

Paläomagnetisch-sedimentologische Analysen sedimentärer Zyklen in der Weddell See und ihre stratigraphische Interpretation

Spieß, V
 Grobe, H

1989

1. VORBEMERKUNG

Im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens Sp 296/1 wurden in den Jahren 1986 und 1987 zwei aufeinanderfolgende Finanzierungsanträge gestellt, um sedimentologische und paläomagnetische Arbeiten im Zeitraum von 07.1987 bis 06.1989 an Sedimenten aus der Weddell See, Antarktis durchzuführen.

Im ersten Antragsjahr wurden Personalmittel für eine studentische Hilfskraft (19 h/Woche) für die paläomagnetischen Arbeiten beantragt und bewilligt. Für die sedimentologischen Arbeiten war ein(e) ganztags beschäftigte(r) technische(r) Assistent(in) beantragt worden. Eine halbe Stelle (BAT VII/2) wurde bewilligt. Im zweiten Antragszeitraum wurden 1.5 studentische Hilfskraftstellen (19 h/Woche) und eine volle TA-Stelle (BAT VII) beantragt, von denen eine studentische Hilfskraftstelle und eine volle TA-Stelle bewilligt wurden.

Die im Antrag vorgeschlagenen Messungen konnten zum überwiegenden Teil im Antragszeitraum und in den darauffolgenden Jahren durchgeführt werden.

Während die sedimentologischen Untersuchungen einen weitgehend unabhängigen Datensatz lieferten und damit, auch aufgrund der intensiven Vorarbeiten von Grobe (1986), einer Interpretation unmittelbar zugänglich waren, konnte eine endgültige Interpretation der magnetischen Messungen erst mit der kürzlich erfolgten Erarbeitung eines stratigraphischen Konzepts vorgenommen werden (Grobe & Mackensen, 1992). Dies ist einer der Hauptgründe dafür, daß zahlreiche im Rahmen des Projekts gesammelte sedimentologische Daten bereits publiziert werden konnten (Mackensen et al., 1989, 1990; Grobe et al., 1990a,b; Grobe & Mackensen, 1992; Grobe et al., eingereicht), während dies für die magnetischen Daten erst noch bevorsteht. Aus diesem Grund sollen hier die sedimentologischen Ergebnisse nur kurz zusammengefaßt werden, während auf die Ergebnisse der Magnetik etwas ausführlicher eingegangen wird. Auf eine vollständige Diskussion der Ergebnisse im Vergleich mit der umfangreichen Literatur soll hier allerdings aus Platzgründen verzichtet werden und vorwiegend auf die durchgeführten Arbeiten, die Resultate und die Implikationen für die abschließende Bearbeitung hinzuweisen.

PUBLIKATIONEN

Wissenschaftliche Ergebnisse, deren Gewinnung zum Teil oder vollständig im Rahmen des Forschungsprojektes gefördert wurden, wurden in folgenden wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht bzw. auf Tagungen durch Vortrag oder Poster präsentiert:

Mackensen, A., H. Grobe, H.-W. Hubberten, V. Spieß, and D. K. Fütterer, 1989, Stable isotope stratigraphy from the Antarctic continental margin during the last one million years, *Mar. Geol.*, 87, 315-321.

Veröffentlichung der ersten interpretierbaren Sauerstoffisotopenkurve aus dem Antarktischen Ozean. Die Interpretation wurde gestützt durch die in dem behandelten Sedimentkern (PS1388) eindeutig erfaßten paläomagnetischen Grenzen (Brunhes/Matuyama, Jaramillo).

Grobe, H., D. Fütterer and V. Spieß, 1990: Sedimentary Cycles and Climatic History of the Antarctic Continental Margin. In: Barker, P.F., J.P. Kennett, S. O'Connell et al.: *Scientific Results ODP 113. Ocean Drilling Program, College Station, 121-131.*

Grobe, H., D. K. Fütterer, and V. Spieß, 1990, Oligocene to Quaternary processes on the Antarctic continental margin, ODP Leg 113, Site 693, in *Proc. ODP*, edited by Barker, Kennett, *Scient. Res.*, 113, pp. 121-131, College Station, TX (Ocean Drilling Program).

In dieser Arbeit wurden die sedimentologischen und paläomagnetischen Ergebnisse von zwei im Rahmen dieses Antrages bearbeiteten Kernen (PS1481, PS1591) verwendet, um die oberen gestörten Meter der ODP-Bohrung 693 zu ergänzen und somit eine Interpretation der vollständigen Abfolge vom Oligozän bis zum Quartär zu ermöglichen.

Mackensen, A., H. Grobe, G. Kuhn, and D. K. Fütterer, 1990, Benthic foraminiferal assemblages from the eastern Weddell Sea between 68 and 73°S: distribution, ecology and fossilization potential, *Mar. Micropal.*, 16, 241-283.

Diese Arbeit beschäftigt sich vorwiegend mit den Foraminiferenvergesellschaftungen des Untersuchungsgebietes. Die Faunendaten wurden ergänzt durch die im Rahmen dieses Antrages bearbeiteten sedimentologischen Daten der Oberflächenproben.

Grobe, H., A. Mackensen, H.-W. Hubberten, V. Spieß, and D. K. Fütterer, 1990, Stable isotope record and late Quaternary sedimentation rates at the Antarctic continental margin. In *Geological History of Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*, edited by U. Bleil and J. Thiede, pp. 729-760, NATO/ASI Series C: Dordrecht, the Netherlands (Kluwer Academic Press).

Interpretation weiterer Isotopenkurven von Kernen auf 'Profil Atka'. Erste detaillierte Darstellung der Sedimentationsraten am Antarktischen Kontinentalhang während eines Klimazyklus mit Rekonstruktion der relevanten Sedimentationsprozesse.

Grobe, H., & A. Mackensen, 1992, im Druck, Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin. In: J. Kennett and D. Warnke (eds.), *Antarctic Glacial Evolution, Antarctic Research Series.*

Umfassende Rekonstruktion von Paläoglazilogie, Paläoozeanographie und Paläoproduktivität am Antarktischen Kontinentalhang für die beiden letzten Klimazyklen auf der Grundlage gestapelter sedimentologischer Parameter von 11 ausgewählten Kernen.

Grobe, H., The record of sea-level changes in Pleistocene sediments from the Antarctic continental margin, 1992, Vortrag und Abstract, 82. Tagung der Geologischen Vereinigung, Stuttgart.

Grobe, H. & Fütterer, D. K., in Vorbereitung, The record of sea-level changes in the Antarctic Ocean, *Geol. Rundschau.*

Vortrag und Veröffentlichung befassen sich mit der Interpretation des vorliegenden Datensatzes unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Meeresspiegelschwankungen auf die Sedimentationsprozesse während der quartären Klimazyklen.

Grobe, H., Fütterer, D. K., Hubberten, H., Kuhn, G. & Mackensen, A., 1993, eingereicht, Antarktische Sedimentfazies im Wechsel quartärer Klimazyklen, Vortrag und Abstract, Tagung der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Halle.

Grobe, H., Fütterer, D. K., Hubberten, H., Kuhn, G. & Mackensen, A., in Vorbereitung, Antarktische Sedimentfazies im Wechsel quartärer Klimazyklen, Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft.

In diesen Veröffentlichungen werden die im Rahmen dieses Antrages untersuchten Sedimente, ergänzt durch weitere Kerne aus dem Bereich des Weddellmeeres, auf Grund ihres Fossilinhaltes, ihrer mineralogischen Zusammensetzung und ihrer Korngrößenverteilungen in mehrere Fazies gegliedert, die wiederum unterschiedlichen Ablagerungsbedingungen zugeordnet werden können.

Mackensen, A., & Grobe, H., in Vorbereitung, Southern Ocean bottom-water production and North Atlantic deep-water flux: evidence from benthic foraminiferal assemblages, $d^{13}C$, biogenic opal and carbonate distribution, *Paleoceanography*.

Mackensen, A., Grobe, H., & Hubberten, H., Microhabitat and $d^{13}C$ fractionation of live deeply infaunal benthic foraminifera, in Vorbereitung, *Micropaleontology*.

An ausgewählten Kernen (PS1388, PS1506) werden die in diesem Antrag produzierten $d^{13}C$ -Isotopendaten, ergänzt durch weitere Kerne aus dem Bereich der Polarfront und des Südatlantik für überregionale Rekonstruktionen von Paläoozeanographie und Paläoproduktivität genutzt.

Abelmann, A., R. Gersonde, V. Spieß, 1989, Poster: Plio-Pleistocene Paleooceanography in the Weddell Sea - Siliceous Microfossil Evidence, Third International Conference on Paleooceanography, Cambridge.

Coordes, D., R. Gersonde, A. Abelmann, V. Spieß, 1989, Poster: Plio-Pleistocene Sedimentation on Maud Rise, Weddell Sea (Antarctic Ocean), Third International Conference on Paleooceanography, Cambridge.

Abelmann, A., R. Gersonde, V. Spieß, 1990, Plio-Pleistocene paleooceanography in the Weddell Sea - Siliceous microfossil evidence. In: U. Bleil & J. Thiede (Hrsg.), *Geological History of the Polar Ocean: Arctic versus Antarctic*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 729-759.

Verwendung paläomagnetischer Ergebnisse für Arbeiten über einen Nord-Süd-Transekt durch die Weddell See und den südwestindischen Ozean.

Spieß, V., 1988, Vortrag: Magnetostratigraphie mariner Tiefseesedimente, Kolloquiumsvortrag Universität Münster, 22.11.88

Spieß, V., H. Grobe, 1988, Poster: Combined High Resolution Paleomagnetic and Sedimentologic Analyses of Pleistocene Sediments Along the Antarctic Continental Margin, Weddell Sea. Advanced Research Workshop. *Geologic History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*, Bremen.

Spieß, V., H. Grobe, 1989, Poster: Pleistocene Sedimentation at the Weddell Sea Antarctic continental margin: palaeomagnetic and sedimentologic evidence, Third International Conference on Paleooceanography, Cambridge.

Präsentation von paläo- und gesteinsmagnetischen Ergebnissen des Profils Atka. Auf die dort gezeigten Ergebnisse wird in diesem Bericht näher eingegangen.

EINLEITUNG

Während der POLARSTERN-Expedition ANT IV/3 wurden auf drei hangnormalen Profilen am Antarktischen Kontinentalhang im östlichen Weddellmeer vor Camp Norway, vor der Georg-von-Neumayer Station und vor der Atka Bucht Sedimentkerne mit einem 1,5-t-Schwerelot gezogen. Eine ergänzende Beprobung ausgewählter Profilabschnitte oder -lücken wurde auf den Expeditionen ANT V und VI durchgeführt. Der vollständige Probensatz umfaßt 26 Kerne mit einer Gesamtlänge von ca. 200 m (Abb. 1). An den Kernen wurden 2413 sedimentologische und 1692 paläomagnetische Proben entnommen und bearbeitet (Tab. 1). Der Datensatz wurde durch die im Rahmen einer Dissertation (Grobe, 1986) bearbeiteten fünf Kerne auf einem Profil vor Kapp Norvegia ergänzt.

Mit den vorgestellten marin-geologischen Arbeiten des Forschungsschiffes POLARSTERN mit Schwerpunkt im Bereich der Atka Bucht wurde erstmals in engen Abständen umfangreiches Probenmaterial auf einem Kernprofil vom Schelf bis in die Tiefsee gesammelt. Damit sollten hochauflösend die Abhängigkeit der Lithologie und Sedimentologie von der Lage zur Schelf- und Eiskante und die Auswirkung der globalen Klimaänderungen auf die lokalen Sedimentationsprozesse untersucht und Zusammenhänge mit einem am gleichen Material gewonnenen paläo- und gesteinsmagnetischen Datensatz hergestellt werden.

ZIELSETZUNG

SEDIMENTOLOGIE

Die in den Anträgen formulierten Zielsetzungen der sedimentologischen Arbeiten (Abb. 2) umfaßten die Kernnahme und standardmäßige Bearbeitung mit den Schritten: Kernbeschreibung, Entnahme von Radiographien, Bestimmung von IRD, Wassergehalt, C_{org} , Karbonat, Opal, Korngrößen, Siltfraktion, Tonmineralen, Analyse der Sandkomponenten, Statistik der Sedimentologie, Stratigraphie und fazielle Gliederung. An ausgewählten Kernen waren ergänzende biostratigraphische, isopenstratigraphische und gegebenenfalls radiometrische Untersuchungen vorgesehen. Es wurde angestrebt, aus diesen Daten Aussagen zur Stratigraphie, Paläoglazilogie, Paläozeanographie, und Paläoklimatologie zu gewinnen und eine fazielle Charakterisierung der zyklischen Wechsel zwischen glazialen und interglazialen Ablagerungsperioden vorzunehmen.

MAGNETIK

Im Rahmen der magnetischen Messungen waren sowohl die magnetostratigraphische Einordnung durch die Identifikation von Polaritätswechseln und kurzzeitigen Feldvariationen als auch eine gesteinsmagnetische Charakterisierung der Sedimente angestrebt. Zu den eingesetzten Methoden gehörten die schrittweise Wechselfeldentmagnetisierung, Bestimmung der charakteristischen remanenten Magnetisierung (ChRM), Auswertung der Magnetisierungsintensität und Wechselfeldstabilität und Aufstellen einer Stratigraphie mit den Richtungsparametern (ausschließlich Inklination). Der Zusammenhang mit klimatisch gesteuerten Prozessen sollte anhand der Magnetisierungsintensität und Wechselfeldstabilität sowie zahlreichen weiteren gesteinsmagnetischen Parametern (Suszeptibilität, künstliche Remanenzen ARM, IRM, Curie-Temperaturen) in ihrem Zusammenspiel mit den

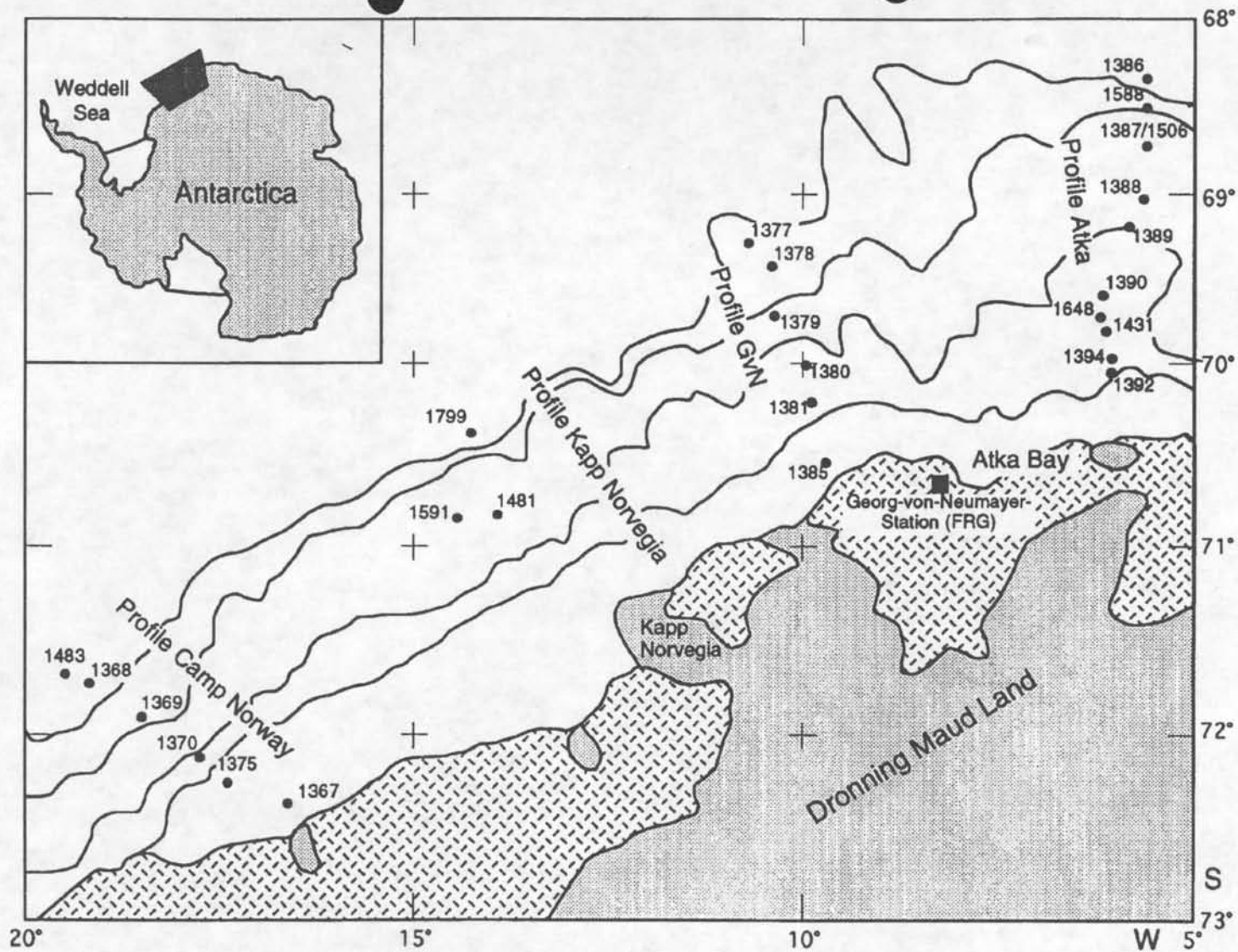


Abbildung 1: Karte der im Rahmen des Forschungsprojektes bearbeiteten Sedimentkerne am antarktischen Kontinentalrand mit Tiefenlinien im Abstand von 1000 Metern, aufschwimmenden Schelfeisen (gestrichelt) und Landgebiete (grau). Die 4 Kernprofile sind mit ihrem Namen gekennzeichnet, wobei 4 Kerne des Profils *Kapp Norvegia* bereits von Grobe (1986) vollständig bearbeitet wurden und hier nicht aufgenommen wurden.

Probenahme und Bearbeitung

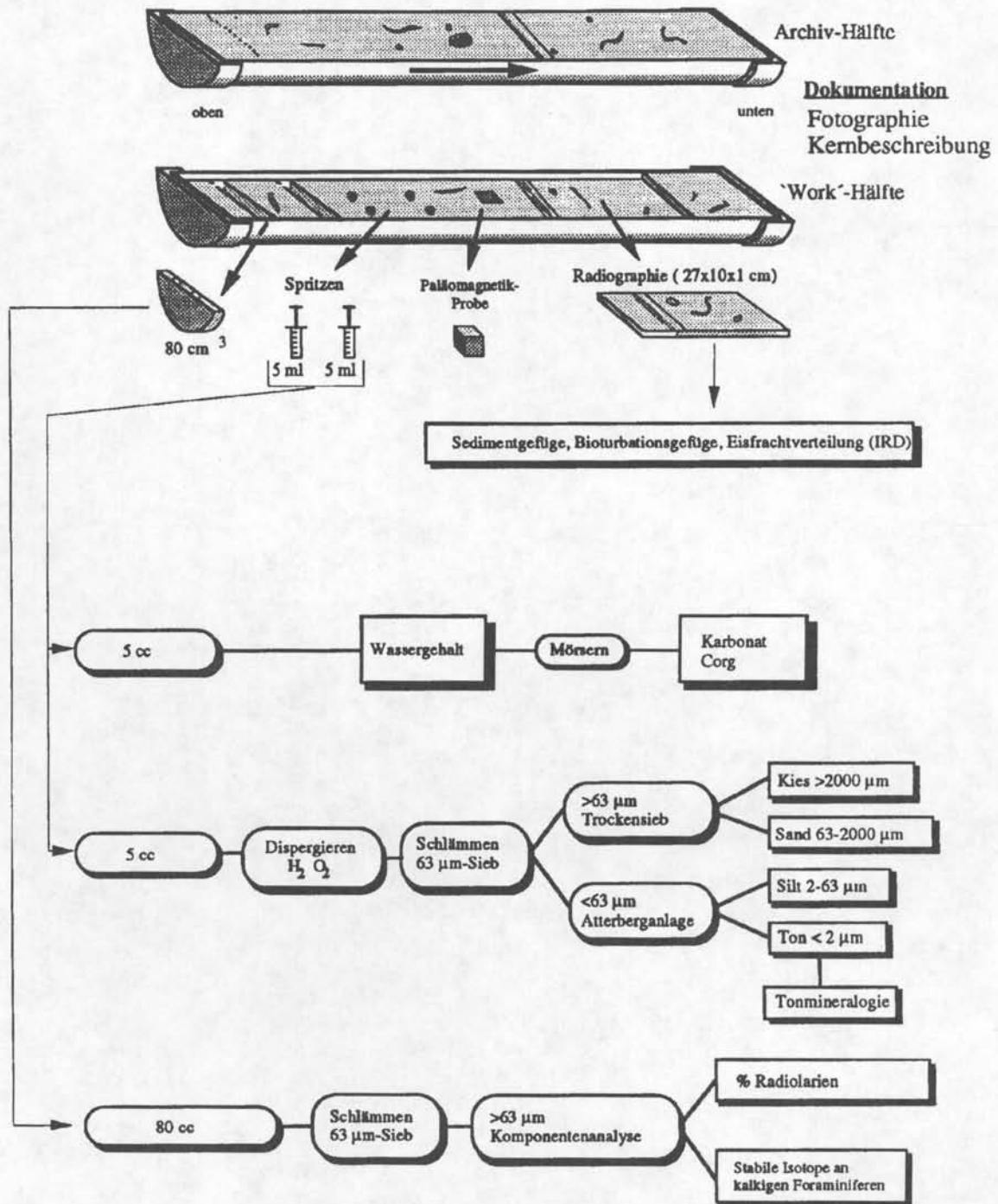


Abbildung 2: Probenahme und sedimentologische Bearbeitung. Skizze der verschiedenen Probentypen und Bearbeitungsschritte des für alle Kerne durchgeführten Standardschemas mit den abgeleiteten sedimentologischen Parametern.

