

**Titel:** ALPAKKA (zeitliche Variationen im Auftriebsgeschehen und El-Niño-Ereignisse vor Peru: Auswirkungen und Überlieferung kurzfristiger Klimaschwankungen)

**Schwerpunkte:** Hochauflösende Klimarekonstruktionen an laminierten Sedimenten, Erfassung von El-Niño-Ereignissen, Veränderungen in der Auftriebsintensität und -produktivität

**Projektleiter:** Prof. Dr. Wolf-Christian Dullo

**Mitarbeiterin:** Dipl. Geol. Anja Wolf

Geomar Forschungszentrum für marine Geowissenschaften,  
Wischhofstr. 1 – 3, 24148 Kiel

**Förderkennzeichen:** KZ G0147A

## 1. Einleitung

Entlang der Westküsten der Kontinente kommt es infolge atmosphärischer und ozeanischer Zirkulationsmuster zu Upwelling-Prozessen, einem Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers in den küstennahen Zonen (SMITH 1983). Der resultierende Nährstoffreichtum im Oberflächenwasser und die damit verbundene erhöhte Bioproduktion sorgen für hohe Sedimentationsraten organischen Materials am Meeresboden. Zeitliche und räumliche Schwankungen in der Intensität und Produktivität des Küstenauftriebs werden in den abgelagerten Sedimenten archiviert.

Eines der produktivsten Auftriebsgebiete unserer Erde ist heute vor Peru zu finden. Die der Küste vorlagernden Forearc-Becken (THORNBURG & KULM 1981) bieten hier optimale Voraussetzungen für eine geschützte Sedimentation und somit für eine ungestörte Überlieferung des Upwelling-Signals. Zudem grenzt die Ausbildung einer Sauerstoffminimumzone (OMZ, *oxygen minimum zone*), die lokal von 50 m bis zu 650 m Wassertiefe reicht (CTD-Messungen, LÜCKGE & REINHARDT 2000), benthische Aktivitäten am Meeresboden und Bioturbationen stark ein. Die ausgeprägte Lamination der abgelagerten Sedimente blieb somit erhalten – ideale Voraussetzung für hochauflösende stratigraphische Untersuchungen.

### 1.1 Zielsetzung

In dem seit April 2000 geförderten Forschungsvorhaben ALPAKKA stand die Erfassung zeitlicher Variationen im Auftriebsgeschehen vor Peru im Mittelpunkt der Arbeiten. Die Auswirkungen kurzfristiger Klimaschwankungen auf die Upwelling-Prozesse sollten beleuchtet und speziell die Überlieferung von El-Niño-Signalen in den Sedimenten untersucht werden.

## 2. Untersuchungen und Ergebnisse

### 2.1 Material

Das Untersuchungsmaterial entstammt der peruanischen Auftriebsfazies, die während der SONNE-147-Fahrt im Mai bis Juli 2000 erfolgreich beprobt werden konnte (KUDRASS 2000). Aus dem umfangreichen Probenmaterial wurden drei Sedimentkerne ausgewählt, welche für die gesetzte Fragestellung am besten geeignet schienen. Ihre Stationspunkte bilden einen Transekt vom küstennahen Bereich über den Schelf hin zum oberen Teil des Kontinentalhangs: SO147-4SL aus 96 m, SO147-106KL aus 184 m und SO147-41SL aus 587 m Wassertiefe. Mit Teufen von 18,75 m (106KL), 9,75 m (4SL) bzw. 8,90 m (41SL) stellen diese gleichzeitig die längsten erbohrten Sedimentsequenzen dar. Die Lithologie der Kerne ist in DULLO et al. (2000) schematisch beschrieben. Für die geochemischen und sedimentologischen Untersuchungen wurden die Sedimentkerne aller 5 cm beprobt.

