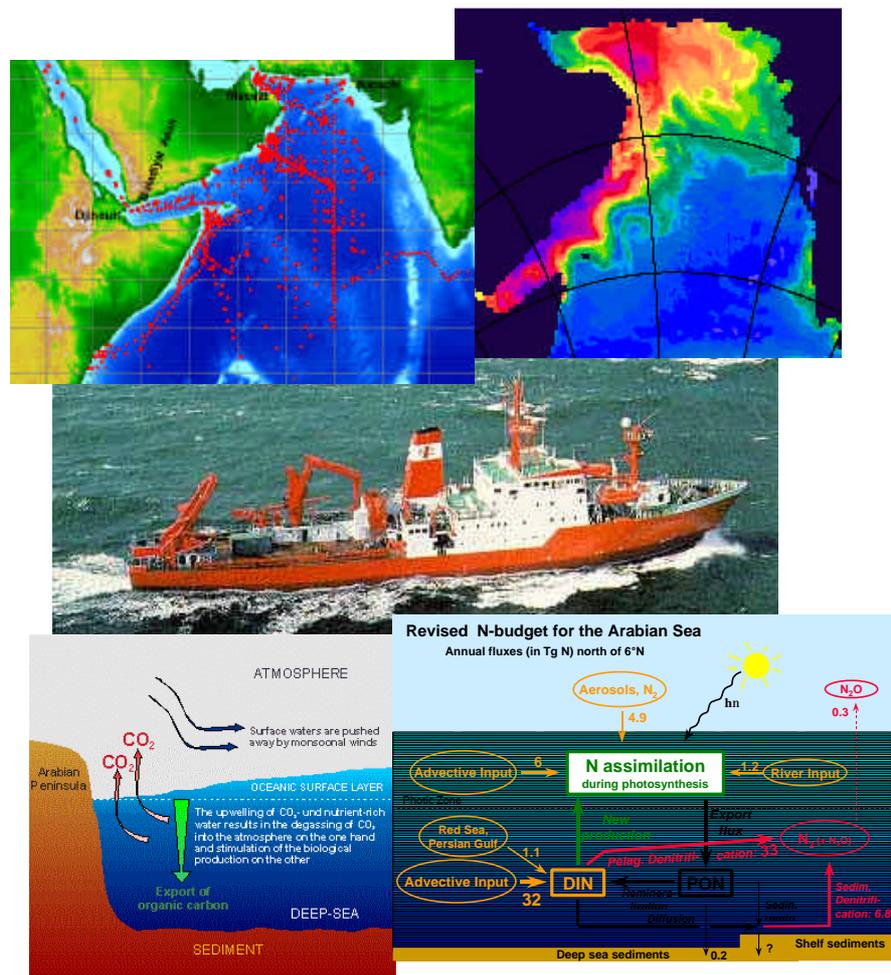


BMBF Verbundprojekt JGOFS-Indik

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



BMBF/BEO 03 F 0241 A

01.01.1999 - 31.12.2000

Abschlussbericht

Hinweis:

**Dieser Bericht enthält unveröffentlichte Ergebnisse,
die nicht ohne Einwilligung des BMBF
oder der Antragsteller verwendet werden dürfen.**

Umschlagbild

Oben links: Übersicht über die Lokationen von Datensätzen aus JGOFS-Felduntersuchungen. Die Datensätze wurden durch das Datenmanagement auf einer CD publiziert und werden auch im Internet zur Verfügung gestellt (Kap. 6, S. 72-73; <http://www.ifm.uni-kiel.de/jgofs/dm/>).

Oben rechts: Verteilung eines künstlichen „Tracers“ im Arabischen Meer durch Auftrieb und Oberflächenströmung anhand eines dreidimensionalen biogeochemischen Modells (vgl. Kap. 5.4.5, S. 63-65).

Mitte: FS Sonne, „Reedereigemeinschaft Forschungsschiffahrt GmbH“.

Unten links: Schematische Darstellung der Bedeutung des Auftriebs im westlichen Arabischen Meeres während des Sommermonsuns für den Kohlenstoffkreislauf (vgl. Kap. 2, S. 4-5).

Unten rechts: Schematische Darstellung und Quantifizierung des Stickstoffkreislaufes im Arabischen Meer (nach Bange et al. 2000).

