

Abschlußbericht 1996-1999

(Ergänzung zum Vorabschlußbericht)

zum Verbundvorhaben

***Tiefenwasserzirkulation
in niederen Breiten und
interhemisphärische Transporte
(TIEFBIT)***

Förderkennzeichen 03 F 0176A,B,C

An das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Kiel, 1999

Tiefenwasserzirkulation in niederen Breiten und interhemisphärische Transporte (TIEFBIT)

Förderkennzeichen: 03 F0176A,B,C

Koordination: Prof. Dr. Friedrich Schott
Institut für Meereskunde
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
Tel: 0431 - 597-3820
Fax: 0431 - 597-3821
e-mail: fschott@ifm.uni-kiel.de

Zielsetzung

TIEFBIT bestand in der ersten Förderungsphase 1996-1999 aus 6 Teilprojekten, von denen sich 4 auf die Tiefenzirkulation des tropischen Atlantiks konzentrieren und 2 auf die des westlichen tropischen Pazifiks. Insgesamt ging es um die Bestimmung der relevanten physikalischen Prozesse, die beim interhemisphärischen Austausch tiefer Wassermassen von Bedeutung sind.

Arbeitsprogramm

Für die modellierenden Programme konzentrierte sich das Arbeitsprogramm der ersten Förderungsphase auf die Erstellung und Interpretation hochauflösender regionaler und Prozeß-Modelle (V-044 und V-076) sowie um die Interpretation von großräumigen Meridional-Transporten von Kohlenstoff in einem niedrig-auflösenden globalen Modell (V-049). Für die experimentell orientierten Projekte ging es um die Auswertung von Beobachtungsdaten der Tiefenzirkulation, die mit "METEOR" und verankerten Stationen im westlichen tropischen Atlantik (V-060) bzw. mit der "SONNE" im Projekt TROPAC (V-061 und V-055) gewonnen worden waren.

Stand des Vorhabens und wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Der Stand der Forschung und die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse wurden in einem Vorabschlußbericht bereits Anfang Mai 1999 aufgezeigt. Als Ergänzung werden hier die Tätigkeiten der Gruppen seit dem Vorabschlußbericht bis zum Ende der ersten Bewilligungsphase aufgezeigt und ansonsten auf den Vorabschlußbericht verwiesen.

Im einzelnen wurden noch folgende Arbeiten durchgeführt:

V-044 (Böning):

Am Ende des Förderungszeitraums von Tiefbit V-044 (03 F 0176A) wurden die bereits in Kap. 2.3 des Vorabschlussberichts angesprochenen Hypothesen von LI ET AL. (1996) bezüglich eines potentiellen rektifizierenden Effekts äquatorialer Wellen im Tiefenwasserniveau des Atlantiks auf die Ausbreitungseigenschaften von Wasserteilchen aufgegriffen. Diese analytischen und Prozessmodell-gestützten Untersuchungen zeigen, wie auch neueste Diagnosen eines globalen Zirkulationsmodells (LI & CHANG, 1999), dass neben der bereits bekannten "Stokes Drift" ein weiterer Mechanismus eine wichtige Rolle für den Transport individueller Teilchen und damit für die Ausbreitung beobachteter Spurenstoffe entlang des Äquators spielen kann, das sogenannte "chaotic stirring".

Lagrangesche Analysen im regionalen FLAME-Modell weisen das "chaotic stirring" charakterisierende Verhalten in mittleren Tiefen entlang des Äquators auf. Ein, in nur einer Modell-Geschwindigkeitsbox, zufallsverteilt initialisiertes Partikel-Ensemble spiegelt die welleninduzierte chaotische Dispersion in dem beobachteten Gebiet wider: Für anfänglich eng benachbarte Teilchen werden im Laufe der Integration völlig verschiedene Bahnverläufe realisiert (Abb. 1). Der Effekt dieses Dispersionsmechanismus auf die Tracerhomogenisierung und -verteilung entlang des Äquators dürfte die früher postulierte Rolle der schwachen mittleren Advektion (BÖNING & SCHOTT, 1993) übertreffen, steht doch in der Untersuchung von LI & CHANG (1999) einer ostwärtigen Versetzung der Wasserpakete, und damit der potentiell mitgeführten Spurenstoffe, ein mittlerer advektiver Transport nach Westen gegenüber. Die massgeblich an diesem Prozess beteiligten äquatorialen Rossby- und Yanaiwellen (LI & CHANG, 1999; LI ET AL., 1996) wurden schon in einer CME-Analyse von BÖNING & SCHOTT (1993) identifiziert.

