

Quantitative Ableitung sedimentphysikalischer Parameter mit Hilfe eines Multi-Sensor Core Loggers – neue Wege in der Analytik mariner Sedimente

MICHAEL E. WEBER¹

Marine Sedimente, Sedimentphysik, Multi-Sensor Core Logger

Kurzfassung

Der Multi-Sensor Core Logger (MSCL) ermöglicht zerstörungsfreie, quasi-kontinuierliche Messungen physikalischer Parameter und somit eine Reduzierung des Zeitbedarfs für Einzelprobenanalysen. Die frischen Kerne können schon einen Tag nach der Probennahme im Schiffslabor untersucht werden. Es werden Dichte, Schallwellengeschwindigkeit (V_p) und magnetischen Suszeptibilität in wassergesättigten Sedimentkernen ermittelt. Hochfrequente Veränderungen der Sedimentfazies lassen sich somit leichter erkennen. Anhand von Beispielen werden die Vorteile von MSCL-Messungen gegenüber traditionellen sedimentologischen Untersuchungsmethoden demonstriert.

Die Beziehungen zwischen Dichte und V_p ermöglichen detaillierte fazielle Zuordnungen noch vor der Öffnung von Sedimentkernen. So steigt in terrigenen Sedimenten die Dichte mit der V_p , während sie in biogenen Sedimenten abnimmt. In biogenen Sedimenten des Südatlantiks sind niedrige Dichten und hohe V_p an hohe Opalgehalte gebunden. In biogenen Sedimenten des Peru-Beckens steigt die Dichte mit dem Karbonatgehalt. Das für den Tiefsee-Umweltschutz sowie für paläoklimatische Studien wichtige Karbonat läßt sich in dieser Meeresregion aus MSCL-Messungen quantitativ ableiten. In den terrigenen Sedimenten des Bengal-Fächers steigt die akustische Impedanz (das Produkt aus Dichte und V_p) mit der Korngröße. Aus den Impedanzen lassen sich dort Korngrößenverteilungen ableiten - ein rasches Verfahren zur Quantifizierung des sedimentären Inventars. In hemipelagischen Sedimenten des Bengal-Fächers ist es außerdem möglich, Suszeptibilitätsschwankungen an Zyklen der Veränderung der Erdumlaufparameter zu kalibrieren – eine wichtige Voraussetzung für detaillierte stratigraphische Studien.

[Quantitative Determination of Physical Parameter Values from Multi-Sensor Core Logging Data – New Possibilities for Analyzing Marine Sediments]

Abstract

The Multi-Sensor Core Logger (MSCL) enables non-destructive, quasi-continuous measurements of physical properties, reducing the time needed for discrete sample analysis. Density, compressional wave velocity (V_p), and magnetic susceptibility are measured on water-saturated sediment cores. Rapid variations in the lithology can thus be more easily recognized. The advantages of MSCL measurements over traditional sedimentological investigation methods are illustrated using several examples.

Density- V_p relationships provide detailed lithological information prior to splitting the sediment cores. In terrigenous sediments, density increases with V_p , whereas in biogenic sediments it decreases. In biogenic sediments in the South Atlantic, low densities and high V_p are associated with high opal content. In biogenic sediments in the Peru Basin, density increases with carbonate content. Carbonate, which is very important for deep-sea environmental protection and for paleoclimatic studies, can be determined quantitatively from MSCL measurements in this area. In terrigenous sediments in the Bengal Fan, the acoustic impedance (the product of density and V_p) increases with grain size. There, the grain-size distribution can be rapidly derived from the acoustic impedance. Moreover, in hemipelagic sediments in the Bengal Fan, it is possible to correlate variations in magnetic susceptibility with cyclic changes in the earth's orbital parameters – an important prerequisite for detailed stratigraphic studies.

Einführung

Die Kenntnis physikalischer und akustischer Eigenschaften nicht konsolidierter mariner Sedimente ist von großer Bedeutung für Untersuchungen zum Paläoklima und Umweltschutz. Dazu zählen die in der vorliegenden Studie behandelten Parameter *magnetische Suszeptibilität*, *Schallwellengeschwindigkeit* (V_p), *Sedimentdichte*, *Wassergehalt* und *Porosität*. Diese stehen in enger Beziehung zur Sedimentzusammensetzung und zeigen in der Regel Änderungen in der Korngrößenverteilung oder im Verhältnis terrigener (Quarz und Ton) zu biogener (Karbonat und Opal) Sedimentbestandteile an. Konventionell werden sedimentphysikalische Parameter an einzelnen Proben bestimmt – eine zeitaufwendige, z. T. teure und vor allem sedimentzerstörende Methode. Die Entwicklung von auto-

matisierten Systemen erlaubt es nun, schon im Schiffslabor diese Eigenschaften schnell, zerstörungsfrei und quasi-kontinuierlich an geschlossenen Sedimentkernen zu messen (WEAVER & SCHULTHEISS 1990). Die so erzeugten Daten besitzen sehr gute räumliche Auflösung und zeigen hohe Präzision und sehr gute Reproduzierbarkeit.

Der Multi-Sensor Core Logger

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungsergebnisse gezeigt, die mit einem *Multi-Sensor Core Logger* (MSCL) der Firma GEOTEK, Surrey / England, gewonnen wurden. Das Gerät besitzt drei Meßsysteme:

- (I) einen Schallgeber und -empfänger zur Messung der Laufzeit von Schallwellen,
- (II) eine Gammaquelle und ein Detektor zur Bestimmung der Schwächung von Gammastrahlen und
- (III) einen Sensor zur Messung der magnetischen Suszeptibilität.

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Tabelle 1: Kernstationen der vorliegenden Studie. Die Kerne stammen von den Schiffsexpeditionen SO-93 (Bengal-Fächer), ANT-XI/4 (südöstlicher Atlantik und südwestlicher Indik) und SO-106 (Peru-Becken).

Table 1: Borehole sites discussed in this paper. Cores taken during the SO-93 expedition (Bengal Fan), ANT-XI/4 (southeast Atlantic and southwest Indian Ocean), and SO-106 (Peru Basin).

Kernnr.	Länge [°]	Breite [°]	Kernlänge [cm]	Wassertiefe [m]	Bemerkungen	Gebiet
22KL	83°20' E	00°45' N	897	4420	Randlicher Berg	Bengal-Fächer
40KL	85°30' E	07°33' N	846	3810	Uferwall Rinne	Bengal-Fächer
47KL	88°25' E	11°11' N	1000	3294	Fossiler Uferwall	Bengal-Fächer
103KL	89°48' E	21°18' N	609	29	Rezente Deltafront	Bengal-Fächer
105KL	89°47' E	21°11' N	810	80	Rezenter Deltafuß	Bengal-Fächer
115KL	89°33' E	17°24' N	1250	2296	Kontinentalhang	Bengal-Fächer
118KL	87°45' E	16°33' N	1159	2562	Uferwall Rinne	Bengal-Fächer
120KL	88°00' E	16°30' N	1150	2629	Distaler Uferwall	Bengal-Fächer
124KL	90°00' E	19°23' N	992	1607	Kontinentalhang	Bengal-Fächer
128SL	90°18' E	20°13' N	472	145	Fossiles Delta	Bengal-Fächer
PS2567	06°15' E	46°56' S	1765	4102	Hang eines Berges	Meteor-Rücken
184KL	90°31' W	06°34' S	1255	4103	Tiefseeplateau	Peru-Becken

Aus den Laufzeitmessungen werden Schallwellengeschwindigkeiten (V_p) bestimmt. Aus der Schwächung von Gammastrahlen werden Dichten (Feuchtraumdichten) abgeleitet und daraus wiederum Porositäten und Wassergehalte. Die Messung der magnetischen Suszeptibilität erfolgt direkt mit einem Bartington MS-2 Sensor (Tab. 1). Eine genaue Beschreibung der Kalibrierung der drei Sensoren des MSCL-Systems sowie der angewandten Berechnungsverfahren während der Datenverarbeitung sind bei WEBER, NIESSEN et al. (1997) nachzulesen.

