

BMBF Verbundprojekt JGOFS-Indik

Quantifizierung und Modellierung des Umsatzes
von Kohlenstoff und assoziierten Elementen im
Arabischen Meer

Koordination

Abschlussbericht

1.1 BMBF/BEO 03 F 0241 A
01.03.2001 – 28.02.2003

Antragsteller: Prof. Dr. V. Ittekkot
Zentrum für Marine Tropenökologie
Fahrenheitstr. 6
28359 Bremen

Das Verbundprojekt JGOFS Indik wurde vom 1.1.1995 bis zum 28.02.2003 vom BMBF gefördert und ist ein deutscher Beitrag zum internationalen JGOFS, das sich zum Ziel gesetzt hat, die Bedeutung der marinen Biosphäre für die CO₂-Aufnahme des Ozeans zu untersuchen. Das Arabische Meer wurde von der Internationalen Forschergemeinschaft als eine der Regionen des Ozean ausgesucht, in denen gezielte national und international koordinierte Felduntersuchungen durchgeführt werden sollten. Die Gründe für die Wahl des Untersuchungsgebiets waren die bereits bekannte Abhängigkeit biogeochemischer Prozesse vom Monsun, die ausgeprägte Sauerstoffminimumzone in den Tiefen des Arabischen Meers und sein hoher Staubeintrag. Im Unterschied zu anderen JGOFS-Studien stand neben dem CO₂ auch das Treibhausgas N₂O im Zentrum des Interesses des Verbundprojektes JGOFS Indik.

JGOFS Indik beinhaltete Teilprojekte zur Entwicklung und Auswertung von Fernerkundungsverfahren, Feldstudien zur Untersuchung und Quantifizierung von Schlüsselprozessen des marinen Kohlenstoff- und Stickstoffkreislaufs, Paläoprojekte und Zeitserienstudien zur Erfassung zeitlicher Variabilitäten und die Modellierung.

In der letzten Synthesephase (01.03.2001 - 28.02.2003) beinhaltete JGOFS Indik sieben Teilprojekte, die sich neben dem Datenmagment, mit dem Stickstoffkreislauf, dem Einfluss des Staubs auf die Partikeldynamik, dem Zooplankton, dem Partikelfluss und der Modellierung befassten. Der Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten lag allerdings auf der Modellierung und der Validierung der Modellergebnisse. Dafür mussten die nationalen und internationalen Daten der experimentell arbeitenden Gruppen zusammengefasst und in ihrer Gesamtheit interpretiert werden. Die im Rahmen von JGOFS erhobenen deutschen Daten wurden in das Dateninformationssystem PANGEA beim World Ocean Data Center (WDC-Mare) in Bremen eingespeist und somit auch der Öffentlichkeit über das Internet zur Verfügung gestellt.

Da JGOFS Indik den Auftrag hatte, Treibhausgasemissionen aus dem Arabischen Meer zu quantifizieren und herauszufinden, wie diese durch Variationen der Monsunstärke beeinflusst werden, haben wir uns in diesem Bericht auch auf die Beantwortung dieser Frage beschränkt. Die zahlreichen wichtigen Einzelergebnisse, ohne die wir nie soweit gekommen wären, sind in den beigefügten Berichten und Veröffentlichungen dargestellt.

Die im Rahmen von JGOFS Indik erhobenen Daten zeigen, dass bis zu 15% der globalen marinen N₂O-Emission aus dem Arabischen Meer kommen können, das selbst nur ca. 2% der Fläche des Ozeans ausmacht. Modellrechnungen zufolge variierten die N₂O-Emissionen aus dem Arabischen Meer während des letzten Jahrzent um ca. +/-10%.

Die CO₂-Emissionen variierten in den Jahren von 1984 bis 2001 ca. zwischen 37 und 73 10¹² g C Jahre⁻¹. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die CO₂ und N₂O-Emissionen mit ansteigender Monsunstärke zunehmen. Die quantitative Beziehung zwischen Monsunstärke und CO₂-Emissionen scheint sich aber Anfang der 90er Jahre geändert zu haben, wobei die ausgeprägteren ENSO-Jahre in den 90ern eine Ausnahme darstellten, bei der die Beziehung Monsunstärke/ CO₂-Emission jener der

80er Jahre ähnelt. Inwieweit eine solche Umstellungen mit ENSO oder anderen Klimaschwankungen zusammenhängt, muss Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

Trotz allgemein guter Übereinstimmungen zwischen Messungen und Modellergebnissen gibt es auch Abweichungen, die besonders auf den Schelfen deutlich wird. Inwieweit wir es hier mit bisher unzureichend berücksichtigten anthropogenen Einflüssen auf die biogeochemischen Kreisläufe zu tun haben, wird die zukünftige Forschung zeigen.

Ausgehend von den JGOFS-Erfahrungen ist kommenden Vorhaben zur Erforschung von Klimaveränderung zu raten, neben der Modellierung auch immer Langzeitbeobachtungen ausgewählter biogeochemischer Schlüsselparameter zu berücksichtigen, um die Modellergebnisse validieren zu können.

Die hier beschriebenen Ergebnisse sind in einfacher und bebildeter Form in der für JGOFS Indik erstellten Broschüre dargestellt, die diesem Bericht anhängt. Zudem wurde eine CD erstellt auf der sich eine interaktive Powerpoint-Präsentation befindet die das Projekt JGOFS Indik vorstellt und die erzielten Ergebnisse allgemeinverständlich darstellt.

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 3

Steuermechanismen der N₂O-Verteilung im Arabischen Meer

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Dr. T. Rixen*, Dr. H.W. Bange#, Dr. Habil. E. Maier-Reimer & Prof. Dr. V. Ittekkot*

*Zentrum für Marine Tropenökologie Fahrenheitstr. 6 28359, Bremen

#Institut für Meereskunde Kiel

Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Inhalt

Zusammenfassung	3 - 1
1 Einleitung	3 - 2
2 Ergebnisse	3 - 2
2.1 Datenanalyse	3 - 2
2.2 Regionale Modellierung	3 - 3
2.3 Globale Modellierung	3 - 4
3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung	3 - 5
4 Ausblick	3 - 5
5 Literatur / Anhang	3 - 5

Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes ist es, die Prozesse, die die die N₂O -Verteilung und Emission steuern, zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu wurden mehr als 2400 Daten ausgewertet und die daraus gewonnenen Erkenntnisse in regionale und globale Modelle eingebunden. Es zeigte sich, dass die N₂O-Produktion eng an die Nitrifikation in der Wassersäule und damit an die Exportproduktion gebunden ist. Entsprechend ist die N₂O-Emission am höchsten im Auftriebsgebiet vor Oman und dem hochproduktiven indischen Schelf. Im Jahresdurchschnitt können bis zu 15% der globalen marinen N₂O-Emissionen aus dem Arabischen Meer kommen. Die Modellergebnisse lassen vermuten, dass die interannuale Variation im letzten Jahrzehnt ca. +/-10% betrug. Des weiteren zeigt sich, dass gerade die Schelfe in den Modellen bisher noch nicht adäquat berücksichtigt worden sind.

1 Einleitung

Ziel dieses Projektes ist es, die Bildungs- und Abbauprozesse von N_2O in der Wassersäule des Arabischen Meeres zu untersuchen und die N_2O -Emissionen zu quantifizieren. Um diese Ziele zu erreichen, wurde der folgende Arbeitsplan im Antrag festgelegt:

- 1 Zusammenstellung und Auswertung aller verfügbaren N_2O -Messungen im Arabischen Meer
 - 1.1 Überprüfung der Datenqualität.
 - 1.2 Erstellung von N_2O -Feldern (Jahresmittelwerte, so weit wie möglich auch monatliche Felder).
 - 1.3 Interpolation der N_2O -Daten auf "Standard Depth Levels", um sie mit dem World Ocean Atlas 1998 und den US JGOFS-Daten vergleichen zu können.
 - 1.4 Durchführung einer Isopyknenanalyse mit N_2O , um herauszufinden, inwieweit Mischungsprozesse unterschiedlicher Wassermassen die Verteilung von N_2O in der Sauerstoffminimumzone bestimmen.
- 2 Modellierung der N_2O -Verteilung in der Wassersäule des Arabischen Meeres und Abgleich mit den N_2O -Feldern
 - 2.1 Durchführung von Sensitivitätsexperimenten zur Erforschung der Steuerungsmechanismen für die N_2O -Verteilung
- 3 Einbindung der im Arabischen Meer erforschten Prozesse in ein globales 3D-Modell, um die Allgemeingültigkeit dieser Prozesse zu bestätigen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf dem Vergleich mit ähnlichen Regionen z.B. dem tropischen Ostpazifik.

2 Ergebnisse

2.1 Datenanalyse

Die im Arbeitsplan unter Punkt 1 genannten Ergebnisse sind in Bange et al., (2001) publiziert und werden hier deshalb nur noch kurz zusammengefasst:

Im Rahmen des Projektes wurde alle verfügbaren N_2O -Daten zusammengetragen. Die daraus resultierende Datenbasis besteht jetzt aus mehr als 2400 Einzelmessungen. Damit weist das Arabische Meer die weltweit höchste N_2O -Datendichte auf. Trotz dieser hohen Datendichte ist die Ungenauigkeit der Abschätzung der durchschnittlichen jährlichen N_2O -Emission ($0,2-0,4 \text{ Tg N a}^{-1}$) immer noch relativ groß. Der Grund für diesen Fehler sind die Unsicherheiten der zahlreichen Parameter (z.B. Wassertemperatur, Salinität, Windgeschwindigkeit, Diffusion von N_2O , N_2O -Konzentration in der Atmosphäre, etc.), die zur Berechnung der saisonalen N_2O -Emissionen benötigt werden, sowie die bisher nur unzureichend parametrisierten

Gasaustauschmodelle und die geringe zeitliche und räumliche Abdeckung der Daten. Letzteres ist ein großes Problem, das im besondern Maße für die Schelfe gilt, die zu den bedeutendsten N_2O -Quellen zählen (siehe Abb. 1). Entsprechend der beschriebenen Probleme sind die Unsicherheiten der Abschätzung der globalen marinen N_2O -Emissionen erheblich größer. Sie variieren zwischen 1.3 und 11 Tg N a^{-1} (siehe Bange et al., eingereicht) und deuten darauf hin, dass bis zu 15% der marinen N_2O -Emissionen aus dem Arabischen Meer kommen könnten.

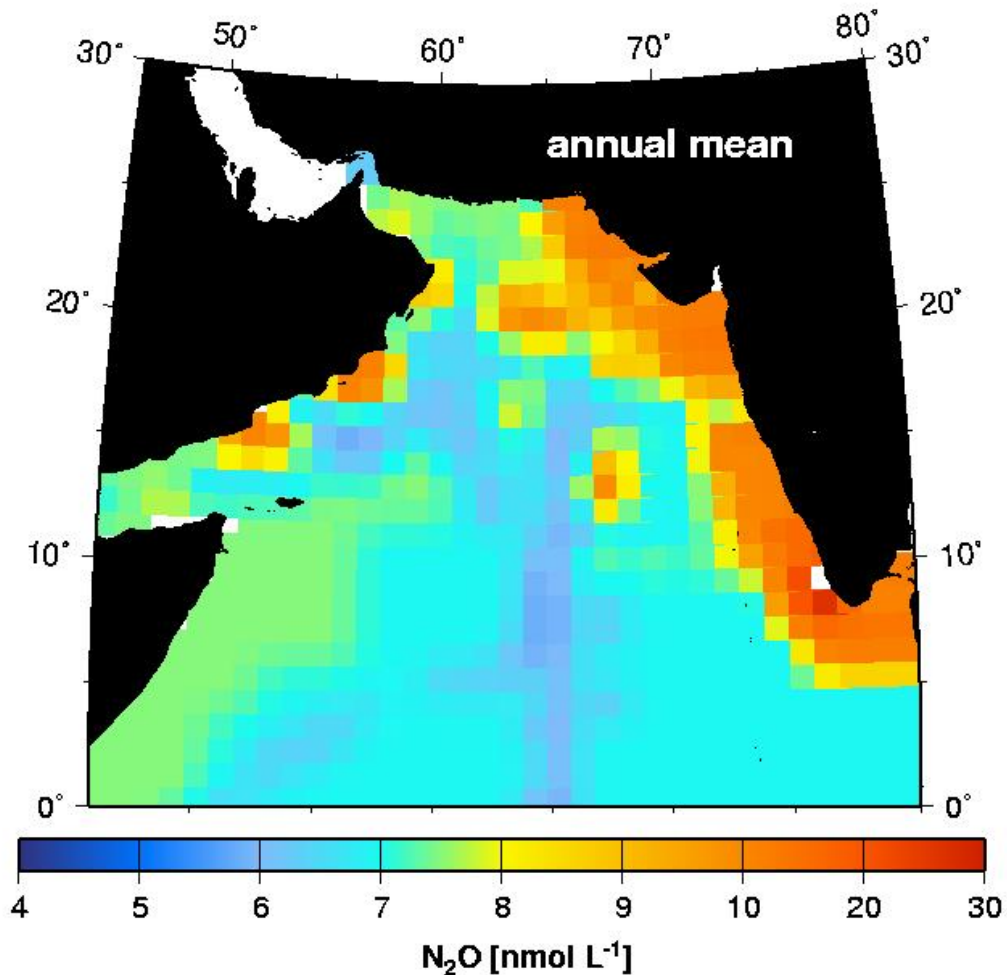


Abb. 1 Mittlere N_2O -Verteilung (Daten aus: [Bange et al., 2001])

2.2 Regionalmodellierung

Die unter Punkt 2 im Arbeitsplan genannten Arbeiten sind in Zusammenarbeit mit dem TP 16 durchgeführt worden. Nach eingehender Diskussion mit dem TP 16 sind wir zu der Überzeugung gelangt, dass die N_2O -Produktion in der Wassersäule im wesentlichen an die Nitrifikation gekoppelt ist. Die Bildung von N_2O bei der Denitrifikation wurde im Modell außer acht gelassen, da die Denitrifikation nur in der Sauerstoffminimumzone (OMZ) stattfindet, in der das gebildete N_2O gleich zu N_2

reduziert wird. Die Reduktion von N_2O in der OMZ führt zu einem N_2O -Minimum und somit zur Ausbildung einer Doppelpeakstruktur, die für die N_2O -Tiefenprofile des Arabischen Meeres charakteristisch ist (siehe Abb. 2).

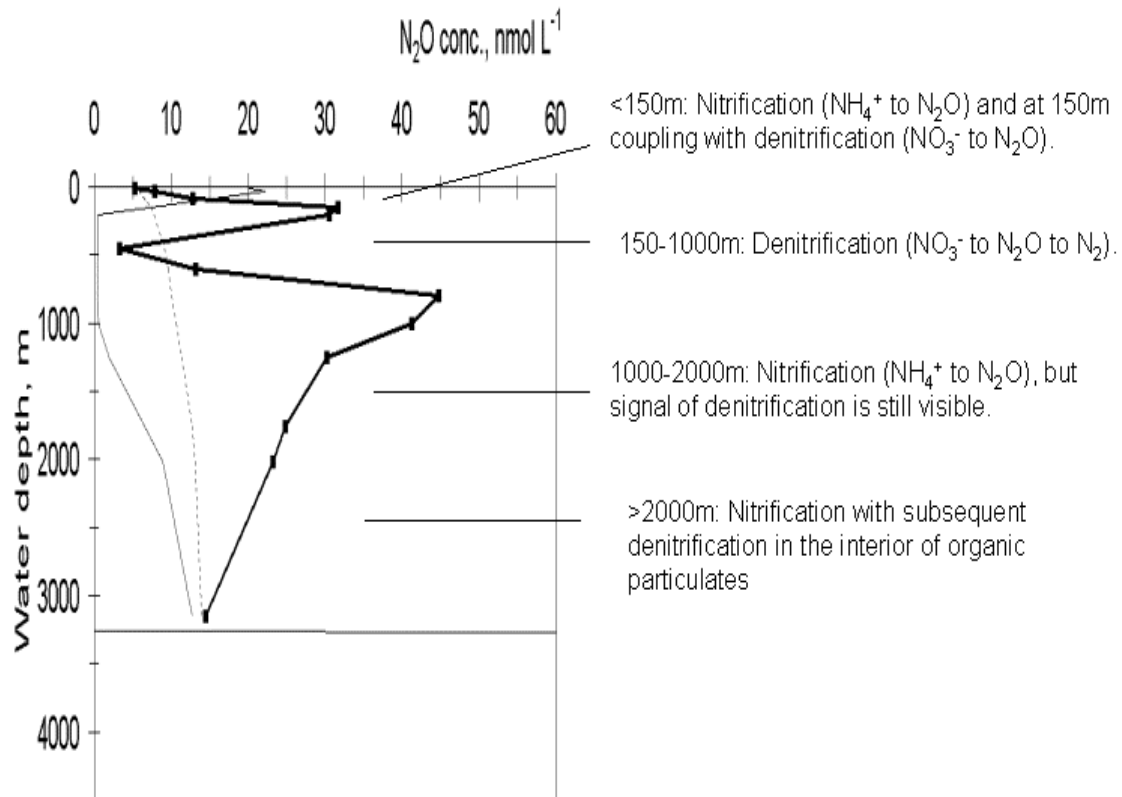


Abb. 2: Ein für das Arabische Meer typische N_2O -Tiefenverteilung. Die dünne graue Linie zeigt die Sauerstoffkonzentration und die gestrichelte dünne Linie die N_2O -Gleichgewichtskonzentration (aus: *Bange et al.*, eingereicht).

Aufgrund der engen Kopplung der N_2O -Produktion an die Nitrifikation zeigen die Modellergebnisse eine Korrelation zwischen dem Export von organischem Material in die Tiefsee mit der N_2O -Emission. Das ist konsistent mit den paläozeanographischen Ergebnissen, die z.B. geringere atmosphärische N_2O -Konzentrationen während des Glazials mit einer geringeren Produktivität im Arabischen Meer in Zusammenhang bringen [*Suthhof et al.*, 2001]. Im Unterschied zu den paläozeanographischen Arbeiten lassen die Modellergebnisse jedoch vermuten, dass nicht die Denitrifikation sondern die Nitrifikation die Produktivität mit der N_2O -Emission verbindet.

Die modellierte N_2O -Emission des Arabischen Meeres (siehe Abb. 3) ist mit $0.07 Tg N a^{-1}$ geringer als die N_2O -Emission die aus den Daten abgeschätzt wurde ($0.2 - 0.4 Tg N a^{-1}$). Der Grund ist vermutlich, dass die N_2O -Emission auf den Schelfen im Modell unterschätzt wird (vergleiche Abb. 1 und 3). In den Jahren von 1990 bis 2001 betrug die modellierte interannuale Variation der N_2O -Emission aus dem Arabischen Meer $\pm 10\%$.

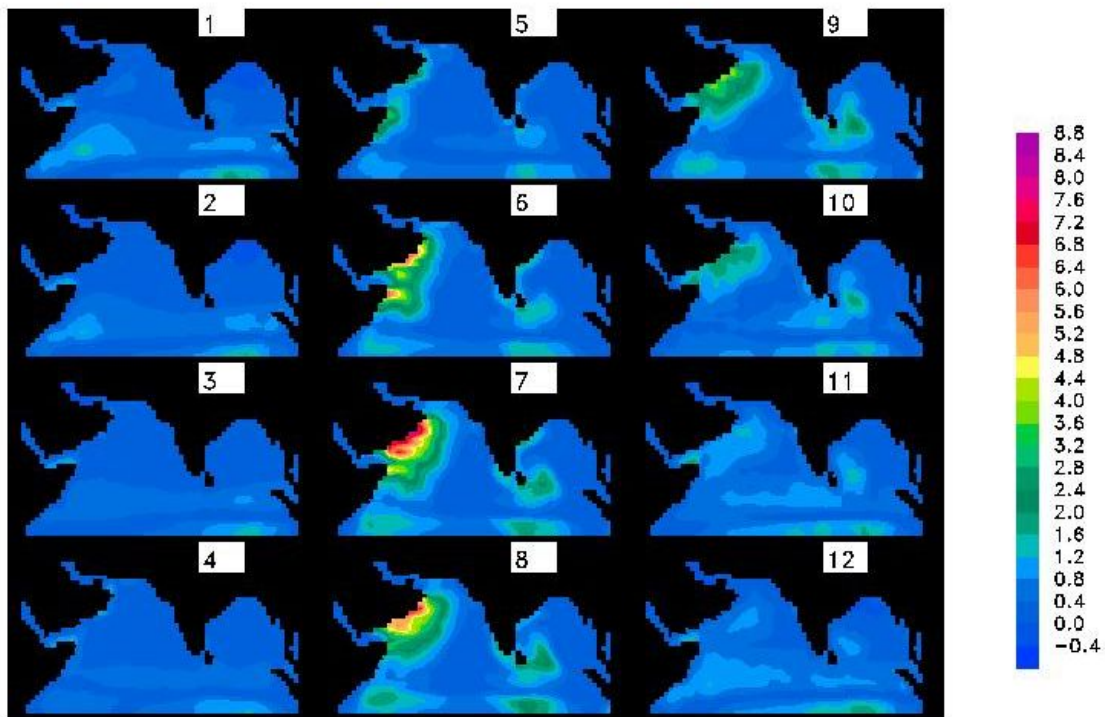


Abb. 3: Modellerte saisonale Variabilität der N₂O-Emissionen im Indischen Ozean.

2.3 Globale Modellierung

Die Erfahrungen aus dem Arabischen Meer flossen, wie beantragt, auch in die Entwicklung globaler Modelle ein. Die globalen Modellergebnisse zeigen, dass neben dem äquatorialen Pazifik und dem Arabischen Meer auch der nordwestliche Pazifik für die marinen N₂O-Emissionen von Bedeutung zu sein scheint. Die vom Modell berechnete globale N₂O-Emission beträgt 1,2 g N a⁻¹ und ist etwas geringer als die bisherigen Abschätzungen die wie bereits erwähnt zwischen 1.3 und 11 Tg N a⁻¹ liegen. Ähnlich wie bei der regionalen Modellierung könnte die Unterschätzung der N₂O-Emission auf den Schelfen zu der geringen N₂O-Emissionen des globalen Modells beitragen. Die Ergebnisse des regionalen und des globalen Modells implizieren, dass ca. 6 % der globalen marinen N₂O-Emission aus dem Arabischen Meer kommen. Das ist geringer als die Abschätzungen die anhand der N₂O-Messungen vorgenommen wurden. Die Gründe für diese Diskrepanz muss in nachfolgenden Forschungsvorhaben untersucht werden.

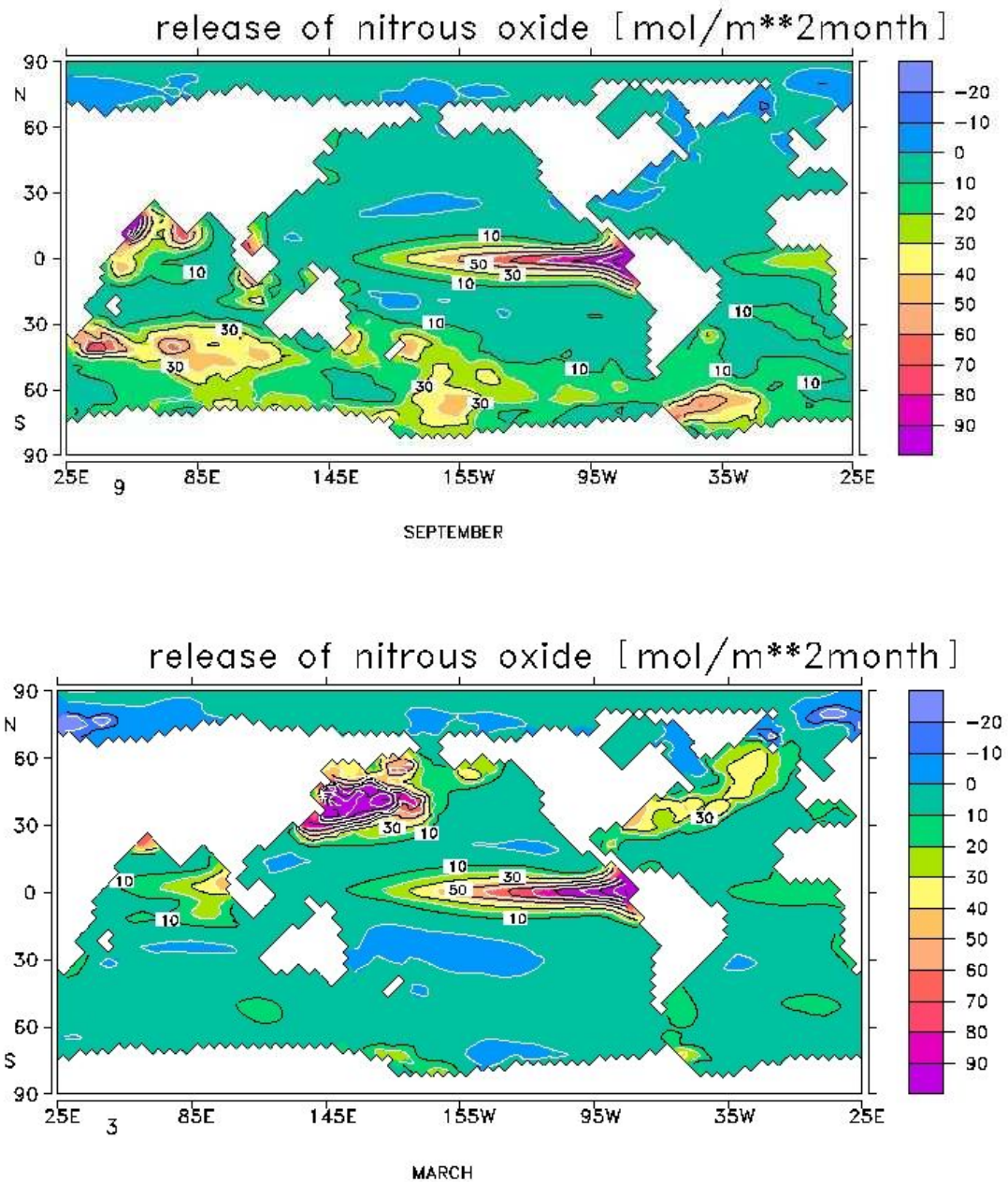


Abb. 4: Globale N₂O-Emissionen im September und im März.