BMBF Verbundprojekt JGOFS-Indik III

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

BMBF/BEO 03 F 0241 A

**Abschlussbericht der Koordination
für die dritte Projektphase**

01.01.1999 - 31.12.2000

A. Suthhof* & V. Ittekkot*

Zentrum für Marine Tropenökologie
Bremen

* Im Berichtszeitraum auch:
Institut für Biogeochemie und Meereschemie
Zentrum für Meeres- und Klimaforschung
Universität Hamburg

INHALT

1 EINLEITUNG	4
2 ARBEITSGEBIET	6
3 ZIELE UND DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN	8
4 KOOPERATION IM VERBUND SOWIE VERBINDUNG ZU INTERNATIONALEN FORSCHUNGSPROJEKTEN UND ANDEREN BMBF-VERBUNDVORHABEN ..	11
5 ERGEBNISSE	11
5.1 Stoffflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean	11
5.1.1 <i>Kohlendioxid</i>	15
5.1.2 <i>Lachgas</i>	16
5.2 Stoffflüsse und Umsetzungsprozesse im oberflächennahen Bereich	18
5.2.1 <i>Hydrographische Zonierung und Planktonvergesellschaftung</i>	23
5.2.2 <i>Nährstoffe und gelöster anorganischer Kohlenstoff</i>	28
5.2.3 <i>Bakterieller Kohlenstofffluss im Nahrungsnetz</i>	30
5.2.4 <i>Kohlenstoffbilanzierung in einem Filament</i>	33
5.2.5 <i>Saisonale Variabilität von N₂O und CH₄ in der Mischungsschicht</i>	35
5.3 Stoffexport in die Tiefsee und Umsetzungsprozesse in der Wassersäule ..	36
5.3.1 <i>Partikelfluss in die Tiefsee</i>	39
5.3.2 <i>Validierung des Partikelflusses durch Radionuklid-Traceruntersuchungen</i> ..	42
5.3.3 <i>Respiratorischer Kohlenstoffbedarf von Bakterien und Zooplankton</i>	45
5.3.4 <i>Remineralisierungsverhältnisse in der Wassersäule</i>	46
5.3.5 <i>Biogeochemie der Spurenelemente</i>	48
5.4 Modellierung des Gesamtsystems	48
5.4.1 <i>Eindimensionale Modellierung von Produktivität und Aggregatbildung</i>	51
5.4.2 <i>Modellierung der Spurenelemente</i>	54
5.4.3 <i>Bio-optische Prozesse</i>	58
5.4.4 <i>Eindimensionale Modellierung des Stickstoffkreislaufes</i>	61
5.4.5 <i>Dreidimensionale biogeochemische Modellierung</i>	66
5.5 Stofffluss ins Sediment und Rekonstruktion der Monsungeschichte	66
5.5.1 <i>Abbau und Akkumulation des organischen Kohlenstoffs</i>	67
5.5.2 <i>Radionuklidflüsse ins Sediment</i>	68
5.5.3 <i>Monsunvariabilität im Spätquartär</i>	68

6 DATENMANAGEMENT	72
6.1 <i>Datenbestand</i>	72
6.2 <i>Datenanfragen/-weitergabe</i>	73
7 AUSBLICK	74
8 LITERATUR	77

ANHANG:

I. Liste der Teilprojekte, Antragsteller und wissenschaftlichen Mitarbeiter

II. Publikationen im Rahmen von JGOFS-Indik

 Beiträge für wissenschaftliche Zeitschriften und Bücher

 Veröffentlichung von Datensammlungen

 Kurzfassungen und Poster

 Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen

1 EINLEITUNG

Nach dem aktuellen Bericht des *International Panel on Climate Change* (IPCC 2001) hat sich die globale Oberflächentemperatur während des letzten Jahrhunderts um etwa $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ erhöht. Die neunziger Jahre des letzten Jahrhunderts waren dabei sehr wahrscheinlich die global wärmsten seit Beginn der Temperaturmessung. Die Hinweise, dass dieser Temperaturanstieg auf die vom Menschen verursachte Emission von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) zurückzuführen ist, haben in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Das quantitativ wichtigste unter den genannten Treibhausgasen ist CO_2 . Seine Konzentration in der Atmosphäre hat vor allem durch die Verbrennung von fossilen Kohlenwasserstoffen und durch die Abholzung von Wäldern seit dem Beginn der Industrialisierung um ca. 25% zugenommen (Houghton et al. 1996). Zur Zeit liegt die anthropogene CO_2 -Emission bei etwa 5,5 bis 8,1 Gt C a⁻¹ (Houghton et al. 1996; Ledley et al. 1999). Der erwartete Anstieg der Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre könnte bis zum Jahr 2100 zu einem weiteren Temperaturanstieg von $1,4^\circ$ - $5,8^\circ\text{C}$ führen (IPCC 2001). Die Ozeane werden auf diesen globalen Wandel mit Veränderungen ihrer biogeochemischen Kreisläufe reagieren. Dies wird auch Auswirkungen auf die sozio-ökonomische Bedeutung der Weltmeere haben.

