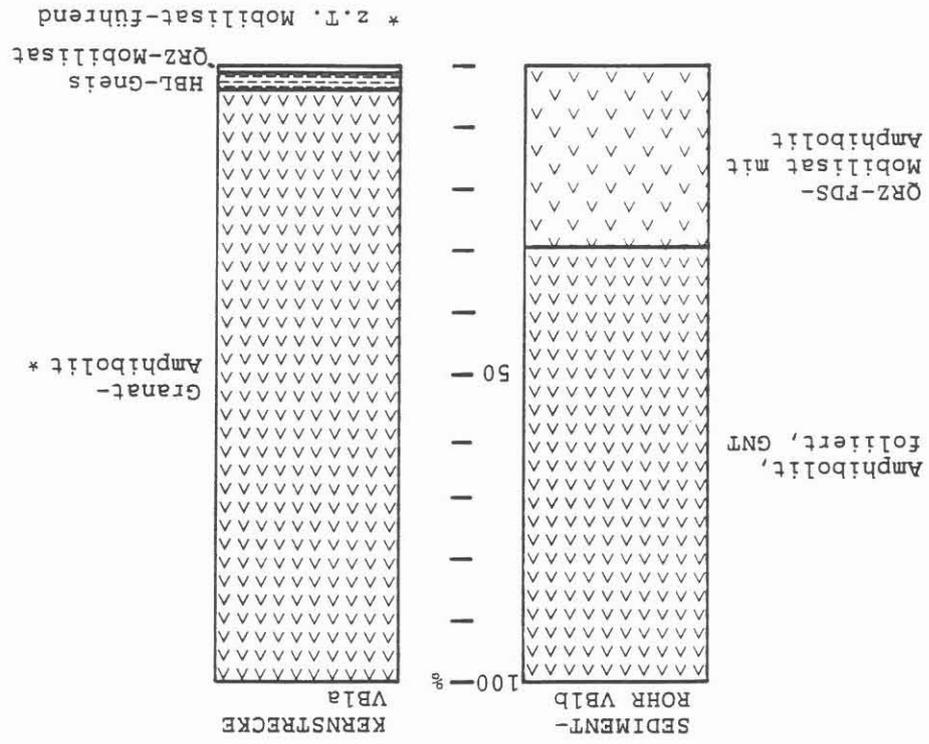
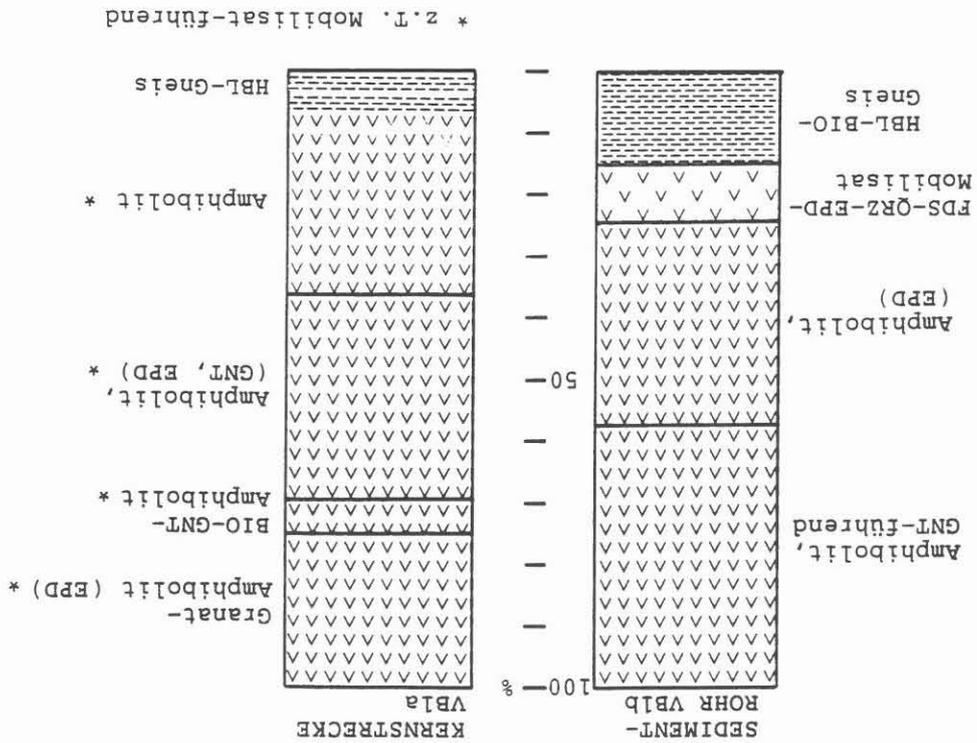


Abb.H.11: Vergleich der Lithologie von Sedimentrohr VB1b und Kernstrecke Vb1a im Tiefenbereich 3855.8 - 3871.0 m.



Tab.H.2: Grobfraktion (> 5 mm) der Sedimentrohr-Proben von 3895.2 - 3997.9 m.

