

D. Geophysik

KTB Oberpfalz VB – Gesteinsphysikalische Untersuchungen

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

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

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

D. Geophysik

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

Inhaltsverzeichnis:

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

*) Anschrift der Verfasser: KTB-Feldlabor
8486 Windischeschenbach

D.1. Einleitung

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

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

D.2 Dichte

D.2.1 Allgemeines

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

D.2.2 Dichte der Cuttings

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

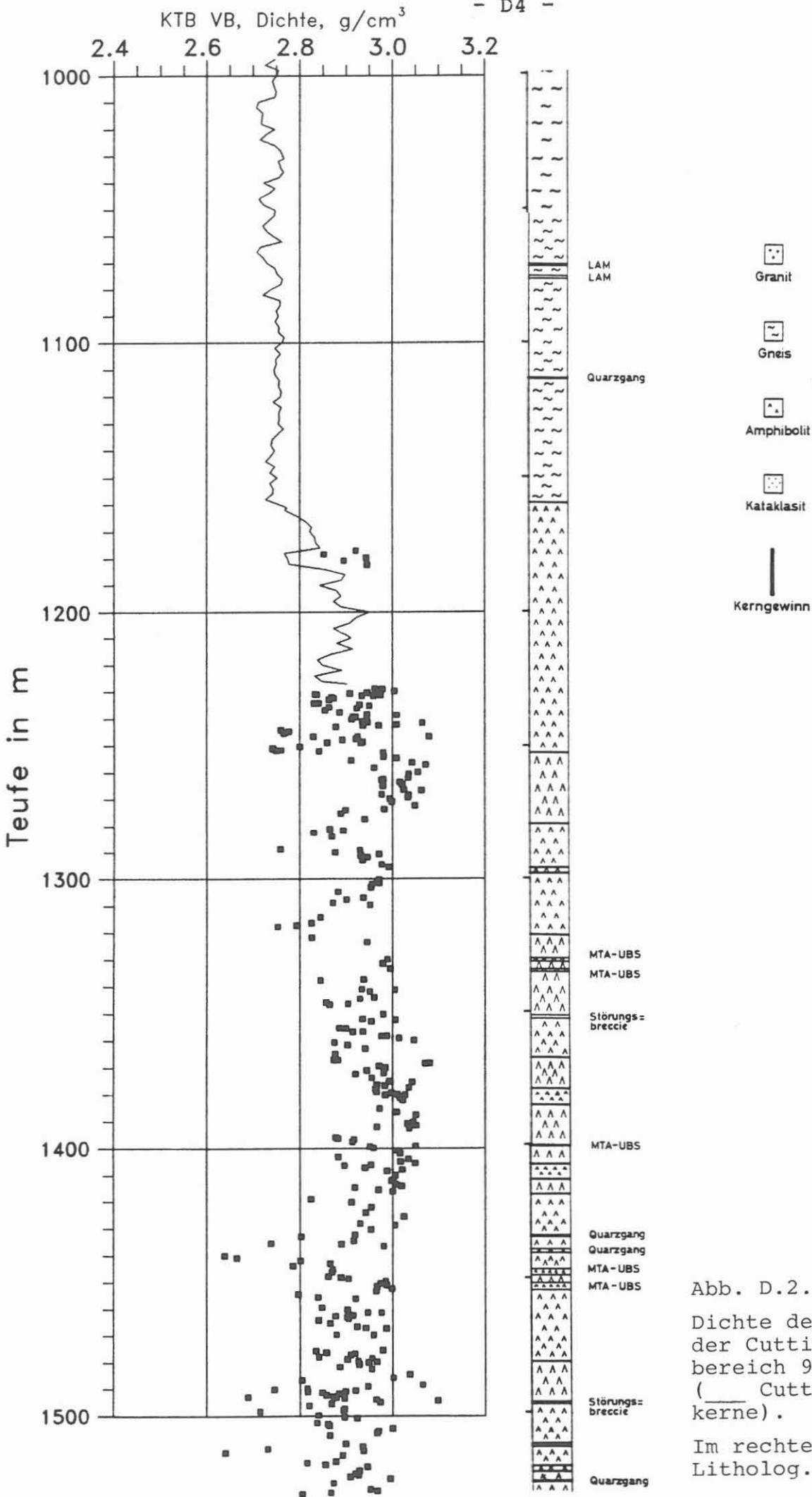


Abb. D.2.1:

Dichte der Bohrkerne und der Cuttings im Teufenbereich 992 - 1 530 m. (___ Cuttings, ... Bohrkerne).

Im rechten Teil der Abb.: Litholog.