Die Systeme II und III sind 14 bzw. 64 cm von System I entfernt. Auf einem ca. 4 m langen Schlitten werden entlang eines Förderbandes Sedimentkerne von 1 m Länge mit Hilfe eines Schrittmotors bewegt. Die kleinste Schrittweite und somit der kleinste mögliche Meßabstand liegt bei 0,2 cm. Entsprechend der besonderen Anordnung der Systeme auf dem Schlitten werden bei einem 100 cm langen Kernstück von den 3 Meßsonden insgesamt 174 Messungen durchgeführt, wenn ein Meßabstand von 1 cm gewählt wird (die magnetische Suszeptibilität muß wegen der geringen räumlichen Auflösung der Spule 10 cm über das Kernende hinweg gemessen werden). Bei einer Meßzeit von 10 sec je Sensor, erfordert ein 1 m langes Kernsegment eine Meßzeit von ca. 30 min. Für die anschließende Datenverarbeitung werden die Meßwerte auf einem Computer digital gespeichert.

Zur Zeit sind weltweit rund 25 MSCL-Systeme im Einsatz, sechs davon allein in Deutschland an Standorten der Meeresforschung in Bremerhaven, Hannover, Kiel und Warnemünde.

Probenmaterial und Methodik

Der vorliegenden Studie liegen MSCL-Daten von drei Expeditionen mit deutschen Forschungsschiffen zugrunde. 1994 wurden auf Expeditionen mit FS Sonne ca. 400 m

Sedimentkern im Bengal-Fächer (Reise SO-93) und mit FS Polarstern ca. 300 m im Antarktischen Zirkumpolarstrom (Reise ANT-XI/4) gewonnen. Weitere Daten stammen aus dem Peru-Becken, wo während der Reise SO-106 (1996) annähernd 200 m Sedimentkerne gewonnen wurden (Tab. 1). Die Kerne wurden unmittelbar nach ihrer Gewinnung in 1 m Stücke geteilt, für einen Tag horizontal gelagert und dann in 1 bis 2 cm Intervallen nach dem o. g. Schema vermessen.

Neben den Messungen an Bord mit dem MSCL-System wurden im Labor verschiedene Untersuchungen an einzelnen Proben durchgeführt. Entsprechend WEBER (1992) wurden die sedimentphysikalischen Parameter Wassergehalt, Porosität und Dichte bestimmt. Untersuchungen der Korngrößenverteilung wurden nach WEBER et al. (1997) durchgeführt und nach FOLK & WARD (1957) berechnet. Karbonatgehalte wurden nach KLOSA (1994) bestimmt. Schallwellengeschwindigkeiten (V_p) wurden nach einem Berechnungsverfahren von BREITZKE & SPIE (1993) auf 20°C normiert.

Vergleich von Logmessungen und Messungen an Einzelproben

Um die Qualität der aus der Absorption von Gammastrahlen abgeleiteten physikalischen Kenngrößen beurteilen zu können, werden diese zunächst mit den Kenngrößen von Einzelproben verglichen. Um das Maß der Übereinstimmung in der gesamten Spannweite der möglichen natürlichen Variabilität sedimentphysikalischer Parameter in wassergesättigten, nicht verfestigten Sedimenten beurteilen zu können, ist es notwendig, verschiedene Lithologien bzw. Faziestypen zu vergleichen. Dabei ist es wichtig, die mittleren Korndichten der Sedimente zu kennen, da diese bei der Ableitung aus der Absorptionsmessung mit einfließen (siehe dazu WEBER et al. 1997):

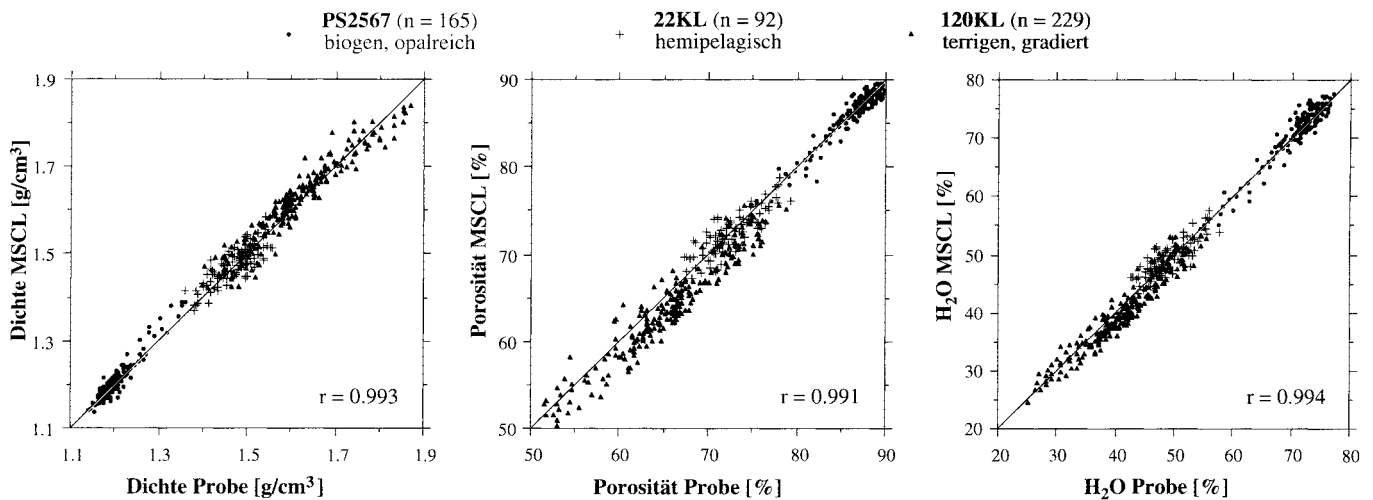


Abb. 1: Streudiagramm verschiedener sedimentphysikalischer Parameter, einerseits aus Messungen der Gammastrahlen im MSCL und andererseits aus konventioneller Bestimmung von Einzelproben (Berechnungsverfahren nach WEBER et al. 1997). Die Sedimentkerne repräsentieren durch unterschiedliche Lithologien eine große Variationsbreite:

- PS2567, Meteor Rücken, biogen, opalreich, 165 Proben
- 22KL, Bengal-Fächer, hemipelagisch, 92 Proben
- 120KL, Bengal-Fächer, terrigen, gradiert, turbiditisch, 229 Proben.

Die Geraden spiegeln jeweils das 1:1 Verhältnis wieder. Die Übereinstimmung der zwei Meßmethoden ist jeweils sehr gut (r der linearen Regressionen ist jeweils > 0,99), d. h. sedimentphysikalische Parameter können mit großer Präzision von MSCL-Messungen abgeleitet werden.

- Für sehr niedrige Dichten (1,1 bis 1,4 g/cm³) wurde ein Sedimentkern aus der Antarktischen Polarfrontzone (Meteor-Rücken; Südatlantik) gewählt (PS2567). Diese Meeresregion ist durch eine hohe Primärproduktion von silikatischem Plankton charakterisiert (BAREILLE, LABRACHERIE & LABEYRIE 1991). Der Sedimentkern zeigt klimatisch induzierte Wechsellagerungen von biogenem Opal (30 bis 80 %) und biogenem Karbonat (0 bis 50 %).
- Mittlere Dichten (1,4 bis 1,5 g/cm³) zeigt der Sedimentkern 22KL aus dem distalen Bengal-Fächer. Er weist hemipelagische Sedimente auf, eine Wechsellagerung von pelagischen Sedimenten und feinkörnigen, distalen Turbiditen.
- Für sehr hohe Dichten (bis zu 1,9 g/cm³) wurde der Sedimentkern 120KL aus dem Bengal-Fächer verwendet. Er stammt von einem distalen Uferwall der aktiven Rinne im mittleren Fächerbereich, in welcher Sedimentsuspension am Meeresboden in die Tiefsee transportiert wird. Der Kern besteht vorwiegend aus Turbiditen mit gradierter Schichtung.