3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

Im Unterschied zur Zeit der Antragsplanung gibt es jetzt zum ersten mal eine beckenweite Abschätzung der N₂O-Emissionen. Dank der Modellierung gibt es auch

erstmalig eine Vorstellung über die Amplitude der interannualen Variation der N₂O-Emission aus dem Arabischen Meer und über die Prozesse die die N₂O-Produktion steuern. Diese sind wiederum erstmalig auch in globale Modelle eingeflossen, deren Ergebnisse zur Zeit noch interpretiert werden.

4 Ausblick

Der Vergleich zwischen Daten und Modellergebnissen weist die größte Diskrepanz im Bereich des indischen Schelfs auf (vergl. Abb. 1 und 3). Da der Schelf jedoch für die N₂O-Emissionen von zentraler Bedeutung ist sollten in Zukunft küstennahe Prozesse in die beckenweite und globale Modelle stärker eingebunden werden.

5 Literatur / Anhang

- Bange, H.W., M.O. Andreae, S. Lal, C.S. Law, S.W.A. Naqvi, P.K. Patra, T. Rixen, and R.C. Upstill-Goddard, Nitrous oxide emissions from the Arabian Sea: A synthesis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1, 61-71, 2001.
- Bange, H.W., S.W. Naqvi, and L.A. Codispotii, The nitrogen cycle, in *Arabian Sea Biogeochemistry*, edited by S.L. Smith, Springer, Heidelberg, eingereicht.
- Suthof, A., V. Ittekkot, and B. Gaye-Haake, Millennial-scale oscillation of denitrification intensity in the Arabian Sea during the late Quaternary and its potential influence on atmospheric N₂O and global climate, *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 637-650, 2001.

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 7

Datenmanagement

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Dipl. Biol. J. Hermann & Prof. Dr. K. Lochte

Institut für Meereskunde (IfM) an der Universität Kiel
Biologische Ozeanographie
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel

Inhalt

Zusammenfassung	7 - 1
1 Einleitung	7 - 2
2 Ergebnisse	7 - 2
2.1 Datenbestand und Datenaufarbeitung	7 - 3
2.2 Datenzugang und Langzeitarchivierung	7 - 7
2.3 Onlinedaten	7 - 8
2.4 Datenanfragen	7 - 9
2.5 Internationale JGOFS-Datensammlung	7 - 9
2-6 Workshops	7 - 9
2-7 Öffentlichkeitsarbeit	7 - 9
3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung	7 - 11
3.1 Datenaufarbeitung und Langzeitarchivierung	7 - 11
3.2 Beteiligung am internationalen JGOFS-Datenmanagement	7 - 11
4 Ausblick	7 - 11
4.1 Empfehlungen für zukünftige Datenerhebungen	7 - 11

Zusammenfassung

Von den deutschen am JGOFS-Programm beteiligten Wissenschaftlern wurden 33 Forschungsfahrten und 30 Langzeitverankerungen als direkt zum deutschen JGOFS-Programm gehörig identifiziert. Weitere 155 Fahrtabschnitte/ Verankerungen werden als dem JGOFS-Programm ‚assoziiert‘ betrachtet. Von dem Rohdatenbestand (772 MB) konnten 80% abschließend bearbeitet werden, d. h. die Messdaten sind mit ihren Metadaten relational verknüpft.

Die Daten wurden in das Dateninformationssystem PANGAEA beim World Data Center WDC-Mare in Bremen transferiert. Sie sind über das Internet über verschiedene Portale abrufbar. Dieser Datenbestand bildet auch die Grundlage für den deutschen Anteil einer internationalen JGOFS Daten-DVD, deren erste Ausgabe im Mai 2003 zur Final JGOFS Open Science Conference in Washington D.C. erscheinen wird. Durch diese beiden Maßnahmen ist die Langzeitarchivierung der Daten gesichert.

Es werden Vorschläge zur Verbesserung des Datenmanagements für zukünftige Projekte gemacht. Eine engere Verzahnung der Datenaufnahme durch den Wissenschaftler und dem Datenmanagement in der Planungs- und der Messphase könnte die Effektivität des Datenmanagements bei zukünftigen Programms deutlich steigern.

1 Einleitung

Das Datenmanagement dieses Teilprojektes ist die Weiterführung von drei vorangegangenen Projekten, die ihre geographischen Schwerpunkte entweder im nördlichen Atlantik oder im Arabischen Meer hatten. Während aller Projektphasen wurden die Daten aus beiden Projektgebieten bearbeitet. Das übergreifende Ziel war das Management der gesamten deutschen JGOFS-Daten. Daher wird sich dieser Abschlussbericht nicht nur mit den Ergebnissen der aktuellen Projektphase befassen, sondern auch das JGOFS-Datenmanagement insgesamt betrachten.

Das JGOFS-Datenmanagement verfolgte die folgenden drei Hauptziele:

1. Erfassung der abgegebenen Daten und existierenden Metadaten und deren Neuorganisation in relationalen Datenbankstrukturen
2. Persönliche Betreuung von Datenanfragen der Wissenschaftler durch direkte Weitergabe von Rohdaten oder Erstellung von Datenprodukten
3. Schaffung eines dauerhaften Datenzugangs auch über das Projektende hinaus

Während das deutsche JGOFS-Programm im Jahre 1989 mit der Meteor-Fahrt M10 begann, wurde erst 1995 die Stelle eines Datenmanagers eingerichtet. Von 1995 bis 1999 wurde Datenmanagement von Thomas Mitzka betreut, ihm folgte Anfang 2000 Joachim Herrmann.

Die systematische Inventarisierung der Datenbestände und die Schaffung von für relationale Datenbanken geeigneten Strukturen begann Anfang 2000. Anfang 2001 wurde damit begonnen, die aufbereiteten Daten in das Dateninformationssystem PANGAEA (www.pangaea.de) des World Data Center Mare am MARUM in Bremen (www.wdc-mare.org) zu überführen.

Prinzipiell lassen sich 3 Phasen bei der Datenbearbeitung unterscheiden:

Phase I: Inventarisierung

Phase II: Datenorganisation und -restrukturierung

Phase III: Import in ein relationales Datenbanksystem

Inventarisierung bedeutet die Erfassung und Klassifikation der abgegebenen Daten auf Dateibasis in einem Katalog. Jede Datei wurde nach ihren Inhalt, den gemessenen Parametern und der Schiffsreise klassifiziert. Für jede wurde ihr jeweiliger Bearbeitungsstatus notiert; damit kann der Übergang von Phase I in Phase II überwacht werden. Als Maß für den ‚Erfolg‘ kann die Zahl der bearbeiteten Dateien oder das bearbeitete Datenvolumen (in Bytes) genommen werden.

Die *Datenorganisation* bzw. *-restrukturierung* umfasst das manuelle Zusammenführen der Messwertdaten mit ihren Metadaten, die Plausibilitätskontrollen und die Konvertierung in datenbankkonforme Formate. Dies geschieht z. B. mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen. Phase II ist der zeitaufwändigste Teil des Datenmanagement. Je nach Qualität und Umfang der abgegebenen Daten kann die Aufarbeitung eines Fahrtabschnittes bis zu 3 Monate dauern. Alle Dateien, die diese Phase erreichen, gelten als

‚bearbeitet‘ (processed). In dieser Phase entscheidet es sich, ob die abgelieferten Daten den Qualitätsansprüchen zur Weiterverarbeitung genügen und es werden Datendubletten (Dateiversionen) aussortiert.

In Phase III werden alle aufbereiteten Daten in *relationale Datenbankstrukturen* importiert. Lokal werden die Daten mit Microsoft Access verwaltet, um sie dann in das online verfügbare Dateninformationssystem PANGAEA überführen zu können.

Der Benutzer hat über die Webseite des Datenmanagements (www.ifm.uni-kiel.de/jgofs/dm) Zugang auch zu den in PANGAEA befindlichen Daten. Vorproduzierte Grafiken geben dem Benutzer einen ersten Eindruck von einigen Daten.

2 Ergebnisse

2.1 Datenbestand und Datenaufarbeitung

Im Jahre 2001 wurde eine Umfrage unter den Wissenschaftlern der deutschen JGOFS-Gemeinde durchgeführt, mit der geklärt werden sollte, welche Schiffsreisen und Langzeitverankerungen als „JGOFS“ – Reise/Verankerung und welche nur als „JGOFS-assoziierte“ (JGOFS affiliated) kategorisiert werden sollten. Die Umfrage ergab, dass 33 Forschungsfahrten und 30 Verankerungen als direkter deutscher Beitrag zum JGOFS-Programm gewertet werden sollten (vgl. Tab.1).

	JGOFS	‚JGOFS assoziiert‘	Summe
Reisen/Fahrtabschnitte	33	56	89
Verankerungen	30	99	129
Summe	63	155	218

Tab. 1: Programmzugehörigkeit deutscher Forschungsfahrten und Verankerungen

Die beim JGOFS-Datenmanagement eingegangenen Daten werden in einer Inventarliste geführt. Der zu verwaltende Rohdatenbestand hat sich wie Tab. 2 zeigt seit Anfang 2000 deutlich erhöht.

Stand	Zahl der Dateien	Datenvolumen
Januar 2000	3331	282.2 MB
Dezember 2000	4348	645.4 MB
Februar 2003	5433	772.4 MB

Tab. 2: Datenbestandsentwicklung seit Januar 2000

Die qualitative Aufteilung des aktuellen Datenbestandes in Datentypen ist in Tab. 3 gezeigt. Die Tiefenprofile der ozeanographischen Messungen und die Aufnahme der

Zeitreihen physikalischer Umweltparameter (Lichtmessungen, schiffseigene Wettermessungen) während des laufenden Schiffsbetriebes machen den überwiegenden Teil des Datenbestandes aus. Die restlichen Datentypen (diskrete Probandaten mit den dazugehörigen Kalibrierungsdaten) haben mengenmäßig nur ein relativ geringes Datenvolumen, sind aber umgekehrt proportional aufwendig in der Bearbeitung.

Datentyp	Zahl der Dateien	prozentuale Verteilung	Datenvolumen	prozentuale Verteilung
Profile	3208	59.0 %	278.9 MB	36.1 %
Zeitreihen	905	16.7 %	433.3 MB	56.1 %
Diskrete Probandaten (Schöpfer, Pumpen)	683	12.6 %	38.7 MB	5.0 %
Netzfänge	34	0.6 %	1.5 MB	0.2 %
Kalibrierungsdaten	205	3.8 %	3.3 MB	0.4 %
Infos, Metadaten	398	7.3 %	16.8 MB	2.2 %
SUMME	5433		772.4 MB	

Tab. 3: Aufteilung der abgegebenen Daten in Datentypen am Ende des Projektzeitraumes

Schlüsselt man den Rohdatenbestand nach Schiffsreisen und ihrer Programmzugehörigkeit auf, ergeben sich die in Tab. 4a und 4b gezeigte Statistiken. Dabei werden die Datenbestände in die Kategorien „bearbeitet“ (processed), „nicht bearbeitet“ (not processed) und „Randdaten“ (marginal data) eingeteilt. Zu der Kategorie „Randdaten“ gehören die erwähnten physikalischen Zeitreihen, die aufgrund ihres hohen Datenvolumens ein besonderes Problem darstellen, und daher aus dieser Betrachtung herausgenommen wurden. Weiterhin ist anzumerken, dass die Summenwerte größer als die Gesamtsumme in Tab. 2 und 3 sind, da in einer Datei Daten aus mehreren Fahrten sein können und daher mehrfach gezählt werden.

Von Datenbestand der JGOFS-Fahrten wurden bis Ende Februar 2003 79% (= 618 MB) abschließend bearbeitet. Bei der Bearbeitung hatten im Allgemeinen die Reisen mit einem hohen Datenbestand Vorrang. Für zwei Reisen wurden keine Daten abgegeben.

'JGOFS' Cruises	Year	Ocean area	No. Files	Raw Data Volume	Processed	Non Processed	Marginal data
M10/1	1989	NA	460	119.5 MB	99%	1%	0%
M10/2	1989	NA	306	76.8MB	99%	1%	0%
M10/3	1989	NA	101	28.9MB	99%	1%	0%
M21/1	1992	NA	21	1.7MB	0%	48%	52%
M21/2	1992	NA	31	1.0MB	0%	96%	4%
M21/3	1992	NA	3	0.2MB	0%	100%	0%
M21/6	1992	NA	7	0.3MB	0%	100%	0%
M26/1	1993	NA	21	0.4MB	0%	87%	13%
M27/2	1993	NA	51	14.7MB	98%	0%	2%
M30/2	1994	NA	3	0.5MB	100%	0%	0%
M32/3	1995	IO	216	8.4MB	0%	100%	0%
M32/5	1995	IO	379	35.5MB	4%	96%	0%
M33/1	1995	IO	60	10.7MB	6%	94%	0%
M36/1	1996	NA	121	8.1MB	100%	0%	0%
M36/2	1996	NA	195	13.5MB	63%	0%	37%
M36/5	1996	NA	513	100.3MB	88%	7%	5%
Po173/2	1990	NA	1	0.2MB	0%	100%	0%
Po200/6	1993	NA	8	0.2MB	0%	100%	0%
Po202/1	1994	NA	71	5.5MB	99%	1%	0%
Po209/1	1995	NA	54	22.6MB	100%	0%	0%
Po212/4	1995	NA	8	0.9MB	100%	0%	0%
Po231/1	1997	NA	22	0.4MB	0%	100%	0%
Po231/2	1997	NA	19	0.9MB	0%	100%	0%
Po231/3	1997	NA	78	1.3MB	2%	98%	0%
So90	1993	IO	58	4.7MB	0%	100%	0%
So118	1997	IO	39	6.2MB	0%	100%	0%
So119	1997	IO	495	26.7MB	19%	50%	31%
So120	1997	IO	1104	81.0MB	97%	3%	0%
ANTX/6	1992	SO	128	3.7MB	0%	100%	0%
ANTXIII/2	1995	SO	11	2.1MB	0%	100%	0%
ANTXVI/3	1999	SO	27	2.7MB	0%	100%	0%
ANTVIII/2	2000	SO					
Kel1	1993	NA					
Sum			4611	579.7MB	79%	18%	3%

Tab. 4a: Status der Aufarbeitung der JGOFS-Forschungsfahrtendaten

Im Falle der „JGOFS-assoziierten“ Fahrten liegt die Aufarbeitungsquote bei 90% (= 159 MB). Die höhere Quote ergibt sich daraus, dass es sich weniger aufwendig zu bearbeitende ozeanographische Profildaten handelt. Wie Tab. 4b gibt es in dieser Programmkategorie noch mehrere Reisen, für die keine Daten abgegeben wurden.

'JGOFS affiliated'	Year	Ocean area	No. Files	Raw Data Volume	Processed	Non Processed	Marginal data
M10/4	1989	NA	15	108.8MB	100%	0%	0%
M12/3	1990	NA	3	0.1MB	0%	100%	0%
M21/4	1992	NA	2	0.1MB	0%	100%	0%
M21/5	1992	NA	2	0.2MB	0%	100%	0%
M22/1	1992	NA					
M22/5	1992	NA	3	0.1MB	0%	100%	0%
M26/3	1993	NA	1	0.1MB	0%	100%	0%
M27/1	1993	NA	1	0.1MB	0%	100%	0%
M30/1	1994	NA					
M30/3	1994	NA					
M31/2	1995	IO	16	1.6MB	100%	0%	0%
M31/3	1995	IO	63	6.9MB	30%	70%	0%
M32/1	1995	IO	1	0.0MB	0%	0%	100%
M32/2	1995	IO					
M32/4	1995	IO	3	0.3MB	0%	99%	1%
M32/6	1995	IO	1	0.0MB	0%	0%	100%
M36/6	1996	NA	115	15.0MB	34%	24%	42%
M37/1	1996	NA					
M37/2	1996	NA	104	5.6MB	99%	1%	0%
M42/1	1998	NA	135	9.8MB	98%	2%	0%
M42/2	1998	NA					
M42/4	1998	NA					
M45/4	1999	NA					
Po202/1	1994	NA	71	5.5MB	99%	1%	0%
Po202/3	1994	NA					
Po209/2	1994	NA	2	4.2MB	100%	0%	0%
Po212/1	1995	NA	7	0.3MB	81%	19%	0%
Po212/2	1995	NA	48	4.0MB	100%	0%	0%
Po212/3	1995	NA	41	3.1MB	100%	0%	0%
Po219/a	1996	NA	48	2.7MB	99%	1%	0%
Po233/a	1997	NA	77	5.0MB	100%	0%	0%
Po233/b	1997	NA	9	0.4MB	100%	0%	0%
Po233/c	1997	NA	20	0.7MB	100%	0%	0%
Po233/d	1997	NA	5	0.1MB	100%	0%	0%
Po237/2	1998	NA	25	1.2MB	100%	0%	0%
Po237/3	1998	NA	2	0.0MB	100%	0%	0%
Po247/2	1999	NA					
Po247/3	1999	NA					
Po248	1999	NA					
Po249	1999	NA					
Po257	2000	NA					
Po259/1	2000	NA					
Po259/2	2000	NA					
Po267	2001	NA					

Po268	2001	NA					
So117	1997	NA	8	0.4MB	7%	93%	0%
So129	1998	NA	6	0.2MB	0%	100%	0%
VH95/12	1995	NA					
VHA1/96-2	1996	NA					
VHA1/96-3	1996	NA	24	0.4MB	100%	0%	0%
VH97/3-3	1997	NA					
Hei42	1993	NA	2	0.0MB	0%	100%	0%
Hei63	1994	NA	2	0.1MB	0%	100%	0%
Hei75	1995	NA	2	0.1MB	0%	100%	0%
ANTIX/3	1991	SO					
ANTXVIII/5b	2001	SO					
Sum			864	177.2MB	90%	6%	4%

Tab. 4b: Status der Aufarbeitung der mit dem JGOFS-Programm assoziierten Forschungsfahrtendaten

JGOFS-Verankerungen wurden an drei Positionen im Nordatlantik und an fünf Positionen im Arabischen Meer ausgebracht (vgl. Tab. 5). Da die meisten Verankerungen jährlich gewartet und mit Geräten neu bestückt wurden, ergaben sich insgesamt 30 Einsätze von JGOFS-Verankerungen.

'JGOFS' Moorings	Year	Ocean area	Deployments
L1	1993-99	NA	6
L2	1992-96	NA	10
L3	1992-96	NA	6
CAST	1995/97	IO	2
EAST	1996-97	IO	2
WAST	1995/97	IO	2
SAST	1995	IO	1
NAST	1995	IO	1
Sum			30

Tab. 5: Übersicht über die „JGOFS“-Dauerverankerungen

Die Sedimentfallendaten, die an allen Verankerungen gewonnen wurden, liegen als Synthesewerk in einer Datei vor. Sie sind daher nicht sinnvoll nach obigem Schema darstellbar. Die Daten werden bei Projektende über das WDC-Mare verfügbar sein.

2.2 Datenzugang und Langzeitarchivierung

JGOFS war eines der ersten deutschen meereskundlichen Projekte, das ein zentrales Datenmanagement hatte. Es war ein Ziel des Datenmanagements, dass der Forschung der größte Teil der Messergebnisse auch in Zukunft in einer systematisch organisierten Form über das Internet zur Verfügung steht. Ein wichtiger Aspekt in der Synthesephase

von JGOFS war daher die Überführung der JGOFS Daten in das World Data Center (WDC)-Mare in Bremen. Damit ist ihre Langzeitarchivierung außerhalb der JGOFS-Projektlaufzeit gesichert. Das WDC-Mare wird in Zusammenarbeit mit dem Internationalen JGOFS-Projektbüro weiterhin eine Daten-DVD produzieren, die die verfügbaren Daten der internationalen JGOFS Projekte umfassen soll und die zur weiteren Verbreitung der Daten und ihrer langfristigen Verfügbarkeit zusätzlich beitragen wird. Die Aufrechterhaltung des Zugangs zu den Daten per World Wide Web oder DVD ist eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung der Daten in anderen Projekten und für die Modellierung.

2.3 Onlinedaten

Alle Daten, die beim JGOFS Datenmanagement abgeliefert wurden, sind mittlerweile frei. Die Daten sind über das Internet auf der Webseite des Datenmanagements (www.ifm.uni-kiel.de/jgofs/dm) zugänglich. Hier sind für den Benutzer einige Hilfestellungen realisiert. Die Webseiten sind nach Schiffsreisen strukturiert und innerhalb einer Seite nach Datentypen. Neben allgemeinen Informationen zum Fahrtabschnitt gibt es Angaben über die vorhandenen Messparameter. Falls es zu einer Reise Daten in PANGAEA gibt, existiert dort ein Link, der schon eine vorformulierte Datenabfrage an PANGAEA enthält. PANGAEA-Datensätze können relativ einfach mit dem Programm Ocean Data View (www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV/) graphisch dargestellt werden. Hinweise dazu finden sich unter www.pangaea.de/Software/. Auf den Webseiten des JGOFS-Datenmanagement finden sich zusammenfassende Grafiken, die mit ODV erstellt wurden und dem Benutzer einen ersten optischen Eindruck, der Daten geben, die er herunterladen kann.

Die Daten werden online über das Dateninformationssystem PANGAEA zur Verfügung gestellt. Im System befinden sich rund 1.4 Millionen vollständig referenzierte Messwert-Datensätze (data records). Für die PANGAEA-Datenausgabe werden die Messwert-Datensätze (data records) zu neuen Einheiten zusammengepackt. Diese Datensätze (data sets) orientieren sich an den Geräteeinsätzen, z. B. an einem Tiefenprofil einer CTD mit Wasserkransschöpfer. Bei Projektende sind 1550 Tiefenprofile, 417 Schöpferprofile und 4 Zeitserien online verfügbar. Als zentrale Suchmaschine dient das Programm PangaVista des PANGAEA-Informationssystems. Dabei ist es egal, ob man sich über www.wdc-mare.org oder www.pangaea.de einwählt. Die Datenzugangsschnittstelle ist identisch.

Durch Eingabe von geeigneten Suchbegriffen, die durch ein logisches ‚UND‘ miteinander verknüpft werden, kann sich der Nutzer Datensätze zusammensuchen. Er hat auch die Möglichkeit über die Eingabemaske den geographischen Raum einzuschränken. Hinter dem Link ‚Show map‘ verbirgt sich auch die Möglichkeit, Datensätze per Rahmenauswahl mit der Maus zu selektieren. Prinzipiell sind die Datensätze in PANGAEA als sog. Events gespeichert; d. h. man bekommt z. B. das Tiefenprofil eines Geräteeinsatzes an einer Station.

