

D. Geophysik

Tiefenbohrung KTB Oberpfalz VB-
Ergebnisse der Geowissenschaftlichen
Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windisch-
eschenbach), Teufenbereich: 2500–3009 m

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

KTB-Report	89-4	D1-D39	26 Abb.	Hannover 1989
------------	------	--------	---------	---------------

Tiefbohrung KTB-Oberpfalz VB, Ergebnisse der Geowissenschaftlichen Bohrungsbearbeitung im KTB-Feldlabor (Windischeschenbach), Teufenbereich: 2500 - 3009m.

D. Geophysik

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

Inhaltsverzeichnis:

D.1	Dichte.....	D02
D.2	Ultraschallseismik.....	D05
D.3	Wärmeleitfähigkeit.....	D10
D.4	Natürliche remanente Magnetisierung (NRM).....	D13
D.5	Suszeptibilität.....	D16
D.6	Elektrische Leitfähigkeit.....	D20
D.7	Relaxation.....	D24
D.8	Porosität.....	D30
D.9	Permeabilität.....	D32
D.10	Innere Oberfläche.....	D35
D.11	Literatur.....	D38

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

D.1 Dichte

D.1.1 Allgemeines

Im Teufenbereich von 2500 - 3009.7 m wurde die Dichte an 484 Bohrkernen und an 43 Cuttingsproben gemessen. Die Dichte der Bohrkernkerne wurde nach dem "Archimedischen Prinzip" bestimmt (BÜCKER et al., 1988), die Dichte der Cuttings mit dem Pyknometer (RAUEN et al., 1988). An den Seitenkernen, die in dem Bereich von 2648 - 2688 m gewonnen wurden, wurde die Dichte nach dem "Archimedischen Prinzip" gemessen. Dargestellt sind die Dichtewerte in Abb. D.1.1. Ebenfalls sind in der Abb. D.1.1 die Dichtewerte der Zentrifugenproben dargestellt, die mit Hilfe der RDA - Analytik ermittelt wurden (siehe KTB-Report 88-9, HOMANN et al., 1988).

D.1.2 Dichte der Cuttings

Im Teufenbereich von 2636 - 2683 m ergab sich eine mittlere Dichte von $2.82 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$. Die minimale Dichte von 2.75 g/cm^3 wurde an einer Probe aus 2641 m gemessen. Die maximale Dichte 2.97 g/cm^3 ergab eine Probe aus einer Teufe von 2666 m. Die Lithologie im hier betrachteten Bereich besteht aus Hornblende-Gneisen mit Amphibolit-Lagen, wodurch sich die relativ hohen Dichten erklären lassen.

D.1.3 Dichte der Kerne

Die Dichte in dem hier betrachteten Teufenabschnitt läßt sich in zwei Bereiche unterteilen. Im ersten Bereich von 2500 - 2690 m weist die Dichte eine starke Heterogenität mit einer Durchschnittsdichte von $2.82 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ auf. Lithologisch ist dieser Bereich durch eine Wechsellagerung von Hornblende-Gneisen mit untergeordneten Biotit-Gneisen und Amphiboliteinschaltungen gekennzeichnet. Unterhalb von 2690 m weisen die Dichtewerte eine Homogenität mit einer mittleren Dichte von $2.74 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$. Lithologisch handelt es sich hier vorwiegend um Biotit-Gneise mit wenigen Hornblende-Gneis-Einschaltungen. Die minimale Dichte (2.67 g/cm^3) ergab die Messung an einem Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis aus einer Teufe von 2809 m. Die maximale Dichte (3.04 g/cm^3) wurde einem Biotit-Hornblende-Gneis aus einer Teufe von 2567 m bestimmt. Vergleicht man die Dichtewerte der Kerne bzw. der Cuttings mit den Dichtewerten der Zentrifugen-Proben, so lassen sich hier ebenfalls die o.g. Teufenbereiche unterscheiden. Im oberen Bereich streuen die Dichtewerte der Zentrifugen-Proben ($2.83 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$) auch sehr stark, stimmen aber mit den Kern- bzw. Cuttingsdichten gut überein. Im zweiten Bereich liegen die Dichtewerte der Zentrifugen-Proben ($2.70 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$) systematisch unter den Kerndichten. Es wäre zu erwarten, daß die Dichten der Zentrifugen-Proben über den Dichtewerten der Kerndichten lie-

gen, da mit dem "Archimedischen Prinzip" die Totaldichte bestimmt wird, während mit Hilfe der RDA-Analytik die Matrixdichte bestimmt wird, die Porosität also unberücksichtigt bleibt. Im oberen Bereich trifft diese Erwartung auch zu. Die systematische Abweichung im zweiten Bereich läßt die Vermutung zu, daß mit der RDA-Analyse systematisch zu geringe Dichten ermittelt wurden. Dies kann darauf beruhen, daß der unter der Nachweisgrenze der RDA liegende Anteil schwerer Minerale (z.B. Granat, Pyrrhotin) bei der Dichteberechnung unberücksichtigt bleibt. Insbesondere unterhalb 2690 m werden im Litholog (vgl. Kapitel B) etwas höhere Granatgehalte beschrieben, so daß die Erklärung plausibel erscheint. Unterhalb von 2900 m deuten die NRM-Messungen (siehe Abschnitt D.4) auf erhöhte Pyrrhotin-Gehalte hin.

D.1.4 Dichte der Seitenkerne

Die Seitenkerne haben einen Durchmesser von ca. 1 Zoll und eine Länge von 2-5 cm und wurden aus dem Bereich der Richtbohrstrecke gewonnen. Die mittlere Dichte der 16 Seitenkerne beträgt $2.94 \pm 0.13 \text{ g/cm}^3$. Die maximale Dichte (3.14 g/cm^3) weist ein Amphibolit aus der Teufe von 2685.6 m auf. Die niedrigste Dichte (2.78 g/cm^3) hat ein Biotit-Hornblende-Gneis aus der Teufe von 2680 m. Die Amphibolite treten in diesem Bereich durch ihre deutlich höhere Dichte ($>3 \text{ g/cm}^3$) hervor. Die mittlere Dichte der Seitenkerne liegt auch deutlich über den mittleren Dichten der Cuttings und der Zentrifugen-Proben. Eine Erklärung hierfür ist, daß es sich bei den Cuttings bzw. Zentrifugen-Proben um Mischproben über einen Bereich von einigen Dezimetern handelt, während die Seitenkerne nur für einen sehr kleinen Bereich repräsentativ sind.

Die insgesamt hohen Dichtewerte deuten darauf hin, daß das hier beschriebene Bohrintervall noch in der ZEV steht.

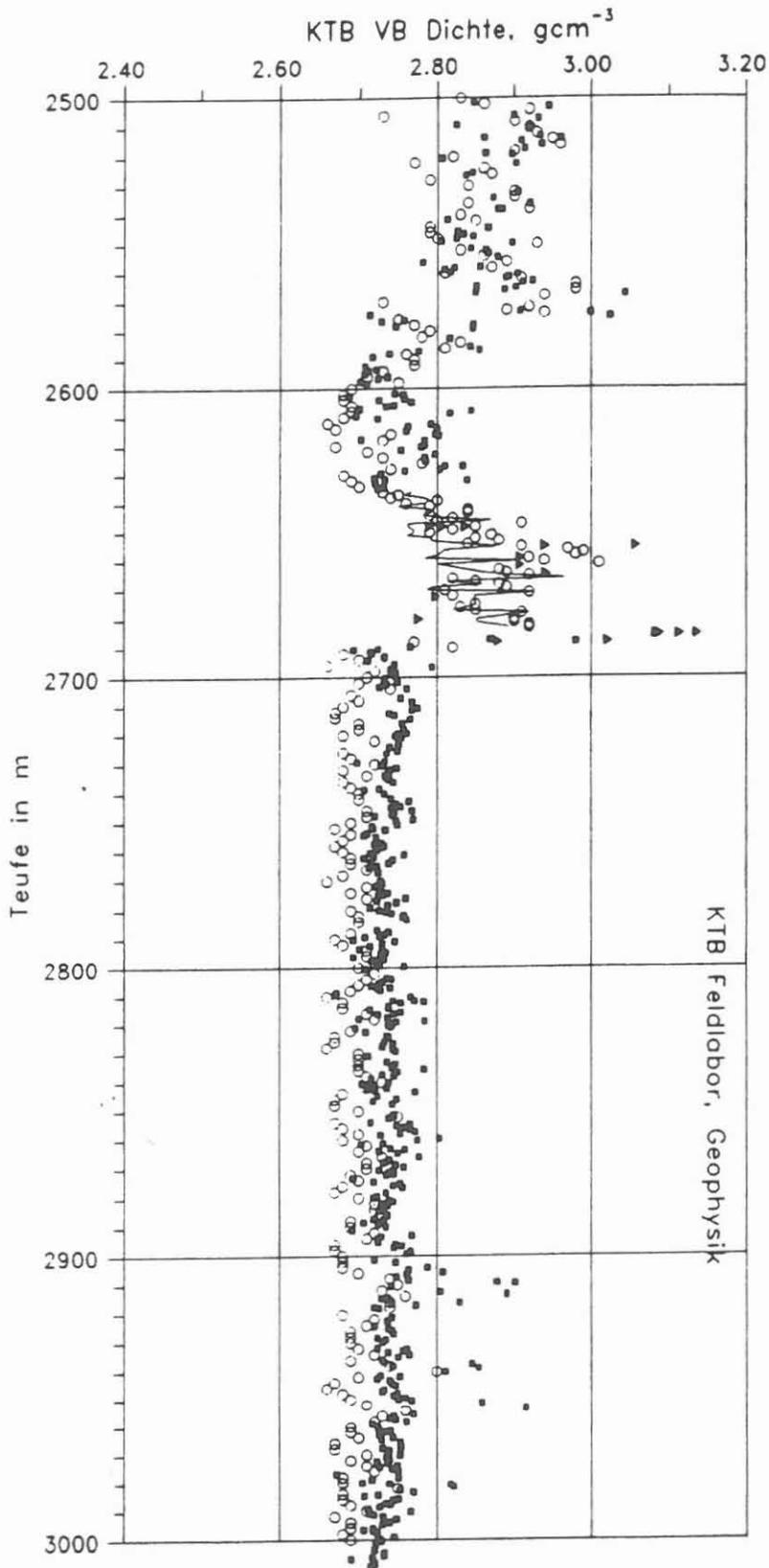


Abb. D.1.1: Teufenlog der Dichte
durchgezogene Linie: Cuttings
quadratische Punkte: Kerne
offene Kreise : Zentrifugen-Proben
Dreiecke : Seitenkerne

D.2 Ultraschallseismik

D.2.1 Allgemeines

Die Daten der Schallgeschwindigkeit im vorliegenden Teufenabschnitt wurden ausnahmslos mit der am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Uni München entwickelten Apparatur gewonnen (Beschreibung in HUENGES et al., 1989).

D.2.2 Ergebnisse

Abbildung D.2.1 zeigt die Ergebnisse der Radial-Durchschallungen an Bohrkernen. Es sind die maximalen an Bohrkernen beobachteten Geschwindigkeiten dargestellt, die immer in der Ebene der Foliation gemessen werden. Der Zusammenhang zwischen Lithologie und v_p ist undeutlich; nur sehr hohe Geschwindigkeiten von mehr als 6500 m/sec scheinen streng an das Auftreten von Hornblende-Gneisen und Amphiboliten gebunden zu sein.

In Abbildung D.2.2 werden die Ergebnisse der Messungen der p- und s-Wellen-Geschwindigkeit parallel zur Achse der Bohrkernkerne dargestellt. Nur diejenigen Ergebnisse werden gezeigt, die mit einer Abstandsvariation zwischen Sender und Empfänger über mehr als 80 mm erfaßt wurden (HUENGES et al., 1989). Diese Bedingung eliminiert unzuverlässige Messungen an Kernen mit starker Absorption der Schallenergie parallel zur Achse der Kerne. Auffällig ist die niedrige Datendichte im Teufenbereich unterhalb der Richtbohrstrecke bis etwa 2870 m, die nur durch die schlechte Qualität der Daten bedingt ist - ein möglicher Hinweis auf Mikroriß-Häufung im Kernmaterial in diesem Bereich.

Abbildung D.2.3 zeigt den gemessenen Zusammenhang zwischen axialen p- und s-Wellen-Geschwindigkeiten. Zur Berechnung des Korrelations-Koeffizienten wurden die unter verschiedenen Polarisationswinkeln relativ zur Foliation gemessenen s-Wellen-Geschwindigkeiten gemittelt. Auffällig ist, daß v_p/v_s nicht konstant ist. Dieses Verhältnis ist umso höher, je niedriger v_p liegt. (Wertebereich für v_p/v_s : 1.70-1.96).

Aus Abb. D.2.4 ist ein nur sehr undeutlicher Zusammenhang zwischen Dichte und p-Wellen-Geschwindigkeit zu erkennen (Korrelations-Koeffizient: 0.5). Geschwindigkeiten größer als 6500 m/sec wurden jedoch ausschließlich bei Gesteinen mit Dichten höher als 2.8 g/cm³ gemessen.

Abb. D.2.5 zeigt die Anisotropie der gemessenen p-Wellen-Geschwindigkeiten (zur Definition siehe LIPPMANN et al., 1988). Auffallend hohe Anisotropien von mehr als 30 % wurden innerhalb eines Granat-Sillimanit-Biotit - Gneises bei 2720 m beobachtet.