### 2.2 Analysen

Die anschliessenden Laboranalysen umfassten sedimentologische Arbeiten (Korngrössenzusammensetzung), geochemische Untersuchungen (Bestimmung von TC-, TOC-, N-, Karbonat-, Opal- bzw. Chlorin-Konzentrationen) sowie Messungen stabiler Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotope in Kalkschalen benthischer Foraminiferen (*Bolivina seminuda*). Schwankungen in den Konzentrationen lassen deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Ablagerungen erkennen und weisen auf veränderte Sedimentationsbedingungen hin. Diese sind mit Variationen der Auftriebintensität bzw. -produktivität verbunden, können aber auch postsedimentäre Umlagerungen und Erosionen infolge verstärkter Bodenströmungen oder erhöhten Terrigeneintrag durch ansteigende Humidität bzw. Aridität an Land widerspiegeln.

Um die Relevanz und Zuverlässigkeit der gemessenen Gehalte und ihre Aussagekraft als Paläoproduktivitätsproxies zu überprüfen, wurden zusätzlich zu den Sedimentkernen alle zur Verfügung stehenden Oberflächenproben der SO147-Fahrt auf ihre Zusammensetzung untersucht. Anhand von Sedimentverteilungskarten konnten so auch typische Sedimentationsmuster im küstennahen Auftriebsgebiet vor Peru erfasst werden: Für die graphische Darstellung mussten aus dem Stichprobenumfang  $n$  von 26 Oberflächenproben eine Klassenanzahl  $k$  ( $k = \sqrt{n}$ ) berechnet und anhand der Minimal- und Maximalwerte eine individuelle Klassenbreite für jedes Merkmal festgelegt werden. Nach Einstufung der einzelnen Messwerte in die jeweiligen Klassen wurden diese den Stationspunkten der Beprobungskarte zugeordnet (Abb. 1).

Es zeigt sich, dass sowohl *TOC*-, *N*-, *Opal*- und *Chlorinkonzentrationen* die Bioproduktivität im Oberflächenwasser widerspiegeln und somit eine Rekonstruktion der Paläo-Intensität des Küstenauftriebs erlauben. Abweichungen in den Korrelationen der Proxies resultieren aus Verdünnungseffekten bzw. unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der organischen Partikel. So werden beispielsweise die opalinen Skelette der Diatomeen aufgrund ihrer hohen Sinkgeschwindigkeiten konzentriert im inneren Schelfbereich, unmittelbar unterhalb der hochproduktiven Auftriebszelle abgelagert (hohe Opalgehalte der Sedimente). Die feinen Partikel organischen Materials (*TOC*-Konzentrationen) verbleiben hingegen länger in Suspension und können von vorherrschenden Wasserströmungen weitertransportiert werden. In den Sedimentkernen zeigt sich der gemessene *TOC*-Gehalt als repräsentativster Paläoproduktivitätsproxy, da er die höchste zeitliche Auflösung bietet.

Mit Hilfe von AMS *14C*-Messungen war es möglich, einzelne ausgewählte Sedimentlagen zu datieren und Altersmodelle für die untersuchten Kerne zu erarbeiten. Bei den Altersangaben (in Kalenderjahren, *cal ka BP*) wurde ein Reservoireffekt von 800 Jahren (persönl. Mitteilung, REIN) berücksichtigt. Für eine genauere stratigraphische Einordnung der Sedimentsequenzen, speziell in älteren Zeitabschnitten (> 50000 Jahre), wurden die gemessenen Sauerstoffisotopenwerte (*SO147-106KL*) bzw. *TOC*-Gehalte (*SO147-4SL*, *41SL*) mit bekannten Referenzkurven (JOUZEL et al. 1993, 1996; BONNEFILLE & CHALIÉ 2000) korreliert. Wo  $\delta^{18}O$ -Messungen nur unzureichende Ergebnisse lieferten, wurden die sich analog verhaltenden *TOC*-Gehalte benutzt. Hohe *TOC*-Werte stehen dabei für erhöhte Auftriebsproduktivität und -intensität während kälterer Phasen (schwere  $\delta^{18}O$ -Werte).

Für den Kern *SO147-106KL* wurde von Rein & Sirocko (unveröffentl. Daten) ein zuverlässiges Altersmodell für die obersten 9,5 m erarbeitet, d.h. für einen Zeitabschnitt bis 17,5 *cal ka BP*. In tieferliegenden Bereichen wird die Abfolge feinlaminiertes Diatomeenschlammes von gröberen Schilllagen unterbrochen, die als Relikte glazialer Zeiten zu interpretieren sind und grosse Sedimentationslücken markieren. Die verbliebenen Sedimentsequenzen des Kerns stammen aus den MIS-Stadien 1, 2, 5a und 5e, seine Basis liegt bei 133,0 *cal ka BP*.