Abb. 1 zeigt, daß Log- und Einzelproben Daten über alle Lithologien hinweg sehr gut miteinander korreliert sind (der Korrelationsfaktor r ist jeweils > 0,99) und keine systematischen Abweichungen aufweisen. Als ein wesentliches Ergebnis der vorliegenden Studie ist demnach hervorzuheben, daß Dichten, Wassergehalte und Porositäten von Sedi-

Fig. 1: Plot of several physical parameters derived from gamma-ray measurements with a multi-sensor logger and from measurements made conventionally on individual samples (see WEBER et al. 1997 for the calculation methods used). The cores were selected to represent a wide range of different lithologies

- (PS2567, Meteor Ridge, biogenic, opal-rich, n = 165;
- 22KL, Bengal Fan, hemipelagic, n = 92;
- 120KL, Bengal Fan, terrigenous, graded, turbiditic, n = 229).

The straight lines have a slope of 1. The two methods show very good agreement (linear regression coefficient r = 0.99). Thus, physical parameter values for sediments can be determined very well from MSCL measurements.

mentkernen künftig nicht mehr an einzelnen Proben bestimmt werden müssen, sondern nach einmaliger Kalibrierung aus der Absorption von Gammastrahlen abgeleitet werden können.

Das Verhältnis von Dichte zu Schallwellengeschwindigkeit als Faziesindikator

In terrigenen Sedimenten steigt generell die Dichte mit der Schallwellengeschwindigkeit V_p an. In Sedimenten des Bengal-Fächers ist dies besonders in den basalen Bereichen von deutlich gradierten Turbiditen der Fall (40KL, Abb. 2). Der Dichte/ V_p -Gradient liefert folglich ein Maß für die Korngrößenverteilung im Sediment. Darauf wird im nächsten Kapitel eingegangen.

In biogenen Sedimenten hingegen steigt die V_p mit abnehmender Dichte (Abb. 2). Die Ursache liegt vermutlich darin, daß das enthaltene Opal zu einem erhöhten Rigiditätsmodul aufgrund der Packungsgeometrie führt (z. B. BURGER 1992), woraus höhere Geschwindigkeiten bei niedrigerer Dichte resultieren (siehe dazu WEBER et al., 1997). Mit bis zu 80 % Opalgehalt bei hohen V_p und 30 % bei niedrigen V_p läßt der V_p /Dichte-Gradient in der Antarktischen Polarfrontzone (PS2567) somit auf die Opalgehalte schließen.

Im ebenfalls biogenen Sedimentkern 184KL aus der Tiefsee des östlichen Pazifiks (Peru-Becken) sind hohe Karbo-

Abb. 2: Schallwellengeschwindigkeit (Vp) und Dichte in Sedimenten unterschiedlicher Lithologien:

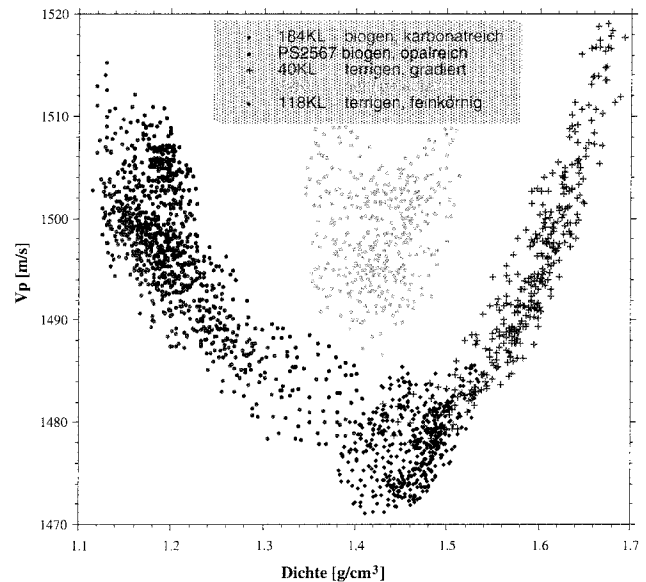
- PS2567, Meteor-Rücken: biogen, opalreich (398 Proben)
- 184KL, Peru-Becken: biogen, karbonatreich (594 Proben)
- 40KL, Bengal-Fächer: terrigen, gradiert, turbiditisch (397 Proben)
- 22KL, Bengal-Fächer: hemipelagisch (400 Proben)
- 118KL, Bengal-Fächer: terrigen, feinkörnig (456 Proben).

In terrigenen Sedimenten mit deutlichen Korngrößenunterschieden (Turbidite) steigt die Dichte mit der Vp, während sie in biogenen Sedimenten abnimmt. Hemipelagische Sedimente sowie terrigene Sedimente mit geringen Korngrößenunterschieden zeigen eher punktförmige Anhäufungen. Dichte-Vp-Diagramme liefern folglich wichtige Hinweise zur Sedimentfazies.

Fig. 2: Plot of compressional wave velocity (Vp) vs. density in sediments with different lithologies

- PS2567, Meteor Ridge, biogenic, opal-rich, n = 398;
- 184KL, Peru Basin, biogenic, carbonate-rich, n = 594;
- 40KL, Bengal Fan, terrigenous, graded, turbiditic, n = 397;
- 22KL, Bengal Fan, hemipelagic, n = 400;
- 118KL, Bengal Fan, terrigenous, fine-grained, n = 456.

Vp is normalized to 20 °C using a calculation method of Breitzke & Spiess (1993). In terrigenous sediments with a wide range of grain sizes (turbidites), density increases with increasing Vp. In biogenic sediments it decreases with increasing Vp. Hemipelagic sediments and terrigenous sediments with a narrow range of grain sizes plot in a cluster. It can thus be seen that plots of Vp vs. density provide important information about the lithology of a sediment.



natgehalte (bis zu 80 %) vorwiegend an hohe Dichten, untergeordnet an niedrige Vp gebunden. Karbonatgehalte können demnach aus Dichtewerten abgeleitet werden (siehe übernächstes Kapitel).

Feinkörnige terrigene (detritische) Sedimente ohne deutliche Korngrößenwechsel und mit sehr geringem Biogenopalgehalt (118KL von einem Uferwall der aktiven Rinne im mittleren Fächerbereich) zeigen eine Punktwolke bei mittleren Dichten und sehr niedrigen Vp. Hemipelagische Sedimente (22KL) haben mittlere Biogengehalte und ebenfalls geringe Korngrößenunterschiede. Sie zeigen daher Punktwolken bei mittleren Vp und mittleren Dichten.

Anhand eines Dichte/Vp-Diagramms lassen sich somit fazielle Eigenschaften sehr gut erkennen und gegeneinander abgrenzen, noch bevor ein Sedimentkern geöffnet wird. In den o.g. Beispielen aus dem marinen Milieu liefern sie u. a. quantitative Hinweise über die wichtigen Sedimentparameter *Korngrößenverteilung*, *Karbonat-* und *Opalgehalt*.