Von den anthropogenen CO_2 -Emissionen nimmt der Ozean derzeit ca. 2 Gt C a⁻¹ auf und wirkt so dem Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen entgegen (Orr et al. 2001). Die Aufnahmekapazität des Ozeans wird dabei sehr stark durch biologische Prozesse gesteuert. Die *Joint Global Ocean Flux Study* (JGOFS) untersucht den Einfluss dieser Prozesse auf den marinen Kohlenstoffkreislauf und die Kreisläufe der assoziierten Elemente. Die im Rahmen von JGOFS durchgeführten und geplanten Untersuchungen finden als Prozessstudien in Ozeanbereichen mit unterschiedlichen meteorologischen und ozeanographischen Gegebenheiten statt. Zu den ausgewählten Regionen gehört das Arabische Meer, da dieses Meeresgebiet extrem starken saisonalen Schwankungen ozeanischer Prozesse ausgesetzt ist, die mit den Monsunen identifizierbare Steuerungsmechanismen aufweisen (Kap. 2). Darüber hinaus gibt es im Arabischen Meer im Gegensatz zu den meisten anderen Ozeangebieten eine sehr stark ausgeprägte Sauerstoffminimumzone. Hierbei handelt es sich um einen Abschnitt in der Wassersäule mit geringen Sauerstoffkonzentrationen, der einen wesentlichen Einfluss auf die marinen Stoffkreisläufe besitzt, und in Bezug auf die Bildung bestimmter Spurengase globale Bedeutung hat.

Der deutsche Beitrag zur JGOFS-Prozessstudie im Arabischen Meer startete 1995. Zu Beginn des Verbundprojektes wurden während der Forschungsfahrten 1995 und 1997 umfangreiche Felduntersuchungen und anschließend Laborarbeiten durchgeführt (Kap. 3). Es folgte die Auswertung der Ergebnisse innerhalb der einzelnen Teilprojekte. Im Berichtszeitraum wurde an der Synthese der Ergebnisse gearbeitet. Hierbei wurden vor allem die Erkenntnisse der Teilprojekte zusammengeführt und die Ergebnisse anderer internationaler JGOFS-Studien im Arabischen Meer einbezogen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung von numerischen Modellen. Die Arbeiten wurden dabei sowohl mit den internationalen Aktivitäten von JGOFS als auch mit anderen Forschungsprogrammen der deutschen Meeresforschung inhaltlich und organisatorisch abgestimmt (Kap. 4).

Dieser Abschlussbericht fasst die Ergebnisse der ersten Synthesephase zusammen. Aufgrund der Bedeutung des Ozeans als Quelle oder Senke für Treibhausgase, ist die Untersuchung der Stoffflüsse zwischen Atmosphäre und Ozean ein Schwerpunkt (Kap. 5.1).

In der lichtdurchfluteten Deckschicht des Ozeans wird durch die Photosynthese gelöstes CO₂ konsumiert. Gleichzeitig wird es von bestimmten Organismen bei der Bildung von Karbonatschalen fixiert aber auch freigesetzt. Ziel der Untersuchungen in der Deckschicht ist daher vor allem die Bilanzierung des Kohlenstoffflusses von der CO₂-Fixierung im organischen Material oder in Karbonatschalen bis zur Umsetzung innerhalb der Nahrungskette (Kap. 5.2).

Der Stofftransport aus dem Oberflächenwasser in die Tiefsee (Meso- und Bathypelagial) entzieht das gebundene CO₂ für den Zeitraum von Jahrhunderten dem direkten Austausch mit der Atmosphäre. Zusammen mit den Oberflächenprozessen des CO₂ wird dieser Vorgang als „Biologische Pumpe“ bzw. als „Karbonat-Pumpe“ bezeichnet. Kap. 5.3 beschreibt die Quantifizierung des in die Tiefsee transportierten Materials sowie der Umsetzungs-, Lösungs- und Abbauprozesse in der Wassersäule. Hierbei wird ein Teil des zuvor dem Oberflächenwasser entzogenen CO₂ wieder freigesetzt und kann in Abhängigkeit von der ozeanischen Zirkulation wieder in die mit der Atmosphäre im Austausch befindlichen Deckschicht gebracht werden.