Die umfangreichen Zeitreihenmessdaten stellen ein besonderes Problem dar. Hier sind besonders die Schiffs-DVS-Daten und die Lichtmessungen zu nennen. Diese Randdaten würden aufgrund ihrer Quantität die Leistung des PANGAEA-Datenbankservers stark belasten. Da sie gleichzeitig für die meisten Untersuchungen nur geringe Relevanz besitzen, können diese marginalen Daten noch nicht in Online-Datenbanksysteme

transferiert werden. Sie werden daher nur als Dateidownload-Link in der Datenmanagement-Webseite angeboten.

2.4 Datenanfragen

Die Zahl der direkten Datenanfragen beim Datenmanager ist in dieser Projektphase naturgemäß stark zurückgegangen. Da immer weniger Wissenschaftler noch am JGOFS-Programm aktiv beteiligt waren, sie zudem auch ihren Datenbedarf schon in den Vorjahren decken konnten bzw. schon die Online-Datenzugänge (anonym) nutzen konnten, wurden nur acht der Anfragen persönlich abgewickelt.

Solange der Datenmanager am Institut für Meereskunde beschäftigt ist, wird es möglich sein, auch Daten bzw. Datenprodukte zu beziehen. Danach werden die Rohdaten in geeigneter Weise auf Servern und CD-ROMs am IfM bzw. am WDC-Mare zur Verfügung stehen.

2.5 Internationale JGOFS-Datensammlung

Im Mai 2003 wird eine Daten-DVD erscheinen, die alle deutschen JGOFS-Daten enthalten wird, die bis zum 31. März 2003 im Dateninformationssystem PANGAEA gespeichert sind. Auf dieser DVD werden weiterhin alle CD-ROMs kopiert, die bis dahin international erschienen sind, u. a. auch die vom deutschen JGOFS-Datenmanager erstellte Daten-CD aus dem Jahre 1999.

Das Weltdatenzentrum WDC-Mare plant die Integration aller internationalen JGOFS-Daten in ihr Datenbanksystem. Nach Abschluss dieser Arbeiten wird im Jahre 2005 eine zweite Daten-DVD erscheinen können.

2.6 Workshops

Der deutsche Datenmanager war in dieser Projektphase an zwei nationalen JGOFS – Workshops in Kiel (5.-6. Dez. 2001, 26.-27. Sept. 2002) und einem internationalen Data Management Task Team (DMTT) Workshop in Silver Springs, USA (29.-30. Jan. 2002) beteiligt. Vom 27.-28. Januar 2003 nahm er an einem DMTT-PANGAEA Koordinierungstreffen zur Produktion der internationalen JGOFS Daten-DVD in Bremen teil. Der abschließende DMTT-Workshop wird erst nach Projektende am 13.-15. März 2003 am BODC in Merseyside/England stattfinden. Da die Finanzierung des Projektes Ende Februar ausläuft, wird dieser wichtige, abschließende Workshop, auf dem die Produktion der JGOFS Daten DVD behandelt wird, möglicherweise ohne deutsche Beteiligung stattfinden.

2.7 Öffentlichkeitsarbeit

Michael Meyerhöfer war ein Jahr lang über nicht ausgenutzte JGOFS Indik Gelder (TP Willebrand/Oschlies) für den Bereich Öffentlichkeitsarbeit innerhalb des TP 7 tätig.

Für die Öffentlichkeitsarbeit von JGOFS - Indik sollten die wichtigsten Ergebnisse aus den Teilprojekten ausgewertet und als Grundlage für eine allgemeinverständliche Darstellung dienen.

Ziel war eine anschauliche Präsentation der Funktion von Monsungebieten für die Biogeochemie des Ozeans und für das Klima. Die dazugehörigen Materialien wurden für verschiedene Anlässe konzipiert, z. B. Vorträge oder Ausstellungen für die Öffentlichkeit oder für Veranstaltungen an Schulen bzw. als Unterrichtsmaterial.

Die Produkte werden außerdem dem Koordinator und den Wissenschaftlern der Teilprojekte zur Verfügung gestellt und so einem erweiterten Nutzerkreis zugänglich gemacht.

Folgende Arbeit wurde geleistet:

Eine interaktive, vertonte PowerPoint - Präsentation

Die Präsentation ist auf CD erhältlich und konzipiert für Schulen, Wissenschaftsmessen und Ausstellungen.

Sie kann sowohl als autonom ablaufende Darstellung z.B. mit einem Touchscreen gezeigt werden als auch auf einem PC z. B. an einer Schule eingerichtet werden. Voraussetzungen sind der Besitz des Microsoft - Programms „PowerPoint“ ab Version 97 sowie einer Soundkarte mit Lautsprechern.

In vereinfachtem Format ist sie auch für das Internet verfügbar.

Die Präsentation zeigt:

1. Fragestellungen und Ergebnisse des Projektes JGOFS-Indik:
 - a. Auswirkungen des Monsuns im Arabischen Meer:
 - auf die Physik
 - Strömungen
 - Auftrieb
 - auf die Biologie:
 - Primärproduktion
 - Planktongemeinschaften
 - Sedimentation
2. Von der Messung zum Modell
 - Darstellung der Probennahme (Arbeiten an Bord)
 - Darstellung der Laborarbeiten
3. Einfache Animationen aus den Modellen:
 - Was passiert, wenn der Monsun
 - sehr schwach ausfällt?
 - sich normal entwickelt?
 - überdurchschnittlich stark ausfällt
4. Darstellung der Hintergründe:
 - Was ist und wie entsteht der Monsun?
 - Was ist windgetriebener Küstenauftrieb (Stichworte Corioliskraft und Ekmantransport)?
 - Was ist der Treibhauseffekt?
 - Wie gestaltet sich der Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean (Stichworte Biologische und Physikalische Pumpe)?
 - Was ist Phytoplankton (mit Darstellung der verschiedenen Gruppen)?

Ein Poster weist in kurzer Form auf den Inhalt und die Handhabung der Präsentation hin und richtet sich an Besucher von Ausstellungen, auf denen die Präsentation autonom auf einem Touchscreen vorgeführt wird. Es soll zur Betrachtung der Präsentation anregen.

Ein zusätzliches Faltblatt geht ausführlicher auf Zielsetzung und Ergebnisse von JGOFS Indik ein und ist zur Mitnahme durch interessierte Besucher und zur begleitenden Verwendung an Schulen gedacht.

3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

3.1 Datenaufarbeitung und Langzeitarchivierung

Die systematische Aufarbeitung der deutschen JGOFS-Daten hat vor allem in den letzten drei Jahren statt gefunden. In dieser Zeit ist gelungen, 80% gesamten Datenbestands (Datenvolumen) zu bearbeiten. Insgesamt wurden 1550 Tiefenprofile, 417 Schöpferprofile, 4 Zeitserien und die Sedimentfallendaten in das World Data Center WDC-Mare für die Langzeitarchivierung überführt.

Bei Projektende gibt es noch einen Restdatenbestand von rund 115 MB, der noch nicht weiterverarbeitet werden konnte. Ein wichtiger Teil dieser Daten umfasst die Messwerte der Meteor Fahrt M32 aus dem Jahre 1995. Der Grund dafür, dass diese Daten noch nicht aufgearbeitet werden konnten, liegt in den oben aufgeführten Problemen der mangelnden Standardisierung der Daten und ihrer Zuordnung zu Metadaten. Mit einem zusätzlichen Aufwand von ca. 3 Monaten wäre es möglich, diese Datenlücke zu schließen.

3.2 Beteiligung am internationalen JGOFS Datenmanagement:

Die Teilnahme am internationalen JGOFS Datenmanagement und den Workshops erfolgte entsprechend der Antragsplanung.

4 Ausblick

4.1 Empfehlungen für zukünftige Datenerhebungen

Trotz der frühen Einrichtung eines zentralen Datenmanagements in JGOFS wurden im Laufe des Projektes spezielle Probleme und Schwierigkeiten deutlich, die hier zusammengefasst werden sollen, um allgemeine Empfehlungen für das Datenmanagement zu geben

Sehr nachteilig auf die Archivierung der Daten wirkt sich der lange zeitliche Abstand zwischen der Datenerhebung und ihrer datentechnischen Bearbeitung aus. Die letzte, große JGOFS relevante Fahrt fand 1997 statt; die abschließende Datenbearbeitung im obigen Sinne erfolgte erst 2002. Da viele Datenerzeuger/Bearbeiter nach ein paar Jahren für Rückfragen oft nicht mehr zur Verfügung stehen, ist es außerordentlich schwierig, solche Daten zu organisieren. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Arbeitsaufwand, der die Bearbeitung sehr stark verlangsamt. Aus diesem Grunde müssen die Datenerfassung und

deren Aufarbeitung durch den Wissenschaftler und das Datenmanagement zeitgleich erfolgen. Eine Eingangskontrolle der abgegebenen Daten muss sofort durchgeführt werden. Unkalibrierte Rohdaten dürfen nur in Absprache an das Datenmanagement geliefert werden. Ein solch konsequentes Vorgehen würde den Umfang, die Aktualität und die Qualität der Daten, die anderen Forschern jetzt und auch in der Zukunft zugänglich gemacht werden sollen, erheblich steigern.

Ein außerordentlich hoher Arbeitsaufwand ist für die Synchronisation der diskreten Daten mit ihren Metadaten anzusetzen, vor allem wenn die Daten von verschiedenen Bearbeitern zu einem Fahrtabschnitt zugeliefert wurden. Die meisten Wissenschaftler protokollieren nur die Metadaten, die sie für ihre Arbeit relevant halten. Da es keine Vereinheitlichung in den Datenformaten und den Metadaten der Probennahme gab, ist es sehr mühsam, Daten konsistent zu halten. Das Datenmanagement muss daher schon in der Planungsphase einer Expedition miteinbezogen werden. Im Vorfeld müssen bindende Absprachen über Datenformate und Metadatenerfassung getroffen werden.

Zur Verbesserung der Datenerfassung auf Expeditionen wurde daher vom Datenmanager ein Schema der sofortigen Erfassung von Metadaten und der eindeutigen Zuordnung der Messdaten auf der Basis des „Bedford Systems“ entwickelt. Dabei werden an einer(!) zentralen Stelle alle für die Probennahme relevanten Metadaten notiert. Über eine eindeutige Indexnummer ist jede diskrete Probennahme später eindeutig referenzierbar. Die Indexnummer werden auf Aufkleber gedruckt und dann vor der Probennahme auf den entsprechenden Probennahmebehälter geklebt. Der Wissenschaftler muss sich während der Probennahme also nicht mehr um die Protokollierung der Metadaten kümmern, sondern muss sich nur noch die Indexnummer merken. Da das System schon die spätere relationale Datenbankstruktur widerspiegelt, werden Konsistenzprobleme im Vorfeld minimiert. Dadurch kann der Datenweiterverarbeitungsprozess erheblich beschleunigt werden.

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 10

**Wirkung von Mineralstaub auf Produktion und Sedimentation
von organischem Kohlenstoff: Modellierung der Partikel-
Produktion, - Aggregation und –Sedimentation anhand der
Verteilung von partikulären Spurenelementen in der
Arabischen See**

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Prof. Dr. W. Balzer und Dr. W. Barkmann

Meereschemie/ FB 2 Universität Bremen

Postfach 330440

28334 Bremen

Inhalt

Zusammenfassung	10 - 1
1 Einleitung	10 - 2
2 Arbeiten und Ergebnisse	10 - 2
2.1 Modellierung des Kohlenstoff-und Staubkreislaufs	10 - 2
2.2 Ergebnisse des 1D-Modells	10 - 4
2.3 Vergleich mit Beobachtungen	10 - 6
2.4 Ergebnisse des 3D-Modells	10 - 8
3 Relevanz der Ergebnisse für die JGOFS-Ziele	10 - 13
4 Literatur	10 - 13

Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Feldstudien und Modellentwicklungen wurden in der Synthesephase die experimentellen Befunde von organischer Materie und staubassoziierten Spurenmetallen in einem numerischen 1D-Modell zusammengeführt, welches beide Komponenten beinhaltet und die Partikeldynamik in der Wassersäule adäquat beschreiben kann. Aus Sinkstofffallen-Messungen ist bekannt, dass die Flüsse organischer und mineralischer Partikel im tiefen Ozean häufig miteinander korreliert sind, obwohl die Einträge atmosphärischen Staubes, durch den diese Elemente vorwiegend in den offenen Ozean gelangen, unabhängig von der monsunbedingten Primärproduktion in der Arabischen See sein sollten. Die Ergebnisse eines im vorangegangenen Bewilligungszeitraums entwickelten 1D-Aggregationsmodells zeigten, dass die Aggregation zwischen Phytoplankton und Staub, sowie das Absinken der Aggregate, wirksame Mechanismen bilden, die den Staub - und damit die Spurenelemente - aus der Deckschicht in größere Tiefen transportieren können. Ein Vergleich mit Beobachtungen ergab jedoch, dass die berechneten Vertikaltransporte zu hoch waren, ebenfalls nahm die modellierte Staubkonzentration in der Tiefe kontinuierlich zu. Um diese Defizite auszugleichen, wurde ein Disaggregationsmodul entwickelt, das den Zerfall der größeren Aggregate in kleinere Fragmente simuliert. Unter Berücksichtigung dieser neu entwickelten Parametrisierung der Disaggregation und einer vergleichsweise geringen Remineralisierungsrate in der Tiefe, konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Messungen von Konzentrationen und Flüssen, sowohl im organischen Material als auch im Staub, erreicht werden. Aus den 1D-Modellrechnungen geht hervor, dass die Aggregation des organischen Materials mit sich selbst und mit den Staubeilchen überwiegend in der Deckschicht dominiert, während der Zerfall von größeren Aggregaten in kleinere Teilchen die Flussraten im tieferen Ozean kontrolliert.

Durch Einbindung des Aggregationsmoduls (Staub und organische Aggregate) in ein biogeochemisches 3D-Zirkulationsmodell, konnten Aufschlüsse über die Partikeldynamik in der Wassersäule und ihre Auswirkungen auf die vertikalen partikulären Kohlenstoff- und Staubflüsse in den verschiedenen Provinzen der Arabischen See gewonnen werden. So reproduziert das Modell die gemessenen jährlichen Vertikaltransporte des partikulären organischen Kohlenstoffs in der Tiefsee, die in dem Bereich zwischen 0.5 und 1.5 mg C m⁻² d⁻¹ liegen. Die starken atmosphärischen Staubeinträge in der westlichen Arabischen See finden keine Entsprechung im suspendierten Staub, obwohl die entsprechenden Modellvariablen stark auf die Einträge reagieren. Als Ursache dafür kann die gute Korrelation zwischen Staubeintrag und Primärproduktion gesehen werden, die insbesondere in den Auftriebsgebieten sehr groß ist. Folgende Prozesse können für die Zunahme der Konzentration in der Tiefe verantwortlich sein: a) der Staubfluss konvergiert in der Tiefe als Folge einer Abnahme der mittleren Sinkgeschwindigkeit und b) durch Remineralisierung organischen Materials werden die eingefangenen Staubeilchen wieder frei.

Im Hinblick auf die Synthese von JGOFS-Ergebnissen haben wir ein Modell vorgelegt, das großräumig den Fluss organischen Kohlenstoffs mit dem Staubfluss (aus atm. Modell) verknüpft und gleichzeitig unabhängige Messungen des suspendierten Staubs recht gut wiedergibt. Dadurch wurde

eine neue prognostische Variable (Staub) in die Modellierung des Kohlenstoffkreislaufs einbezogen, die experimentell zugänglich ist. Weitere Arbeiten müssen sich mit einer besseren Parametrisierung von Remineralisierung, Aggregation und Disaggregation befassen, wofür allgemein keine oder nur wenig Datenkenntnisse vorliegen.

1 Einleitung

JGOFS untersucht weltweit die ozeanischen Material-Flüsse mit dem Auftrag, "die biogeochemischen Kreisläufe von Kohlenstoff und assoziierten Elementen im Meer zu qualifizieren und zu quantifizieren". Zu diesen assoziierten Elementen gehören neben Stickstoff und Phosphor auch eine Reihe von Spurenelementen, da die Primärproduktion als Ausgangspunkt des ozeanischen Kohlenstoffflusses nicht nur an die Makronährstoffe N und P, sondern auch an eine Reihe von Spurenelementen (v.a. Fe, Zn, Cu, Ni) geknüpft ist. Mineralische (Staub-) Partikel, deren Eintragsintensität in die Arabische See global zu den höchsten gehört, führen der Deckschicht nicht nur die assoziierten Spurenelemente zu, sondern haben auch Einfluss auf das Aggregations- und Sedimentationsverhalten des organischen Kohlenstoffs.

Bei verschiedenen Studien in der Arabischen See, aber auch im tropischen und subtropischen Nordatlantik ist häufig ein enger Zusammenhang zwischen der Sedimentation von Mineralstaub und organischem Kohlenstoff festgestellt worden, der insofern erstaunlich ist, als die Mechanismen von Input/Produktion zeitlich völlig unabhängig sind. Daneben ist seit langem bekannt, dass die Deposition von Aerosolen der ozeanischen Deckschicht essentielle Spurenstoffe (Eisen, Stickstoff, etc.) zuführt und damit die Produktivität erhöhen kann. Unsere bisherige Hypothese für die gemeinsame Sedimentation von relativ schweren Staub- und den organischen Partikeln war, dass das voluminöse organische Material die anorg. Partikel einfängt ("scavenged") und Aggregate bildet, die ihrerseits durch den mineralischen Anteil eine höhere Sinkgeschwindigkeit erhalten

Obwohl die Staubdeposition eine wichtige Komponente des Klimasystems darstellt und zudem den gegenwärtigen globalen Veränderungen unterliegt, gibt es kaum Studien im internationalen JGOFS-Programm, die sich mit der Wechselwirkung von Staubdeposition und organischer Produktion/Sedimentation befassen. Dies liegt z.T. daran, dass die gemeinsam festgelegten JGOFS-Schwerpunktsregionen (z.B. NABE, Äquatorialer Pazifik, etc.) außerhalb der Hauptdepositionsgebiete von Stäuben liegen. Trotzdem ist festzuhalten, dass in der Arabischen See und im tropischen /subtropischen Nordatlantik Partikelbeschreibung und Partikeltransport ohne Berücksichtigung der Aerosoldeposition nicht denkbar sind.

Unser Hauptziel für die Synthesephase war es daher, die beobachteten Kohlenstoff- und Staub-Flüsse sowie die relevanten Prozesse (s.u.) in ein numerisches 3D-Modell zu integrieren, um somit die Einzel-Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf großräumig zu erfassen und zu quantifizieren.

2 Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Modellierung des Kohlenstoff- und Staubkreislaufs

Die Fragestellungen in TP 10 erforderten die Entwicklung eines neuen Modells, das nicht nur die physikalischen und biogeochemischen Prozesse und Variablen simuliert, sondern auch die Verteilungen von ausgewählten Spurenelementen in der Wassersäule. Da diese Elemente (z.B. Al und Fe) vorwiegend durch Staub in den Ozean eingetragen werden, muss dieses Modell neben dem organischen Kreislauf auch den Transport von Staub-

partikeln und deren Wechselwirkung mit der Biologie enthalten. Somit vereint das hier entwickelte Modell mehrere Ansätze. Es basiert auf einem eindimensionalen biogeochemischen Modell (Abb. 10-1) mit den prognostischen Größen NO_3 , NH_4 , Phyto- und Zooplankton, Detritus und Chlorophyll sowie der diagnostischen Variablen Kohlenstoff. Weiter enthält das Modell neue Routinen zur Berechnung von Aggregation und Disaggregation der Phytoplanktonzellen mit sich selbst und mit Staubpartikeln. Die Implementierung der Phytoplankton-Aggregation folgt weitestgehend dem Konzept von Kriest und Evans (1999), insofern als das komplette Größenspektrum der Partikel von der einzelnen Zelle bis zu den großen Aggregaten des 'marine snow' modelliert wird, statt wie andere Ansätze (z. B. Clegg und Whitfield, 1990) von vorneherein auf bestimmte Größenklassen festgelegt zu sein. Der Zusammenhang zwischen Partikeldimension und -anzahl wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben (McCave, 1984), deren Exponent eine weitere prognostische Variable darstellt. So ist es jederzeit möglich, von der Gesamtkonzentrationen auf die Konzentration von Aggregaten einer bestimmten Größenklasse rückzuschließen. Die Aggregation von Phytoplankton mit Staub stellt eine eigene Neuentwicklung dar und berücksichtigt 1) die Aggregation durch Turbulenz und 2) differentielle Sinkgeschwindigkeiten der beteiligten Partikel (Jackson, 1990). Neue prognostische Variablen sind hierbei die Konzentrationen der frei im Wasser befindlichen bzw. der in Aggregaten gebundenen Staubkörner, wiederum als über das gesamte Größenspektrum integrierte Werte. Zusätzlich berechnet das Staubmodul den Massenzuwachs der Aggregate bei der Aufnahme von Staub sowie die damit verbundene mögliche Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit.

Die Deckschichtdynamik wurde durch ein eindimensionales TKE-Modell (turbulent kinetic energy) simuliert, das mit Wärme- und Impulsflüssen angetrieben wird. Ebenfalls wurde ein sich saisonal verändernder und von der Ekmandivergenz der windgetriebenen Strömung abhängiger Vertikaltransport von Nährstoffen in das Modell übernommen. Dieser kann in Verbindung mit der Deckschichtvertiefung zu einem zusätzlichen Transport von Nährstoffen in die photische Zone beitragen. Der Staubeintrag auf die Wasseroberfläche wurde im 1D-Modell den Fallen-Beobachtungen entsprechend zunächst auf einen konstanten Wert von $2 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ gesetzt.

Das im Teilprojekt 10 zuvor entwickelte Modell, das sich aus verschiedenen Modulen zusammensetzt und sowohl den biogeochemischen Kreislauf in der Wassersäule als auch die Aggregation von organischem Material mit freien Staubpartikeln berücksichtigt, wurde im laufenden Projekt um ein weiteres Modul ergänzt, das den Zerfall größerer Aggregate in kleinere Partikel (Disaggregation) beschreibt. Da im tieferen Ozean sowohl die inneren als auch die äußeren Kräfte, die auf die Aggregate wirken, in der Regel unbekannt sind, wurde im TP 10 die Disaggregation über einen Ansatz parametrisiert, der eine Referenzverteilung der Größenklassen voraussetzt, die wiederum einen Gleichgewichtszustand zwischen Aggregation und Disaggregation beschreibt.

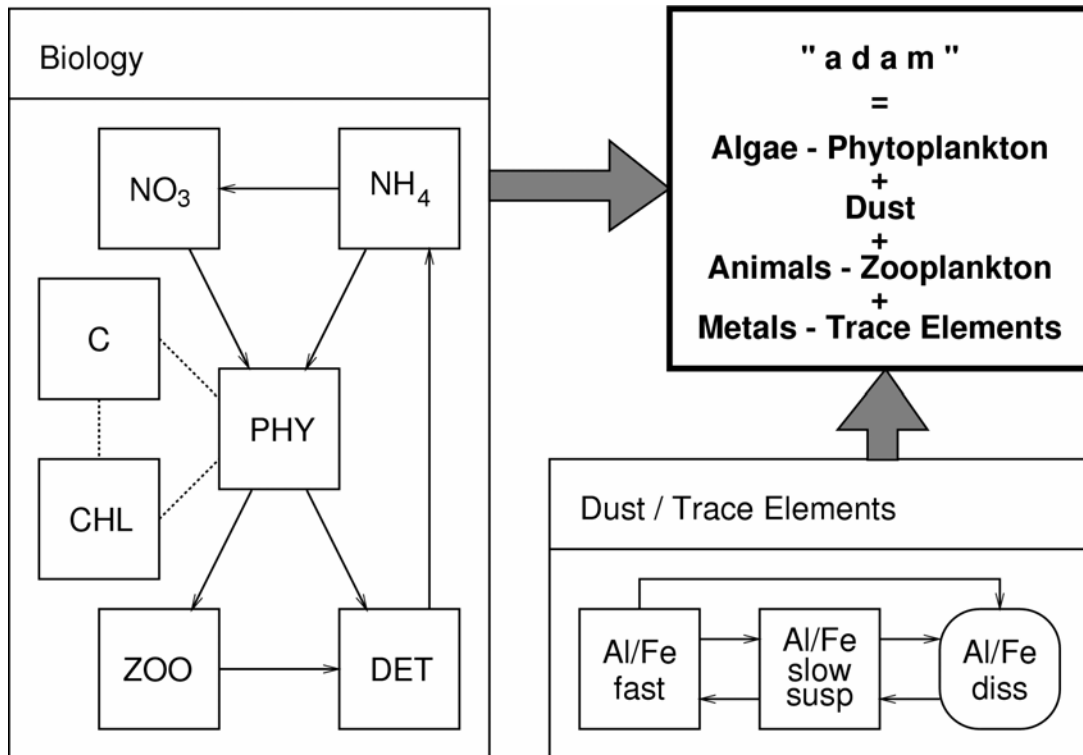


Abb. 10-1: Schema des biologischen Modellteils und des Staub-/Spurenelementmoduls.