3895.2 - 3907.8 m

Amphibolit, wechselnde Granat-Gehalte ----- 84.5 %
Quarz-Feldspat-Mobilisate im Amphibolit ----- 15.5 %

3907.8 - 3914.6 m

Amphibolit ----- 74.2 %
Mobilisate in Amphibolit ----- 13.2 %
Leukokrate, foliierte Amphibolite u. Hornblendegneise 12.6 %

3914.6 - 3927.6 m

Amphibolit mit wechselnden Granat-Gehalten ----- 74.1 %
Leukokrater Granat-Amphibolit ----- 5.1 %
Mobilisat-reicher Amphibolit ----- 20.8 %

3947.0 - 3949.6 m

Amphibolit mit wechselnden Granat-Gehalten ----- 66.5 %
Quarz-Feldspat-Epidot-Mobilisate in Amphibolit ----- 8.5 %
Biotit-Gneis (Nachfall) ----- 25.0 %

3949.6 - 3963.2 m

Amphibolit mit wenigen Mobilisaten

3963.2 - 3989.4 m

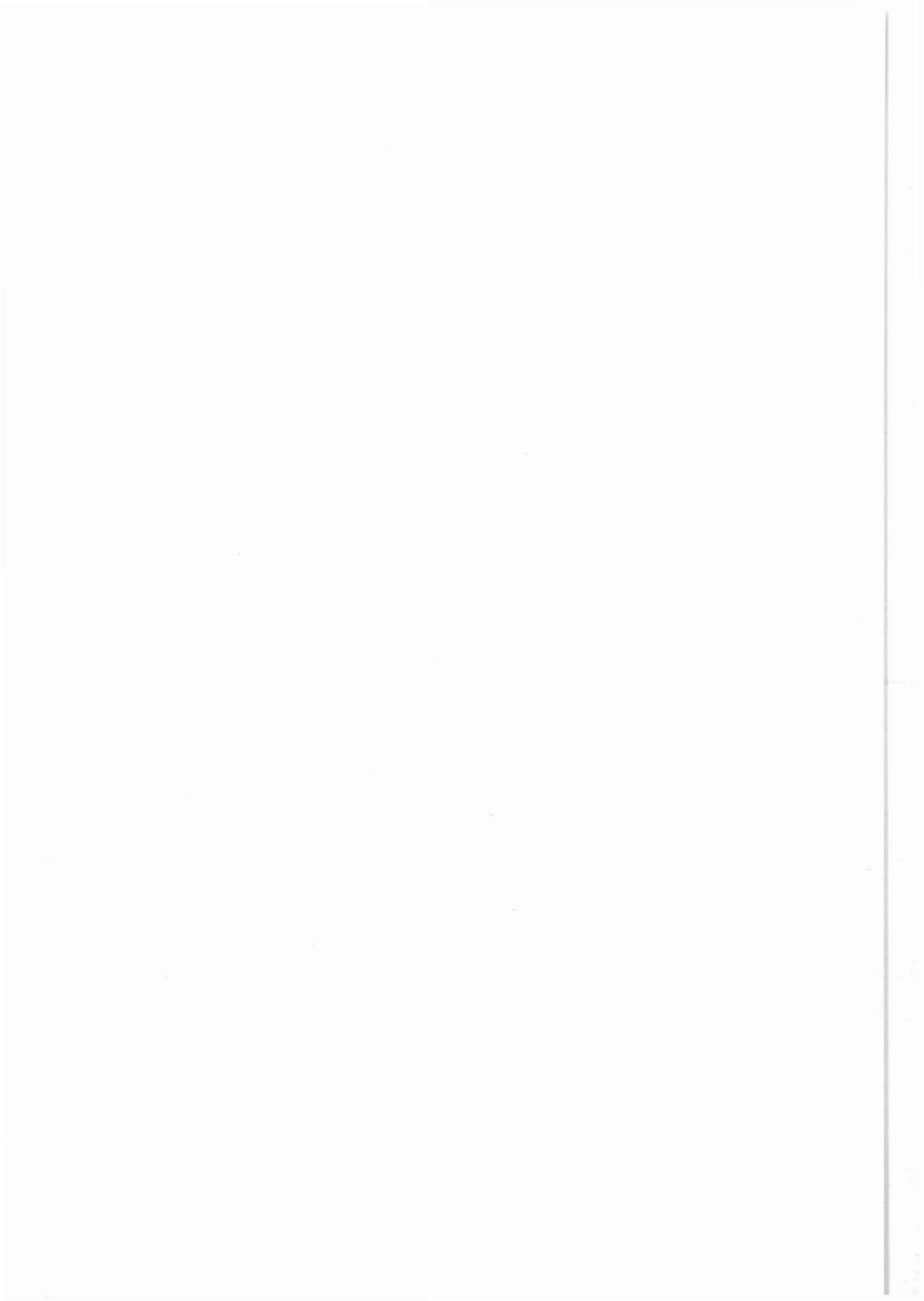
Amphibolit mit wechselnden Granat- und Mobilisatgehalten