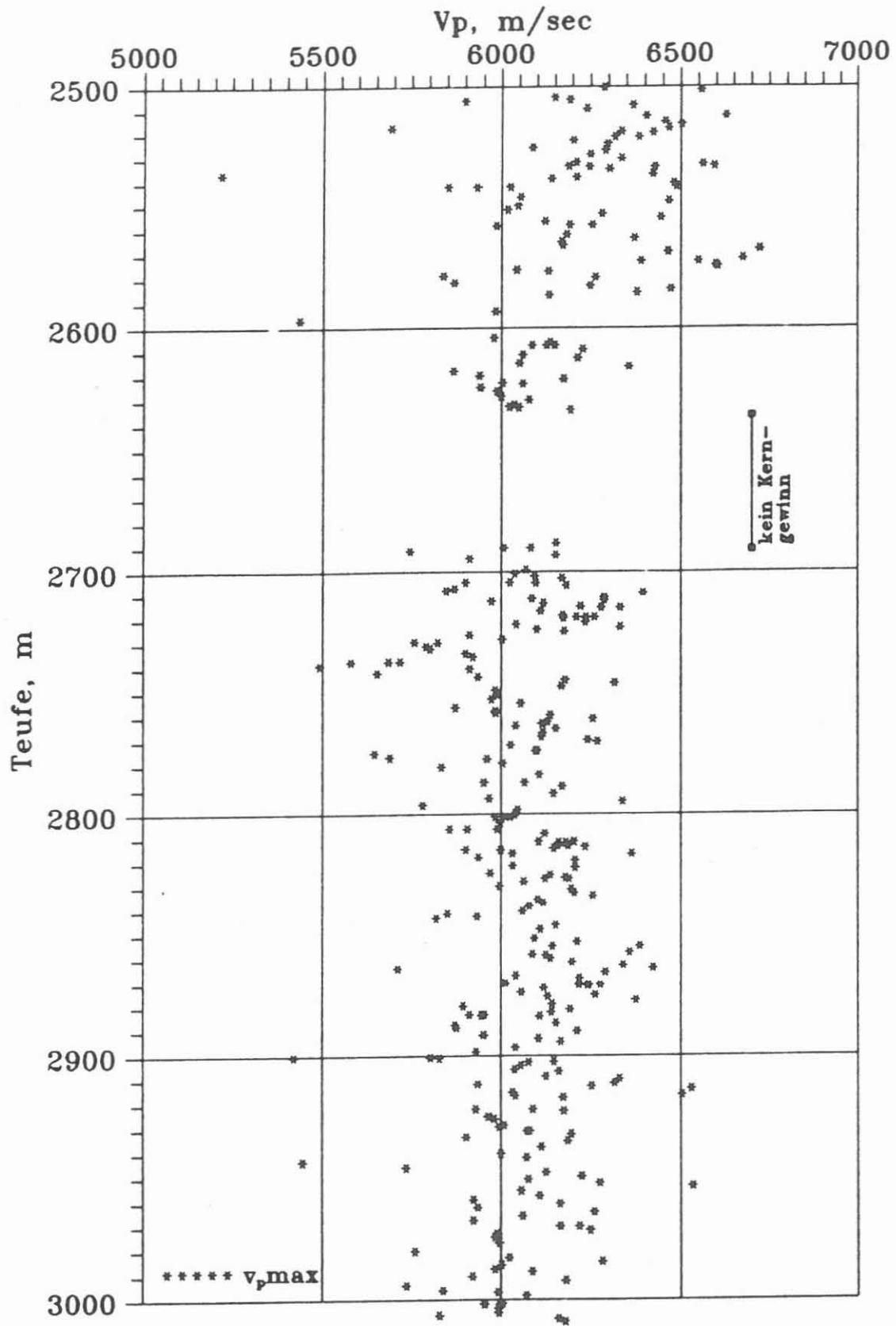


Abb. D.2.1: Teufenlog der radialen p-Wellen-Geschwindigkeiten, Maximalwerte

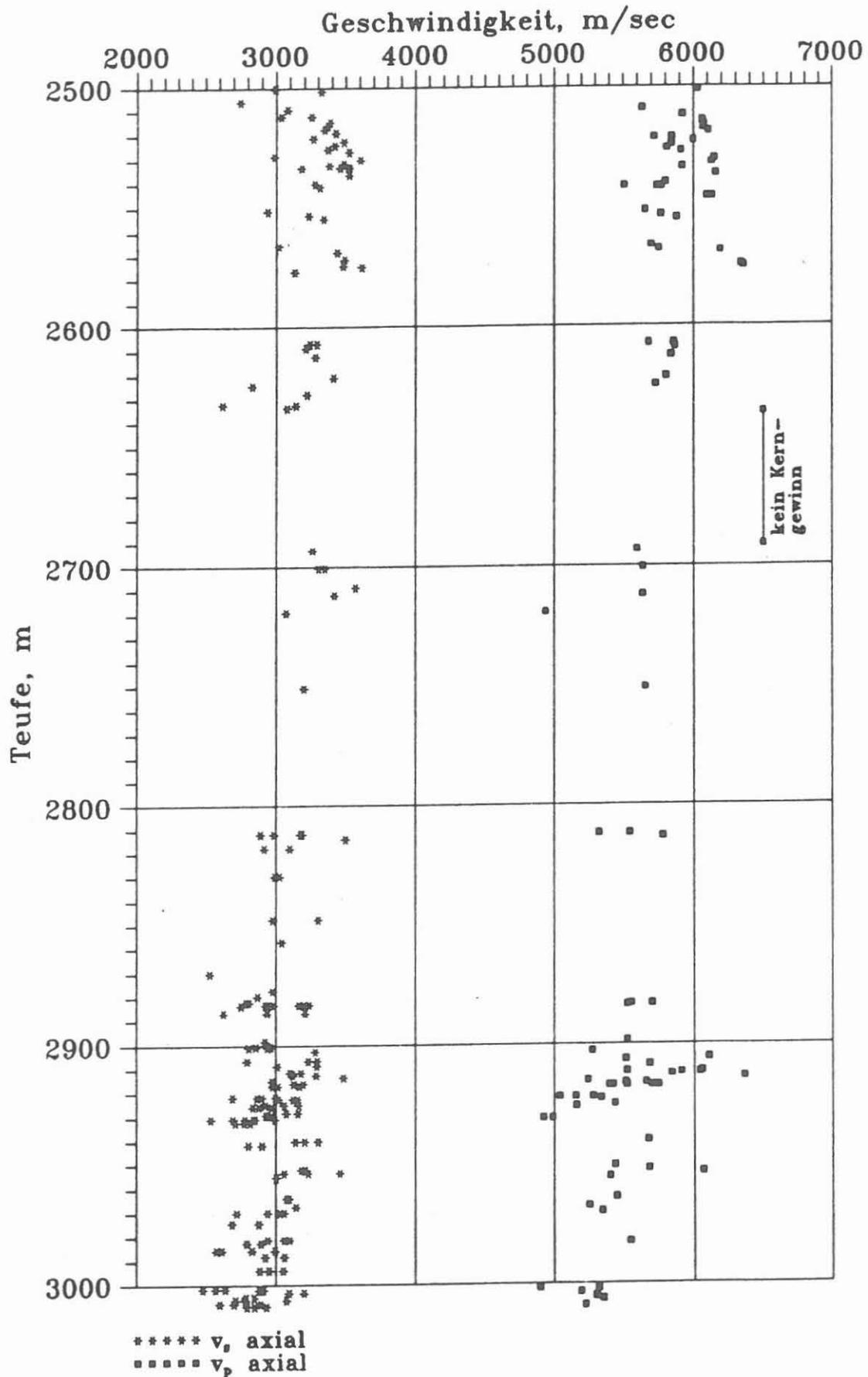


Abb.D.2.2: p- und s-Wellen-Geschwindigkeit parallel zur Achse der Bohrkerne

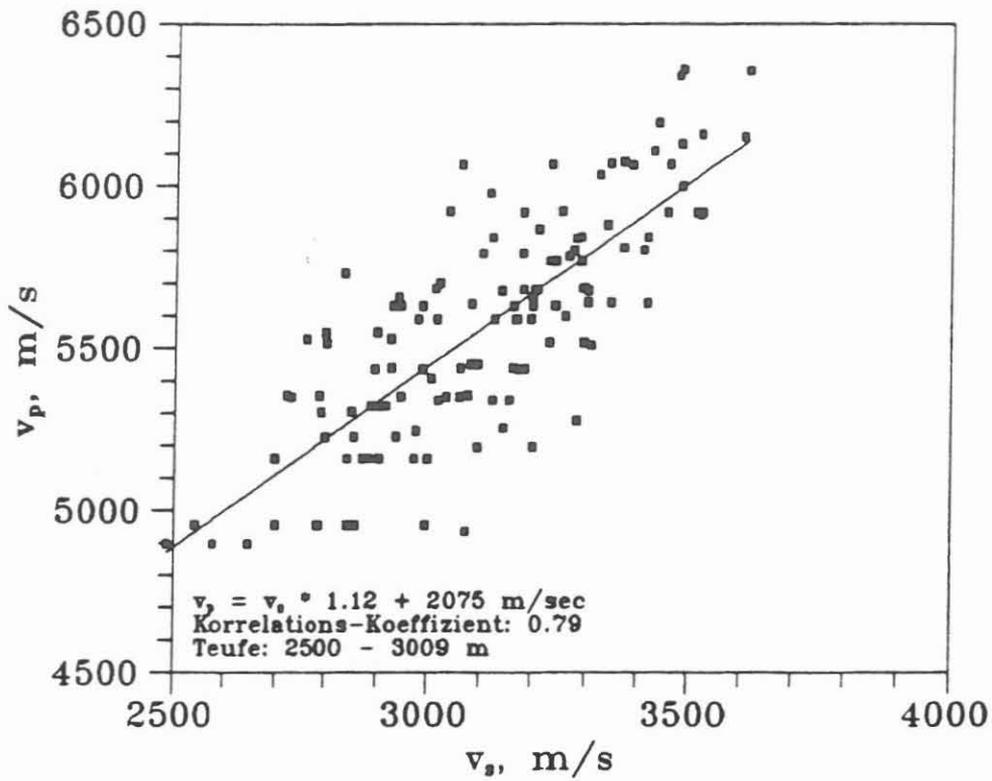


Abb. D.2.3: Zusammenhang zwischen axialen p- und s-Wellen-Geschwindigkeiten.

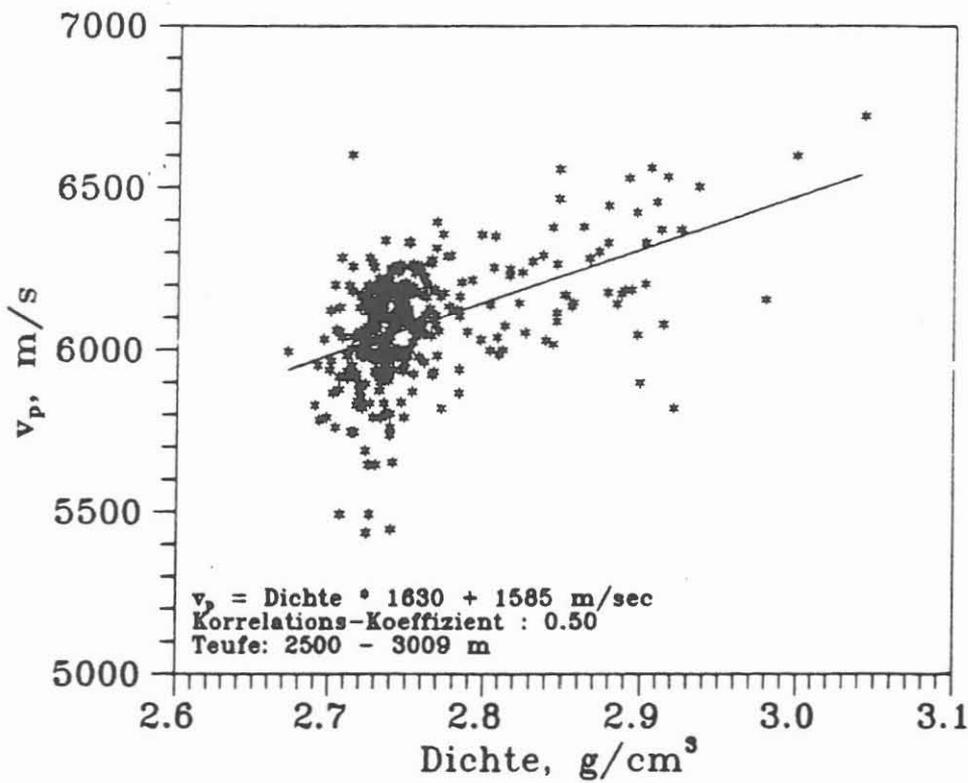


Abb. D.2.4: Zusammenhang zwischen v_p und Dichte

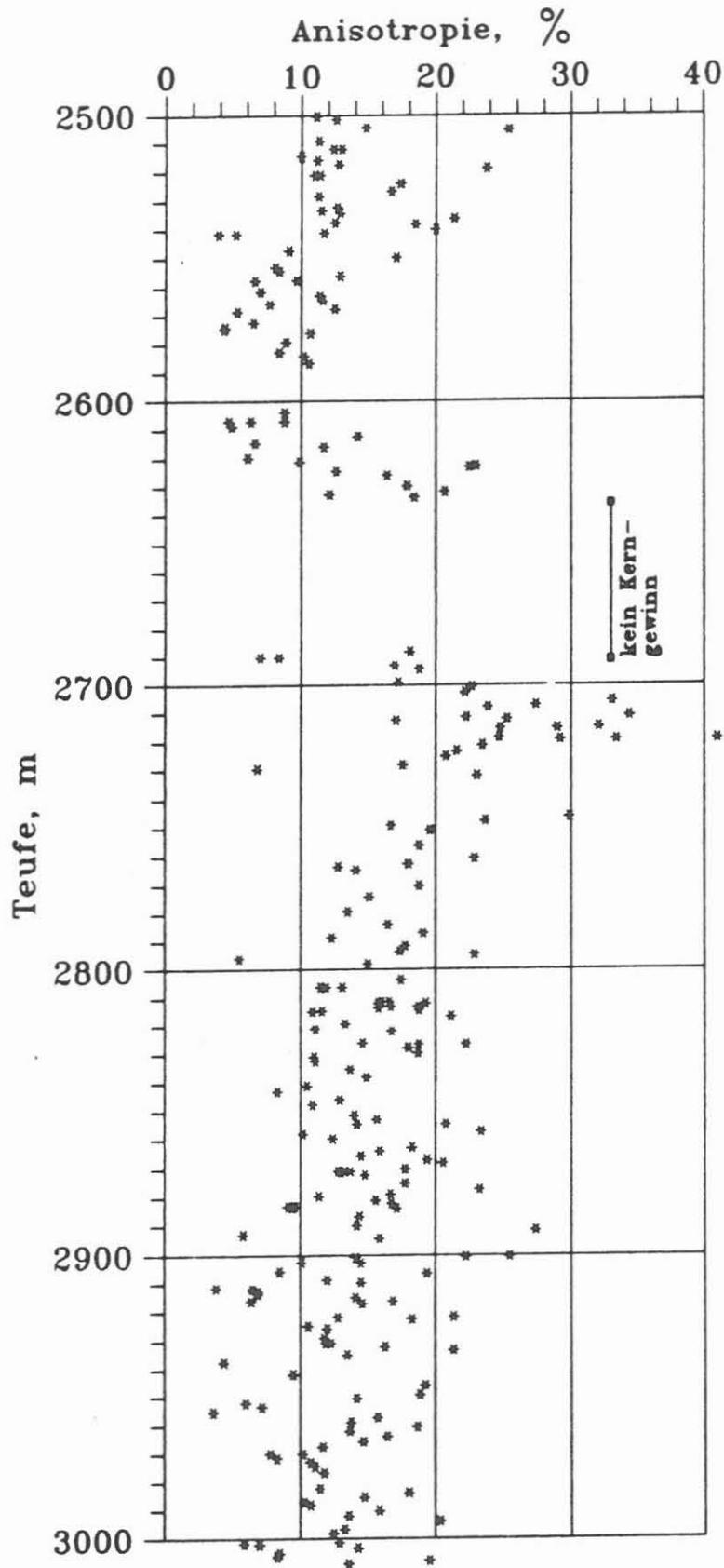


Abb. D.2.5: Anisotropie der radialen p-Wellen-Geschwindigkeit

D.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit und deren Anisotropie wurde ca. alle 5 m an Bohrkernen der Strecke zwischen 2500 und 3000 m mit dem bei HUENGES et al. (1989) beschriebenen Verfahren gemessen und bestimmt. Abb. D.3.1 zeigt die Meßdaten, ermittelt, wie oben beschrieben, in 3 senkrecht zueinander stehenden Richtungen auf den Bohrkernen. Bis 2570 m wurden zumeist niedrigere Werte gemessen. Dies kann auf den Mineralbestand mit schwankendem, aber niedrigem Quarzgehalt unter 30 % zurückgeführt werden (rechte Spalte; siehe Kapitel C dieses Reportes). Weitere Minima im Quarzgehalt wurden zwischen 2630 und 2700 m und zwischen 2900 und 2930 m gemessen. Sie korrelieren schwach mit Minima im Wärmeleitfähigkeitslog (Abb. D.3.1).