D.2.3 Dichte der Bohrkerne

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

D.3. Ultraschallseismik

D. 3.1 Allgemeines

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

D.3.2 Ergebnisse

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

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

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

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

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

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

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

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

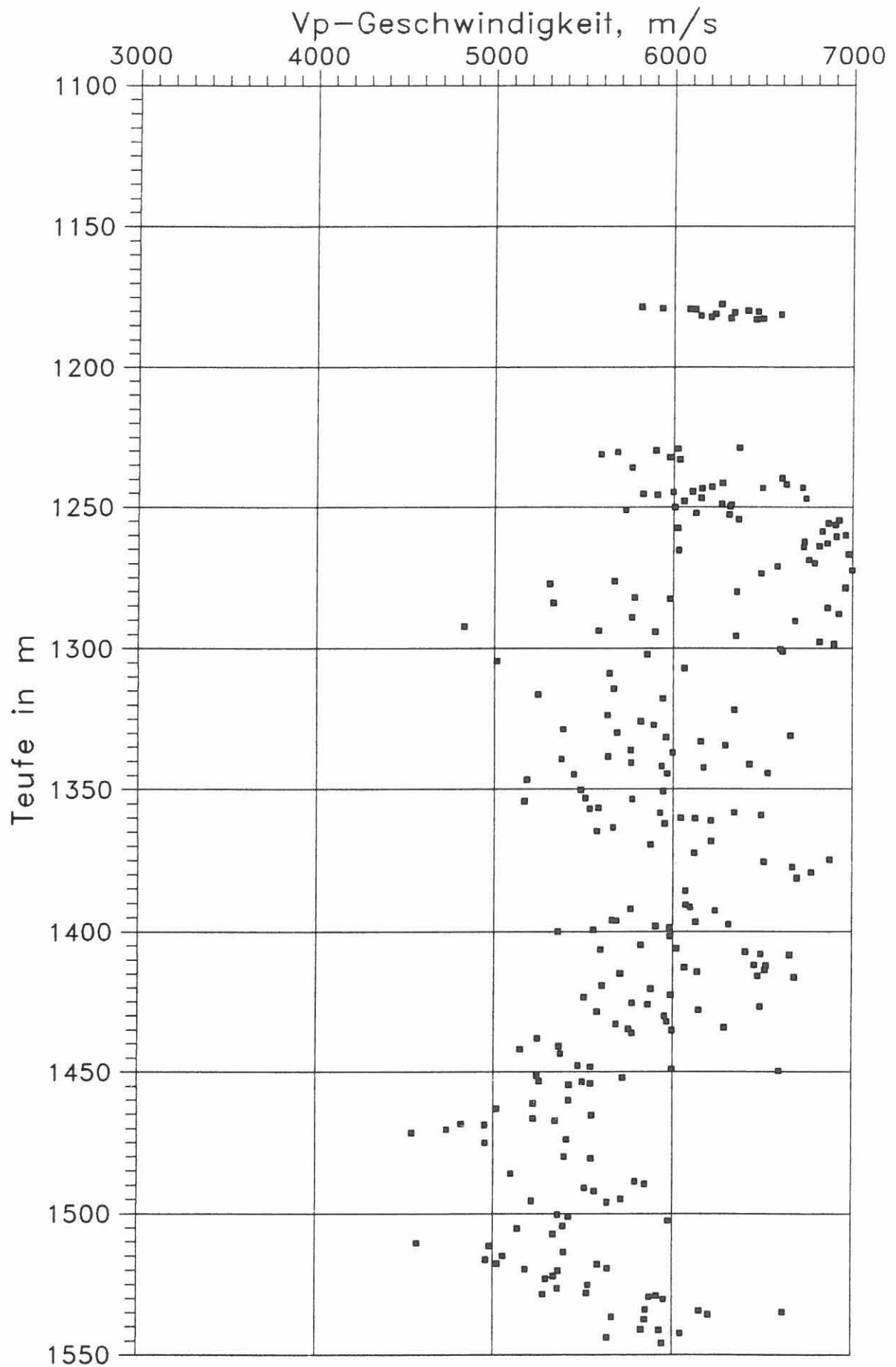


Abb. D.3.1 Ergebnisse der Radialdurchschallungen von Bohrkernen

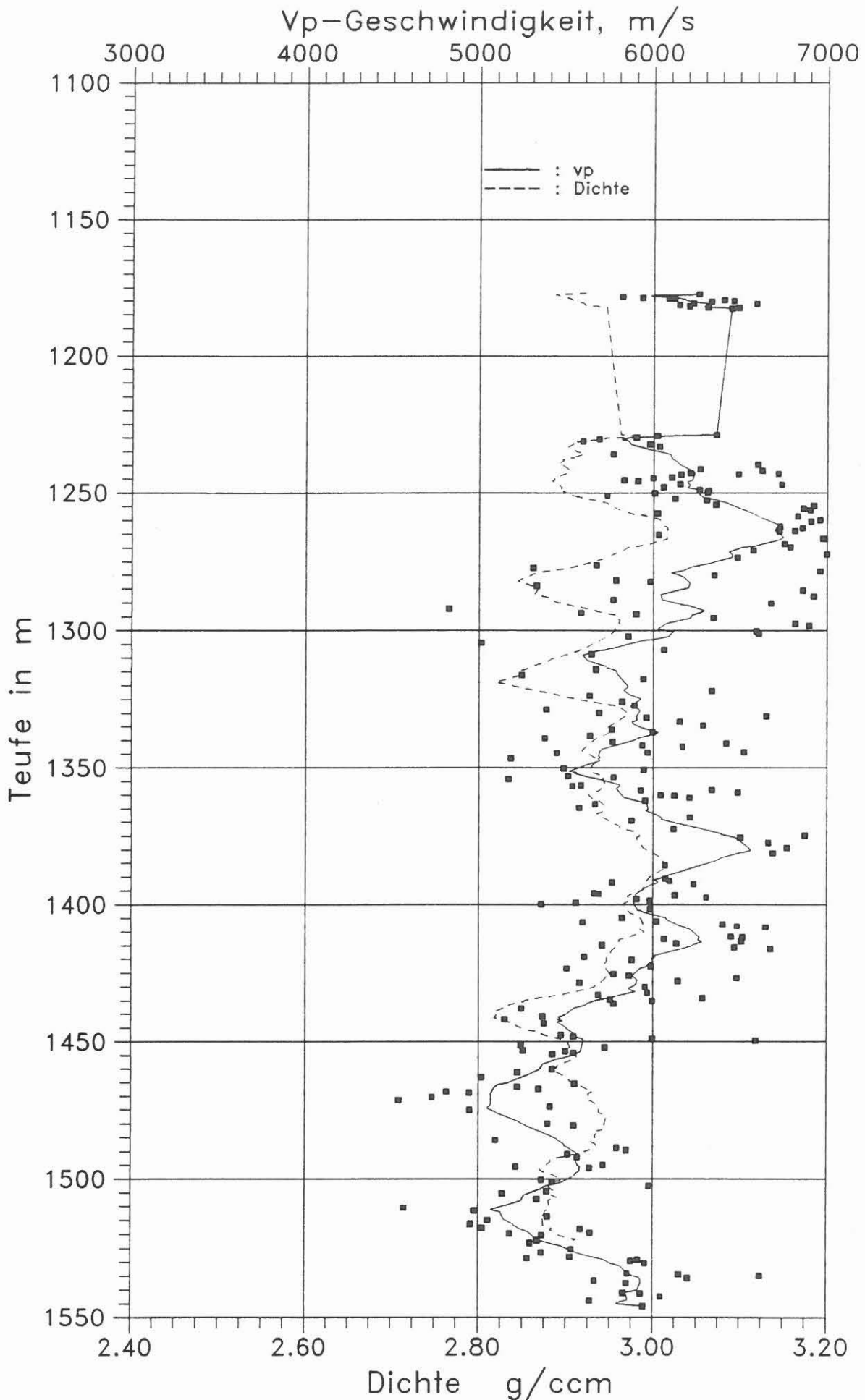


Abb. D.3.2 (.....) gemessene P-Geschwindigkeiten
(——) mittlere P-Geschwindigkeit
(----) mittlere Dichte
jeweils gleitendes Mittel über 15 m

Abb. D.3.3.a

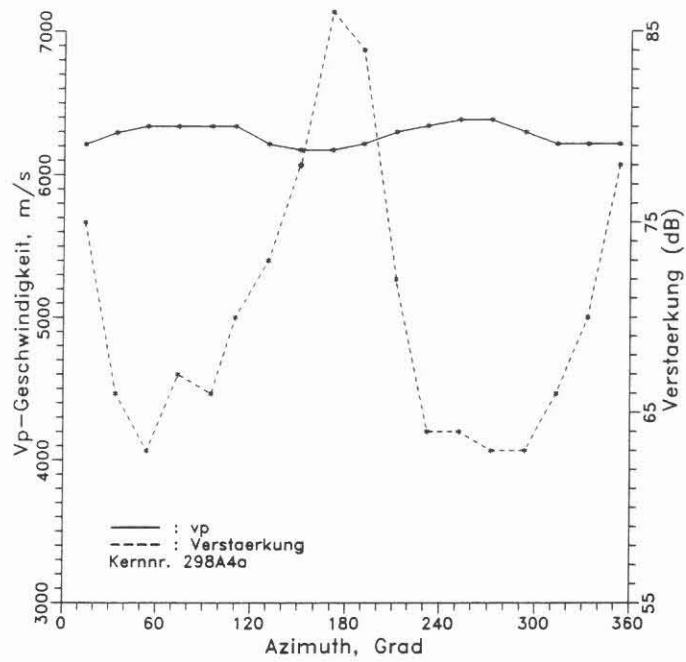


Abb. D.3.3.b

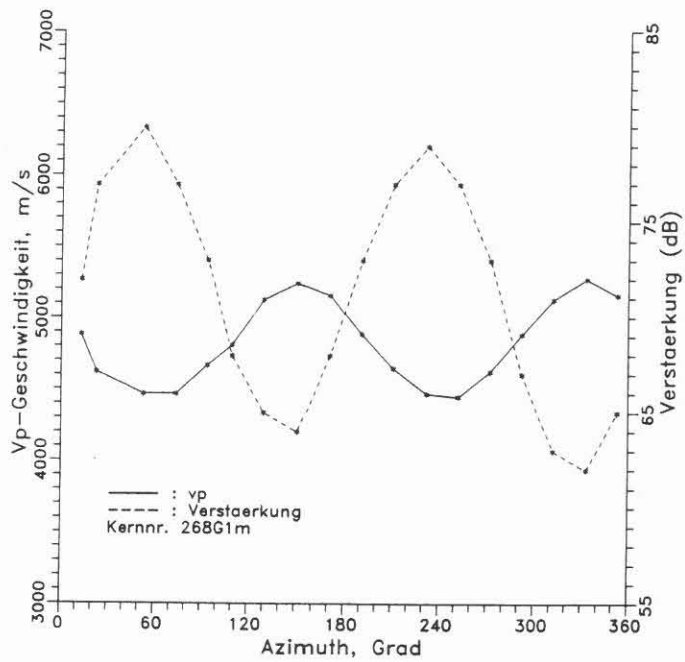


Abb. D.3.3.a und D.3.3.b:
Typische Beispiele für Radial-Durchschallungen an Bohrkernen
unter verschiedenen Azimuten.
(—) p-Wellen-Geschwindigkeit
(----) am Empfänger nötige Verstärkung für konstante Amplitude

D.4. Elektrische Leitfähigkeit

D.4.1 Allgemeines

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

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

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

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

D.4.2 Meßmethode

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

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

Beeinflussung des Bohrkerns ausgeschlossen.

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

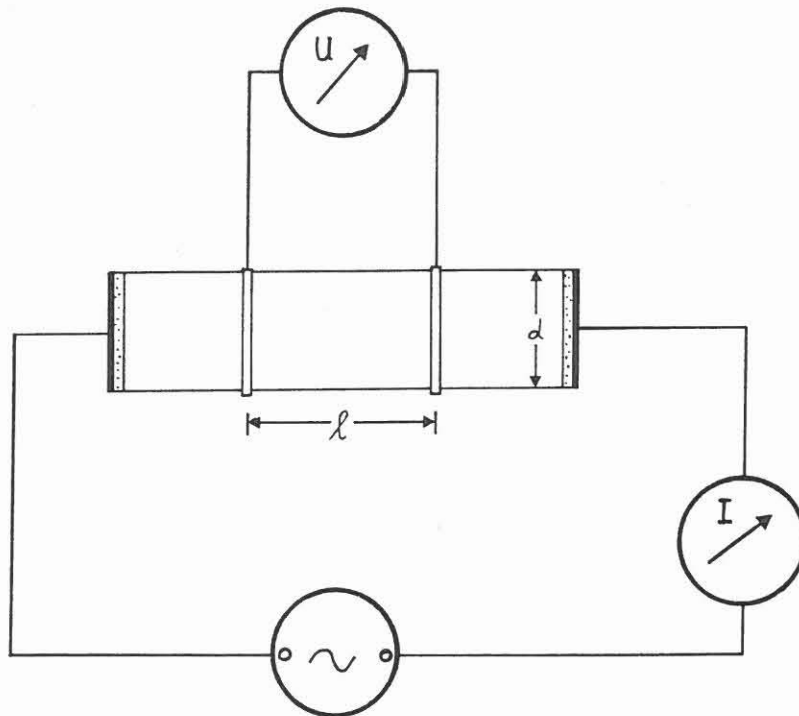


Abb. D.4.1. : Aufbau der Apparatur zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Bohrkernen.

Der spezifische elektrische Widerstand ϱ (in der Einheit Ωm) eines Bohrkerns berechnet sich zu :

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

mit : U = Potentialdifferenz (Spannung) in V
I = Strom in A
A = Querschnittsfläche des Bohrkerns in m^2
l = Abstand der Potentialelektroden in m

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

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

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

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

D.4.3 Ergebnisse

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

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

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

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

gemessenen Widerstandes treffen.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