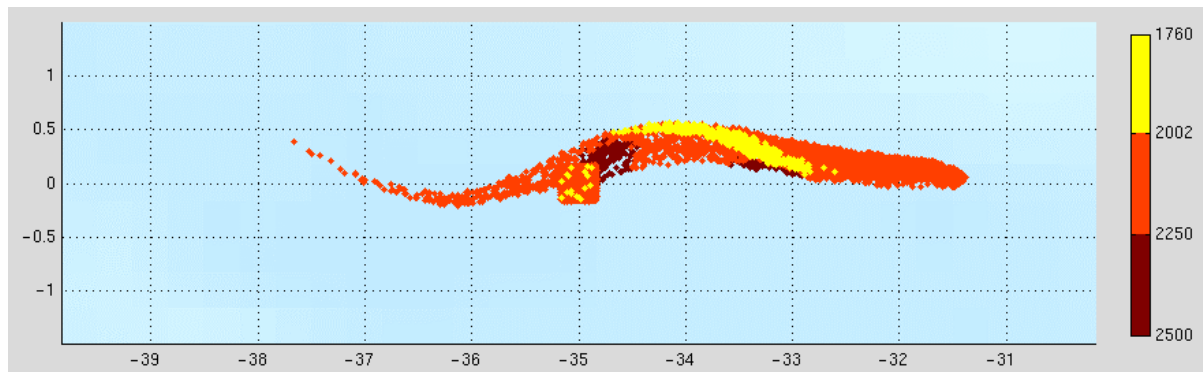


Abbildung 1: FLAME: (oben) Dispersion einer Teilchenwolke initialisiert in einer Box bei 35° West in 2125 m Tiefe auf dem Äquator, integriert über 1 Jahr; die Legende [m] gibt die vertikale Versetzung innerhalb der Modelltiefenstufen an

Literatur

BÖNING, CLAUS W. & FRIEDRICH A. SCHOTT. Deep currents and the eastward salinity tongue in the equatorial Atlantic: results from an eddy-resolving, primitive equation model. *Journal of Geophysical Research*, **98 (C4)**, 6991-6999, 1993.

LI, XIANJIN & PING CHANG. Mixing induced by the Atlantic equatorial wave activity in an eddy-resolving OGCM. *Journal of Geophysical Research*, **104 (C6)**, 13303-13315, 1999.

LI, XIANJIN, PING CHANG & R. C. PACANOWSKI. A wave-induced stirring mechanism in the mid-depth equatorial ocean. *Journal of Marine Research*, **54**, 487-520, 1996.

V-076 (Käse):

Die Arbeiten nach der Abgabe des vorgezogenen Abschlussberichts konzentrierten sich auf die Revision der drei eingereichten Arbeiten. Davon ist inzwischen eine Arbeit akzeptiert, die zweite wieder eingereicht. Die dritte bei JPO vorgelegte Arbeit ist noch in der Revision. Sie wird erst nach Annahme der noch ausstehenden wieder eingereichten Arbeit erneut vorgelegt werden, da es sich um auf einander basierende Einzelteile handelt.

Durch die (nicht vom Projektleiter zu verantwortenden) Verzögerung bei der Abgabe des Gesamt-Fortsetzungsantrags konnte die Mitarbeit von Dr. Tyler, der die wesentlichen theoretischen Ansätze erarbeitet hatte, nicht mehr gewährleistet werden. Er ist nach Auslaufen des Projekts am 30.6.1999 in die USA zurückgekehrt. Angesichts dieses Verlusts und wegen der von den Gutachtern geforderten

finanziellen Kürzung und Beschränkung auf das Modell der Gruppe Boeing sah sich der Teilprojektleiter nicht in der Lage, die im Fortsetzungsantrag formulierten Fragestellungen ordnungsgemäß anzugehen und hat diesen deshalb zurückgezogen.