Unterhalb 2570 m wurden hauptsächlich Gesteine mit Gneis-Textur erbohrt, deren Wärmeleitfähigkeit in Hinblick auf die Struktur betrachtet werden muß. Zur genaueren Untersuchung wurden daher unter Benutzung der von der Arbeitsgruppe Geologie ermittelten Einfallswinkel und -richtungen der Foliation die Tensorelemente k_{11} und k_{33} der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Foliation ermittelt. In Abb. D.3.2 ist oben die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten parallel und senkrecht zur Foliation dargestellt. Man beobachtet eine deutliche Anisotropie mit 3.4 (7) W/m K parallel und 2.7 (5) W/m K (in Klammern die Standardabweichung bezogen auf die letzte Ziffer) senkrecht zur Foliation.

Abb. D.3.2 stellt unten die Wärmeleitfähigkeit in Richtung Bohrkernachse dar. Betrachtet man die Zonen mit annähernd gleichem Quarzgehalt, so fällt auf, daß die Wärmeleitfähigkeit zwischen 2720 m und 2900 m abfällt. Im gleichen Teufenabschnitt wurde eine schrittweise Verringerung des Einfallwinkels der Foliation beobachtet (rechte Spalte). Diese Korrelation zwischen Erniedrigung der Wärmeleitfähigkeit und Verflachung der Foliation setzt sich unterhalb 2900 m nicht fort. Beobachtet wurden zwischen 2900 und 3010 m vermehrt flaserige Gneise (siehe Gefügevarietätenlog im Kapitel B dieses Reportes). Diese Flaserung ist Ursache für einen verminderten Einfluß der Foliation. Weitere Abweichungen von der o.g. Korrelation werden mit den schon erwähnten niedrigen Quarzgehalten erklärt.

Abb. D.3.1 Wärmeleitfähigkeit von KTB-VB-Kernen. Die Signaturen geben jeweils einen Mittelwert mit mittlerem Fehler aus 5 Wiederholungsmessungen in einer Ebene an, die durch jeweils 2 Richtungen 0°, 90° zur Referenzlinie oder z = Bohrkernachse aufgespannt werden. Rechts Quarzgehalt in Gew.-% aus Z- und Cuttings-Messungen (nach Kapitel C dieses Reportes).

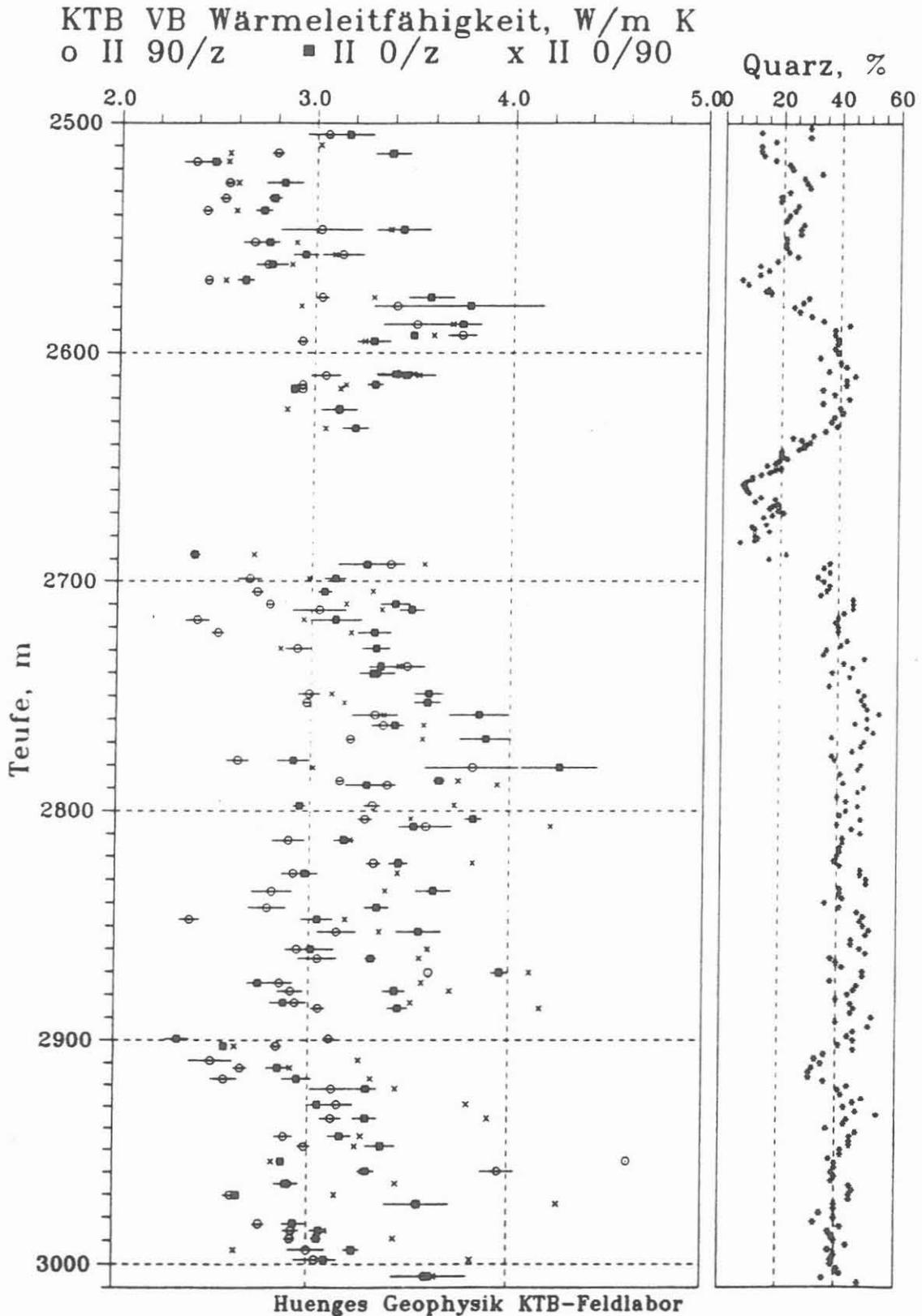
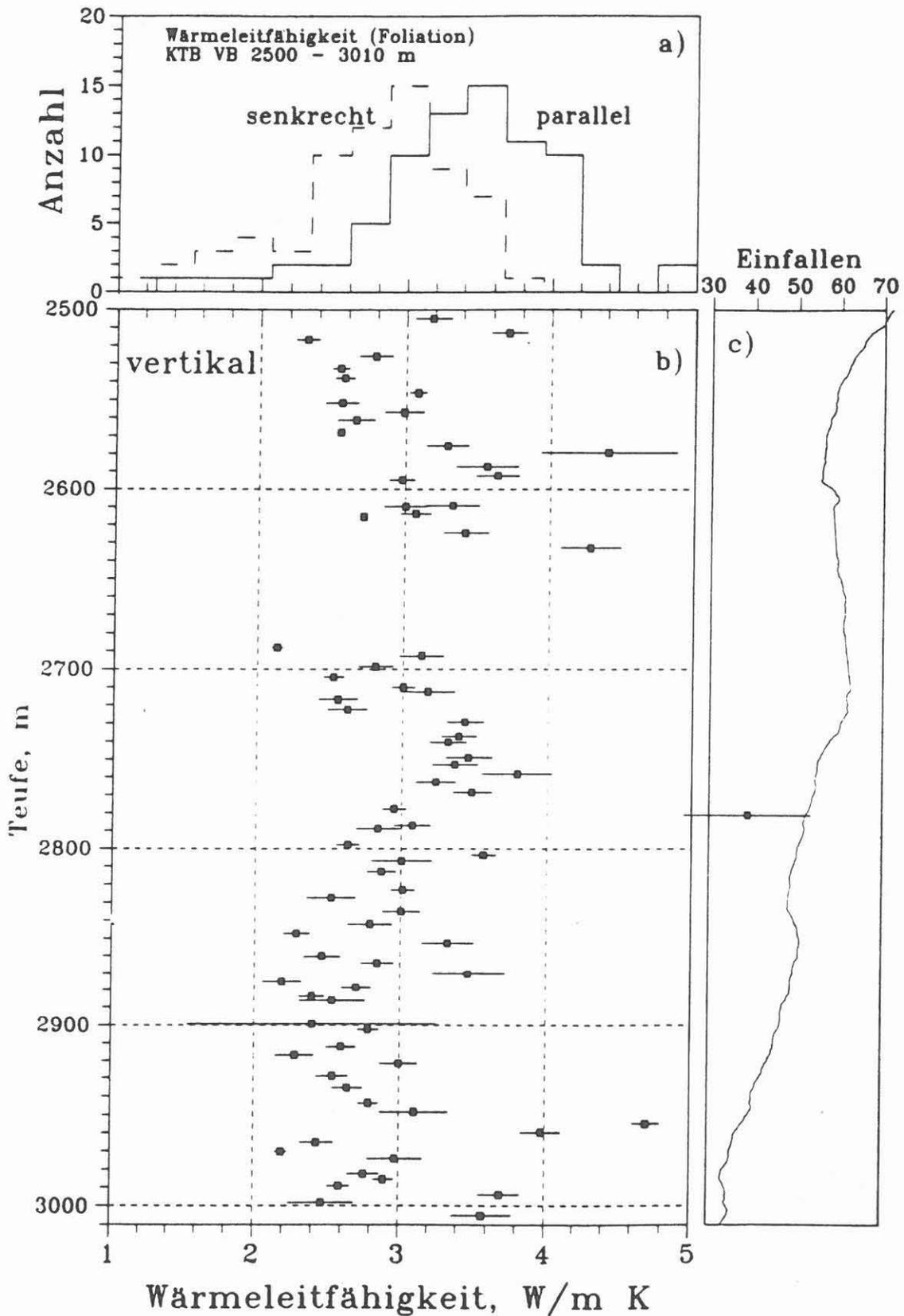


Abb. D.3.2 Transformierte Wärmeleitfähigkeitswerte:
a) Häufigkeitsverteilung parallel und senkrecht zur Foliation; b) parallel zur Bohrkernachse; c) Einfallswinkel der Foliation.



D.4 Natürliche remanente Magnetisierung (NRM)

D.4.1 Teufenlog der NRM

In dem hier betrachteten Teufenabschnitt konnten an 130 Bohrkernstücken (KM 611 - 736) Messungen der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM) vorgenommen werden. Dies entspricht im Mittel etwa einer Messung alle drei Meter. Dabei wurden in Teufenbereichen, in denen sich magnetische Anomalien abzeichneten, die Messungen dichter vorgenommen.

Das Teufenlog der NRM (Abb. D.4.1) läßt sich aufgrund der Magnetisierungswerte grob in vier Abschnitte unterteilen. Im ersten Abschnitt von 2500 - 2630 m wurden hohe Remanenzen mit Spitzenwerten bis zu 5000 mAm^{-1} gemessen. Daran schließt sich ein Bereich mit schwachen Magnetisierungswerten um 15 mAm^{-1} bis 2900 m an. Unterhalb von 2900 bis 2960 m liegen die NRM-Werte wieder relativ hoch bis zu 3000 mAm^{-1} . Von 2960 m bis 3010 m sind die Magnetisierungswerte deutlich kleiner als 100 mAm^{-1} .

Lithologisch wird der erste Abschnitt von 2500 - 2630 m als auch der dritte Abschnitt von 2900 - 2960 m durch eine Wechselfolge von Amphibolit und Hornblende-Biotit-Gneisen bzw. Granat-Sillimanit-Biotit-Gneisen beschrieben (vgl. Kap. B in diesem Report). Träger der Magnetisierung ist im ersten Abschnitt hauptsächlich Pyrrhotin (neben untergeordneten Magnetit-Einschaltungen), im Abschnitt von 2900 - 2960 m konnte auch Magnetit im Anschliff identifiziert werden (vgl. Kap. B).

Im Zusammenhang mit dem Gefügevarietätenlog (Abb. D.4.1, rechter Teil) ist auffallend, daß hohe Magnetisierungswerte fast ausnahmslos in foliierten Biotit-Hornblende-Gneisen vorkommen und mit einem post-metablastisch deformierten Gefüge korreliert werden können. Die strafflagig-mylonitischen Gefügevarietäten des Sillimanit-Biotit-Gneises stehen in diesem Teufenabschnitt fast durchweg in Zusammenhang mit niedrigen NRM-Werten $< 100 \text{ mAm}^{-1}$. Inwieweit über größere Teufenabschnitte ein Zusammenhang zwischen Gefüge und Magnetisierungswerten zu finden ist, muß noch näher untersucht werden. Diese Untersuchungen könnten aber Aufschluß über die Entstehung der Magnetisierung und einen möglichen Zusammenhang mit der Genese dieser Gesteine bringen.