3989.4 - 3997.9 m

Amphibolit und epidotführender Chlorit-Gneis

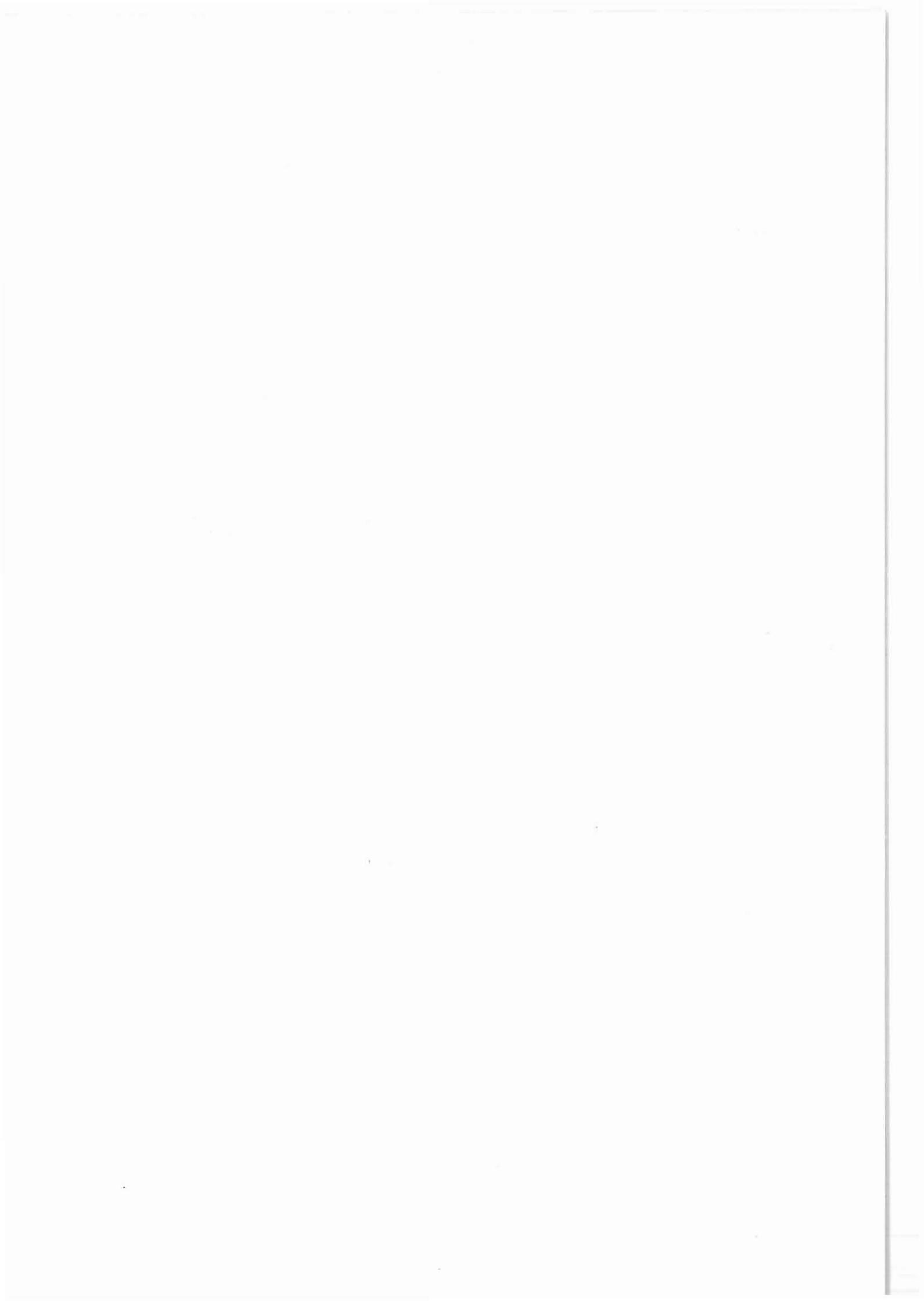
Der hohe Anteil an großen, eckigen Nachfall-Bruchstücken im Teufenbereich von 3947.0 bis 3949.6 m (siehe Tab.H.2 - Biotit-Gneis) läßt sich auf bohrtechnische Probleme beim Vertiefen der Bohrung zurückführen. Auch die ungewöhnlich hohe Probenmenge (siehe g/m in Tab.H.1) steht damit im Zusammenhang.

Zusammenfassend haben diese ersten Untersuchungen gezeigt, daß der Nachfall in der Regel gering ist. Das Sedimentrohr liefert deshalb wichtiges Probenmaterial aus dem abgebohrten Teufenbereich. Soweit möglich, sollte deshalb beim Vollbohren in der Hauptbohrung ein Sedimentrohr eingesetzt werden.



I.

Kontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung



KTB Report	90-2	I1-I10	9 Abb.	Hannover 1990
------------	------	--------	--------	---------------

I. Kontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung

H.-J. Heinschild *)

Inhaltsverzeichnis:		Seite
I.1	Einleitung.....	I 2
I.2	Ergebnisse.....	I 3
I.3	Bewertung.....	I 5
I.4	Schriftenverzeichnis.....	I 10
I.5	Danksagung.....	I 10

*) Anschrift des Autors:
KTB Feldlabor
8486 Windischeschenbach

I. Kontaminationsfreie Bohrspülungsentgasung

I.1 Einleitung

Die in der Bohrspülung gelösten Gase wurden in der KTB Vorbohrung ab einer Bohrlochtiefe von ca. 1000 m kontinuierlich mit einer Gasfalle (Quirlentgaser) der Firma GEO-data aus der Bohrspülung freigesetzt und massenspektrometrisch analysiert (vgl. z.B. HOMANN et al. 1988). Mit dieser Gasfalle ist jedoch eine Quantifizierung der in der Bohrspülung gelösten Gasmenge nicht möglich, da insbesondere bei geringen Gasgehalten in der Bohrspülung Fremdluft mitangesaugt wird.

