

**MAGNETISCHE BOHRLOCHMESSUNGEN IN DER TIEFSEEBOHRUNG 418A
(BERMUDA RISE) UNTER VERWENDUNG EINES 3-D-
BOHRLOCHMAGNETOMETERS**

W. Bosum

Zusammenfassung

Im Rahmen der Meßfahrt LEG 102, die der Erforschung "alter ozeanischer Kruste" mit Hilfe geophysikalischer Bohrlochmessungen diente, wurden u. a. magnetische Messungen unter Verwendung eines 3-Komponenten Magnetometers ausgeführt. Nach einer Beschreibung des Meßsystems, der Meß- und Interpretationsmethodik werden die Ergebnisse diskutiert. Das Magnetik-Log, eine kontinuierliche Feldvermessung, bzw. seine Umrechnung in ein Magnetisierungsprofil liefert in erster Linie eine Klassifizierung der durchteuften Bereiche, die 3-D-Messung in konkreten Punkten erlaubt die Bestimmung der (totalen) Magnetisierung nach Betrag und Richtung. Unter Verwendung eines (magnetischen) Suszeptibilitäts-Logs (USGS) läßt sich die remanente Magnetisierung berechnen. Durch Vergleich mit einer paläomagnetischen Polwanderungskurve gelang es damit erstmalig, eine absolute Altersangabe aufgrund magnetischer Messungen in Bohrungen zu machen.

Abstract

In the framework of ODP-cruise LEG 102 geophysical borehole logging was carried out in Deep Sea Hole 418A to investigate oceanic "old basement". Among others a 3-axis-borehole magnetometer was used, the specification of which and the performance of measurements are described. The results are presented in form of the "magnetic log" and "3-D-measurements" in concrete points. The magnetic log and its transformation into a magnetization profile yield a detailed classification of the transversed rocks, in good correlation with the petrographic results. From the 3-D-measurements paleopole positions could be calculated, the first time in deep-sea drilling programs, which allowed an age-determination in combination with the polar wander path. The evaluation of the data was strongly supported by additional borehole susceptibility logging with an equipment of the USGS.

1 Einleitung

Die Meßfahrt LEG 102 des ODP führte mit dem Bohrschiff "Joides Resolution" an die Südspitze des "Bermuda Rise" (Abb. 1), wo die Tiefseebohrung 418 A 1977 durch die "Glomar Challenger" im sog. "alten Basement" abgeteuft worden war. Sie sollte wieder aufgetan werden, um unter Einsatz aller verfügbaren geophysikalischen Bohrlochmethoden ihre Eignung für anstehende Aufgaben des ODP zu prüfen, um die jeweiligen physikalischen Eigenschaften der durchteuften Gesteine zu bestimmen und einen Vergleich zwischen den Aussagemöglichkeiten von Untersuchungen im Bohrloch und an Bohrkernen anzustellen.

Zu diesen Messungen gehörten auch magnetische Bohrlochmessungen (BOSUM & SCOTT, im Druck), und zwar sowohl Messungen der Suszeptibilität (US Geol. Survey), als auch des magnetischen Feldes innerhalb der Bohrung (BGR). Letztere sollen im Folgenden beschrieben werden.

2 Das 3-D-Bohrlochmagnetometer, Aufbau und Meßmethodik

Die wesentlichen Komponenten des 3-D-Bohrlochmagnetometers (BOSUM & REHLI 1985) sind:

Förstersonden- (fluxgate-) Tripel und Gradiometer zur Messung des Magnetfeldes und seines Gradienten, Kreiseleinheit mit Beschleunigungsmesser zur Richtungs- sowie Neigungsbestimmung und Sonderelektronik (Datenübertragung). Sie besitzen folgende Empfindlichkeiten bzw. Eigenschaften:

Förstersonden-Tripel:	1 nT
Gradiometer	: 2 nT/40 cm
Neigungsmesser	: $5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ$
Kreisel	: Mittl. Drift in E-W-Stellung $0,5^\circ/\text{h}$.

Das magnetische Feld wurde kontinuierlich in Richtung der Bohrlochachse (Magnetik-Log) mit einer Geschwindigkeit von 5 m/min vermessen, das entspricht einem Meßintervall von ca. 8 cm. Da die Bohrung senkrecht ($< 2^\circ$ Abweichung) verläuft, entspricht die Meßgröße der Vertikalintensität. Daneben wurde in konkreten Punkten, i. a. im Abstand von 5 m, das magnetische Feld in 3 Komponenten (1 parallel, 2 senkrecht zur Bohrlochachse) gemessen (3-D-Messung).

Das Magnetik-Log liefert in erster Linie Aussagen über die Magnetisierung der an der Bohrlochwand anstehenden Gesteine und erlaubt daher eine Klassifizierung der durchteuften Bereiche nach magnetischen Gesichtspunkten. Einflüsse entfernter liegender Störkörper lassen sich aufgrund ihrer magnetischen Charakteristik (glatte, breite Anomalien im Gegensatz zu stark