Im Kern *SO147-4SL* sind Sedimente des Holozäns aufgeschlossen, die einen Zeitbereich von 0,4 bis 11,7 *cal ka BP* umfassen.

Von Kern *SO147-41SL* wurden ausschließlich die obersten 6 Meter betrachtet, da nur in diesem Bereich das Paläoproduktivitätssignal in feinlaminierten Diatomeenschlammes archiviert ist. Die untersuchte Sedimentsequenz grenzt einen Zeitbereich von 19,0 bis 26,0 *cal ka BP* ein und ermöglicht eine Rekonstruktion der Auftriebsintensität für das *Letzte Glaziale Maximum* – einer Zeitscheibe, die in den beiden anderen Kernen nicht erhalten blieb.

(1996) bzw. SONNE-76-Paket (DULLO 1992, BIRLOW 1996) lassen folgenden Schluss zu: Im Zeitbereich ist die Überlieferung des Upwelling-Signals auf interglaziale Zeiten be-

### 2.3 Zeitliche Variationen im Auftriebsgeschehen vor Peru

Abb. 2 zeigt zusammenfassend die gemessenen TOC-Konzentrationen in den Kernen 4SL, 106KL und 41SL als Maß der biologischen Produktivität in den verschiedenen Zeitabschnitten. Über Spektralanalysen (*Blackman-Tukey, high resolution level*) konnten periodisch auftretende Schwankungen in den Zeitreihen erfasst werden. Auffallende Zyklen der Auftriebsproduktivität liegen bei 11,8ka, 9ka, 6ka, 4,7ka, 2,3ka, 1,5ka, 1,1 – 1,2ka. Vergleichbare Perioden wurden u. a. in Tiefseekernen des äquatorialen Pazifiks und Atlantiks (10 – 12ka, HAGELBERG et al. 1994), im Indischen Ozean (4,6ka und 2,3ka, PESTIAUX et al. 1988), Oman-Graben (2,3ka, NAIDU & MALMGREN 1995), im Auftriebsgebiet vor W-Afrika (1150a – 1280a, EGLINTON et al. 1992), in Tiefseekernen aus dem Arabischen Meer (1450a und 1150a, SIROCKO et al. 1996), im Südosten der Vereinigten Staaten (1224a und 1425a, GRIMM et al. 1993), im Camp-Century-Eiskern von Grönland (1150a und 1450a, DANSGAARD et al. 1984), im GISP2-Eiskern (1050a, STUIVER et al. 1995) sowie im  $^{14}\text{C}$ -Budget der Atmosphäre (2,3 ka, STUIVER et al. 1991) nachgewiesen. Die Variationen in der Produktivität und Intensität des peruanischen Küstenauftriebs, reflektiert durch Schwankungen in den TOC-Konzentrationen der Sedimente, sind somit eindeutig an Oszillationen im globalen Klimasystem gekoppelt.

Um die Auswirkung und Überlieferung sehr kurzfristiger Klimaschwankungen wie El-Niño-Ereignisse zu untersuchen, reichte die zeitliche Auflösung der bisherigen Analysen nicht aus. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Sedimentabschnitt mit sehr hoher Sedimentationsrate ausgewählt (holozäne Ablagerungen des SO147-106KL) und aller 0,5 cm neu beprobt. Die 1,20 m lange Sequenz überdeckt einen Zeitabschnitt von 1,29 bis 1,86 cal ka BP. Bei 240 Proben bedeutet dies eine zeitliche Auflösung von 2,3 Jahren. Unterzieht man die gemessenen Paläoproduktivitätsproxies (TOC-, Opal- und Chlorin-Konzentrationen) einer Spektralanalyse (*Blackman-Tukey, high resolution level*), so werden in den Zeitreihen übereinstimmende Perioden sichtbar: 140 – 149a, 35 – 39a, 20 – 21a, 13a, 5 – 7a. Letztgenannte markiert eindeutig die Überlieferung des El-Niño-Signals in den peruanischen Auftriebssedimenten. Zu welchen Zeiten die einzelnen Zyklen besonders stark ausgeprägt waren, soll mit Hilfe von Wavelet-Analysen noch geklärt werden.