2.2 Ergebnisse des 1D-Modells

Als Folge der Deckschichtvertiefung in den Monsunperioden wird anorganischer Stickstoff in die photische Zone gemischt und somit eine Planktonblüte erzeugt (Abb. 10-2). Die Intermonsunperioden zeichnen sich jeweils durch ein stark ausgeprägtes tiefes Chlorophyll-Maximum zwischen 50m und 80m Tiefe ab. In diesem Tiefenbereich ist der durch kleinskalige Turbulenz hervorgerufene vertikale diffusive Transport von Nährstoffen maßgebend für die Stärke der Primärproduktion und für die Erhaltung des Chlorophyllmaximums. Der Export von organischem Material in den tieferen Ozean erfolgt hauptsächlich im SW und NE Monsun. Scheraggregation produziert Aggregate unterschiedlicher Größenordnung, die dann durch ihre unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten eine weitere Zusammenballung einzelner Aggregate unterstützen. Diese beiden Prozesse verursachen die starke Sedimentation während der Monsunperioden und bewirken somit einen starken Exportfluss von organischem Material.

Die Modellergebnisse zeigen, dass neben der Aggregation organischer Partikel und Staubteilchen, die Disaggregation eine wesentliche Rolle in der Dynamik mariner Aggregate spielt. Der Vertikaltransport des partikulären organischen Materials - mit maximalen Werten unterhalb der Deckschicht - ist im wesentlichen auf die Perioden des SW und NE Monsuns beschränkt (Abb. 10-2). Unterhalb dieser Tiefe nimmt der Partikelfluss kontinuierlich ab.

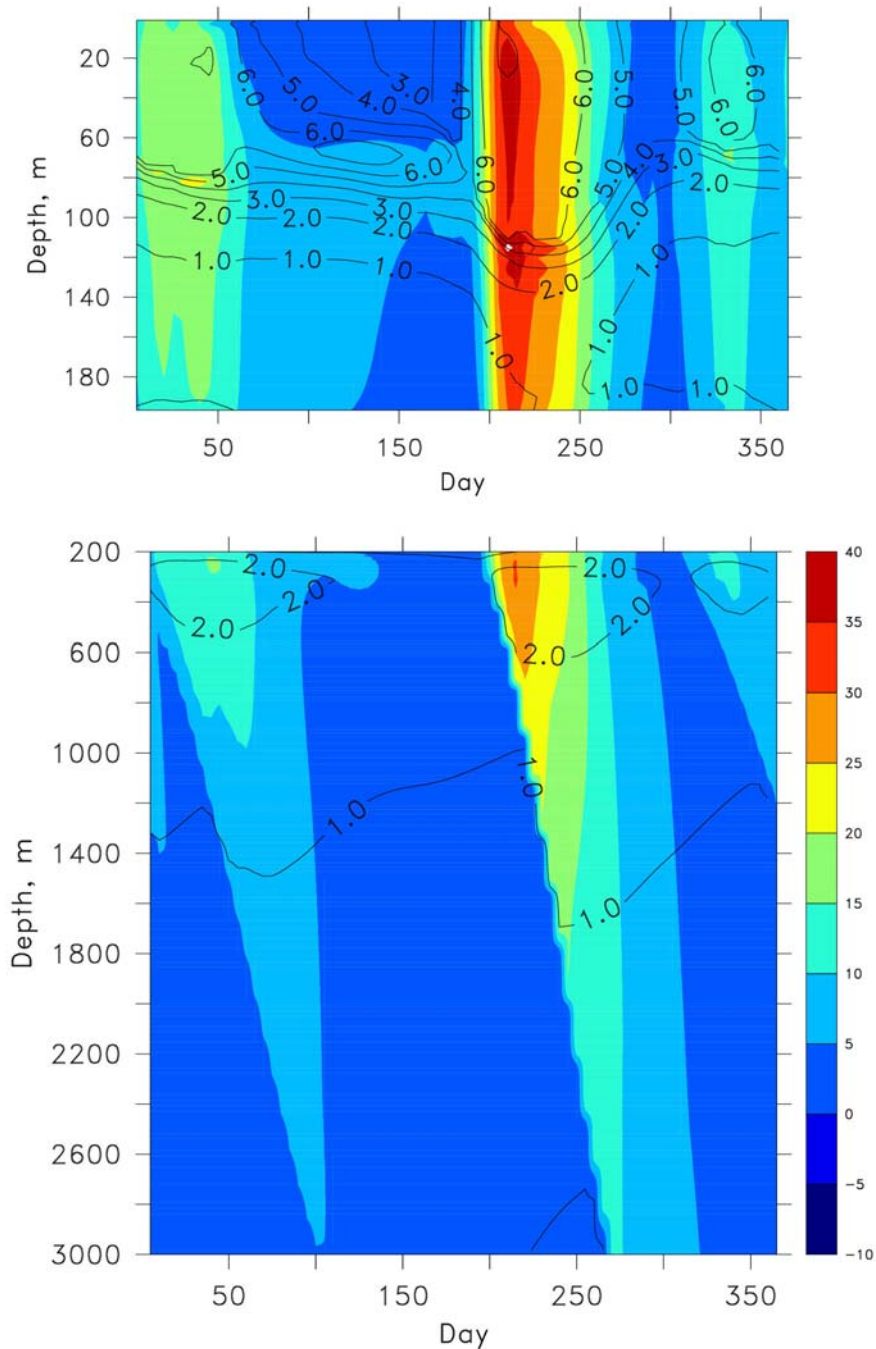


Abb. 10-2: Modellierter Jahresgang des Vertikaltransports von partikulärem organischem Stickstoffs (farbig in: $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) sowie der Konzentration von PON (Konturen in: mg N m^{-3}) in den verschiedenen Tiefenintervallen. Beachte die hohen Sinkstoff-Flüsse während des SW-Monsuns.

Diese Abnahme ist nicht nur auf Remineralisation, sondern auch auf den Dissagregationsprozess der Aggregate unterhalb der Deckschicht zurückzuführen. Daher

beträgt der modellierte der Fluss in 3000m Tiefe nur noch 25% seines ursprünglichen Wertes. Diese Modellergebnisse liegen nahe bei den Beobachtungen von Lee et al. (1998) im zentralen Arabischen Meer, die Werte um 15% gemessen haben. Ein zusätzlicher Effekt des Zerfalls der größeren Aggregate in kleinere Fragmente - in Verbindung mit einer reduzierten Abbaurate für das organische Material - ist die horizontal nahezu gleichbleibende Konzentration der suspendierten Partikel in der Tiefe, was den Messungen in der Arabischen See entspricht.

Die Intermonsun-Perioden sind durch eine oligotrophe Deckschicht gekennzeichnet, in der die biologische Aktivität gering ist. Folglich akkumulieren die suspendierten Staubteilchen atmosphärischen Ursprungs in den oberen Wasserschichten. Zu Beginn der Planktonblüte können die Staubpartikel an das organische Material fixiert und mit den schnell sinkenden Aggregaten aus der Deckschicht entfernt werden. Zum Ende der Planktonblüte sind die oberen Wasserschichten daher annähernd frei von suspendierten Staubpartikeln, da diese in den tieferen Ozean sedimentieren (Abb. 10-3). Dieser Vorgang deckt sich mit Beobachtungen (Ramaswamy et al., 1991 und Schüssler et al., eingezeichnet), in denen sich die feinkörnigen Partikel bis zum Eintritt biologisch bewirkter Sedimentationsereignisse überwiegend im oberen Ozean aufhalten. Bei einer Tiefe von 3000m erreichen die modellierten vertikale Flüsse der Staubpartikel Werte von $15-20 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ während des Sommermonsuns und etwas geringere Werte von $5-10 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im Wintermonsun.

2.3 Vergleich mit Beobachtungen

Zum Vergleich mit Beobachtungen wurden die gemessenen Al-Konzentrationen des suspendierten Materials hinzugezogen (Abb. 10-4). Al bietet sich an, da es ein Hauptbestandteil von silikatischen Komponenten der Erdkruste und damit ein wichtiges Leitelement für die Verteilung von atmosphärischen Staub ist. Die Datenbasis zur Al-Verteilung basiert auf unseren Untersuchungen während der deutschen JGOFS-Aktivitäten in der Arabischen See. Die gemessenen Al-Konzentrationen wurden in Staubkonzentrationen umgerechnet, mit der üblichen Annahme, dass der Al-Gehalt des eingetragenen Staubs 8% der Gesamtmasse beträgt.

Charakteristisch für die beobachtete Tiefenverteilung der Staubkonzentration im suspendierten Material ist die relativ geringe Konzentration in den oberen 200m. Typische Werte in diesem Bereich liegen zwischen 0 und $1 \text{ mg Staub pro m}^3$. Unterhalb von 200m bis max. 1000m steigt die Staubkonzentration auf Werte zwischen 1 und $2 \text{ mg Staub pro m}^3$ an. Messungen, die im Südwestmonsun in der westlichen Arabischen See durchgeführt wurden, zeigten etwas höhere Konzentrationen.

Unser Modell ist in der Lage, die charakteristische Verteilung der Konzentration suspendierten Staubes zu reproduzieren (Abb. 10-4) - geringe Werte in Oberflächennähe und ein Anstieg in den obersten 500 - 1000m - , obwohl eine Überschätzung der Konzentrationen im oberflächennahen Wasser zu erkennen ist.

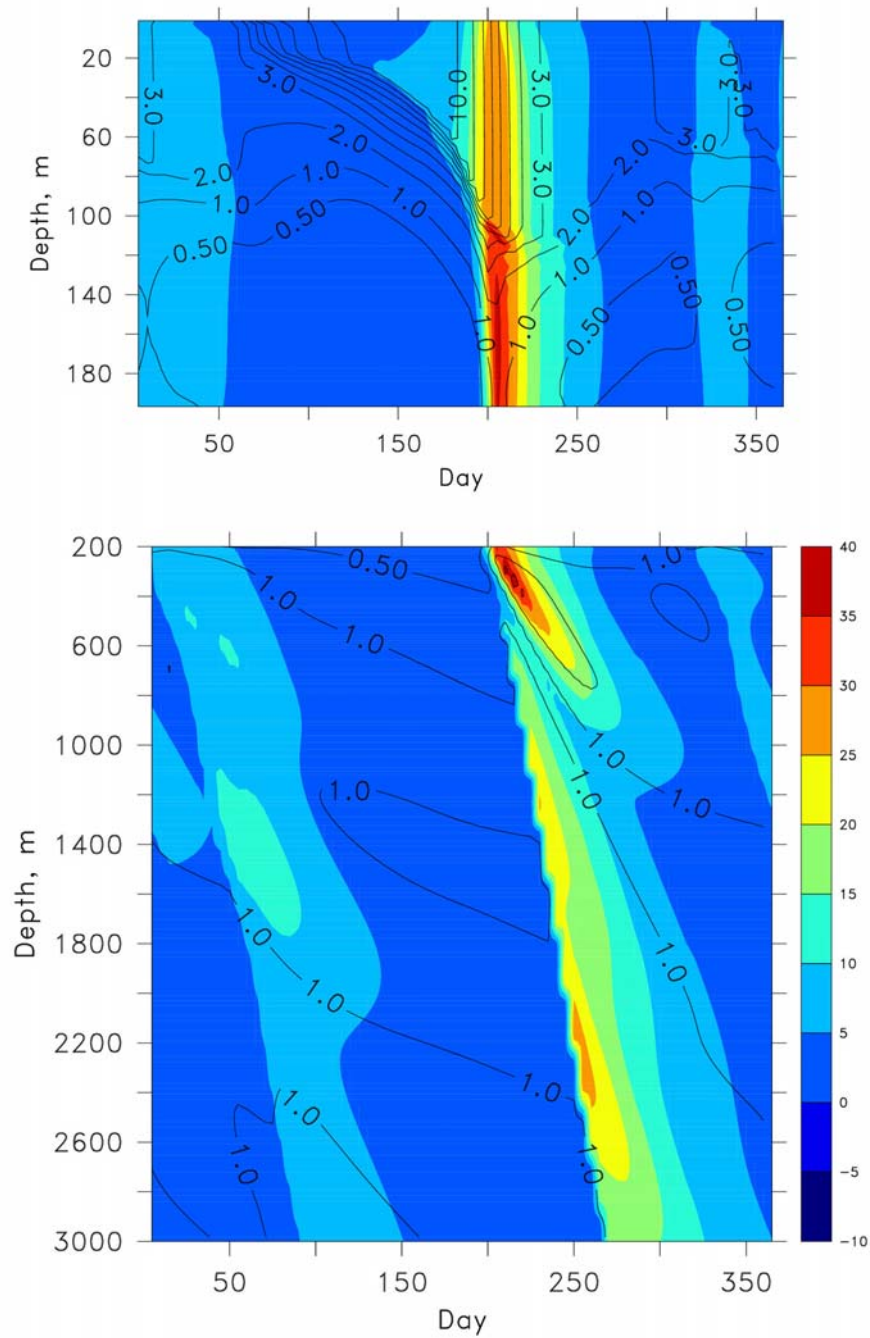


Abb. 10-3: Modellierter Jahrgang des Vertikaltransports von Staub (farbig in: $\text{mg N m}^{-2} \text{d}^{-1}$) sowie der Konzentration von Staub (Konturen in: mg m^{-3}) in den verschiedenen Tiefenintervallen. Beachte die ebenfalls hohen Staub-Flüsse durch „scavenging“ während des SW-Monsuns.

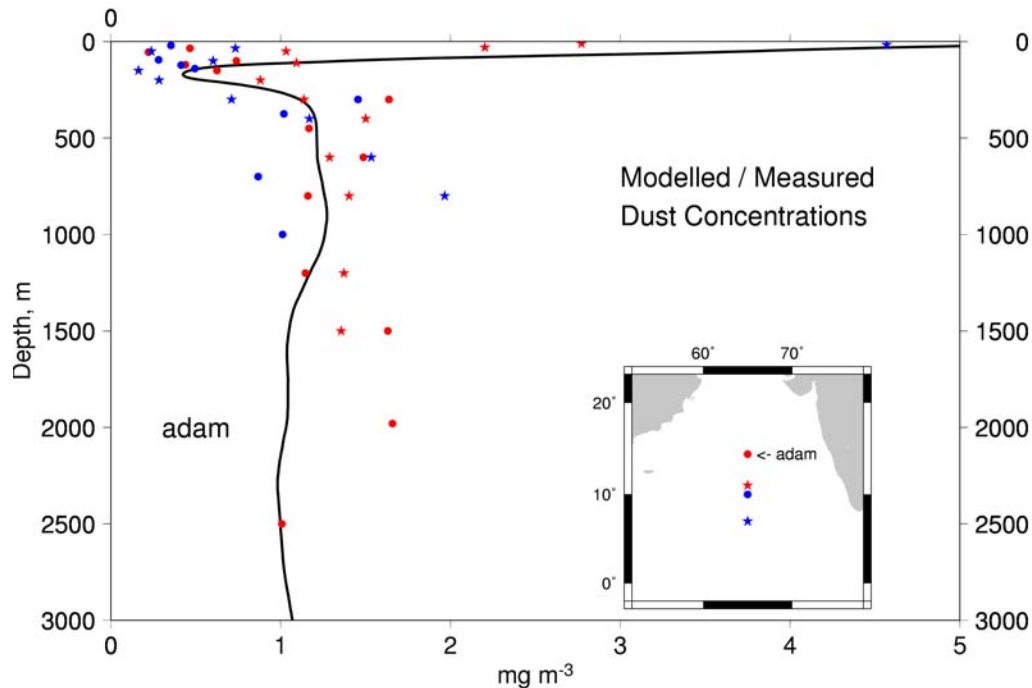


Abb. 10-4: Modellierte (1D) und gemessene Vertikalverteilung der Staubkonzentration in der Arabischen See. Ausgezogene Linie: Jahresmittel an der Station CAST. Verschiedene Vertikalprofile (Kreise und Sterne: Lokation siehe eingeblendete Karte) der Expeditionen M32-3 und SO117 kombiniert, um den allgemein starken Anstieg in den obersten 800m und die Übereinstimmung mit dem Modell deutlich zu machen.

Diese Diskrepanz kann durch das Vorkommen von Pikoplankton erklärt werden, das durch Aggregation den Staub aus den oberen Wasserschichten entfernen könnte. Hohe Konzentrationen des Pikoplanktons wurden insbesondere im Zwischenmonsun in den oligotrophen oberen Wasserschichten beobachtet (Liu et al., 1998) und sind im Modell nicht berücksichtigt. Eine starke Akkumulation der eingetragenen Staubpartikel ist daher in den Modellergebnissen insbesondere im Zwischenmonsun zu erwarten.

2.4 Ergebnisse des 3D-Modells

Durch Einbindung der Aggregationsmodule (Staub und organische Aggregate) in ein biogeochemisches Zirkulationsmodell (TP 16, Maier-Reimer) sollten Erkenntnisse über das Verhalten der Aggregate und über die Auswirkungen der Partikeldynamik auf das Herabsinken des partikulären Materials in den verschiedenen Provinzen der Arabischen See gewonnen werden. Im Gegensatz zu konventionellen Modellen, in denen die Sinkgeschwindigkeiten vorgegeben werden, wird hier das Herabsinken der Aggregate über deren Größenverteilung unter Einbeziehung eines empirischen Zusammenhangs zwischen Partikeldurchmesser und Sinken berechnet.

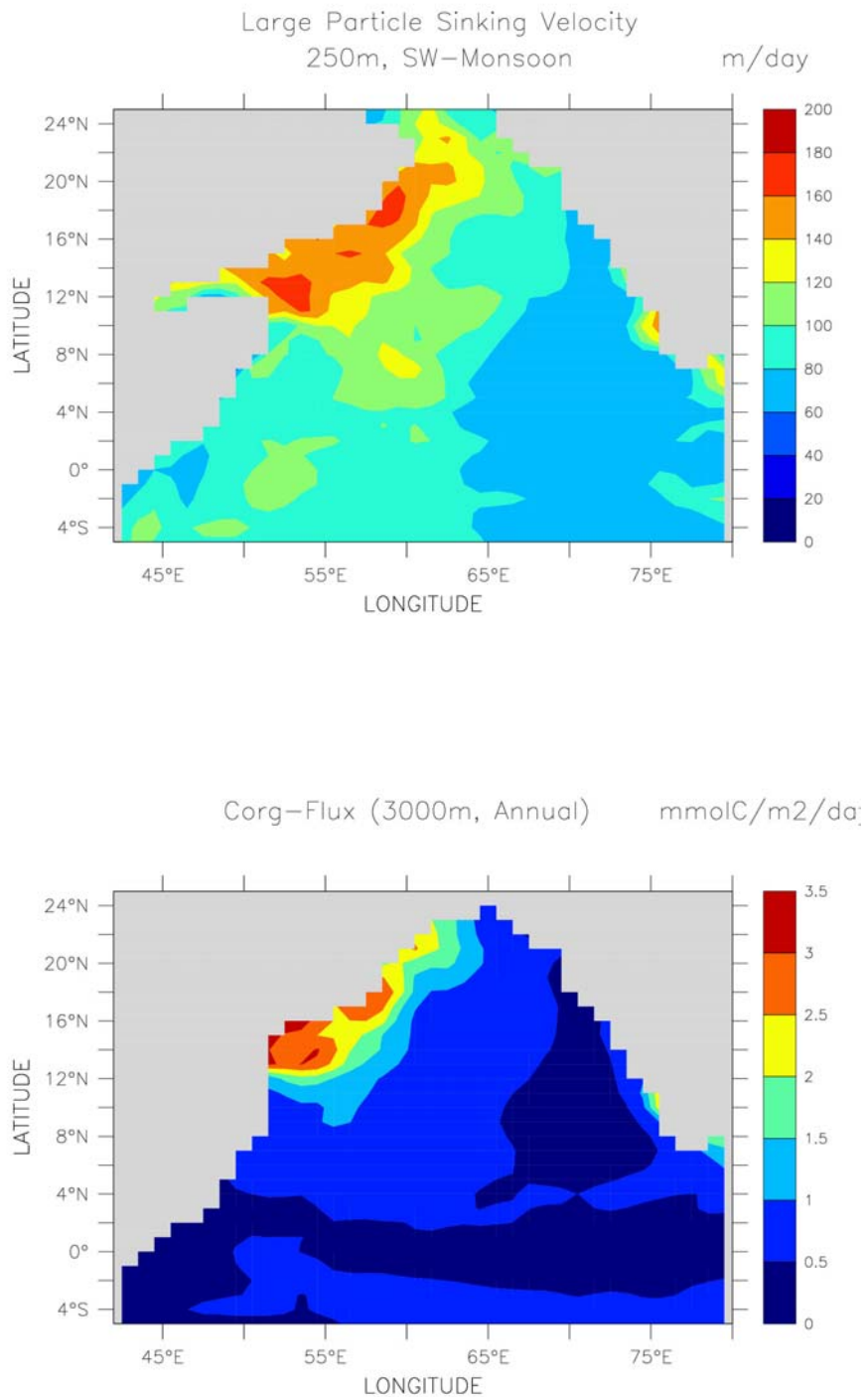


Abb. 10-5: a) Modellierte (3D) mittlere Sinkgeschwindigkeiten der größeren Aggregate (Durchmesser > 53 μ m) während des SW-Monsuns in 250m Tiefe. b) Modellierter Jahresmittelwerte des partikulären organischen Kohlenstoff-Flusses in 3000 m Tiefe, in guter Übereinstimmung mit den (wenigen) Messungen (vgl. Abb. 10-6).

Da das organische Material während des Herabsinkens biologisch abgebaut wird, ist für eine realistische Abschätzung des vertikalen Kohlenstofftransports eine genaue Formulierung der Sinkgeschwindigkeit notwendig. Die im Modell berechneten Sinkgeschwindigkeiten hängen von der Turbulenz in der Deckschicht und von der Stärke der Produktion ab und zeichnen sich daher durch eine starke zeitliche und räumliche Variabilität aus (Abb. 10-5a). Maximale Sinkgeschwindigkeiten um 180 m pro Tag werden während des SW-Monsuns für die größeren Aggregate ($> 53 \mu\text{m}$ Durchmesser) in der westlichen Arabischen See berechnet. Typisch sind die geringeren Werte in Oberflächennähe und eine Zunahme zwischen Deckschicht und 200 m bis 400 m Tiefe, sowie eine Abnahme zur östlichen Arabischen See hin.

Untersuchungen mit Hilfe von Sinkstofffallen über Transportraten von organischem Kohlenstoff und dessen saisonale und regionale Variabilität wurden im Rahmen des internationalen JGOFS-Programmes in den verschiedenen Regionen der Arabischen See durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen deuten darauf hin, dass in der östlichen und zentralen Arabischen See mit jährlichen Flussraten des partikulären organischen Kohlenstoffes (POC) in der Tiefsee (bei 3000m) um $0.5 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ zu rechnen ist (Lee et al., 1999, Haake et al., 1993). Zum westlichen Rand hin steigen die Flüsse an und liegen in dem Bereich zwischen 1.0 und $1.3 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Abb10-6).