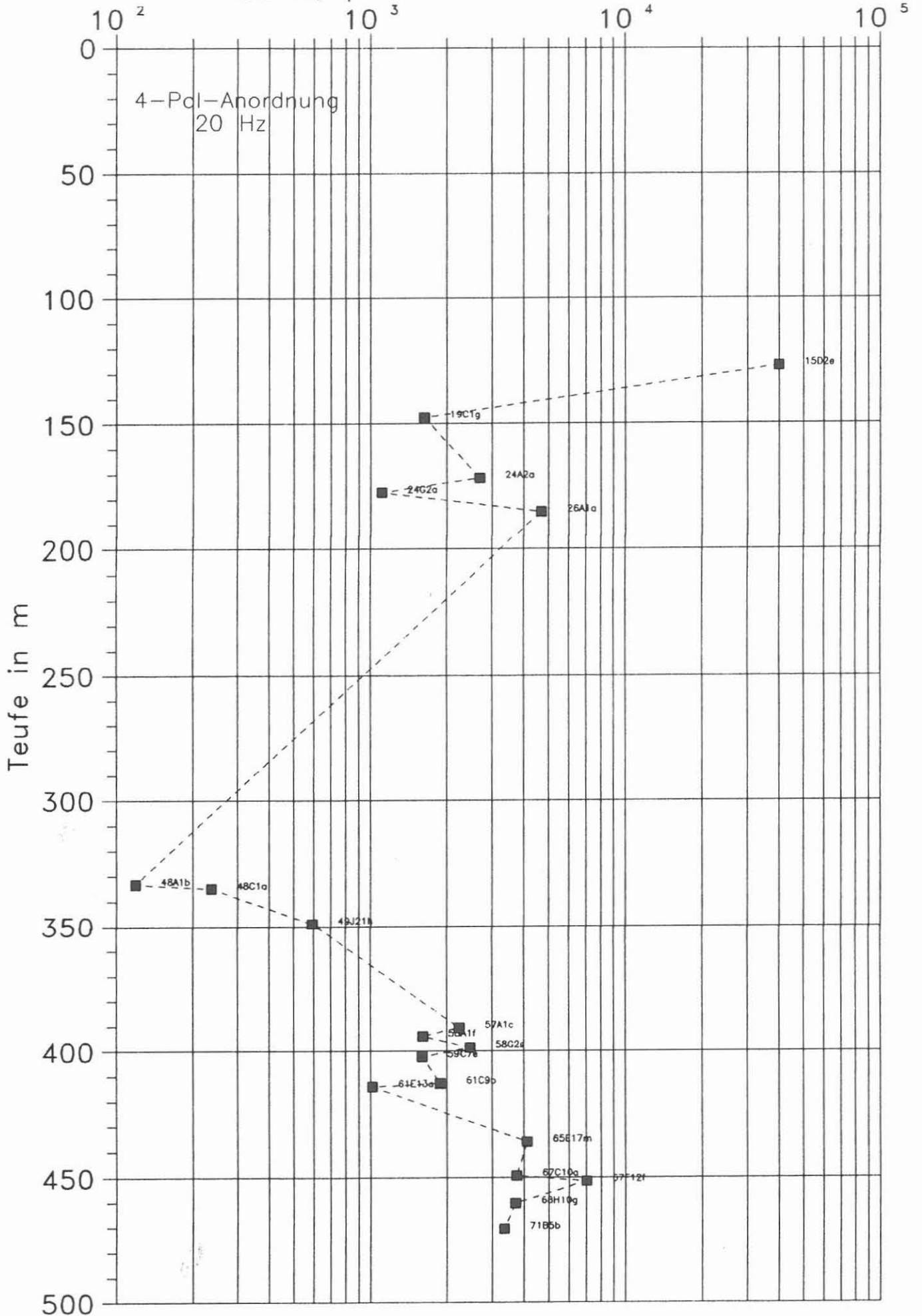


Abb. D.4.2 : spezifischer elektrischer Widerstand von Bohrkernen im Teufenbereich von 0 bis 480 m.

KTB VB, spez. elektr. Widerstand in Ωm

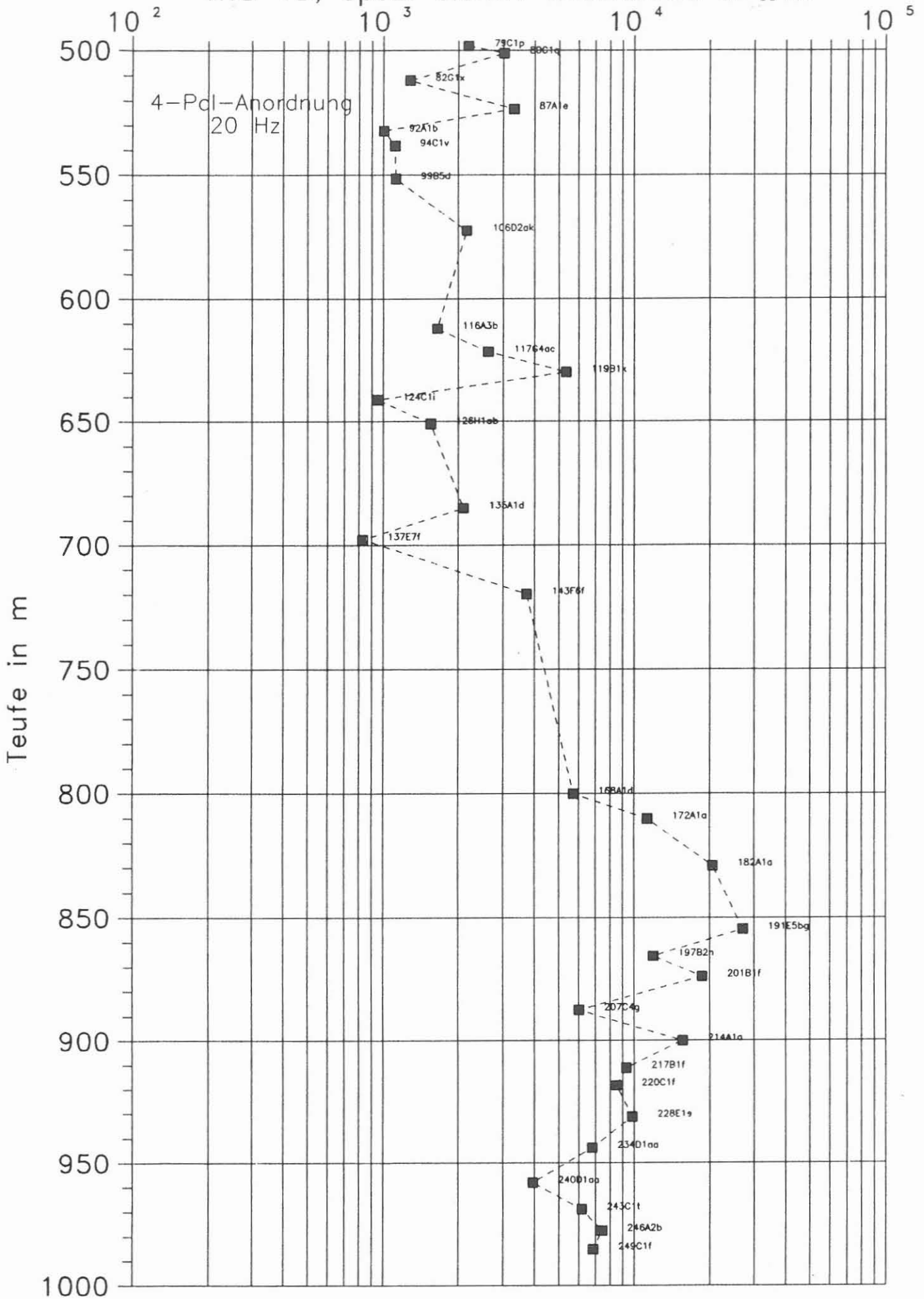


Abb. D.4.3 : spezifischer elektrischer Widerstand von Bohrkernen im Tiefenbereich von 480 m bis 992 m.

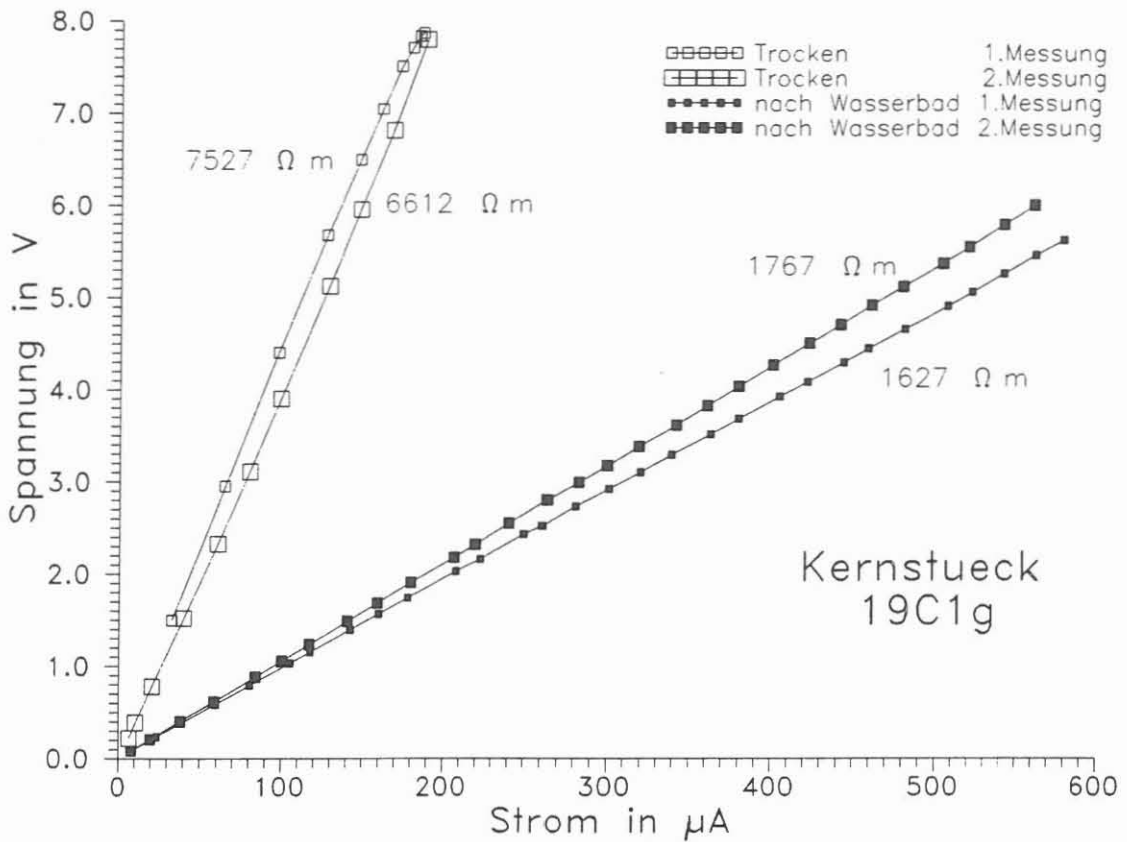


Abb. D.4.4 : gemessene Spannung in Abhängigkeit vom eingespeisten Strom. Nach Gleichung D.4.1. berechnet sich für jede Meßreihe der spezifische elektrische Widerstand.