Tabelle 1: Im Rahmen des Forschungsprojekts bearbeitete Sedimentkerne vom antarktischen Kontinentalrand

Kern	Geographische		Wasser- tiefe [m]	Kern- länge [m]	Sedimen- tologie Anzahl	Paläo- magnetik Anzahl
	Breite [°S]	Länge [°W]				
Profil Atka						
PS1392-1	70.196	6.725	1804	6.30	81	108
PS1394-4	70.100	6.850	1710	8.10	100	176
PS1431-1	69.819	6.588	2467	9.35	99	92
PS1648-1	69.740	6.525	2539	8.63	88	87
PS1390-3	69.614	6.399	2736	9.90	108	98
PS1389-3	69.217	5.933	2178	9.09	93	177
PS1388-3	69.033	5.917	2536	12.34	141	133
PS1387-3	68.733	5.867	2426	10.40	103	100
PS1506-1	68.733	5.850	2436	11.50	371	45
PS1588-1	68.532	5.798	3469	5.90	90	67
PS1386-2	68.333	5.633	4406	5.30	52	53
Profil GvN						
PS1385-3	70.483	9.595	340	0.95	10	-
PS1381-3	70.217	9.767	1775	9.76	100	96
PS1380-3	70.167	9.983	2119	9.45	100	96
PS1379-3	69.730	10.244	3210	1.63	24	-
PS1378-3	69.450	10.467	3729	8.15	82	80
PS1377-2	69.272	10.693	3804	9.00	91	88
Profil Kapp Norvegia						
PS1591-1	70.834	14.554	2371	12.20	153	-
PS1481-3	70.835	13.927	2515	10.80	154	107
PS1799-1	70.339	14.418	4420	3.91	40	-
Profil Camp Norway						
PS1367-2	72.333	16.500	310	2.38	25	-
PS1375-3	72.150	17.100	1760	9.10	106	89
PS1370-2	72.067	17.467	2332	4.49	49	-
PS1369-2	71.900	18.283	3209	4.00	40	-
PS1368-3	71.750	18.967	4008	5.51	63	-
PS1483-3	71.720	19.267	4148	5.30	50	-
Anzahl gesamt					2413	1692

sedimentologischen Parametern analysiert werden. In diesem Zusammenhang waren die Korrelation und Parallelisierung zwischen verschiedenen Kernen, die Bildung gleitender Mittel oder Methoden der Zeitreihenanalyse ins Auge gefaßt worden.

DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE

SEDIMENTOLOGIE

Im Rahmen der sedimentologischen Arbeiten wurden alle Kerne (Tab. 1) nach einem Standardschema mit einem mittleren Probenabstand von 10 cm beprobt. Die Untersuchungen (Abb. 2) an drei entnommenen Parallelproben umfaßten die Bestimmung des Wassergehaltes, des Gehaltes an organisch und karbonatisch gebundenem Kohlenstoff, die Bestimmung der prozentualen Anteile von Kies, Sand, Silt und Ton und die Analyse der Tonmineralvergesellschaftungen. An der Sandfraktion (> 63 μ m) wurde im Rahmen einer Grobfractionsanalyse der Gehalt an Radiolarien ausgezählt. Aus der gleichen Probe wurden planktische Foraminiferen (*Neogloboquadrina pachyderma*) zur Analyse der stabilen Isotopenverhältnisse von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ ausgelesen. An 10 Kernen des Profils Atka wurden zusätzlich detaillierte granulometrische Analysen der Siltfraktion durchgeführt. An Hand der routinemäßig präparierten Radiographien wurden die Kernbeschreibungen verbessert um die Sedimentstrukturen detailliert in die Interpretationen der Ablagerungsbedingungen mit einbeziehen zu können. Der Kiesanteil als Maß für den Eintrag eistransportierten Materials wurde entsprechend einer am AWI entwickelten Methode (Grobe, 1987) an Horizonten von jeweils 1 cm ausgezählt. Die von dem beantragten technischen Personal durchgeführten Arbeiten umfaßten die Entnahme und Aufbereitung des Probenmaterials (Trocknen, Sieben, Mörsern, Schlämmen, Wiegen), die Anfertigung von Texturpräparaten für die Röntgendiffraktion und die Kohlenstoffanalyse.

Obwohl Kontinentelhänge meist durch Rutschungen gestörte oder unvollständige Sedimentabfolgen liefern, ließ die spezifische Morphologie des Hanges im östlichen Weddellmeer vermuten, daß hier ein, zumindest für die quartären Abfolgen, weitgehend ungestörtes Sedimentpaket beprobt werden konnte. Der aus diesem Projekt hervorgegangene Datensatz bestätigt dies. Auf einer bis zu 200 km breiten Terasse am Hang zwischen 2000 und 2500 m (Abb. 3) haben sich ungestörte Sedimente zudem oberhalb der CCD (carbonate compensation depth) abgelagert, die somit in den meisten Proben einen ausreichenden Karbonatanteil für Isotopenmessungen enthielten (Abb. 4).

Da die paläomagnetischen Messungen nicht die erhofften stratigraphischen Unterteilungen der Brunhes-Epoche ermöglichten, wurden detaillierte Isotopenmessungen an planktischen Foraminiferen aus nahezu allen Proben durchgeführt. Die Isotopenanalyse von insgesamt 27 Sedimentkernen zeigte jedoch, daß die Daten nur schwer zu interpretieren sind. Das Isotopensignal wird vermutlich, besonders in Horizonten mit geringen Karbonatgehalten, durch Lösung verfälscht. Bisher konnte lediglich ein Kern (PS1388) eindeutig mit der globalen Isotopenchronologie korreliert werden (Mackensen et al., 1989). Mit Hilfe dieser Isotopenkurve war es jedoch möglich eine Lithostratigraphie zu entwickeln, die eine detaillierte stratigraphische Einstufung aller Kerne, zumindest für die beiden letzten Klimazyklen zuläßt (s. Grobe & Mackensen, 1992). An einer Ausweitung der Stratigraphie (1)

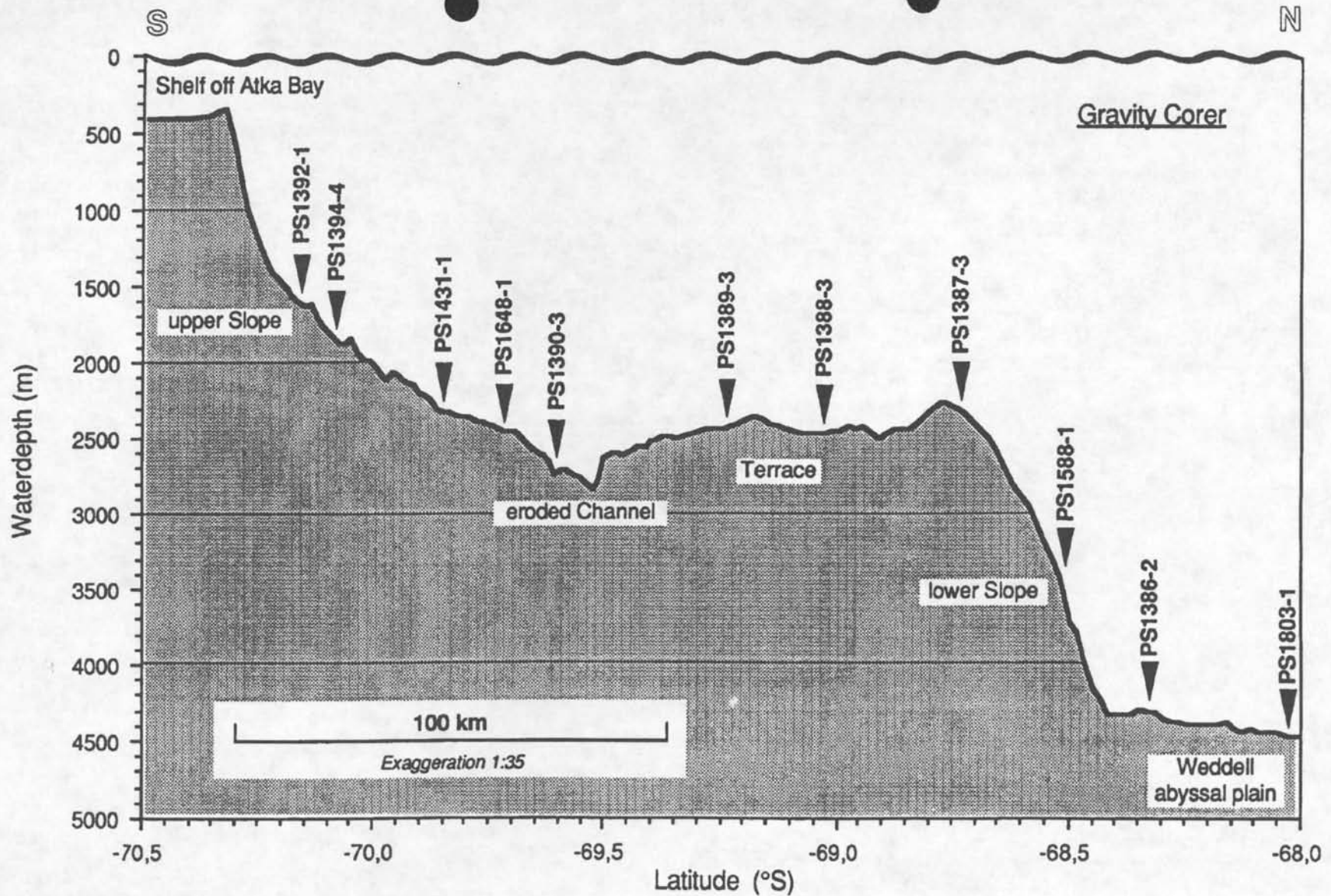


Abbildung 3: Bathymetrie des Profils Atka mit den Kernnahmestationen, aufgetragen gegen die geographische Breite. In einer Wassertiefe von etwa 2500 m ist eine ausgeprägte Terrasse erkennbar, die vom oberen Kontinentalhang durch eine Rinnenstruktur getrennt ist (Station PS1390).

● Karbonatgehalt [%] ●

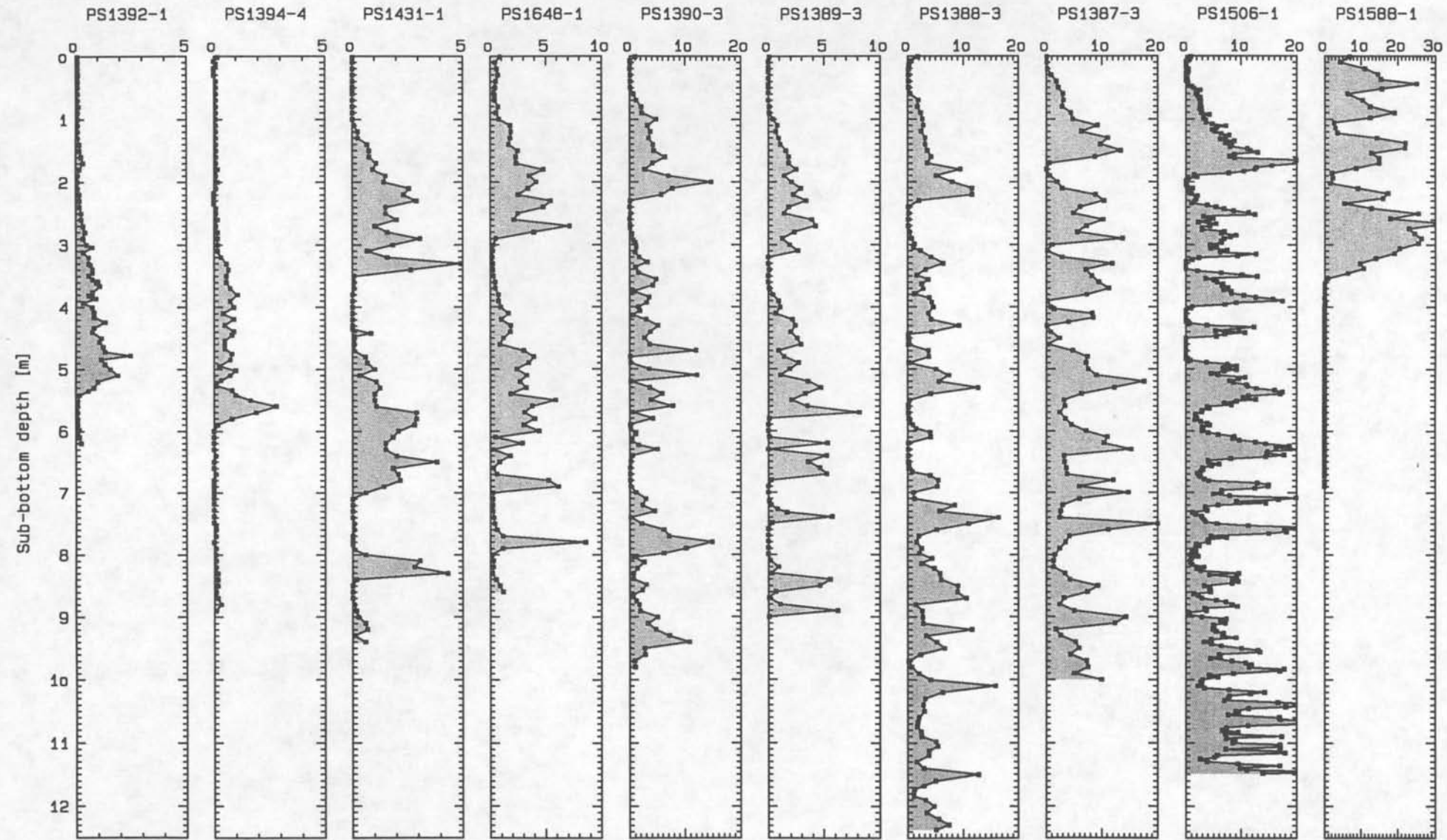


Abbildung 4: Karbonatgehalte [in %] für die 10 Sedimentkerne des Profils Atka gegen die Tiefe. Die Skalierung der Achsen wurde den jeweiligen Maximalwerten der einzelnen Kerne angepasst. Deutlich erkennbar ist die Zunahme vom Schelf bis in die Tiefsee. Die höchsten Werte finden sich am unteren Kontinentalhang in den Kernen PS1588-1 und PS1386-2, die niedrigsten in Schelfnähe in den Kernen PS1392-1 und PS1394-4.

für die letzte Million Jahre und (2) für die letzten 5 Millionen Jahre, gestützt auf die paläomagnetischen Ergebnisse, sowie an einer Interpretation auch der diagenetisch veränderten Isotopendaten wird zur Zeit gearbeitet.

Die Lithostratigraphie in Verbindung mit der sedimentologischen Analyse eines hochauflösenden Probensatzes ermöglichte die Verwendung einer neuen Auswertemethodik, die die Grundlage bildete für eine stark verbesserte Interpretation der geologischen Daten (Grobe & Mackensen, 1992). Für die Rekonstruktion der Paläoumweltbedingungen während der beiden letzten Klimazyklen wurden aus dem Datensatz 11 Kerne mit ähnlicher zeitlicher Auflösung ausgewählt. Für jeden Kern wurde ein Altersmodell für die letzten 300 000 Jahre aufgestellt und die zwischen den stratigraphischen Fixpunkten gemittelten Sedimentationsraten berechnet. Jeder Kern wurde in äquidistante Zeitschritte unterteilt und die individuellen Parameter durch Teilung durch den jeweiligen Maximalwert auf Werte zwischen 0 und 1 normiert. Die Parameter wurden durch Addition der zeitgleichen Werte und Division durch die Anzahl der Kerne gestapelt. Für die Interpretation der Sedimente im Hinblick auf Paläozeanographie, Paläoglazologie und Paläoproduktivität wurden diese gestapelten Parameter und nicht einzelne Kerne verwendet (Grobe & Mackensen, 1992).

Die Ergebnisse zeigen, daß für alle Kerne ein einheitliches Sedimentationsmodell angenommen werden kann. Die Variationen der sedimentologischen Parameter sind parallelisierbar und lassen sich für eine fazielle Gliederung heranziehen. Neben den relativen Anteilen von Karbonat, Radiolarien in der Sandfraktion, dem Siltanteil und dem Illitgehalt in der Tonmineralfraktion zeigen auch die Korngrößenspektren der terrigenen Siltfraktion charakteristische Unterschiede für die Schelffazies, die Opalfazies, die Karbonatfazies und die Kontouritfazies (Abb. 5). Während die Schelffazies grobkörnig mit hohem Sandgehalt ist, zeigen die übrigen Faziestypen eine stetige Zunahme mit abnehmender Korngröße. Die Breite der Verteilung unterscheidet sich aber signifikant mit den höchsten Grobanteilen in der Opalfazies und den geringsten in der Kontouritfazies (kein Sand). Die gemittelten Kurven (Grobe & Mackensen, 1992) zeigen, daß beim Übergang vom Glazial zum Interglazial der Radiolarienanteil sprunghaft und für kurze Zeit ansteigt, bevor die Produktion planktonischer Foraminiferen einsetzt. Zu diesen Zeiten werden die höchsten Sedimentationsraten gefunden. Die in der Opalfazies gleichzeitig beobachtete Zunahme der mittleren Korngröße und des Siltanteils geht mit der Abschmelzphase der Schelfeise einher. Sobald die Klimaoptima überschritten sind, findet ein stetiger Übergang zurück zu glazialen Verhältnissen statt mit langsam abnehmendem Karbonatanteil und deutlich reduzierter Sedimentationsrate statt.

Diese in zahlreichen Kernen beobachtete Abfolge läßt sich allgemein zur lithostratigraphischen Datierung verwenden, auch wenn die Messungen der Sauerstoffisotopen durch Schmelzwassereintrag und andere Störsignale nur mit Einschränkungen interpretiert werden können. Aufbauend auf diesem stratigraphischen Konzept und der Gliederung in vier Ablagerungsperioden lassen sich nun die paläo- und gesteinsmagnetischen Daten in ihrer zeitlichen Einordnung detaillierter untersuchen.