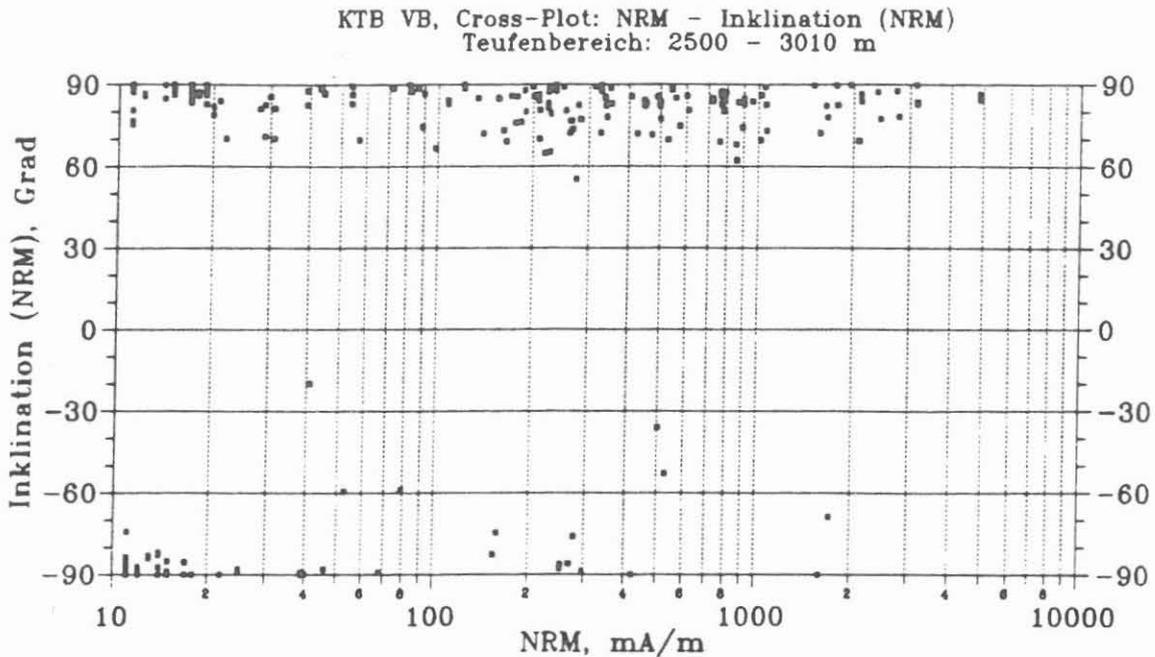


Abb. D.4.2: Zusammenhang zwischen der Inklination der NRM und den Magnetisierungswerten. Negative Inklinationen wurden fast ausnahmslos bei niedrigen NRM-Werten bestimmt.

D.4.2 Inklination der NRM

Die Inklination der NRM ist, wie bereits in den vorhergehenden Teufenabschnitten, steil mit sowohl positivem als auch negativem Vorzeichen. Die hier bestimmten Inklinationenwerte liegen im Mittel zwischen 60° und 90° . Negative Inklinationen konnten wieder hauptsächlich bei schwachen Magnetisierungswerten ermittelt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abb. D.4.2 deutlich zu sehen.

Da davon ausgegangen werden muß, daß die Inklination der NRM durch den Bohrprozeß (drilling induced remanent magnetization, DIRM) beeinflusst wird, soll hier auf weitere Interpretationen verzichtet werden. Detailuntersuchungen hierzu laufen bereits am Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik der Universität München.

D.5 Magnetische Suszeptibilität

D.5.1 Allgemeines

In den Teufenbereichen von 2500 m bis 2635 m und von 2687 m bis 3009.7 m konnten Messungen an Bohrkernen mit 1 cm Meßpunktabstand ausgeführt werden. Im dazwischenliegenden Richtbohrabschnitt von 2635 m bis 2687 m wurde die Suszeptibilität an getrocknetem Cuttingsmaterial in 1 m-Abständen bestimmt. Die Meßverfahren sind bei BÜCKER et al. (1988 und 1989) beschrieben.

D.5.2 Das Teufenlog der magnetischen Suszeptibilität

Abb. D.5.1 zeigt die Suszeptibilität, gemessen an Bohrkernen und Cuttings. Die Cuttings-Daten streuen wesentlich stärker und erreichen höhere Werte, was durch Gehalte an metallischem Abrieb zu erklären ist (siehe hierzu LIPPMANN et al., 1988). Sie sind daher als wenig aussagekräftig anzusehen.

Die Kern-Suszeptibilitäten streuen weniger stark. Aus der Häufigkeitsverteilung (Abb. D.5.2) lassen sich 0.3 bis $0.4 \cdot 10^{-3}$ SI-Einheiten als charakteristische Suszeptibilität für den behandelten Teufenbereich ablesen. Dieser Wert wird in etwa über weite Bereiche in den Gneisen wechselnder Zusammensetzung gemessen, so auch zwischen 2700 m und 2900 m. Daraus ergibt sich eine mittlere induzierte Magnetisierung von $\approx 13.4 \cdot 10^{-3}$ A/m (nach $M_{ind} = \chi \cdot 38.2$ A/m für die magnetische Breite der Oberpfalz).

Es fallen einige Teufenabschnitte erhöhter Suszeptibilität auf. Zwischen 2505 m und 2560 m wurden neben Bio-Hbl-Gneisen auch Amphibolite in Wechselfolge erbohrt. Weitere positive Anomalien wurden registriert: um 2575 m (Bio-Hbl-Gneis), von 2620 m bis 2630 m (Sil-Bio-Gneis), um 2910 m (Gnt-Bio-Hbl-Gneis), um 2940 m (Bio-Hbl-Gneis) und bei 2955 m. Die letztgenannte Anomalie (siehe auch Abb. D.5.5 und D.5.6) wird durch eine ganz lokale Magnetit-Anreicherung an der Grenze zwischen Bio-Hbl-Gneis und Sil-Bio-Gneis verursacht. (Zur Petrologie siehe auch Kapitel B im gleichen Band).

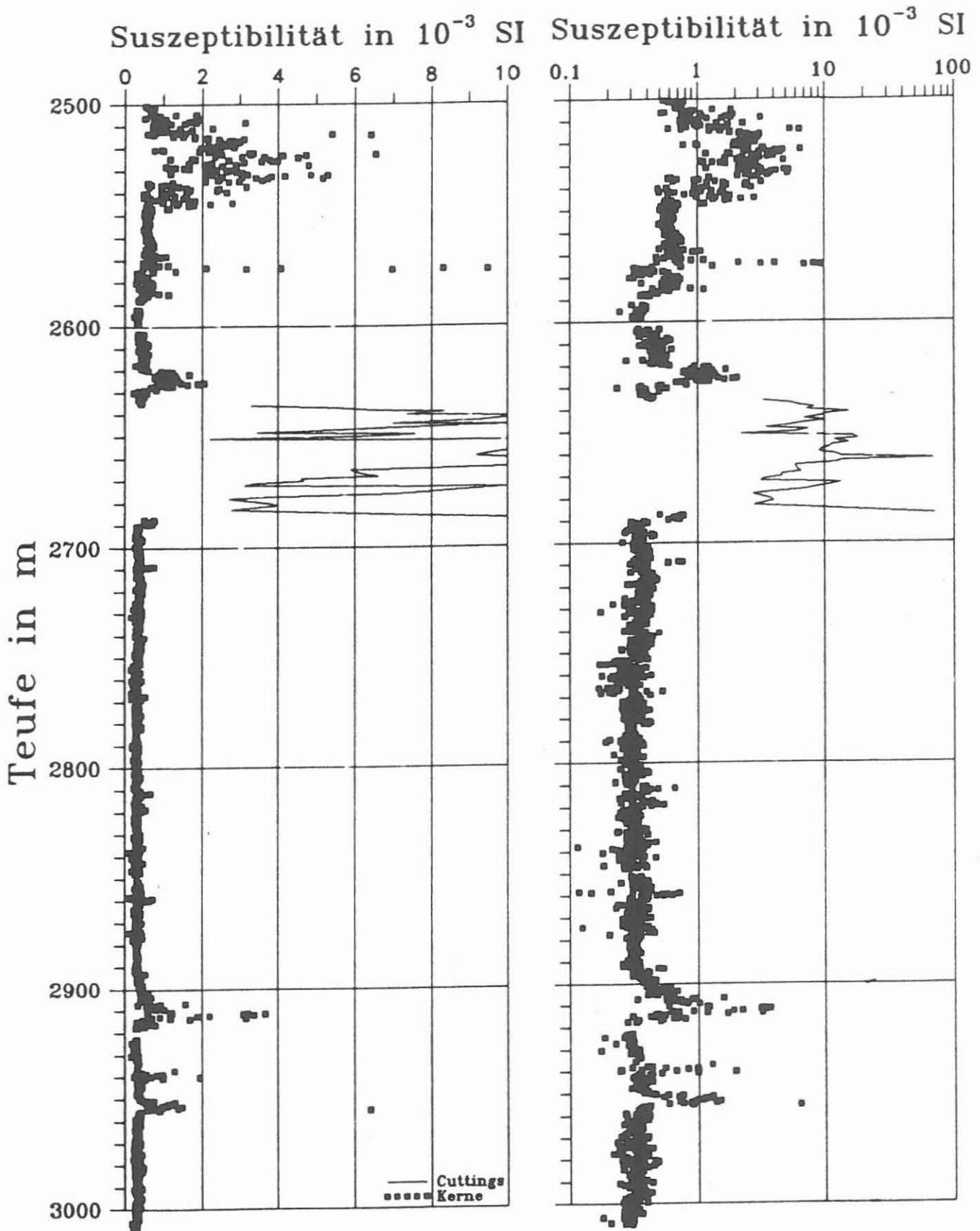


Abb. D.5.1: Teufenlog der magnetischen Suszeptibilität in linearer und logarithmischer Darstellung.

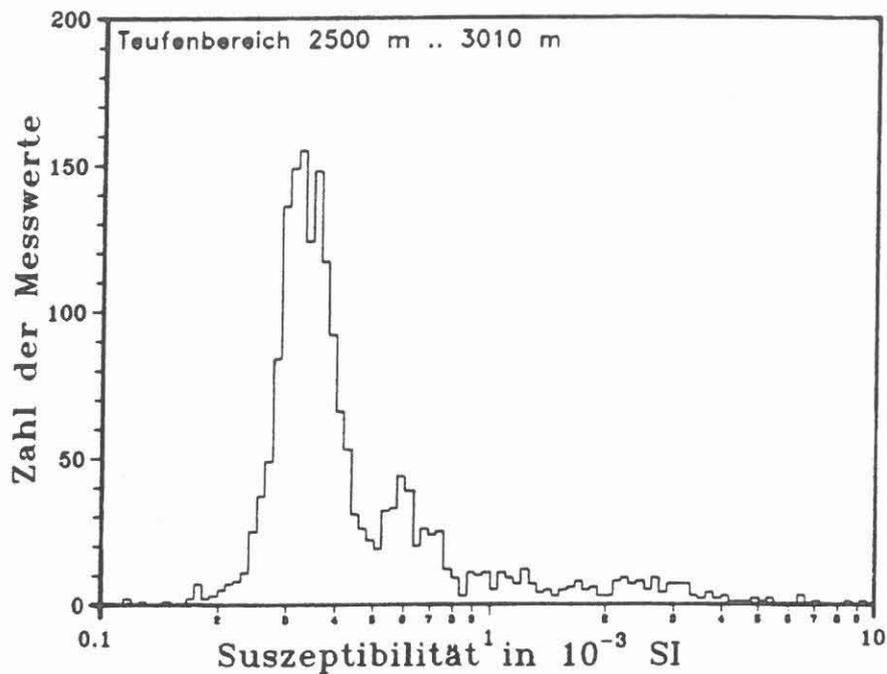


Abb.D.5.2: Häufigkeitsverteilung der Suszeptibilität in 100 logarithmisch eingeteilten Suszeptibilitäts-Intervallen von (0.1 bis 10) * 10⁻³ SI.

D.5.3 Beispiele für Suszeptibilitätsvariationen an einzelnen Kernen

In Abb. D.5.3 ist ein Meßprofil über ein Kernstück aus Biotit-Hornblende-Gneis gezeigt. Aus Suszeptibilitätswerten von etwa $0.5 \cdot 10^{-3}$ SI ragt ein Maximum bis etwa $7.5 \cdot 10^{-3}$ SI-Einheiten (um 2513.8 m Teufe) hervor. An dieser Stelle war bereits makroskopisch Pyrrhotin zu erkennen. Erzmikroskopische Untersuchungen konnten keine weiteren magnetischen Mineral-Komponenten (insbesondere keinen Magnetit) nachweisen. In Abb. D.5.4 ist ein Foto eines Anschliffes aus dem Bereich der Anomalie gezeigt.

In der Abb. D.5.5 ist ein weiteres Meßbeispiel gezeigt, das aus der im letzten Abschnitt genannten Anomalie stammt (also aus dem Grenzbereich zwischen Bio-Hbl-Gneis und Sil-Bio-Gneis bei 2955 m Teufe). Auch hier fällt ein eng begrenzter Peak der Suszeptibilität (bis $6.5 \cdot 10^{-3}$ SI) um die Teufe 2955.2 m auf. Diese Suszeptibilitäts-Anomalie gab den Ausschlag für die Probenahme für einen Anschliff (siehe hierzu eine Aufnahme in Abb. D.5.6). Erzmikroskopisch konnte Magnetit als eine der Haupt-Erzphasen nachgewiesen werden, welcher in den Gneisen dieses Teufenbereichs (im Gegensatz zu denen der ersten 500 m) zum ersten Mal auftrat (siehe auch Kapitel "Erzmikroskopie").

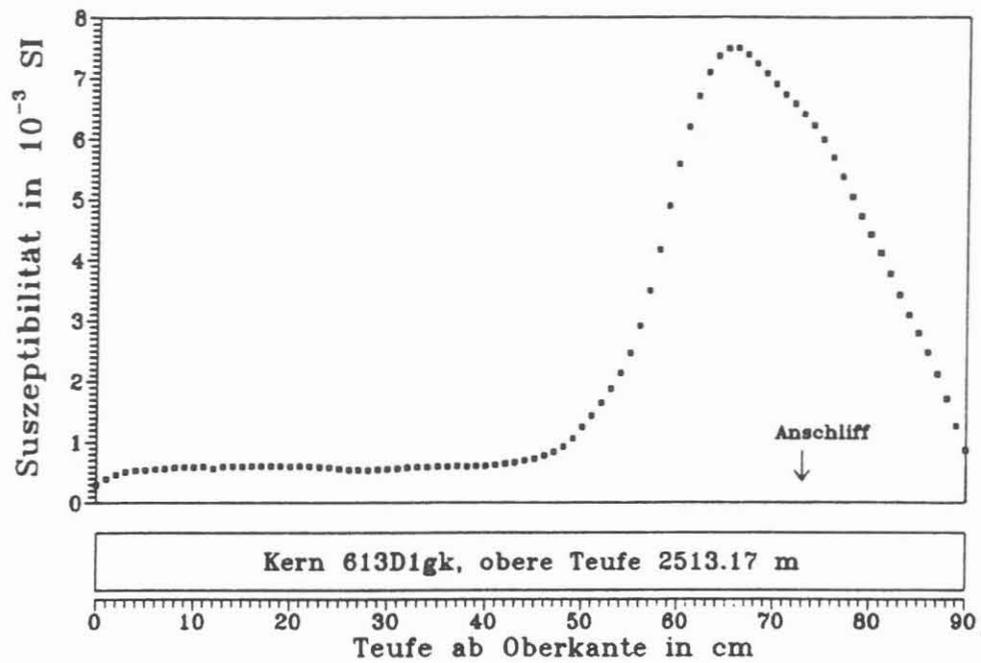


Abb. D.5.3: Meßprofil über einen 90 cm langen Bohrkern (Bio-Hbl-Gneis). Das Suszeptibilitäts-Maximum bei 65 cm unter Kopf des Kernstücks ist durch Pyrrhotin verursacht (siehe: Abb. D.5.4).