Ableitung der Korngrößenverteilung in Sedimenten des Bengal-Fächers anhand der akustischen Impedanz

Die akustische Impedanz stellt das Produkt aus Vp und Dichte dar, wobei die Dichtevariation rund 80 % des Impedanzwertes liefert. Sie ist ein wichtiges Hilfsmittel beim Vergleich gekernter Sedimentsektionen mit hochauflösenden seismischen Aufzeichnungen (WEAVER & SCHULTHEISS 1990). In terrigenen Sedimenten sind Dichte und Vp eng mit der Korngrößenverteilung verknüpft. Grobkörnige (sandig-siltige) Sedimente haben höhere Dichten, da deren Porositäten und Wassergehalte niedriger sind (HOLLER 1985). Weiterhin ist Vp wegen des besseren intergranula-

ren Kontaktes höher. Für den Bengal-Fächer wird dies anhand des Kerns 105KL aus dem Bereich der rezenten Deltafront deutlich (Abb. 3).

Die terrigenen Sedimente des Bengal-Fächers sind häufig gradiert mit einzelnen grobsiltigen Lagen, die wenige Zentimeter bis Millimeter dick sind. Daneben treten stärker tonhaltige Schlämme auf. Auf dem Schelf sind diese Lagen Sturmereignissen zugeordnet, wohingegen sie auf dem Kontinentalhang Turbidite repräsentieren. Gradierte Lagen bestehen überwiegend aus Silt (bis zu 98 %), der wiederum in der 63 bis 20 µm Fraktion konzentriert ist und Sortierungswerte von etwa 1,4 Φ - Einheiten ("moderately well sorted", FOLK & WARD 1957) aufweist. Nur wenige Lagen enthalten bis zu 15 % Sand. Die Tongehalte sind niedrig im basalen Teil der gradierten Lagen (≤ 5 %) und hoch (ca. 50 %) in den feinkörnigen Zwischenlagen.

Die Korrelation der in Abb. 3 dargestellten MSCL-Daten zu Einzelprobenparametern ist allgemein sehr gut ($r \geq 0,9$). Die beste Korrelation zeigt sich zwischen akustischer Impedanz und Tongehalt ($r = 0,975$; Abb. 4). Die gradierten Lagen können aufgrund dieser Beziehung klar von den feinkörnigen Zwischenlagen getrennt werden. Die polynomiale Regression in Abbildung 4 hat jedoch nur Gültigkeit, wenn die Karbonatgehalte gering sind. Höhere Karbonatgehalte führen zu niedrigeren Impedanzwerten, wie Proben des Kerns 47KL aus dem äußeren Fächerbereich in 3294 m Tiefe belegen. Die Ursache hierfür liegt in der sich ändernden Beziehung zwischen Vp und Dichte in stärker biogenen Sedimenten (siehe oben). In den Schelfarealen vor Bangladesch sowie auf dem oberen Kontinentalhang des Fächers sind die Karbonatgehalte im allgemeinen jedoch sehr gering (≤ 3 %). Hier kann man die Regression aus Abbildung 4 verwenden, um Tongehalte aus der akustischen Impedanz abzuleiten, was in Abbildung 5 für

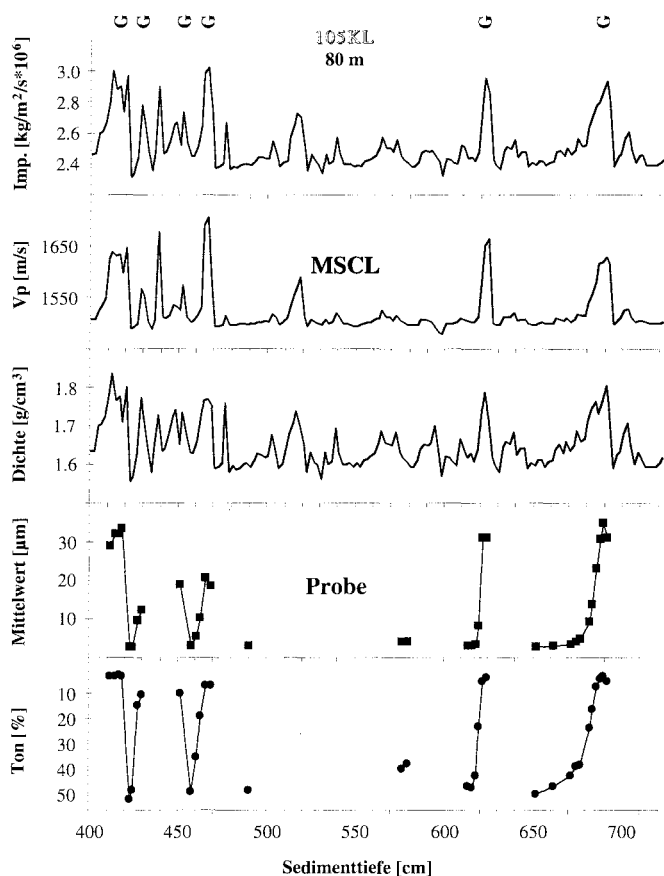


Abb. 3: sedimentphysikalische Parameter des MSCL mit Korngrößenparametern von 34 diskreten Proben des Sedimentkerns 105KL (Schelf vor Bangladesch). Die Datensätze stammen aus 400-720 cm Sedimenttiefe und zeigen deutliche Maxima jeweils in basalen Bereichen gradierter Lagen (G).

Fig. 3: Comparison of physical parameter values determined from MSCL measurements with grain-size distributions obtained from 34 samples taken at sediment depths of 400 – 720 cm from core 105KL from the continental shelf off Bangladesh. The two data sets correlate very well. Distinct maxima in the MSCL-derived values occur at the base of each graded layer (G).

einen Kerntransekt vom rezenten Delta bis zum oberen Kontinentalhang dargestellt ist. Diese Berechnung beschränkt sich auf Impedanzwerte $\leq 2960 \text{ kg/m}^2/\text{s}\cdot 10^3$ (Tongehalt = 0 %) und $\geq 2200 \text{ kg/m}^2/\text{s}\cdot 10^3$ (Tongehalt = 60 %).

Die Kerne des oberen Kontinentalhangs (115 und 124KL) zeigen nach der Berechnung hohe Tongehalte (≥ 50 %) und relativ gleichförmige Verläufe innerhalb der Kerne. Der nichttonige Anteil setzt sich vermutlich fast ausschließlich aus Silt zusammen, da Sand nur untergeordnet

und Kies überhaupt nicht auftritt (siehe oben). An der Schelfkante (Kern 128KL) sind die durchschnittlichen Tongehalte deutlich niedriger. Zusätzlich sind einige gradierte Lagen als Einschnitte erkennbar. In Annäherung an den Deltafuß (Kern 105KL) und die Deltafront (Kern 103KL) im Norden zeigen die Sand/Silt-Tonverhältnisse sehr rasche Wechsel, was, in Verbindung mit sedimentologischen Beobachtungen, auf ein hochenergetisches Milieu mit schnellen Änderungen der Sedimentationsbedingungen schließen läßt.