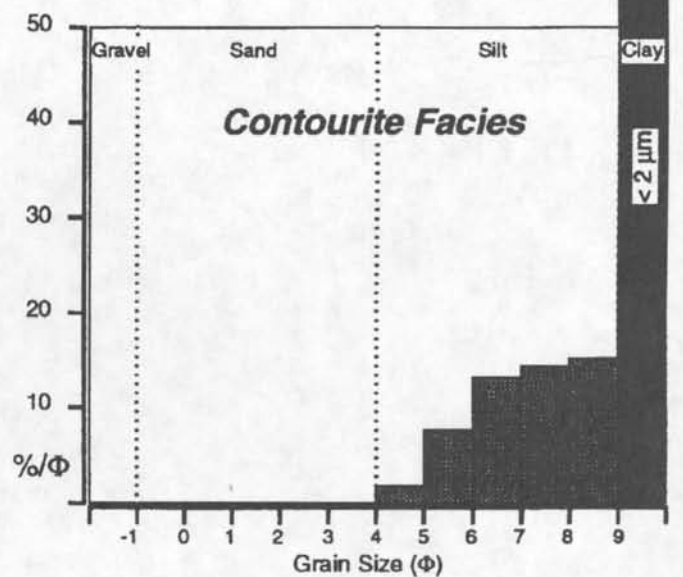
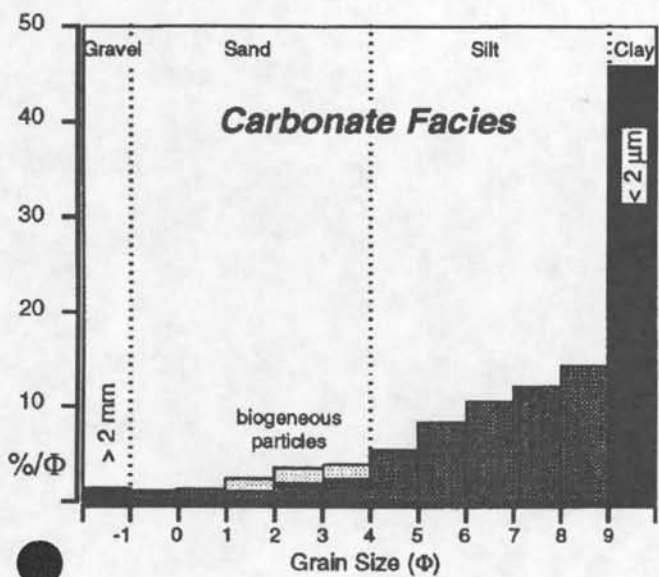
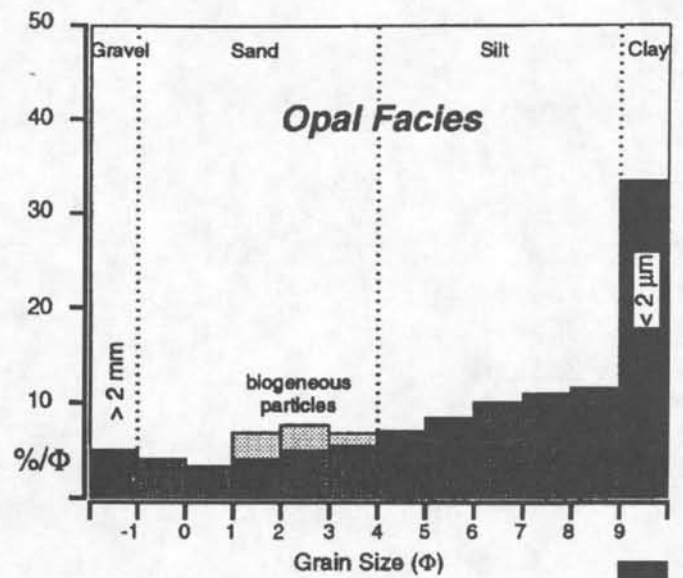
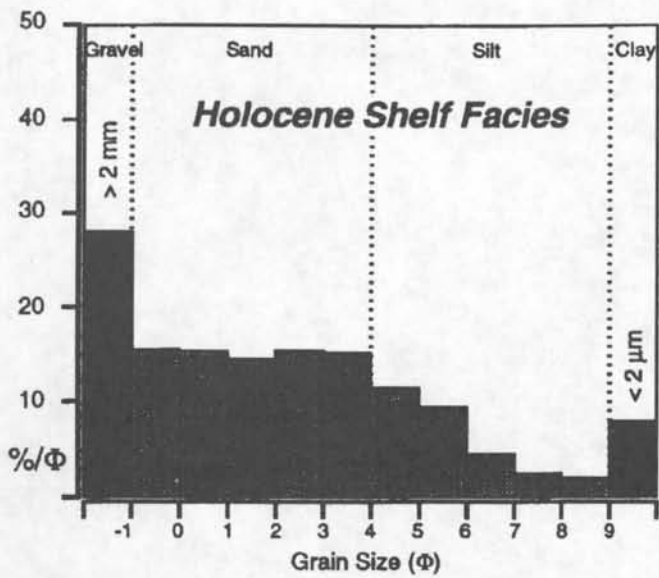


Abbildung 5: Gliederung der Sedimentfazies am antarktischen Kontinentalrand anhand der mittleren Korngrößenspektren (logarithmische Größenklassen Φ ; Sand/Silt-Grenze bei $64 \mu\text{m}$). Die vier Faziestypen unterscheiden sich durch ihre unterschiedlichen Sandgehalte und die Breite der Verteilungen. Der (geringe) Anteil biogener Partikel ist durch die punktierten Säulenabschnitte angedeutet.

Traditionell basiert die magnetostratigraphische Datierungsmethode auf der Identifikation von Polaritätswechseln des Erdmagnetfeldes in der sedimentären Abfolge. Für die mit Kerngeräten erreichbaren obersten 10 bis 15 Meter der Sedimentbedeckung, die in der Regel ein Alter von weniger als 4 Millionen Jahre aufweist, sind in den aktuellen Polaritäts-Zeit-Skalen (z.B. Berggren et al., 1985) einige wenige Änderungen der Magnetfeldkonfiguration global nachgewiesen worden, die letzte vor etwa 730 ka beim Übergang in die geomagnetische Brunhes Epoche. Bei einer Kernlänge von 10 Metern muß die Sedimentationsrate niedriger als 1.3 cm/ka sein, damit eine magnetostratigraphische Datierung zumindest mit der Brunhes/Matuyama-Grenze möglich ist.

In den vorliegenden Untersuchungen wurden nur in größeren Entfernungen von der Schelfkante ausreichend niedrige Sedimentationsraten beobachtet, so daß in einzelnen Schwerelotkernen durch die Erfassung der früheren magnetischen Epochen Matuyama, Gauß und Gilbert eine magnetostratigraphische Interpretation möglich wurde. Die ursprünglich bei Antragstellung formulierte Hoffnung, durch den Nachweis kurzzeitiger Polaritätsergebnisse innerhalb der Brunhes Epoche die magnetostratigraphische Auflösung deutlich zu verbessern, erfüllte sich nicht. Im Gegensatz zum Nordatlantik, wo im Rahmen der Arbeiten der Bremer Arbeitsgruppe zahlreiche Sedimentkerne hochauflösend magnetostratigraphisch eingeordnet werden konnten (u.a. Bleil & Gard, 1989; Nowaczyk & Baumann, 1990; Spieß, iVb), sind im vorliegenden Datensatz nur wenige Proben mit Magnetisierungsrichtungen nicht-normaler Polarität gefunden worden (Abb. 6). In allen Fällen (insbesondere auch für die Basis von PS1648-1) waren die Abweichungen mit anomalen Lithologien wie Turbiditen oder grobkörnigen/sandigen Lagen korreliert. Antiparallele Mehrkomponentensysteme, wie sie sich in den Sedimenten der Grönland-See und Framstraße (Bleil & Gard, 1987; Nowaczyk & Baumann, 1990; Spieß, iVb) häufig fanden, waren in keinem einzigen Fall nachweisbar.

Hohe Werte des mittleren entmagnetisierenden Feldes (MDF_{NRM}) zwischen 30 und 80 mT bei gleichzeitig sehr hohen Magnetisierungsintensitäten gewährleisten auf der anderen Seite, daß ausreichend stabile Magnetisierungsträger für die Dokumentation der Variationen des Erdmagnetfeldes im Sediment vorhanden sind. Die Richtungsstreuung bei der Abmagnetisierung ist sehr gering und charakterisiert ein Medium von hoher Aufzeichnungsqualität. Dennoch gibt es keine Hinweise auf abweichende primäre oder sekundäre Richtungskomponenten, die der rezenten Magnetfeldrichtung überlagert sind und von der normalen Dipolkonfiguration abweichen. Geht man davon aus, daß gleichzeitig in anderen Arealen der Nachweis von Richtungsanomalien, Feldkrisen und kurzzeitigen Polaritätsumkehrungen innerhalb der Brunhes-Epoche erbracht wurde (s.o.), so müssen für diese offensichtliche Diskrepanz Erklärungen gefunden werden:

- Die in den Sedimenten beobachteten, ausschließlich steilen Inklinationen deuten zunächst auf eine reine Dipolkonfiguration des regionalen Magnetfeldes hin. Unter der Annahme einer kontinuierlichen Sedimentation und damit einer vollständigen Erfassung der magnetostratigraphischen Sequenz widerspricht dieses Ergebnis den Beobachtungen in anderen Regionen. Obwohl sich aus den isotopenstratigraphischen Analysen deutliche Unterschiede zwischen glazialen und

Stabile/NRM Inclination

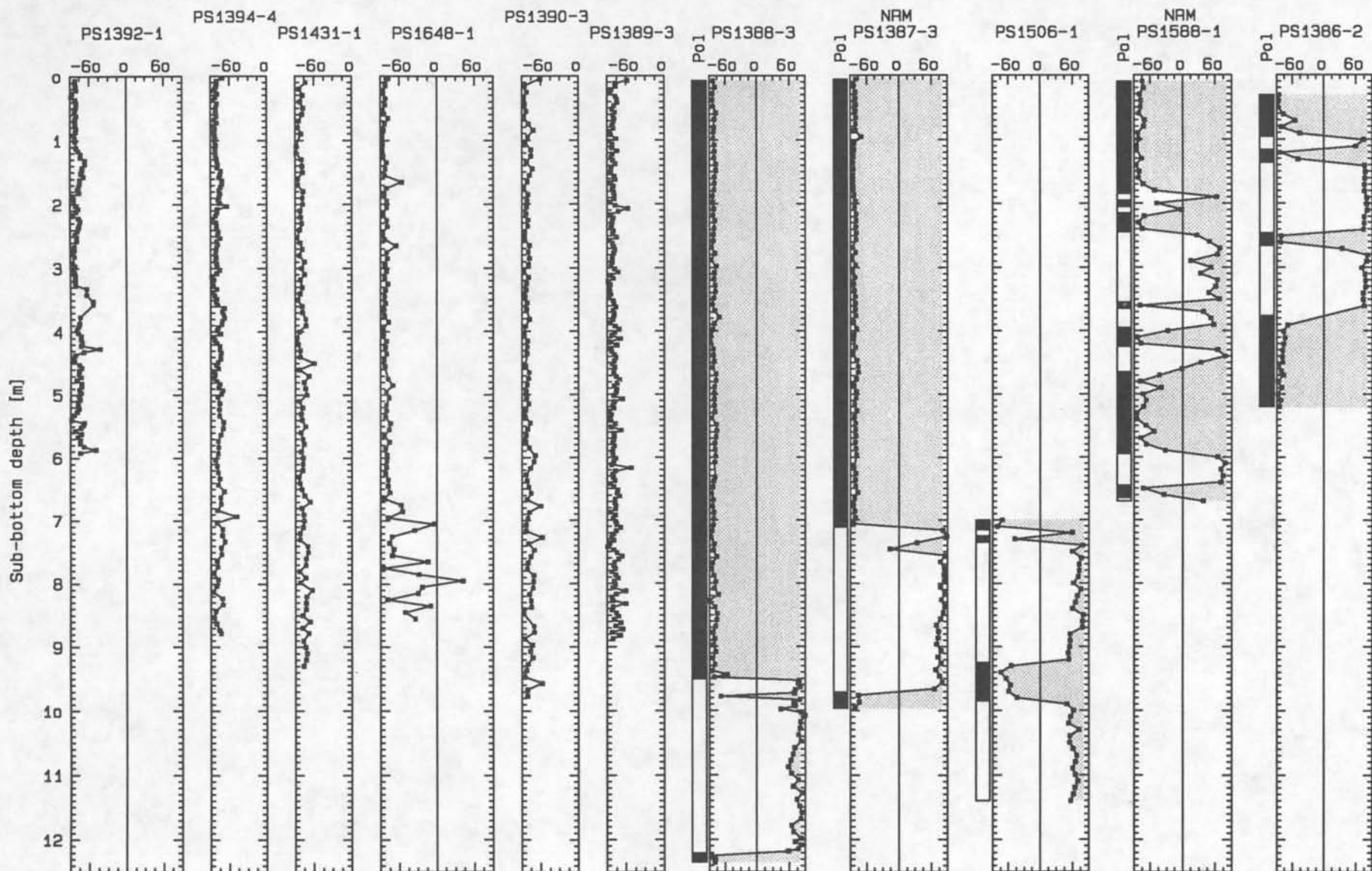


Abbildung 6: Stabile und NRM Inklination für die 10 Sedimentkerne des Profils Atka. Für die Kerne mit einem Alter von mehr als 730 ka sind die Inklinationswerte gegen die Dipolinklination -79° grau unterlegt und die Polaritätsbalken hinzugefügt (schwarz = normale, weiß = reverse Polarität).

interglazialen Sedimentationsraten ergeben, müßten zumindest einzelne kurzzeitige Variationen des Erdmagnetfeldes von einer mittleren Dauer von einigen tausend Jahren zu Zeiten hoher Sedimentationsraten aufgezeichnet worden sein, wenn die Annahme der Dipolgeometrie und globalen Synchronität Gültigkeit besitzt. Verliert dagegen zu Zeiten von Feldkrisen die Dipolkomponente an Bedeutung, so sind komplexe Geometrien der Verteilung der Inklinationwinkel auf der Erdoberfläche vorstellbar. Für eine Analyse dieser komplexen Feldzustände genügt der vorliegende, auf ein kleines Areal beschränkte Datensatz nicht.

- Die magnetostratigraphische Auflösung der Oberflächensedimente wird neben der Sedimentationsrate ganz wesentlich von Prozessen nach der Ablagerung am Meeresboden beeinflusst. Die zunehmende Entwässerung führt sukzessive zu einer Fixierung der magnetischen Partikel, so daß in einer bestimmten Tiefe ('lock-in' Tiefe) die vorherrschende Magnetfeldrichtung im Sediment gespeichert ist. Bioturbation, verbunden mit einer vertikalen Durchmischung und einer Glättung der Richtungsvariationen, eliminiert daher die kurzzeitigen Änderungen, wenn sie bis zur lock-in Tiefe wirksam ist. Das Fehlen der Polaritätsereignisse der Brunhes-Epoche in den antarktischen Sedimenten könnte also mit, gegebenenfalls regional unterschiedlichen, postsedimentären Prozessen der Magnetisierungsbildung und -veränderung erklärt werden. Eine Analyse dieser Vorgänge ist außerordentlich schwierig und läßt sich mit dem vorliegenden Datenmaterial noch nicht durchführen.

Magnetostratigraphische Kalibrierungspunkte konnten auf dem Profil Atka für Sedimentkerne mit größerem Abstand von der Schelfkante bestimmt werden. In den Schwerelotkernen PS1388-3, PS1387-3, PS1506-1, PS1588-1 und PS1386-2 wurden Polaritätswechsel identifiziert, die auf ein Sedimentalter von mehr als 730 ka (Brunhes/Matuyama Grenze) hindeuten. Abbildung 7 zeigt die Alters-Tiefen-Funktionen für die genannten Kerne. Als mittlere Sedimentationsraten für den Gesamtkern ergaben sich 13.4, 10.7, 10.0, 1.7, 1.5 m/Ma und damit eine stetige Abnahme mit zunehmender Entfernung von der Schelfkante. Während die Sedimentationsraten auf der Terasse sehr ähnlich sind, nehmen sie am Steilhang und in der Tiefsee deutlich bis auf wenige Meter pro Million Jahre ab, so daß dort Sedimentalter der Basis von 2 bis 4 Millionen Jahren erreicht werden. Eine Präzisierung für die jüngeren Abschnitte erfahren diese Werte durch die Messungen von $\delta^{18}\text{O}$, deren Veröffentlichung bevorsteht. Einzelergebnisse der Magnetostratigraphie wurden bereits in oben aufgeführte Publikationen eingearbeitet (Mackensen et al., 1989; Grobe et al., 1990; Abelmann et al., 1990), deren zusammenfassende Veröffentlichung sich an die Abgabe dieses Abschlußberichts anschließen soll.

Abbildung 8 zeigt weitere magnetostratigraphische Ergebnisse der Schwerelotkerne PS1377-2, PS1378-2, PS1381-3 und PS1481-3, die westlich des Profils Atka liegen (Abb. 1). Die mittleren Sedimentationsraten liegen mit 3.5, 4.2, 3.2 und 4.8 m/Ma deutlich niedriger als auf der Terasse vor der Atka Bucht. Keine Polaritätswechsel wurden in den Kernen PS1375-3 und PS1380-3 gefunden, die demzufolge wahrscheinlich ein Basisalter von weniger als 730 ka und Sedimentationsraten in der Größenordnung von >10 m/Ma aufweisen. Die magnetostratigraphischen Ergebnisse für Kern PS1481-3 wurden als Ergänzung zu den Auswertungen von ODP Probenmaterial der Bohrung 693 (Grobe et al., 1990) eingebracht.

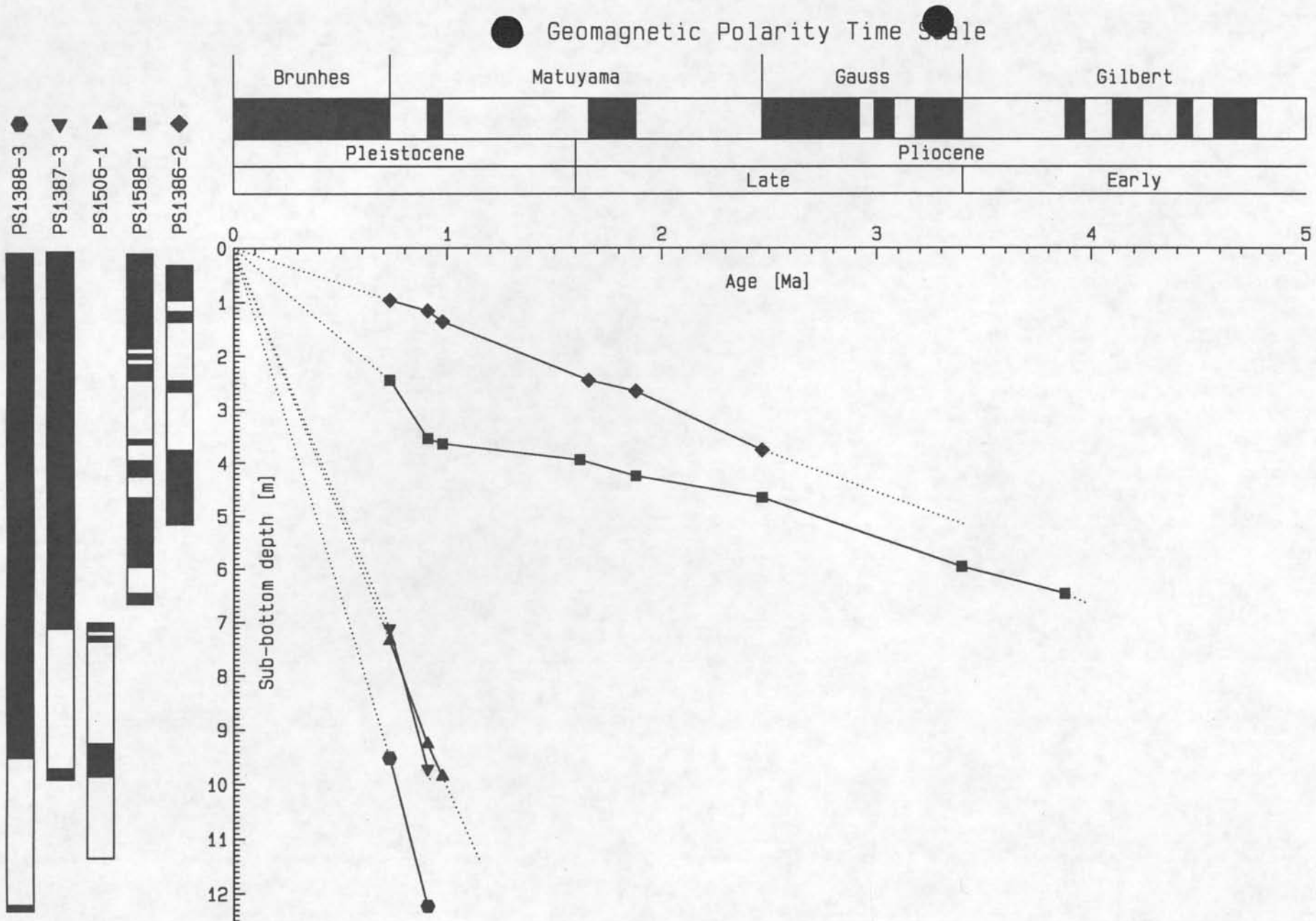


Abbildung 7:

Alters-Tiefen Funktionen für die Kerne PS1388-3, PS1387-3, PS1506-1, PS1588-1 und PS1386-2 des Profils Atka nach der der magnetostratigraphischen Interpretation der stabilen Magnetisierungsrichtungen. Punktierte Linien sind interpoliert zum Nullpunkt und extrapoliert mit der zuletzt bestimmten Sedimentationsrate bis zur Basis der Kerne. Die Ergebnisse insbesondere bei niedrigen Sedimentationsraten müssen noch mit weiteren biostratigraphischen Untersuchungen gestützt werden.