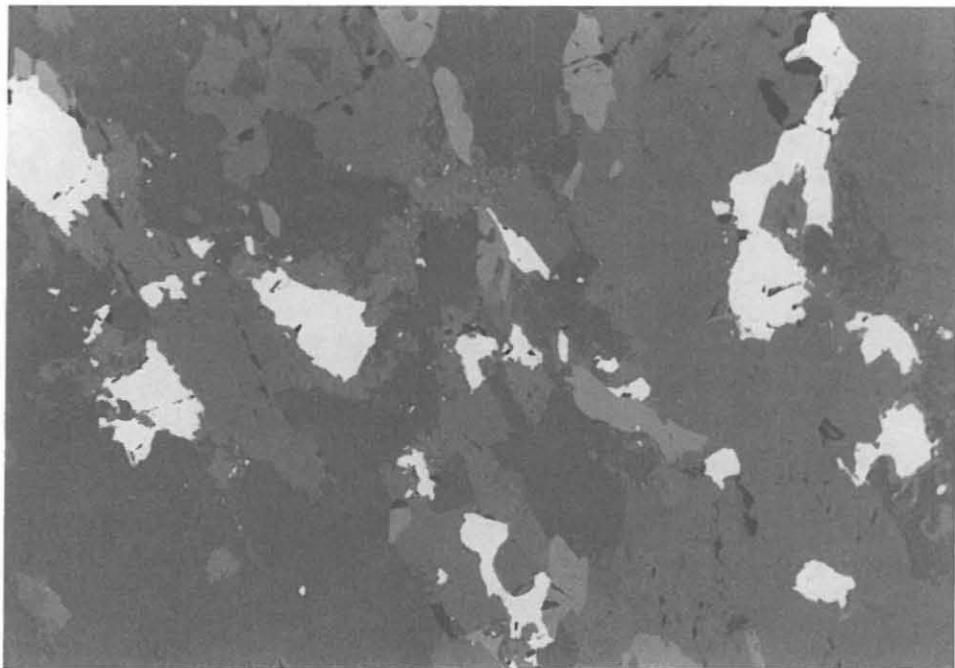


Abb. D.5.4: Anschliff aus dem Bereich, der in Abb. D.5.3 gekennzeichnet ist. Feinstkörnige Pyrrhotin-Körner in Bio-Hbl-Gneis (713D1gK; 2513.9m; Luft, 1 Nicol, lange Bildkante: 3.6 mm)

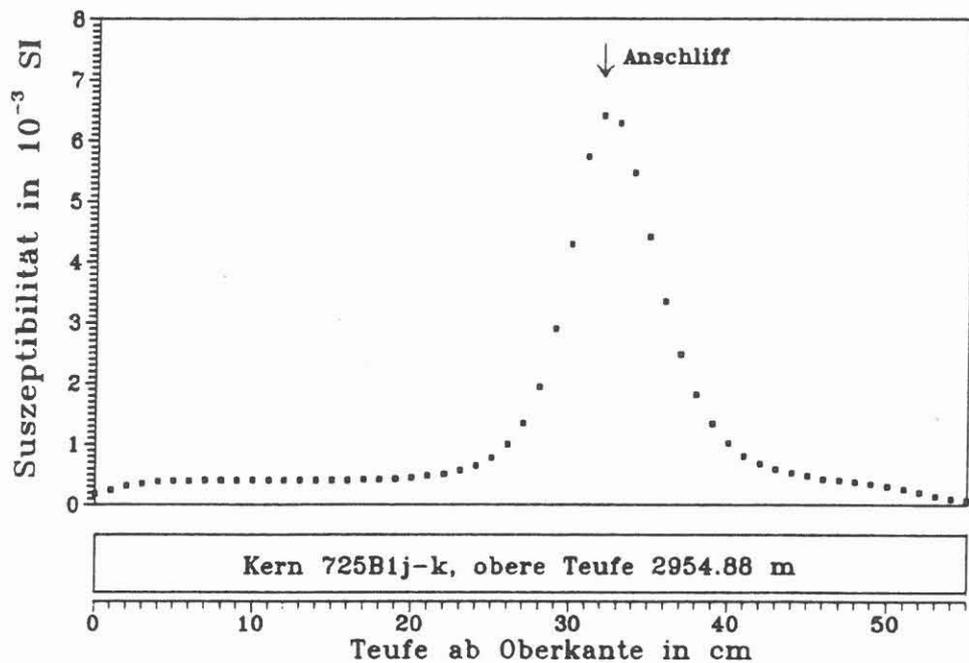


Abb. D.5.5: Meßprofil über einen 55 cm langen Bohrkern. Das eng begrenzte Suszeptibilitäts-Maximum 32 cm unter Kopf des Kerns ist durch erzmikroskopisch nachgewiesenen Magnetit verursacht (Abb. D.5.6).



Abb. D.5.6: Anschliff aus dem oben (Abb. D.5.5) gekennzeichneten Bereich. Streifiger Magnetit (hellgrau) ist in Buchten und Hohlräumen von Pyrit (weißlich-grau) eingelagert (725B1jK; 2955.9 m; Luft, 1 Nicol, lange Bildkante: 3.6 mm).

D.6 Elektrische Leitfähigkeit

D.6.1 Allgemeines

Es konnten 286 Bohrkernstücke vermessen werden. Aus 12 Einzelmessungen pro Probe wurden Mittelwert und Standardabweichung des spezifischen elektrischen Widerstandes berechnet. Die Meßapparatur besteht im Prinzip aus einer 4-Pol-Elektrodenanordnung (miniaturisierte Anordnung nach Wenner), mit nachfolgendem Meßverstärker. Vor der Messung wurden alle Bohrkernstücke für ca. 24 Stunden gewässert. Näheres zur Meßanordnung und Behandlung der Proben ist bei HUENGES et al. (1989) nachzulesen.

D.6.2 Ergebnisse

Über die gesamte Berichtsstrecke wurden fast ausschließlich Gneise wechselnder Zusammensetzung erbohrt. Die Verteilung der Daten (Abb. D.6.1) entspricht in etwa einer logarithmischen Normal-Verteilung, wie sie bereits für die ersten 2500 m Bohrstrecke beschrieben wurde (siehe BÜCKER et al., 1989). Eine derartige Verteilung legt eine Mittelwertbildung der Logarithmen der Meßwerte nahe. Eine solche logarithmische Mittelung wurde auch in den ersten 2500 Metern auf die teufenabhängigen Daten angewandt (siehe BÜCKER et al., 1989).

Aus dem Teufenlog (Abb. D.6.3) lassen sich anhand der Widerstandswerte zwei unterschiedliche Bereiche herauslesen. Im Teufenbereich bis zur Richtbohrung (2500 m bis 2635 m) schwanken die Widerstände stärker; die Extremwerte sind 1160 Ωm bei 2505.9 m Teufe und 84 $\text{k}\Omega\text{m}$ in der Teufe 2585.4 m. Der logarithmische Mittelwert ist 8550 Ωm .

Unterhalb von 2687 m bis 3009.7 m Teufe streuen die gemessenen Widerstände weniger stark als im oberen Bereich um einen logarithmischen Mittelwert von 5010 Ωm . Die kleinsten Widerstände wurden bei 2870.05 m Teufe registriert. Der (arithmetische) Mittelwert an diesem einen Kernstück beträgt 810 Ωm bei Einzelmessungen bis hinunter zu 60 Ωm (siehe Abb. D.6.2). Das entsprechende Kernstück führt Graphit.

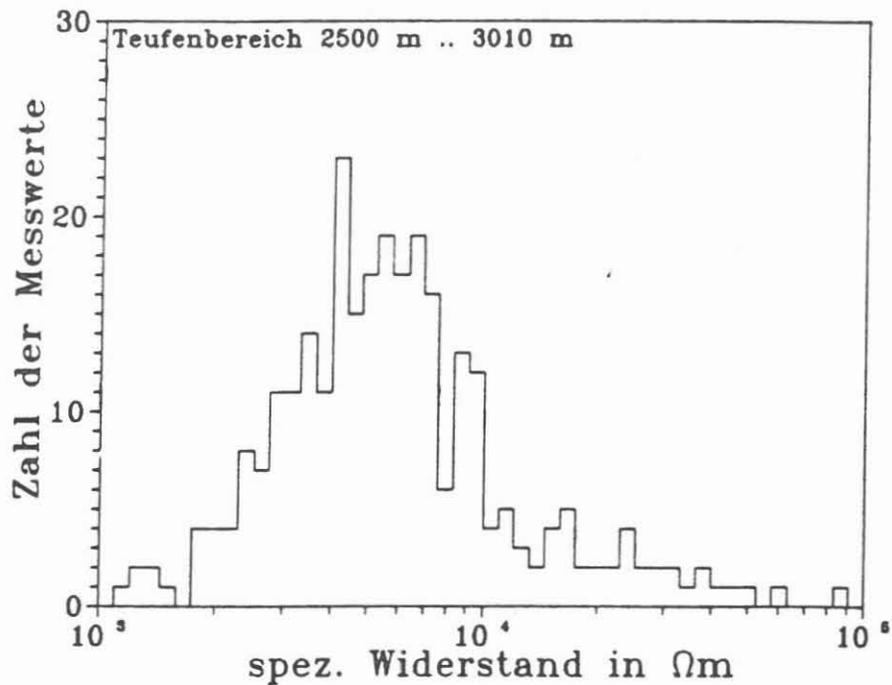


Abb. D.6.1: Verteilung des Widerstandes im Teufenbereich von 2500 m bis 3009.7 m. Das Widerstandsintervall von $10^3 \Omega\text{m}$ bis $10^5 \Omega\text{m}$ wurde logarithmisch in 50 gleiche Teilintervalle zerlegt.

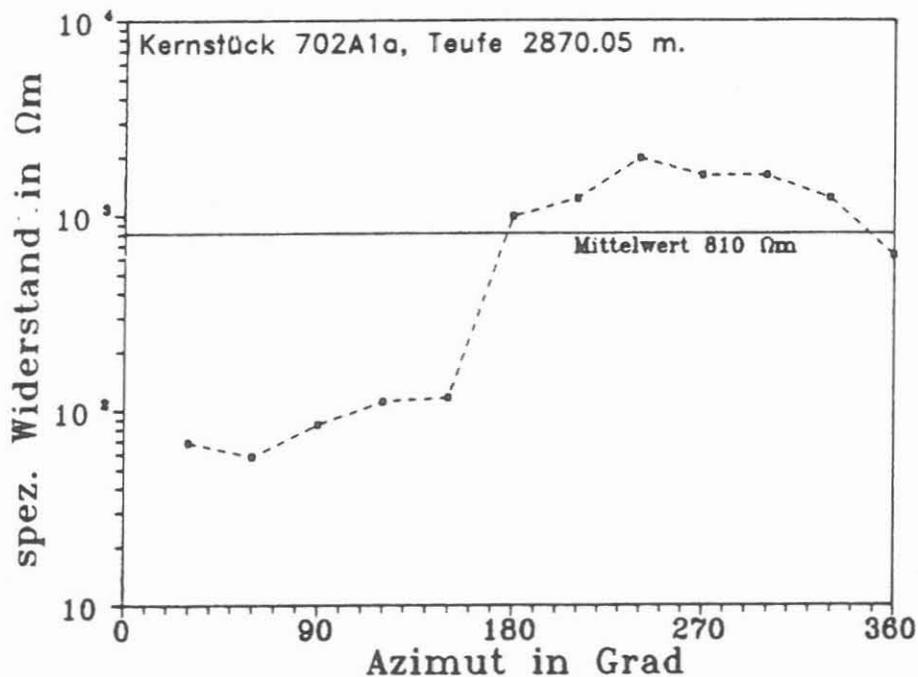


Abb. D.6.2: Beispiel für eine Widerstandsmessung mit einer 4-Pol-Elektrodenanordnung auf der Kernmantelfläche (Meßprinzip bei HUENGES et al., 1989). Der Kern 702A1a ist ein kataklastisch überprägter Gneis mit Graphit-Gehalt. Der Graphit ist wahrscheinlich für die Widerstandserniedrigung um 90° Azimut verantwortlich.

