

Der Nordatlantik als Teil des Erdsystems: Vom System-Verständnis zur Analyse regionaler Auswirkungen

BMBF Verbundvorhaben als Beitrag zur nationalen und internationalen Erdsystemforschung

Abschlußbericht Nordatlantik-Projekt

Förderkennzeichen 03F0443

vorgelegt am 28. April 2010

Projektpartner:

Universität Hamburg, Institut für Meereskunde

Leibnitz-Institut für Meereswissenschaften, IfM GEOMAR

Universität Bremen, Institut für Umweltphysik

Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft

Max-Planck Institut für Meteorologie

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Projektträger:

Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht der Universität Hamburg (AP 2.3 und AP 4.1)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Detlef Stammer Dr. Armin Köhl Prof. Dr. Detlef Quadfasel Prof. Dr. Rolf Käse	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2010
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Hamburg Institut für Meereskunde Bundesstrasse 53 20146 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0443A
	11. Seitenzahl 11
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Für das Verständnis von bereits stattfindenden oder sich anbahnenden Veränderungen im Nordatlantik sind Analyseansätze durch Modell-Datensynthesen unumgänglich, da nur so eine bestmögliche Beschreibung der sich ändernden Zirkulation und der zugehörigen Antriebsfelder möglich wird. Übergeordnetes Ziel der Projekte war die Erstellung einer langen Messreihe der Massen- und Wärmetransporte zwischen dem Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik zur Analyse saisonaler, zwischenjährlicher und dekadischer Ozeanvariabilität (AP 2.3) und ihre Einbettung in ein dynamisch und in sich konsistentes Modell der nordatlantischen Zirkulation und der dazugehörigen Oberflächenflüsse (AP 4.1). Die wissenschaftlichen Anwendungen der erstellten Synthesen liegen in der umfassenden Beschreibung und Prognose von Änderungen der vertikalen Umwälzbewegung (MOC) aufgrund variabler meridionaler Wärme- und Frischwassertransporte, sowie in der Analyse des Austausches zwischen den verschiedenen klimatischen Regionen des Atlantiks vom Nordmeer bis zu den Tropen	
19. Schlagwörter Nordatlantik Synthese, Wechselwirkung subpolarer-subtropischer Atlantik	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Detlef Stammer Dr. Armin Köhl Prof. Dr. Detlef Quadfasel Prof. Dr. Rolf Käse	5. end of project
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) University of Hamburg Institute of Oceanography Bundesstrasse 53 20146 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0443A
	11. no. of pages 11
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>For the understanding of existent or future changes in the North Atlantic approaches through model-data syntheses are inevitable. By this method, a best description of the changing circulation and the associated forcing fields is achieved. The overall objective of both projects was to establish long term observational time series of water mass and heat transport across the Greenland-Scotland Ridge (AP 2.3) and to create a dynamic and self-consistent assessment of its role for the North Atlantic circulation and its associated surface fluxes (AP 4.1). The scientific applications of the established synthesis lie in the comprehensive description and prediction of changes of the vertical overturning circulation (MOC) and meridional heat and freshwater transports. This analysis focuses on the exchange processes between the subpolar / subtropical / tropical Atlantic and the fluxes between ocean and atmosphere over the Atlantic.</p>	
19. keywords	
20. publisher	21. price

Abschlussbericht

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Aufgabe 1 (AP 2.3)

Eine Schlüsselregion des Nordatlantiks bilden die Passagen des Grönland-Schottland-Rückens. Dort werden die dichten Wassermassen, die bei winterlicher Konvektion im Nordmeer entstehen, nach dem Überströmen in die tiefen Randströme des subpolaren und subtropischen Ozeans versetzt. Daher stand zunächst die Erstellung einer langfristigen Messreihe der Massen- und Wärmetransporte zwischen dem Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik zur Analyse saisonaler, zwischenjährlicher und dekadischer Ozeanvariabilität im Vordergrund.

Aufgabe 2 (AP 2.3)

Um den möglicherweise limitierenden Charakter der engen, flachen Passagen im Grönland-Schottland-Rücken zu verstehen und mit Beobachtungen zu vergleichen, wurde die Entwicklung eines prognostischen Modells zur hydraulischen Überströmung von Meeresschwellen/Strassen zur Sensitivität der Transportschwankungen auf geänderte atmosphärische Antriebe vorangetrieben und die Ergebnisse mehrerer Sensitivitätsexperimente analysiert.