Abschliessend läßt sich sagen, dass die Bildung energiereicher Wirbel in äquatorialen Randströmen durch nichtlineare Dynamik bestimmt wird. Mit der von uns entwickelten 'Stringfunction' konnte durch Analyse von Ergebnissen numerischer Simulationen Aufschluss erhalten werden, wie das Zusammenspiel von variabler Bodentopographie und planetarischer bzw. relativer Vorticity (einem generalisierten β -Effekt) zur Ablösung von 'Strings' (Eddies) führt.

V-060 (Schott, Fischer, Stramma):

Im Rahmen des "Climate Observing System of the Tropical Atlantic" (COSTA) sollen in Zukunft alle Aktivitäten im tropischen Atlantik abgestimmt und die Zusammenarbeit verbessert werden. Ein COSTA Treffen fand vom 4.-7. Mai 1999 in Miami statt, an dem J. Fischer und L. Stramma teilnahmen, um unter anderem die zukünftigen Vorhaben im Rahmen des TIEFBIT Projekts abzustimmen. Es gibt mehrere französische, amerikanische und brasilianische Vorhaben, die zur Zeit laufen oder in der Beantragung sind, und eine Zusammenarbeit sowohl bei den Fahrtplanungen als auch den Auswertungen verspricht für die neu beantragten TIEFBIT-Anträge sehr hilfreich zu werden. Insbesondere ist hier die Kooperation mit E. Chassignet zu nennen, der das MICOM-Modell (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Modelling Group) betreibt, um die Tiefenzirkulation in Modellen verschiedener physikalischer Konzeptionen zu vergleichen.

Im Rahmen des Treffens in Miami wurden weitere Diskussionen über die Ergebnisse zur Variabilität bei 44°W am Äquator für die geplante Veröffentlichung mit R.L. Molinari geführt. Da die Anteile von Labradorseewasser bzw. von rezirkulierendem Wasser an der Variabilität bei 44°W im tiefen westlichen Randstrom noch unklar sind, sind noch einige weitere Datenanalysen vereinbart und zum Teil bereits durchgeführt worden, bevor das Manuskript eingereicht wird.

Der Vergleich zwischen den Transporten über 35°W und 5°S aus den Meteor Daten zeigte eine Wassermassentransformation von tiefem NADW in flachere Tiefen des NADW. Eine Möglichkeit erhöhter Vermischung liegt in höherer Turbulenz entlang der Topographie. Aus den vorliegenden CTD Messungen wurden Skalen vertikaler Instabilität abgeschätzt, die ein Maß für die Turbulenz darstellen. Mit der sogenannten Thorpe Skala lassen sich Muster von vertikaler Instabilität auch im

Meteor Datensatz entlang der seamountreichen Küste Südamerikas finden. Diese sind allerdings statistisch nicht signifikant genug, um eine mittlere besonders starke Vermischung aufgrund der Wechselwirkung mit der Topographie abzuleiten. Erhöhte Turbulenz und diapyknische Vermischung im westlichen Randstrom entlang der südamerikanischen Küste sind also nicht die Hauptursache für die aus Beobachtungen abgeleitete Wassermassentransformation.

Abschließend muß erwähnt werden, daß die Untersuchungen in der ersten Bewilligungsphase von TIEFBIT äusserst hilfreich waren zur Festlegung der Fahrtroute der Vermessungen und der Positionierung des Verankerungsarrays im tropischen Atlantik zu Beginn der zweiten TIEFBIT-Phase während der Meteorreise M47/1 im März/April 2000.