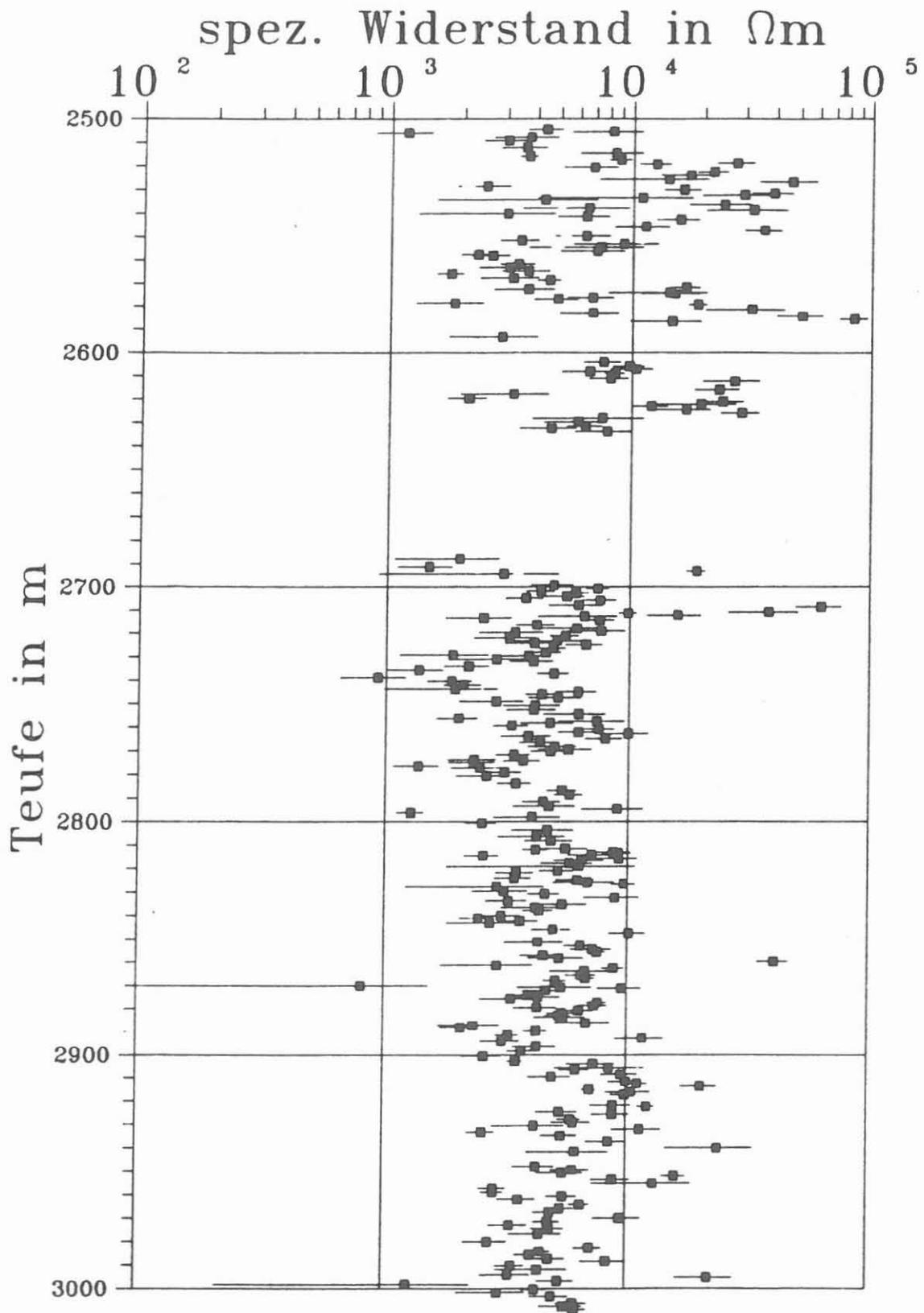


Abb. D.6.3: Teufenlog der spezifischen elektrischen Widerstände. Eingezeichnet ist der arithmetische Mittelwert \pm Standardabweichung aus 12 Einzelmessungen pro Kernstück.

D.7 Retardierte Entspannungsdeformation und akustische Emission

D.7.1 Allgemeines

Im Teufenbereich zwischen 2500 - 3009 m wurden an vier Bohrkernproben Messungen der Entspannungsdeformation und der akustischen Emissionen (AE) durchgeführt. Die Versuchsdurchführung dieses Relaxationsexperimentes ist im KTB-Report 88-6 (WOLTER et al., 1988) beschrieben. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um heterogene, texturierte Gneise. Aus der Tabelle D.7.1 sind die Teufe, die Petrographie sowie das Streichen und Einfallen der Foliation der untersuchten Proben zu entnehmen. Die Messung der akustischen Emission war aus technischen Gründen (Meßgerät defekt) nicht bei allen Bohrkernproben möglich. Durch Auswertung der Formation Micro Scanner Tool-Logs (FMST-Log) konnte eine Orientierung der Bohrkernproben 632G1r, 638D2j und 656G1p erfolgen, wodurch die Ermittlung der absoluten Orientierung der maximalen radialen Hauptdeformationsrichtungen ermöglicht wurde.

Probe	Teufe [m]	Petrographie	Foliation [N°E] Streichen/Einfallen
632G1rK	2614.0	Hbl-Bio-Gneis, mittelkörnig	130/70SW
638D2j	2689.5	Bio-Hbl-Gneis, feinkörnig mit Qrz-Fds-Klasten	140/65SW
656G1p	2737.4	Sil-Mus-Bio-Gneis, grobflaserig	140/60SW
699H2xK	2862.9	Bio-Sil-Gneis, lagig	130/45SW

Tab. D.7.1: Struktur und Textur der untersuchten Proben

D.7.2 Meßergebnisse

In der Tabelle D.7.2 sind die erzielten Meßergebnisse aufgeführt. e_1 , e_2 , e_3 sind die Beträge der Hauptdeformationen, α ist die Orientierung der maximalen radialen Hauptdeformation (e_1) bezogen auf die Feldlaborreferenzlinie, θ ist die Absolutorientierung der radialen Hauptdeformation e_1 , τ_0 ist die durchschnittliche Relaxationszeit der Retardation (LIPPMANN et al., 1988), τ_{AE} ist die Relaxationszeit der akustischen Emissionen und $AE(n)$ ist die Anzahl der akustischen Signale, die während des 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°E]	τ_ϕ [h]	τ_{AE} [h]	AE [n]
632G1rK	60	30	27	84	179 ± 10	20	18	26084
638D2j	106	22	11	91	32 ± 10	11	16	5979
656G1p	133	57	87	115	46 ± 10	33	36	2396
699H2xK	111	71	92	172	-	24	-	-

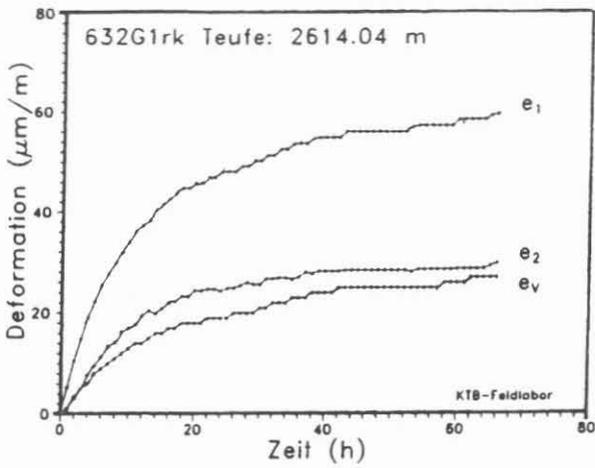
Tab. D.7.2: Meßergebnisse der Entspannungsdeformation und der akustischen Emission. Die Orientierungsdaten sind als vorläufige Daten zu betrachten.

In den Abbildungen D.7.1 a-d sind die Zeit-Deformationsverläufe der Entspannungsdeformation dargestellt. Aus der Abbildung D.7.1 c sind 35 h nach Meßbeginn "Sprünge" im Zeit-Deformationsverlauf zu erkennen, deren Ursache mit Ribbildungen während des Ablaufes der anelastischen Entspannungsdeformation erklärt wird. Die Abbildungen D.7.2 a-d sind halblogarithmische Darstellungen des Zeit-Deformationsverlaufes für die Ermittlung der Relaxationszeiten. Die Relaxationszeiten τ_1 , τ_2 und τ_v sind die Zeitkonstanten der Hauptdeformationen e_1 , e_2 und e_v . τ_ϕ ist die mittlere Relaxationszeit der zeitabhängigen Entspannungsdeformation.

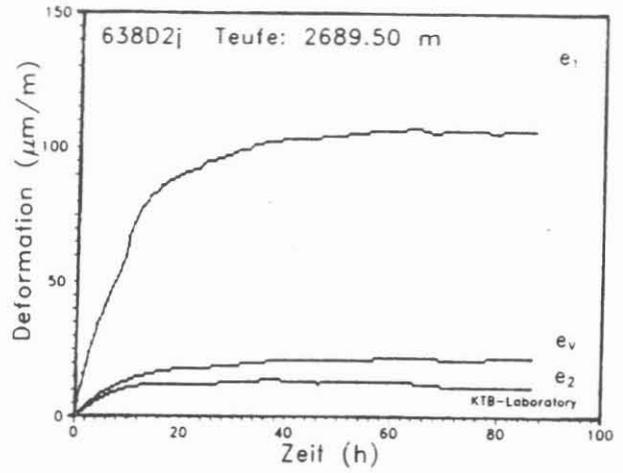
Die Abbildungen D.7.3 a-c zeigen die Summenkurven der akustischen Emissionen, die während des Retardationsprozesses registriert wurden. Die Abbildungen D.7.4 a-c sind halblogarithmische Darstellungen der akustischen Emission gegen die Zeit, die der Berechnung der Relaxationszeiten (τ_{AE}) dienen.

D.7.3 Zusammenfassung

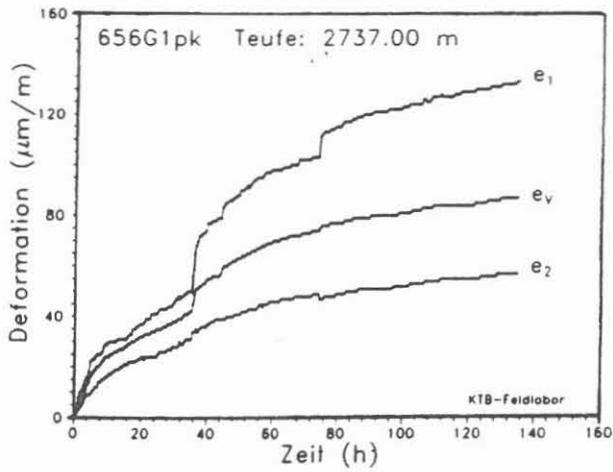
Die Messung der retardierten Entspannungsdeformation und der akustischen Emission führt bei den einzelnen Proben zu nahezu übereinstimmenden Relaxationszeiten (τ_2 und τ_{AE}). Die Beträge der retardierten Entspannungsdeformation sind deutlich geringer als die, die an Proben aus den oberen Teufenbereichen erzielt wurden (HUENGES et al., 1989). Es ist kein Trend zu verzeichnen, daß mit zunehmender Teufe die Beträge der Entspannungsdeformation größer werden, auch sind in der Orientierung der radialen Hauptdeformationen keine Übereinstimmungen vorhanden. Dies ist in den unterschiedlichen Gesteinseigenschaften begründet. Da die Textur eines Gesteins einen erheblichen Einfluß auf das Verhalten der Entspannungsdeformation hat (HUENGES et al., 1989; WOLTER & BERCKHEMER, 1989), ist es nicht zulässig, aus den gemessenen Beträgen der anelastischen Entspannungsdeformation mit Hilfe der Blanton-Formel (BLANTON, 1983) die Beträge der in situ-Hauptspannungen in der Tiefe zu berechnen.