Aufgabe 1 (AP 4.1)

In diesem Rahmen wurde eine Synthese/Reanalyse der Zirkulation des mit höchstmöglicher räumlicher Auflösung und unter Verwendung des ECCO adjungierten Modells erstellt. Als Beobachtungsgrundlage dienen alle frei erhältlichen, z. B. ARGO Profile, Zeitserien von Verankerungen und eine breite Palette von Fernerkundungsdaten. Als Ergebnis steht eine kontinuierliche Modelltrajektorie zur Verfügung, einschließlich monatlicher Mittelwerte von Temperatur, Salzgehalt und des vollständigen Geschwindigkeitsfeldes. Ein spezieller Fokus ist dabei die Ermittlung von dominanten Variabilitätsmustern der atlantischen Zirkulation. Damit einher geht die Identifizierung optimal nutzbarer Beobachtungsgrößen und die Entwicklung geeigneter Messstrategien, die notwendig sein werden, um prognostizierte Veränderungen und die dafür verantwortlichen Klimaprozesse im atlantischen Sektor frühzeitig zu erfassen.

Aufgabe 2 (AP 4.1)

Sensitivitätsuntersuchungen sollten durchgeführt werden, mit deren Hilfe die Reaktion der Zirkulation und des Meeresspiegels im Nordatlantik auf einen drastischen Eintrag von Frischwasser von Grönland untersucht werden kann. Diese Sensitivitätsuntersuchungen wurden zusammen mit Messkampagnen der Projekte AP 2.3 (Quadfasel, Käse) und AP 1.3 (Schauer, Gerdes) durchgeführt. Das adjungierte Modell wurde und wird weiterhin dazu benutzt, um Schlüsselprozesse und -regionen zu identifizieren, aus denen Beobachtungen wesentlich sein werden, um in Zukunft frühzeitig Änderungen der MOC und anderer kritischer Eigenschaften des Nordatlantiks identifizieren zu können.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.

Die beteiligten Gruppen besitzen weitreichende Erfahrungen in der Durchführung, Auswertung und Interpretation ozeanographischer Feldexperimente mit Hilfe von Schiffsexpeditionen, von autonomen Driftern und von Langzeitverankerungen sowie das Know-How zur Durchführung von Studien mit hochauflösenden numerischen Zirkulationsmodellen. Als technische Voraussetzungen für die Durchführbarkeit von Ozeansynthesen ist zudem ein Synthesystem vorhanden, mit dessen Hilfe Ozeanmodelle in Übereinstimmung mit gemessenen Daten gebracht werden können. Ein solches System steht mit dem ECCO-MITgcm Ozeansynthesemodell (mitgcm.org und ecco-group.org) zur Verfügung. Die Gruppe der Abteilung Fernerkundung und Datenassimilation hat langjährige Erfahrung mit diesem System vorzuweisen, die bis in die Anfänge der Entwicklung des Systems zurückreichen. Die notwendige Voraussetzung zur Durchführung dieser sehr rechenintensiven Methode, die auf einem iterativen Näherungsverfahren beruht, ist des Weiteren der Zugang zu entsprechenden Ressourcen eines Höchstleistungsrechenzentrums. Das DKRZ, bei dem die Universität Hamburg als Gesellschafterin beteiligt ist, bietet diese Voraussetzungen. Das DKRZ wurde erst 2009 durch ein neues IBM Power6 System mit 264 Nodes/8448 Cores ausgebaut. Es stehen jedoch von daher erst seit Mitte 2009 ausreichende Ressourcen zur Verfügung.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Beobachtungsprogramm (AP2.3) konnte während mehrerer Seereisen wie geplant durchgeführt werden. Dazu gehörten die jährlichen Aufnahmen und Wiederauslegungen der Verankerungen in der Dänemarkstrasse, die jeweils durch hochauflösende hydrographische und Stromprofilmessungen ergänzt wurden (FS Maria S Merian Reisen MSM05/4 und MSM12/1). Unsere Verankerungen im Färöer-Bank Kanal wurden von unseren Partnern von den Färöer Inseln gewartet und ebenfalls mit hydrographischen Aufnahmen ergänzt.