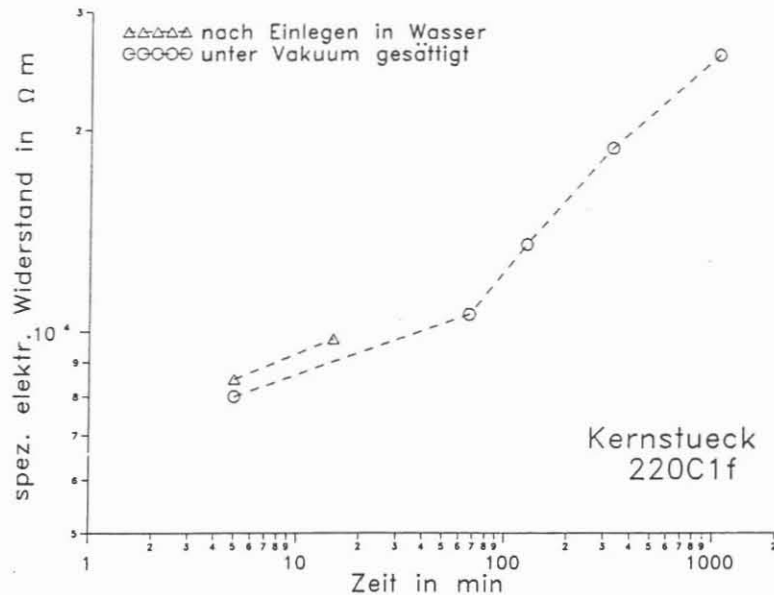


Abb. D.4.5 : Austrocknungseffekte . Vergleich gemessener spez. elektr. Widerstände in Abhängigkeit von der Austrocknungszeit. Der Bohrkern wurde auf 2 Arten präpariert :

- durch Einlegen in Leitungswasser (hier: 2 Wochen)
- und später
- durch Wassersättigung unter Vakuum

D.5 Wärmeleitfähigkeit

D.5.1. Allgemeines

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

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

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

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

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

D.5.2.1 Probenvorbereitung

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

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

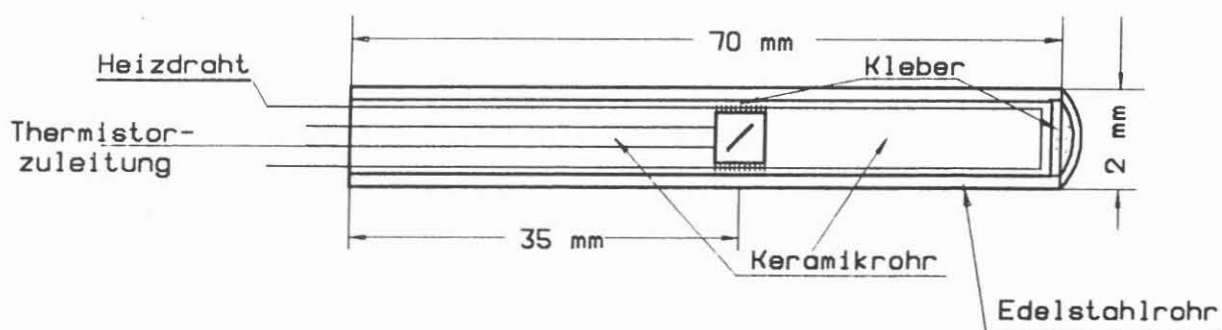


Abb. D.5.1 Aufbau der Nadelsonde

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

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

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

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

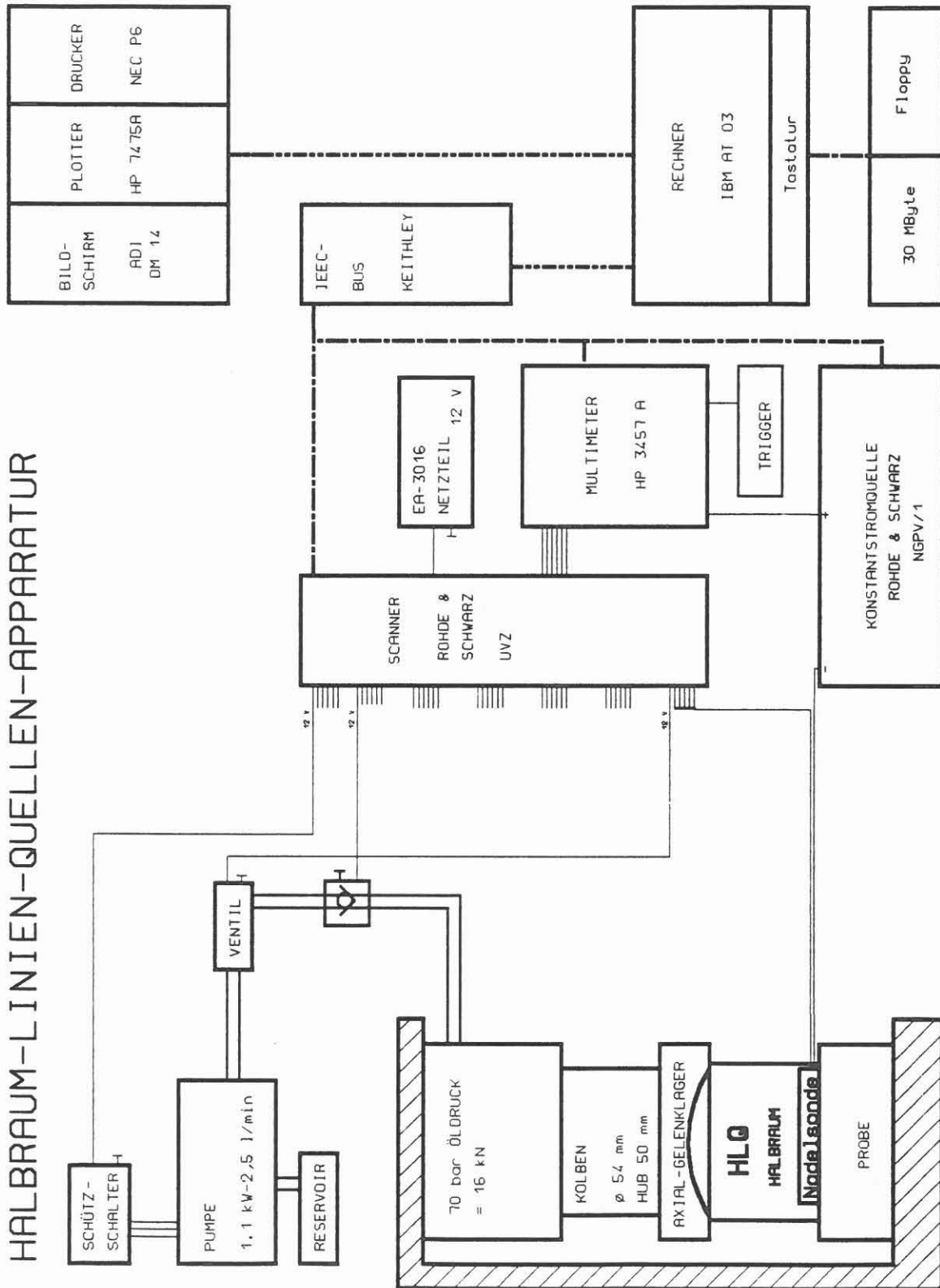


Abb. D.5.2 stellt den Meßaufbau der HLQ-Apparatur exemplarisch für eine Meßstelle dar. Insgesamt können fünf Halbraumsonden, vier auf Kalottenflächen und eine auf die Stirnfläche eines präparierten Bohrkerns aufgedrückt werden.

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

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

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

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

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

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

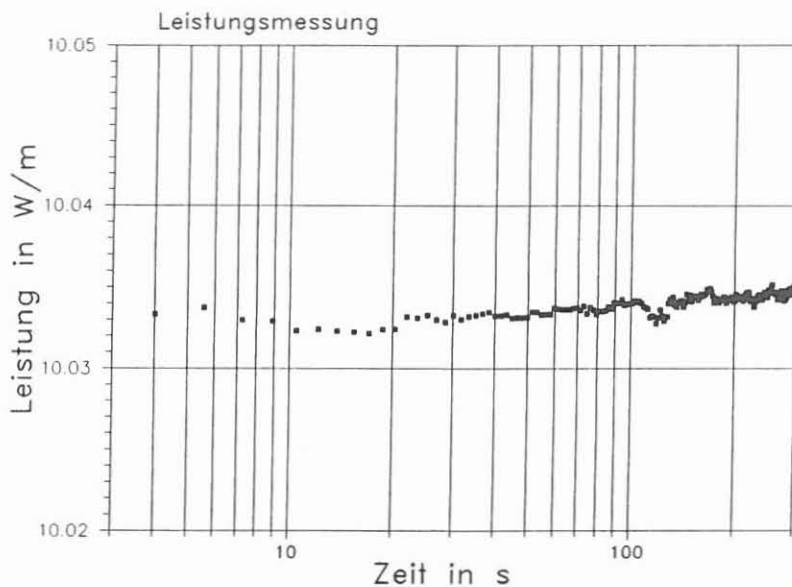


Abb. D.5.3 Leistung/Heizdrahtlänge während einer Aufheizung der HLQ in Luft

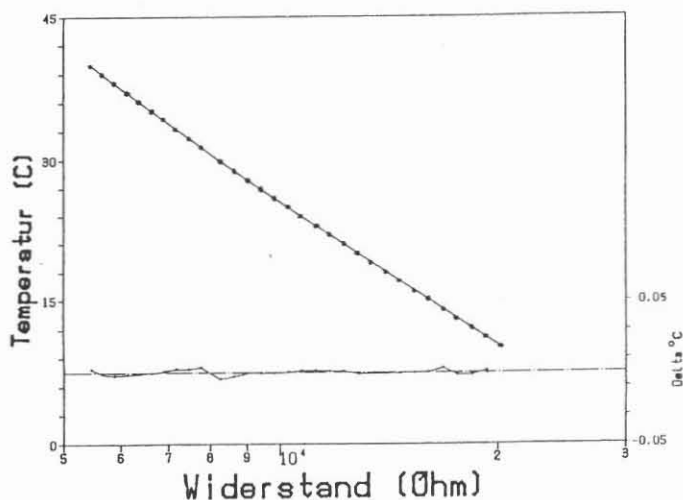


Abb. D.5.4 Eichkurve eines Thermistors. Durchgezogene Linie = Least-Square-Fit eines Polynoms 7. Grades an die Meßpunkte. Untere Kurve = Abweichung der gerechneten von den gemessenen Werten (Skala rechts).