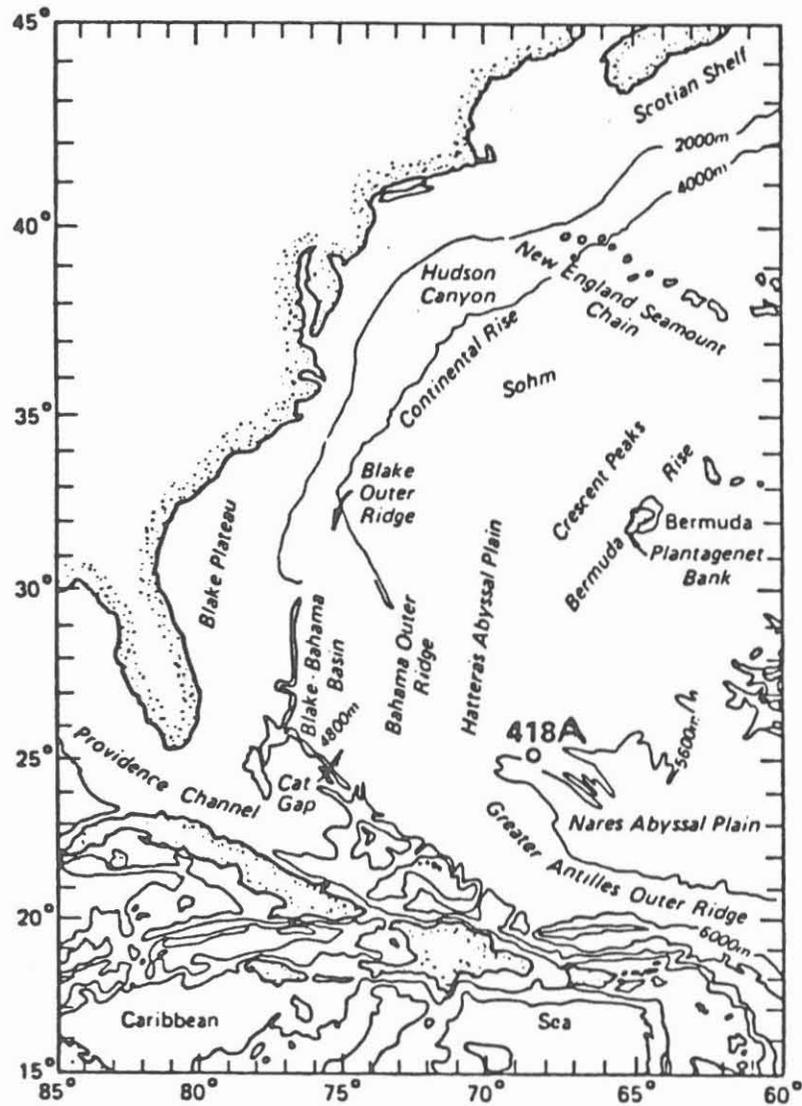


Abb. 1: Lage der Tiefseebohrung 418A.

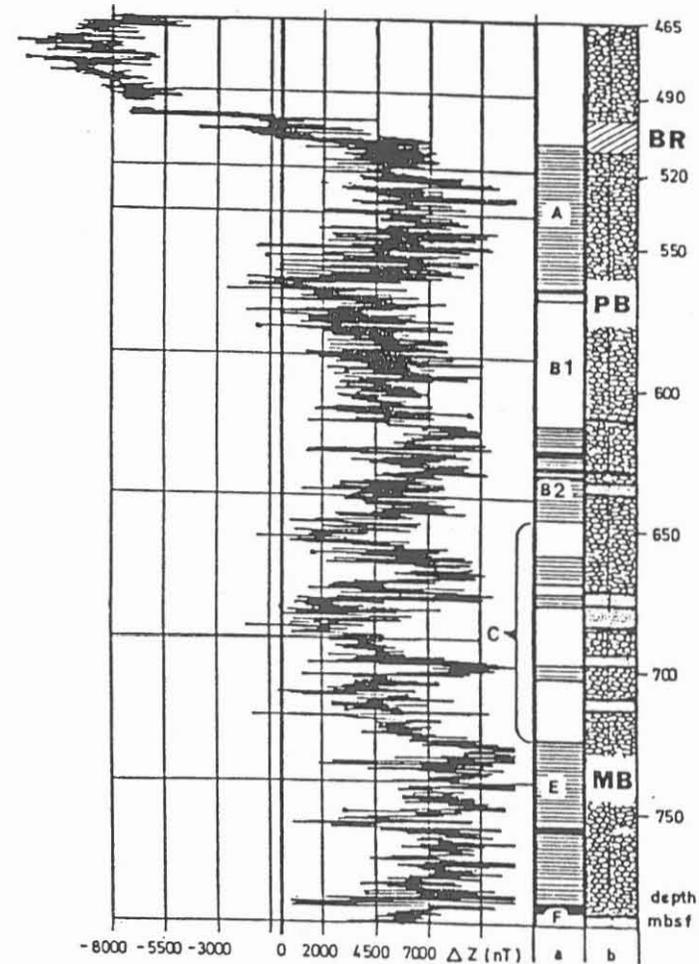


Abb. 2: Original Magnetik-Log der Bohrung 418A. Dargestellt sind die ΔZ -Anomalien, eine qualitative Gliederung nach magnetischen Gesichtspunkten (Spalte a) und eine lithologische Grobgliederung (Spalte b, BR: Breccienzone, PB: Pillow Basalt, MB: Massive Basalt). Tiefe in m unter Meeresboden (u. M.) entspricht mbsf (m below sea floor).

streuenden Werten im ersten Fall) abtrennen. Zur leichteren Korrelation mit dem petrographischen Bohrprofil und den anderen geophysikalischen Messungen wird eine Umrechnung der Vertikalintensität in Magnetisierung vorgenommen (BOSUM 1985). Die Werte über zusammenhängende Bereiche werden gemittelt.

Die 3-D-Messung erlaubt im Umfeld eines magnetischen Störkörpers seine Lokalisierung, im Innern die Berechnung der Richtung der Magnetisierung. Zur Veranschaulichung der Aussagen werden die Ergebnisse nach Umrechnung in Form von Vektoren und Polardiagrammen dargestellt.

3 Meßergebnisse und Interpretation

3.1 Das Magnetik-Log

Abb. 2 zeigt den Originalplot des Magnetik-Logs, wie er auf dem Schiff gewonnen wurde. Auffälligste Erscheinung ist der Vorzeichenwechsel der Vertikalintensität von etwa -10 000 nT auf +7 000 nT bezogen auf den Normalfeld $Z_0 = 37\ 200$ nT, in einer Teufe von ca. 504 m (unter Meeresboden, u. M.), das entspricht etwa 6 010 m unter Meeresniveau. Dieser Vorzeichenwechsel des Feldes weist auf eine Feldumkehr hin, die auch durch Laboruntersuchungen an Bohrkernen bestätigt wird (LEVI 1979). Sie fällt zusammen mit der Breccienzone (BR), die in Abb. 2 Spalte b schraffiert angezeigt ist. Unterhalb der Breccienzone kann das Magnetik-Log aufgrund der Anomaliencharakteristik, vor allem der Amplitude und des Schwankungscharakters, in verschiedene Einheiten unterteilt werden.