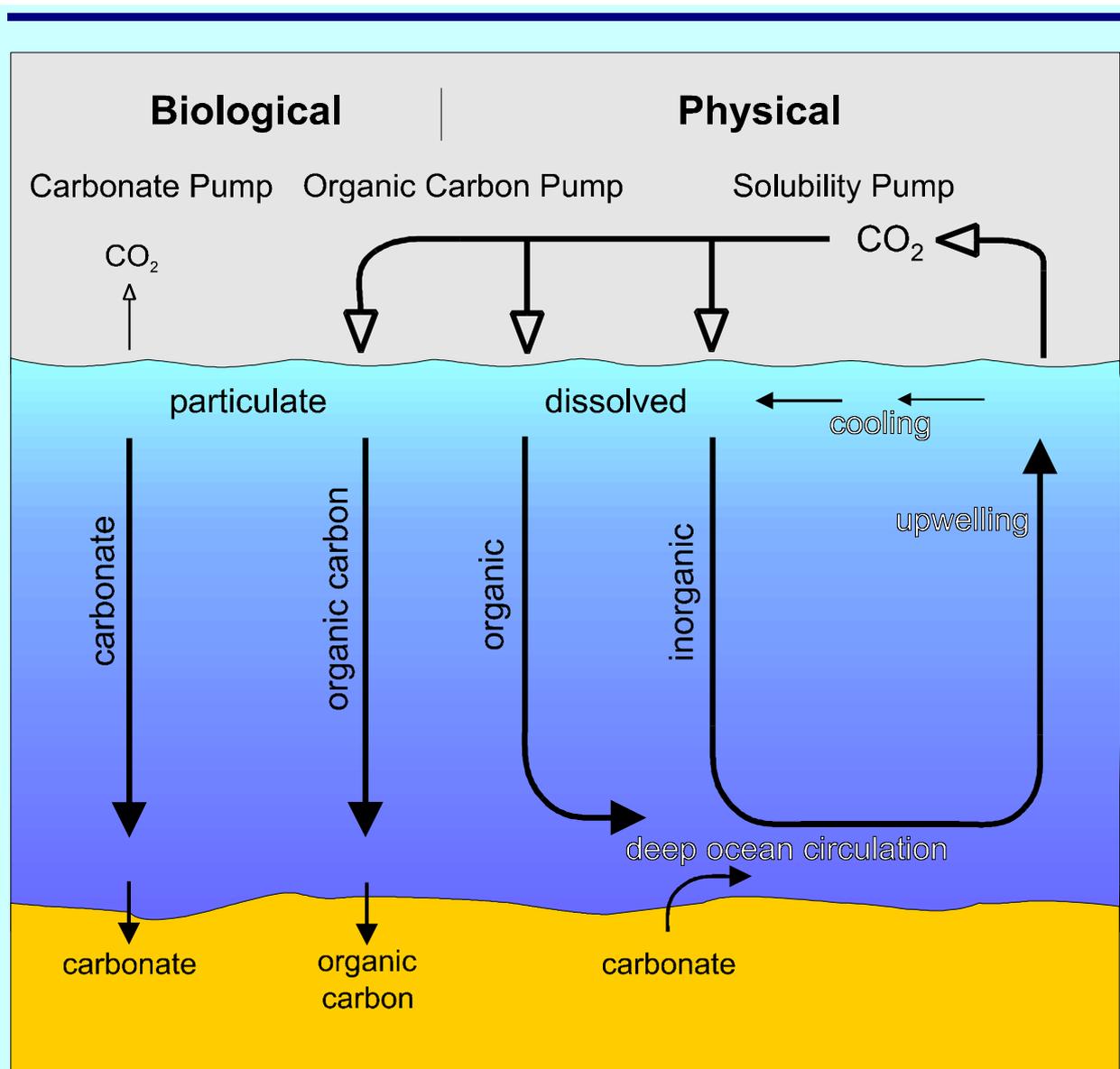
Die numerische Modellierung im Arabischen Meer erlaubt die Quantifizierung der Umsetzungsprozesse mit einer zeitlichen und räumlichen Auflösung, wie sie durch Feldstudien nicht zu erreichen ist (Kap. 5.4). Über Sensitivitätsstudien kann die Reaktion einzelner biogeochemischer Variablen auf Veränderungen des biologischen und physikalischen Systems ermittelt werden. Hierdurch ergeben sich auch Möglichkeiten der Vorhersage.

Das Sediment spielt eine wichtige Rolle als langfristige Senke für die Elemente, deren biogeochemischen Kreisläufe untersucht werden (Kap. 5.5). Gleichzeitig ist die Einbeziehung der jüngeren geologischen Geschichte und die Rekonstruktion der durch den Monsun gesteuerten Zirkulation anhand von Sedimenten eine wichtige Ergänzung für das Verständnis des Monsunsystems und seiner natürlichen Variabilität.

Für die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes ist, ebenso wie für die globale Synthese von JGOFS, die Assimilation aller Daten wichtig. Gleichzeitig muss der allgemeine Zugriff auf diese Daten gewährleistet werden. Diese Funktion wird in JGOFS-Indik vom „Datenmanagement“ übernommen (Kap. 6).

In Kap. 7 wird ein Ausblick auf sich aus den bisherigen Arbeiten entwickelten wissenschaftlichen Fragestellungen und Planungen für die abschließende Synthesephase gegeben. Dort finden sich auch Angaben zur Verwertbarkeit der Ergebnisse.