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

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

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

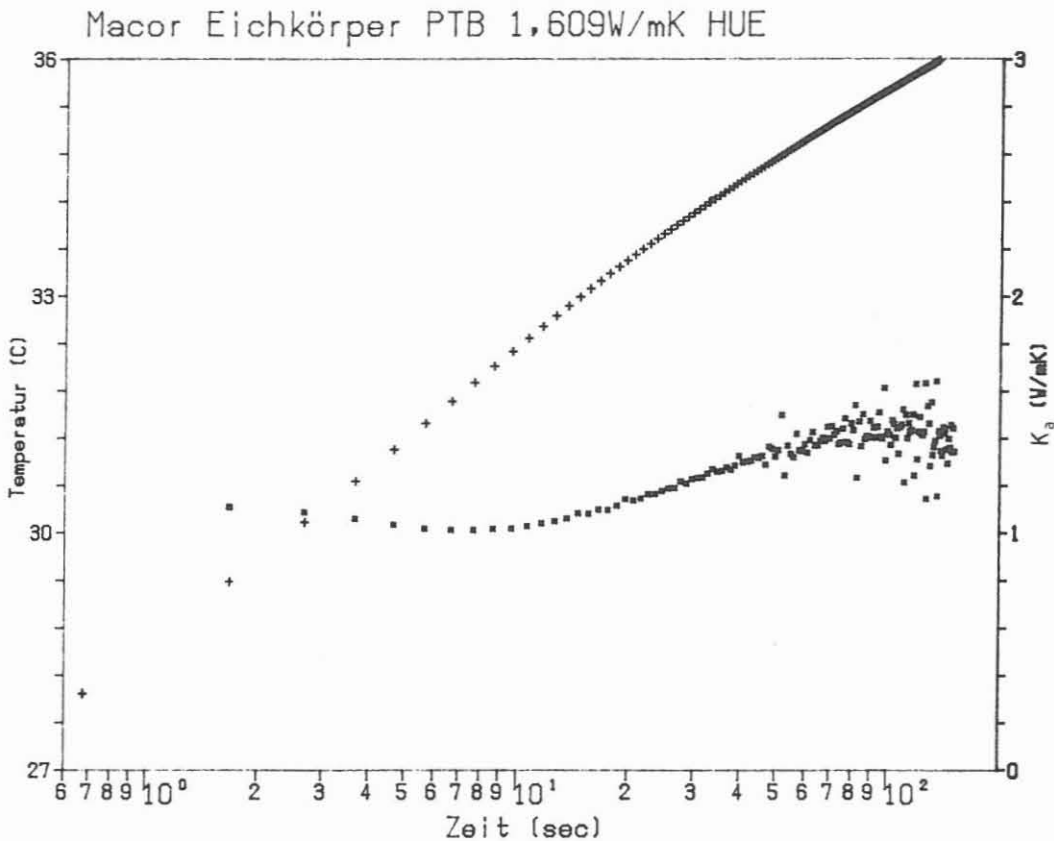


Abb. D.5.5 Aufheizkurve von MACOR. + = Temperaturen ; x = mit (2) errechnete scheinbare Wlf-Werte.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

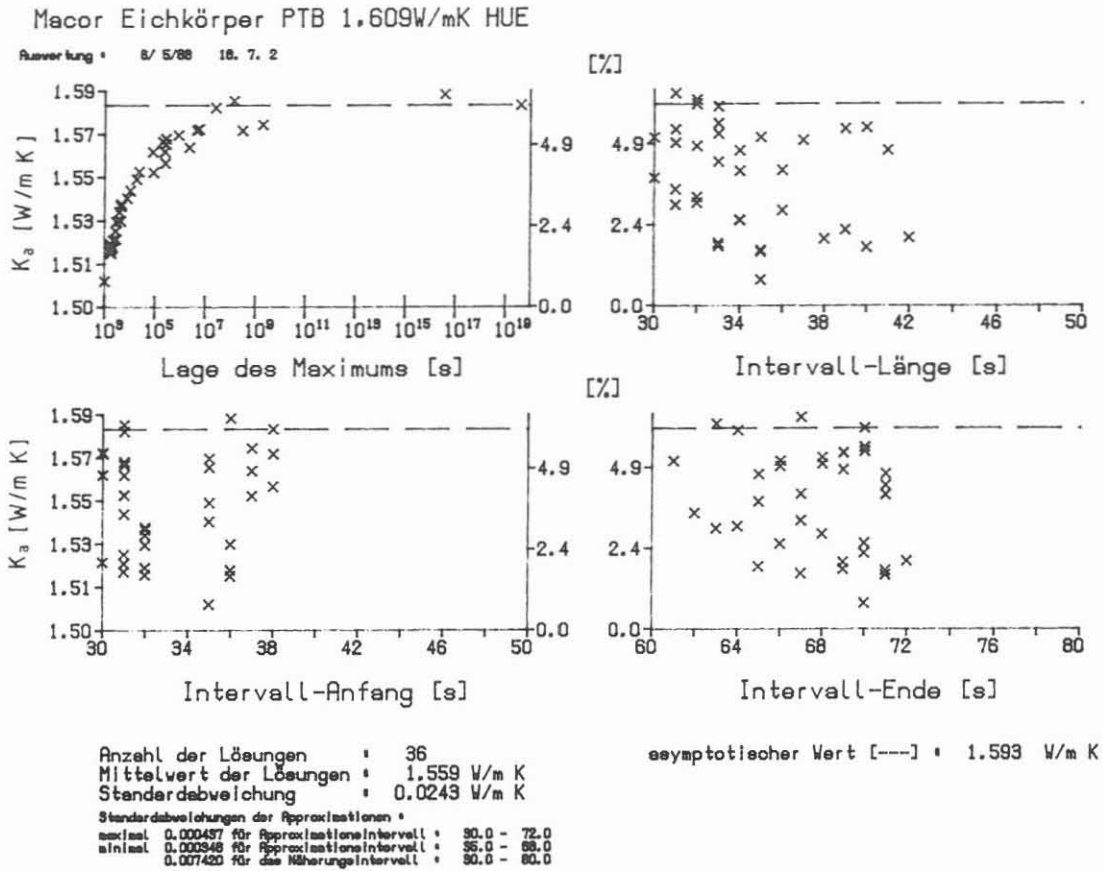


Abb. D.5.6 Auswertung einer Messung am Standard Macor ($k = 1.61 \pm 1 \% \text{ W/m K}$).

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

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

D.5.2.4 Wlf ausgewählter Bohrkerne

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

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

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

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

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

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

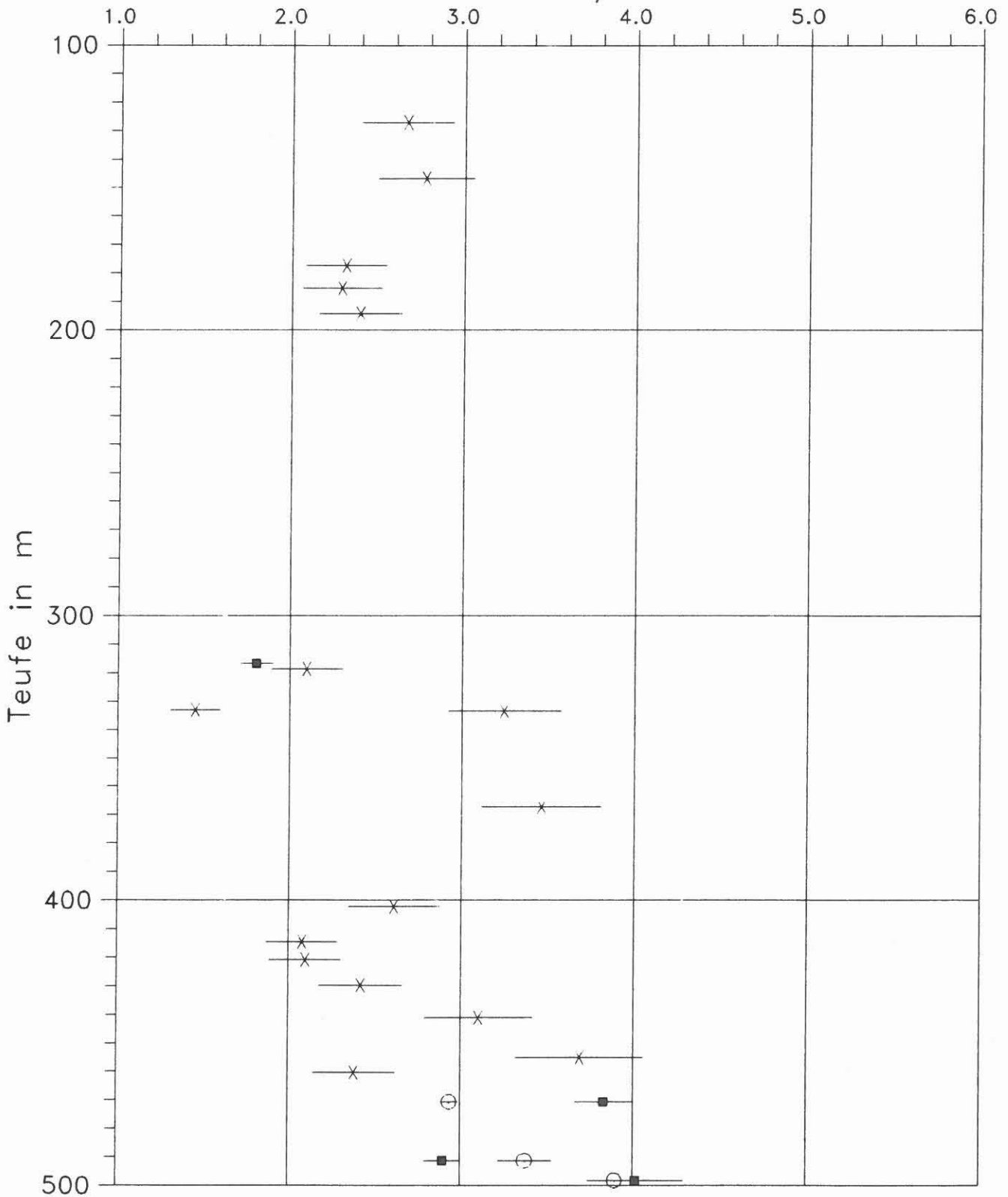


Abb.D.5.8 Wlf KTB VB 500 - 1000 m. ■ = in 90°/z-Ebene und o = in 0°/z-Ebene mit mittlerem quadratischen Fehler.