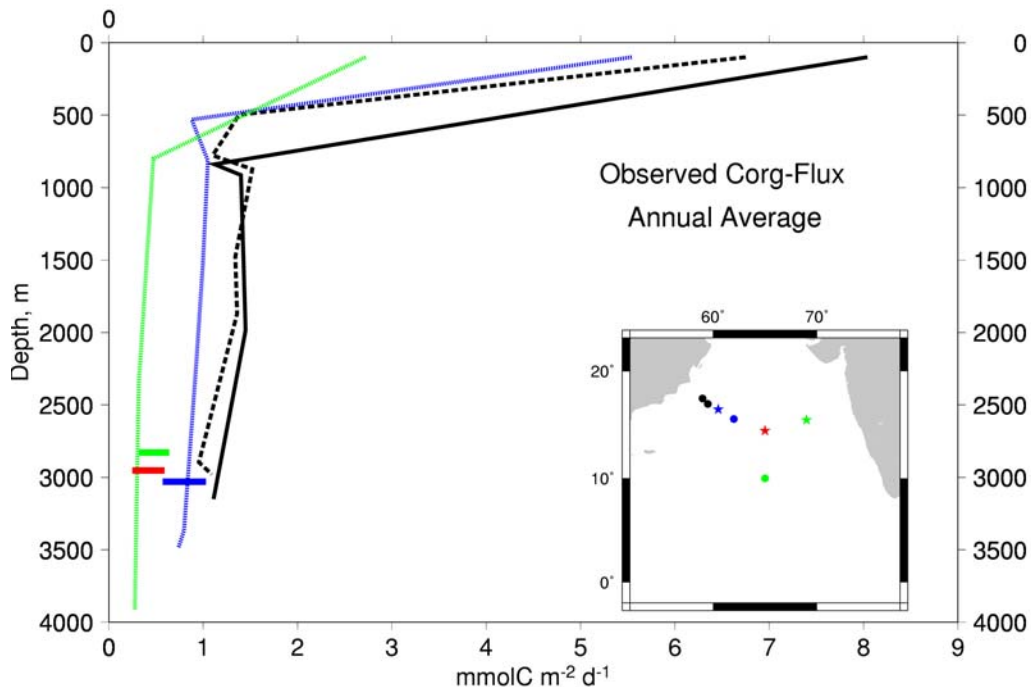


Abb. 10-6: Gemessene Jahresmittelwerte des partikulären organischen Kohlenstoffflusses. Profile: Daten von Lee et al. (1998). Balken: gemessene Bereiche der mit Sternen bezeichneten Positionen von Haake et al. (1993).

Entsprechende Flussraten in der Tiefe wurden auch von dem Modell berechnet. Der Vertikaltransport des partikulären organischen Kohlenstoffs in der Arabischen See ist in erster Näherung eng mit Primär- und Exportproduktion verbunden, obwohl Unterschiede zwischen der westlichen und östlichen Arabischen See festzustellen sind. So liegt das Verhältnis zwischen jährlicher Primärproduktion und POC Fluss im westliche Becken zwischen 4% und 5%, während im Ostteil Verhältnisse zwischen 5% und 7% berechnet wurden. Ausgenommen ist das Gebiet vor der Küste von Yemen, in dem in den Modellrechnungen ebenfalls Werte zwischen 5% und 7% auftraten. Hier spielt die horizontale Advektion des partikulären Materials eine nicht unbedeutende Rolle für den Massefluss in der Tiefsee. Ähnliche Gradienten weist die Horizontalverteilung des POC-Flusses relativ zur Exportproduktion auf. Als Exportproduktion wird hier der Anteil des produzierten organischen Materials definiert, der nicht mehr für die weitere Produktion zur Verfügung steht (u.a. abgestorbenes Plankton). Etwa 70% bis 80% des herabsinkenden POC werden zwischen dem oberen Ozean und der Tiefsee abgebaut, so dass zwischen $0.5 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in der zentralen Arabischen See und $2.6 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im (küstennahen) westlichen Teil in größere Tiefen sinken (Abb. 10-5b).

Die Dynamik der organischen Partikel in der Deckschicht hat auch einen bedeutenden Einfluss auf die Aufenthaltsdauer der staubassoziierten Spurenelemente im oberen Ozean. Der aus der Atmosphäre eingetragene Staub wird in die organischen Aggregate eingebunden und in die tieferen Wasserschichten transportiert (particle scavenging). Im Gegensatz zum organischen Material unterliegen die in den Staubpartikeln enthaltenen Spurenmetalle wie z.B. Al kaum Veränderungen und können somit als ergänzende Zustandsvariable zur Beschreibung der Partikeldynamik hinzugezogen werden. Zur Modellierung der Staubeintrag und des Transports von atmosphärischen Staub im Ozean, wurde der Staubeintrag an der Meeresoberfläche den Ergebnissen eines am MPI für Biogeochemie in Jena entwickelten Atmosphärenmodells entnommen (Werner et al., 2002). Danach beschränkt sich das Gebiet mit extrem starker jährlicher Staubdeposition auf die westliche Arabische See und deckt sich somit mit den Auftriebsgebieten des SW-Monsuns. Der in die Deckschicht gelangte atmosphärische Staub wird hier wesentlich effektiver aus dem oberen Ozean entfernt, als z.B. in der zentralen und östlichen Arabischen See. Folglich zeigen die modellierten Staubkonzentrationen im SPM, die über Aggregations- und Disaggregationsprozesse, sowie über Remineralisierung organischen Materials in direkter Wechselbeziehung mit den größeren herabsinkenden Aggregaten stehen, einen geringeren West-Ost Gradienten, als von dem atmosphärischen Staubeintragsfeldern zu erwarten wäre (Abb. 10-7a,b) Diese Modellergebnisse werden auch von den Beobachtungen unterstützt (Abb. 10-4).

Die beobachtete Zunahme der Staubkonzentration zwischen 100m und 400m bis 800m Tiefe wird auch vom Modell in der westlichen Arabischen See während des SW-Monsuns reproduziert (Abb. 10-7a,b). 'Particle Scavenging' reduziert die Konzentration im oberen Ozean und lässt so einen vertikalen Gradienten entstehen. Wie im Modell simuliert, können folgende Prozesse verantwortlich für die Zunahme der Konzentration in den tieferen Schichten sein: a) die Staubkonzentration erhöht sich in der Tiefe als Folge einer Abnahme der mittleren Sinkgeschwindigkeit und b) durch Remineralisierung organischen Materials werden die eingefangenen Staubpartikel wieder frei und bleiben in dem Tiefenhorizont bis zum erneuten „Einfangen“ hängen. In der östlichen Arabischen See ist die modellierte Planktonblüte im SW-Monsun nicht stark genug, um den Staub effektiv aus der Deckschicht zu entfernen. Dies geschieht in diesem Gebiet in den Wintermonaten.

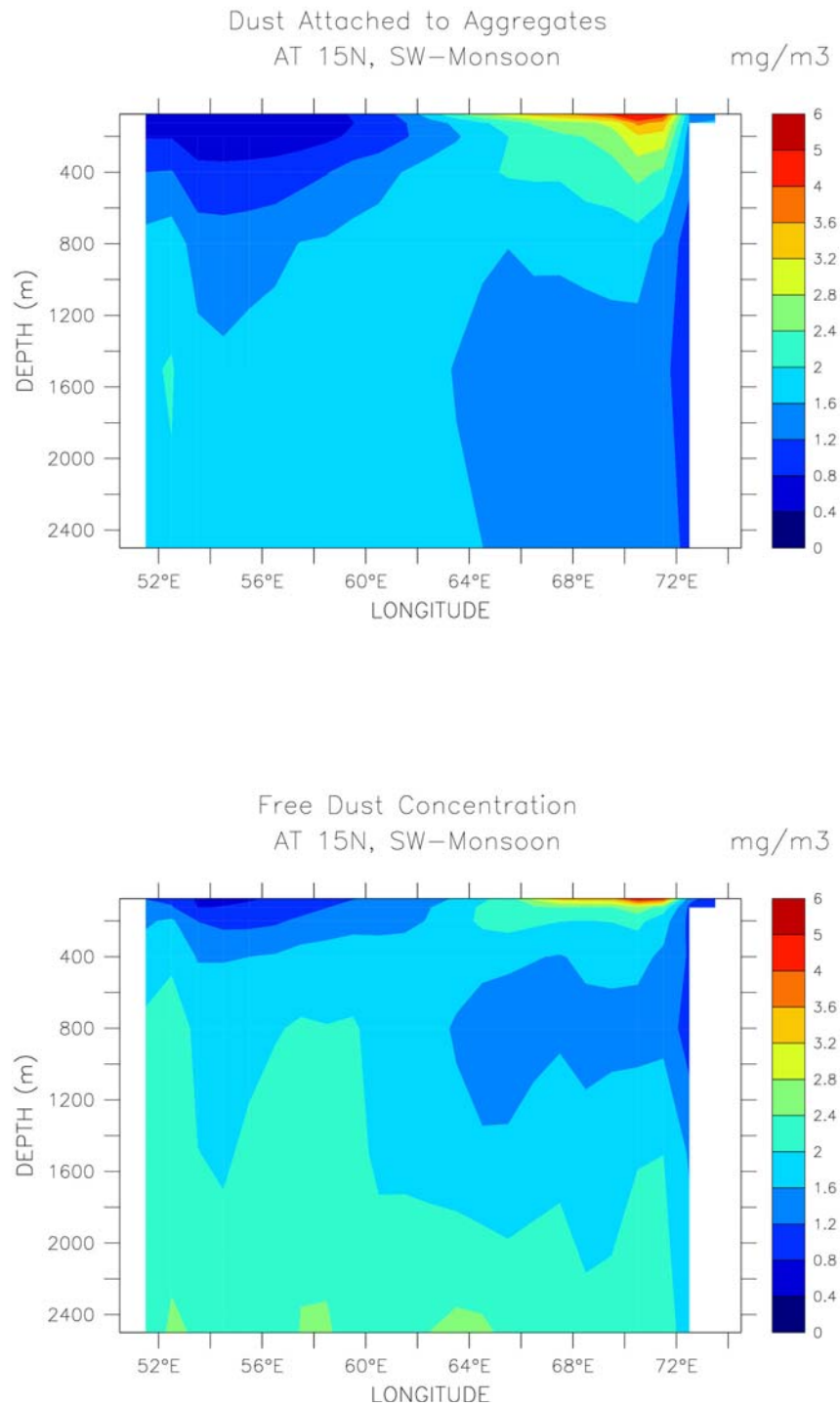


Abb. 10-7: Modellerte (3D) Tiefenverteilungen entlang des 15. Breitengrades während des SW-Monsuns: a) der Staubpartikel, die an die organischen Aggregate gebundenen sind, und b) der freien Staubpartikel. Beachte die Zunahmen in den obersten 800m, die aber nur im westlichen Teil auftreten, im östlichen Teil ist die Produktivität zu gering.

3 Relevanz der Ergebnisse für die JGOFS-Ziele

Eines der beiden Hauptziele von JGOFS lautet „die biogeochemischen Kreisläufe von Kohlenstoff und assoziierten Elementen im Meer zu qualifizieren und zu quantifizieren“. Da die Arabische See bezüglich der in diesem Vorhaben untersuchten Spurenelemente, aber auch einige anderer Parameter ein ausgesprochenes „Datenmangelgebiet“ darstellt, waren die hier erhobenen Daten notwendig für die weitere Modell-Auswertung während der Synthesephase. Die Notwendigkeit von Modellrechnungen zur Quantifizierung der bisher identifizierten, steuernden Prozesse wurde bereits deutlich hervorgehoben. Die Bedeutung der Modellierung kommt klar auch im zweiten Hauptziel JGOFS zum Ausdruck, nämlich „einen möglichst umfassenden Datensatz bezüglich der relevanten Elemente zu nutzen, um mit Hilfe von Modellen zukünftige Entwicklungen (besser) vorhersagen zu können“.

Zusammenfassend können aus den Modellergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- a) die beobachtete geographische Verteilung des POC-Flusses in 3000m Tiefe wird von dem erweiterten 3D-Modell gut reproduziert, ebenfalls stimmen die modellierten jährlichen Staubflüsse in der Tiefsee mit den Beobachtungen überein,
- b) die gemessenen Profile von Al (=Staub) im suspendierten Material werden in der zentralen und westlichen Arabischen See vom Modell gut wiedergegeben,
- c) die relative Bedeutung der Quell- und Senkterme des suspendierten Staubs (Aggregation /Disaggregation und Remineralisierung organischen Materials) scheint gut im Modell berücksichtigt zu sein,
- d) Aggregation und Aggregat-Sinken bilden wirksame Mechanismen, die den Staub - und damit die im TP 10 untersuchten Spurenelemente - aus der Deckschicht in größere Tiefen transportieren,
- e) die zeitliche Entwicklung eines Sedimentationsereignisses für Al hängt kritisch vom Verlauf des Staubeintrages in Zusammenhang mit einer Planktonblüte ab,
- f) der Zerfall von größeren Aggregaten in kleinere Fragmente (Disaggregation) steuert die Flussraten sowohl der biogenen als auch der lithogenen Partikel im tieferen Ozean,
- g) die beobachtete Zunahme des suspendierten Al in den oberen 800m entsteht durch die Abnahme der Sinkgeschwindigkeit und/oder durch Freisetzen von Staubpartikeln aus organischem Material aufgrund des bakteriellen Abbaus.

4 Literatur

- Clegg S. L., Whitfield M. (1990) A generalized model for the scavenging of trace metals in the open ocean - Part I. particle cycling. Deep Sea Res. 37(8), 809-832
- Haake, B., Ittekkot, V., Rixen, T., Ramaswamy, V., Nair, R.R., Curry, W.B. (1993). Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Arabian Sea. Deep Sea Research I, 40, 1323-1344.

- Jackson G. A. (1990) A model of the formation of marine algal flocs by physical coagulation processes. *Deep Sea Res.* 37(8), 1197-1211
- Kriest I., Evans G. T. (1999) Representing phytoplankton aggregates in biogeochemical models. *Deep Sea Res. I*, 46, 1841-1859
- Lee, C., Murray, D.W., Barber, R.T., Buesseler, K.O., Dymond, J., Hedges, J.J., Honjo, S., Manganini, S.J., Marra, J., Moser, C., Peterson, M.L., Prell, W.L., Wakeham, S.G., (1998). Particle organic fluxes : compilation of results from the 1995 US JGOFS Arabian Sea Process Study. *Deep Sea Research II*, 45, 2489-2501.
- Liu, H., Campbell, L., Landry, M.R., Nolla, H.A., Brown, S.L., Constantinou, J. (1998) *Prochlorococcus* and *Synechococcus* growth rates and contributions to the production in the Arabian Sea during the 1995 Southwest and Northeast Monsoons. *Deep Sea Research II*, 45, 2327-2352.
- McCave I. N. (1984) Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean. *Deep Sea Res.* 31(4), 329-352
- Ramaswamy, V., Nair, R.R., Manganini, S., Haake, B., Ittekkot, V., (1991) Lithogenic fluxes to the deep Arabian Sea measured by sediment traps. *Deep-Sea Research*, 38, 169-184.
- Schüßler, U., Balzer, W., Deeken, A. On the biogeochemistry of aluminium in the Arabian Sea. Submitted to *Deep Sea Research*.
- Werner, M., Tegen, I., Harrison, S.P., Kohfeld, K.E., Prentice, I.C., Bulkanski, Y., Rodhe, H., Roelandt, C. (2002) Seasonal and interannual variability of the mineral dust cycle under present and glacial climate conditions. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108 (D24).

Einzureichende Manuskripte

- Schüßler, U.W., W. Balzer and A. Deeken „On the biogeochemistry of aluminium in the Arabian Sea“
- Balzer, W., and U. Schüßler „Trace elements in suspended and fast sinking particles of the Arabian Sea“
- Schäfer-Neth, C., W. Barkmann, W. Balzer and U. Schüßler „Modelling the aggregate formation and sedimentation between organic and mineral particles“

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 11

Kopplung zwischen Atmosphäre und Ozean: Die Biologische Pumpe in Abhängigkeit vom Stickstoffkreislauf

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Dr. T. Rixen, Dr. A. Suthhof, Dipl. Biol. N. Loick & Prof. Dr. V. Ittekkot

Zentrum für Marine Tropenökologie

Fahrenheitstr. 6

28359 Bremen

Inhalt

Zusammenfassung	11 - 1
1 Einleitung	11 - 2
2 Ergebnisse	11 - 2
2.1 Prozesse, die den Kohlenstoffexport kontrollieren	11 - 2
2.2 Prozesse, die Regimeshifts verursachen	11 - 2
2.3 Auswirkungen von Regimeshifts auf die Biologische Pumpe	11 - 3
2.4 Paläorekord	11 - 4
2.5 Modellergebnis zur Veränderung der Monsunintensität	11 - 4
2.7 Unterstützung des Koordinators	11 - 4
3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung	11 - 5
4 Ausblick	11 - 5
5 Literatur	11 - 5
Anhang	

Zusammenfassung

Innerhalb der zweiten Synthesephase von JGOFS-Indik hat dieses Teilprojekt Prozesse identifiziert und quantifiziert, die die Effektivität der Biologischen Pumpe im Arabischen Meer steuern. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Wechselwirkungen der Biologischen Pumpe mit dem Klima, dem Stickstoff- und dem Silikatkreislauf. Die Arbeiten beruhten auf der Auswertung eines der umfangreichsten Datensätze, die für ein einzelnes Meeresgebiet existieren. Dieser Datensatz wurde aus Messungen nationaler und internationaler JGOFS-Projekte zusammengestellt. Die Untersuchungen wurden inhaltlich eng mit denen anderer Teilprojekte abgestimmt und bedienten sich der Kombination moderner Methoden wie Satellitenbeobachtung, Isotopenbiogeochemie und Modellierung. Die Ergebnisse tragen zur internationalen Synthese von JGOFS bei und werden in globale Modelle eingehen.

Im Detail zeigen die JGOFS-Indik Ergebnisse, dass sich nordhemisphärische Klimavariationen in den Sedimenten des Arabischen Meeres besser widerspiegeln als im Nord-Atlantik. Die wärmeren Phasen sind dabei durch einen stärkeren Monsun und damit auch erhöhte N₂O-Emissionen gekennzeichnet (siehe TP3). Die Auswirkung auf die Effektivität der Biologischen Pumpe sind jedoch schwer abzuschätzen, da Veränderungen der Monsunintensität Prozesse hervorrufen, die sich gegenläufig auf die Effektivität der biologischen Pumpe auswirken. Modellbasierende Studien (siehe auch Bericht des Koordinators und TP16) deuten jedoch darauf hin, dass eine Intensivierung des Monsuns zu den N₂O- auch die CO₂-Emissionen aus dem Arabischen Meer erhöht. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass das Arabische Meer zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits stark anthropogen beeinflusst war und die damit einhergehende Reduzierung des Flusseintrages die Effektivität der Biologischen Pumpe im Arabischen Meer abschwächt. Diese anthropogene CO₂-Quelle konnte bisher jedoch noch nicht quantifiziert werden.

1 Einleitung

In der Abschlussphase dieses Projekts wurden vor allem folgende wissenschaftliche Arbeitsziele verfolgt:

- Identifikation und Quantifizierung von Prozessen, über die die Monsunstärke die Effektivität der Biologischen Pumpe beeinflusst.
- Rekonstruktion der Monsunvariabilität auf verschiedenen Zeitskalen und Beschreibung der Auswirkungen dieser Variabilität auf die Biologische Pumpe.
- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Monsunsystem und anderen Klimasystemen auf verschiedenen Zeitskalen.

Eine zusätzliche Aufgabe des Teilprojektes war die Unterstützung des Koordinators.

2 Ergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst. Ausführliche Darstellungen befinden sich in den im Anhang beigefügten Veröffentlichungen.

2.1 Identifikation und Quantifizierung von Prozessen, über die die Monsunstärke die Effektivität der Biologischen Pumpe beeinflusst.

Es konnte gezeigt werden, dass die Stoffflüsse des organischen Kohlenstoffs während des Nord-Ost-Monsuns (NE-Monsun) durch das winterliche Abkühlen der Wasserschichten und die wind-gesteuerte Durchmischung der oberen Wassersäule kontrolliert werden. Zu Zeiten des Süd-West-Monsuns (SW-Monsun) werden die C_{org} -Flüsse durch den windgetriebenen Auftrieb gesteuert (Rixen et al. 2000A, siehe Abb.1).

Die Effektivität der biologischen Pumpe wird aber darüber hinaus von der biogenen Karbonatausfällung bestimmt. Da bei der Bildung von organischem Kohlenstoff CO_2 aufgenommen und bei der Ausfällung von Karbonat CO_2 freigesetzt wird, ist das Verhältnis zwischen Organischem und Karbonat- Kohlenstoffexport (Rain Ratio) ein häufig genutzter Indikator für die Effektivität der biologischen Pumpe. Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass das „rain ratio“ zu Zeiten von Diatomeenblüten erhöht ist und beim Übergang von Diatomeen- zu Blüten andere Algen auf bis zu 30% reduziert werden kann.

Ferner konnte das Projekt zeigen, dass Diatomeenblüten im Arabischen Meer durch den Mangel an gelöstem Silikat limitiert werden. Sie treten daher nur in den Zeiten auf, in denen die vom Monsuns getriebene Durchmischung und der Auftrieb so stark sind, dass sie ausreichend Silikat aus tieferen Wasserschichten an die Oberfläche transportieren können. Wenn ein starker Monsun aber vermehrt Silikat für Diatomeen zur Verfügung stellt, so ist davon auszugehen, dass die Effektivität der biologischen Pumpe mit zunehmender Monsunintensität steigt. Modellergebnisse (siehe TP16 und Bericht des Koordinators) zeigen hingegen CO_2 -Emissionen, die mit zunehmender Monsunstärke ansteigen. Demnach scheint zumindest nach heutigen Erkenntnissen diese Effektivitätssteigerung der Biologischen Pumpe nicht stark genug zu sein, um die CO_2 -Emissionen zu reduzieren, die einen intensiveren Monsuns begleiten.

Neben dem Silikateintrag aus dem Indischen Ozean (von Süden) sind Flüsse und Staubeinträge wichtige Silikatquellen des Arabischen Meeres. Bewässerungs- und Staudammsysteme haben den Sedimenteintrag durch Flüsse (z.B. Indus Narmada, Tapti) in das Arabische Meer während der letzten 140 Jahre stark reduziert. Nach Bau des Tarbela Dammsystems verringerte sich die ursprüngliche Flussfracht des Indus von 250 Mill t yr⁻¹ auf 50 Mill t yr⁻¹ (Ittekkot und Arain, 1986). Desweiteren werden gerade zur Zeit große Staudammprojekte entlang der Flüsse Narmada und Tapti verwirklicht. Untersuchungen von Tegen et al. (1996) schätzen die atmosphärischen Sedimenteinträge auf 75-115 Mill t pro Jahr. Damit ist der atmosphärische Eintrag so groß wie der derzeitige Eintrag über die Flüsse. Der Staubeintrag ist auch ausreichend, um die gemessenen Flussraten lithogenen Materials in den Sedimentfallenproben zu erklären. Das lässt vermuten, dass sich das Arabische Meer seit ca. 1850 von einem fluss- zu einem ‚nur noch‘ eolisch-gesteuerten System wandelt. Es wird daher vermutet, dass der heutige Silikatmangel im Arabischen Meer zum Teil anthropogen verursacht ist. Im Vergleich zum Golf von Bengalen, der trotz Dammbauten immer noch von Flusseinträgen dominiert wird, ist die biologische Pumpe effizienter als im Arabischen Meer. Das lässt vermuten, dass Bewässerungsmaßnahmen an Land die marine CO₂-Aufnahme reduzieren, indem sie zum Si-Mangel beitragen und somit die Effektivität der Biologischen Pumpe schmälern. Eine Quantifizierung dieser anthropogenen CO₂-Quelle steht noch aus.