Neben dieser "konventionellen" Gasfalle wurde während der KTB Vorbohrung ein luftkontaminationsfrei arbeitendes Spülungsseparator-System im Bypass erprobt und erstmals im Routinebetrieb eingesetzt. Mit diesem Bypass-Degasser der Fa. NL International Inc. von der ARGE KTB-Mud-Logging ist erstmalig eine Quantifizierung der in der Bohrspülung gelösten bzw. freigesetzten Gase möglich.

In diesem Report werden nur die Ergebnisse, die während der Testläufe des Bypass-Degassers erzielt wurden, vorgestellt. Die Beschreibung des Bypass-Degassers mit sämtlichen Erläuterungen zur Arbeitsweise und den technischen Problemen bei der Realisierung des Projektes ist Bestandteil eines gesonderten Berichtes.

Der für die KTB Vorbohrung verwendete Spülungskreislauf mit der Anbindung des Bypass-Degassers und der Gasfalle ist aus Abb. I.1 dargestellt.

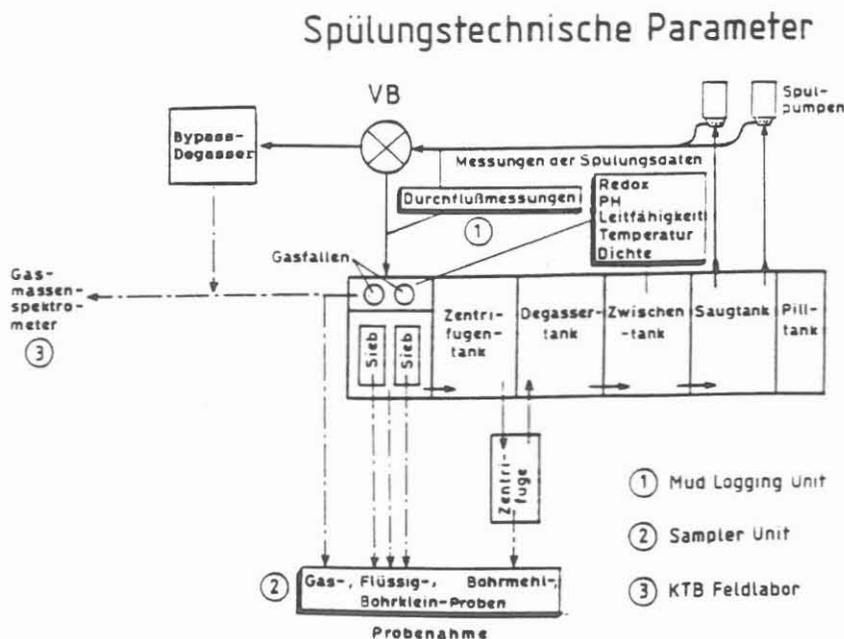


Abb.I.1: Schema des Spülungskreislaufes

I.2 Ergebnisse

Nach langwierigen und umfangreichen Konstruktionsarbeiten wurde während eines ersten Degasser-Testlaufes (Dez. 1988) ein Gasgemisch zur Bohrspülung dotiert, um die Funktionstüchtigkeit und Effizienz des Bypass-Degassers zu testen. In der nachfolgenden Tabelle I.1 sind die Zusammensetzung des Dotiergases und die durch den Bypass-Degasser freigesetzte Gasphase aufgeführt. Die gemessenen Sauerstoffgehalte wurden als Luft (Hinweis auf Undichtigkeiten und/oder eventuell in der Bohrspülung gelöste Luft) definiert, so daß diese Stickstoffgehalte um diesen Betrag korrigiert worden sind.

Tabelle I.1: Zusammensetzung des Dotiergases vor der Zuführung in die Bohrspülung und die prozentuale Wiederfindung nach der Entgasung aus der Bohrspülung

	Dotiergas		Wiederfindung in %
Stickstoff	99.75	45.9	46
Sauerstoff	0.05	-	-
Kohlendioxid	0.05	0.009	17
Wasserstoff	0.05	0.029	57
Methan	0.05	0.013	26
Helium	0.05	0.031	61

Die Zusammensetzung der aus der Bohrspülung mit dem Bypass-Degasser freigesetzten Gasphase entspricht nicht der Zusammensetzung der Gasphase des Dotiergases, das der Bohrspülung zugesetzt wurde. Es ist anzunehmen, daß die unterschiedliche Löslichkeit der einzelnen Gase in der Bohrspülung (pH der Bohrspülung ≈ 10) deren Freisetzung mit dem Bypass-Degasser hauptsächlich beeinflußt.

Nach MESSER GRIESHEIM (1982) nimmt die Löslichkeit der gemessenen Gase in Wasser bei 10°C in folgender Reihe ab:

Helium < Stickstoff < Wasserstoff < Methan < Kohlendioxid

Im Rahmen eines zweiten Testlaufes konnte im März 1989 nach weiteren Optimierungsarbeiten der Bypass-Degasser erstmals während des Bohrbetriebs, also unter realen Bohrbedingungen, getestet werden. Zu dieser Zeit wurde der Bohrlochabschnitt der KTB VB1b mit dem Rotary-Bohrverfahren von 3860 auf 3936 m vertieft.

Parallel zum Einsatz des Bypass-Degassers war weiterhin eine konventionelle Gasfalle im Betrieb, so daß beide freigesetzten Gasphasen kontinuierlich analysiert und verglichen werden konnten.