Die stärksten Vertikalfelder bei einheitlichem Schwankungscharakter beobachtet man zwischen 514 und 565 m u. M. (Abschnitt A in Spalte a), zwischen 565 und 610 m u. M. (B1) und zwischen 725 und 785 m u. M. (E).

Aus einem Vergleich mit dem petrographischen Profil folgt, daß die Einheiten A und B1 "Pillow Basalt (PB)", der Einheit E "Massive Basalt (MB)" entsprechen. Die Abschnitte B2 und C weisen aufgrund ihres unruhigen Feldverlaufs auf einen heterogenen Aufbau hin, in Übereinstimmung mit der Petrographie, die eine Wechsellagerung von "Pillow Basalt" und "Massive Basalt" anzeigt. Die Grenzen nach Petrographie und Magnetik (Spalten a und b) stimmen im Detail nicht unmittelbar überein, was durch den Schiffshub (einige m) und Lücken im Kernprofil erklärt werden kann.

Aus dem Magnetik-Log (Abb. 3) wurde die (totale) Magnetisierung der an der Bohrlochwandung anstehenden Gesteine berechnet. Abb. 3b zeigt das Ergebnis. Als Modell wird der in

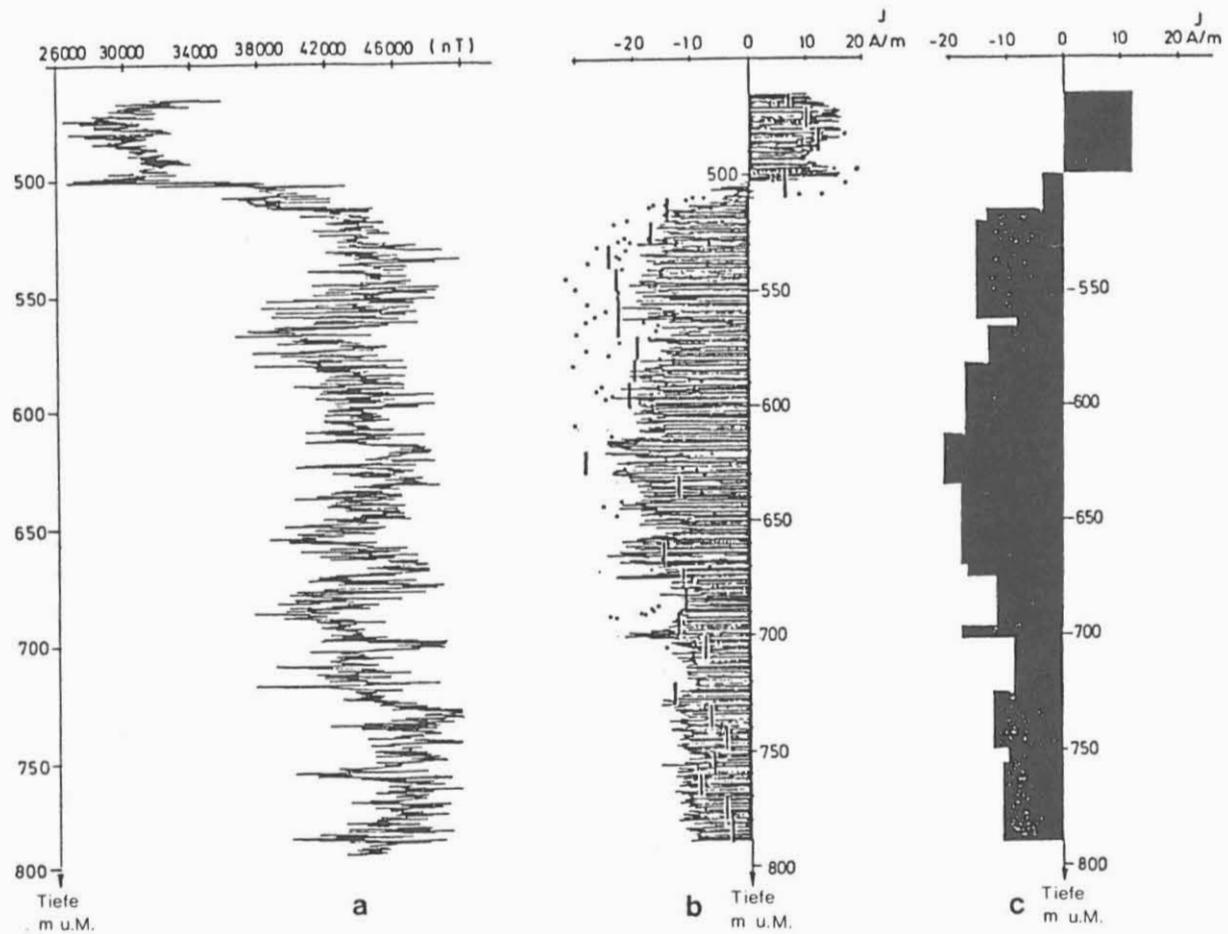


Abb. 3: Aus dem Magnetik-Log (a) errechnetes Magnetisierungsprofil (b) mit Mittelwerten (c). Mathematisches Modell: zum Bohrloch konzentrische Zylinderscheiben, äußerer Radius: 100 m. Die Punkte (Einzelmessungen) und Balken (Mittelwerte über 10 m) zeigen die Ergebnisse von Messungen der NRM an Bohrkernen. Tiefe in m u. M.

horizontale, zum Bohrloch konzentrische Scheiben zerlegte Untergrund verwendet (BOSUM 1985). Der äußere Radius wird iterativ ermittelt, indem das Ergebnis mit dem von Bohrkernuntersuchungen verglichen wird.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen (LEVI 1979; LEVI et al. 1979) sind in Abb. 3b als Punkte (Einzelmessungen) bzw. Balken (Mittel über 10 m) eingetragen. Sie stellen die natürliche remanente Magnetisierung (NRM) dar, die jedoch wegen des hohen Königsberger Q-Faktor ($Q = J_R/J_i$; J_R : remanente Magnetisierung, J_i : induzierte Magnetisierung) zwischen 10 und 80 unmittelbar mit der aus dem Magnetik-Log erhaltenen Gesamtmagnetisierung J_T verglichen werden kann. Die Anpassung von J_T an die NRM war im Mittel bei einem äußeren Radius des "Einflußzylinders" von 100 m am besten, wobei im oberen Teil der Bohrung die NRM-Werte systematisch etwas größer, im unteren Teil systematisch etwas geringer sind als die J_T -Werte nach dem Magnetik-Log, woraus geschlossen werden kann, daß der Einflußzylinder im oberen Bereich geringer, im unteren Bereich größer als 100 m sein sollte. Die NRM der Einzelproben streut stärker als die J_T , was durch den Einfluß der starken Inhomogenität des Gesteins bei kleinen Gesteinsproben zu erklären ist.