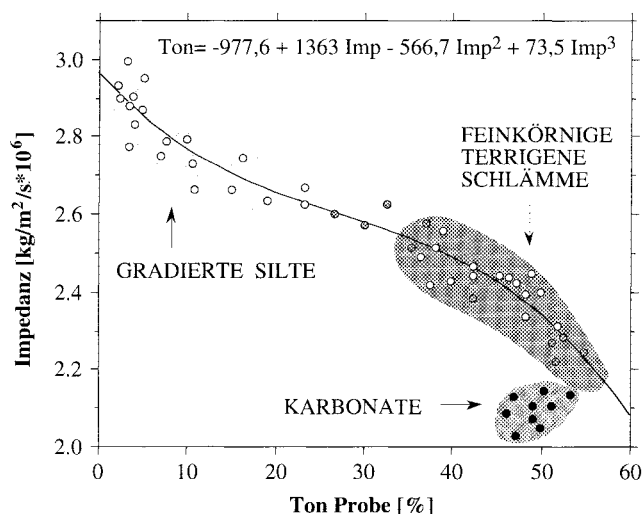
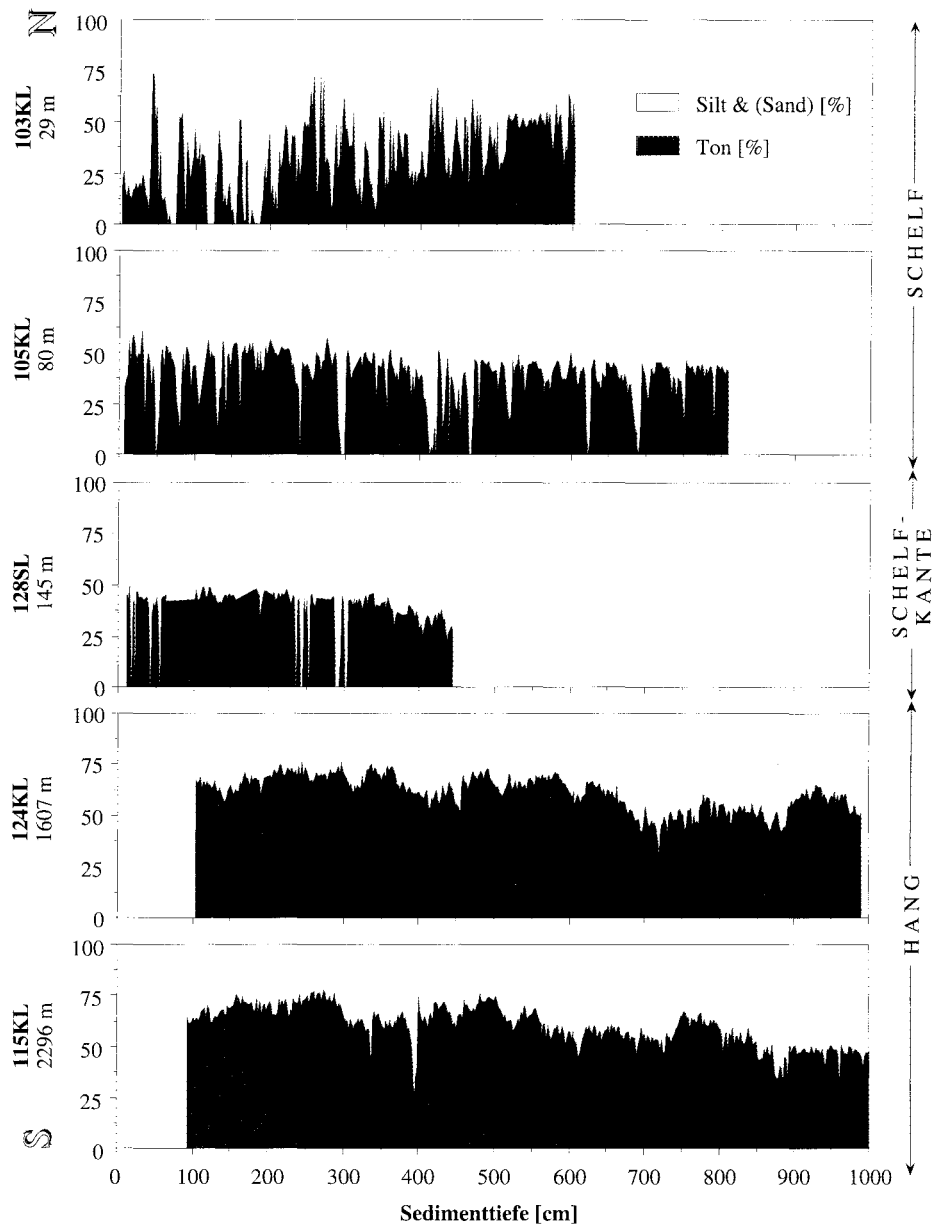


Abb. 4: akustische Impedanz des MSCL und Tongehalte von Einzelproben. Weiße Datenpunkte sind von Kern 105KL, Schelf vor Bangladesch (34 Proben); graue und schwarze Datenpunkte von 47KL, unterer Bengal-Fächer (19 Proben). Anhand des Diagramms können gradierte siltige Lagen, die nach Sturmereignissen auf dem Schelf bzw. durch Suspensionsströme auf dem Kontinentalhang entstehen, klar von terrigenen tonigen Schlämmen unterschieden werden. Die polynomiale Regression ($r = 0,975$) gilt nicht für karbonatreiche Sedimente (schwarze Punkte).

Fig. 4: Plot of acoustic impedance measured by MSCL vs. the clay content of individual samples (circles are for core 105KL, continental shelf off Bangladesh, $n = 34$; gray and black points are for core 47KL, lower Bengal Fan, $n = 19$). Graded, silty layers (resulting from storms in the shelf area or turbidity currents on the continental slope) can be clearly distinguished from terrigenous muds. The polynomial regression curve does not pass through the cluster of carbonate-rich sediments (black points).

Abb. 5: Sand/Silt- und Tongehalte auf einem N-S-Kernprofil vom Schelf vor Bangladesch bis zum oberen Bereich des Bengal-Fächers. Die Daten sind abgeleitet von der akustischen Impedanz mit Hilfe der Gleichung in Abb. 4. Relativ gleichförmige Kurvenverläufe sind auf dem Fächer zu erkennen, während die Sedimente des Schelfs starken Schwankungen unterliegen.

Fig. 5: Sand/silt, and clay contents along a N-S profile from the continental shelf off Bangladesh to the upper part of the Bengal Fan. The grain-size distribution was determined from acoustic impedance values using the equation in Fig. 4. The curve is relatively smooth for the area of the fan, in contrast to the large variations for the shelf area.



Die Kombination aus Korngrößendaten einzelner Proben und MSCL-Daten ermöglicht im Bengal-Fächer eine detaillierte Studie fazieller Sedimenteigenschaften und läßt Rückschlüsse auf das Sedimentationsgeschehen zu. Weiterhin ermöglicht die Kenntnis der abgeleiteten Sand/Silt-Tongehalte, das sedimentäre Inventar mit relativ wenig Zeitaufwand und geringen finanziellen Mitteln zu quantifizieren.

Ableitung von Karbonatgehalten in Sedimenten des Peru-Beckens anhand der Sedimentdichte

Das Karbonat der Tiefseesedimente des östlichen Pazifiks enthält wichtige paläozeanographische und paläoklimatische Informationen. Die karbonatischen Sedimente des Peru-Beckens bestehen hauptsächlich aus Nannofossil-schlamm, die in ihrem heutigen Erhaltungszustand ein

Abbild der Bioproduktivität im Oberflächenwasser und der Lösungsgeschichte im Bodenwasser sind (WEBER et al. 1995). Die Bestimmung der Karbonatgehalte an einzelnen Proben erfordert jedoch relativ viel Zeit und Personal und außerdem einen entsprechend hohen apparativen Aufwand. Die in Abb. 6 dargestellten Karbonatmessungen an 35 verschiedenen Probenlokationen (insgesamt 1600 Messungen) zeigen eine sehr gute Korrelation zur Dichte ($r = 0,95$). Dichten können folglich in Karbonatgehalte umgerechnet werden, was am Sedimentkern 184KL aus dem nordwestlichen Peru-Becken gezeigt werden soll.