Beim Vergleich der Meßergebnisse muß berücksichtigt werden, daß die Gasfalle, wenn sie weniger als 5 l Gas/Stunde aus der Bohrspülung freisetzen konnte, Fremdluft ansaugte, während beim Degasser systemgesteuert Argon zugegeben wurde. In Abb.I.2 sind die Methangehalte der Bohrspülung, die mit unterschiedlichen Methoden freigesetzt wurden, dargestellt. Die Methangehalte der Gasphasen sind sowohl bei der konventionellen Gasfalle als auch beim Degasser nicht auf den Fremdluftanteil bzw. zugegebene Argonmenge korrigiert. Die Korrelation der Ergebnisse der unterschiedlichen Gasfreisetzungsmethoden zeigt Abb.I.3.

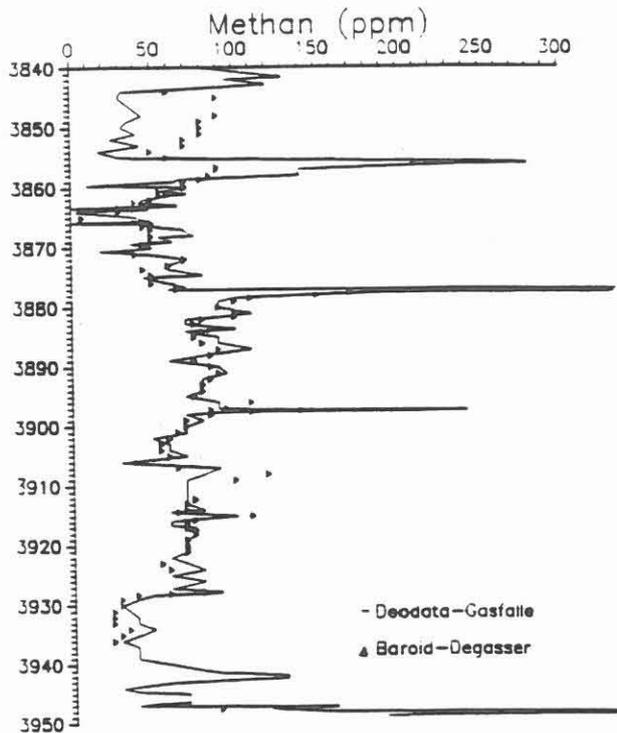


Abb.I.2: Vergleich der Methangehalte zwischen Gasfalle und Bypass-Degasser

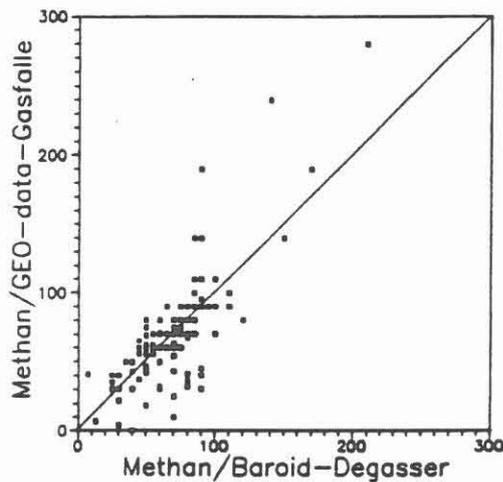


Abb.I.3: Korrelation der Methangehalte

Es ergibt sich eine relativ gute Korrelation. Unterschiede können aufgrund der unterschiedlichen Konfiguration der beiden verwendeten Gasfreisetzungsmethoden erklärt werden.

I.3 Bewertung

Sowohl mit der Gasfalle in der Spülungsrinne als auch mit dem Bypass-Degasser sind Gasanreicherungen in der Bohrspülung nachweisbar. In den Abbildungen I.4 bis I.6 sind die Gehalte für Methan, Helium und Sauerstoff für beide Entgasungsverfahren sowie die freigesetzte Totalgasmenge, die unter den gegebenen Bedingungen gewonnen wurde, für den Testlauf vom März 1989 dargestellt.

Beim Vergleich der Methan- und Heliumgehalte fallen die z.T. stark schwankenden Meßwerte für den Degasser im Vergleich zum Quirlentgaser auf, die durch technische Probleme bei diesem Degasser-Prototyp verursacht wurden und in einem gesonderten Bericht behandelt werden.

Außerdem sind die Gaspeaks der Gasphase, die durch eine Entgasung der Bohrspülung mit dem Bypass-Degasser freigesetzt wurde, breiter. Dies könnte durch eine längere Verweilzeit der Bohrspülung im Degasser sowie durch das größere Volumen (Gasraum) über der Bohrspülung im Degassertank verursacht werden.

Die um den Faktor 2 höheren Sauerstoff-Gehalte bei der "Gasfallen-Messung" verdeutlichen, daß die Gasfalle Fremdluft mitangesaugt haben muß, was bei der on line-Analyse zu geringeren Methangehalten führt (vgl. Abb.I.4).

Anhand Abb.I.7 kann gezeigt werden, daß die freigesetzte Gasmenge etwa 5 l Gas/m³-Bohrspülung betrug. Da während der Testphase am Bypass-Degasser aber Undichtigkeiten auftraten, ist dieser Wert wahrscheinlich noch zu hoch. Wird nämlich nur der Teufenbereich berücksichtigt, in dem kein Sauerstoff in der freigesetzten Gasphase nachgewiesen werden konnte, variieren die Werte zwischen 2 - 4 l Gas/m³-Spülung.

Für den Teufenbereich (3868 - 3879 m), in dem Sauerstoff nicht in der Gasphase nachgewiesen werden und damit eine System-Undichtigkeit (Luft) ausgeschlossen werden konnte, wird eine Korrelation der Resultate mit einigen Degasserparametern versucht.