Dieser Bericht beinhaltet die Arbeiten von 14 Teilprojekten und dem Datenmanagement (Abb. 1-1; Anhang I). Deren Beiträge wurden unter inhaltlichen Gesichtspunkten teilweise aufgetrennt und für diesen gemeinsamen Bericht durch die Koordination des Projektes neu zusammengestellt sowie redaktionell bearbeitet. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse aus den Teilprojekten findet sich jeweils im „Zwischenbericht 1999“ und in den separat eingereichten Abschlussberichten der einzelnen Teilprojekte. Diese Berichte und der hier vorliegende Bericht enthalten z.T. noch unveröffentlichte Ergebnisse, die nicht ohne Einwilligung der Antragsteller bzw. des BMBF verwendet werden dürfen. Eine Liste der Veröffentlichungen aus dieser Projektphase ist im Anhang II beigefügt.



Die ozeanischen Kohlenstoff-Pumpen kontrollieren auf verschiedenen Wegen den Transfer von Kohlenstoff aus der ozeanischen Deckschicht in die Tiefsee:

- durch das Absinken von Organismenresten und Kotballen, die sowohl in organischem Material als auch in Karbonatschalen gebundenen Kohlenstoff enthalten,
- durch den diffusiven oder advektiven Transport von gelöstem organischem Material im Rahmen der ozeanischen (thermohalinen) Konvektion und
- durch den Transport von gelöstem CO₂ im Zusammenhang mit dieser Zirkulation.

Aufgrund des ständigen Ausgleichs zwischen den CO₂-Partialdrücken von Atmosphäre und ozeanischer Deckschicht, wirkt sich die Aktivität der Kohlenstoff-Pumpen auch auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre aus. Nicht dargestellt ist der Transfer von partikulärem organischem oder karbonatischem Kohlenstoff in die gelöste Fraktion durch den biologischen Abbau des organischen Materials oder durch Lösung von Karbonatschalen in der Tiefsee. Nur ein kleiner Teil des partikulären Kohlenstoffs wird über geologische Zeiträume ins Sediment eingelagert. Die Quantifizierung all dieser Prozesse innerhalb einzelner Meeresgebiete und für den gesamten Ozean ist eines der Hauptziele von JGOFS.

Quelle: Verändert nach SCOR/JGOFS Committee.

2 ARBEITSGEBIET

Das Besondere am Arabischen Meer ist vor allem die Steuerung fast aller physikalischen und biogeochemischen Prozesse durch den asiatischen Monsun. Hierdurch lassen sich die Wechselwirkungen zwischen dem Klima und biogeochemischen Prozessen in einem räumlich überschaubaren Gebiet besonders gut erforschen. Der Monsun ist ein jahreszeitlich wechselndes Windsystem, das von der sommerlichen Erwärmung und der winterlichen Abkühlung des asiatischen Festlandes angetrieben wird. Im Sommer, in der Zeit von Mai/Juni bis zum September weht ein starker SW-Wind über das Arabische Meer (SW-Monsun), der seine höchsten Geschwindigkeiten in einer Zone erreicht, die etwa parallel zur Arabischen Küste verläuft. Diese Zone erhöhter Windgeschwindigkeiten wird als Findlater-Jet bezeichnet (Findlater 1966, Legler et al. 1989) und verursacht den Aufstieg von kaltem Tiefenwasser in einem breiten Streifen vor der arabischen Küste. Diese Wassermassen enthalten hohe Nährstoffkonzentrationen, was den Umsatz der Biologischen Pumpe steigert (Abb. 2-1a). Andererseits transportieren sie große Mengen CO_2 in das Oberflächenwasser, was zu einer erhöhten Emission führen kann. Es war daher lange Zeit unklar, ob das Arabische Meer eine Quelle oder Senke für CO_2 ist. Im Winter, etwa von Dezember bis Februar (NE-Monsun, Abb. 2-1b), wird die biologische Aktivität von der Tiefe der Durchmischungsschicht und der euphotischen Zone bestimmt (Banse & McClain 1986, Madhupratap et al. 1996). Auch in diesem Fall kommt es gleichzeitig zur einer verstärkten Aktivität der Biologischen Pumpe und einer erhöhten Emission von CO_2 . In der Zeit des Übergangs zwischen den beiden Monsunphasen, dem Zwischen- oder Intermonsun (ca. März bis Mai und Oktober bis Dezember), dominieren hingegen oligotrophe Bedingungen.