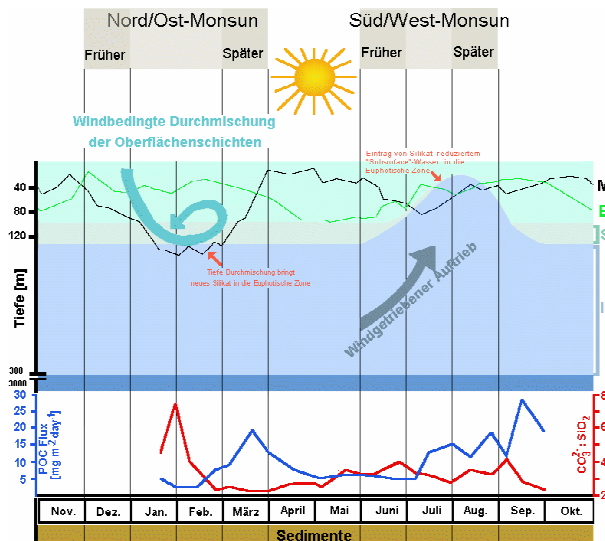


Abb.1: Vereinfachte schematische Darstellung der saisonalen Verschiebung der Durchmischungsschicht (schwarze Linie = ML = "Mixed Layer") und der Euphotischen Zone (grüne Linie = EZ) aufgrund von Winddurchmischung und Auftrieb im Arabischen Meer und den damit zusammenhängenden C_{org}-Flüssen inklusive der Karbonat/ biogenes Opal Verhältnisse. Tiefe der Durchmischungsschicht und der Euphotischen Zone (1% Lichtintensität) wurden an der ONR-Fallenstation gemessen und nach Dickey et al. (1998) modifiziert. ML ist dabei die Wassertiefe, in der die Temperatur 1° C niedriger ist als an der Oberfläche. Die C_{org}-Flüsse (violette Linie) und Rain-Ratios (rote Linie) wurden anhand von Sedimentproben aus 3000 m Tiefe aus dem westlichen Arabischen Meer ermittelt. SS = "Subsurface" Wasserschicht (100 - 150 m), IM = "Intermediate" (Zwischen) Wasserschicht (150 - 300 m)

2.2 Rekonstruktion der Monsunvariabilität auf verschiedenen Zeitskalen und Beschreibung der Auswirkungen dieser Variabilität auf die Biologische Pumpe

Aufgrund der unterschiedlich intensiven Denitrifikation innerhalb der SMS in Abhängigkeit von Klimaänderungen, ergeben sich potentielle Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt des globalen Ozeans und damit auf die Effektivität der Biologischen Pumpe. Dabei wird angenommen, dass eine erhöhte Denitrifikation aufgrund eines intensiveren Monsuns während der Warmzeiten die Effektivität der biologischen Pumpe reduziert. Inwieweit dieser Prozess durch eine verstärkte Einmischung von Silikat und der damit verbundenen Erhöhung des „rain ratios“ kompensiert wird (siehe Abschnitt 2.2), konnte bisher noch nicht geklärt werden. Eine weitere klimatische Rückkopplung entsteht auch durch N₂O-Emissionen aus dem Arabischen Meer, die nach bisherigen Erkenntnissen mit zunehmender Monsunstärke ansteigen (siehe TP 3).

2.3 Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Monsunsystem und anderen Klimasystemen auf verschiedenen Zeitskalen.

Das Projekt konnte zeigen (siehe Suthhof et al., 1999), dass es eine verblüffend große Übereinstimmung zwischen der Klimaentwicklung im Bereich des Nordatlantiks und des Arabischen Meeres gibt. Suborbitale Klimaänderungen wirken sich schnell und umfassend auf die biogeochemischen Prozesse aus. Bond-Zyklen lassen sich an den Stickstoff-Isotopenverhältnissen im Arabischen Meer meist klarer erkennen, als dies anhand verschiedener Indikatoren in Sedimenten des Nord-Atlantiks möglich ist (vergl. Abschlussbericht 2000 und Zwischenbericht 2002). Das Arabische Meer ist daher ein sensibler Klimaindikator, und zukünftige Veränderungen dürften sich entsprechend auf die regionale Biogeochemie und besonders auf die Intensität der Sauerstoffminimumschicht (SMS) auswirken.

2.4 Unterstützung des Koordinators

Neben der Forschung gehört die Unterstützung des Koordinators zu den Aufgaben des Teilprojektes. Hierfür wurden zusätzlich zu den Vorbereitungen der JGOFS-Treffen Anfang Dezember 2001 und im Juli 2003 in Kiel vor allem eine Darstellung von JGOFS-Indik im Internet und eine Broschüre erstellt. Zudem wurde an einer interaktiven JGOFS-Präsentation mitgewirkt.

3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

Die geplante Zusammenstellung und statistische Auswertung von Daten (z.B. Windstress, Tiefe der Durchmischungsschicht, Partikelfluss, Stickstoffisotope, sedimentäre Akkumulationsraten) ist beendet. Die Ergebnisse zu den mit einem 3D-Modell durchgeführten Sensitivitätsstudien (TP 16, E. Maier-Reimer, MPI Meteorologie, Hamburg) liegen vor und sind dem Bericht des TP 16 zu entnehmen. Alle technischen und wissenschaftlichen Ziele wurden weitgehend erreicht.

4 Ausblick

Die Arbeiten im Rahmen von JGOFS Indik zeigten, dass das Arabische Meer eine Quelle für CO₂ ist, die mit zunehmender Intensität des Monsuns größer wird (siehe Faltblatt). Menschliche Eingriffe, z.B. durch die Etablierung von Bewässerungssystemen, scheinen die CO₂-Emission zusätzlich zu erhöhen. Diese und weitere bisher nicht berücksichtigte anthropogene Einflüsse auf die marine Treibhausgasemissionen gilt es in Zukunft zu identifizieren und zu quantifizieren.

5 Literatur (Manuskripte mit "*" sind als Anhang beigefügt)

Ittekkot, V. and R. Arain (1986). "Nature of particulate organic matter in the river Indus, Pakistan." Geochimica et Cosmochimica Acta **50**: 1643-1653.

Ittekkot, V., R. R. Nair, et al. (1991). "Enhanced particle fluxes in Bay of Bengal induced by injection of fresh water." Nature **351**: 385-387.

Rixen, T., B. Haake und V. Ittekkot (2000A). "Sedimentation in the western Arabian Sea: the role of coastal and open-ocean upwelling." Deep Sea Research II **47**: 2155-2178.

Rixen, T., V. Ittekkot, B. Haake-Gaye und P. Schäfer (2000B). "The influence of the SW monsoon on the deep-sea organic carbon cycle in the Holocene." Deep Sea Research II **47**: 2629-2651.

Tegen, I. and I. Fung (1995). "Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification." Journal of Geophysical Research **100**(D9): 18,707-18,726.

Anhang

Rixen, T., M.V.S. Gupta und V. Ittekkot (eingereicht 2003). „Particle flux and sedimentation.“ in *The Arabian Sea*, S. Smith (Ed.), Berlin, Heidelberg: Springer.

Rixen, T. et al. (eingereicht 2003) "Diatoms and their effects on the efficiency of the biological pump in the Arabian Sea upwelling System." Global Biogeochemical Cycles.

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 14

Biologische Stoffflüsse im Bathypelagial des Arabischen Meeres

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Dr. R. Koppelman & Dr. H. Weikert

Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft
Zeiseweg 9
22765 Hamburg

Inhalt

Zusammenfassung	14 - 1
1 Einleitung	14 - 2
2 Ergebnisse	14 - 2
3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung	14 - 7
4 Ausblick	14 - 7
5 Literatur	14 - 8
Anhang	
Koppelman et al. (im Druck)	
Koppelman et al. (akzeptiert), J. Geophys. Res.	
Koppelman & Weikert (in Vorb., Draft version)	

Zusammenfassung

Das deutsche JGOFS-Indik Teilprojekt 14 soll die Transferpfade des Kohlenstoffs im Mesozooplankton der Tiefsee untersuchen. Es wurden drei Expeditionen in das Arabische Meer durchgeführt; dabei wurde ein umfangreicher Satz Zooplanktonproben gewonnen. Ziel des Projektes war es, die feintaxonomischen Strukturen des Mesozooplanktons und dessen Bedeutung für den Kohlenstofftransfer im Rahmen einer nationalen und internationalen Synthese zu untersuchen, um Mechanismen und Prozesse im Pelagial anhand von Schlüsseltaxa genauer zu erfassen. Weiterhin erfolgte ein Abgleich der Ergebnisse mit Daten aus dem Benthos, die im BMBF-Projekt BIGSET gewonnen wurden. In Rahmen des abgeschlossenen Projekts wurden erstmals Regenerationszeiten für verschiedene Größenklassen des Tiefsee-Zooplanktons auf der Basis energetischer und somatischer Kohlenstoffflüsse bestimmt. Zusätzlich zu den im Antrag beschriebenen Aufgaben wurde das Mesozooplankton in Relation zu den Freiwasser-Bakterien betrachtet.

1 Einleitung

Das Arabische Meer ist eines der vier Schlüsselgebiete, die von der internationalen JGOFS Planning Group ausgewählt wurden, um die Rolle der Ozeane im Klimawirkungsgefüge zu untersuchen (SCOR 1992). Aufgabe des Vorhabens „Biologische Stoffflüsse im Bathypelagial“ war es, die weitgehend unbekannt Transferpfade des Kohlenstoffs innerhalb der Organismengemeinschaften des Bathypelagials, deren Wechselwirkungen untereinander und mit dem Benthos bzw. den in flacheren Kompartimenten der Wassersäule lebenden Gemeinschaften zu erforschen. Als Hauptfragestellung sollte der Kohlenstoffbedarf der bathypelagischen Fauna in Relation zum messbaren Eintrag ermittelt werden.

Das Teilprojekt 14 hat auf drei Expeditionen in das Arabische Meer (Oktober 1995, April 1997, Februar 1998) umfangreiches Zooplanktonmaterial gesammelt. Auf der Basis der Biomasse-Verteilungen (Koppelman und Weikert 1997, Koppelman et al., im Druck) konnten Erkenntnisse zum Stoffumsatz im Bathypelagial gewonnen werden (Koppelman und Weikert 1999, Koppelman et al. 2000), und mit Hilfe stabiler Stickstoffisotope wurden die trophischen Ebenen für verschiedene Zooplankton-Größenklassen ermittelt (Koppelman und Weikert 2000). Ergebnisse zur Zusammensetzung der stabilen Stickstoffisotope des Zooplanktons im Arabischen Meer wurden auch für einen Vergleich mit dem östlichen Mittelmeer herangezogen (Koppelman et al. akzeptiert).

Ziel der durchgeführten Synthesephase war es, die feintaxonomischen Strukturen des Mesozooplanktons und dessen Bedeutung für den Kohlenstofftransfer unter Hinzuziehung internationaler Datensätze zu untersuchen. Weiterhin sollte ein Abgleich mit den Kohlenstoffkonsumptionsraten des Benthos erfolgen.

2 Ergebnisse

Ein Teilziel unserer Untersuchungen bestand darin, die Bedeutung einzelner Taxa für den Kohlenstoffumsatz in der Tiefsee aufzuklären. Wie im Fortsetzungsantrag beschrieben, wurde dazu das vorhandene Probenmaterial von drei Reisen (M33/1, So118, So129) hinsichtlich einer feineren taxonomischen Aufschlüsselung bearbeitet. Diese Analysen erfolgten exemplarisch für das Arabische Meer über die gesamte Wassersäule an der zentralen Station CAST. Dabei wurden über die grobtaxonomische Analyse hinausgehend folgende Taxa der Copepoda Calanoida quantifiziert: die tagesperiodisch vertikalwandernde Gattung *Pleuromamma*, die in der Sauerstoffminimumzone bedeutenden Genera/Arten *Eucalanus* spp., *Rhincalanus* spp. und *Lucicutia grandis* sowie die ontogenetisch interzonal wandernde Art *Calanoides carinatus* (Abb. 14.1). Ergebnisse der beiden letztgenannten Arten werden im Folgenden vorgestellt.

Die Art *Calanoides carinatus* wurde fast nur in Form juveniler Stadien im zentralen Arabischen Meer gefangen. Die höchsten Abundanzen traten im Februar und Oktober in Tiefen zwischen 250 und 750 m auf. Während des Intermonsuns im April wurden nur geringe Individuenzahlen nachgewiesen. Untersuchungen von Smith (2001) haben gezeigt, dass die Art ihr Hauptvorkommen vor der Küste von Somalia und vor der Arabischen Halbinsel hat. Dort reproduziert sich *C. carinatus* während des Auftriebs zwischen Juni und September (SW-Monsuns) an der Oberfläche und verbringt

anschließend die auftriebsfreie Zeit inaktiv in größeren Tiefen. Die Vermutung liegt nahe, dass ein Teil des reproduktiven Bestandes mit dem nach Osten gerichteten Oberflächenstrom während des SW-Monsuns in das offene Arabische Meer transportiert wird. Im Oktober waren die Individuen dann zum Überwintern in größere Tiefen abgetaucht, wo sie auch im Februar noch gefunden wurden. Somit kommt es während des SW-Monsuns zu einem beachtenswerten horizontalen Individuentransport aus den küstennahen Auftriebsgebieten in das offene Arabische Meer. Ein Teil des von dort importierten Kohlenstoffs wird über längere Zeit in der Tiefsee eingelagert.

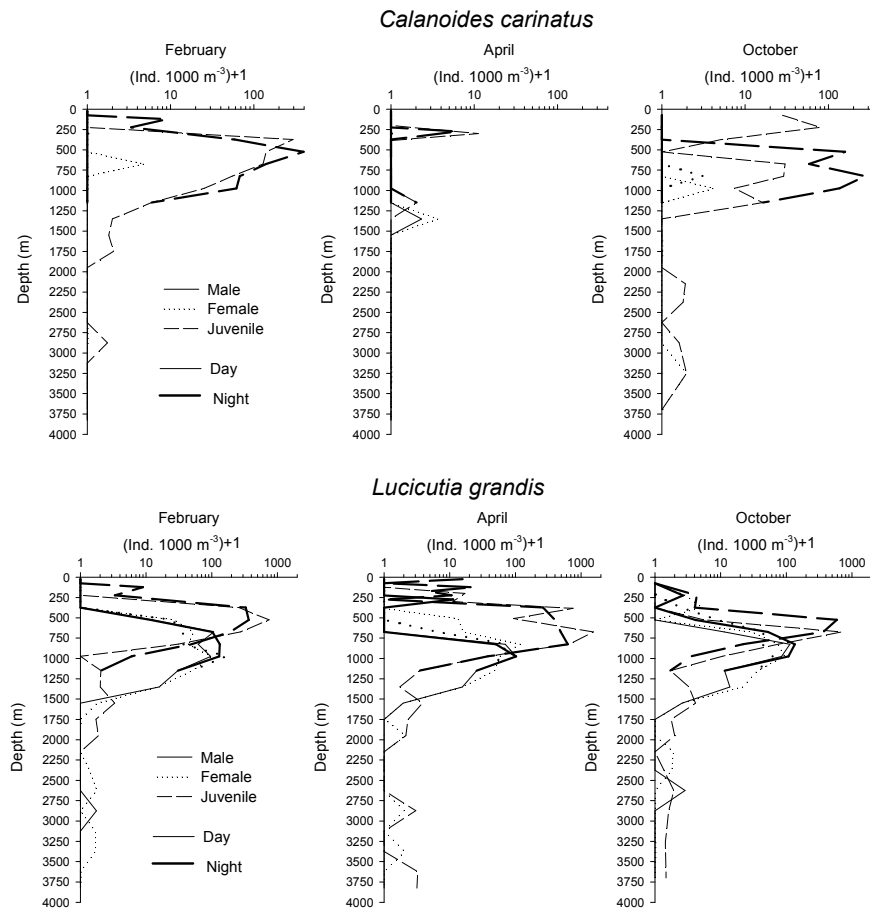


Abb. 14.1: Vertikalverteilung von *Calanoides carinatus* und *Lucicutia grandis* im zentralen Arabischen Meer (CAST).

Die Verteilung von *Lucicutia grandis* entspricht dem von Wishner et al. (2000) publizierten Bild. Auffällig ist, dass sich die juvenilen Formen in der Sauerstoffminimumzone (OMZ) des Arabischen Meeres aufhalten, während die Adulten im Bereich der unteren Grenze der OMZ leben. Erste Bilanzierungen zeigen, dass *L. grandis* ~0.05 % der Primärproduktion und ca. 1.4 % der Exportproduktion unterhalb von 100 m konsumiert. Damit verbraucht der im 100-1500 m-Bereich angesiedelte Bestand von *L. grandis* in etwa soviel Kohlenstoff wie die gesamte benthische Gemeinschaft in 3950 m Tiefe.

Weiterhin wurden erste Analysen zur Abundanz und Zusammensetzung des bodennahen und abyssopelagischen (>2500 m) Zooplanktons durchgeführt (siehe Zwischenbericht). Das Abyssopelagial eignet sich aufgrund stabiler abiotischer Bedingungen und einer reduzierten Saisonalität (Koppelman et al., im Druck) besonders gut dazu, energetische

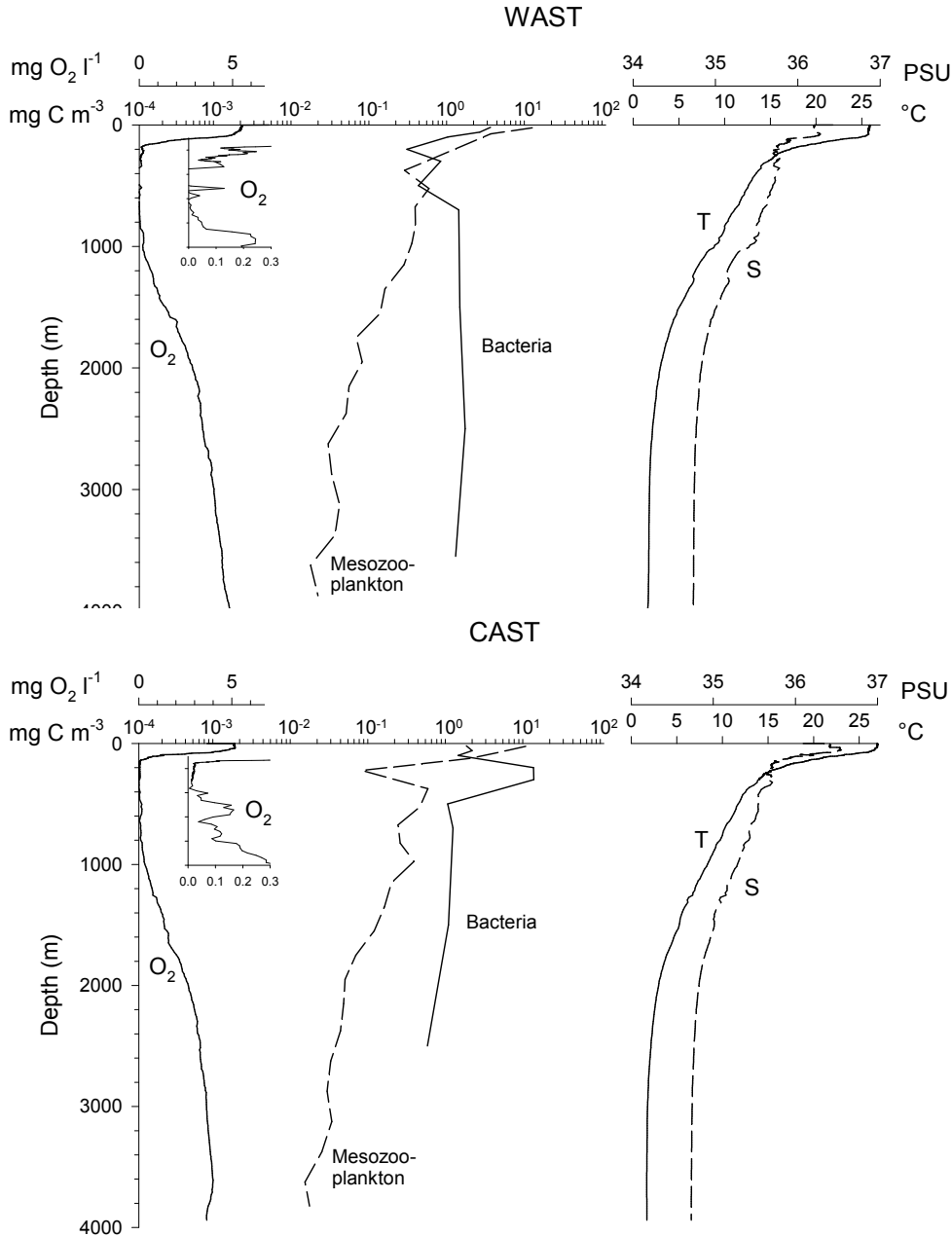
und somatische Kohlenstoffflüsse abzuschätzen. Jüngste Untersuchungen von Hansell und Ducklow (2003) zur Bakterienverteilung im Bereich um 2000 m zeigten ebenfalls, dass die Abundanzen in diese Tiefen eher den langfristigen Nahrungseintrag als kurze, episodische Ereignisse reflektieren. Die Ergebnisse sind nachstehend erläutert.

Obwohl die Zooplanktonbestände und deren metabolische Raten in der Tiefsee gering sind, spielt das Zooplankton aufgrund der Größe des Lebensraums eine bedeutende Rolle für den Kohlenstoffumsatz. Auf der Basis der Zooplanktonbiomassen (*siehe* Koppelman und Weikert 1997; Koppelman et al. im Druck) und der energetischen Kohlenstoffbedürfnisse (*siehe* Koppelman et al. 2000) erfolgte eine Bilanzierung der jährlichen Verbrauchsraten im Abyssopelagial. Diese Daten wurden in Relation zu den POC-Verlusttermen in der tiefen Wassersäule gesetzt, die mit Hilfe langjähriger Sinkstofffallendaten (Rixen et al. 2002) und der von Martin et al. (1987) publizierten Beziehung zwischen POC-Flüssen und der Wassertiefe berechnet wurden (s.a. Koppelman et al. 2000, Koppelman und Weikert in Vorb.). Es zeigt sich, dass das Zooplankton unterhalb von 2500 m an der produktiven Stationen WAST etwa 5 % dieser Nahrung nutzt. An der oligotrophen Station SAST werden im gleichen Tiefenbereich ungefähr 9 % genutzt. Das Benthos benötigt WAST etwa $13,5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ während an SAST etwa $3,1 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ konsumiert werden. Die jährlichen Primärproduktionsraten betragen an den Stationen 235 und $153 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Damit sind die Remineralisationsraten des Benthos sind an SAST um 75% geringer als an WAST bei einer um 35% reduzierten Primärproduktion. Die Abweichungen können durch laterale Effekte im Bereich um WAST verursacht sein oder durch eine erhöhte Remineralisation im Pelagial. Damit würde das Pelagial als Filter für das Benthos wirken. Bei geringeren Flussraten wird relativ mehr Material im Pelagial abgebaut, so dass die Versorgung des Benthos erheblich stärker eingeschränkt wird als in Gebieten mit höherer Produktion.

Mit Hilfe stabiler Stickstoffisotope können somatische Stoffflüsse bestimmt werden. Die Kombination der energetischen und somatischen Bedürfnisse erlaubt die Berechnung der Kohlenstoffflüsse innerhalb der Zooplanktongemeinschaft und der daraus resultierenden Lebenszeiten. Für das Zooplankton in der Größenklasse 2-5 mm ergeben sich minimale Generationszeiten von 5-6 Jahren. Bei auf höheren trophischen Ebenen lebenden pelagischen Organismen steigt die Lebenszeit auf mehrere Jahrzehnte an. Das bedeutet, dass sich Störungen in diesem System, wie Tiefseebergbau, Verklappung von Giftstoffen, Einleitungen von CO_2 u.a. aufgrund der langen Expositions- und Regenerationszeiten der Organismen erheblich auswirken können. Diese Ergebnisse wurden auch während des IAPSO-IABO Meeting 2001 in Argentinien vorgestellt (Weikert und Koppelman 2001). Das dazu vorgesehene Manuskript (Koppelman und Weikert in Vorb.) bedarf nach einer ersten Begutachtung noch einer Überarbeitung.

Während der Sonne-Reise 129 konnten in Ergänzung zu den Netzfängen auch Wasserproben zur Quantifizierung der Bakterien gewonnen werden (Koppelman et al. in Vorb.). Der Vergleich ergab, dass die Biomasse des Zooplanktons an der Oberfläche etwas höher ist als die der Bakterien. Mit zunehmender Tiefe reduziert sich der Bestand des Zooplanktons stärker als derjenige der Bakterien; dadurch nimmt die relative Bedeutung der Bakterien mit zunehmender Tiefe zu (Abb. 14.2). Von besonderem Interesse ist die Verteilung beider Gruppen in der OMZ. Dort nimmt die Biomasse des Zooplanktons erheblich ab, während die Bakterienbiomasse zunimmt.

Ein Vergleich mit Bakterienverteilungen aus anderen Meeresgebieten zeigt unterhalb von 600-800 m (Abb. 14.3) ebenfalls nur schwach abnehmende bzw. gleichbleibende Konzentrationen mit zunehmender Tiefe. Allerdings wurden die niedrigsten Bestände in oligotrophen und die höchsten in eutrophen Meeresgebieten nachgewiesen. Somit scheint sich die Hypothese von Hansell und Ducklow (2003), dass die Bakterienkonzentrationen in der Tiefsee die langfristige Produktivität an der Oberfläche reflektieren, zu bestätigen.
 Abb. 14.2: Vertikalverteilung von Bakterien- und Zooplanktonbiomasse and WAST und CAST in



Relation zu abiotischen Parametern.