Auch der im Antrag vorgelegte Plan zu den Modellarbeiten (AP2.3 und AP4.1) wurde im wesentlichen eingehalten, wobei jedoch einige Modifikationen in Bezug auf die Länge der Modellläufe wie auch der angestrebten Modellauflösung vorgenommen werden musste. Dies ist einerseits durch die Rechenkapazitäten begründet, die erst seit Mitte 2009 in ausreichendem Umfang zur Verfügung standen. Zum anderen stellen hochauflösende Synthesen und die damit zusammenhängenden technischen Schwierigkeiten noch ein aktives Forschungsfeld dar. Die Möglichkeiten mit hochauflösenden Synthesen in Bereiche langer Zeitskalen vorzustoßen, sind daher begrenzt. Die Durchführbarkeit einer hochauflösenden Synthese über 50+ Jahre wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt innerhalb dieses Projektes nicht mehr als realistisch eingestuft. Die Arbeiten konzentrierten sich deshalb zum einen auf die Durchführung und Auswertung hochauflösender prognostischer Simulationen und zum anderen auf kürzere bzw. weniger hochauflösende Synthesen.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ein wesentlicher Vorteil der Arbeitsgruppen lag in der Beteiligung am Sonderforschungsbereich (SFB-512), in dessen Rahmen die angewendeten Verfahren erprobt und angewendet werden konnten. In der Abteilung Fernerkundung und Datenassimilation werden seit nunmehr ca. 6 Jahren globale wie auch regionale Synthesen betrieben, in denen dynamische Modelle der Ozeanzirkulation mit Hilfe einer Variationsmethode (adjungierte Methode) in Übereinstimmung mit Messdaten aus Feldmessungen wie auch von satellitengestützten Messverfahren gebracht werden können. Diese Erfahrungen haben ein breites Anwendungsspektrum, vom Verständnis von Zirkulationsänderungen bis zur Initialisierung gekoppelter Klimavorhersagen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei der umfangreichen Arbeit zur Gewinnung der Messdaten konnte auf die langjährig erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem isländischen HAFRO-Institut (Drs. Valdimarsson & Jónsson) und dem Faroese Fisheries Laboratory (Dr. Hansen) zurückgegriffen werden. Die enge Kooperation mit Instituten in Bergen (Drs. Drange & Østerhus) wurde ebenfalls fortgesetzt (AP 2.3). Die Arbeiten profitieren von den im Verbund gesammelten Daten und den sich daraus ergebenden Kooperationen. Eine Zusammenarbeit ergab sich auch bei dem Vergleich der gewonnenen Frischwasserflussfelder mit der Gruppe von Herrn Bakan am Max Planck Institut für Meteorologie und dem Meteorologischen Institut der Universität Hamburg und bei der Anwendung der Synthesen zur Initialisierung von gekoppelten Klimamodellen mit der Gruppe von Herrn Marotzke am MPI Hamburg (AP 4.1)

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse im Vergleich zur Zielsetzung

Zu Aufgabe 1 (AP 2.3)

Analyse der Transportzeitserien

Die Erstellung langer Zeitreihen des Overflows wurde für die beiden tiefen Passagen im Grönland-Schottland Rücken, dem Färöer-Bank Kanal und der Dänemarkstrasse, mit den bewährten Stromprofilmesserverankerungen fortgesetzt. Aus dem Färöer-Bank Kanal liegt nunmehr, seit 1996, eine mehr als 12 Jahre lange Zeitserie des Volumentransports vor. In der Dänemarkstrasse beginnt die Zeitreihe erst 1999; sie ist zudem durch längere Lücken charakterisiert.

Die bereits im Zwischenbericht für 2007 avisierte Arbeit zur Analyse der Färöer-Bank Kanal Zeitserie und deren Vergleich mit dem Kopenhagener Zirkulationsmodell (basierend auf dem MPI HOPE Modell) wurde inzwischen in *Nature* publiziert (Olsen et al., 2008). Hier konnte gezeigt werden, dass im Färöer-Bank Kanal ein auf längeren Zeitskalen stabiler Ausstrom existiert, dem allerdings mehr oder weniger starke saisonale Fluktuationen überlagert sind (Abb. 1a). Auffällig ist hier die nahezu perfekte Übereinstimmung der jahreszeitlichen Variabilität zwischen Beobachtungen und Modell in den Jahren 1997-2000 und 2006-2008. Die Diskontinuität 2000-2003, die ebenfalls in beiden Zeitserien vorhanden ist, steht möglicherweise im Zusammenhang mit dem Auftreten negativer winterlicher NAO-Phasen.