Aus den errechneten Magnetisierungswerten wurden Mittelwerte gebildet (Abb. 3c). Sie zeigen, daß generell oberhalb etwa 675 m die Gesamtmagnetisierung mit ca. 17 A/m stärker ist als unterhalb, wo sie ca. 12 A/m im Mittel beträgt. Das Suszeptibilitätslog (BOSUM & SCOTT, im Druck) zeigt folgenden Verlauf: im oberen Teufenbereich bis etwa 610 m beobachtet man sehr niedrige Suszeptibilitäten, entsprechend ca. 0,2 A/m. Die Magnetisierungen variieren im mittleren Teufenbereich, entsprechend der Wechsellagerung vom Pillow und Massive Basalt zwischen 0,30 und 1,6 A/m und erreichen zwischen 645 und 725 m die höchsten Werte mit 2,2 A/m, im Mittel 1,5 A/m. Der untere Teufenbereich von 725 bis 785 m, wo der Massive Basalt aufgeschlossen ist, zeichnet sich durch eine relativ einheitliche Magnetisierung von 1,2 A/m aus.

Aus dem Vergleich zwischen Magnetik-Log und Suszeptibilitätslog lassen sich gesteinsmagnetisch interessante Schlüsse ziehen:

Die im oberen Teil der Bohrung bis ca. 610 m abzuleitende starke remanente Magnetisierung mit Q-Faktoren in der Größenordnung von 80 weist auf einen Gesteinstyp hin, der durch Feinkörnigkeit, also schnelle Abkühlung, gekennzeichnet ist, zutreffend für Pillow Basalt. Demgegenüber ergibt sich zwischen 725 und 785 m ein Q-Faktor von im Mittel $Q = 8$, d. h. ein Hinweis auf einen relativ grobkörnigen Gesteinstyp, entstanden bei relativ langsamer Abkühlung, wie man sie bei dem Massive Basalt erwarten kann.

Insgesamt spiegeln also die magnetischen Logs, insbesondere die Kombination von Magnetik-Log und Suszeptibilitätslog, den petrographischen Aufbau treffend wieder: Unterhalb der durch die Breccienzone gekennzeichneten Feld- bzw. Magnetisierungs-umkehr finden sich im oberen Bereich Pillow-Basalte, die nach einer Wechsellagerung von Pillow-Basalt und Massive Basalt in Massive Basalt im unteren Teil der Bohrung übergehen. Die Begrenzung des magnetischen Störkörpers könnte in relativ geringer Entfernung von 100 m zu finden sein, in Übereinstimmung mit der Interpretation der "Ocean floor"-Anomalie, aufgrund derer die Bohrung an die östliche Grenze des Mo-Störkörpers (entsprechend 105 m.a.) gesetzt worden war.

3.2 Die 3-D-Messung

Die Ergebnisse der magnetischen 3-Komponenten-Messungen, die in Abständen von 5 m erfolgten, zeigt die Abb. 4 in Vektordarstellung. Die Vektoren sind in Abb. 4a im Vertikalschnitt in ihrer wahren Länge wiedergegeben. Das Azimut läßt sich aus der Lage der Störfeldvektoren in der Horizontalebene (Abb. 4b) entnehmen. Die gleichzeitige Betrachtung der Polardiagramme (Abb. 5 und 6) erleichtert das Verständnis. Weiter sind in Abb. 7 die Inklination und in Abb. 8 die Deklination der Anomalievektoren (A in Abb. 7) dargestellt. Die Inklination der Magnetisierungsvektoren wurde aus der der Anomalievektoren errechnet (M in Abb. 7) (BOSUM 1985), ihre Deklination ist dieselbe.

Die auffälligste Erscheinung in dem Profil der Anomalievektoren ist der Vorzeichenwechsel in ca. 510 m u. M., verursacht durch die Umkehr des magnetischen Erdfeldes. Eine feinere Gliederung des Profils aufgrund der Inklinationswerte läßt sich aus Abb. 4a, jedoch besser noch aus Abb. 7 ablesen. Sie deutet auf Grenzen bei 580 und 720 m u. M. hin, entspricht also in etwa den o. g. Intervallen des Magnetik-Log.

Die Inklinationswerte oberhalb 510 m u. M. streuen stark, vermutlich aufgrund ihrer Nähe zur Breccienzone, verbunden mit der Feldumkehr. Unterhalb zeigen die Inklinationswerte der Magnetisierung (M) einen relativ glatten Verlauf. Bis etwa 590 m u. M. beträgt die Inklination ca. -25° , bis 700 m ca. -30° , unterhalb 700 m -40° im Mittel. Diese Werte stimmen gut mit denen der Laboruntersuchungen an Bohrkernen überein (LEVI 1979). Die Dreiteilung des Profils ist jedoch wesentlich klarer in den Bohrlochmessungen erkennbar, auch ist ihr Verlauf glatter.