Der Kern stammt aus dem Bereich der Karbonatkompensationstiefe und zeigt die für den Pazifik typischen klimainduzierten Karbonatlösungszyklen (HAYS et al. 1969) mit Karbonatgehalten von 0 % bis 80 %. Die aus den Dichtedaten des Kerns mit Hilfe der polynomialen Regressionsgleichung aus Abb. 6 abgeleiteten Karbonatgehalte zeigen

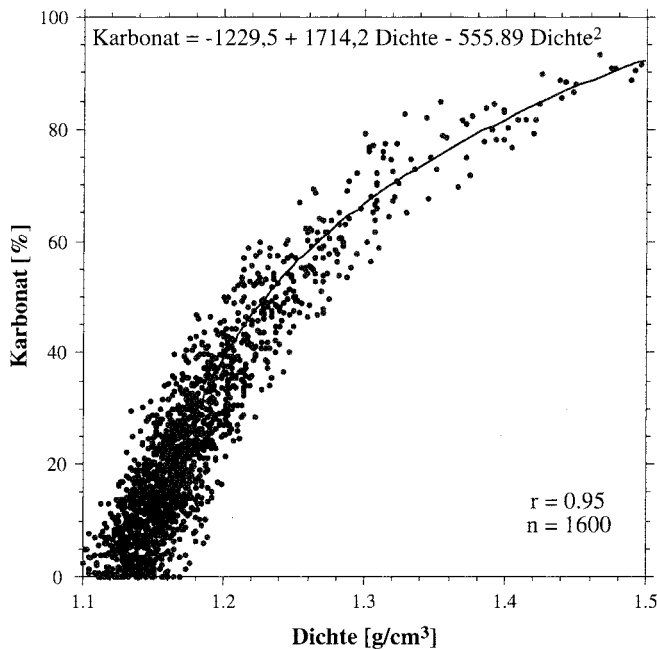


Abb. 6: Dichte und Karbonatgehalte in Sedimenten des Peru-Beckens. 1600 Messungen an Proben von 35 Sedimentstationen. Die polynomiale Regression ($r = 0,95$) kann zur Berechnung von Karbonatgehalten aus Dichtedaten genutzt werden, (siehe Abb. 7).

Fig. 6: Plot of density vs. carbonate content of sediments in the Peru Basin; 1600 measurements were made on individual samples from 35 cores. The polynomial regression curve ($r = 0,95$) can be used to calculate density from carbonate content (see Fig. 7).

eine sehr gute Übereinstimmung mit den Gehalten, die an *Cibicidoides wuellerstorfi* (s. u.) in Einzelproben gemessen wurden (Abb. 7).

Logmessungen an Sedimenten des Peru-Beckens erlauben es somit, Karbonatgehalte sehr präzise indirekt zu bestimmen. Der Vorteil dieser Methode ist einerseits wiederum die Zeit- und Kostenersparnis; andererseits ist die gegenüber Einzelproben vielfach höhere Datendichte wichtig für paläozooarcheologische und stratigraphische Studien (z. B. HERBERT & MAYER 1991). Hierzu zählt vor allem die Erstellung astronomisch kalibrierter Zeitreihen (SHACKLETON et al. 1995), die im folgenden anhand der magnetischen Suszeptibilität erläutert werden soll.

Magnetische Suszeptibilität als Hilfsmittel zur Aufstellung von Zeitreihen

Die magnetische Suszeptibilität beschreibt im wesentlichen den Gehalt an Magnetit im Sediment (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Der Magnetit ist aufgrund seiner geringen Korngröße in der Feinfraktion angereichert. Es gibt unterschiedliche Quellen, die magnetische Trägerminerale in marine Sedimente eintragen können. Von Land her können die Abtragungsprodukte magnetithaltiger Gesteine ins Meer gelangen. Im Meer sind submariner Vulkanismus und magnetitproduzierende Bakterien eine wichtige Quelle. Suszeptibilitätsmessungen können folglich auch Rück-

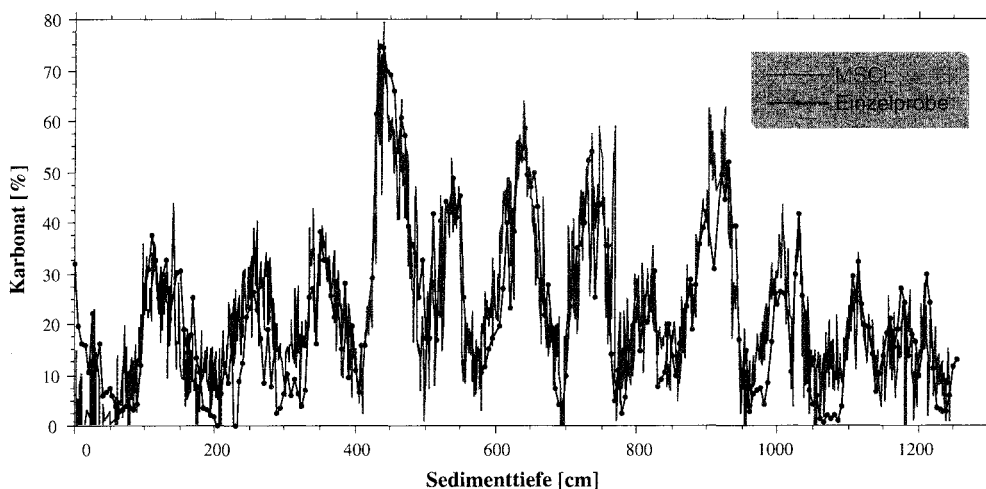


Abb. 7: Vergleich gemessener Karbonatgehalte einzelner Proben ($n = 250$) mit Karbonatgehalten, die aus Dichtemessungen des MSCL mit Hilfe der polynomialen Regression in Abb. 6 abgeleitet wurden ($n = 1250$). Die Übereinstimmung beider Datensätze ist sehr gut ($r = 0,96$). Das höhere Grundrauschen der MSCL-Daten ist auf die fünfmal höhere Meßdichte zurückzuführen.

Fig. 7: Comparison of measured carbonate content of individual samples ($n = 250$) with carbonate content determined from MSCL density measurements ($n = 1250$) using the polynomial regression curve in Fig. 6. The two data sets are in good agreement ($r = 0,96$). The noise level in the MSCL data is due to the much higher ($\times 5$) number of measurements.

Abb. 8:

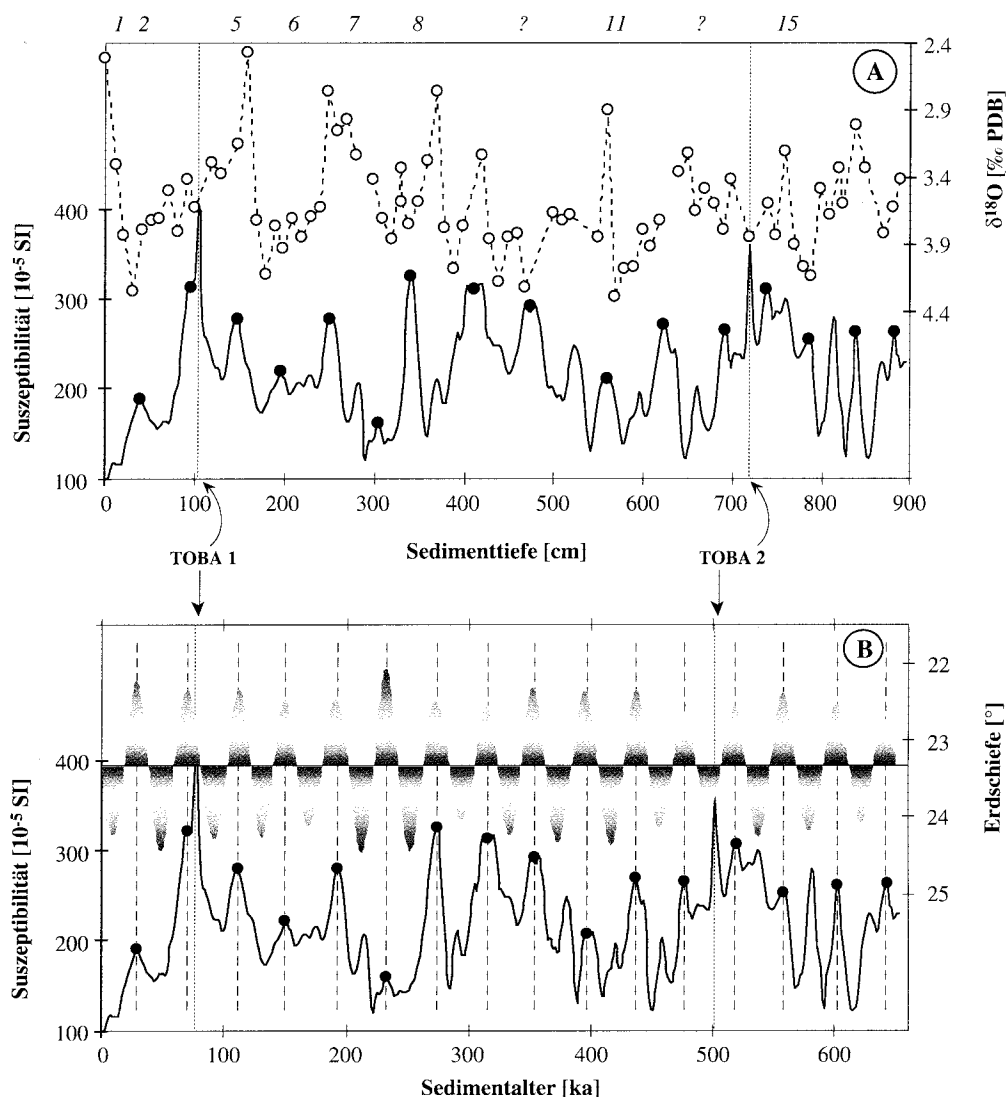
(A) Magnetische Suszeptibilitäten aus MSCL-Messungen und Sauerstoffisotopenwerte von *Cibicidoides wuellerstorfi* (kursiv geschriebene Zahlen beziehen sich auf Isotopenstadien) in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe im Sedimentkern 22KL (unterer Bengal-Fächer).