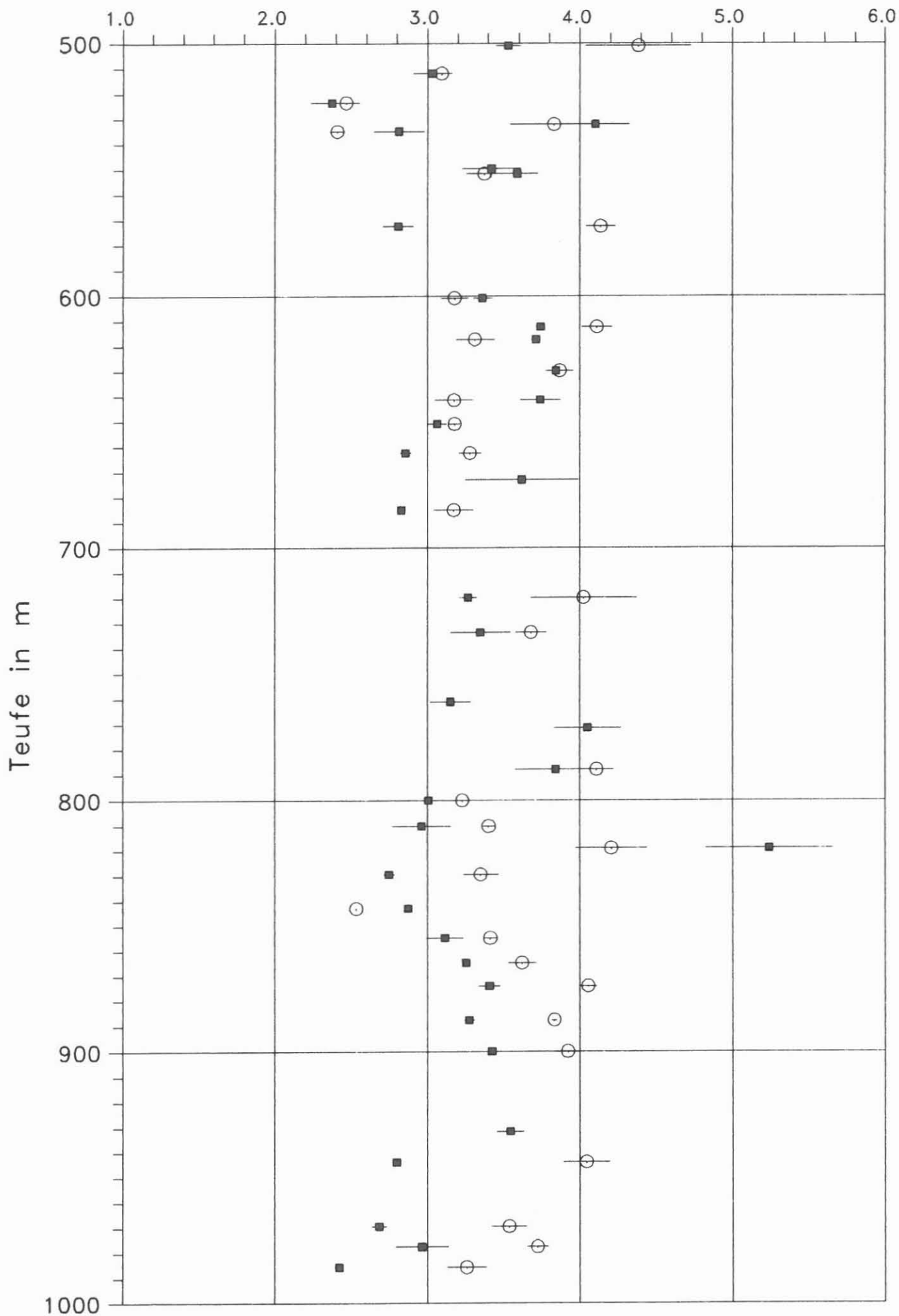
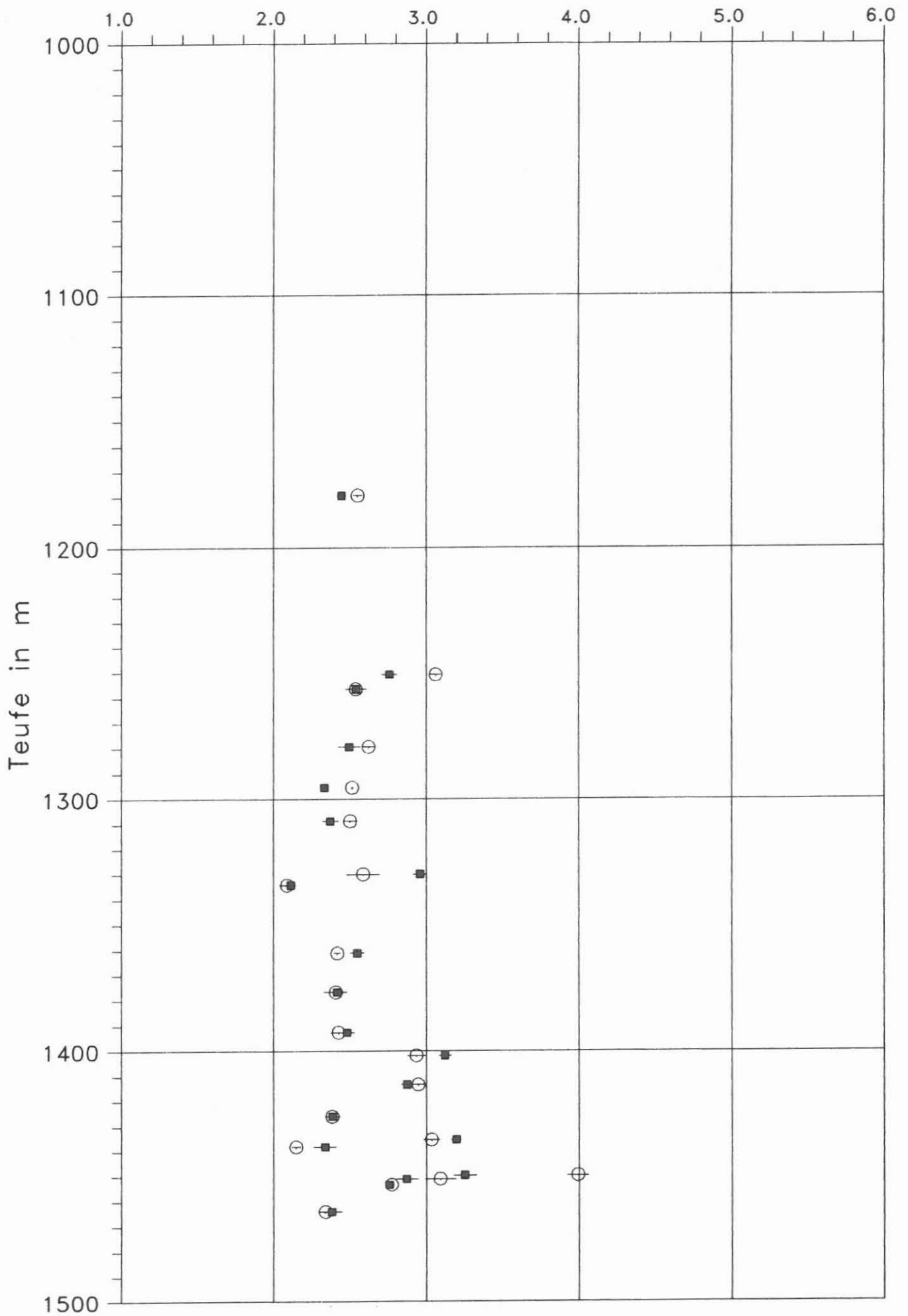


Abb.D.5.9 Wlf KTB VB 1000 - 1500 m. ■ = in 90°/z-Ebene und o = in 0°/z-Ebene mit mittlerem quadratischen Fehler.



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

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

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

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

D.6 Natürliche remanente Magnetisierung

D.6.1 Allgemeines

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

D.6.2 Beschreibung der Ergebnisse

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

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

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

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

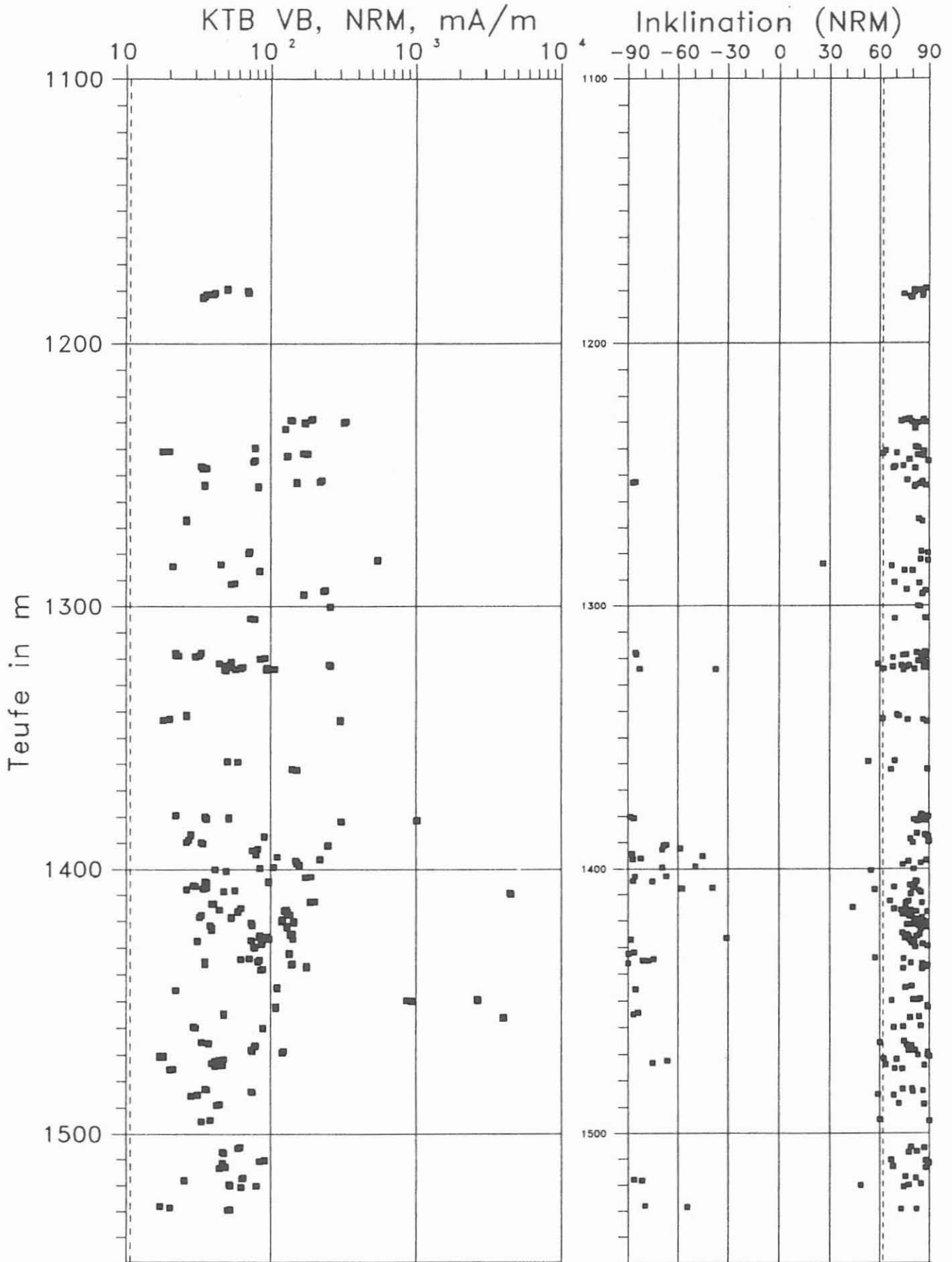


Abb. D.6.1: Teufenlog von natürlicher remanenter Magnetisierung (NRM) und der Inklination der NRM im Teufenabschnitt 1100-1530 m.