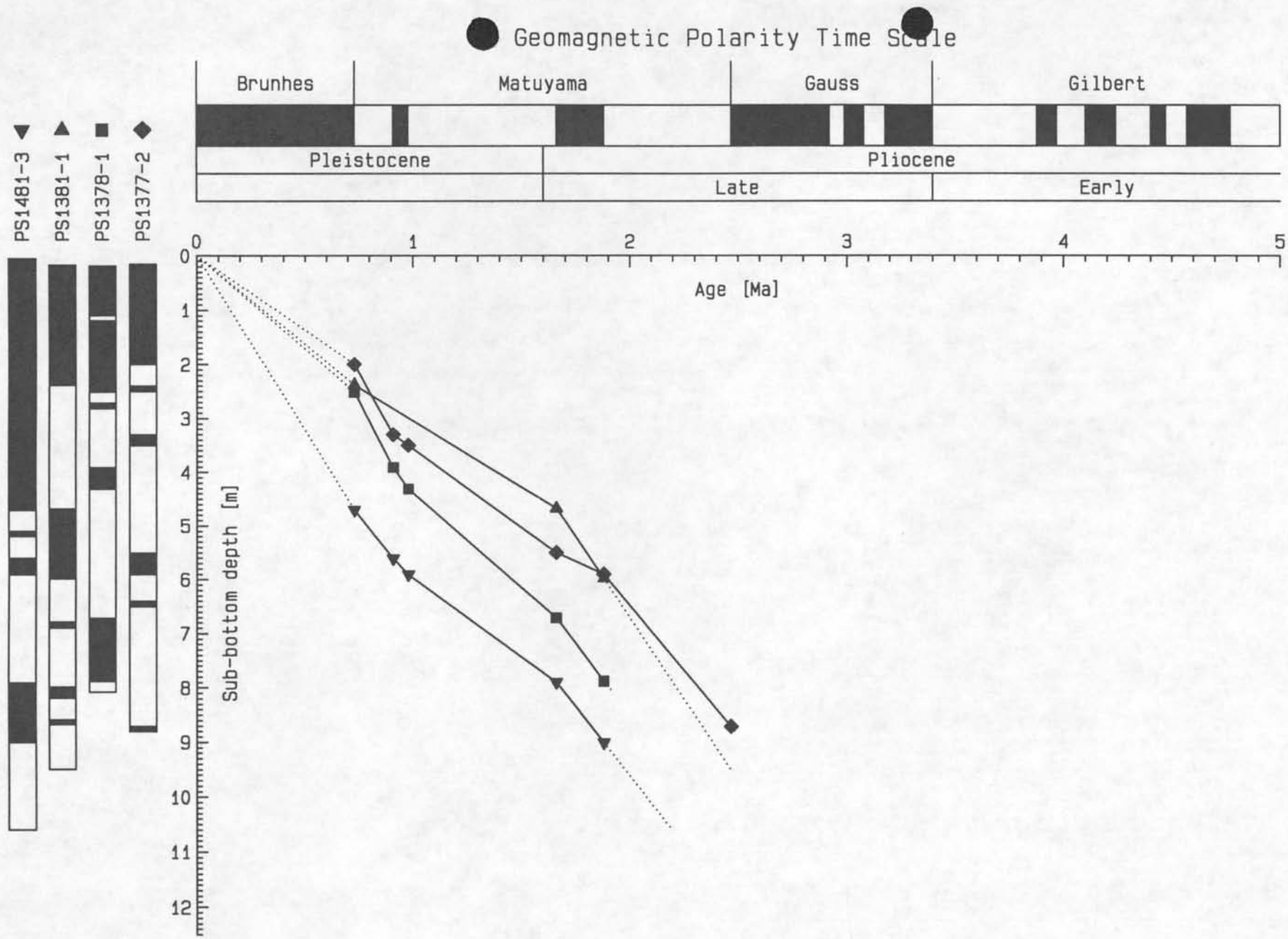


Abbildung 8: Alters-Tiefen Funktionen für die Kerne PS1377-2 (NRM), PS1378-1 (NRM), PS1381-1 und PS1481-3 abgeleitet aus der magnetostratigraphischen Interpretation. Sonst wie Abbildung 7.

Mit den paläomagnetischen Messungen wurden im Zuge der schrittweisen Wechselfeldentmagnetisierung magnetische Parameter an den Sedimentproben bestimmt, die nicht ausschließlich von den Variationen des Erdmagnetfeldes und seiner Dokumentation in den Sedimentproben kontrolliert werden, sondern wesentlich von den Ablagerungsbedingungen, dem Eintrag magnetischen Materials und den vorherrschenden Strömungs- und Transportprozessen abhängen. Die ersten Beobachtungen eines scheinbaren direkten Zusammenhangs zwischen der Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung und dem Karbonatgehalt in einzelnen Kernen waren Anlaß für eine systematischere Untersuchung an einer größeren Zahl von Kernen aus einem begrenzten Areal mit überwiegend vergleichbaren Umweltbedingungen.

Eine besonders auffällige Charakteristik zeigt der Verlauf des mittleren entmagnetisierenden Feldes (Abb. 9) mit der Teufe. In den kontinentnahen Kernen waren sprunghafte Änderungen im Niveau zwischen ~27 mT und ~80 mT zu beobachten, die in den übrigen magnetischen (NRM Intensität, Abb. 10; Suszeptibilität, Abb. 11) und sedimentologischen Parametern keine Entsprechung besaßen. Auf der Terasse und am unteren Kontinentalhang lagen die Werte in der Nähe des höheren Niveaus mit stetigen zyklischen Änderungen. Der MDF Parameter ist prinzipiell nicht unabhängig vom äußeren Magnetfeld und der Magnetisierungsrichtung, da bei dessen Umkehr mehrere Richtungskomponenten in einer Probe vorhanden sein können, die, gemeinsam entmagnetisiert, zu einer schnelleren Abnahme der Intensität führen können. Da jedoch keine abweichenden Richtungen beobachtet wurden, kann von einer einzigen Richtungskomponente ausgegangen werden, zumal in Kern PS1648-1 selbst bei Abmagnetisierung bis zu einer Feldstärke von 250 mT (sonst standardmäßig max. 100 mT) nur Einkomponentensysteme gefunden wurden. Daher müssen die beobachteten Variationen mit der Quantität und Qualität der magnetischen Trägerminerale im Sediment in direktem Zusammenhang stehen.

Um diese Tatsache näher zu untersuchen, wurden in der verbleibenden Zeit des Projekts gesteinsmagnetische Messungen durchgeführt. Dazu zählten vor allem die Aufprägung und Abmagnetisierung künstlicher Remanenzen (ARM, IRM), die in zahlreichen Studien (vgl. z.B. Thompson & Oldfield, 1986) erfolgreich durchgeführt werden konnte. Es zeigte sich, daß im Gegensatz zur Aufprägung der ARM, für die zum damaligen Zeitpunkt (1988/89) keine Laborgeräte mit geeignet hohen Konstant- und Wechselfeldern verfügbar waren, vor allem die schrittweise Erzeugung einer Sättigungsmagnetisierung (IRM) mit einem Pulsmagnetisierer die paläomagnetischen Messungen bestätigte. Damit ließen sich Parameter wie die Sättigungsmagnetisierung, das $H_{1/2}$ und das MDF der IRM bestimmen und gezielt auf die Variationen der magnetischen Kornfraktion hin analysieren. Zusammen mit der Suszeptibilität stand ein geeigneter Datensatz zur Verfügung, um nach einer Methode von Thompson & Oldfield (1986) eine Abschätzung der magnetischen Korngröße vorzunehmen.

Unter der Annahme einer ausschließlich aus Magnetit bestehenden magnetischen Fraktion, die durch Messungen der Curie-Temperaturen bestätigt werden konnte, lassen sich Suszeptibilität und Sättigungsremanenz in ein Nomogramm eintragen. Aus diesem nach empirischen Daten u.a. von Dankers (1978) und Thompson & Oldfield (1986) aufgestellten

NRM Median Destructive Field [mT]

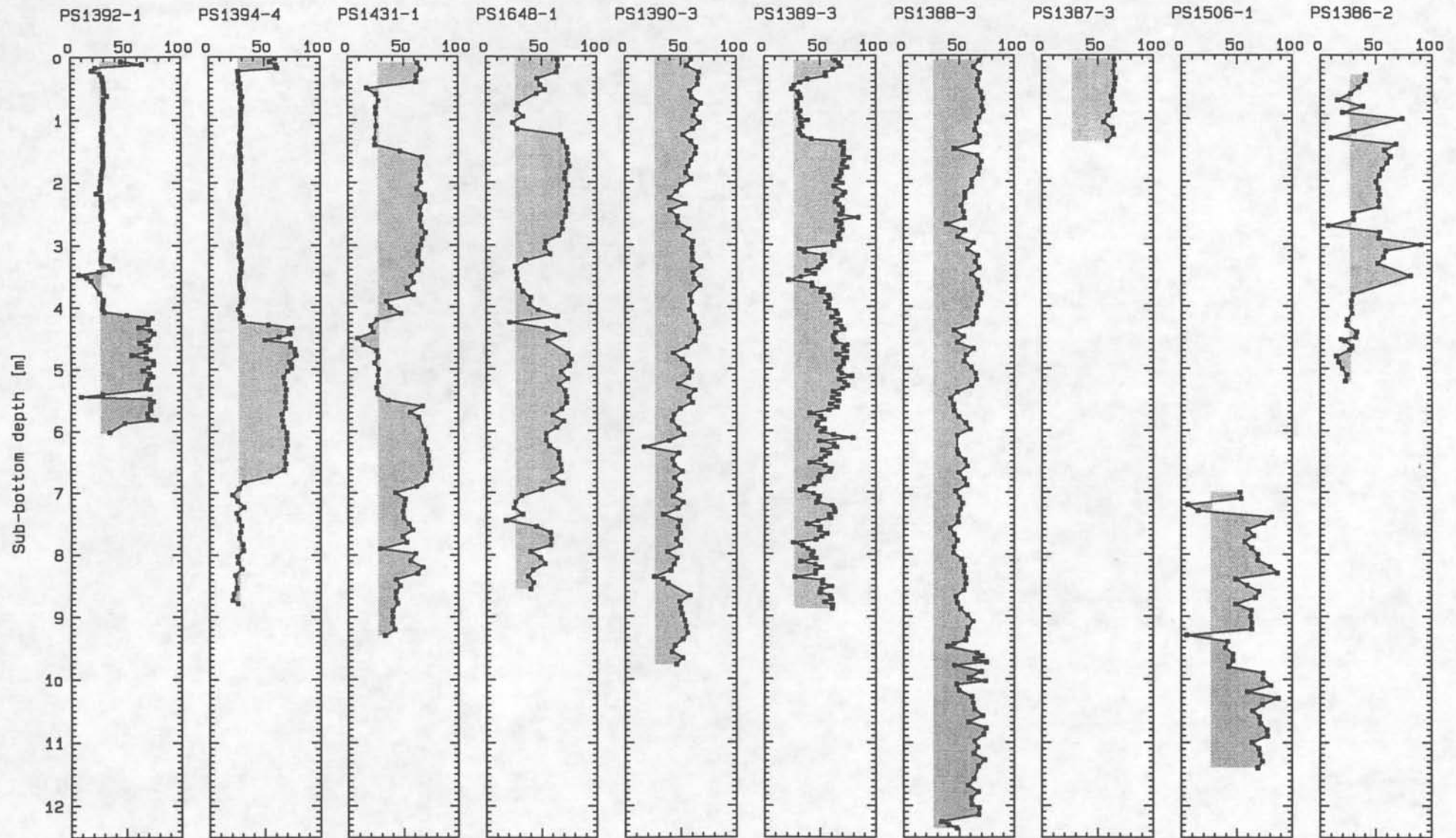


Abbildung 9: Mittleres entmagnetisierendes Feld (MDF) der NRM in mT in Abhängigkeit von der Tiefe für die Sedimentkerne des Profils Atka. Die Kurven sind relativ zu einem Niveau von 27 mT grau eingefärbt, das in vielen Kernen ein Minimum darstellt.

NRM Intensity [mA/m]

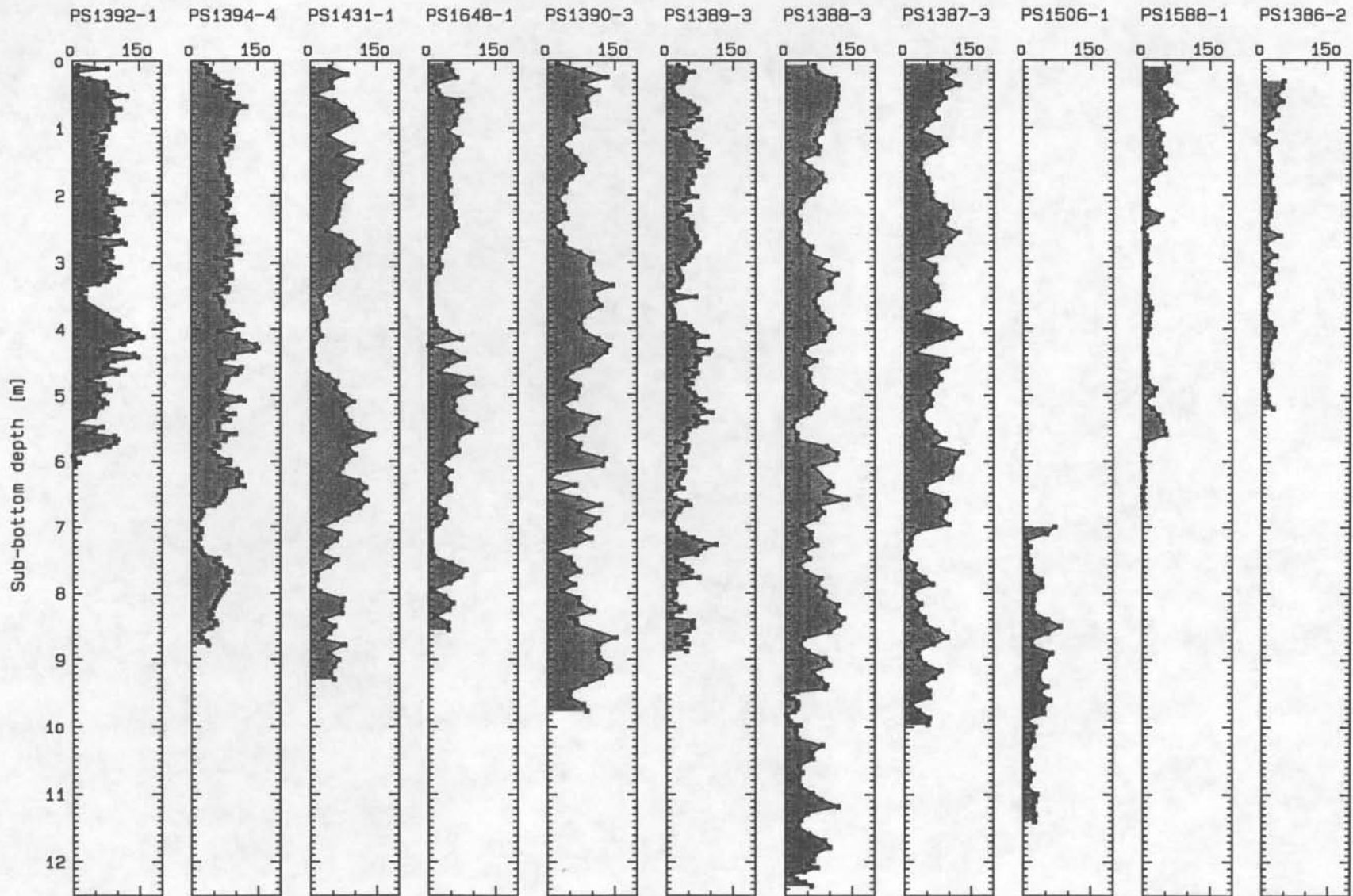


Abbildung 10: Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung in mA/m in Abhängigkeit von der Tiefe für die Kerne des Profils Atka.

Susceptibility [μSI]

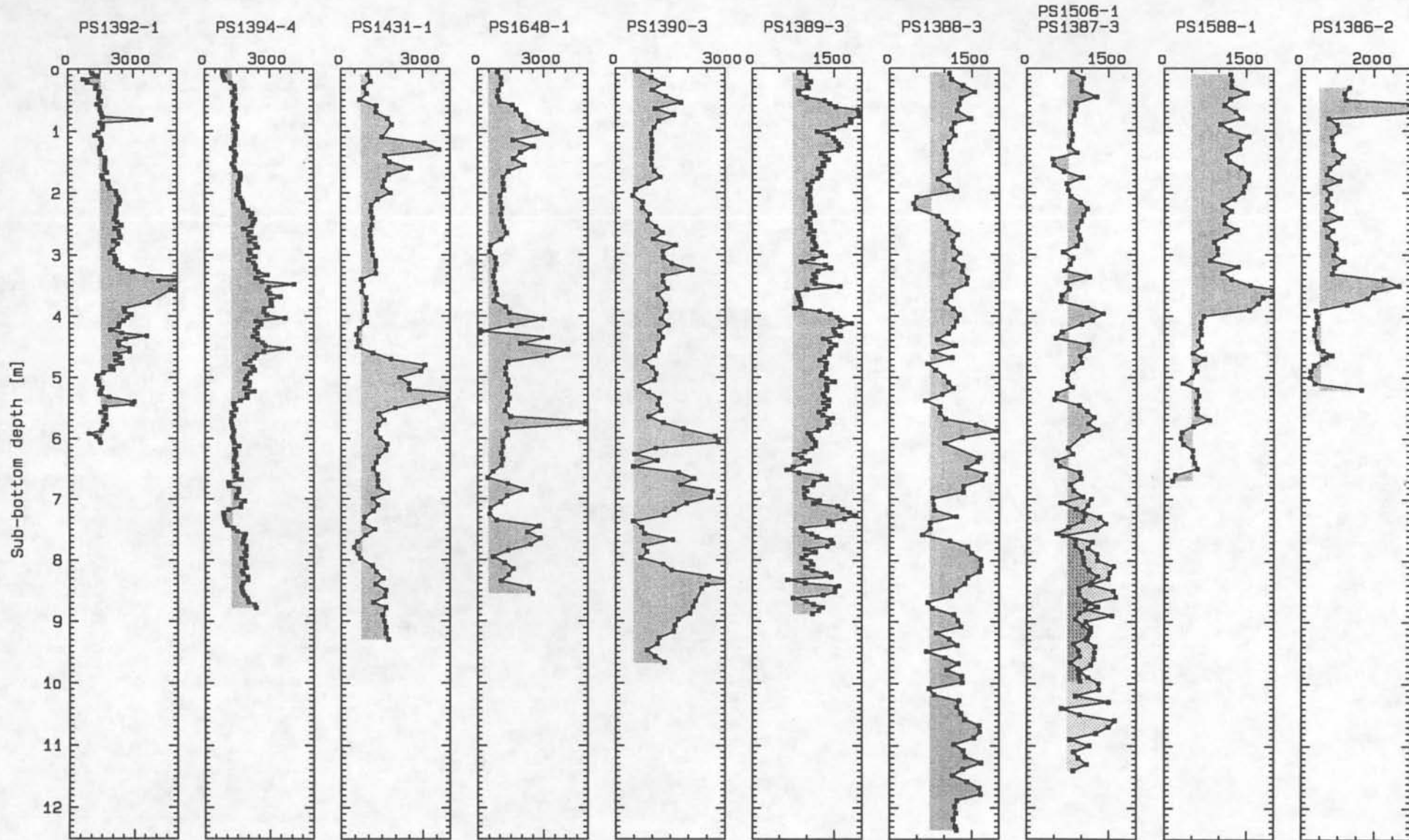


Abbildung 11: Magnetische Suszeptibilität in 10^{-6} SI in Abhängigkeit von der Tiefe für die Kerne des Profils Atka. Die Achsenskalierung und das Referenzniveau für die Graufärbung wurden willkürlich an die extremalen Amplituden der einzelnen Kerne angepaßt.