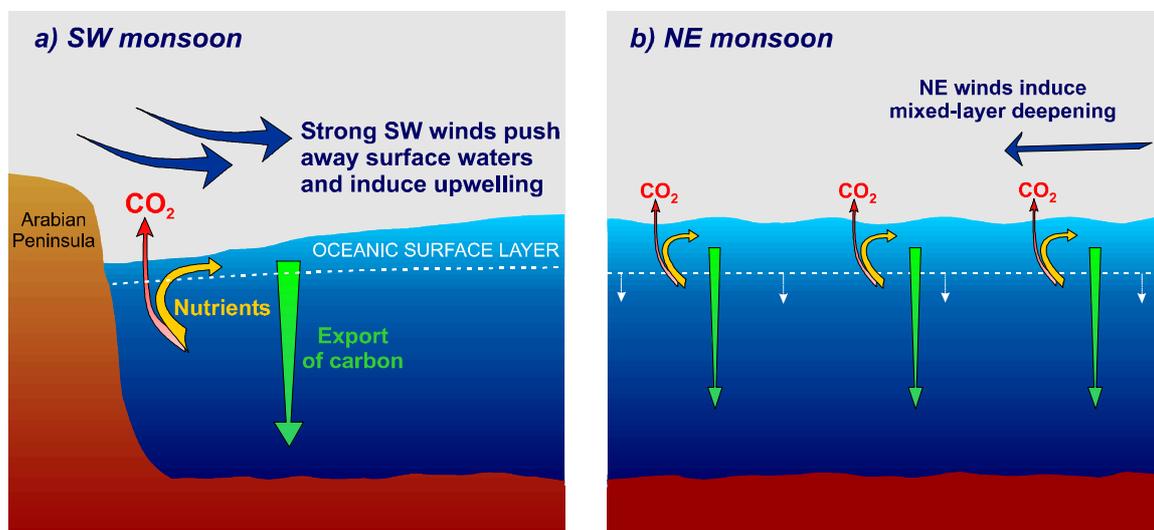


Abb. 2-1: Im SW-Monsun führen die starken Winde im westlichen Arabischen Meer zum Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers und damit sowohl zu verstärkter CO_2 -Emission als auch zu erhöhtem Kohlenstoffexport (a). Während des schwächeren NE-Monsuns kommt es zu den selben Effekten durch eine Vertiefung der Durchmischungsschicht (b).

Die hohe biologische Produktivität im Arabischen Meer führt zu einem hohen Export von organischem Material aus dem Oberflächenwasser in die darunter liegenden Wassermassen. Sowohl durch die hohe Sauerstoffzehrung beim Abbau dieses durch die Biologische Pumpe eingetragenen organischen Materials, als auch durch den Einstrom von

relativ O_2 -armen intermediären Wassermassen aus niedrigen Breiten beiderseits des Äquators (Swallow 1984, Olson et al. 1993, You & Tomczak 1993) kommt es zur Ausbildung einer beständigen Sauerstoffminimumzone in Wassertiefen zwischen ca. 200 bis 1150 m (z.B. Wyrski 1973, Sen Gupta & Naqvi 1984; Abb. 2-2a). Sie ist im Nordosten am stärksten ausgeprägt und wird durch den Einstrom von höher salinaren Wassermassen aus dem Roten Meer und Persischen Golf und die damit verbundene Stratifizierung der Wassersäule noch verstärkt (Wyrski 1973, Qasim 1982). In der Sauerstoffminimumzone laufen z.B. mit der Denitrifikation biogeochemische Prozesse von globaler Bedeutung ab (z.B. Mantoura et al. 1993).

Für die Untersuchung des Exports von partikulärem Material in die Tiefsee wurden z.T. bereits seit 1986 im Rahmen einer deutsch-indischen Zusammenarbeit Sinkstofffallen im Arabischen Meer verankert (Abb. 2-2b). Diese kontinuierlichen Messungen bilden einen wichtigen Bezugspunkt, um die in JGOFS-Indik durchgeführten temporären Messungen in einen größeren Zeitrahmen einzuordnen (vgl. Kap. 5).