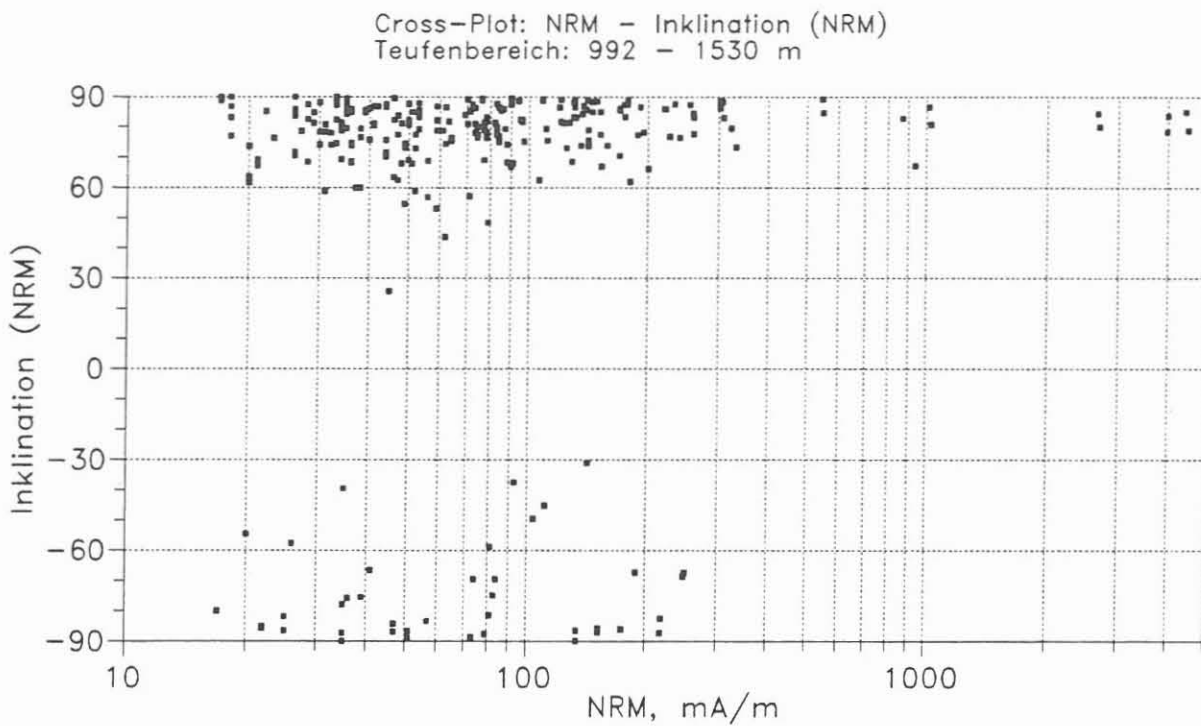


Abb. D.6.2 Abhängigkeit der natürlichen remanenten Magnetisierung von der Inklination der NRM. Steile sowie negative Inklinationen werden hauptsächlich bei schwacher Magnetisierung gemessen.

D.6.3 Königsberger Q-Faktor

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

$$M = M_I + M_R$$

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

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

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

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

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

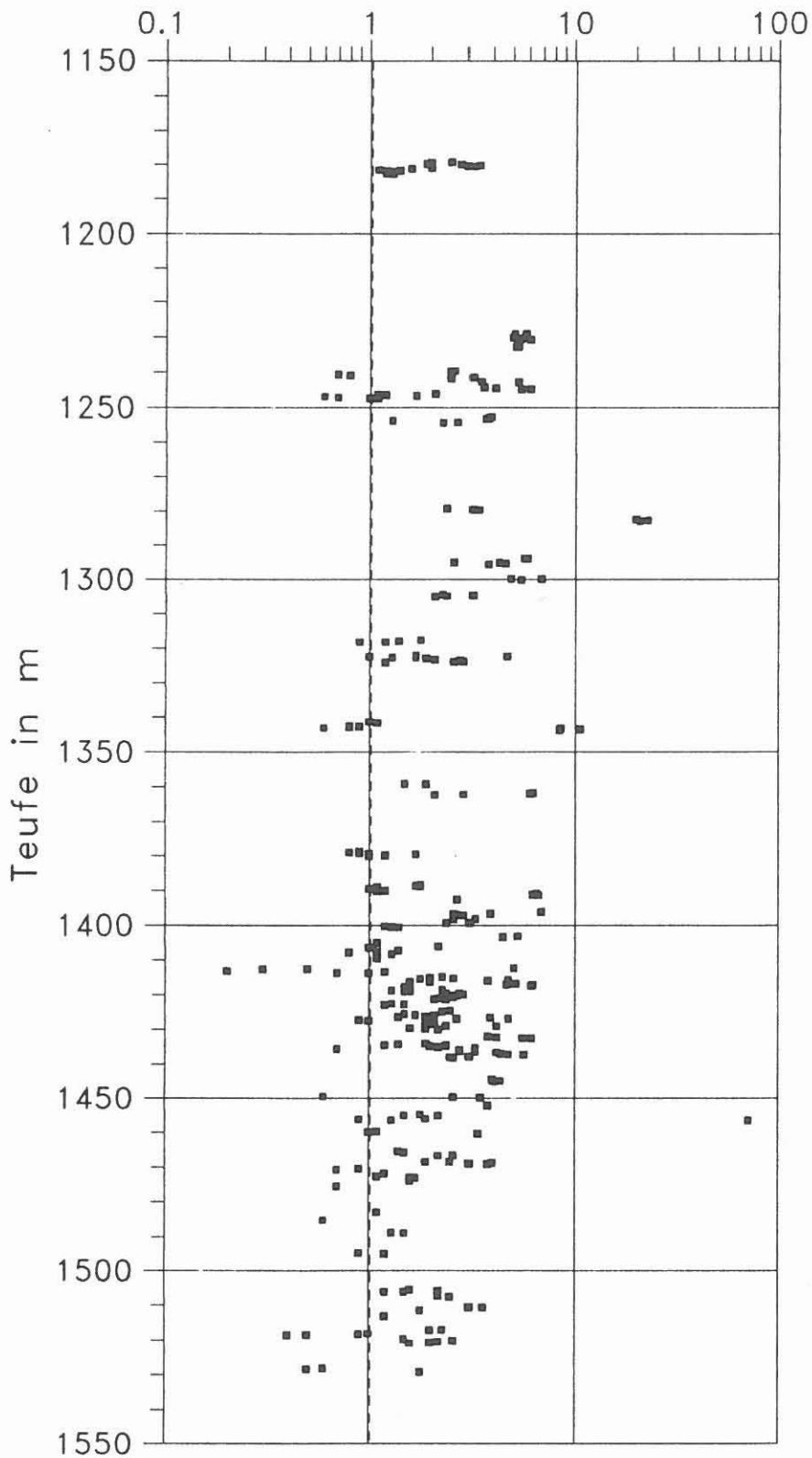


Abb. D.6.3: Teufenlog der Königsberger Q-Faktoren (Verhältnis von natürlicher remanenter zu natürlicher induzierter Magnetisierung).
(gestrichelte Linie: $Q = 1$)

D.7. Suszeptibilität

D.7.1 Allgemeines

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

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

D.7.2 Suszeptibilität von Bohrkleinproben

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

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

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

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

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

D.7.3 Suszeptibilität der Bohrkerne

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

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

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

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

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

D.7.4 Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrklein und Bohrkerne

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

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

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

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

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

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

D.7.5 Gegenüberstellung von Suszeptibilität und Dichte von Bohrkernen

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

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

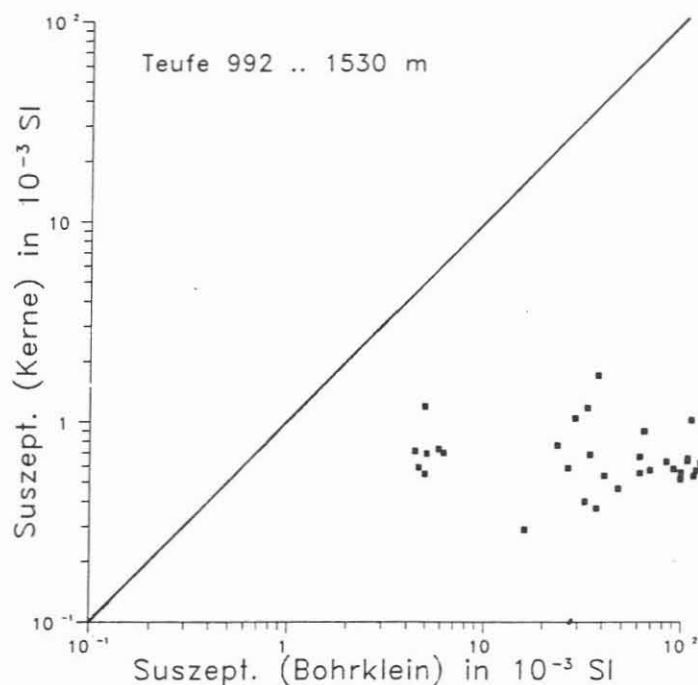


Abb. D.7.2 : Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkernen und Bohrklein. Die Werte der Kernmessungen wurden über etwa 1 m gemittelt und den Bohrklein-Werten der gleichen Teufe gegenübergestellt.