Zusammenhang mit einer deutlichen Abhängigkeit von der magnetischen Korngröße wird eine Abschätzung des Mittelwertes möglich. Die Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse für die beiden Kerne PS1388-3 und PS1394-4. Während für Kern PS1388-3 die Schätzwerte zwischen 1.5 und 4 μm mit einer Häufung um 2 μm rangieren, liegen für den kontinentnäheren Kern PS1394-4 die deutlich höheren Werte zwischen 2 und 8 μm mit einer Häufung um 6 μm . Steigen die Intensitäten an, so nimmt der relative Anteil der magnetischen Fraktion zu mit einer deutlichen Tendenz zu geringeren Korngrößen. Der zusätzliche magnetische Eintrag besteht daher überwiegend aus kleinen Körnern aus dem μ - und sub- μ -Bereich.

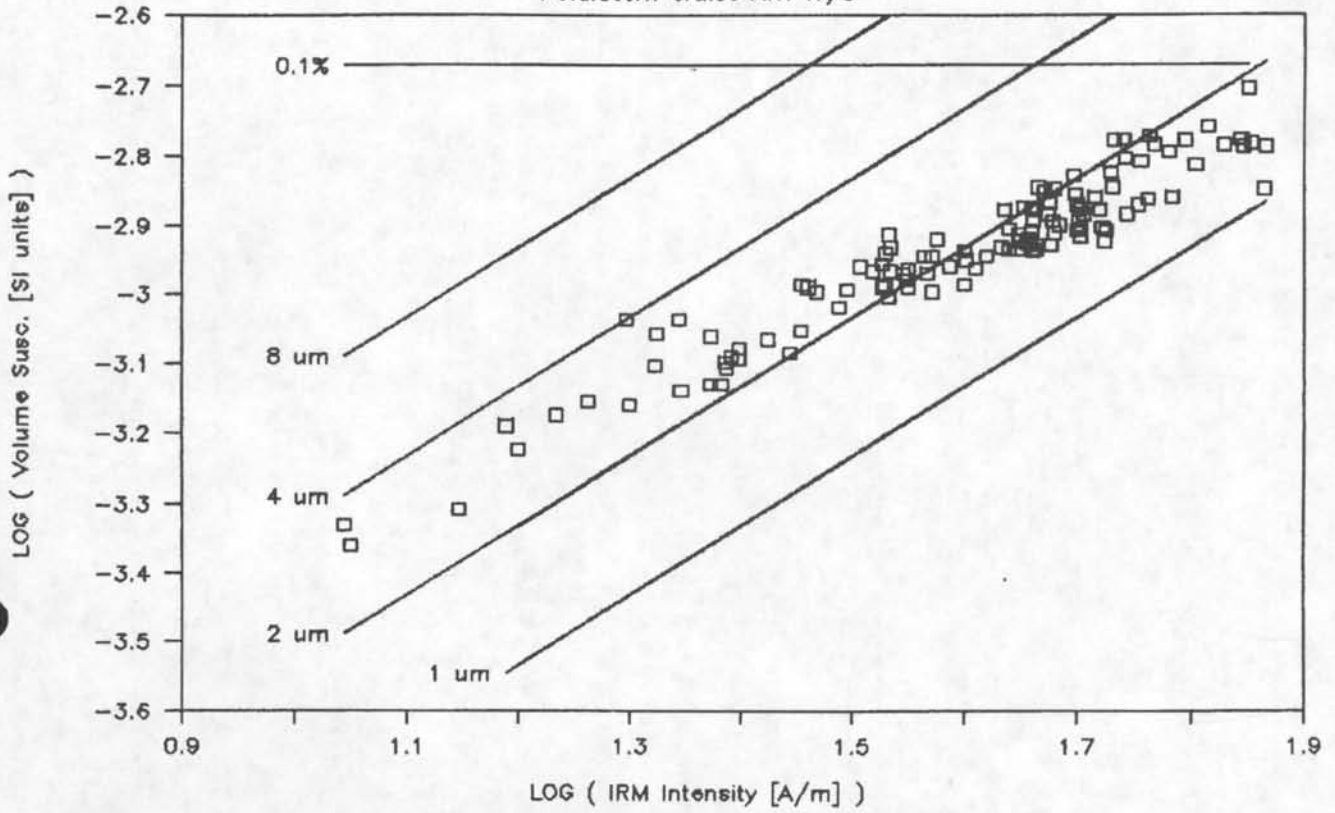
Die gesteinsmagnetische Stratigraphie im Vergleich mit den paläomagnetischen Daten für Kern PS1388-3 zeigt Abbildung 13. Zwischen Suszeptibilität und Sättigungsremanenz ergibt sich die erwartete ausgeprägte Korrelation, da beide Parameter in erster Linie konzentrationsabhängig sind. Die Korrelation zur NRM Intensität ist dagegen wesentlich schlechter und deutet auf Sekundäreffekte bei der Fixierung der Magnetisierungsrichtungen im Sediment hin, die den Grad der Ausrichtung der magnetischen Partikel durch zusätzliche Komponenten unterschiedlicher Richtung oder auch die variable Intensität des Erdmagnetfeldes bei der Ablagerung (Paläointensität) die Qualität der Signalspeicherung im Sediment beeinflussen. Die insgesamt hohen MDF-Werte der NRM liegen zwischen 40 und 75 mT mit zyklischen, stetigen Variationen. Das MDF der IRM weist ebenfalls auf ein wechselfeldstabiles, verhältnismäßig homogenes Trägermaterial (~ 35 mT).

Aus dem Nomogramm in Abbildung 12 wurde die mittlere magnetische Korngröße abgeschätzt und ebenfalls gegen die Tiefe aufgetragen. Sie zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit dem Anteil der Siltfraktion (skizziert durch die punktierte Linie) und damit der Gesamtkorngrößenverteilung, so daß die magnetische Fraktion den charakteristischen Variationen der Sedimentzusammensetzung folgt. Die periodischen Schwankungen der magnetischen Korngrößen zwischen 1.7 und 4 μm lassen sich sehr leicht mit den Kurven des Karbonat- und Radiolariengehaltes und damit den globalen Klimazyklen korrelieren und so mit der Variabilität der glaziomarinen Erosions- und Sedimentationsprozesse in Verbindung bringen.

Abbildung 14 zeigt die gesteinsmagnetische Stratigraphie für Kern PS1394-4 bis zu einer Tiefe von 5 Metern. Die in der Paläomagnetik beobachteten Sprünge der MDF-Kurve zwischen 27 und ~ 70 mT konnten in den IRM-Messungen wiedergefunden werden. Dagegen zeigen weder Suszeptibilität noch Sättigungsremanenz direkt einen solchen abrupten Übergang. Allerdings findet er sich in der geschätzten magnetischen Korngröße, die in diesen Teufen von 4 bis 6 μm bis auf weniger als 2 μm abfällt. Die magnetische Kornfraktion ist für diesen Kern im generellen Trend weniger stark an die Siltanteile gekoppelt, doch prägen sich alle Extrema auch in der magnetischen Fraktion durch. Die Phase niedrigerer MDF-Werte um 27 mT zeichnet sich durch eine extrem geringe Streuung aus, die in gleicher Weise bei der NRM und der IRM beobachtet wird. Auch für diesen, wesentlich näher an der Schelfkante liegenden Kern ist der Zusammenhang zwischen klimakontrollierten Parametern und der Gesteinsmagnetik deutlich zu erkennen.

PS 1388-3

Polarstern cruise ANT IV/3



PS 1394-4

Polarstern cruise ANT IV/3

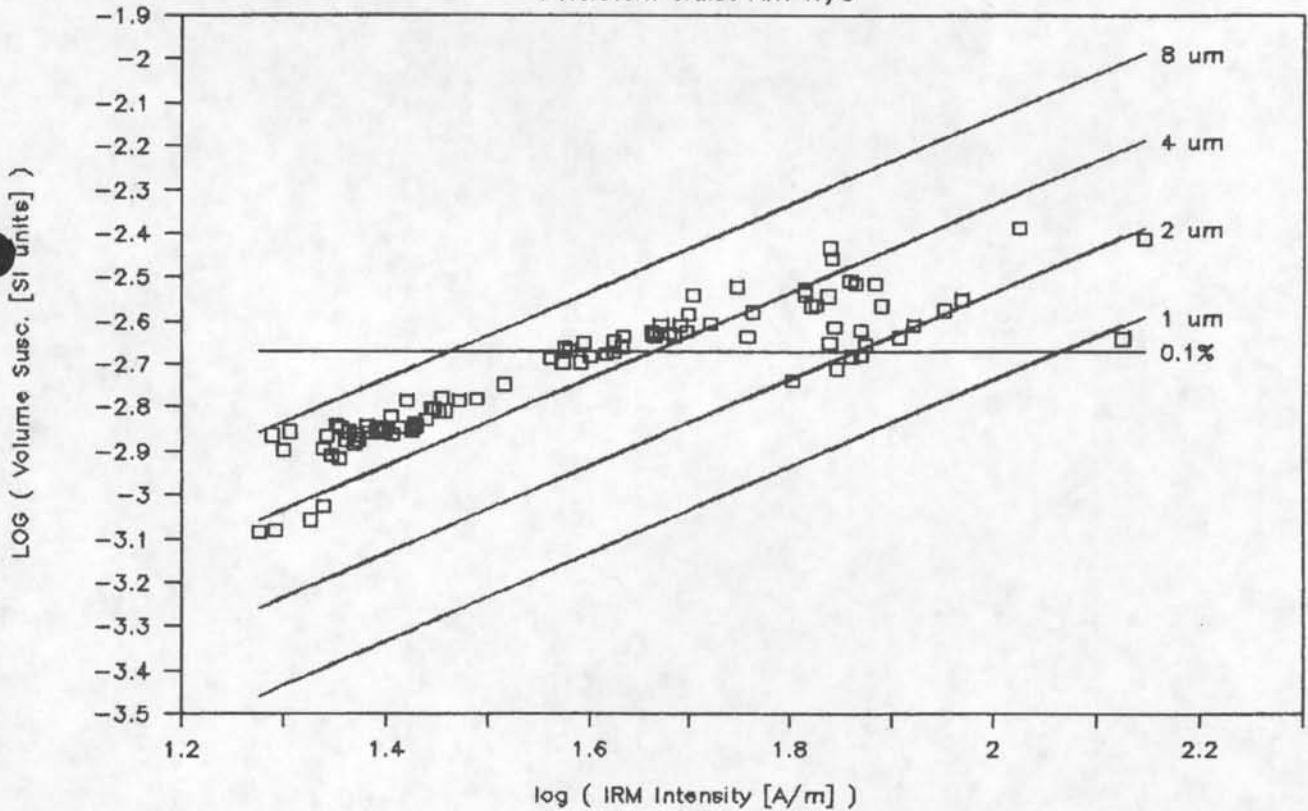


Abbildung 12: Nomogramme zu Abschätzung der magnetischen Korngröße nach Thompson & Oldfield (1986) für die Kerne PS1388-3 (oben) und PS1394-4 (unten). Darstellung doppeltlogarithmisch für magnetische Suszeptibilität und Sättigungsremanenz.

PS1388-3

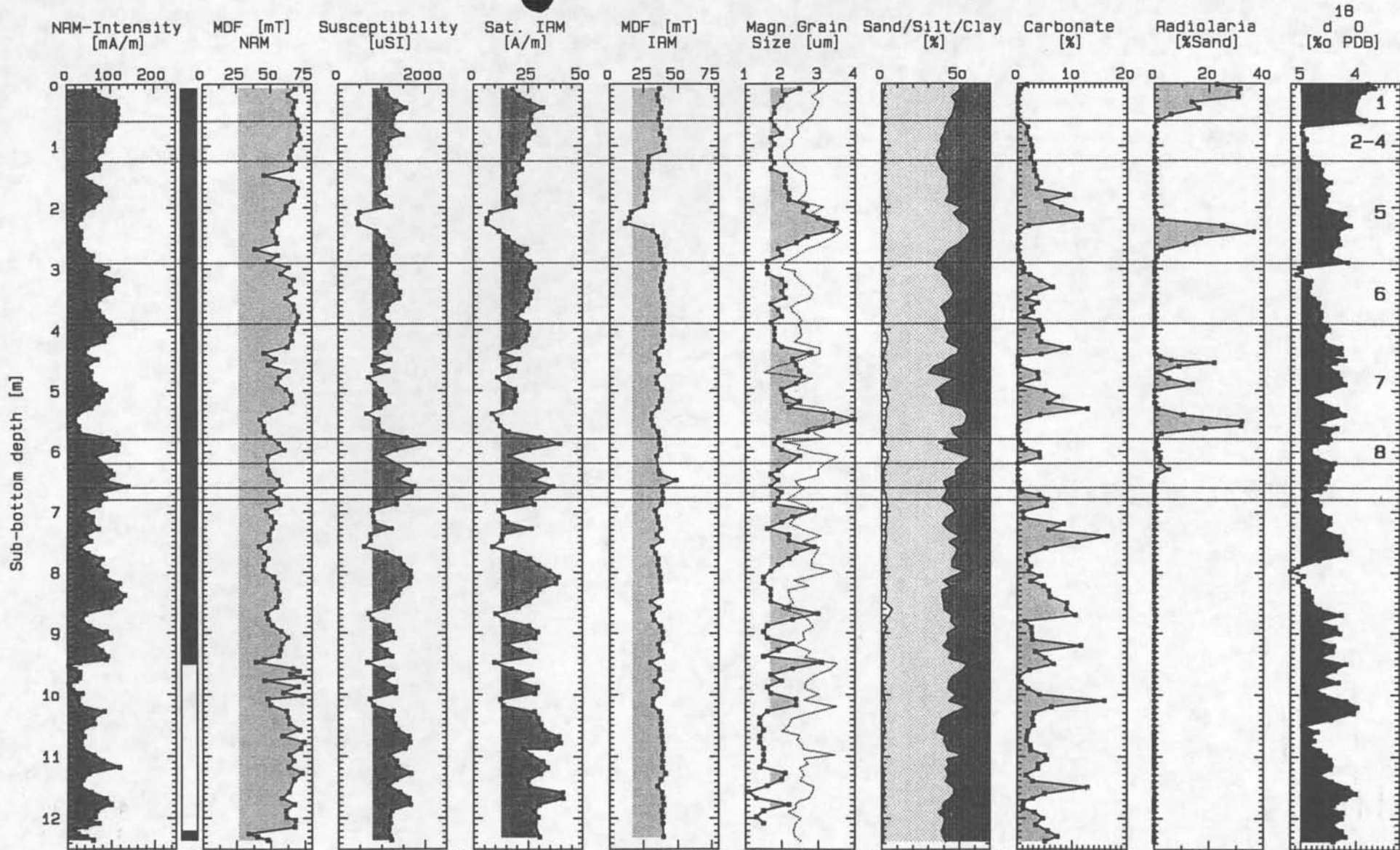


Abbildung 13: Gesteinsmagnetische Messungen an Kern PS1388-3 in Abhängigkeit von der Tiefe. Von links nach rechts: NRM Intensität in mA/m, MDF der NRM in mT, magnetische Suszeptibilität in 10^{-6} SI, Sättigungsremanenz in A/m, MDF der IRM in mT, geschätzte mittlere magnetische Korngröße (punktierter Linie skizziert den Verlauf des Siltanteils), Korngrößenverteilung der terrigenen Fraktion, Gesamtkarbonatgehalt, Anteil von Radiolarien in der Sandfraktion, Sauerstoffisotopenstratigraphie. Punktierter Linien kennzeichnen die Grenzen der Sauerstoffisotopenstadien nach Grobe & Mackensen, 1992.

PS1394-4

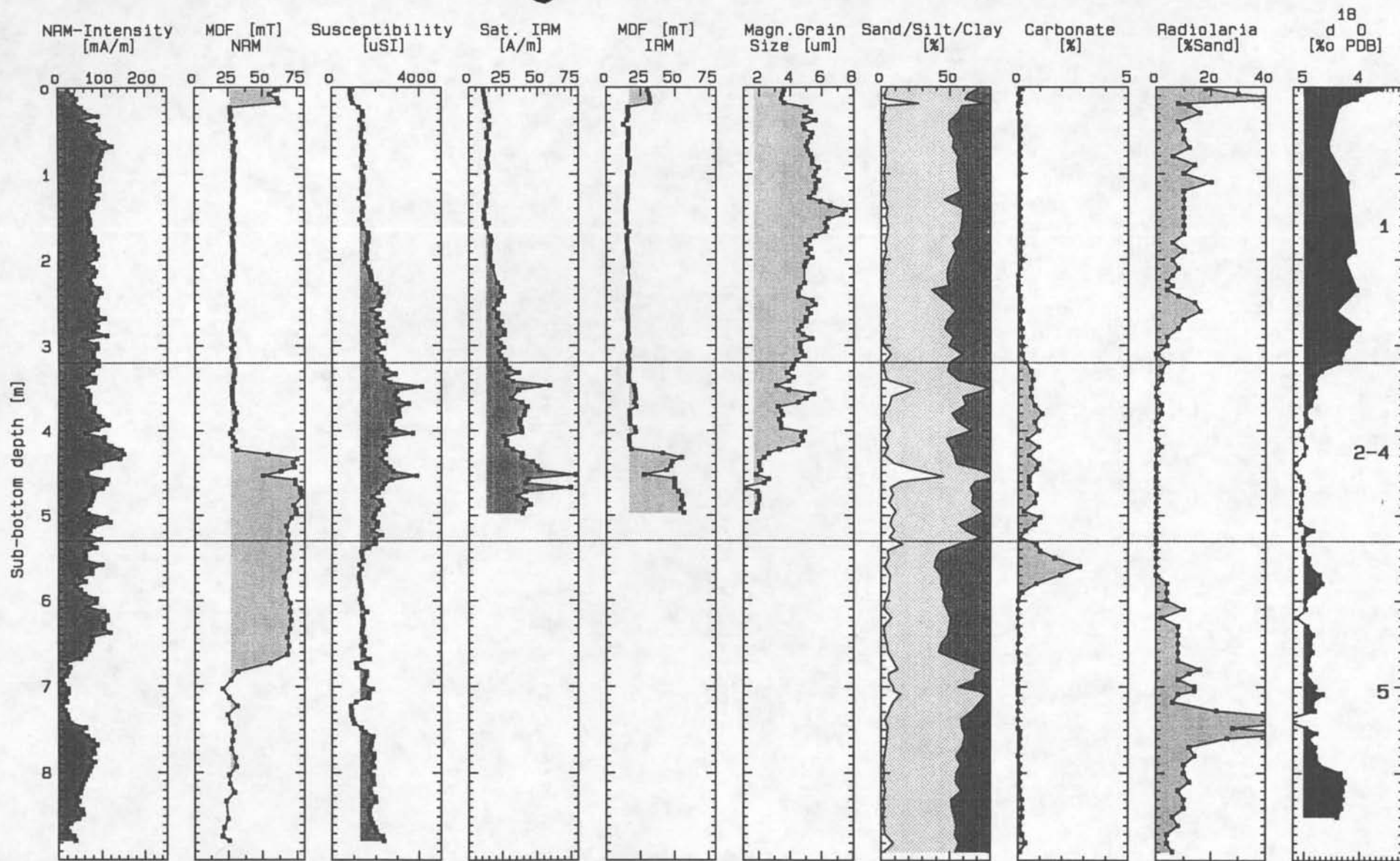


Abbildung 14: Gesteinmagnetische Messungen an Kern PS1394-4 in Abhängigkeit von der Tiefe. Sonst wie Abbildung 13.