Die Deklinationswerte (Abb. 8) streuen wesentlich stärker. Dieses ist dadurch bedingt, daß die Sonde in der Bohrung aufgrund des großen Bohrlochdurchmessers drehte (inzwischen

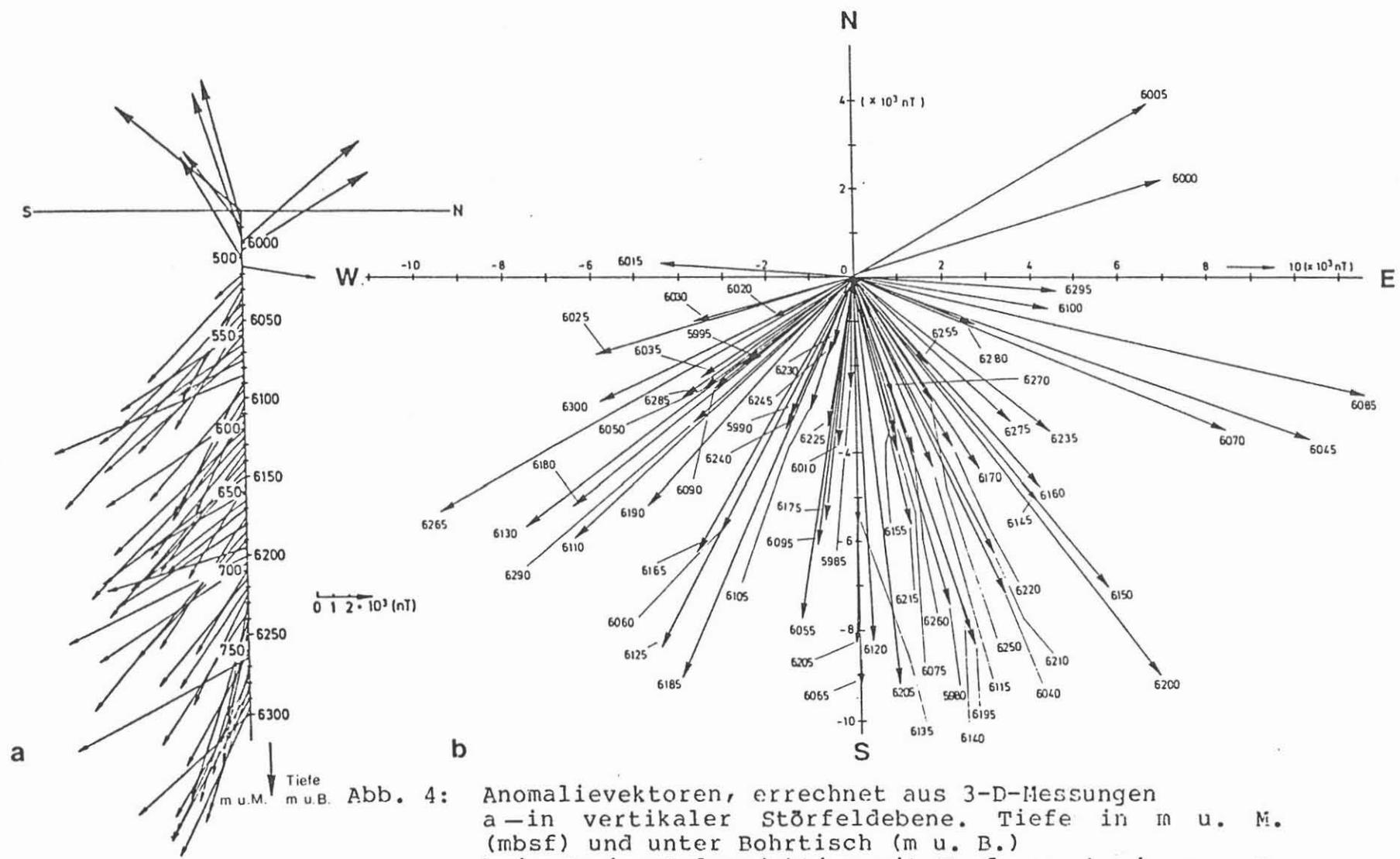


Abb. 4: Anomalievektoren, errechnet aus 3-D-Messungen
 a—in vertikaler Störfeldebene. Tiefe in m u. M. (mbsf) und unter Bohrtisch (m u. B.)
 b—in Horizontalprojektion mit Teufenangabe in m u. B. entspricht mbrf (m below rig floor).

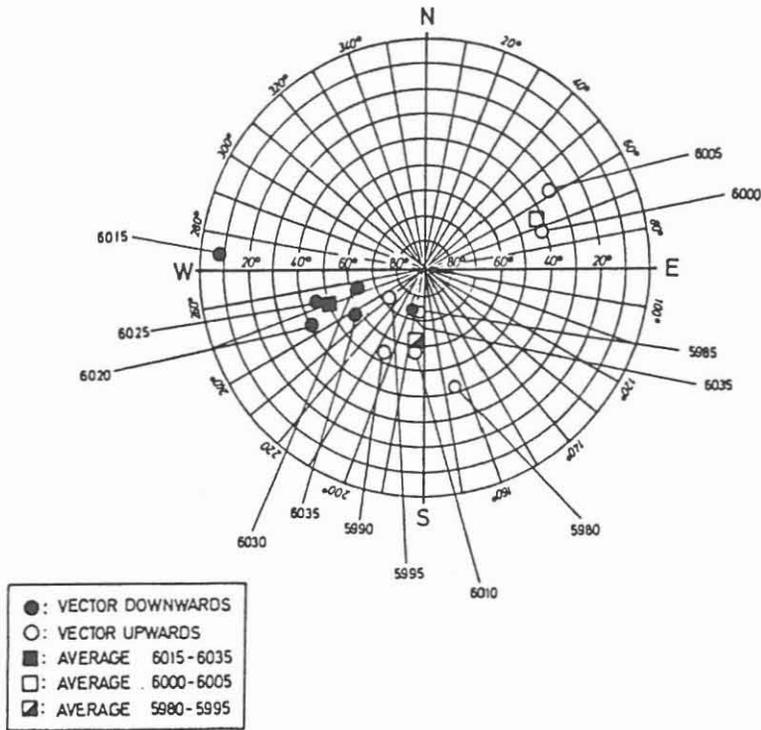


Abb. 5: Anomalievektoren des oberen Teils der Bohrung 418A in Polardiagramm-Darstellung. Zahlen geben die Teufe in m u. B. (unter Bohrtisch) an.