(B) Magnetische Suszeptibilitäten und Variationen der Erdschiefe nach BERGER (1978) dargestellt gegen Sedimentalter.

Fig. 8:

(A) Magnetic susceptibility measured with a MSCL and oxygen isotope values measured on *Cibicidoides wuellerstorfi* (numbers in italics indicate the isotope stages) vs. sediment depth in core 22KL (lower Bengal Fan).

(B) Magnetic susceptibility vs. sediment age ($\delta^{18}O$ ages calibrated on the basis of variations in the inclination of the earth's axis (BERGER 1978)). Using 16 fixed age points, this method provides good resolution with respect to time.



schlüsse auf mögliche Liefergebiete oder auch Transportmechanismen aufzeigen.

In den Sedimenten des Bengal-Fächers ist Magnetit in der terrigenen Feinfraktion angereichert. Die Gehalte sind somit von der Lithologie abhängig. Lithologische Variationen werden hier vor allem durch Glazial-Interglazialzyklen beeinflusst, die ihrerseits wiederum von dem zyklischen Verlauf der Erdbahnparameter gesteuert werden (Milankovitch-Theorie). Dieser zyklische Verlauf der orbitalen Parameter läßt sich für die jüngere geologische Vergangenheit anhand von Modellen zeitlich sehr präzise einstufen (z. B. BERGER 1978). Dadurch ist es – unter Voraussetzung einer kontinuierlichen Sedimentation – möglich, lithologische Variationen in Sedimenten orbital zu datieren. Der Vorteil solcher orbital kalibrierter Zeitreihen besteht in der hohen zeitlichen Auflösung (MIENERT & CHI 1995). Während der Fahrt 154 des Ozean Bohrprogramms (ODP) auf dem Ceará-Rücken (NW des Amazonas-Fächers) wurden z. B. mit Hilfe von Suszeptibilitätsdaten kontinuierliche Zeitreihen bis zum Mittleren Miozän erstellt und einzelne Bohrlöcher miteinander korreliert (CURRY et al. 1995).

Für den Bengal-Fächer wurde geprüft, ob die mit dem MSCL gemessenen Suszeptibilitätsschwankungen ebenfalls für die Erstellung von Zeitreihen geeignet sind. Dazu wurden die hemipelagischen Sedimente des Kerns 22KL aus dem unteren Fächerbereich gewählt (Abb. 8). Er liegt in 4420 m Wassertiefe auf einer leichten Erhebung außerhalb des direkten Einflußbereichs der aktiven Rinne. Er zeigt eine zyklische Wechsellagerung von tonigen Sedimenten mit höheren Suszeptibilitäten und tonig-siltigen Sedimenten mit niedrigeren Suszeptibilitäten. Um stratigraphische Informationen zu erhalten, wurde zunächst mit Hilfe von benthonischen Foraminiferen der Art *Cibicidoides wuellerstorfi* eine Sauerstoffisotopenstratigraphie erstellt (Abb. 8A). Danach sind die Isotopenstadien 1-8 relativ leicht zuzuordnen, während im älteren Kernbereich die Zuordnung nur bedingt möglich ist. Dies hängt damit zusammen, daß die Karbonaterhaltung im älteren Abschnitt schlechter ist, da die Kernposition zu dieser Zeit vermutlich unterhalb der Karbonatkompensationstiefe lag. Weitere stratigraphische Anhaltspunkte liefern zwei Aschenlagen, die die jüngsten Ausbrüche des Toba-Vulkans vor 75.000 und 500.000 Jahren (500 ka) dokumentieren (CHESNER et al. 1991).

Mit Hilfe der beiden Aschen-Alter sowie der Alter der Isotopenstadiengrenzen 1/2, (12 ka), 5/6 (128 ka) und 6/7 (186 ka) (Alter nach IMBRIE, HAYS et al. 1984) konnte ein erstes Altersmodell für den Kern 22KL erstellt werden. Eine Spektralanalyse der Suszeptibilitätskurve auf Basis dieser vorläufigen Altersskala zeigt, daß die größte spektrale Energie im 41.000 Jahresband der Erdschiefe steckt. Diese Erkenntnis wurde anschließend genutzt, um – innerhalb der Grenzen, die durch die o. g. Altersfixpunkte vorgegeben sind – die einzelnen Suszeptibilitätsmaxima in Abb. 8 an der Variation der Erdschiefe (nach BERGER, 1978) zu justieren. Dadurch konnte das Altersmodell für 22KL deutlich verbessert werden. Eine weitere Spektralanalyse dieser justierten Suszeptibilitätskurve zeigt zusätzliche spektrale Energie auf den 19.000 und 23.000 Jahresbändern der orbitalen Präzession. Diese Information wurde ebenfalls genutzt, um die Alters-Tiefenstruktur weiter zu verbessern.

Im Kern 22KL fällt das jeweilige Maximum der Suszeptibilität ohne Phasenverschiebung mit dem jeweiligen Minimum der Erdschiefe zusammen (Abb. 8). Dazwischenliegende Suszeptibilitätsminima zeigen höhere Korngrößen und höhere Dichten und zeugen somit von einer maximalen Fächeraktivität (Turbidit-sedimentation) während der maximalen Schiefstellung der Erdachse. Suszeptibilitätsmessungen können somit auch in einem Turbidit-Fächer für hochauflösende Altersmodelle genutzt werden.

Schlußfolgerungen und Zusammenfassung

Messungen mit dem MSCL liefern sedimentphysikalische Datensätze (Dichte, Schallwellengeschwindigkeit und magnetische Suszeptibilität) für wassergesättigte Sedimente in hoher Datendichte und sehr guter Qualität. Die Messungen sind zerstörungsfrei und erlauben eine quasi-kontinuierliche und vor allem rasche Bestimmung der o. g. Parameter an Sedimentkernen noch vor deren Öffnung und Beprobung. Die Daten liefern wichtige Hinweise zu Lithologie und Fazies.