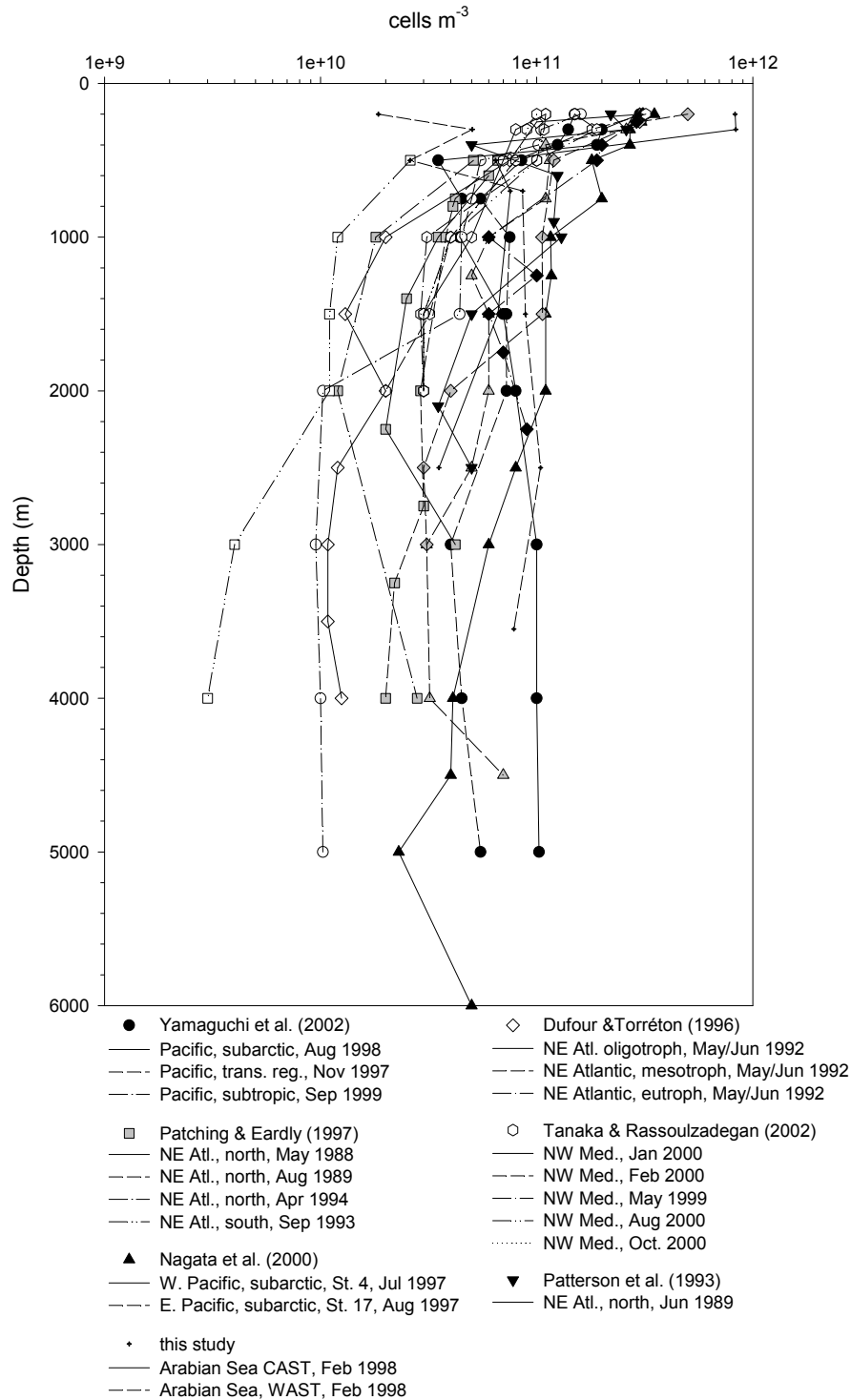


Abb. 14.3: Vertikalverteilung von Bakterienkonzentrationen in verschiedenen ozeanischen Gebieten, zusammengestellt aus verschiedenen Quellen. Offene Symbole: oligotrophe Gebiete. Graue Symbole: mesotrophe Gebiete. Schwarze Symbole: eutrophe Gebiete.

3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

Die im Antrag vorgesehenen Arbeiten wurden abgeschlossen. Weitere auf diesen Datensatz basierte Publikationen befinden sich in Vorbereitung oder sind geplant.

4 Ausblick

Während der OCEANS-Tagung in Paris vom 06.01.-10.01.2003 wurden Ergebnisse aus dem JGOFS-Projekt und daraus resultierende Fragen für den Tiefseebereich vorgestellt (Koppelman und Weikert 2003). Es herrschte Einigkeit darüber, dass insbesondere der Bereich des Mesopelagials (klassische Definition 200-1000 m) aber auch das darunter liegende Bathypelagial intensiver untersucht werden müssen. Folgende ausgewählte Themen, die im Bezug zu dem hier vorgestellten Projekt stehen, sollen in den OCEANS-Wissenschaftsplan einfließen:

1. Bestimmung der Mechanismen der Materialumwandlung und dessen Raten in der pelagischen Tiefsee
 - Bedeutung des aktiven Transports durch Tiere (Fäkation, DOM-Exkretion, Mortalität, Fortpflanzungsprodukte)
2. Funktionelle Beschreibung des pelagischen Tiefsee-Ökosystems
 - Weiterführende Bestimmung der pelagischen Tiefseetiere (Biodiversität, DNA-Untersuchungen)
 - Räumliche und zeitliche Verteilung der pelagischen Tiefseeorganismen (beginnend mit Schlüsselarten)
 - Untersuchung der Interaktion zwischen Materialfluss und Organismen
3. Untersuchungen zur Kopplung mit angrenzenden Systemen
 - Austausch mit dem Benthos (Filterwirkung des Pelagials für die Nahrungsversorgung des Benthos, Transport von Material und Organismen vom Benthos in das Pelagial)
 - Untersuchungen zur Kopplung zwischen der Oberfläche und dem pelagischen Tiefseesystem (Auswirkungen globaler Umweltveränderungen, Tiefsee-Fischerei, Veränderungen der physikalischen Kräfte)
 - Auswirkungen von "Climate Engineering" (Eisendüngung, CO₂-Versenkung)

4 Literatur (Manuskripte mit "*" sind als Anhang beigefügt)

- Dufour, P.H. and J.-P. Torréton (1996): Bottom-up and top-down control of bacterioplankton from eutrophic to oligotrophic sites in the tropical northeastern Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I* 43: 1305-1320.
- Hansell, D.A. and H.W. Ducklow (2003): Bacterioplankton distribution and production in the bathypelagic ocean: Directly coupled to particulate organic carbon export? *Limnology and Oceanography* 48: 150-156.
- Koppelman, R. and H. Weikert (1997): Deep-Arabian Sea zooplankton distribution. Intermonsoon, October 1995. *Marine Biology* 129: 549-560.
- Koppelman, R. and H. Weikert (1999): Temporal changes of deep-sea mesozooplankton abundance in the temperate NE Atlantic and estimates of the carbon budget. *Marine Ecology Progress Series* 179: 27-40.
- Koppelman, R. and H. Weikert (2000): Transfer of organic matter in the deep Arabian Sea zooplankton community: insights from $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Deep-Sea Research II* 47: 2653-2672.
- Koppelman, R. and H. Weikert (2003): The influence of mesozooplankton on the remineralisation of organic carbon in the deep-sea. *Ocean Biogeochemistry and Ecosystems Analysis. International Open Science Conference, 7-10 January, Paris, France.* p. 95
- *Koppelman, R. and H. Weikert (in Vorb.): Energetic and somatic carbon fluxes indicate deep-sea zooplankton longevity.
- Koppelman, R., P. Schäfer and R. Schiebel (2000): Organic carbon losses measured by heterotrophic activity of mesozooplankton and CaCO_3 flux in the bathypelagic zone of the Arabian Sea. *Deep-Sea Research II* 47: 169-187.
- *Koppelman, R., H. Fabian and H. Weikert (im Druck): Temporal variability of deep-sea zooplankton in the Arabian Sea.
- *Koppelman, R., H. Weikert and N. Lahajnar (akzeptiert): Vertical distribution of mesozooplankton and its $\delta^{15}\text{N}$ -signature in the deep Levantine Basin (Eastern Mediterranean) in April 1999. *Journal of Geophysical Research.*
- Koppelman, R., H. Zimmermann-Timm and H. Weikert (in Vorb.): A comparison of bacterial and mesozooplankton abundance and biomass in the deep-sea of the NW Indian Ocean
- Martin, J.H., G.A. Knauer, D.M. Karl and W.W. Broenkow (1987): VERTEX: carbon cycling in the northeast Pacific. *Deep-Sea Research* 34: 267-286.
- Nagata, T, H. Fukuda, R. Fukuda and I. Koike (2000): Bacterioplankton distribution and production in deep Pacific waters: Large-scale geographic variations and possible coupling with sinking particle flux. *Limnology and Oceanography* 45: 426-435
- Patching, J.W. and D. Eardly (1997): Bacterial biomass and activity in the deep waters of the eastern Atlantic-evidence of a barophilic community. *Deep-Sea Research I* 44: 1655-1670
- Rixen, T., M.V.S. Guptha and V. Ittekkot (2002): 2.9 Sedimentation. In: Report of the Indian Ocean Synthesis Group on the Arabian Sea process Study, ed. by Watts, L., Burkill, P. and S. Smith. JGOFS Report No. 35, Bergen, Norway.
- SCOR (1992): Joint Global Ocean Flux Study. Implementation Plan. Scientific Committee on Oceanic Research, JGOFS Report No. 9.
- Smith, S.L. (2001): Understanding the Arabian Sea: Reflections on the 1994-1996 Arabian Sea Expedition. *Deep-Sea Research II* 48: 1385-1402.
- Tanaka, T and F. Rassoulzadegan (2002): Full-depth profile (0-2000m) of bacteria, heterotrophic nanoflagellates and ciliates in the NW Mediterranean Sea: Vertical partitioning of microbial trophic structures. *Deep-Sea Research II* 49: 2093-2107

- Weikert, H. and R. Koppelman (2001): The mesozooplankton of the deep Arabian Sea and its impact on carbon fluxes. IAPSO – IABO Meeting, 21-28 October, Mar del Plata – Argentina. IJ01-10.
- Wishner, K.F., M.M. Gowing and C. Gelfman (2000): Living in suboxia: Ecology of an Arabian Sea oxygen minimum zone copepod. *Limnology and Oceanography* 45: 1576-1593
- Yamaguchi, A., Y. Watanabe, H. Ishida, T. Harimoto, K. F., S. Suzuki, J. Ishizaka, T. I. and M.M. Takahashi (2002): Structure and size distribution of plankton communities down to the greater depths in the western North Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II* 49: 5513-5529.

Anhang

- Koppelman, R. and H. Weikert (in Vorb.): Energetic and somatic carbon fluxes indicate deep-sea zooplankton longevity.
- Koppelman, R., H. Fabian and H. Weikert (im Druck): Temporal variability of deep-sea zooplankton in the Arabian Sea.
- Koppelman, R., H. Weikert and N. Lahajnar (akzeptiert): Vertical distribution of mesozooplankton and its $\delta^{15}\text{N}$ -signature in the deep Levantine Basin (Eastern Mediterranean) in April 1999. *Journal of Geophysical Research*.

BMBF-Verbundsprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 16

Modellierung der saisonalen Produktion in der Arabischen See

**Schlussbericht für die Laufzeit
01.03.2001 – 28.02.2003-09-18**

Dr. Habil. Ernst Maier-Reimer
Max Planck Institut für Meteorologie Hamburg

Inhalt

Zusammenfassung	16 - 1
1 Einleitung	16 - 2
2 Ergebnisse	16 - 3

Zusammenfassung

Entsprechend der Modifikation der Zielsetzung des Verbundprojektes ("Kohlenstoff und assoziierte Elemente") wurden die Modelle des MPI Meteorologie um wesentliche Komponenten des Stickstoffkreislaufs erweitert, im einzelnen sind das gelöste Nitrat in den Massenzahlen 14 und 15, Lachgas und gasförmiger Stickstoff, der bei Denitrifikation entsteht.

1 Einleitung

Die Arabische See nimmt unter zumindest zwei Gesichtspunkten eine Sonderstellung unter den ozeanischen Regionen ein: zum einen bewirkt die Monsunzirkulation eine ungewöhnlich starke Saisonalität der Zirkulation mit ausgeprägter interannualer Variabilität; damit verbunden ist eine ungewöhnlich starke Zufuhr von Nährstoffen mit der Konsequenz einer ausgeprägten Zone von Sauerstoffzehrung, in der Nitrat und Sulfat reduziert werden können zur Remineralisation organischen Materials. Die von anderen Ozeanen (z. B. Atlantik) bekannte fast lineare Beziehung zwischen Phosphat und Nitrat ist in diesem Bereich deutlich verletzt.

Die Frage nach dem ultimativ limitierenden Nährstoff für marine Produktion - Stickstoff oder Phosphor - wird seit Jahrzehnten heftig diskutiert. Neuerdings setzt sich die Sprechweise durch, dass Biologen die limitierende Rolle des Stickstoffs favorisieren, während Geochemiker eher für Phosphor plädieren. Tatsächlich hat Stickstoff eine viel komplexere Reaktionskette als Phosphor. Abschätzungen über den globalen Verlust von Nitrat durch Reduktion in anoxischen Gebieten — vor allem in der Arabischen See — können zu dem Schluss führen, dass der Ozean in einigen Jahrtausenden frei von Nitrat sein könnte. Andererseits verfestigen sich neuerdings Informationen über Stickstofffixierende

Cyanobakterien, z. B. *Trichodesmia*, die den Defekt durch Denitrifikation aus der Atmosphäre ausgleichen. Bei für andere Spezies ausreichendem NO_3^- können *Trichodesmia* mit ihrer geringen Replikationsrate nicht durchsetzen. Im Modell werden die beiden Prozesse so angesetzt, dass eine Stickstoffbilanzierung möglich ist. Aufsteigendes nitratverarmtes Wasser erlaubt an der Oberfläche Produktion ohne gelöstes Nitrat bis das elementare N:P-Verhältnis wieder dem angenommenen Redfield Verhältnis 16 entspricht, d. h. *Trichodesmia* werden als Phosphatlimitiert behandelt.

Das Modell basiert auf der Annahme einer konstanten Stöchiometrie in organischem Material; Abweichungen davon in den Ergebnissen sind dann dynamisch bedingt. Die Grundgleichungen des Modells sind:

$$(R_{NP}, R_{CP}, R_{OP}) = \frac{(16 \text{ mol N}, 122 \text{ mol C}, 172 \text{ mol O}_2)}{\text{mol P}}$$

(nicht immer explicit in nachstehenden Formeln)

$$\begin{aligned} \text{DPO}_4^{3-}/dt &= -\text{Phosy} + e(1-f)\text{Gr} + \epsilon d\text{Zoo} \\ &\quad + r\text{DOP} + \text{rem}_O + \text{rem}_N \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{DNO}_3^-/dt &= -R_{NP}\text{Phosy} + R_{NP}(e(1-f)\text{Gr} \\ &\quad + \epsilon d\text{Zoo} + r\text{DOP} - \text{rem}_N * 0.8) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{DO}_2/dt = R_{OP}(\text{Phosy} - \text{rem}_O) \quad (3)$$

$$\text{DPhy}/dt = \text{Phosy} - \text{Gr} - \gamma_P\text{Phy} - d\text{Phy} \quad (4)$$

$$\text{DZoo}/dt = \epsilon f\text{Gr} - \gamma_Z\text{Zoo} - d\text{Zoo} \quad (5)$$

$$\text{DDOP}/dt = (hP + \gamma_Z\text{Zoo} + \gamma_P\text{Phy} - r\text{DOP}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{DPOP}/dt &= d\text{Phy} + d\text{Zoo} + (1-e)\text{Gr} \\ &\quad - W_S \partial \text{POC} / \partial z - \text{rem}_O - \text{rem}_N \end{aligned} \quad (7)$$

wobei der Operator D/dt advektive und diffusive Beiträge zur Veränderung bezeichnet. γ und d bezeichnen Verlustprozesse durch Exudation und absterben. G_r und P_{Phosy} bezeichnen die Prozesse Grazing und Photosynthese. Dieses System stellt die Grundgleichungen für den organischen Kreislauf dar; ähnliche Gleichungen für Kieselsäure, DIC (ΣCO_2) und Alkalinität vervollständigen das System; Die Behandlung von Si ermöglicht die Aufspaltung des Phytoplanktons nach Diatomeen und Kalkbildnern. Der Gasaustausch mit der Atmosphäre für die Gase CO_2 , O_2 , N_2O und N_2 wird mit den üblichen windabhängigen Koeffizienten nach Wanninkhof berechnet.

2 Ergebnisse:

Das biogeochemische Modell wurde in physikalische Zirkulationsmodelle verschiedener Auflösung — und damit sehr verschiedener Anforderung an Rechenleistung — eingebettet. Ein grobauflösendes Modell mit 13 Schichten und 1 Grad horizontaler Auflösung — mit südlicher Berandung bei 25S —, das sehr ökonomisch läuft und auch auf kleinen Workstations betrieben werden kann. Mit derselben Horizontalauflösung wurde eine Konfiguration mit 40 Schichten erstellt, mit der eine bessere Darstellung der Vertikalstrukturen erreicht werden kann. Ein hochauflösendes Modell (etwa 15 km Auflösung in der Arabischen See, mit südlicher Berandung Antarktis) erlaubt eine realistische Darstellung von Filamenten, ist jedoch nur auf Hochleistungsrechnern zu betreiben.

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde der Schwerpunkt auf die Simulation der interannualen Variabilität gelegt. Aus den NCEP (National center for environmental prediction) Daten wurden tägliche Werte für den atmosphärischen Antrieb (Windschub, atmosphärische Temperatur, und Kurzwellenstrahlung) auf das Gitter des groben Modells interpoliert. Damit wurde die Variabilität aller Zustandsgrößen im Zeitraum 1990 - 2001 simuliert.

In den vergangenen Zwischenberichte wurden mehrere Abbildungen zum klimatologischen Zustand des Modells gezeigt; wir beschränken uns hier auf die Darstellung einiger Aspekte der interannualen Variation.

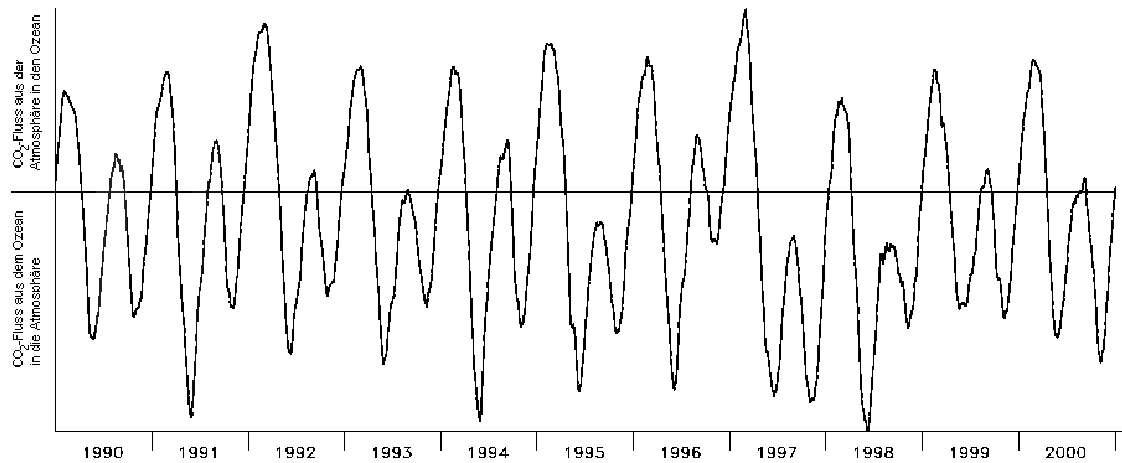


Abb. 1: Simulierter Atmosphären - Ozeanfluss von CO_2 in der Arabischen See, normiert auf die Schwankungsbreite 9 Gigamol/Tag. Die Nulllinie ist markiert. Insgesamt emittiert der Ozean CO_2 in die Atmosphäre, vornehmlich wegen des starken monsonalen Auftriebs von CO_2 -reichem Tiefenwasser.

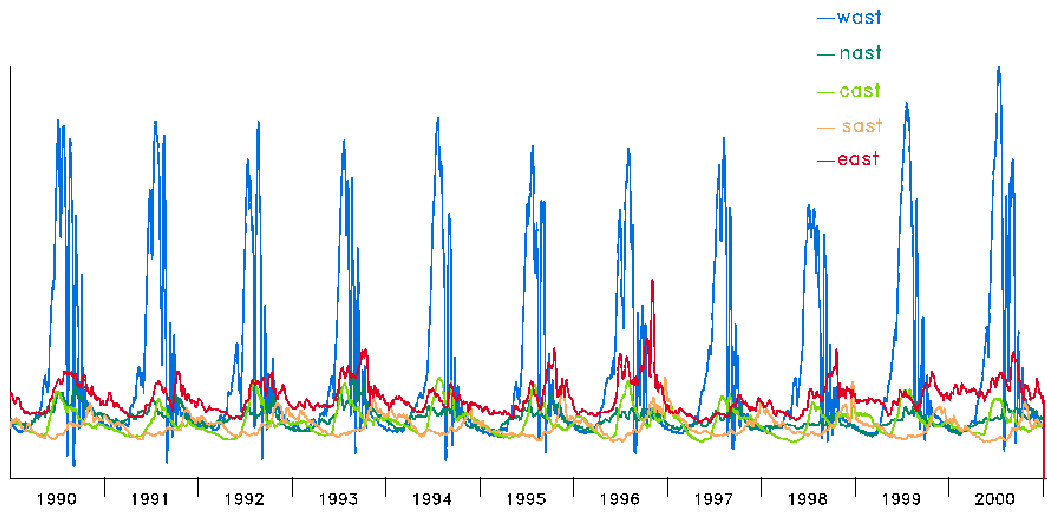


Abb. 2: Simulierte Exportproduktion von Kalkschalen an den 5 Stationen, normiert auf das gemeinsame Maximum, das an der Station WAST eingenommen wird.

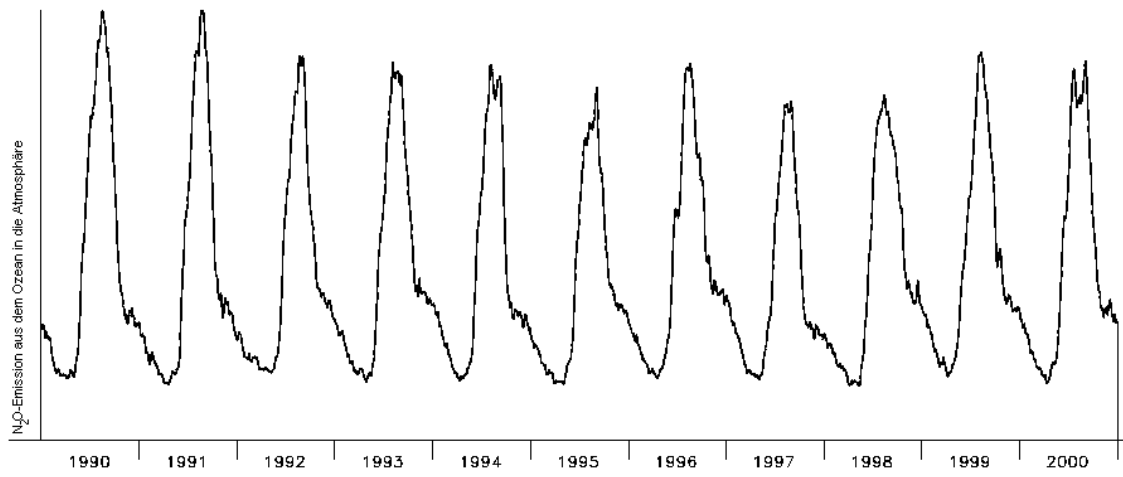


Abb. 3: Simulierter Ozean-Atmosphärenfluss von N₂O in der Arabischen See, normiert auf die Schwankungsbreite 17.5 Megamol/Tag.