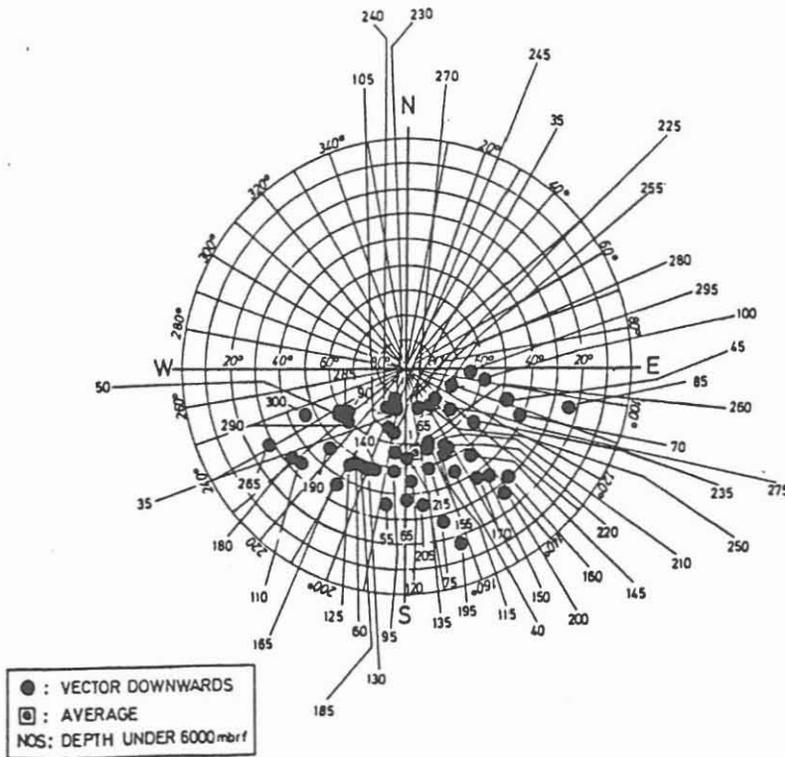


Abb. 6: Anomalievektoren des unteren Teils der Bohrung 418A in Polardiagramm-Darstellung. Zahlen geben die Teufe unterhalb des 6 000 m u. B.-Niveaus an.

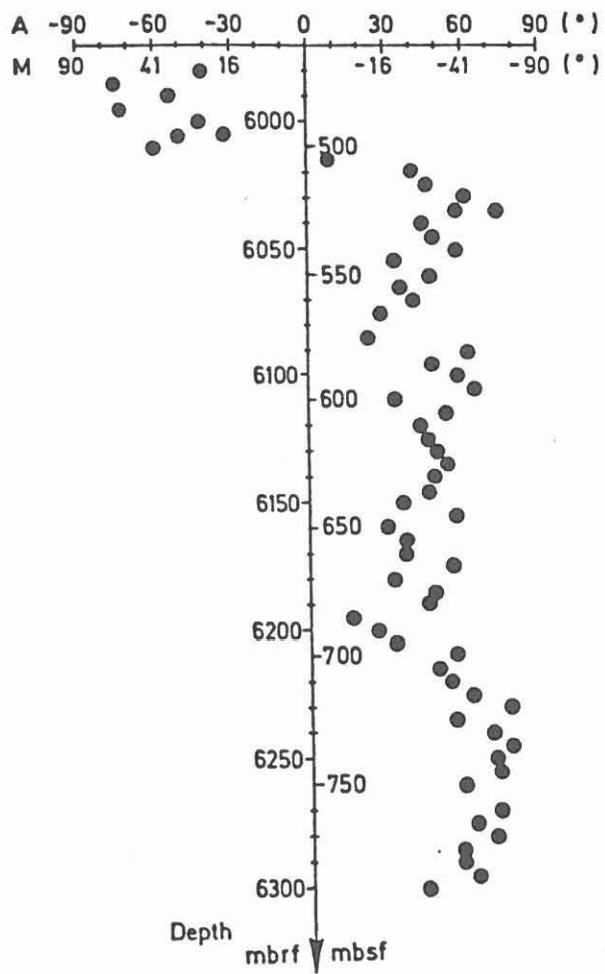


Abb. 7:
 Profil der aus 3-D-Messungen errechneten Inklination der Anomalievektoren (A) bzw. der Magnetisierungsvektoren (M). Tiefe in m u. M. (mbsf) und m u. B. (mbrf).