## 3. Fazit

### 3.1 Glazial-Interglazial-Wechsel in der Auftriebsintensität

Die Ergebnisse und deren Vergleich mit älteren Daten der WECOMA-7706- (REIMERS & SUESS 1983b) bzw. SONNE-78-Fahrt (DULLO 1992, BIEBOW 1996) lassen folgenden Schluß zu: Im Schelfbereich ist die Überlieferung des Upwelling-Signals auf interglaziale Zeiten be-

schränkt (SO147-106KL), in SO147-4SL speziell auf holozäne Sedimente. In Kaltzeiten bewirkte der Rückgang des Meeresspiegels (bis 120m im *Letzten Glazialen Maximum*) eine seewärtige Verlagerung der Auftriebszelle (BIEBOW 1996), eine verstärkte Erosion durch Boden- und Oberflächenwasserströmungen, einen erhöhten Eintrag terrigenen Materials bzw. eine gänzliche Trockenlegung der küstennahen Gebiete.

Die Sedimente des Kerns SO147-41SL aus einem tiefer gelegenen Bereich des Kontinentalhangs liefern Zeugnis für die seewärtige Verlagerung der Auftriebszelle während des *Letzten Glazialen Maximums*. Die feinlaminierten Sedimente des Kerns stellen Ablagerungen im Einflußbereich der OMZ dar. Die gemessenen Konzentrationen von TOC, Opal und Chlorinen sind jedoch relativ gering. Im Vergleich zu den Werten der Oberflächenproben aus dem heutigen Zentrum der Auftriebszelle, zwischen 9°S und 14°S, spricht dies für Ablagerung im *Randbereich der Hochproduktionszone*. Wie bereits in BIEBOW (1996) beschrieben, wird eine südliche Verlagerung der Auftriebszelle während des LGM infolge Verschiebungen der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ, *innertropical convergence zone*) postuliert.

Die Intensität des Küstenauftriebs ist also nicht primär an Glazial- bzw. Interglazial-Zeiten gebunden, vielmehr wird das Produktivitätssignal von Schwankungen des Meeresspiegels (ROMINE & MOORE 1981) bzw. Verschiebungen der Innertropischen Konvergenzzone überlagert.

### 3.2 Kurzskaligere Klimaschwankungen

Von rezenten Beobachtungen ist bekannt, dass die Produktivität des peruanischen Küstenauftriebs stark von klimatischen Schwankungen beeinflusst wird. Speziell die aller 4 – 8 Jahre auftretenden El-Niño-Ereignisse, in denen es zu einem Eindringen anormal warmer Wassermassen entlang der Küsten Südamerikas kommt, sorgen für eine stark reduzierte Produktivität im Auftriebsgebiet. In den Untersuchungen der vorliegenden Studie konnten Verknüpfungen zwischen globalen Klimaveränderungen und Variationen im peruanischen Küstenauftrieb hergestellt werden. In den hochauflösenden Zeitreihen verschiedener Proxieparameter wurden solar gesteuerte Produktivitätsschwankungen mit Perioden um 11,8ka, 4,7ka, 2,3ka, 1,5ka, 1,1 – 1,2ka deutlich, ebenso wie kurzskalige El-Niño-Signale im 5- bis 7-Jahres-Zyklus.