INTERPRETATION

Die gesteinsmagnetischen und sedimentologischen Untersuchungen entlang eines Kernprofils am antarktischen Kontinentalrand zeigen deutlich, daß alle Parameter sowohl von der Lage der Kernposition relativ zur Schelfkante abhängen als auch von den global beobachtbaren Klimaveränderungen, die sich in der parallel verlaufenden Sauerstoffisotopenstratigraphie planktischer und benthischer Foraminiferen widerspiegeln. Eine Rinnenstruktur in der Nähe der Kernstation PS1390 markiert die Grenze zwischen den durch gravitativen Transport beeinflussten Sedimenten am oberen Kontinentalhang und der hemipelagischen Sedimentationsumgebung auf der Terasse. Innerhalb der Rinne wird eine niedrigere Sedimentationsrate beobachtet als zu beiden Seiten.

Die höchsten Sedimentationsraten weisen die kontinentnahen Kerne PS1394-4 und PS1392-1 auf, während auf den Kernstationen PS1431, PS1648 bis hin zu PS1390 die Sedimentationsrate stetig abnimmt. Auf der Terasse findet eine ungestörte und weitgehend vollständige Sedimentation im Pleistozän mit nur geringfügig variierenden Sedimentationsraten statt.

Die Ergebnisse der sedimentologischen Arbeiten, die hinreichend in den beigelegten Veröffentlichungen wiedergegeben sind, können für die detaillierte stratigraphische Einordnung aller Kerne verwendet werden. Daraus läßt sich eine Altersabhängigkeit der klimakontrollierten gesteinsmagnetischen Parameter ableiten, die für die Kerne PS1388-3 und PS1394-4 in den Abbildungen 15 und 16 zusammengefaßt sind.

Die magnetischen Korngrößen in Kern PS1388-3 bleiben in den glazialen Intervallen sehr gering und können der Konturitifazies zugeordnet werden. Bei einem Glazial/Interglazial-Übergang setzt zunächst, verbunden mit Schmelzwasserereignissen in der $\delta^{18}\text{O}$ -Stratigraphie, die Produktion silikatischer Mikrofossilien ein, die dann in eine karbonatisch beeinflusste Sedimentfazies übergeht. Dieser Übergang, der gerade auch in den rezenten Oberflächensedimenten zu beobachten ist, wird durch eine kurzzeitige Zunahme der magnetischen Korngröße begleitet, die gegenüber der Stadiumsgrenze um etwa 10'000 Jahre verschoben ist. Der Anstieg der magnetischen Korngrößen von im Mittel 1.7 auf ~ 3.5 μm reflektiert direkt den Siltanteil im Sediment, ist mithin also an den Transport der terrigenen Sedimentanteile gekoppelt. Der Übergang vom Klimaoptimum zu glazialen Bedingungen ist an der Stadiengrenze 5/4 aus den gemessenen Parametern nicht zu erkennen und es ist anzunehmen, daß bereits vor Ende des Interglazials in der Umgebung des Arbeitsgebietes quasi-glaziale Bedingungen vorherrschen. Sie sind durch feinkörnige Sedimente mit niedrigen Sedimentationsraten gekennzeichnet.

Im kontinentnächsten Kern PS1394-4 sind die gleichen geologischen Fazieswechsel beim Glazial/Interglazial-Übergang im Karbonat-/Radiolariengehalt wie in Kern PS1388-3 zu beobachten. Die stratigraphische Einordnung ist allerdings wesentlich schwieriger. Sie basiert auf der Identifikation der Holozängrenze in der $\delta^{18}\text{O}$ -Stratigraphie und auf Vergleichen sedimentologischer Parameter zwischen den Sedimentkernen. Auffällig ist die sprunghafte Abnahme des MDF, mit der ein deutlicher Anstieg der magnetischen Korngröße einhergeht. Das Niveau der niedrigen Korngrößen liegt wie für Kern PS1388-3 bei ~ 1.7 μm .

Auf Station PS1394 finden sich die geringen Korngrößen nur im Glazial in der Konturitifazies, während gegen Ende des letzten Glazials die Korngröße schubweise zunimmt

PS1388-3

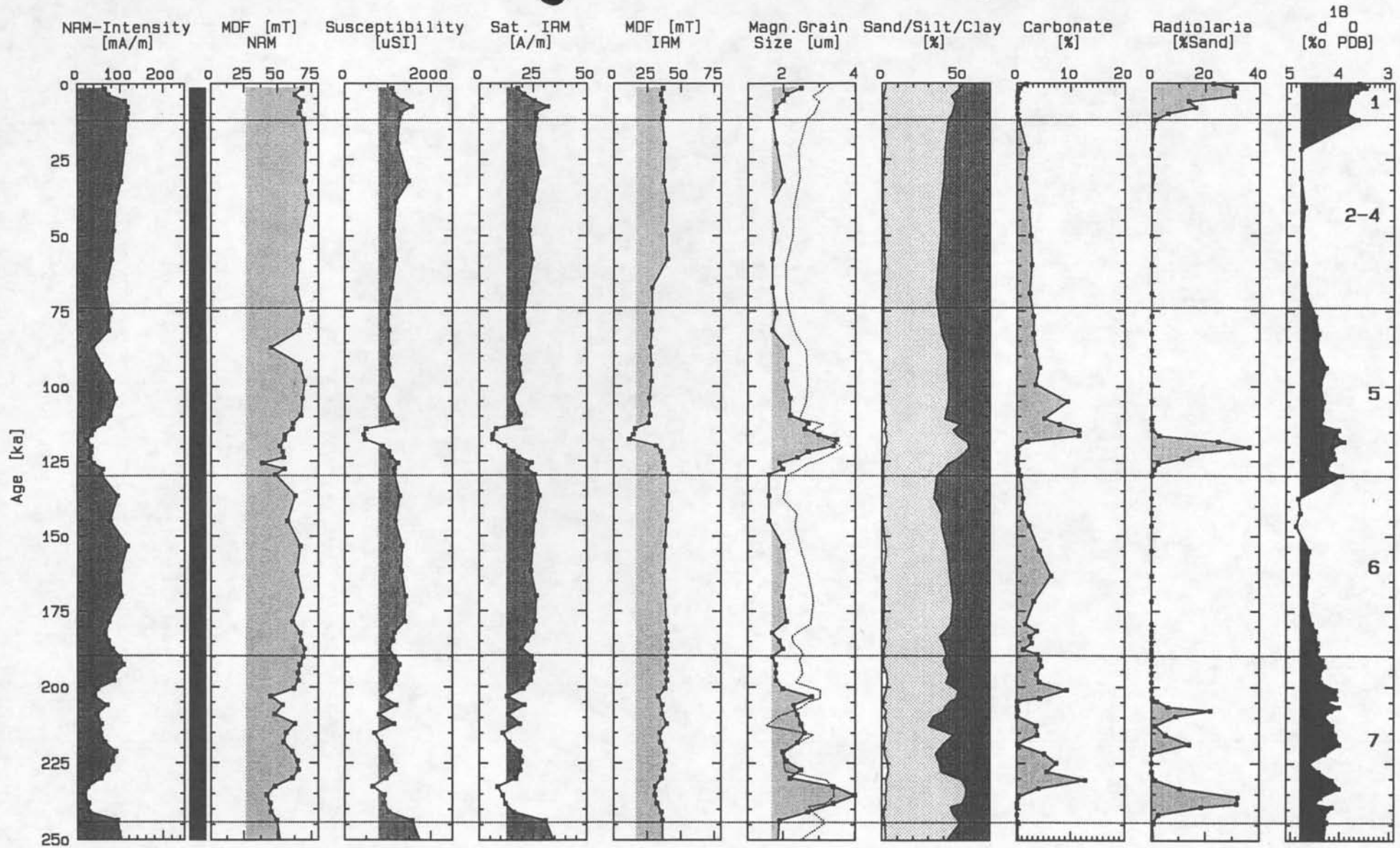


Abbildung 15: Gesteinmagnetische Messungen an Kern PS1388-3 (vgl. Abb. 13) in Abhängigkeit vom Alter für die letzten 250'000 Jahre nach der stratigraphischen Einordnung von Grobe & Mackensen (1992). Sonst wie Abbildung 13.

PS1394-4

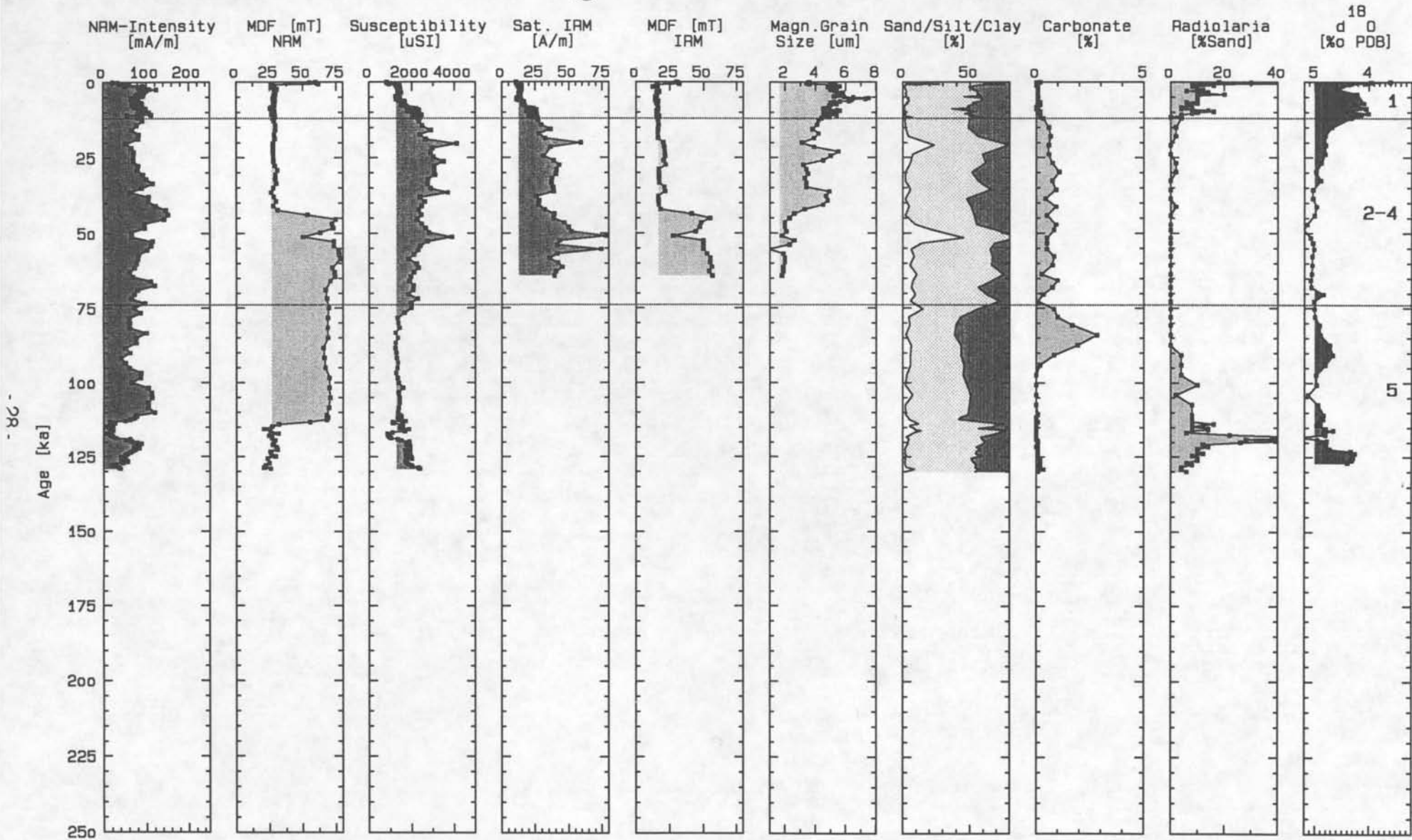


Abbildung 16: Gesteinmagnetische Messungen an Kern PS1394-4 in Abhängigkeit vom Alter für die letzten 250'000 Jahre. Sonst wie Abbildung 13.

und den Übergang in das Glazial vorwegnimmt. Ursache können Meeresspiegeländerungen und das aufschwimmende Schelfeis sein, verbunden mit einem zunehmenden Eintrag durch gravitativen Hangtransport und von eistransportiertem Material oder selektiver Erosion durch hangparallele Strömungen. Obwohl nach der derzeitigen Datierung der abrupte Wechsel in den MDF-Werten mitten im Glazial angesiedelt ist, ist nicht auszuschließen, daß sich durch eine weitere Verfeinerung der Stratigraphie diese Grenze in Richtung auf eine Stadiengrenze verschiebt. Dennoch scheinen die in den sedimentologischen und gesteinsmagnetischen Parameter dokumentierten Veränderungen der Umwelt nicht synchron zu verlaufen, sondern einen komplexen Ablauf verschiedener Prozesse anzudeuten.

Ein Vergleich der altersabhängigen MDF-Kurven für das gesamte Profil Atka zeigt (Abb. 17), daß die Spätglaziale bis zur Kernposition PS1389 durch diesen abrupten Wechsel und damit auch Änderungen in der magnetischen Korngröße gekennzeichnet sind. Es ist anzunehmen, daß dann diese Gebiete noch im Einflußbereich der Schelfeise gelegen haben und daher die oben beschriebenen Prozesse wirksam waren (vgl. Abb.en 18, 19). Die feinkörnigeren Sedimente auf der Terasse enthalten lediglich zu den Klimaoptima geringfügig gröbere Anteile, die auf die Aufschmelzphase, intensive Strömungen oder Hangtransport entstanden sein können. Ein Muster wie in den kontinentnäheren Kernen ist nicht zu erkennen. Das Glazialstadium 6 ist auf der Station PS1389 nicht mehr und auf Station PS1648 nur schwach in der MDF-Kurve nachzuweisen. Der Glazial/Interglazial-Übergang allerdings zeichnet sich in allen Kernen durch Einbrüche im MDF aus.

NRM Median Destructive Field [mT]

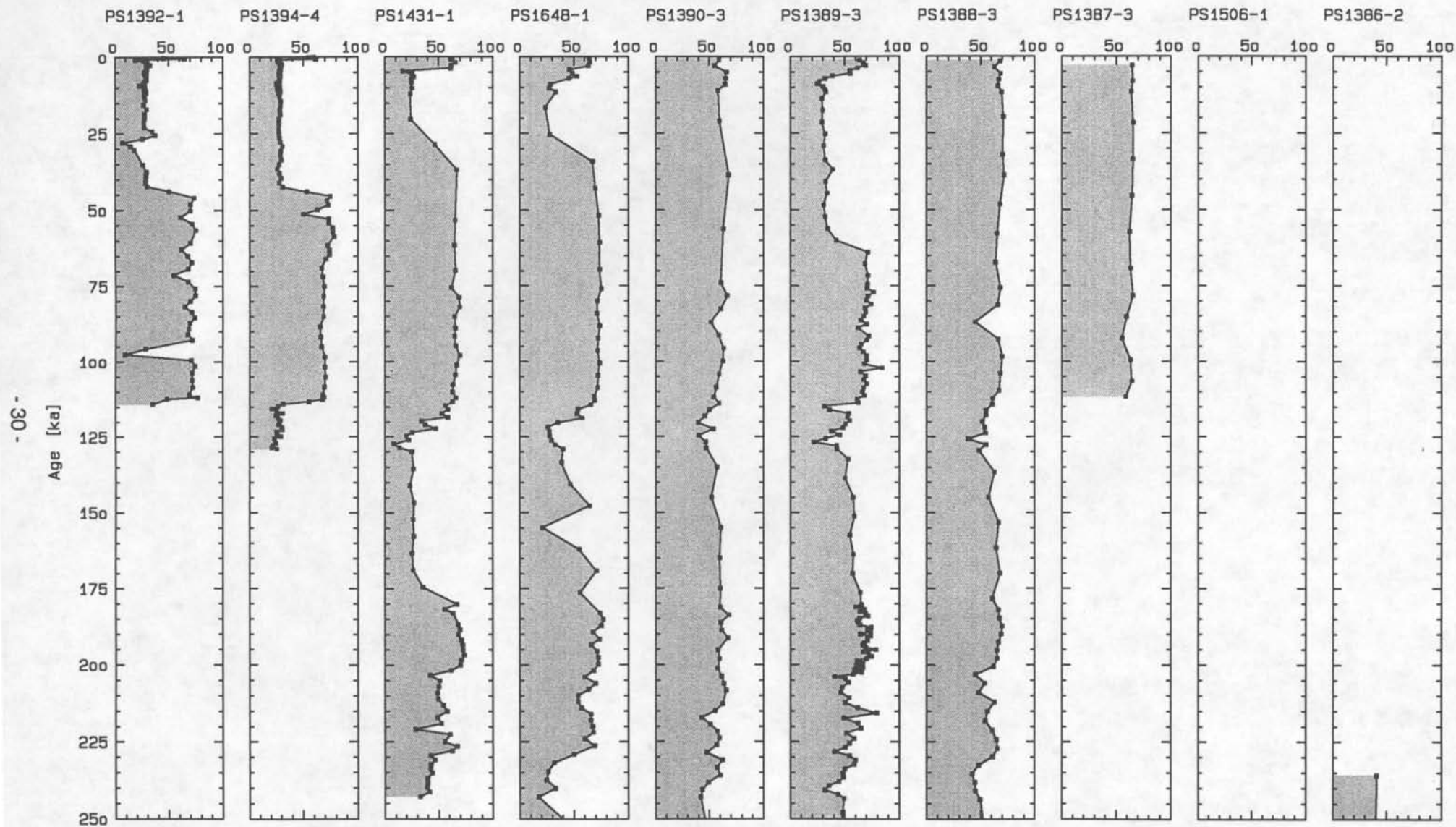


Abbildung 17: Mittleres entmagnetisierendes Feld (MDF) der NRM in Abhängigkeit vom Alter für die Kerne des Profils Atka. Zur stratigraphischen Einordnung wurden die Ergebnisse von Grobe & Mackensen (1992) verwendet.