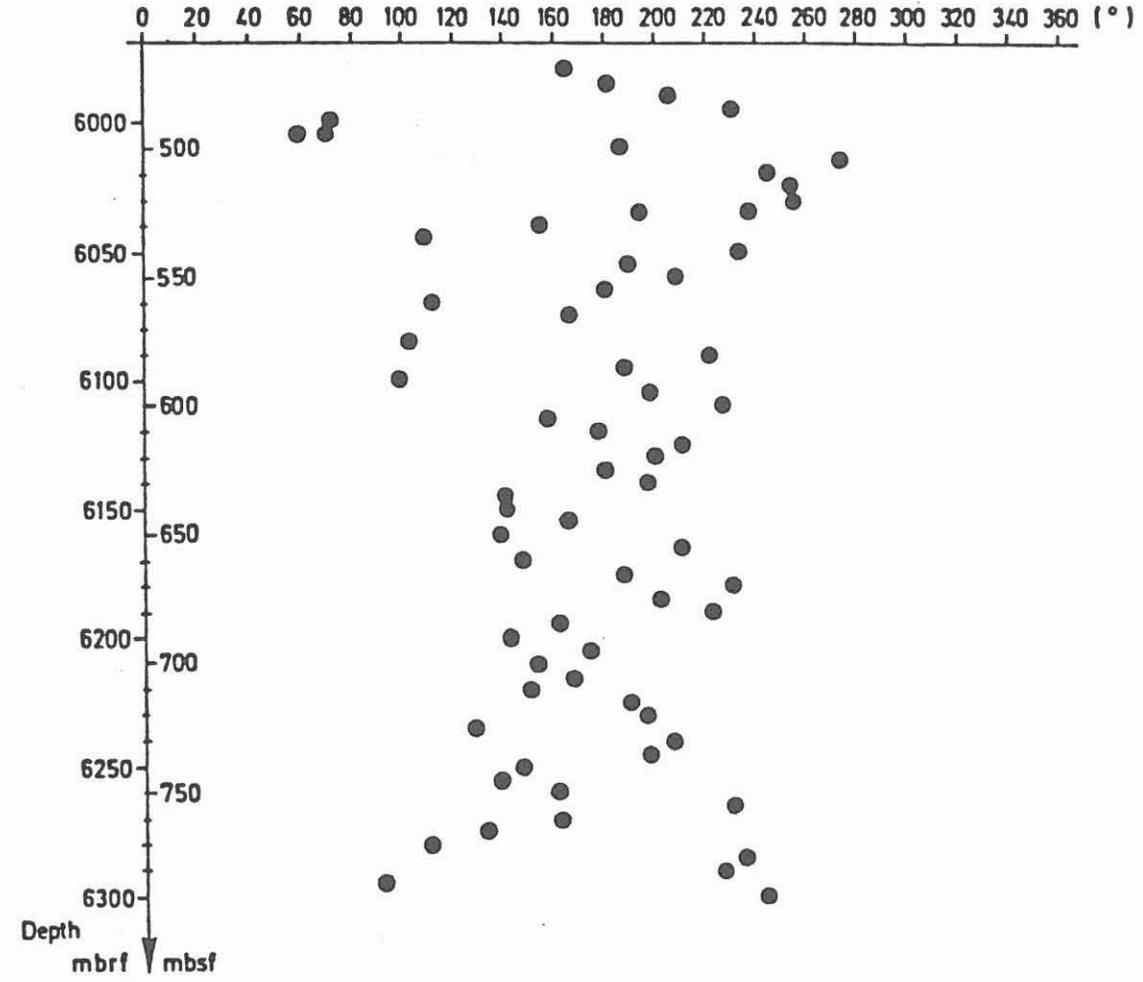


Abb. 8:
 Profil der aus 3-D-Messungen errechneten Deklination der Anomalie-/Magnetisierungsvektoren. Tiefe in m u. M. (mbsf) und m u. B. (mbrf).

wurde dieser Störeinfluß durch die Anbringung von Zentrierern beseitigt). Trotzdem ergeben sich brauchbare Mittelwerte, wie aus der Bündelung der Richtungsvektoren in Abb. 6 entnommen werden kann.

Diese Ergebnisse in Verbindung mit den kräftigen Q-Faktoren von im Mittel $Q = 35$ begründen eine Berechnung von Paläopol-lagen, um Altersangaben zu machen. Abb. 9 zeigt das Ergebnis, eingetragen in die Polar Wander Kurve (APWP) (LANDOLT-BÖRNSTEIN 1985) für Nord-Amerika. Wie zu erwarten, stimmen die Werte, errechnet aus der remanenten Magnetisierung, mit denen aus der Gesamtmagnetisierung vollkommen überein. Weiter sind Fischer-Kreise eingetragen, die die Gebiete angeben, innerhalb derer die Polposition mit 95 % Wahrscheinlichkeit zu suchen ist.

Die Polpositionen für die Tiefenintervalle 510 - 565 m u. M., 580 - 715 m u. M. und 530 - 790 m u. M. stimmen unter Beachtung der Fischer-Kreise gut mit der Unter-Kreide-Position überein, die aus geologischer Altersbestimmung folgt. Damit ist es erstmals im Rahmen von Tiefseebohrprogrammen gelungen, aus magnetischen Bohrlochdaten Altersbestimmungen aufgrund der Pollagen vorzunehmen.

Der Tiefenbereich 470 - 485 m u. M. liefert kein brauchbares Ergebnis; vermutlich sind diese Werte, wie oben ausgeführt, durch die Nähe zur Umkehrzone verfälscht. Der Tiefenbereich 720 - 790 m u. M. liegt ebenfalls außerhalb der Polwanderungskurve. Auch die gesteinsmagnetischen Messungen der Inklination zeigen hier anomale Werte. Als Erklärung können Bewegungen der Gesteinslagen, bzw. magmatischer Ergüsse, z. B. Fließvorgänge herangezogen werden (LEVI 1979; BLEIL & SMITH 1979).

4 Schlußfolgerungen

Die magnetischen Bohrlochmessungen, die hier eingehend beschriebenen 3-D-Magnetometer-Feld-Messungen, aber auch die Suszeptibilitätsmessungen liefern interessante Ergebnisse im Hinblick auf eine Gliederung der durchteuften ozeanischen Basement-Gesteine. Dabei ergänzen sich Magnetik-Log und Suszeptibilitätslog in ausgezeichneter Weise, sollten also auch in Zukunft immer gemeinsam eingesetzt werden.

Im Vergleich zu Laboruntersuchungen von Bohrkernen bieten die Bohrlochmessungen den Vorteil kontinuierlicher Profile mit entsprechend hoher Auflösung und detaillierten Aussagen.

Ein besonderer Vorteil der 3-D-Magnetometermessungen ist die Bestimmung auch der Deklination der Magnetisierung, womit erstmalig Paläopolbestimmungen und damit Altersangaben nach der Magnetik im Rahmen von ODP möglich waren.

Auf der anderen Seite liegt der Vorteil der Bohrkernvermessungen in den großen experimentellen Möglichkeiten im Labor