V-061 (Siedler):

(Weitere beteiligte Wissenschaftler: Dr. J. Holfort, Dr. T.J. Müller, Dipl.-Oz. M.Vanicek, Dr. W. Zenk)

Der Hauptteil dieses Berichtes wurde bereits im Vorabschlussbericht vorgelegt. Hier werden jetzt die Ergänzungen zu den dort behandelten Kapiteln behandelt, die sich aus den Arbeiten in den letzten Monaten des Vorhabens ergaben.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit dem französischen Forschungsinstitut ORSTOM (jetzt: Institut de Recherche pour le Développement) Nouméa, Neu-Kaledonien, wurde die Analyse der oberflächennahen Strukturen im äquatorialen Westpazifik während der SONNE-Fahrt 113 im Oktober/November 1996 fortgeführt. Eine Veröffentlichung zu Prozessen im Zusammenhang mit einem La Niña - El Niño - Übergang wurde fertiggestellt und bei den Geophysical Research Letters eingereicht.

Das in Zusammenarbeit mit dem Vorhaben V-055 (Universität Bremen, Arbeitsgruppe Tracerphysik, Prof. Dr. W. Roether) entstandene und bei den Geophysical Research Letters eingereichte Veröffentlichung wurde positiv begutachtet und befindet sich im Druck.

Ergebnisse

Die gemeinsamen Untersuchungen mit ORSTOM Nouméa ergaben die Möglichkeit, während der Schlussphase eines La Niña - Ereignisses den "fresh pool" (die wegen der üblichen starken Niederschläge in diesem Gebiet entstehenden salzarmen Deckschicht) und den "warm pool" (die dickere Oberflächenschicht, die durch die starken Oberflächenwärmeflüsse entsteht) zu beobachten. Es zeigte sich, dass sich

die Salzgehaltsfront, die den "fresh pool" im Osten begrenzt, zum Schluss der La Nina weit nach Westen verschoben hatte. Die beobachteten Strömungen unterstützen die Annahme, dass advective Prozesse eine wesentliche Rolle bei der Entstehung der thermohalinen Struktur in dieser ENSO-Phase spielen.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erschienen oder eingereicht:

Klatt, O. und J.Holfort, 1999: Bottom water circulation in the western equatorial Pacific as inferred from carbon tetrachloride distributions, *Geophysical Research Letters* (im Druck)

Ioualalen M., J. Holfort, G. Siedler and W. Zenk, C. Hénin and J. Picaut, 1999:

The equatorial West Pacific fresh pool at the end of a La Niña event in October/November 1996, *Geophysical Research Letters* (eingereicht)

Geplant bzw. in Arbeit:

Die Arbeiten zum Tiefen- und Zwischenwasser werden auch nach Abschluss des Vorhabens bis zur Fertigstellung der entsprechenden Publikationen weitergeführt, obwohl bis auf T. J. Müller und W. Zenk alle Mitarbeiter inzwischen an anderer Stelle arbeiten (G. Siedler überwiegend in Telde, Spanien; J. Holfort in Hamburg; M. Vanicek in Woods Hole, USA). Die in Arbeit befindlichen Veröffentlichungen wurden im Vorabschlussbericht bereits genannt.

V-055 (Roether):

Die verbleibende Zeit des Förderungszeitraumes wurde zum Abschluß der Endauswertung der Tracer-Proben und der weiteren Auswertung der Ergebnisse verwendet.

Fertigstellung und Endauswertung der Tracermessungen

Die Endauswertung der Tritiumproben der *Sonne* Reise 113 wurde abgeschlossen. Damit liegen jetzt alle Tracerdaten dieser Expedition vor. Es ist geplant diese Daten nach einer angemessenen Frist an das WOCE Hydrographic Office zu übergeben und somit in den WOCE-Datensatz einfließen zu lassen.

Fortschritte bei der Veröffentlichung der Ergebnisse

Die bei *Geophysical Research Letters* eingereichte Arbeit (O. Klatt und J. Holfort "Bottom water circulation in the western equatorial Pacific as inferred from carbon tetrachloride distributions") wurde am 07.10.99 akzeptiert (siehe Anlage).

Die Absprachen zu einer Arbeit über die regionale Verteilung des ^3He in dem tiefen ^3He -Maximum im Vergleich zur großräumigen Verteilung im Pazifik und die gefundene lokale ^3He Quelle haben sich konkretisiert (Autoren: O.Klatt, J.Lupton, W.Roether und R. Seifert). Der Arbeitstitel ist nun: *A deep helium source in the western equatorial Pacific*.