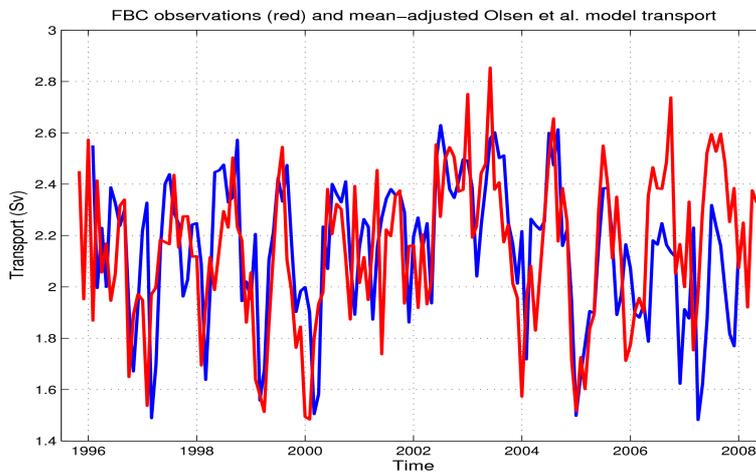


Abb. 1a: Die 12-jährige Messreihe des Färöer-Bank-Kanal Overflows im Vergleich mit den aktualisierten Modellergebnissen von Olsen et al. (2008).

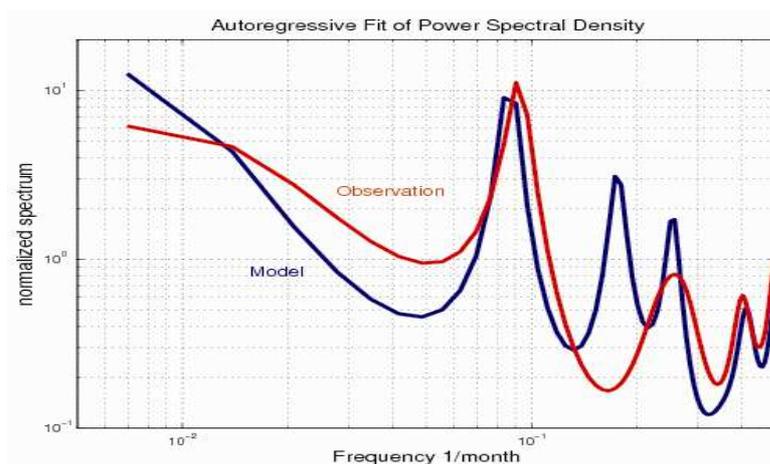


Abb. 1b: Die Spektren der Zeitserien aus Abb. 1a wurden mittels einer Approximation der tatsächlichen Zeitreihen durch einen 'autoregressive moving average process' berechnet. Der optimale Fit ergab eine signifikante Regression mit 12 Parametern bei der Beobachtungsreihe. Im Jahresband ergeben sich damit 12 Freiheitsgrade und ein Standard-Fehler von etwa 30% des Schätzwertes.

Die Messreihe ist sicher nicht lang genug, um gesicherte Differenzen bei speziellen Frequenzen aufzuweisen, doch fällt bereits auf, dass die Fluktuationen mit Halbjahresperiode im Modell ausgeprägter sind als in den Beobachtungen (Abb. 1b). Die normierte spektrale Dichte der Beobachtungszeitserie weist im Gegensatz zur Modellzeitserie keine Spitze im Spektrum auf. Es scheint sich bei diesem Modellverhalten also um ein Artefakt zu handeln. Welche Auswirkungen dieses Modelldefizit auf lange Sicht hat, wird in der nächsten Phase des Projektes zu untersuchen sein.

Zu Aufgabe 2 (AP 2.3)

Zum Einfluss der Nordatlantischen Oszillation

Die Variabilität von Atmosphäre und Ozean wird im Atlantisch-Europäischen Raum entscheidend durch die Nordatlantische Oszillation (NAO) geprägt. Es konnten mit einem 'controlled volume box model' die Schwankungen des Transports in der Dänemarkstraße, hervorgerufen durch NAO-Variabilität, mit Beobachtungen in Einklang gebracht werden.