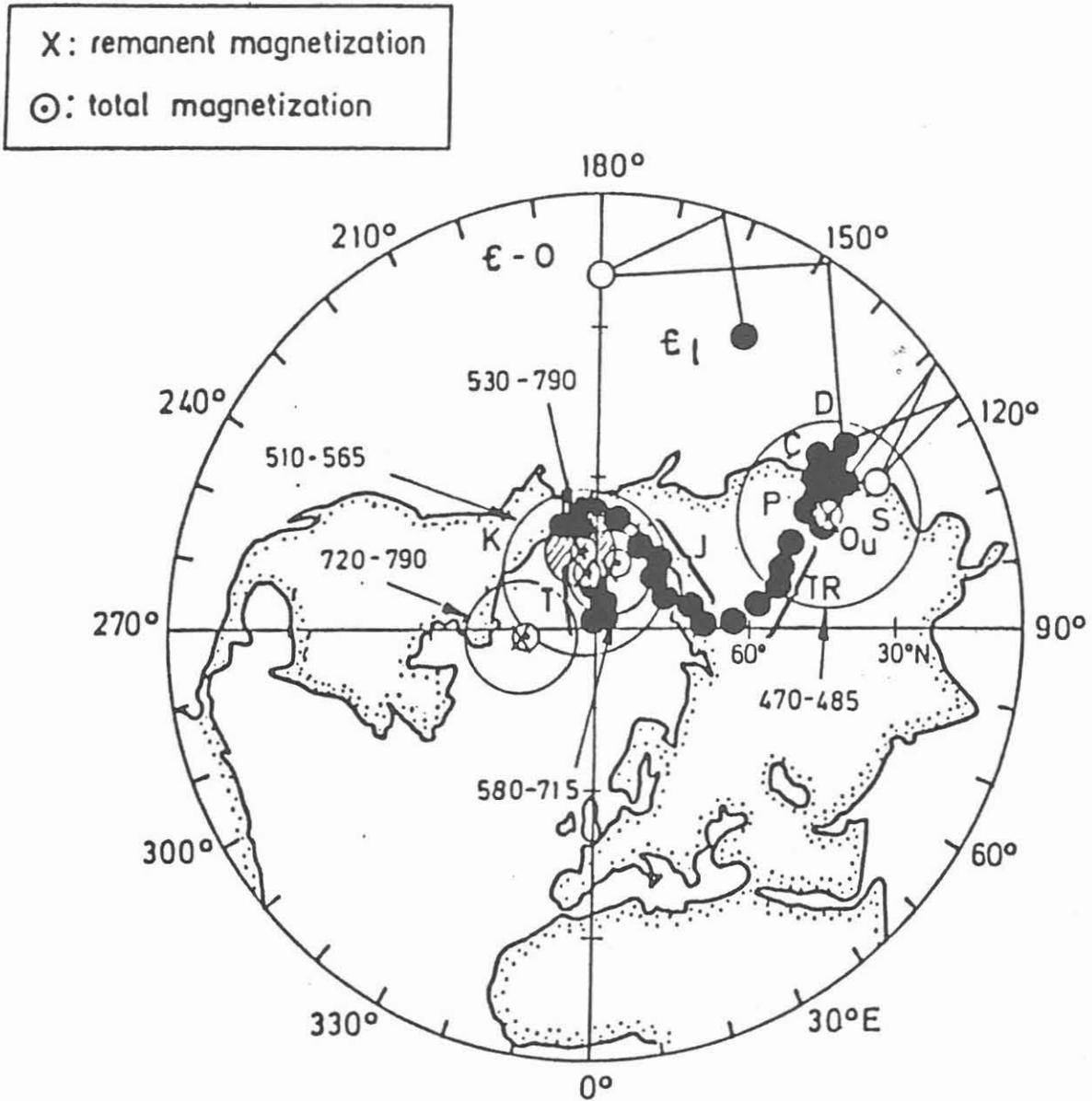


Abb. 9: Polar Wander Kurve (APWP) und Polpositionen errechnet aus den 3-D-Messungen in Bohrung 418A mit Angabe des Fehlerkreises "95" nach Fischer. Tiefenangaben in m u. M. T: Tertiär; K: Kreide; T_B: Trias; P: Perm; C: Karbon; D: Devon; S: Silur, O_U: Ob. Ordovizium, ε₀: Kambrium-Ordovizium, ε_L: Unteres Kambrium.

und den daraus resultierenden signifikanten Testen und Untersuchungen, wie Entmagnetisierung, CURIE-Punkt-Bestimmung, Hysterese- und Sättigungsmagnetisierungsmessungen, so daß die Kombination von Bohrloch- und Bohrkernuntersuchungen erst die Aussagemöglichkeiten der Magnetik voll erschließt.

Literatur

- Bleil, U. & Smith, B., 1979: Paleomagnetism of basalts, Leg 51. - In: Donnelly, T., Francheteau, J., Bryan, W., Robinson, P., Flower, M., Salisbury, M. et al., Init. Repts. DSDP, 51, 52, 53, Pt. 2: Washington (U. S. Govt. Printing Office), pp. 1351-1361.
- Bosum, W., 1985: Magnetische Bohrlochmessungen in den Bohrungen Kirchzarten 1, 2 und 3 unter Verwendung eines 3-D-Bohrlochmagnetometers. - In: Geol. Jahrb., E28, S. 237-261.
- Bosum, W. & Rehli, H.-J., 1985: Bau und Erprobung eines 3-D-Bohrlochmagnetometers. - In: Geol. Jb. E28, S. 191-217.
- Bosum, W. & Scott, J.H., im Druck: Interpretation of Magnetic Logs in Basalt, Hole 418A. - In: Salisbury et al., Proceedings, Init. Repts. (Part B) of the Ocean Drilling Program.
- Landolt-Börnstein, 1985: Numerical data and functional relationships in science and technology, new ser., group V. - In: Fuchs, K. and Soffel, H.: Geophysics of the Solid Earth, the Moon and the Planets, subv. B of Geophysics and Space Research, v. 2: Heidelberg (Springer-Verlag).
- Levi, S., 1979: Paleomagnetism and some magnetic properties of basalts from the Bermuda Triangle. - In: Donnelly, T., Francheteau, J., Bryan, W., Robinson, P., Flower, M., Salisbury, M. et al., Init. Repts. DSDP, 51, 52, 53, Pt. 2: Washington (U. S. Govt. Printing Office), pp. 1363-1378.
- Levi, S., Bleil, U., Smith, B. M. & Rigotti, P. A., 1979: Compilation of paleomagnetic and rock magnetic results of basalt samples from Deep Sea Drilling Project Legs, 51, 52, and 53. - in: Donnelly, T., Francheteau, J., Bryan, W., Robinson, P., Flower, M., Salisbury, M., et al., Init. Repts. DSDP, 51, 52, 53 Pt. 2: Washington (U. S. Govt. Printing Office), pp. 1337-1350.