## Literatur

- BIEBOW, N. (1996): Dinoflagellatenzysten als Indikatoren der spät- und postglazialen Entwicklung des Auftriebsgeschehens vor Peru. GEOMAR Reports 57, 100 pp.
- BONNEFILLE, R. & CHALIÉ, F. (2000): Pollen-inferred precipitation time-series from Equatorial Mountains, Africa, the last 40 kyr BP. *Global and Planetary Change*, 26, 25-50.
- DANSGAARD, W. et al. (1984): North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In: J. E. Hansen & T. Takahashi (eds.), *Climate Processes and Climate Sensitivity*, Geophys. Monogr. 29, Vol. 5, American Geophysical Union, Washington DC., 288-298.
- DULLO, W.-Chr. (1992): SESAK, In: E. SUESS. FS-Sonne - Fahrtbericht SO 78 Peruvent: Balboa, Panama - Balboa, Panama, 28.2.1992 - 16.4.1992. GEOMAR Reports 14, 101-104.
- DULLO, W.-Chr. et al. (2000): Core descriptions and reflectance spectra. In: H. R. KUDRASS, FS-Sonne - Fahrtbericht SO 147 Peru-Auftrieb: Valparaiso - Callao, 29.05.2000 - 03.07.2000, BGR Hannover, 102-119.
- EGLINTON, G. et al. (1992): Molecular record of secular sea surface temperature changes on 100-year timescales for glacial terminations I, II, and IV. *Nature*, 356, 423-426.
- GRIMM, E. C. et al. (1993): A 50,000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with Heinrich events, *Science*, 261, 198-200.
- HAGELBERG, T. K. et al. (1994): Milankovitch forcing of millennial scale climatic variability during the Pleistocene. *Paleoceanography*, 9, 4, 545-558.
- JOUZEL, J. et al. (1993): Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, 364, 407-412.
- JOUZEL, J. et al. (1996): Climatic interpretation of the recently extended Vostok ice records. *Clim. Dyn.*, 12, 513-521.
- KUDRASS, H. R. (2000): FS-Sonne - Fahrtbericht SO 147 Peru-Auftrieb: Valparaiso - Callao, 29.05.2000 - 03.07.2000. BGR Hannover.
- LÜCKGE & REINHARDT (2000): CTD measurements in the water column off Peru. In: H. R. KUDRASS, FS-Sonne - Fahrtbericht SO 147 Peru-Auftrieb: Valparaiso - Callao, 29.05.2000 - 03.07.2000, BGR Hannover, 35-37.
- NAIDU, P. D. & MALMGREN, B. A. (1995): A 2,200 years periodicity in the Asian monsoon system. *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2361-2364.
- PESTIAUX, P. et al. (1988): Paleoclimatic variability at frequencies ranging from 1 cycle per 10,000 years to 1 cycle per 1,000 years: evidence for nonlinear behaviour of the climate system. *Clim. Change*, 12, 9-37.
- REIMERS, C. E. & SUESS, E. (1983b): Spatial and temporal patterns of organic matter accumulation on the Peru continental margin. In: J. Thiede and E. Suess. *Coastal upwelling, ist*

Sediment Record Part B: Sedimentary records of ancient coastal upwelling. Plenum Press, NY, London, 311-337.

REIN, B. & SIROCKO, F., unveröffentl. Daten

ROMINE, K., MOORE, T. C. (1981): Radiolarian distributions and paleoceanography of the eastern Equatorial Pacific Ocean during the last 127,000 years. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 35, 281-314.

SIROCKO, F. et al. (1996): Teleconnections Between the Subtropical Monsoons and High-Latitude Climates During the Last Deglaciation. *Science*, 272, 526-529.

SMITH, R. L. (1983): Circulation patterns in upwelling regimes. – In: E. Suess, J. Thiede, (eds.): Coastal upwelling – its sediment record, Part A: Responses of the Sedimentary Regime to Present Coastal Upwelling, Plenum Press, New York, 1983, 13-35.

STUIVER, M. et al. (1991): Climatic, Solar, Oceanic, and Geomagnetic Influences on Late-Glacial and Holocene Atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  Change. *Quat. Res.*, 35, 1-24.

STUIVER, M. et al. (1995): The GISP2 Delta 18-O climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes. *Quat. Res.*, 44, 341.

THORNBURG, T., KULM, L. D. (1981): Sedimentary basins of the Peru continental margin: structure, stratigraphy, and Cenozoic tectonics from 6°S to 16°S latitude. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 154, 393-422.