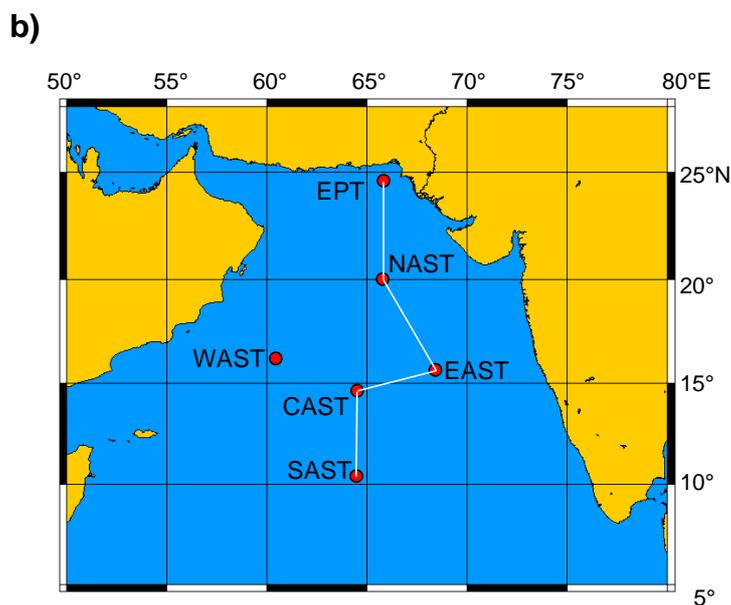
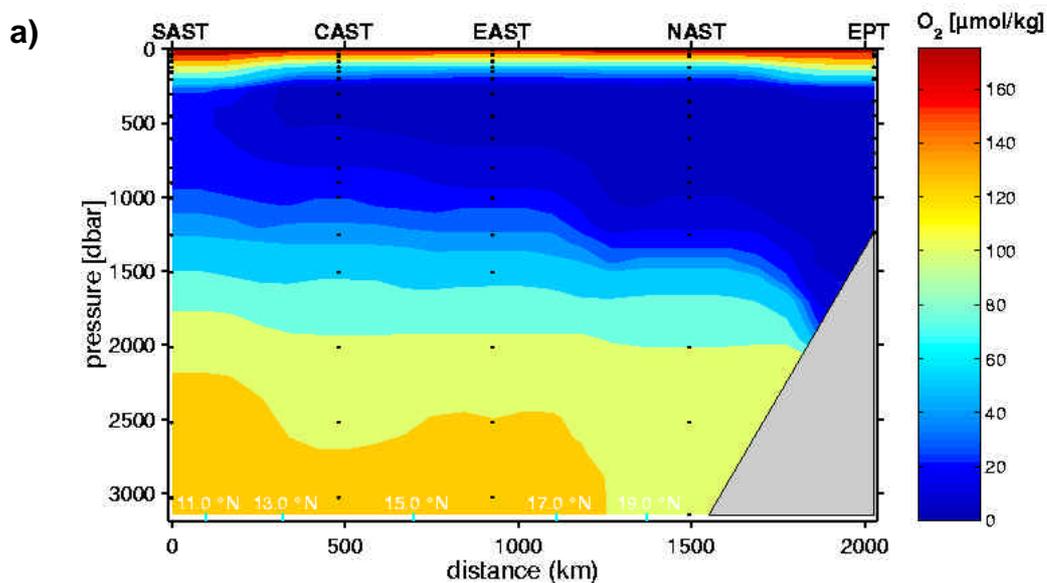


Abb. 2-2: a) Sauerstoffkonzentrationen in der Wassersäule gemessen während der Forschungsfahrt So119 (Quelle: A. Hupe & R. Lendt) und b) zugehörige Profillinie der Sauerstoff-Messungen sowie Verankerungspositionen von Sinkstofffallen im Arabischen Meer (Quelle: A. Suthhof).

3 ZIELE UND DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

Die Ziele der internationalen JGOFS-Prozessstudie im Arabischen Meer sind wie folgt festgelegt:

- Charakterisierung der vom Monsun gesteuerten biogeochemischen Prozesse im Arabischen Meer und Quantifizierung der relativen Bedeutung dieser Region für die globalen biogeochemischen Kreisläufe, insbesondere der Rolle des Arabischen Meeres als Quelle oder Senke für atmosphärisches CO₂;
- Untersuchung der Saisonalität biogeochemischer Prozesse in hoher zeitlicher Auflösung;
- Quantifizierung der Produktion, der Umsetzung und des Verbleibs biologisch fixierten Kohlenstoffs mit besonderer Beachtung der Bedeutung des Sauerstoffminimums für die biogeochemischen Stoffumsetzungen;
- Rekonstruktion der Monsunvariabilität im Quartär.

Um diese Forschungsziele zu erreichen, wurde in der ersten Phase des Projektes 1995 auf insgesamt sieben Fahrten der FS METEOR mit den Felduntersuchungen begonnen (Abb. 3-1). Die Forschungsfahrten ME32/3 und ME32/5 waren hauptsächlich JGOFS relevanten Arbeiten gewidmet. An den anderen Fahrten nahmen jeweils einzelne Arbeitsgruppen teil, wodurch für einen Teil der Messparameter die saisonale Abdeckung verbessert werden konnte. Um die das Arabische Meer kennzeichnende Saisonalität ebenso wie eine interannuelle Variabilität zu erfassen, wurden die Felduntersuchungen in der zweiten Phase 1997 mit dem FS SONNE fortgeführt (So117, So119 und So120). Außerdem fanden auf zwei Fahrten mit dem FS SONNE in den Jahren 1997 und 1998 (So118, So129), die primär dem Tiefsee-Verbundprojekt BIGSET („*B*io*g*eochemische *S*toff- und *E*nergietransporte in der *T*iefsee“) gewidmet waren, weitere JGOFS-relevante Arbeiten statt.