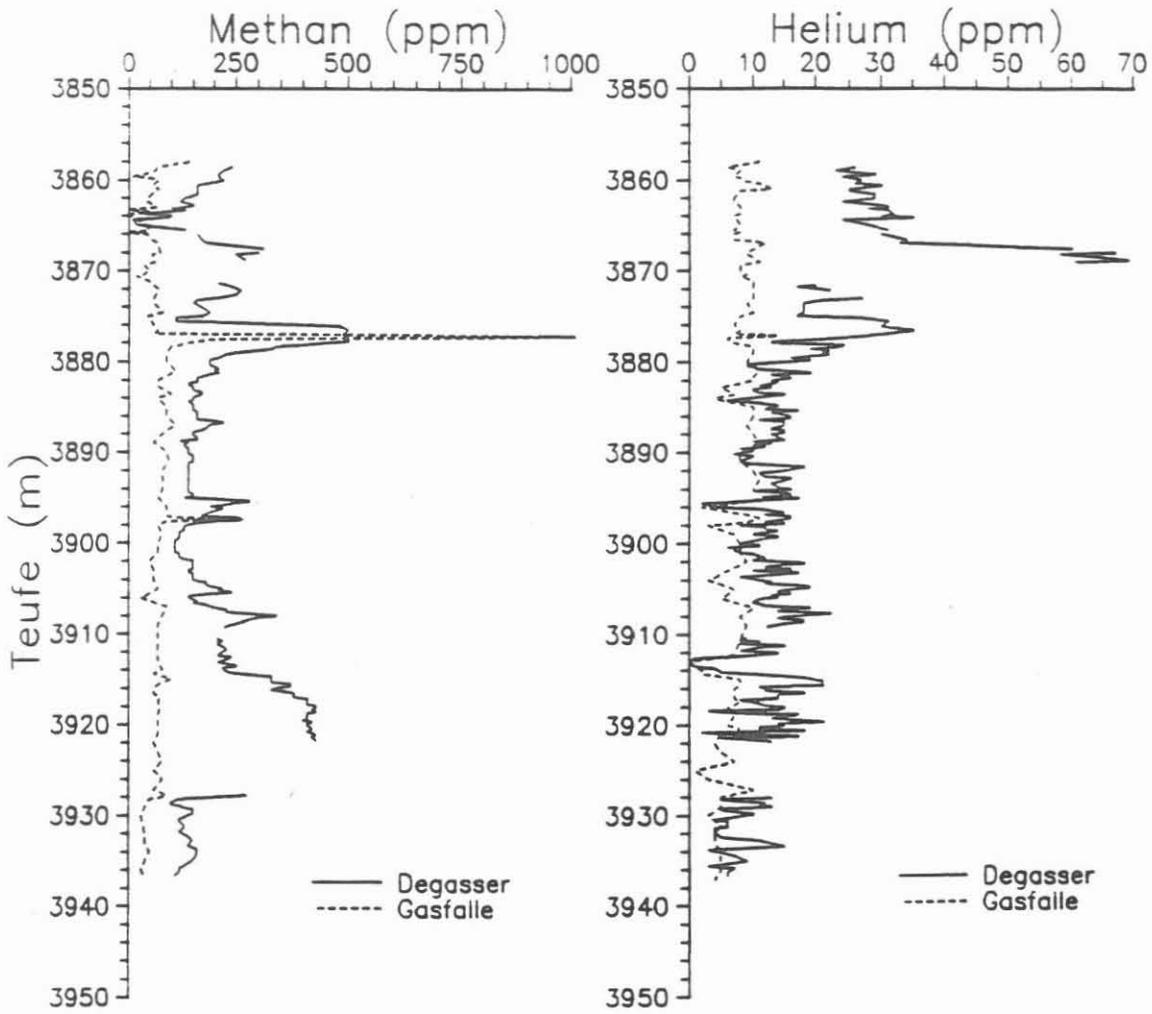


Abb.I.4 und I.5: Vergleich der Meßergebnisse der "Gasfallen-Gasphase" für Methan und Helium mit den um der zudotierten Argonmenge korrigierten Werten der "Bypass-Degasser-Gasphase"