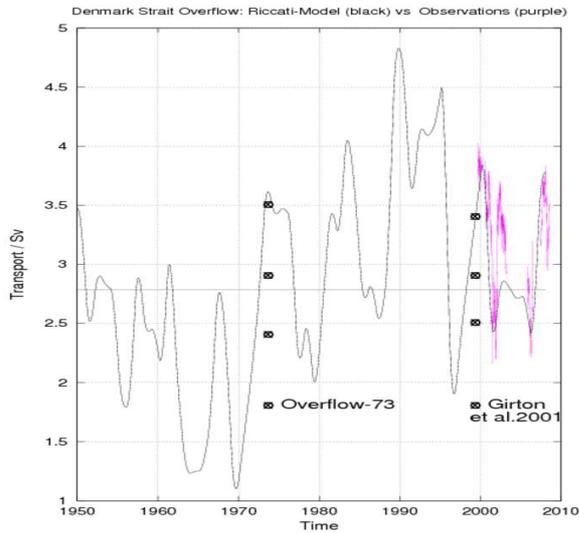


Abb. 2: Bis 2008 aktualisierter Hindcast des Dänemarkstrassen-Overflows mit einem nichtlinearen Riccati-Modell, angetrieben durch eine Netto-Imbalance des Reservoirs dichten Wassers im Nordmeer, die proportional zum NAO vorgegeben wird (nach Käse, 2006). Eingetragen sind zum Vergleich Werte von kurzfristigen Messungen (schwarze Punkte) und die bisher vorliegenden Ergebnisse der Messungen im Rahmen des abgelaufenen Kieler SFB-460 (1999-2003) sowie die Ergebnisse des TP A2.3 (magenta Kurve).

Die Untersuchungen zur Dynamik des Wassermassenaustausches standen im Berichtszeitraum daher unter dem Gesichtspunkt, Besonderheiten des Strömungssystems des europäischen Nordmeeres für negative und positive Phasen der NAO zu ermitteln. Es wurde jeweils ein Ensemble der dynamischen Antriebe (Wind-Stress, Wärme- und Frischwasserfluss) erstellt und der jeweilige Jahresgang in diesen Phasen als klimatologische Anregung für Modellsimulationen mit dem hoch auflösenden Modell ROMS benutzt.

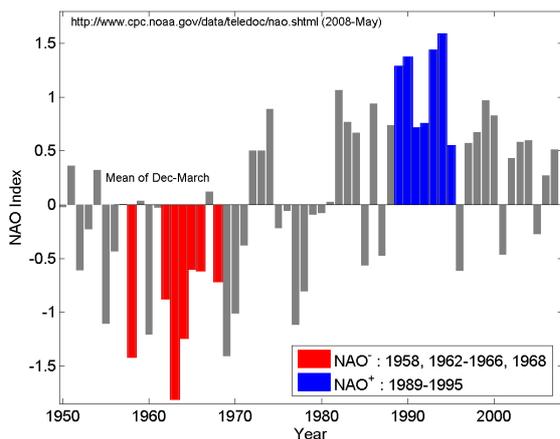


Abb. 3a: Zeitreihe des Winter NAO-Index seit 1950 und benutzte Zeiträume zur Erstellung eines Ensembles der negativen (rot) und positiven (blau) NAO. Der Übergang von vorwiegend negativen zu positiven Phasen sowie die positiven Phasen selbst waren verbunden mit dem Ausbleiben tiefer winterlicher Konvektion in der Grönlandsee.

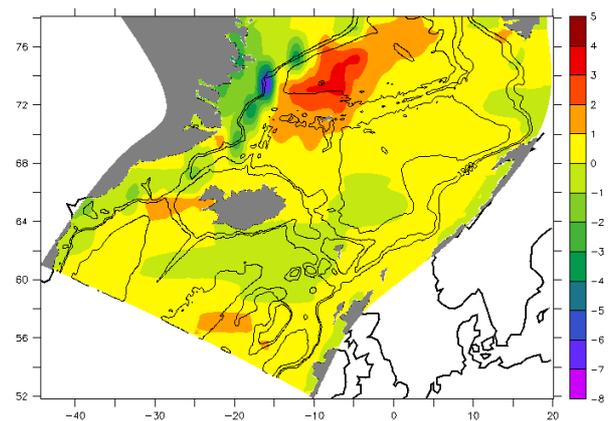


Abb. 3b: Die Differenz der Rotation des Wind-Stresses zwischen positiver und negativer NAO-Ensembles zeigt eine Verstärkung der Zyklonalität über der Grönlandsee sowie der Antizyklonalität über dem grönlandischen Schelf. Dies bewirkt einen verstärkten barotropen Transport in die Dänemarkstrasse. Einheit 10^6 Newton Meter⁻³.