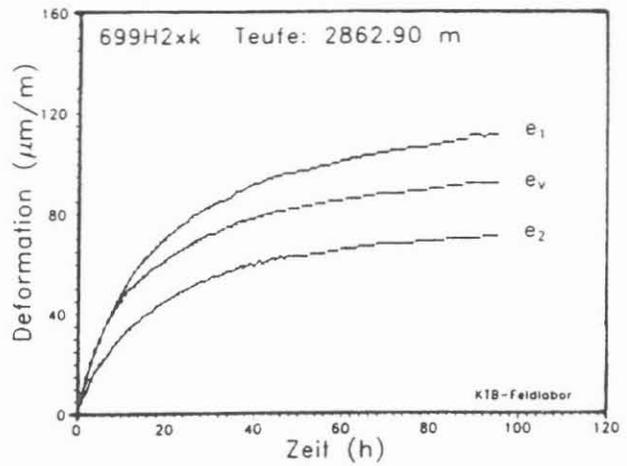
a) Probe: 632G1rK



b) Probe: 638D2j

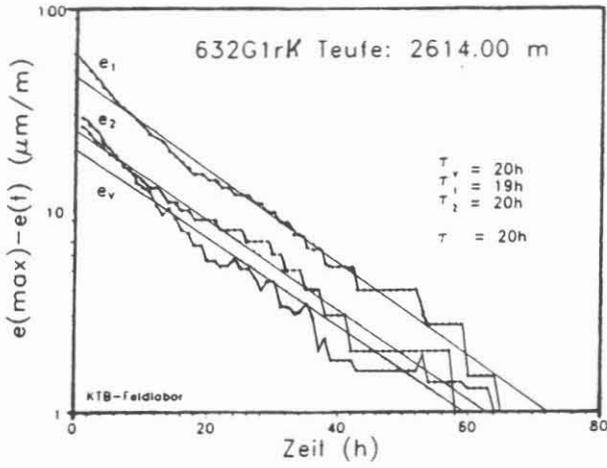


c) Probe: 656G1pk

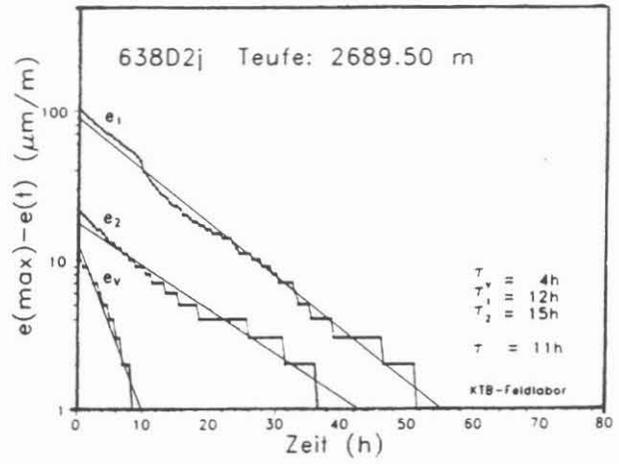


d) Probe: 699H2xK

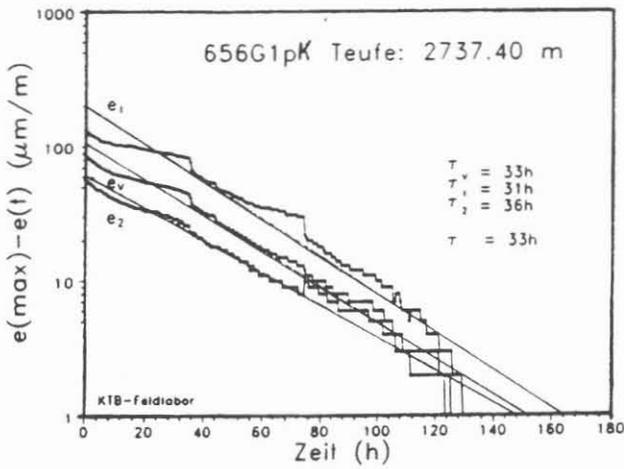
Abb. D.7.1: Zeit-Deformationsverlauf



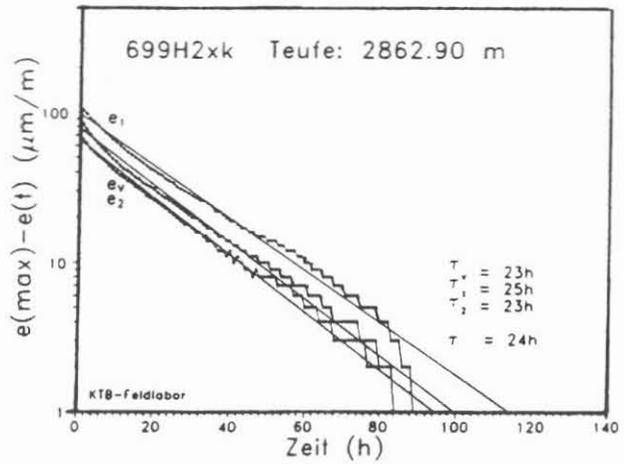
a) Probe: 632G1rK



b) Probe: 638D2j

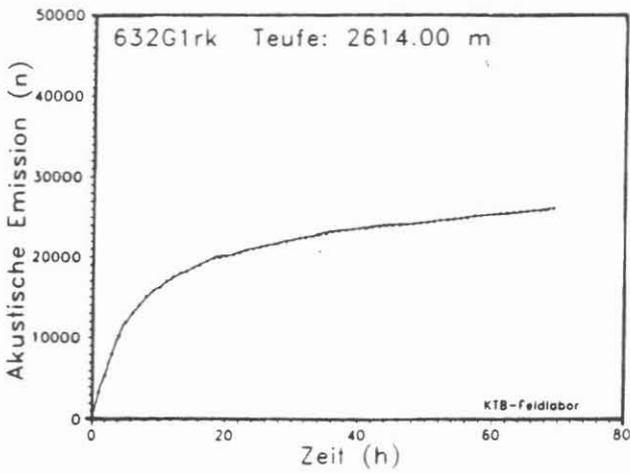


c) Probe: 656G1pK

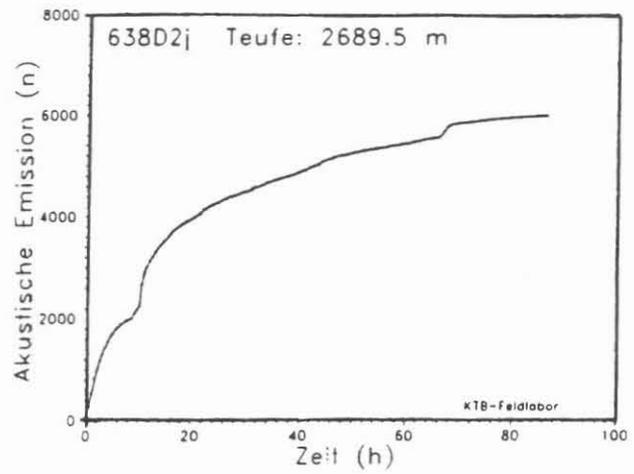


d) Probe: 699H2xK

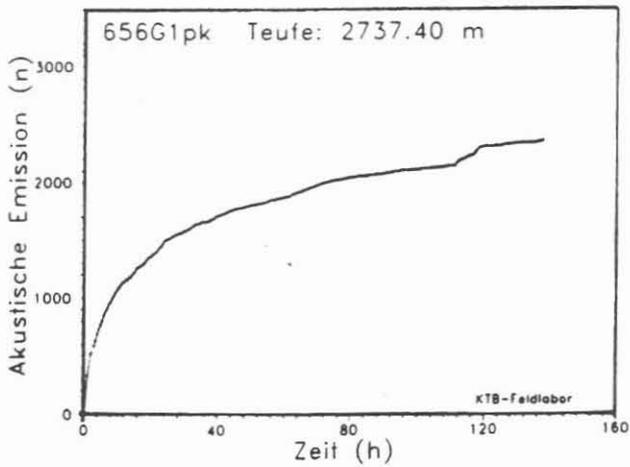
Abb. D.7.2: Halblogarithmische Darstellung des Zeit-Deformationsverlaufs



a) Probe: 632G1rK

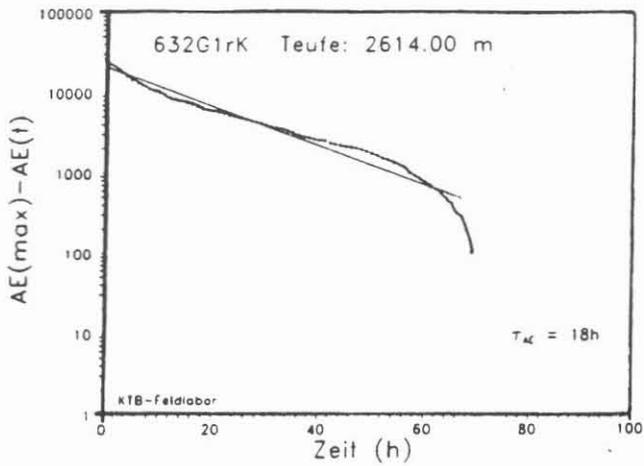


b) Probe: 638D2j

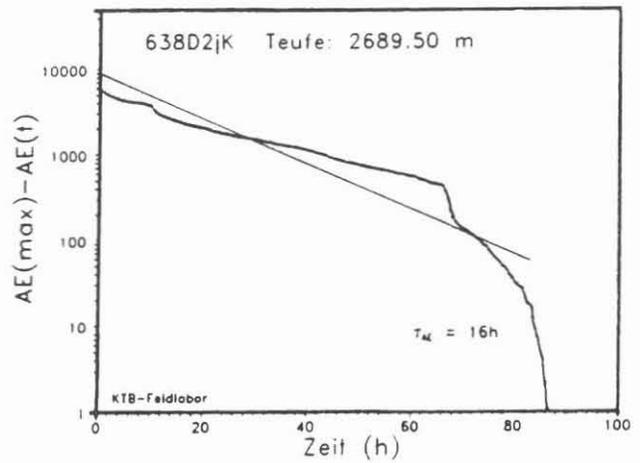


c) Probe: 656G1pK

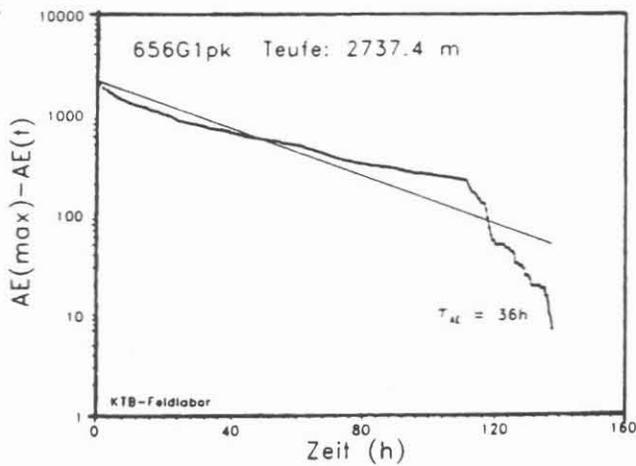
Abb. D.7.3: Summenkurve der akustischen Emissionen



a) Probe: 632G1rK



b) Probe: 638D2jK



c) Probe: 656G1pk

Abb. D.7.4: Halblogarithmische Darstellung der akustischen Emissionen

D.8 Porosität

D.8.1 Allgemeines

Im Bereich von 2504 - 2944 m wurde die Porosität an bisher 291 Miniplugins und im Bereich der Richtbohrstrecke von 2638 - 2693 m an 16 Seitenkernen bestimmt. Die Porositätsbestimmung erfolgte nach dem "Archimedischen Prinzip" (HUENGES et al., 1989).

D.8.2 Porosität der Miniplugins

Bei den Miniplugins ergab sich eine mittlere Porosität von 0.7 ± 0.2 %. Die niedrigste Porosität (0.2 %) hat ein Granat-Sillimanit-Biotit-Gneis aus einer Teufe von 2727.53 m. Die höchste Porosität (2.1 %) wurde an einem Sillimanit-Biotit-Gneis mit wenig Granat aus einer Teufe von 2759.53 m gemessen.

D.8.3 Porosität der Seitenkerne

Drei der 16 Seitenkerne weisen auffällig hohe Porositäten auf (3.0 %, 4.7 %, 5.6 %) auf, die sich auf den möglicherweise wenig schonenden Bohrprozeß gegenüber dem Herausbohren der Miniplugins zurückführen lassen. Es handelt sich bei den Seitenkernen um kataklastische Hornblende-Gneise und Amphibolite. Die übrigen 13 Seitenkerne haben eine mittlere Porosität von 1.1 ± 0.4 %. Die niedrigste Porosität (0.6 %) hat ein Seitenkern aus einer Teufe von 2661.5 m und die größte Porosität (1.9 %) wurde an einem Seitenkern aus einer Teufe von 2685 m bestimmt.

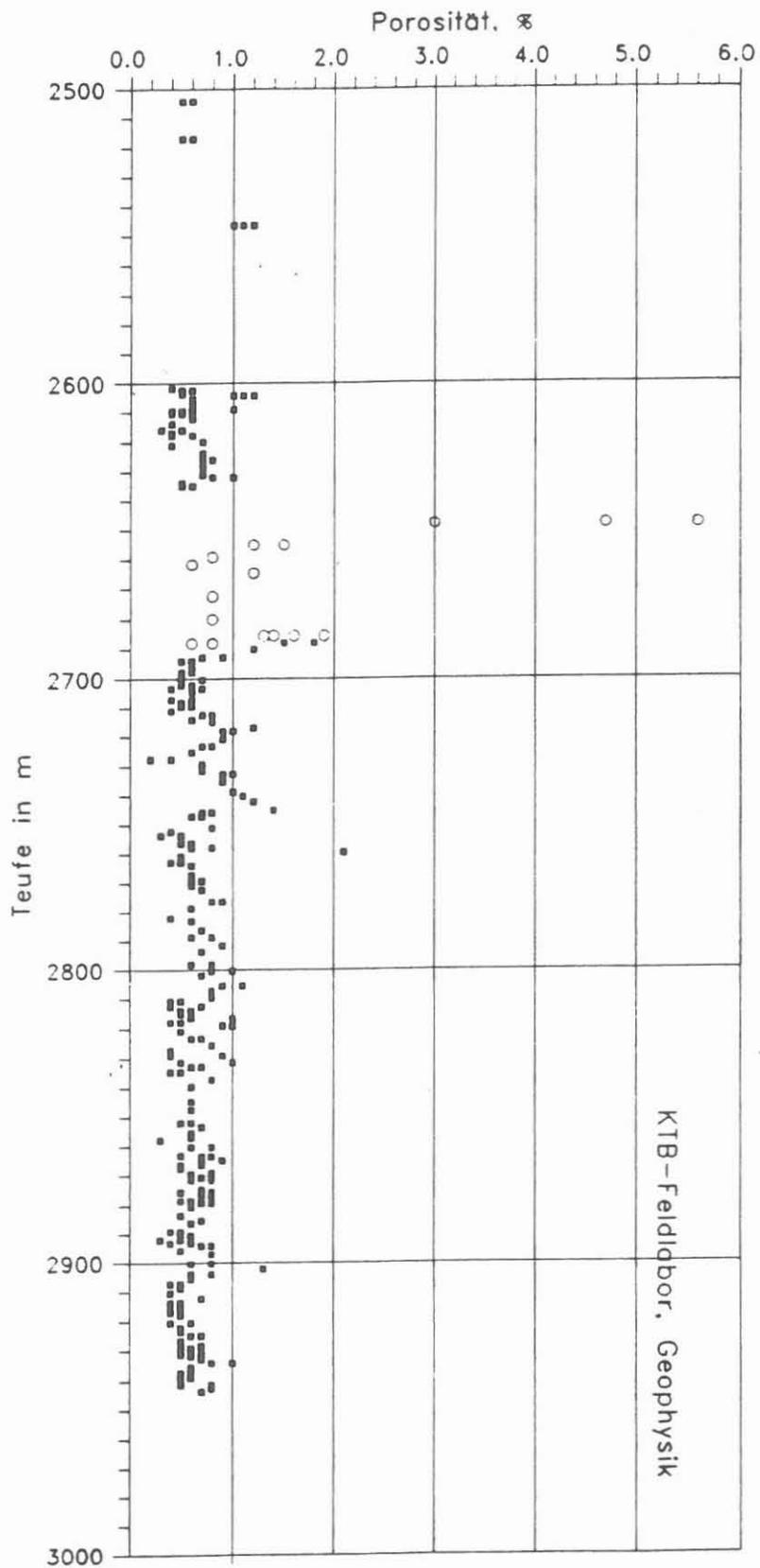


Abb. D.8.1: Teufenlog der Porosität
Punkte: Miniplugs
Kreise: Seitenkerne

D.9 Permeabilität

Die Permeabilität wurde an ausgewählten Proben im Auftrag des NLFb am Mineralogischen Institut der Universität Bonn gemessen. Die Proben waren verschiedenen Druckstufen triaxialer Last ausgesetzt. Eine Beschreibung der Probenpräparation und der Meßprozedur befindet sich im KTB-Report 89-2 (HUENGES et al., 1989). Im gleichen Artikel sind erste Rohmeßdaten, d.h. Druck/Zeit-Kurven des Druckausgleichs durch die Proben dargestellt, aus denen wie folgt die Permeabilität errechnet werden kann:

An die Druck/Zeit-Meßwerte wird die Druckausgleichsgleichung (*) (Herleitung siehe ZOBACK & BYERLEE, 1975 bzw. HUENGES, 1987) angefügt. Die Indizes der Drücke P_1 und P_2 beziehen sich auf die Volumina vor und hinter der Probe, wovon ein Volumen durch eine Druckregelung unendlich gehalten wurde. Das andere Volumen, in dem der Druck P_2 ansteigt, wird mit V bezeichnet. Die Viskosität η des strömenden Fluids wird Tabellenwerken entnommen (z.B. WEAST, 1974). Die Abmessungen der Probe (Fläche A und Länge L) wird vor dem Versuch vermessen. Die Kompressibilität β des Fluids entspricht unter der Annahme eines idealen Gases dem reziproken Fluiddruck. Die Permeabilität k ergibt sich aus diesem Fit mit der Dimension einer Fläche (1 nanodarcy (nd) = 10^{-21} m^2).

$$P_1 - P_2(t) = (P_1 - P_2(0)) * \exp(-(kA/L\eta\beta V) * t) \quad (*)$$

Der auszuwertende Druckbereich muß eingeschränkt werden, da bei zu kleinen Druckdifferenzen der Einfluß des Fehlers der Druckmessung (ca. 0.1 MPa) eine Rolle spielt und bei zu großen Differenzen das rheologische Verhalten des Gesteins und des Fluids nicht mehr gut definiert ist. Bei einem Druckausgleich bis 6 MPa wurde die untere Druckgrenze auf 4 MPa festgelegt. Liegen in diesem Druckintervall zu wenige Werte, z. B. infolge eines zu langsamen Druckanstieges und damit eines vorzeitigen Abbruchs des Experiments, so erfolgt eine automatische Verschiebung der unteren Druckgrenze, bis genügend Werte im Druckintervall vorhanden sind.