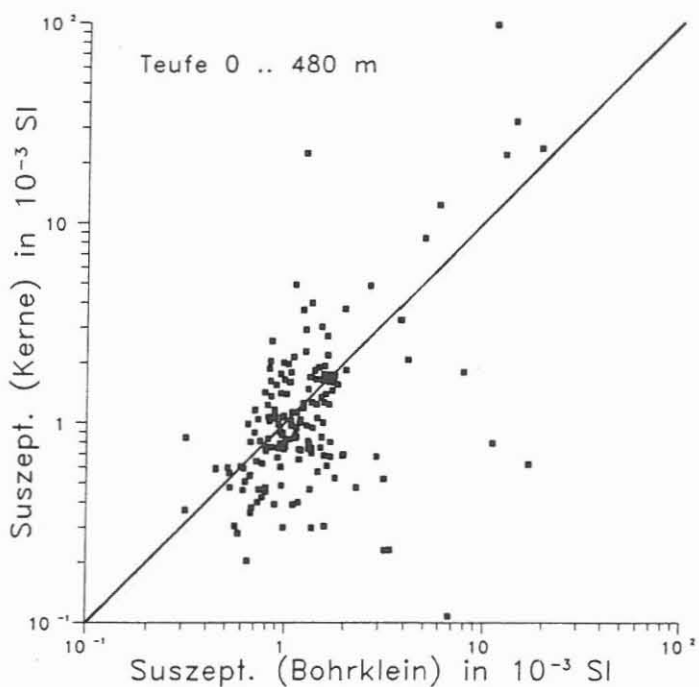


Abb. D.7.3 : Vergleich der Suszeptibilitäten von Bohrkernen und Bohrklein. Die Werte der Kernmessungen wurden über etwa 1 m gemittelt und den Bohrklein-Werten der gleichen Teufe gegenübergestellt.

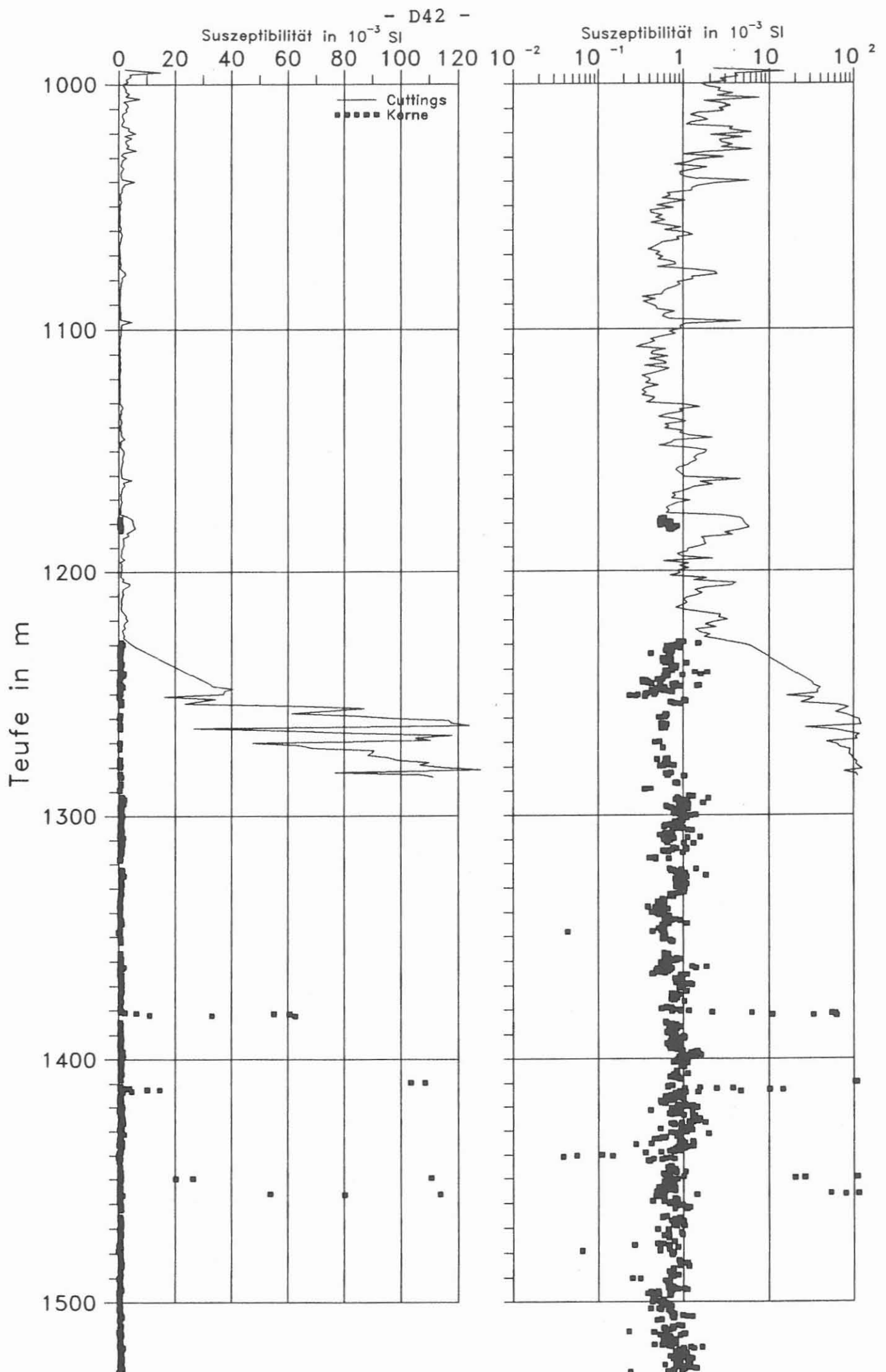


Abb. D.7.1: Suszeptibilität, gemessen an Bohrkernen und Bohrklein im Maßstab 1 : 2000

Cross-Plot Suszeptibilität-Dichte
Teufenbereich: 1000 – 1500 m

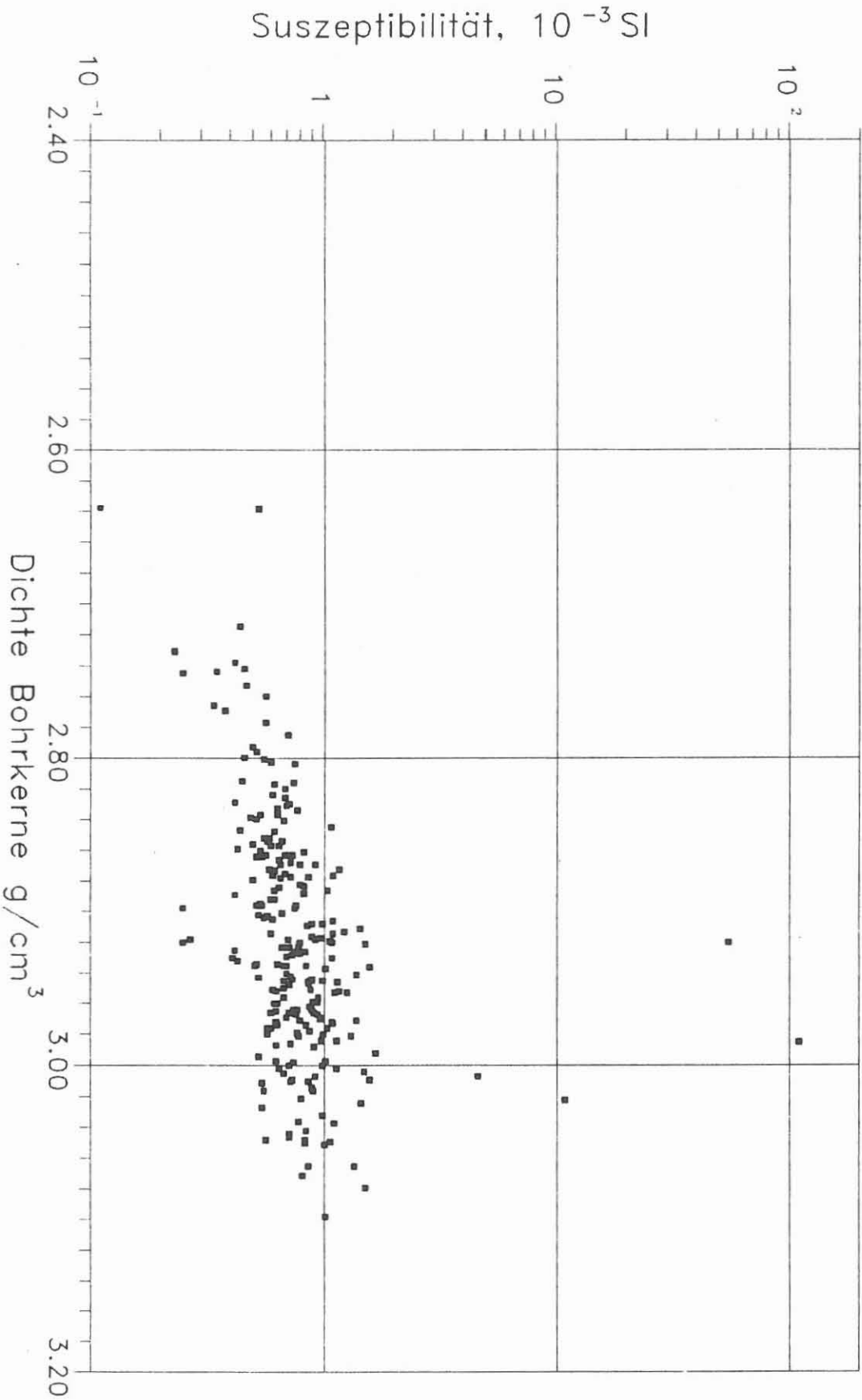


Abb. D.7.4 : Cross-Plot von Suszeptibilität gegen Dichte,
jeweils an den gleichen Kernstücken gemessen.

D.8 Danksagung

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

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

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

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

D.9 Schriftenverzeichnis

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

- KRISTIANSEN, Jan I. (1982): The Transient Cylindrical Probe Method for Determination of Thermal Parameters of Earth Materials. - Thesis; Department of Geology, Aarhus N, Denmark.
- PETERSEN, N. (1978): Glomar Challenger Drillings: The Magnetic Field Produced by the Drill and Drill String. In Dmitriev, L., Heirtzler, J. et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, v.46: p.377-378, Washington (U.S. Government Printing Office).
- WIENAND, J., Rauen, A., Eigner, K.-H., Bücken, C. & K.E. Wolter (1988): Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB, Ergebnisse der geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor, Teufenbereich 480-992 m: D. Geophysik.- KTB-Report 88-2: D1-D42, Hannover.
- WOHLENBERG, J. (1982): in Landolt-Börnstein, Band 1, Teilband a, Berlin, Heidelberg, New York.