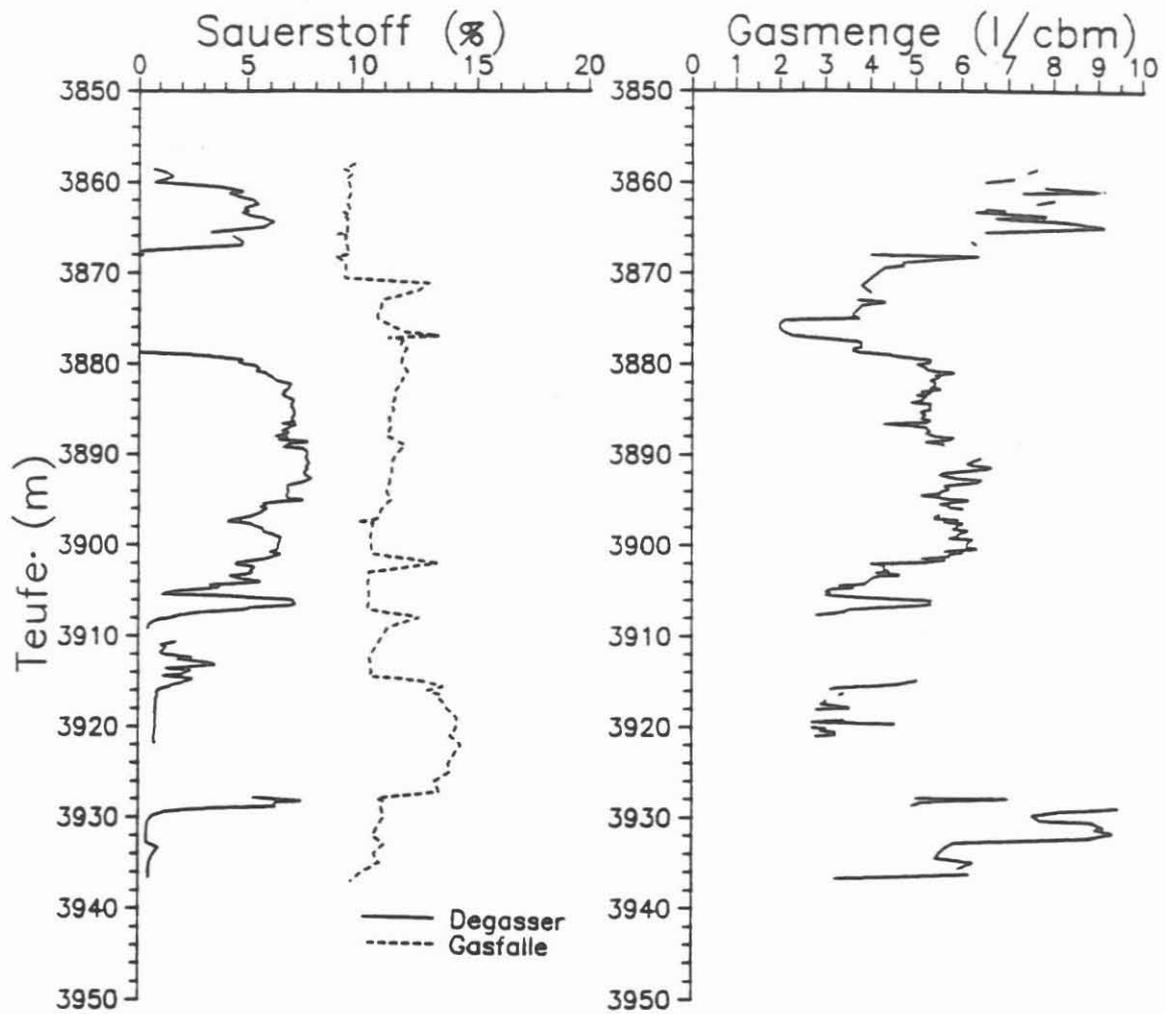


Abb.I.6 und I.7: Sauerstoffgehalte der freigesetzten Gasphase sowie die insgesamt freigesetzte Gasmenge in 1 Gas/m³-Spülung

In Abb.I.8 ist die Abhängigkeit der Zusammensetzung der freigesetzten Gase sowie der Totalgasmenge von der Bohrspülungstemperatur dargestellt.

Es kann keine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Freisetzung von gelösten Gasen und der Temperatur im Bereich zwischen 28 und 37 °C festgestellt werden. Die freigesetzte Gasmenge bleibt in diesem Temperaturintervall relativ konstant; die Zunahme der freigesetzten Heliummenge mit der Temperatur wird wahrscheinlich durch höhere Heliumgehalte in

dem durchteuften Gestein verursacht.

Abb.I.9 zeigt die Korrelation der freigesetzten Gase bzw. des zugegebenen Argons mit dem Druck im Degassertank.