Kernstück-Nr.	Teufe [m]	Lithologie	Gefügevarietät	z. Foliation	z. Orient.-L.
445D1p (1)	1970.0	Gneis	feinkörnig	parallel	225
452C1d (2)	2000.1	Gneis	feinkörnig	45	260
462E1k (3)	2030.3	Gneis	fein - mittelkörnig	80	100
468F1n (4)	2050.2	Lamprophyr	feinkörnig	massig	90
511C1r (5)	2199.29	Gneis	fein - grobkörnig	senkrecht	90
511C1r (6)	2199.35	Gneis	fein - grobkörnig	parallel	180
543A2f (7)	2275.57	Gneis	sehr feinkörnig	massig	170
561D1t (8)	2329.53	Gneis	fein - grobkörnig	parallel	190
572A1a (9)	2366.21	Gneis	mittel-grobflaserig	parallel	180
591B2bK (10)	2429.01	Gneis	mittelkörnig	senkrecht	260
591B2bK (11)	2429.06	Gneis	mittelkörnig	parallel	170

massig = keine Foliation vorhanden

Tab. D.9.1: Beschreibung der Proben

In Abb. D.9.1 sind die Meßergebnisse der in Tabelle D.9.1 beschriebenen Proben in Abhängigkeit des effektiven Druckes (äußerer Druck minus Poreninnendruck) dargestellt. Die bestimmten Permeabilitäten überstreichen mehr als vier Größenordnungen. Die untere Grenze bei 5 nd ist mit einer gestrichelten Linie versehen, da eine Auflösung darunter einen hohen experimentellen Aufwand erfordert. Oberhalb 10^5 nd sollten zur Permeabilitätsmessung effektivere stationäre Verfahren eingesetzt werden. Man erkennt die starke Druckabhängigkeit, die dazu führt, daß die Permeabilität einer Probe unter 100 MPa bei Erniedrigung des Druckes auf Umgebungsbedingungen sich um eine bis zwei Größenordnungen erhöht. Aus den wenigen Messungen ist noch keine Systematik erkennbar. Im speziellen sei auf die Probe 11 (591B2bK, parallel zur Foliation) mit der größten Permeabilität hingewiesen. Ein Riß durchläuft die Probe parallel zur Achse. Interessant ist, daß sich dieser selbst bei fast 100 MPa nicht mehr vollständig schliessen läßt. Ferner sei auf die Probe 511C1r hingewiesen, bei der makroskopisch kein Defekt sichtbar war und parallel und senkrecht zur Foliation geschnitten worden ist. Parallel zur Foliation (6) hat die Probe eine mehrfach erhöhte Permeabilität als senkrecht dazu (5).

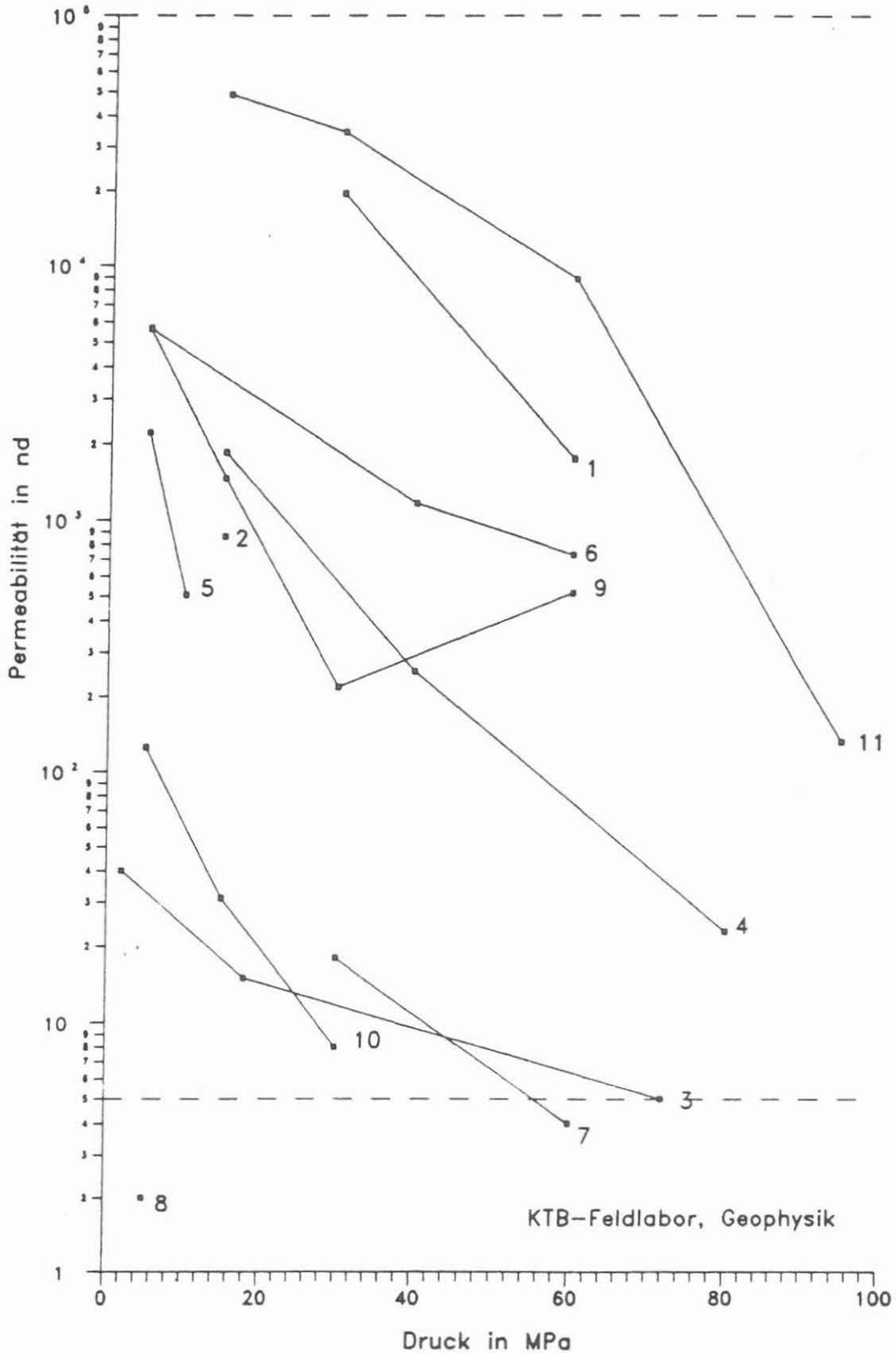


Abb. D.9.1: Permeabilitäten verschiedener Proben nach Tab. D.9.1 in Abhängigkeit vom effektiven Druck. Die gestrichelten Linien begrenzen den Bereich, in dem eine Auswertung sinnvoll ist (siehe Text).

D.10 Innere Oberfläche

D.10.1 Einleitung

Als innere Oberfläche eines Gesteins wird die Grenzfläche zwischen Gesteinsmatrix und Porenfüllung verstanden. An dieser Grenzfläche kann es zu Wechselwirkungen zwischen den beiden Komponenten kommen, wodurch die innere Oberfläche einen starken Einfluß auf die physikalischen (hydraulischen, elektrischen und sogar elastischen) Eigenschaften haben kann.

Als "spezifische innere Oberfläche" werden verschiedene normierte Größen der inneren Oberfläche verstanden. Es wird zwischen drei verschiedenen Normierungen unterschieden:

- S_{TOT} bezogen auf das gesamte Gesteinsvolumen
- S_{MTX} bezogen auf das Matrixvolumen
- S_{POR} bezogen auf das Porenvolumen

Zwischen diesen drei Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$S_{TOT} = \Phi * S_{POR} = (1 - \Phi) * S_{MTX}$$

Φ - Porosität

S_{TOT} wird als "Oberflächendichte" und S_{POR} wird im allgemeinen als "spezifische innere Oberfläche" bezeichnet.

D.10.2 Meßmethode

Die Messung der inneren Oberfläche wurde mit dem AREAMETER II durchgeführt. Das AREAMETER II arbeitet nach einer Methode, die von BRUNAUER, EMMET und TELLER entwickelt und von HAUL und DÜMBGEN vereinfacht wurde. Es handelt sich hierbei um die monomolekulare Adsorption von Stickstoffgas in der Nähe der Siedetemperatur von flüssigem Stickstoff. Aus dem Platzbedarf des adsorbierten Stickstoffs und der Menge des adsorbierten Gases läßt sich die adsorbierende Oberfläche berechnen. Die Menge des adsorbierenden Gases wird am AREAMETER II durch die Druckdifferenz bestimmt, die sich zwischen Probengefäß und Vergleichsgefäß aufbaut.

D.10.3 Meßergebnisse

Es wurden bisher an 56 Miniplugs Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abb. D.10.1 in einem Teufenlog dargestellt sind. Der bearbeitete Teufenbereich reicht von 95 - 1300 m. Es ergab sich in diesem Bereich eine mittlere spezifische Oberfläche von $0.073 \pm 0.058 \text{ m}^2/\text{g}$. Die Oberflächenwerte streuen von $0.007 \text{ m}^2/\text{g}$ bei 398.96 m (granatführender Amphibolit) bis $0.334 \text{ m}^2/\text{g}$ bei 1289.8 m (Granat-Amphibolit).

Aus dieser spezifischen Oberfläche läßt sich die auf das Porenvolumen bezogene "spezifische innere Oberfläche" berechnen. Es ergibt sich als mittlere "spezifische innere Oberfläche" $19.4 \pm 16.1 \mu\text{m}^{-1}$ mit einem Minimalwert von $2.02 \mu\text{m}^{-1}$ bei 398.96 m (granatführender Amphibolit) und einem Maximalwert $77.85 \mu\text{m}^{-1}$ bei 145.0 m (Amphibolit). Die jeweilige hohe Standardabweichung ist durch den großen Wertebereich bedingt, den die Proben überdecken.

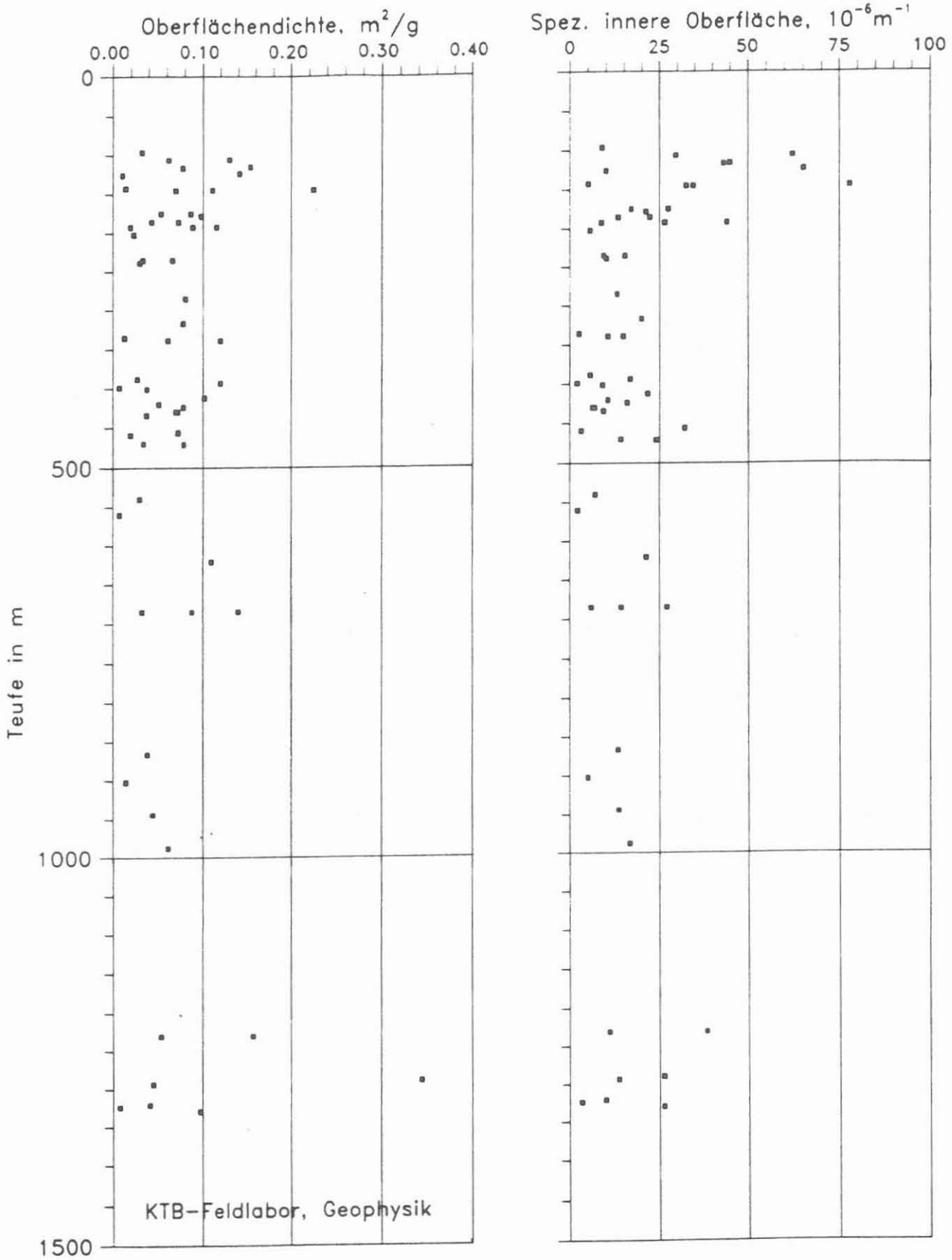


Abb. D.10.1: Teufenlog der Oberflächendichte und der spezifischen inneren Oberfläche

D.11 Literatur

- BLANTON, T.L. (1983): The relation between recovery deformation and in situ stress magnitudes. - Symp., SPE / DOE, 11624: 213-218, Denver.
- 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, Ch., WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A., LIPPMANN, E. & E. HUENGES (1989): Deep Drilling KTB-Oberpfalz VB, Results of the Geoscientific Proceedings in the KTB-Laboratory; Depth from 0-2500 m: D. Geophysik. - KTB-Report, Hannover (in press).
- 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.
- HUENGES, E. (1987): Messung der Permeabilität von niedrigpermeablen Gesteinsproben unter Drücken bis 4kbar und ihre Beziehung zu Kompressibilität, Porosität und komplexen elektrischem Widerstand.- Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- HUENGES, E., BÜCKER, Ch., WOLTER, K.E., WIENAND, J., RAUEN, A. & E. LIPPMANN (1989): 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.
- 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 2000 m: D. Geophysik. - KTB-Report 88-9: D1-D60, 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.
- WEAST, R.C. (1974): Handbook of Chemistry and Physics.- 55th Edition: F-47ff and F-16ff, CRC Press, Cleveland Ohio.

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., (in press).

ZOBACK, M.D. & J.D. BEYERLEE (1975): The Effect of Microcrack Dilatancy on the Permeability of Western Granite. J.Geophys.Res., 80(5): 752-755.