Aufgrund des nun vollständig zur Verfügung stehenden Tracerdatensatzes, konnte mit der Ausarbeitung der Veröffentlichung über eine Wassermassenanalyse im Zwischenwasserbereich und deren Ausbreitung begonnen werden (Autoren J. Holfort und O. Klatt).

Darüber hinaus wurde das Auffinden von CCl_4 im tiefen westlichen Randstrom und der Befund über eine tiefe lokale Heliumquelle auf dem IUGG99 Meeting (19 – 30 Juli 1999 in Birmingham, UK) von Olaf Klatt vorgetragen. Der Titel des Vortrags war "*Water mass analysis in the western equatorial Pacific using anthropogenic tracers*", der Abstract ist in *IUGG99 Birmingham abstracts week A* veröffentlicht (Anlage).

V-049 (Maier-Reimer):

Der Beitrag von Maier-Reimer sowie ein längerer Reprint wurden am 06.08.1999 direkt ans BEO eingereicht. Als Anlage ist der Nachtrag zum Vorabschlußbericht beigefügt.

Vorabschlußbericht 1996-1999

zum Verbundvorhaben

***Tiefenwasserzirkulation
in niederen Breiten und
interhemisphärische Transporte
(TIEFBIT)***

Förderkennzeichen 03 F 0176A,B,C

An das Bundesministerium für Bildung und Forschung

Kiel, 1999

Tiefenwasserzirkulation in niederen Breiten und interhemisphärische Transporte (TIEFBIT)

Förderkennzeichen: 03 F0176A,B,C

Koordination: Prof. Dr. Friedrich Schott
Institut für Meereskunde
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel
Tel: 0431 - 597-3820
Fax: 0431 - 597-3821
e-mail: fschott@ifm.uni-kiel.de

Zielsetzung

TIEFBIT besteht in der ersten Förderungsphase 1996-1999 aus 6 Teilprojekten, von denen sich 4 auf die Tiefenzirkulation des tropischen Atlantiks konzentrieren und 2 auf die des westlichen tropischen Pazifiks. Insgesamt geht es um die Bestimmung der relevanten physikalischen Prozesse, die beim interhemisphärischen Austausch tiefer Wassermassen von Bedeutung sind.

Arbeitsprogramm

Für die modellierenden Programme konzentrierte sich das Arbeitsprogramm der ersten Förderungsphase auf die Erstellung und Interpretation hochauflösender regionaler und Prozeß-Modelle (V-044 und V-076) sowie um die Interpretation von großräumigen Meridional-Transporten von Kohlenstoff in einem niedrig-auflösenden globalen Modell (V-049). Für die experimentell orientierten Projekte ging es um die Auswertung von Beobachtungsdaten der Tiefenzirkulation, die mit "METEOR" und verankerten Stationen im westlichen tropischen Atlantik (V-060) bzw. mit der "SONNE" im Projekt TROPAC (V-061 und V-055) gewonnen worden waren.

Stand des Vorhabens und wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

V-044 (Böning): Das hochauflösende Kieler DYNAMO-Modell ist mit Hilfe von Lagrange'schen Trajektorien im Hinblick auf die Wechselwirkung der tiefen westlichen Randströme mit den Zonalströmungen untersucht worden. Das neue regionale Modell unter dem Konzept FLAME ("Family of Linked Atlantic Model Experiments") mit offenen Rändern wurde fertiggestellt und wurde bezüglich der Rolle der Strömungsfuktuationen im äquatorialen Wellenleiter für die Ausbreitung von Wassermassen im tiefen westlichen Randstrom analysiert. Dabei zeigten sich neue Ergebnisse für die ostwärtige Ausbreitung der äquatorialen Salzzunge bei längerer Modellintegration.