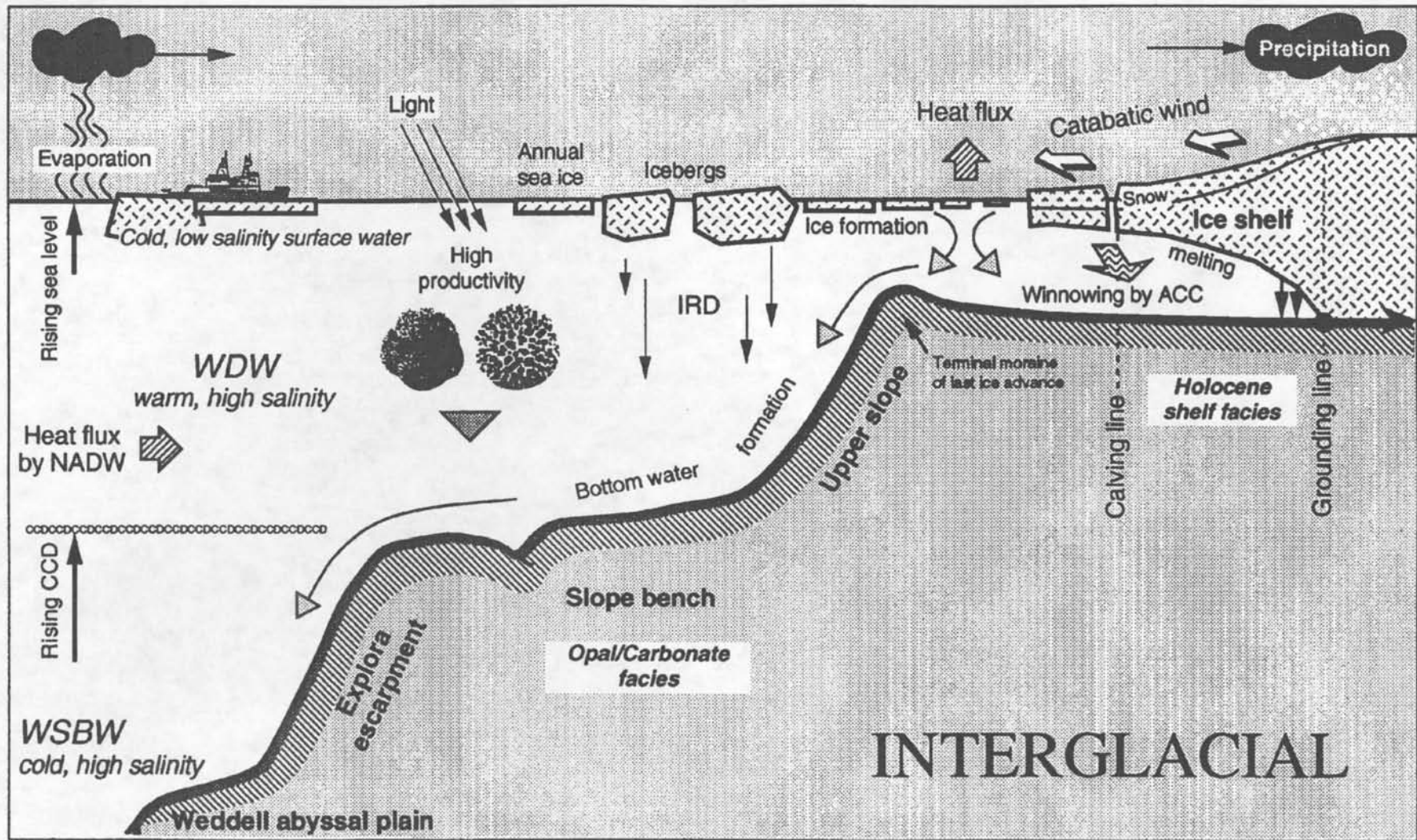
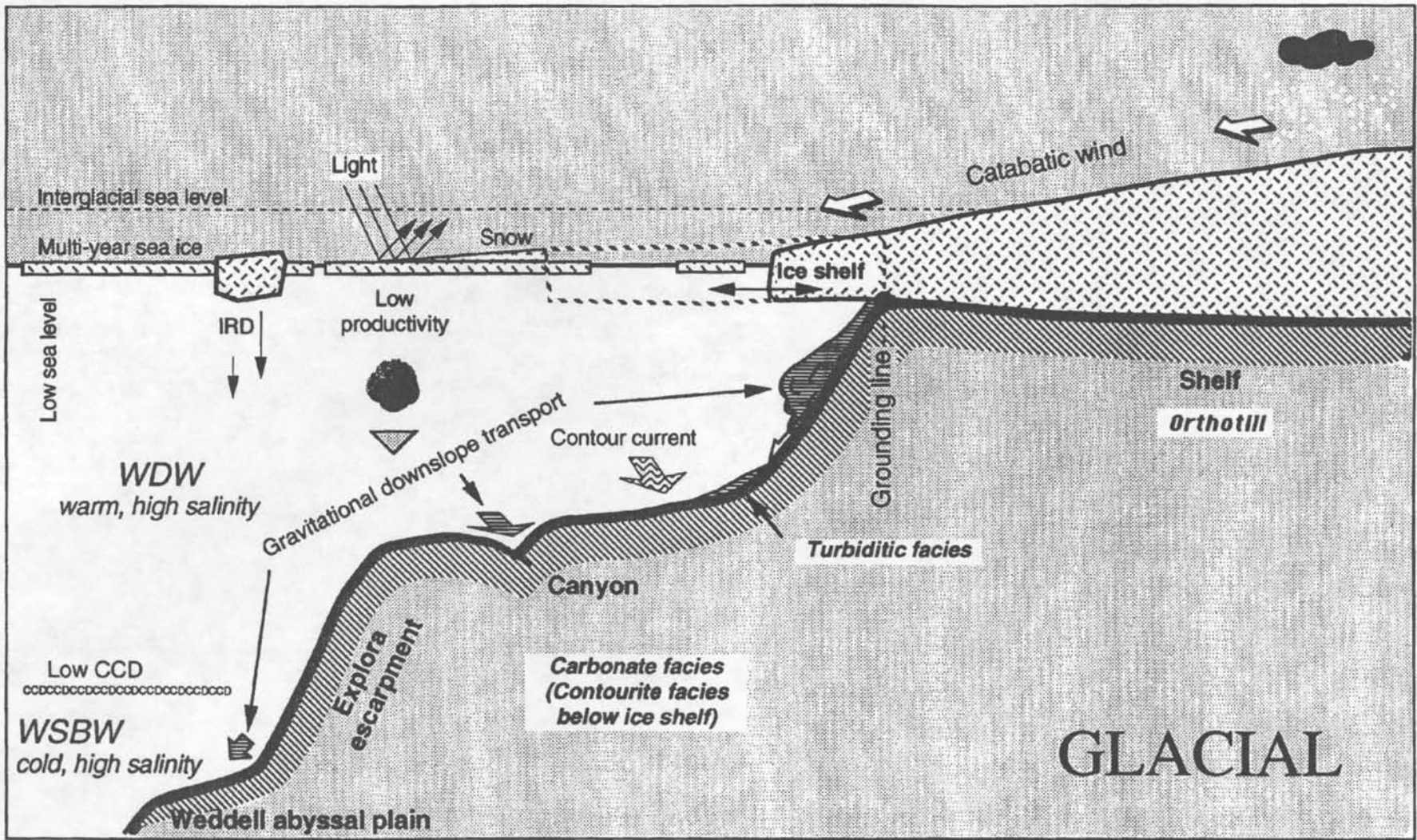


Abbildung 18: Skizze der dominierenden Sedimentationsprozesse im Interglazial für das Profil Atka am antarktischen Kontinentalrand (aus Grobe & Mackensen, 1992)



-32-

Abbildung 19: Skizze der dominierenden Sedimentationsprozesse im Glazial für das Profil Atka am antarktischen Kontinentalrand (aus Grobe & Mackensen, 1992)

ZUSAMMENFASSUNG

Die im Rahmen des zweijährigen Forschungsprojekts über paläomagnetisch-sedimentologische Analysen sedimentärer Zyklen in der Weddell See und ihre stratigraphische Interpretation durchgeführten Arbeiten haben wichtige Ergebnisse zur Geschichte glaziomariner Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalrand geliefert. So konnte für ein dicht beprobtes Kernprofil mit einer außergewöhnlichen Terrassenstruktur eine fazielle Gliederung und stratigraphische Einordnung erreicht werden, die auch auf größere Areale in der Weddell See anwendbar sind.

Aufgrund der stratigraphischen Randbedingungen konnten die gewonnenen paläo- und gesteinsmagnetischen Messungen in eine Altersstruktur integriert und zusammen mit den sedimentologischen Parametern im Hinblick auf lokale und regionale Umweltveränderungen interpretiert werden. Insbesondere die zeitaufwendigen gesteinsmagnetischen Analysen haben gezeigt, daß die magnetische Kornfraktion als accessorischer Bestandteil im Gesamtsediment dennoch an die Sortierungsprozesse des terrigenen Sedimenteintrags gekoppelt ist. Die ungewöhnlich deutlichen Variationen korngrößenabhängiger Parameter zeigten weiterhin, daß in Verbindung mit einer hochauflösenden Stratigraphie die magnetische Detailanalyse und ein besseres Verständnis der Sedimentationsprozesse in der Nähe der Schelfeiskante und speziell bei Meeresspiegeltiefständen die Möglichkeit eröffnen, unmittelbar Aussagen über die Bewegungen der Schelfeise und die Qualität der Meereisbedeckungen zu machen. Die gezielte Fortsetzung dieser Arbeiten in anderen Arealen am antarktischen Kontinentalrand ist daher wünschenswert. Die verwendeten Verfahren lassen sich mit den derzeit verfügbaren Instrumenten noch erweitern und versprechen durch die sehr sensitive Methodik detaillierte Aussagen zu glaziomarinen Sedimentationsprozessen.

2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

2.1 Stand der Forschung

Die pleistozänen Klimazyklen, nach allgemein akzeptierter Ansicht weitgehend durch die Veränderungen der Erdbahnparameter gesteuert (MILANKOVITCH-Zyklen), konnten weltweit durch die Messung stabiler Isotope an Foraminiferen in marinen Sedimenten nachgewiesen werden (Prell et al., 1986). In den Sedimenten des antarktischen Ozeans stand dieses stratigraphische Hilfsmittel bislang aufgrund der zu geringen Karbonatgehalte nicht zur Verfügung. So konnten nur sedimentologische und mikropaläontologische Parameter für diese Fragestellungen herangezogen werden, wobei sich die sedimentologische Arbeiten vorwiegend auf die Rekonstruktion rezenter Ablagerungsbedingungen und -prozesse (Anderson et al., 1983; Orheim & Elverhoi, 1981) beschränkten.

Die ersten sedimentologischen und mikropaläontologischen Analysen im Bereich der Weddell-See wurden von Anderson (1972) durchgeführt. Zwar ermöglichten sie paläoklimatische Interpretationen der letzten 5 Mio.J mit einer höheren Auflösung der letzten 350'000 Jahre, doch konnte keine eindeutige Korrelation mit den Klimazyklen nachgewiesen werden.

In weiteren Arbeiten war der Kontinentalhang der östlichen Weddell See vorwiegend Untersuchungsobjekt unter dem Gesichtspunkt des Sedimenttransportes (Anderson et al., 1979; Wright & Anderson, 1982). Den Sedimenten des Hanges wird aufgrund intensiver Umlagerungsprozesse eine paläoklimatisch bezogene Interpretationsmöglichkeit abgesprochen.

Ebenfalls auf den Kontinentalhangbereich konzentrierten sich die detaillierten sedimentologischen und geochemischen Analysen der norwegischen Antarktisexpedition (NARE), wobei jedoch vorwiegend die rezenten Sedimentationsverhältnisse auf dem Schelf und am oberen Kontinentalhang untersucht sowie ein Vorstoß der Eisschelfe während des letzten glazialen Maximums bis zum Schelf/Hang-Übergang rekonstruiert (Elverhoi & Roaldset, 1983) wurden.

Verhalten und Wechselwirkungen von kontinentalem Eis, Meereis, Meeresspiegel und Ozeanographie im Grenzbereich Schelfeiskante/offener Ozean während der globalen Klimazyklen blieb bisher weitgehend ungeklärt, was sicherlich nicht zuletzt auf die geographisch exponierte Lage des Untersuchungsgebietes und die noch recht geringe Anzahl von Probenpunkten zurückzuführen ist.

Eine gezielte Beprobung ausgewählter, ungestörter Bereiche am Kontinentalhang mit Kastengreifer und Schwerelot während der ersten vier Antarktisexpeditionen mit FS POLARSTERN verspricht nunmehr detaillierte Aufschlüsse über die oben angesprochenen Problemkreise.

Magnetostratigraphie

Magnetostratigraphische Untersuchungen werden überwiegend zur Datierung von Sedimentkernen durch die Identifikation von Polaritätswechseln des Erdmagnetfeldes eingesetzt. Die Polaritätswechsel der letzten 4 Millionen Jahre sind durch radiometrische Methoden an Vulkaniten datiert worden, so daß die entsprechenden Tiefenwerte in den Sedimentkernen mit einem absoluten Alter versehen werden können. Bei der Untersuchung von Kernen mit einer mittleren Länge von 7 bis 10 m sind bei durchschnittlichen Sedimentationsraten von 1 cm/1000 Jahre keine weiteren Bezugspunkte als die Brunhes/Matuyama-Grenze (0.73 Mio.J.) und das Jaramillo-Event (0.91 und 0.98 Mio.J.) zu erwarten. Dagegen muß bei Sedimentationsraten in der Nähe des Kontinents zwischen 2 und 5 cm/1000 Jahre mit dem vollständigen Fehlen korrelierbarer Polaritätswechsel in der magnetostratigraphischen Sequenz gerechnet werden.

Für diese Fragestellungen kann die Magnetik nur eine befriedigende Antwort liefern, wenn sie über die Änderungen der Polarität hinaus die kontinuierliche Änderung magnetischer Parameter entlang eines Sedimentkerns aufzeichnet und auf Änderungen des Erdmagnetfeldes und der Sedimentationsbedingungen zurückführen kann.

2.2 Darstellung eigener Vorarbeiten

Sedimentologie

Die Bearbeitung mehrerer Sedimentkerne auf einem Profil vor Kapp Norvegia (Abb. 1) hat gezeigt (Grobe, 1986), daß die Kontinentalhangsedimente eine deutliche fazielle Gliederung aufweisen. Die verschiedenen Sedimentfazies konnten mit Hilfe von Thorium-230 (Mangini, unpubl. Daten) und Karbonatstratigraphie eindeutig den globalen Klimazyklen zugeordnet werden (Grobe, 1986; Grobe & Kuhn, 1986). Hieraus ergibt sich die Möglichkeit einer hochauflösenden sedimentologischen Stratigraphie, mit deren Hilfe die klimatischen Stadien und deren Übergänge verschiedenen Sedimentfazies und damit unterschiedlichen Ablagerungsmilieus zugeordnet werden können.

Es hat sich gezeigt, daß der Hangbereich im Untersuchungsgebiet aufgrund seiner morphologischen Gliederung für die vorgesehenen Arbeiten gut geeignet ist. Dem 30-100 km breiten Schelf folgt der obere, relativ steile Kontinentalhang bis zu einer Wassertiefe von etwa 1800 m. Im mittleren Teil bildet der Hang eine flach einfallende bis zu 100 km breite Terasse bis 3000 m Wassertiefe. Der sich anschließende zweite steile Hangabschnitt fällt bis in die Tiefsee ab. Die Sedimentation im Bereich der Terasse erfolgt weitgehend ungestört durch Rutschungen, wie mit Hilfe des 3.5 kHz Sedimentecholotes nachgewiesen wurde. Aus dem Schelfbereich angelieferte Turbidite sedimentieren vorwiegend am Fuß des oberen Hanges und beeinflussen die landfernere, hemipelagische Sedimentation nicht. Die Turbidithorizonte haben sich als geeignetes Mittel zur Rekonstruktion von Vorstößen des Schelfeises erwiesen.

Der antarktische Kontinentalhang als Untersuchungsgebiet bietet gegenüber den Tiefseebecken den Vorteil, daß auch kleinere Veränderungen der durch die Fluktuationen der Schelfeiskante beeinflussten Sedimentation dokumentiert werden und Karbonatlösung im meist untersättigten antarktischen Meerwasser in geringeren Wassertiefen eine untergeordnete Rolle spielen kann. Die

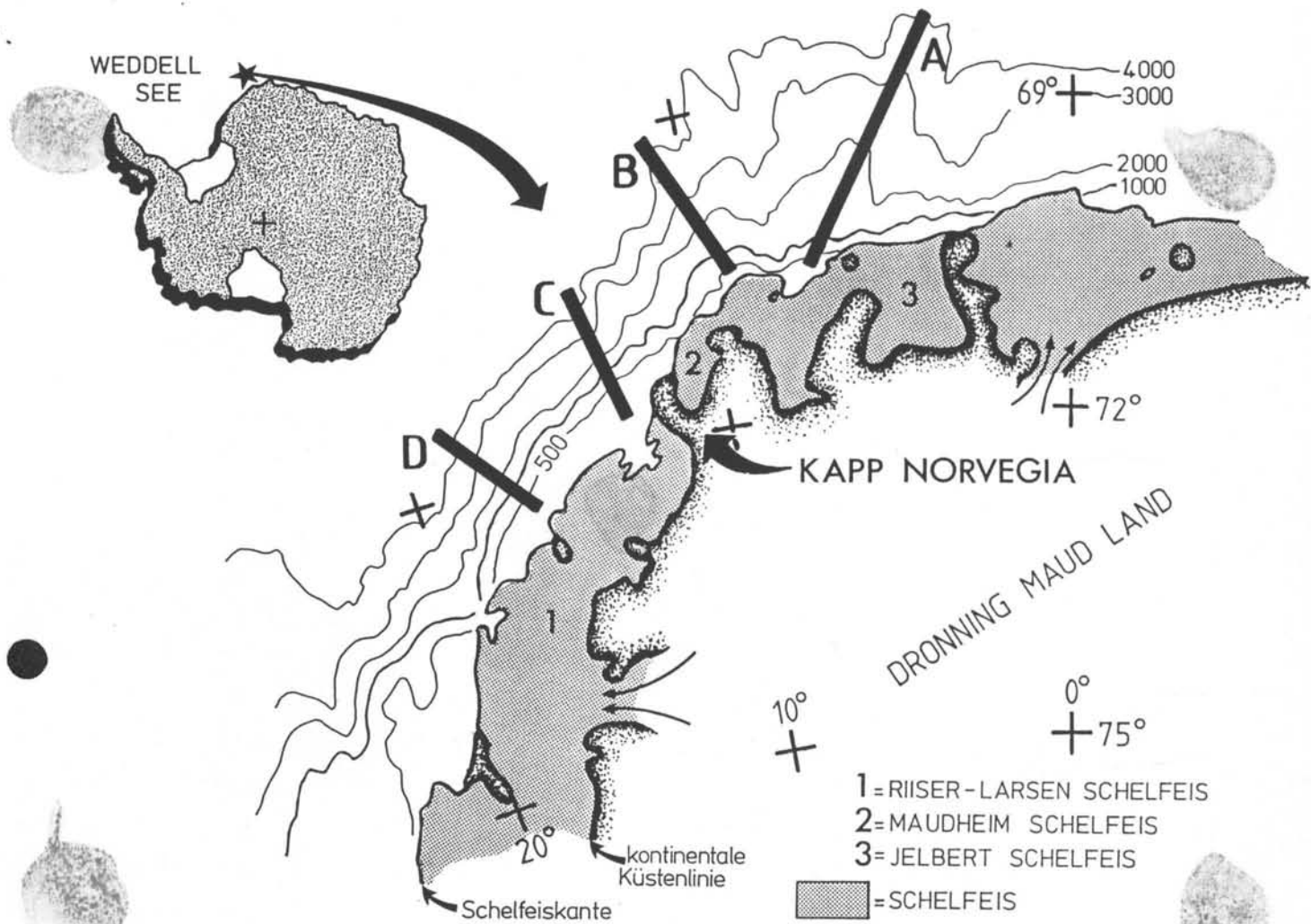


Abb. 1 : Die vier Sedimentkernprofile aus dem Bereich der östlichen Weddell-See reichen vom Schelf (300 m) bis in den Tiefseebereich (4000 m). Mit insgesamt 42 Schwereloten und Großkastengreifern wurden auf den POLARSTERN-Expeditionen ANT I-IV etwa 350 m Sedimentkerne gewonnen. Profil Kapp Norvegia (c) wurde in vorangegangenen Arbeiten bereits sedimentologisch bearbeitet (Grobe, 1986). Im Rahmen dieses Antrags sollen innerhalb des ersten Jahres die Kerne des Profils Atka (a) sedimentologisch und paläomagnetisch untersucht werden.

Rekonstruktion der paläoklimatischen Geschichte läßt sich daher besonders gut an den Bereichen des Kontinentalhanges durchführen, die eine kontinuierliche und ungestörte Sedimentation aufweisen und gleichzeitig im Einflußbereich einer oszillierenden Schelfeis-kante liegen. Alle diese Vorzüge weist das Untersuchungsgebiet auf.