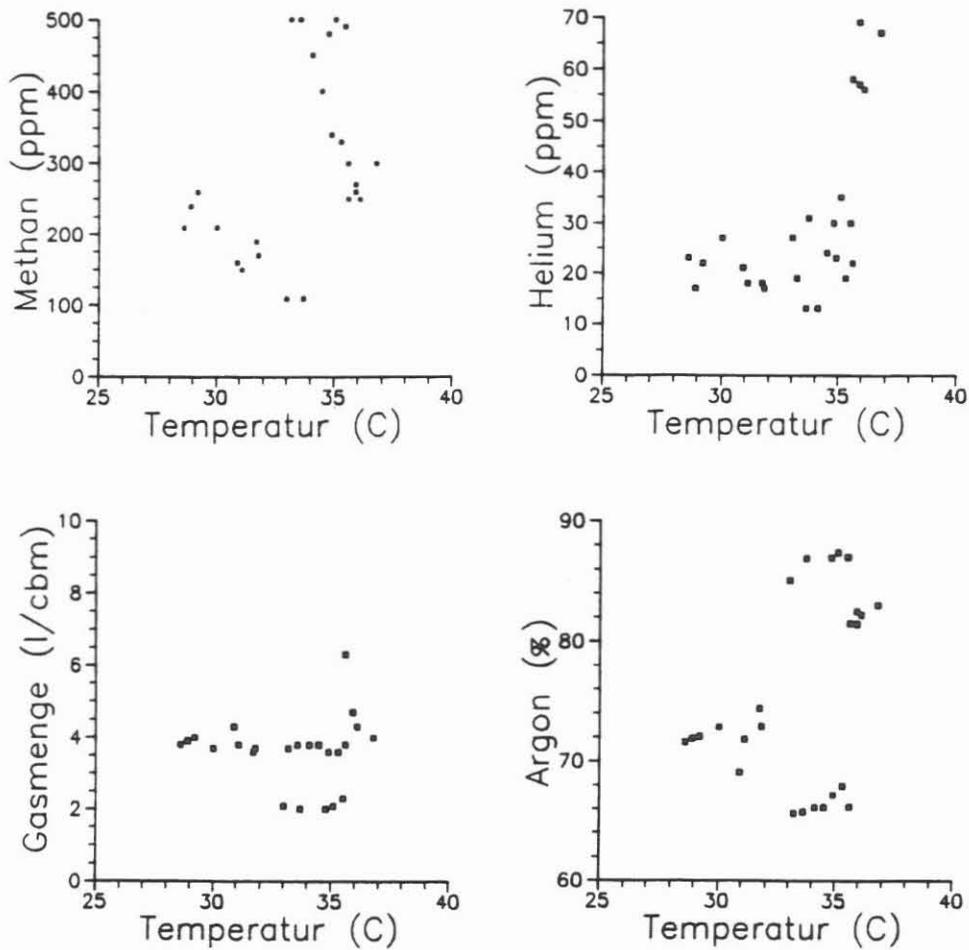


Abb.I.8: Korrelation zwischen Bohrspülungstemperatur und Methan, Helium, Argon sowie Gasmenge (ohne Argon)

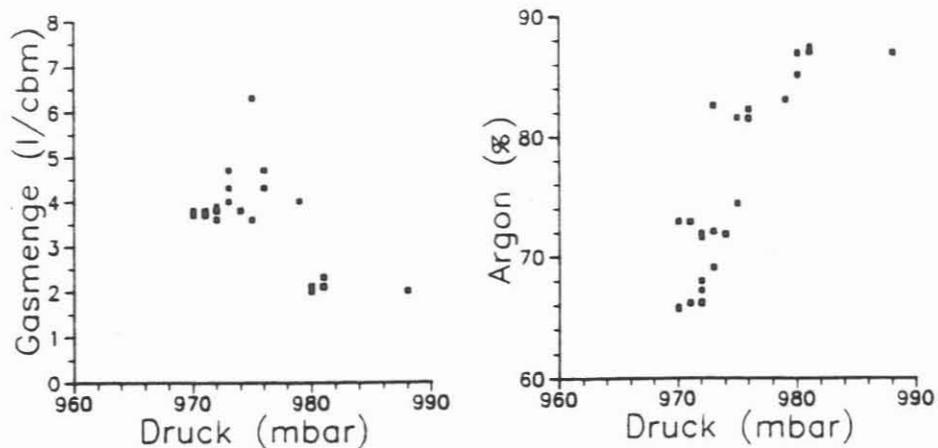


Abb.I.9: Korrelation des Drucks im Degassertank mit der freigesetzten Gasmenge (l Gas/m³-Spülung bzw. zudo-
tiertem Argon)

Der zu beobachtende Trend, daß mit abnehmendem Druck die freigesetzte Gasmenge zunimmt bzw. die Dotiergasmenge abnimmt, wird durch die Konfiguration des Degassers verursacht. Bei einem Druckabfall unter 970 mbar wird Argon zugegeben. Hierbei kann der Druck so schnell ansteigen, daß die Druckobergrenze erreicht ist und "überschüssiges" Gas abgepumpt werden muß. Demnach sind bei hohen Drucken hohe Argongehalte in der Gasphase nachweisbar und die freigesetzte Gasmenge ist dann geringer (Verdünnungseffekte).

Zusammenfassend ist nach den vorliegenden ersten Messungen festzuhalten, daß erstmals eine kontinuierliche Quantifizierung der in der Bohrspülung gelösten Gase über etwa 14 Tage durchgeführt werden konnte.

Wegen verschiedener technischer Probleme war es jedoch nicht möglich, einen Dauerbetrieb des Bypass-Degassers für die Routineuntersuchungen einzurichten.

Das Konzept der kontaminationsfreien Bohrspülungsentgasung sowie der Registrierung der Parameter, wie z.B. Bohrspülungs- und Gasmengen, sollte aufgrund der positiven Erfahrungen weiter verfolgt werden, da sonst keine Bilanzierung der aus dem Gebirge ins Bohrloch zutretenden gasförmigen Fluide möglich ist.

I.4 Schriftenverzeichnis

HOMANN, K.D., HEINSCHILD, H.J., STROH, A. & TAPPER M. (1988):
Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der
geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-
Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich von
1530 bis 1998 m. - In: EMMERMANN, R., DIETRICH,
H.G., HEINISCH, M. WÖHRL, T. (Hrsg.): KTB-Report
88-9: C1-C88, Hannover.

MESSER GRIESHEIM (1982): Gasehandbuch, Düsseldorf 1982

I.5 Danksagung

Besonders gedankt sei Herrn H. Kamm für seinen unermüdlichen Einsatz bei der Bewältigung ungezählter technischer Probleme in der Vor- und Testphase des Degassers in Zusammenarbeit mit der ARGE MUD LOGGING.

Herrn Dr. J. Erzinger vom Institut für Geowissenschaften und Lithosphärenforschung in Gießen sei an dieser Stelle für sein Engagement bei der Realisierung eines kontaminationsfrei arbeitenden Bohrspülungsentsgasungssystems und für seine fortwährende Diskussionsbereitschaft gedankt.

Anlage