Die Felduntersuchungen wurden mit der zweiten Phase im wesentlichen abgeschlossen. Das gleiche gilt für den überwiegenden Teil der Laboruntersuchungen. Die Beschreibung, Auswertung und Interpretation der Daten sowie ihre Zusammenführung in der nationalen Datenbank waren die Arbeitsschwerpunkte im Berichtszeitraum. Gleichzeitig wurde damit begonnen, die Ergebnisse einzelner Teilprojekte zusammenzufassen und in Modelle verschiedener Dimensionalität und Komplexität zu integrieren. Zusätzliche Schwerpunkte lagen in der Integration der Daten bzw. Erkenntnisse aus den JGOFS-Studien anderer Nationen im Arabischen Meer sowie der Publikation der eigenen Ergebnisse (Anhang II). Zur Publikation der Ergebnisse war ursprünglich auch ein Sonderband der Zeitschrift *Deep-Sea Research* geplant. Hierfür sind eine Reihe von Manuskripten eingereicht worden, die ebenfalls im Anhang II aufgelistet sind. Viele der Autoren konnten in der zur Zeit laufenden Synthesephase (2000-2003) jedoch nicht mehr weiterbeschäftigt werden. Die nötige Überarbeitung einiger Manuskripte ist somit nicht gewährleistet. Über die Form der Veröffentlichung wurde daher noch nicht entschieden.

Internationales JGOFS

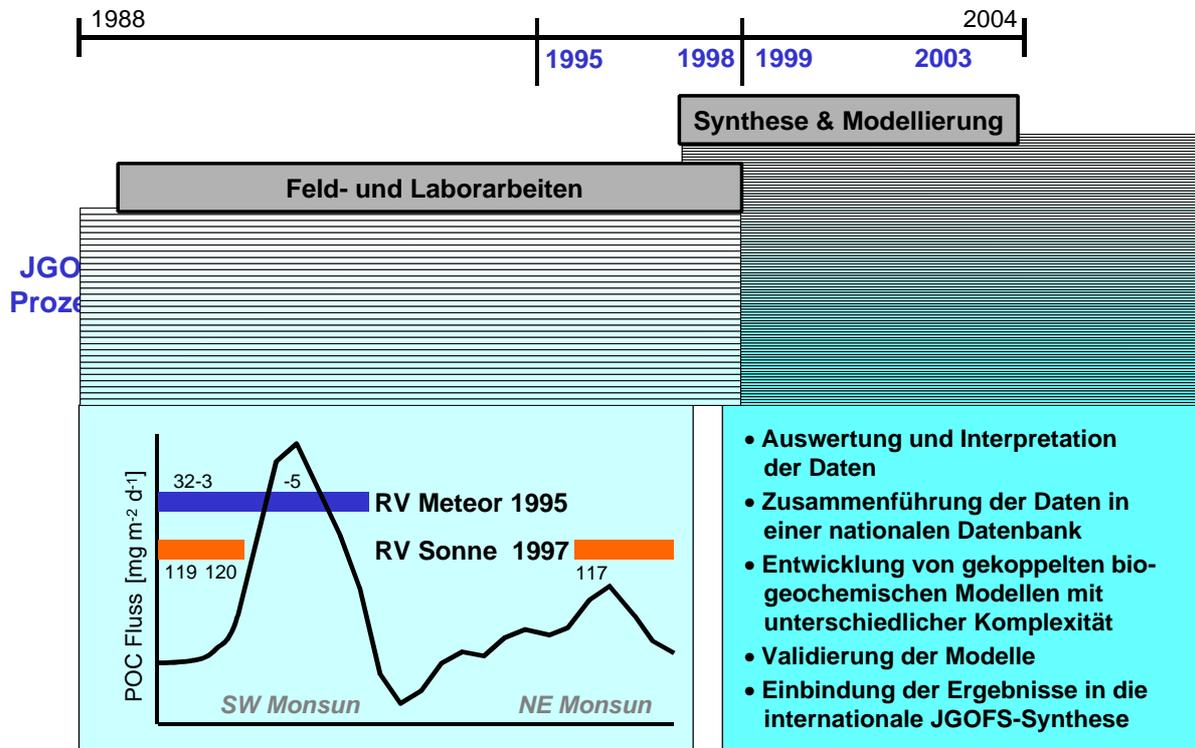


Abb. 3-1: Übersicht über die Feldarbeiten im Verbundprojekt mit FS METEOR- und SONNE in den Jahren 1995 (Phase I) und 1997-98 (Phase II) sowie über die wesentlichen Ziele der Synthese-phase (1999-2000) jeweils in Relation zur Zeitplanung im internationalen JGOFS.