Ein Vergleich von Sedimentdichten des MSCL mit denjenigen einzelner Proben zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Somit kann man die Parameter *Dichte*, *Wassergehalt* und *Porosität* aus der Absorption von Gammastrahlen ableiten und muß nicht mehr auf zeitaufwendige Untersuchungen von diskreten Proben zurückgreifen.

Unterschiedliche lithologische Merkmale lassen sich anhand eines Vergleichs von Dichte und Schallwellengeschwindigkeit erfassen. In terrigenen Sedimenten mit deutlichen Korngrößenunterschieden steigt die Dichte mit der Schallwellengeschwindigkeit, während sie in biogenen Sedimenten abnimmt. Hemipelagische Sedimente sowie terrigene Sedimente mit geringen Korngrößenunterschieden zeigen in Streudiagrammen eher punktförmige Anhäufungen.

Das Produkt aus Dichte und Schallwellengeschwindigkeit, die *akustische Impedanz*, läßt sich in Sedimenten des Bengal-Fächers quantitativ in Beziehung zur Korngrößenverteilung setzen. Dabei wurde die empirische Beziehung von Tongehalten diskreter Proben zu akustischer Impedanz der MSCL-Messungen genutzt, um Sand/Silt-Ton-Verhältnisse in Sedimentkernen des oberen Bengal-Fächers sowie auf dem Schelf vor Bangladesch indirekt zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der limitierenden Faktoren – in diesem

Fall der Karbonatgehalte – erweist sich dieser Ansatz als rascher und kostengünstiger Weg, das jeweilige sedimentäre Inventar zu quantifizieren.

In den biogenen Sedimenten des Peru-Beckens ist die detaillierte Kenntnis der Karbonatgehalte von Bedeutung für den Tiefsee-Umweltschutz sowie für paläoklimatische Studien. Hier konnte eine empirische Beziehung genutzt werden, um aus Sedimentdichten des MSCL Karbonatgehalte quantitativ abzuleiten. Der Vorteil dieser Methode liegt vor allem darin, daß die abgeleiteten Karbonatgehalte in einem sehr engen Meßabstand vorliegen, der mit konventionellen Meßmethoden nur mit hohem Aufwand zu erreichen wäre.

Für paläoklimatische Untersuchungen an marinen Sedimenten sind detaillierte stratigraphische Informationen unerlässlich. Anhand eines Vergleichs der mit dem MSCL gemessenen Variation der Suszeptibilität mit der Variation der Erdschiefe konnte für einen Sedimentkern aus dem unteren Bengal-Fächer ein hochauflösendes Altersmodell für die letzten 650.000 Jahre erstellt werden. Orbital kalibrierte Zeitreihen liefern innerhalb des Quartärs, ebenso wie isotopisch kalibrierte, die beste zeitliche Auflösung.

Danksagung

D. Steinmann, M. Müller, A. Borgard, A. Sanders und T. Bruns führten MSCL-Messungen an Bord der deutschen Forschungsschiffe SONNE und POLARSTERN durch. F. Niessen und G. Kuhn stellten MSCL-Daten des Kerns PS2567 zur Verfügung. H. Erlenkeuser lieferte Isotopendaten. All den o. g. Kollegen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Der Autor wurde finanziell unterstützt durch das Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie (BMBF; 03 G 0093A) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG; Be 834/2).

Literatur

- BAREILLE, G., LABRACHERIE, M. & LABEYRIE, L. (1991): Biogenic Silica Accumulation Rate during the Holocene in the Southeastern Indian Ocean.– *Mar. Chem.*, **35/1**: 537–551; Amsterdam.
- BERGER, A.L. (1978): Long Term Variations of Daily Insolation and Quaternary Climatic Changes.– *J. Atm. Sci.*, **35**: 2362–2367; Boston.
- BREITZKE, M. & SPIEB, V. (1993): An Automated Full Waveform Logging System for High-Resolution p-Wave Profiles in Marine Sediments.– *Mar. Geophys. Res.*, **15**: 297–321; Dordrecht.
- BURGER, H.R., (1992): Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface.– 489 S.; Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- CHESNER, C.A., ROSE, W.I., DEINO, A., DRAKE, R. & WESTGATE, J.A. (1991): Eruptive History of Earth's Largest Quaternary Caldera (Toba, Indonesia) Clarified.– *Geology*, **19**: 200–203; Boulder.
- CURRY, W.B., SHACKLETON, N.J., RICHTER, C. (Hsg) (1995): Proc. ODP, Init. Repts., **154**: 1111 S.; College Station, Texas.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. (1957): Brazos River Bar, a Study in the Significance of Grain-Size Parameters.– *J. Sediment. Petrol.*, **27**: 3–27; Lawrence.
- HAYS, J.D., SAITO, T., OPDYKE, N.D. & BURCKLE, L.H. (1969): Pliocene-Pleistocene Sediments of the Equatorial Pacific: Their Paleomagnetic, Biostratigraphic, and Climatic Record.– *Geol. Soc. Am. Bull.*, **80**: 1481–1514; New York.
- HERBERT, T.D. & MAYER, L.A. (1991): Long Climatic Time Series from Sediment Physical Property Measurements.– *J. Sediment. Petrol.*, **61/7**: 1089–1108; Lawrence.
- HOLLER, P. (1985): Geotechnical Properties of Antarctic Deep Sea Sediments.– *Meteor. Forsch. Ergebn.*, **39**, C: 23–36; Kiel.

- IMBRIE, J., HAYS, J.D., MARTINSON, D.G., MCINTYRE, A., MIX, A.C., MORLEY, J.J., PISIAS, N.G., PRELL, W.L. & SHACKLETON, N.J. (1984): The Orbital Theory of Pleistocene Climate: Support from a Revised Chronology of the Marine $\delta^{18}\text{O}$ Record.– In: A.L. BERGER, J. IMBRIE, J.D. HAYS, G. KUGLA & B. SATZMANN (Hsg.): Milankovitch and Climate: 269–305; Dordrecht (Reidel).
- KLOSA, D. (1994): Eine rechnergestützte Methode zur Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes in Sedimenten und Böden.– Z. angew. Geol., **40/1**: 18–21; Hannover (BGR).
- MIENERT, J. & CHI, J. (1995): Astronomical Time-Scale for Physical Property Records from Quaternary Sediments of the Northern North Atlantic. Geol. Rundsch., **84**, 1: 67–88, Stuttgart.
- SHACKLETON, N.J., CROWHURST, S., HAGELBERG, T., PISIAS, N.G. & SCHNEIDER, D.A. (1995): A New Late Neogene Time Scale: Application to Leg 138 Sites.– In: N.G. PISIAS, L.A. MAYER, T.R. JANECEK et al. (Hsg.).– Proc. ODP, Sci. Res., **138**: 73–101; College Station, Texas.
- THOMPSON, R. & OLDFIELD, F. (1986): Environmental Magnetism, 244 S.; London (Allen and Unwin).
- WEAVER, P.P.E. & SCHULTHEISS, P.J. (1990): Current Methods for Obtaining, Logging and Splitting Marine Sediment Cores.– Mar. Geophys. Res., **12**: 85–100; Dordrecht.
- WEBER, M.E. (1992): Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres.– Antarktis. Ber. Polarforsch., **109**: 165 S.; Bremerhaven.
- , WIEDICKE, M., RIECH, V. & ERLLENKEUSER, H. (1995): Carbonate Preservation History in the Peru Basin: Paleooceanographic Implications.– Paleooceanography, **10/4**: 775–800; Washington D.C.
- , NIESSEN, F., KUHN, G. & WIEDICKE, M. (1997): Calibration and Application of Marine Sedimentary Physical Properties Using a Multi-Sensor Core Logger.– Mar. Geol., **136**, **3/4**: 151–172; Amsterdam.

Eingang des Manuskripts: 2. 12. 1996