Kiel, den 01.10.2002

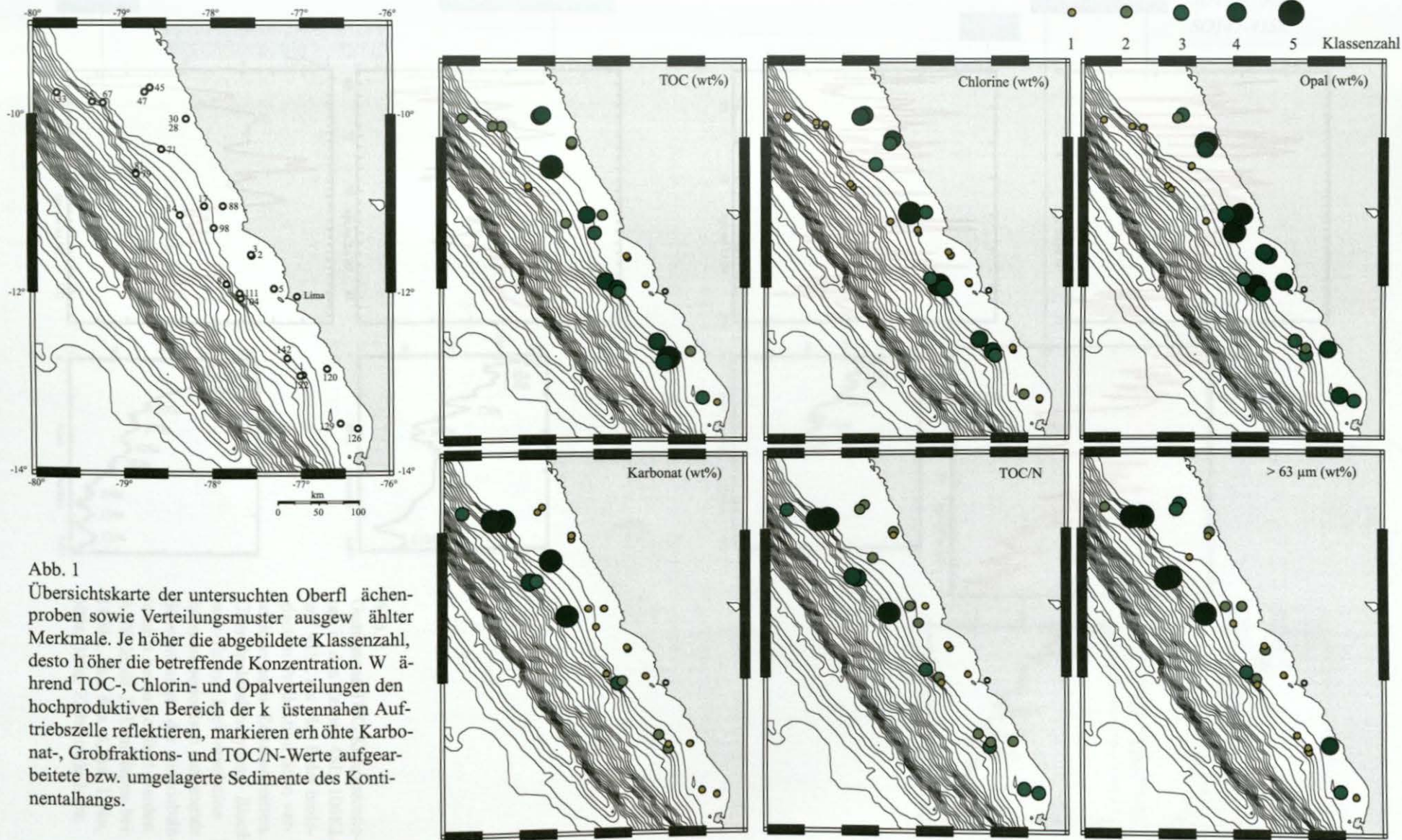


Abb. 1  
 Übersichtskarte der untersuchten Oberfl ächenproben sowie Verteilungsmuster ausgew ählter Merkmale. Je h öher die abgebildete Klassenzahl, desto h öher die betreffende Konzentration. W ährend TOC-, Chlorin- und Opalverteilungen den hochproduktiven Bereich der k üstennahen Auftriebszelle reflektieren, markieren erh öhte Karbonat-, Grobfractions- und TOC/N-Werte aufgearbeitete bzw. umgelagerte Sedimente des Kontinentalhangs.