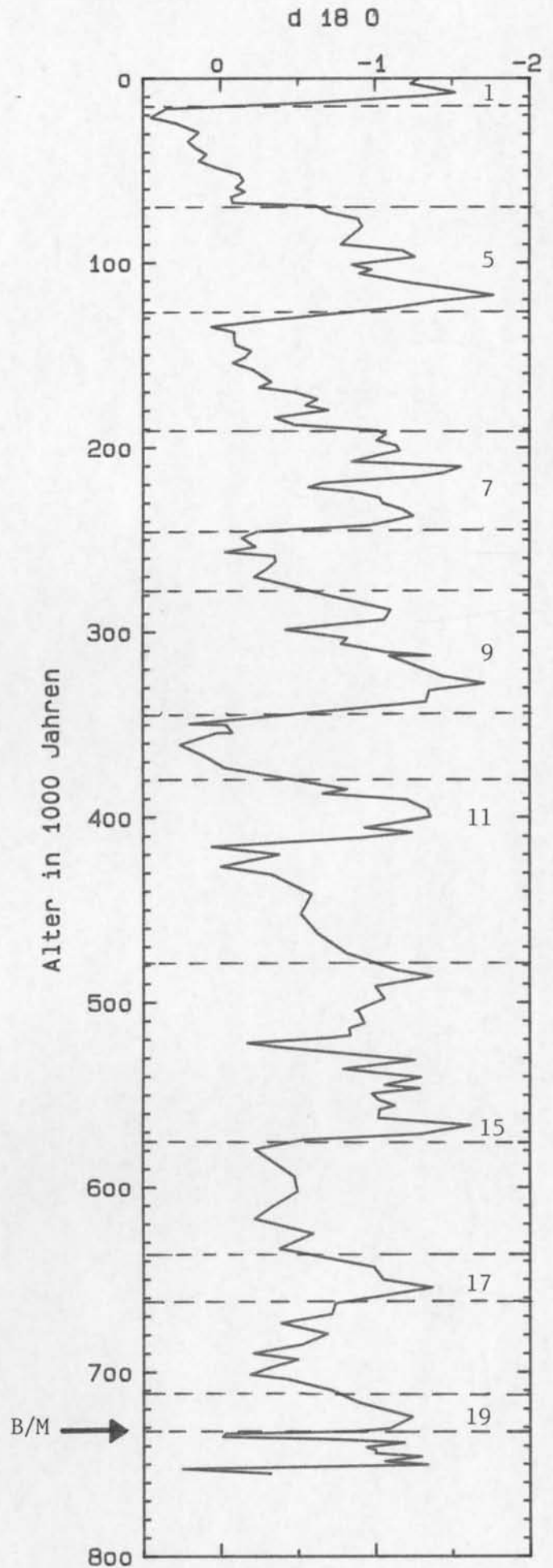
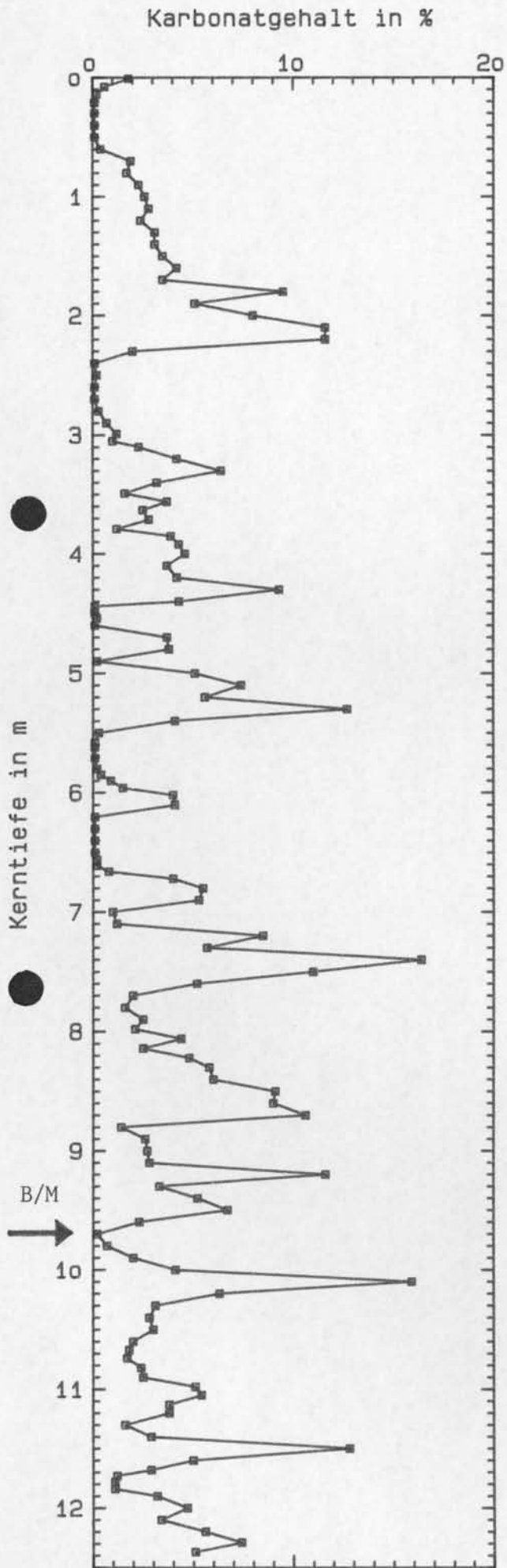
Erste Untersuchungen des Karbonatgehaltes und anderer sedimento-logischer Parameter für den Kern 1388-3 haben diese Einschätzung bestätigt (Abb. 2). Eine überraschend ausgeprägte Zyklizität zeigt eine so deutliche Ähnlichkeit mit einer Klimakurve aus äquato-rialen Breiten (Sarnthein et al., 1984; Abb. 2), daß sich hier eine interessante Möglichkeit andeutet, eine mehr oder weniger kontinuierliche Abfolge antarktischer Tiefseesedimente innerhalb des Pleistozäns zu datieren. Ließen sich mit dieser Zeitinfor-mation auch andere Parameter kalibrieren, so könnte diese indirekt auch auf andere Sedimentkerne übertragen werden, in denen zwar eine Datierung mit dem Karbonatgehalt des Sedimentes nicht mehr möglich ist, sich aber eine Parallelisierung mit Hilfe anderer Parameter durchführen läßt. Auf diesem Wege, der auch über die Auswertung magnetischer Sedimentparameter führen könnte, ließe sich eine unabhängige Kalibrierung mit verschiedenen Methoden für ein durch verschiedene Kernprofile abgedecktes größeres Areal der Weddell See durchführen.

Magnetostratigraphie hoher Breiten

Im Fachgebiet Geophysik an der Universität Bremen bestehen durch den Betrieb eines hochempfindlichen Kryogenmagnetometers für die Messung der Magnetisierung von Sedimenten umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Magnetostratigraphie. Zunehmend werden die hohen geographischen Breiten zu einem Schwerpunkt der Arbeiten, die vor allem im Rahmen des Ocean Drilling Program durchgeführt wurden/werden (Leg 104 : Norwegische See, Leg 113 : Weddell See), aber auch aus der Teilnahme an den Polarstern-Expeditionen ARK II, ARK III und ANT IV (Grönland See, Fram-Straße, Weddell-See) resultieren.

Abb. 2 : Vergleich der Karbonatgehalte im Kern 1388 (Profil Atka) mit einer paläoklimakurve des äquatorialen Atlantik (Sarnthein, 1984). Die Schwankungen im Karbonatgehalt sind nahezu ausschließlich durch unterschiedliche Anteile der planktonischen Foraminifere *N. pachyderma* hervorgerufen worden und lassen sich gut mit dem pleistozänen Klimazyklen korrelieren und stellen damit ein hervorragendes stratigraphisches Hilfsmittel dar.

Abbildung 2



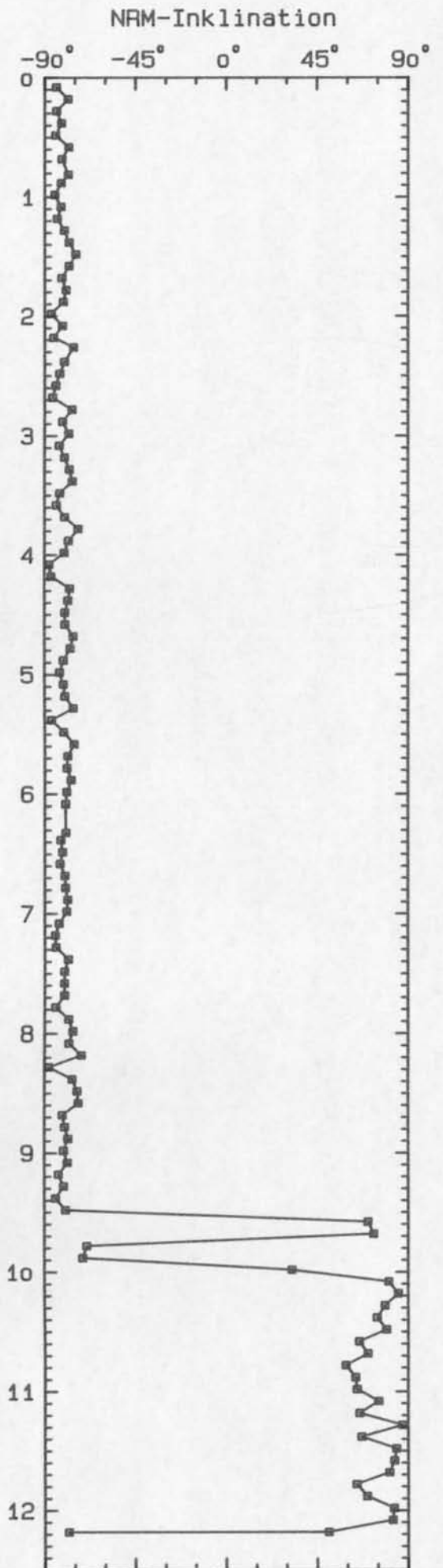
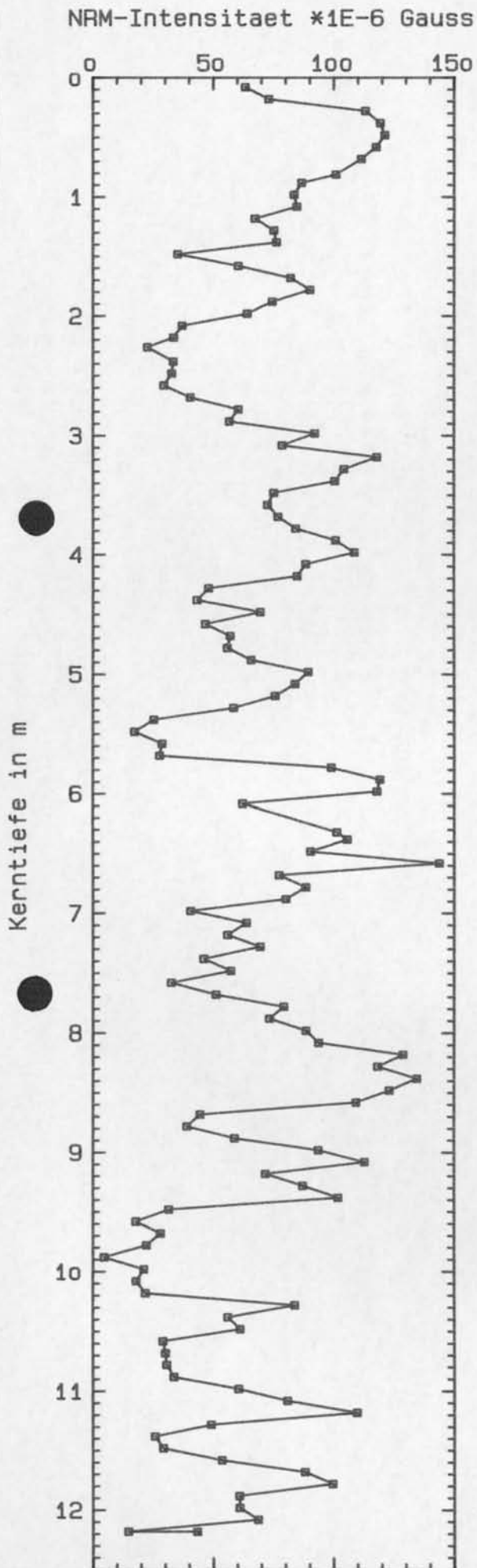
Von der Arbeitsgruppe in Bremen zur Zeit durchgeführte hochauflösende Studien von Sedimentkernen aus hohen Breiten (ARK II, ARK III) haben gezeigt, daß auch innerhalb der Brunhes-Epoche deutliche und zwischen verschiedenen Kernen korrelierbare Richtungsänderungen nachgewiesen werden können. Darüber hinaus zeigen extrem hochauflösende Messungen von Magnetisierungsintensitäten, daß auch dieser Parameter zwischen verschiedenen Kernen große Ähnlichkeiten aufweisen kann. Materialeigenschaften einerseits, die aus unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen während Kalt- und Warmzeiten resultieren und Änderungen der Dipolfeldstärke und Geometrie des Erdmagnetfeldes andererseits überlagern sich und deuten darauf hin, daß eine gemeinsame Verwendung für eine regionale Korrelation möglich ist.

Zusammen mit der geologischen/sedimentologischen Probennahme wurden alle an Bord geöffneten Schwerelotkerne systematisch für eine nachfolgende paläomagnetische Bearbeitung an Land beprobt. Dabei wurden für magnetostratigraphische Untersuchungen insgesamt 1031 Proben in Abständen zwischen 5 und 10 cm entnommen und darüber hinaus weitere 359 Proben für eine methodisch/statistische Auswertung.

Vorstudien, die am Kern 1388-3 aus dem Profil Atka durchgeführt wurden, zeigen in dieser Hinsicht interessante Ergebnisse (Abb. 3). Das Auffinden der Brunhes/Matuyama-Grenze liefert einen eindeutigen Zeitfixpunkt für die Datierung mit den Zyklen im Karbonatgehalt, sodaß umgekehrt eine Kalibrierung der magnetischen Parameter über die verschiedenen Stadien von Kalt- und Warmzeiten möglich sein sollte. Ein Vergleich der Intensität der natürlichen remanenten Magnetisierung mit dem Karbonatgehalt zeigt darüber hinaus interessante Ähnlichkeiten, die auf eine gemeinsame Ursache oder einen Steuerungsprozeß hindeuten und die noch näher untersucht werden (Grobe & Spieß, 1986).

Abb. 3 : Messungen der natürlichen remanenten Magnetisierung (NRM) für Kern 1388 vom Profil Atka. Mit Hilfe der Inklinationenwerte läßt sich die Brunhes-Matuyama-Grenze auf den Tiefenbereich 9.50 bis 9.90 festlegen. Hier muß eine systematische Abmagnetisierung aller Proben erfolgen, um die Grenze noch präziser zu fassen. Die Intensität der NRM weist eine den Klimaschwankungen ähnliche Zyklizität auf, deren Ursache näher untersucht werden soll.

Abbildung 3



3. Ziele und Arbeitsprogramm

=====

3.1 Ziele

Sedimentologie

Bearbeitet werden sollen die pleistozänen Sedimente am antarktischen Kontinentalrand (Schelf, Hang, Fuß und angrenzender Tiefseebereich) im Bereich der östlichen Weddell See zwischen Atka Bucht (8°W) und Lyddan Island (20°W) (Abb. 1), die während der geologischen Beprobung der POLARSTERN ANT IV/3-Expedition gewonnen wurden.

Die Bearbeitung der Kerne vor Kapp Norvegia sowie erste Untersuchungen an Kernen von Profil Atka lassen eine weitgehend ungestörte Sedimentation erkennen und versprechen detaillierte Aussagen zur Veränderung der Sedimentationsverhältnisse im Kontinentalrandbereich im Wechsel der Klimazyklen. Im Rahmen dieses Projekts sollen die einzelnen Faziestypen detailliert in ihren sedimentologischen und paläomagnetischen Eigenschaften erfaßt werden. In Zusammenarbeit mit den Mikropaläontologen des AWI sollen parallel an einem ausgewählten Kern Bestimmungen der dominanten Faunengemeinschaften (Foraminiferen, Diatomeen, Radiolarien) zur Charakterisierung der verschiedenen Sedimentfazies beitragen. Weiterhin sind Bestimmungen stabiler Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenverhältnisse ($\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$) an planktischen und benthischen Foraminiferen (Uni Bremen, AWI) und radiometrische Datierungen (Uni Heidelberg) geplant. Die Gliederung der Sedimentabfolge in den Kernen in verschiedene Faziestypen soll mit Hilfe multivariater statistischer Verfahren (Faktoren, Varianz-, Clusteranalyse) unterstützt werden.

Aus der Interpretation der Faziesabfolgen sowie ihrer begleitenden sedimentologischen, magnetischen und mikropaläontologischen Parameter werden Aufschlüsse zu den Themenkreisen Stratigraphie, Paläoglazilogie, Paläoozeanographie, Paläomagnetik und Paläoklimatologie erwartet.

Als stratigraphische Grundlage soll mit Hilfe umfassender sedimentologischer Untersuchungen (Akkumulationsraten) sowie durch Korrelation mit bestehenden Paläoklimakurven (z.B. Sarnthein et al., 1984) eine Karbonatstratigraphie für den Zeitraum bis 1 Mio.J. aufgestellt werden. Zeitliche Fixpunkte liefert die Paläomagnetik mit der Brunhes-Matuyama-Grenze (0.73 Mio.J.) und dem Jaramillo-Event (0.98 bis 0.91 Mio.J.). Aus d_{180} -Bestimmungen an planktischen und benthischen Foraminiferen soll versucht werden, eine Isotopenstratigraphie aufzustellen, wenn sich auch erste Messungen im Bereich Kapp Norvegia (Grobe, 1986) als schwierig interpretierbar herausgestellt haben.

Magnetostratigraphie

Die semiorientierte Probennahme (Orientierung der Vertikalen an der Kernachse) mit rechteckigen Probendosen von 7 ccm Volumen erlaubt die vollständige Auswertung der Inklination der Magnetisierung. Aussagen über die azimutale Variation der Magnetisierungsrichtung (Deklination) sind aufgrund der durchgehenden Markierung der Coreliner möglich, wenn der Anfangswert für die Kernoberkante an der heutigen Feldrichtung eingehängt werden kann, zumindest jedoch Aussagen über die relative Änderung.

Eine magnetostratigraphische Datierung innerhalb der Brunhes-Epoche ist bislang nicht versucht worden, doch sollte dort eine detailliertere Beprobung und eine aufwendigere Meßmethodik und Datenbearbeitung eine Ansatzmöglichkeit liefern. Der geringe Probenabstand von 5 cm, entsprechend einem Zeitabstand zwischen 1500 und 10000 Jahren, bietet die Grundlage für verschiedene neue Datierungsmöglichkeiten.

Einmal bietet sich die Möglichkeit, Feldexkursionen und kurzzeitige Feldumkehrungen, die allerdings bislang noch nicht weltweit nachgewiesen und korreliert werden konnten, zu identifizieren und mit Hilfe geologischer Zeitinformationen zu kalibrieren. Bei Nachweis in mehreren Kernen entlang eines Profils können diese Zeitmarken auch über Faziesgrenzen hinaus zur

Datierung herangezogen werden. Hier verspricht die relative Nähe der Kernlokationen zum geomagnetischen Pol einen größeren Erfolg, da sich Schwankungen in der Geometrie des Erdmagnetfeldes hier deutlicher auswirken.

Neben dieser Datierung mit singulären Ereignissen bietet sich aber daneben die Messung der Variation der verschiedenen magnetischen Parameter wie der Magnetisierungsrichtung und -intensität an. Während die Änderungen der Magnetisierungsrichtung im wesentlichen auf das Erdmagnetfeld zurückgeführt werden können, wird die Intensität der Magnetisierung darüber hinaus durch die Änderung der Sedimentzufuhr (Klima), Materialänderungen beeinflusst, so daß die genaue Messung dieser Parameter eine Möglichkeit der Korrelation zwischen verschiedenen benachbarten Kernlokationen wie auch nach einer Kalibrierung dieser Variationen an anderen Zeitskalen (Sedimentologie, Biostratigraphie, Isotopenstratigraphie) die Grundlage für eine relative oder absolute Datierung liefern kann.

Im Hinblick auf diese Fragestellungen wurden die an Bord geöffneten Kerne systematisch beprobt. Kerne mit einer vermutlich höheren Sedimentationsrate wurden besonders dicht beprobt (5 cm), um die zeitlichen Variationen bei Vermeidung von Aliasing mit genügender Auflösung zu messen. In diesen Kernen ist vermutlich die Brunhes/Matuyama-Grenze nicht enthalten, so daß eine magnetostratigraphische Datierung nach einer etablierten Polaritäts-Zeit-Skala nicht in Frage kommt. An den übrigen Kernen wird zunächst eine standardmäßige paläomagnetische Analyse (Probenabstand 10 cm; Messung jeder Probe in mindestens 10 Abmagnetisierungsschritten) durchgeführt werden, um die Datierung mit Hilfe von Feldumkehrungen vorzunehmen.

Das Ziel der Untersuchungen wird sein, einerseits Ansätze für eine detaillierte magnetostratigraphische Datierungsmethode im Bereich der Weddell-See zu entwickeln, zum anderen die gemessenen Variationen der magnetischen Parameter in verschiedenen benachbarten Kernen zu vergleichen, mit allen zur Verfügung stehenden geologisch-sedimentologisch-stratigraphischen Daten zu vergleichen und gegebenenfalls an den daraus abgeleiteten Zeitskalen zu

kalibrieren. In der Weiterentwicklung ließen sich Kerne verschiedener Profile parallelisieren und daraus Ansätze für eine allgemeiner anwendbare Datierungsmethode entwickeln, die über den Bereich der Weddell-See und das Pleistozän hinaus anwendbar wäre.