BMBF-Verbundprojekt JGOFS-Indik

Teilprojekt 17

Raum-zeitliche Variabilität der biologischen Produktion im Arabischen Meer: Synthese von *in-situ* Beobachtungen, Fernerkundungsdaten und Modellergebnissen

Schlussbericht für die Projektlaufzeit

01.03.2001 - 28.02.2003

Dr. A. Oschlies, Dr. I. Kriest & Dr. M. Kawamiya
Institut für Meereskunde (IfM) an der Universität Kiel
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel

Inhalt

Zusammenfassung	17 - 1
1 Einleitung	17 - 2
2 Ergebnisse	17 - 2
2.1 Parameteroptimierung des Aggregationsmodells	17 - 3
2.2 Explicit modeling of denitrification	17 - 3
2.3 The fast recycling loop	17 - 4
2.4 Experiments with the aggregation model	17 - 4
2.5 Impact of short-term variations in forcing data	17 - 5
3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung	17 - 7
4 Ausblick	17 - 7
5 Literatur	17 - 7

Anhang

Kawamiya & Oschlies (in press 2003), J. Mar. Systems (*siehe* Zwischenbericht 2001)
Kriest, Deep-Sea Res. I 49 (2002) 2133 - 2162
Kawamiya, J. Mar. Res. 59 (2001) 675 – 696
Kawamiya & Oschlies, Geophysical Res. Letters 28 (2001) 4139 – 4142
Kawamiya & Kriest (einger.), Deep-Sea Res. (*siehe* Zwischenbericht 2001)

Zusammenfassung

Das stickstoffbasierte biogeochemisch-physikalische Modell der Arabischen See konnte durch den Einbau bisher unberücksichtigter Prozesse (Phytoplanktonaggregation, Denitrifizierung) und durch die Verwendung realistischer atmosphärischer Antriebsfelder wesentlich verbessert werden.

Die Modellverbesserungen wurden zunächst in eindimensionalen Modellversionen getestet und durch Assimilation von Beobachtungsdaten optimiert und schließlich auch im dreidimensionalen Zirkulationsmodell erfolgreich angewandt. Im einzelnen führte die Berücksichtigung eines schnellen Recycling - Loops zu einer deutlich verbesserten Simulation der Primärproduktion in oligotrophen Gebieten. Durch das Aggregationsmodul konnte die zeitliche Variabilität des Exports organischen Materials realistisch dargestellt werden. Die explizite Simulation der Denitrifizierung lieferte beckenweite Raten von 18 Tg N yr^{-1} , die gut mit beobachtungsgestützten Abschätzungen übereinstimmen.

Experimente mit realistischem atmosphärischen Antrieb wurden für den Zeitraum 1994-1995 durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die tägliche Variabilität im Antrieb nur einen geringen Einfluss auf die simulierten biogeochemischen Flüsse hat. Gegensätzliche Ergebnisse einer Modellstudie von McCreary et al. (2001) konnten auf Artefakte der dort verwendeten Layer-Modellstruktur zurückgeführt werden. Die Ergebnisse der Arbeiten des letzten Antragszeitraums wurden in bisher vier Publikationen zur Veröffentlichung eingereicht (Kawamiya und Oschlies, 2002; Kawamiya und Kriest, 2002; Kawamiya und Oschlies, 2003; Kriest, 2002).

1 Einleitung

Das Ziel von JGOFS ist die Untersuchung der zeitlichen Variation der Flüsse von Kohlenstoff und assoziierten Elementen im Ozean, sowie ihres Austausches mit der Atmosphäre, dem Boden des Ozeans und den Kontinentalrändern (SCOR, 1992). Eines der Hauptziele der im Rahmen von JGOFS durchgeführten Arabische-See-Prozessstudie sind die Quantifizierung der Primärproduktion, sowie die Transformation und der Verbleib des phytogenen Kohlenstoffs (SCOR, 1995). Feldstudien zur Untersuchung dieser Fragen wurden 1995 und 1997 durchgeführt. Diese Untersuchungen sind zeitlich und räumlich lückenhaft; darüber hinaus sind viele der biogeochemischen Flüsse von Kohlenstoff und Stickstoff nur schwer zu erfassen (z.B. Fressraten). Die Verknüpfung unserer Vorstellungen über die biogeochemischen Prozesse mit den gemessenen Flüssen zu abgeschlossenen Budgets über Hochrechnungen wirft häufig Probleme auf (z.B. Primärproduktion und seine Beziehung zur Sedimentation).

Die numerische Modellierung liefert die Möglichkeit der konsistenten Beschreibung der biogeochemischen Prozesse in der sowohl räumlich als auch zeitliche variablen physikalischen Umgebung. Der Vergleich der Modellergebnisse mit empirisch erhobenen Daten (z.B. Satellitendaten der Ozeanfarbe, aber auch *in-situ* erhobene Daten) gibt neben dem Verleich mit i.a. eindimensionalen *in-situ* Beobachtungen die Gelegenheit, auf eventuelle Unstimmigkeiten in Bezug auf unsere Vorstellung vom Ökosystem hinzuweisen. Sensitivitätsstudien erlauben darüber hinaus, das Verhalten der biogeochemischen Variablen in Bezug auf Veränderungen des biologischen und physikalischen Systems zu ermitteln, und lassen somit Aussagen über die potentiellen Änderungen der biogeochemischen Prozesse unter veränderten Bedingungen (z.B. Klimaänderungen) zu.

In diesem Bericht präsentieren wir Ergebnisse der lokalen (eindimensionalen) Modellierung, die an zwei Stationen der Arabischen See betrieben wurde, sowie eines dreidimensionalen wirbel-erlaubenden Zirkulationsmodells. Beide Modelle beinhalten das gleiche biologische Modell (Nährstoff-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus, "NPZD"), basierend auf Stickstoff, das um ein Aggregationsmodul erweitert wurde. Das eindimensionale Modell ermöglicht aufgrund seiner kurzen Rechenzeit nicht nur die Durchführung von Tests und den eingehenden Vergleich mit Daten, es bietet auch die Möglichkeit, mit Hilfe der Assimilation der *in-situ* Daten die Parameter (= Konstanten der biogeochemischen Gleichungen) zu schätzen, und über ihre Variation Schlüsse auf Unstimmigkeiten im Modell, bzw. in der Vergleichbarkeit von Modellergebnissen und Daten zu ziehen. Die hohe Auflösung des dreidimensionalen Zirkulationsmodells ermöglicht eine im Vergleich zu früheren Modellstudien (McCreary et al., 1996; Keen et al., 1997; Ryabchenko et al., 1998) deutlich bessere Darstellung der physikalischen Umgebung.

2 Ergebnisse

2.1. Parameteroptimierung des Aggregationsmodells

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden bereits im ersten Jahr des Berichtszeitraums abgeschlossen und werden hier der Vollständigkeit halber noch einmal aufgeführt. Zur vorbereitenden Untersuchung der Auswirkung verschiedener Parametrisierungen von marinen Aggregaten, sowie zur Eingrenzung des Parameterbereichs für die Datenassimilation wurden für eine Station in der westlichen Arabischen See verschiedene Sensitivitätsstudien mit dem Aggregationsmodell unternommen, basierend auf einer Analyse vorhandener empirischer Beziehungen zwischen Größe und Masse bzw. Sinkgeschwindigkeit (Kriest, 2002). Modellsimulationen mit dichten und lockeren Aggregaten, jeweils mit und ohne Detritus, wurden durchgeführt und ihr Ergebnis mit Profilen von gelöstem anorganischen Stickstoff, partikulärem organischen Stickstoff, der Anzahl großer Aggregate und der Sedimentation in 100 und 800 m verglichen.

Die hohen Konzentrationen großer Aggregate zur Zeit des SW-Monsuns konnten allein mit einem Modell, das auf Parametern *in situ* gesammelter Aggregate beruht und gleichzeitig Detritus bei der Aggregation berücksichtigt, simuliert werden. Die Berücksichtigung von Detritus in Aggregaten (d.h. mit einer variablen Sinkgeschwindigkeit) ermöglicht auch die beste Wiedergabe der Nährstoffprofile, hingegen wird der Export in 100 m, besonders aber in 800 m erheblich überschätzt. Wird der Detritus von der Aggregation ausgeschlossen, kommt es zu einer erheblichen Überschätzung der Nährstoffkonzentrationen in mittleren Wassertiefen. Gründe für die mangelnde Übereinstimmung des Modells mit den Daten sind sowohl in der Parametrisierung physikalischer Prozesse im Modell, als auch in der fehlenden Berücksichtigung weiterer Komponenten (DON, Denitrifizierung zu sehen).

2.2 Explicit modeling of denitrification

The process of denitrification has been explicitly formulated in the model. Model results in the 17th year of integration show that the increasing trend in the subsurface nitrate maximum is largely eliminated in the upper ~ 1000 m, the most relevant depth range for the interannual experiment. The model, however, underestimates nitrate concentrations in the intermediate depths of the northern Arabian Sea. The region with denitrification along the section at 67° E extends from ca. 100 m to ca. 700 m and to the north of ca. 15° N. The nitrate deficit, a measure of how much higher nitrate concentrations would be without denitrification, was also found to take on high values in a similar depth and latitudinal range by Naqvi and Noronha (1991). Integrated rate of denitrification in the 17th year is ca. 18 Tg N y⁻¹, and is within the range of earlier estimates (Tab. 1).

Source	Rate (Tg N y ⁻¹)	Method
Naqvi 1987	29.5	Box model
Mantoura et al. 1993	11.9+-5	Nitrate deficit + residence time
Naqvi and Shailaja 1993	24-33	ETS (direct measurement)
Howell et al. 1997	21+-7	Nitrate deficit + CFC age
Yakushev and Neretin 1997	34.1	1D model
Bange et al. 2000	6-60	Nitrate deficit + residence time
This study	18.0	3D model

Tab. 1. Estimates of the denitrification rate for the Arabian Sea

2.3. The fast recycling loop

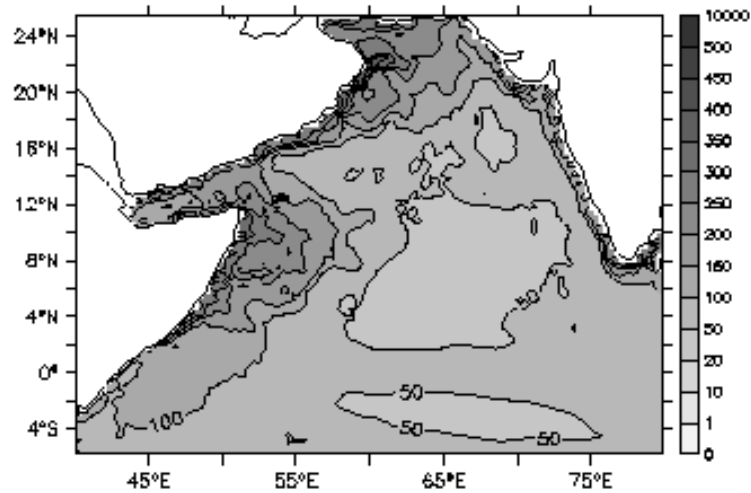
In the experiment with the fast recycling loop, primary production in oligotrophic regimes becomes indeed higher by a factor of 2 to 3 (Figure 1). The simulated values are still substantially lower than those by Antoine et al. (1996), but fairly close to those by Behrenfeld and Falkowski (1997). The annual export ratio calculated at 110 m depth (0.095) falls within the range of the observation-based estimates by Lee et al. (1998) and Buesseler et al. (1998) (~ 0.25 for SWM, ~ 0.05 for other seasons). Results of this experiment are presented in the submitted paper by Kawamiya and Oschlies (2003).

2.4. Experiments with the aggregation model

In the experiment with the aggregation model, primary production in most oligotrophic regimes becomes higher by 30 - 50 %, but to a lesser extent than with the fast recycling loop.

Seasonal variation of the export ratio (e-ratio) is investigated. The model shows the sudden increase of the e-ratio in late southwestern monsoon season that has been indicated in the 234Th data compiled by Buesseler (1998). The pattern of e-ratio is totally changed in an experiment with a constant sinking velocity, i.e., without the aggregation model. The distance between the depth at which sinking flux is defined and that of the maximum productivity turned out to be crucial for e-ratio in this experiment with constant sinking velocity, which is probably an unrealistic feature. This demonstrates an advantage of the model with aggregation process over those with the traditional prescription of particle sinking. These results are presented in the submitted paper by Kawamiya and Kriest (2002).

(a)



(b)

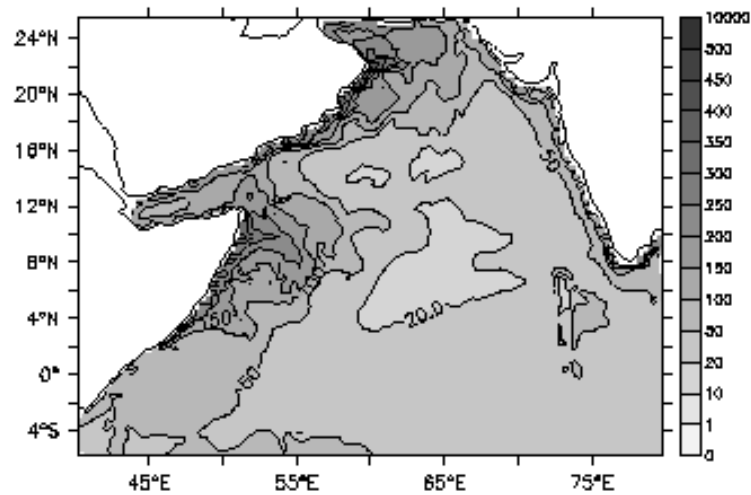


Fig. 17-2: Annual primary production simulated by the model (a) with and (b) without the fast recycling loop. Units are g C m⁻² y⁻¹.

2.5. Impact of short-term variations in forcing data

The importance of short term variations in surface forcing is examined using NCAR/NCEP Reanalysis data by Kalnay et al. (1996). The mixed layer model by Gaspar et al. (1990) has been incorporated. The model yields a good agreement with the mooring observations in both the short-term and seasonal variations of the mixed layer depth (Figure 2). Although the experiment with short term variation does show some differences

from the standard experiment on short time scales, long-lasting differences on, e.g., annual primary production cannot be found between the experiments with and without the short term variation. This disagrees with the work by McCreary et al. (2001). The sensitive reaction of their ecosystem model may be an artifact due to an assumption required for constructing their layer model for circulation.

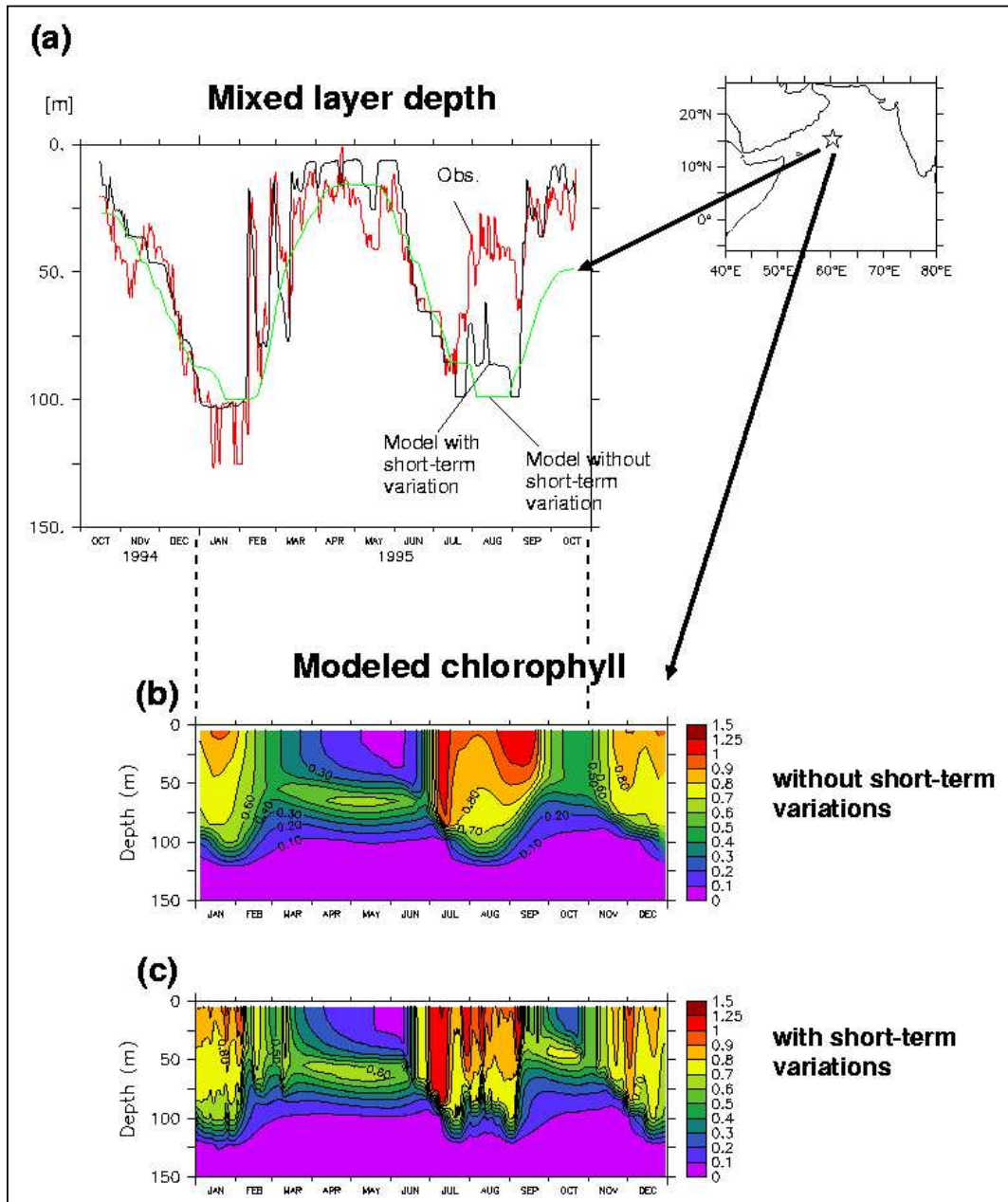


Fig 2: (a) Mixed layer depth (MLD) at the WHOI mooring site (15.5°N/61.5°E) for the experiments with daily mean forcing for 1994-95 (black) and monthly mean forcing (green), and for the data (red). Seasonal variations of chlorophyll concentration (mmol m⁻³) for the experiments with (b) daily and (c) monthly mean forcing for 1995.

Two model runs with short term variation are performed using actual forcing data from 1994-5 (NCAR/NCEP) and combined data composed of a climatology based on 1986-1988 (Barnier et al. (1995)) and short term components in 1987. The comparison of the two runs suggests that the difference seen by McCreary et al. (2001) at the WHOI mooring site (15.5N, 61.5E) might have arisen partly from differences on a monthly time scale in their forcing data. These results are presented in the submitted paper by Kawamiya and Oschlies (2002).

3 Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

Das Forschungsvorhaben konnte in allen Punkten dem Antrag entsprechend erfolgreich abgeschlossen werden.

4 Ausblick

Ein erster Vergleich mit einem ähnlichen Modell des Atlantiks lässt vermuten, dass die verwendeten Parametrisierungen und Parameterwerte nicht wesentlich von der Modellregion abhängen. Dies wird im Hinblick auf weiterzuentwickelnde, globale Modelle biogeochemische Kreisläufe tiefergehender zu untersuchen sein. Für eine globale Modellierung wird in jedem Fall eine Balancierung der Denitrifizierung durch Stickstofffixierung sowie durch Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre und von Land explizit behandelt werden müssen. Für den Nordatlantik sind dazu erste Untersuchungen begonnen worden. Stickstofffixierung ist jedoch auch in der Arabischen See beobachtet worden und sollte daher auch in zukünftigen Modellstudien dieser Region mit berücksichtigt werden.

5 Literatur

- Antoine, D., J.-M. Andre, and A. Morel, Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10, 57--69, 1996.
- Bange, H. W., R. Rixen, A. M. Johansen, R. L. Siefert, R. Ramesh, V. Ittekkot, M. R. Hoffmann, and M. O. Andreae, A revised nitrogen budget for the Arabian Sea, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 14, 1283--1297, 2000.
- Barnier, B., L. Siefridt, and P. Marchesiello, Surface thermal boundary condition for a global ocean circulation model from a three-year climatology of ECMWF analysis, *J. Mar. Syst.*, 6, 363--380, 1995.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski, Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1--20, 1997.
- Buesseler, K., L. Ball, J. Andrews, C. Benitez-Nelson, R. Belastock, F. Chai, and Y. Chao, Upper ocean export of particulate organic carbon in the Arabian Sea derived from thorium-234, *Deep-Sea Res. II.*, 45, 2461--2487, 1998.
- Buesseler, K. O., The decoupling of production and particulate export in the surface ocean, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 12, 297--310, 1998.
- Conkright, M. S., T. D. O'Brien, S. Levitus, T. P. Boyer, and C. S. J. I. Antonov, NOAA Atlas NESDIS 38, World Ocean Atlas 1998, vol.12: Nutrients and chlorophyll of the Indian Ocean, Tech. rep., NODC, 1998.
- Gaspar, P., Y. Gregoris, and J.-M. Lefevre, A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at Station Papa and Long-Term Upper Ocean Study site, *J. Geophys. Res.*, 95, 16,179--16,193, 1990.

- Howell, E. A., S. C. Doney, R. A. Fine, and D. B. Olson, Geochemical estimates of denitrification in the Arabian Sea and the Bay of Bengal during WOCE, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2549–2552, 1997.
- Kalnay, E., et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471, 1996.
- Kawamiya, M., and I. Kriest, Seasonal variation of export ratio in the Arabian Sea predicted by an ecosystem-circulation model with particle aggregation, *Deep-Sea Res.*, submitted, 2002.
- Kawamiya, M., and A. Oschlies, An eddy-permitting, coupled ecosystem-circulation model of the Arabian Sea: Comparison with observations, *J. Mar. Syst.*, in press., 2003.
- Kawamiya, M., and A. Oschlies, Impact of intraseasonal variations in surface heat and momentum fluxes on the pelagic ecosystem of the Arabian Sea, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2002.
- Kriest, I., Different parameterizations of marine snow in a 1d-model and their influence on representation of marine snow, nitrogen budget and sedimentation, *Deep-Sea Res.*, submitted, 2002.
- Kriest, I., and G.~T. Evans, A vertically resolved model for phytoplankton aggregation, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 109, 453–469, 2000.
- Lee, C., et al., Particulate organic carbon fluxes: Compilation of results from the 1995 US JGOFS Arabian Sea Process Study, *Deep-Sea Res. II.*, 45, 2489–2501, 1998.
- Mantoura, R. F. C., C. S. Law, N. J. P. Owens, and P. C. A. Llewellyn, Nitrogen biogeochemical cycling in the northwestern Indian Ocean, *Deep-Sea Res. II.*, 651–671, 651–671, 1993.
- McCreary, J. P., K. E. Kohler, R. R. Hood, S. Smith, J. Kindle, A. S. Fischer, and R. A. Waller, Influences of diurnal and intraseasonal forcing on mixed-layer and biological variability in the central Arabian Sea, *J. Geophys. Res.*, 106, 7139–7155, 2001.
- Naqvi, S. W. A., Some aspects of the oxygen-deficient conditions and denitrification in the Arabian Sea, *J. Mar. Res.*, 45, 1049–1072, 1987.
- Naqvi, S. W. A., and Noronha, R. J., Nitrous oxide in the Arabian Sea, *Deep-Sea Res.*, 38, 871–890, 1991.
- Naqvi, S. W. A., and M. S. Shailaja, Activity of the respiratory electron transport system and respiration rates within the oxygen minimum layer of the Arabian Sea, *Deep-Sea Res. II.*, 40, 687–695, 1993.
- Yakushev, E. V., and L. N. Neretin, One-dimensional modeling of nitrogen and sulfur cycles in the aphotic zones of the Black and Arabian seas, *Glob. Biogeochem. Cycles*, 11, 401–414, 1997.

Anhang

Kawamiya, M. und A. Oschlies, An eddy-permitting, coupled ecosystem-circulation model of the Arabian Sea: Comparison with observations, *J. Mar. Syst.*, in press, 2003. (*siehe* Zwischenbericht 2001)

Kriest, I., Different parameterization of marine snow in a 1 D-Model and their influence on representation of marine snow, nitrogen budget and sedimentation, *Deep-Sea Res. I*, 49, 2133 – 2162, 2002.

Kawamiya M, Mechanism of offshore nutrient supply in the western Arabian Sea, *J. Mar. Res.*, 59, 675 – 696, 2001.

Kawamiya, M. und A. Oschlies, Formation of a basin-scale surface chlorophyll pattern by Rossby waves, *Geophysical Research Letters*, 28 (21), 4139 – 4142, 2001.

Kawamiya M. und I. Kriest, Seasonal variation of export ratio in the Arabian Sea predicted by an ecosystem-circulation model with particle aggregation, *Deep-Sea Res.*, submitted, 2002. (*siehe* Zwischenbericht 2001)