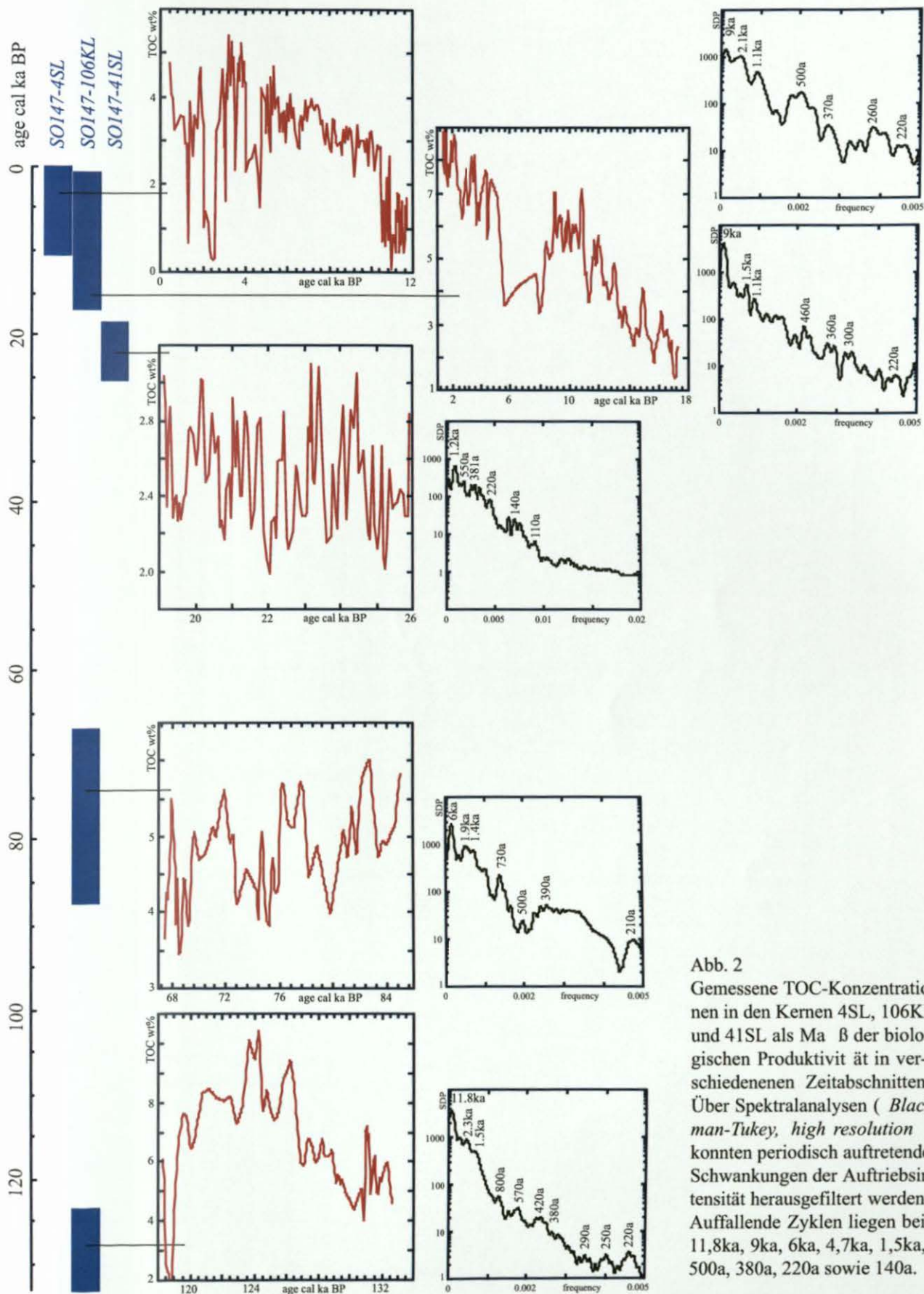


Abb. 2

Gemessene TOC-Konzentrationen in den Kernen 4SL, 106KL und 41SL als Maß der biologischen Produktivität in verschiedenen Zeitabschnitten. Über Spektralanalysen (*Blackman-Tukey, high resolution*) konnten periodisch auftretende Schwankungen der Auftriebsintensität herausgefiltert werden. Auffallende Zyklen liegen bei 11,8ka, 9ka, 6ka, 4,7ka, 1,5ka, 500a, 380a, 220a sowie 140a.