V-076 (Käse): Theoretische Studien und Modelluntersuchungen zur Ablösung von Wirbeln des Nordbrasilstromes wurden anhand der Daten des FLAME Modells aus der Gruppe Böning durchgeführt. Die neuentwickelte Analysefunktion, "Stringfunktion", liefert eine Begründung für die Wirbelbildung in westlichen Randströmen und erklärt die Rolle von Rossby- und Kelvinwellen im äquatorialen Wellenkanal. Die Stringfunktion konnte für die FLAME Modellläufe konstruiert werden und belegt den nichtlinearen Charakter der Rossbywellen und die Ablösung von geschlossenen Strings (Wirbeln). Perioden der Bildung im Modell und Beobachtungen weisen Übereinstimmung auf.

V-060 (Schott, Fischer, Stramma): Es wurden Analysen des Jahresganges des tiefen westlichen Randstromes des *äquatorialen* Atlantiks mit Verankerungsarbeiten und Schiffsmessungen abgeschlossen. Variabilitäten des tiefen westlichen Randstromtransportes konnten quantifiziert und mit Modellrechnungen verglichen, sowie Details über die Ausbreitung des Tiefenwassers aus Daten der Meteor Fahrten beschrieben werden. Wassermassentransformationen im zentralen und östlichen äquatorialen Atlantik wurden aus einem historischen Datensatz, und am südwestlichen Rand aus aktuellen Messungen mit Hilfe eines Inversmodells und Budgetrechnungen untersucht. Eine Reise mit F.S. "METEOR" wird für den März/April 2000 vorbereitet, bei der basierend auf den hier gemachten Analysen ein umfangreiches Strömungsmesser-Array ausgebracht werden soll, um zusammen mit den eigenen Schiffsmessungen die Transporte und Ausbreitungswege genauer zu spezifizieren.

V-061 (Siedler): Die Eichung, Aufbereitung und Auswertung der CTD- und LADCP-Daten der "SONNE"-Reise SO113 im Projekt TROPAC sind abgeschlossen. Ergebnisse aus Verankerungen im Zwischen- und Tiefenwasserbereich im

Karolinen- und Marianenbecken und aus den eingesetzten RAFOS floats wurden in Verbindung mit CTD und LADCP Daten der Reise SO113 analysiert. Der Tiefenwassertransport durch kritische Passagen wurde bestätigt. Floats im Zwischenwasserbereich wurden überraschenderweise meridional über den Äquator verdriftet, genaue Analysen diesbezüglich stehen noch aus.

V-055 (Roether): In diesem Teilprojekt wurden die Tracerdaten der „SONNE“-Reise SO113 aufbereitet und ausgewertet. Aus anthropogenen Tracerdaten (CCl_4) konnte die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Bodenwassers als tiefer westlicher Randstrom im westlichen Marianen Becken abgeschätzt werden. Im Zwischenwasserbereich konnten aufgrund von FCKW Daten Details für die unterschiedliche Ausbreitung des nördlichen und südlichen Zwischenwassers beschrieben werden, weitere Untersuchungen über die Konzentrationen der Vermischung sind geplant. Die Verteilung terrigenen $\delta^3\text{He}$ zeigt eine weitere Quelle für das Tiefenwasser in der Bismarcksee, im Südwesten des äquatorialen Pazifiks.

V-049 (Maier-Reimer): Der vermutete ozeanische interhemisphärische Transport von 0.6 Gt Kohlenstoff pro Jahr konnte bislang nur teilweise erklärt werden. Er ist relativ unabhängig von den geochemischen Tracerverteilungen, und die Sensitivität gegenüber biologischen Parametern erwies sich als relativ gering. Das durch Zonalintegration reduzierte zweidimensionale Modell zeigte, daß der interhemisphärische Transport abhängig von der Parametrisierung des Gas- und Staubeintrags im südlichen Ozean ist. Entsprechende Sensitivitätsuntersuchungen im dreidimensionalen Modell sind noch nicht abgeschlossen.

Eine detaillierte Zusammenstellung der erzielten Ergebnisse ist in den folgenden Vorabschlußberichten der einzelnen Teilprojekte enthalten, auf die hiermit verwiesen wird.

Die Untersuchungen der ersten Antragsphase brachten verschiedene neue und unerwartete Ergebnisse und warfen neue Fragestellungen auf, die in einer zweiten beantragten Förderungsphase untersucht werden sollen.