Zur Verteilung passiver Tracer

Um die unterschiedlichen Strompfade näher zu untersuchen, wurden in einem Experiment zum Modellstart an verschiedenen Punkten Tracer injiziert. Im Gegensatz zu einem früheren Feldexperiment in der Grönlandsee wurde im Modell die gesamte Wassersäule markiert. Ein Beispiel wird für die Verteilung nach einem Jahr ist in Abb. 4 gegeben, aus der die Konzentration resultierend aus einer Markierung in der südlichen Islandsee für negative NAO Ensembles ersichtlich ist. Die Unterschiede zur positiven NAO-Phase sind in der Differenzkarte dargestellt. Durch die erhöhte Zyklonalität nördlich der Schwellen im Falle positiver NAO-Phase wird mehr Tracer in die nördlichen Becken verbracht und auch durch die Dänemarkstrasse exportiert. In diesem Zusammenhang ist die erstmalige Beobachtung eines Tiefendrifiers (Abb. 4c) aus der Islandsee entlang der in Abb. 4a markierten Tracerzunge durch den Färöer-Schottland und den Färöer-Bank Kanal erwähnenswert.

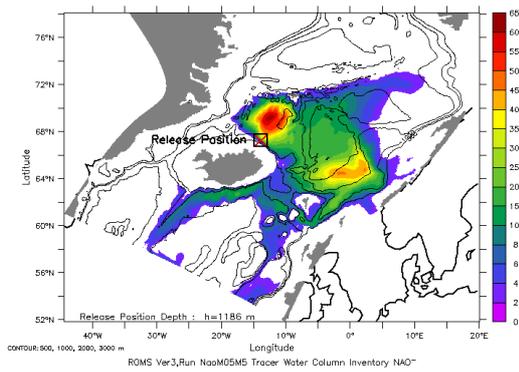


Abb.4a Tracerverteilung nach einem Jahr bei Injektion in der südlichen Islandsee bei negativem NAO.

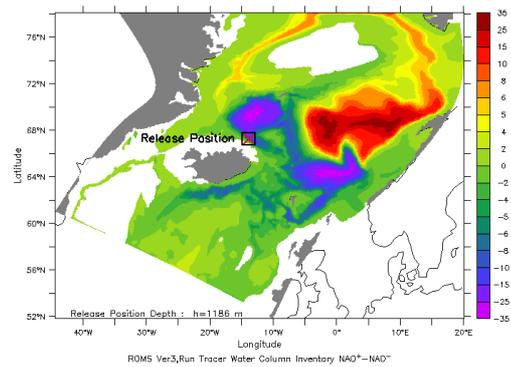


Abb.4b: Differenz der Verteilung zwischen positivem und negativem NAO.

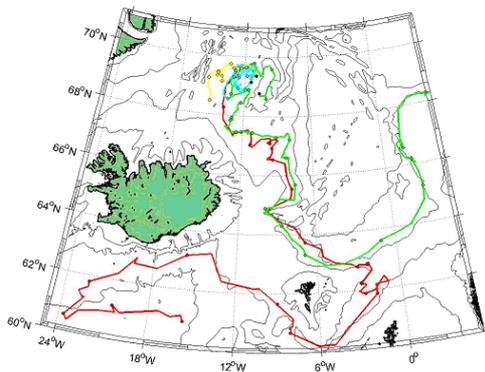


Abb.4c: Trajektorien von vier profilierenden ARGO Tiefendriftern (1000 m Drifftiefe), die in der Islandsee ausgesetzt worden sind. Zwei der Drifter verlassen die Islandsee in Richtung Südosten wobei der eine davon das Rückensystem überquert und durch den Färøer-Shetland Kanal und den Färøer-Bank Kanal in den subpolaren Nordatlantik treibt.

Zu Aufgabe 1 (AP 4.1)

Erweiterung des Modellraums auf Arktis und Europäisches Nordmeer

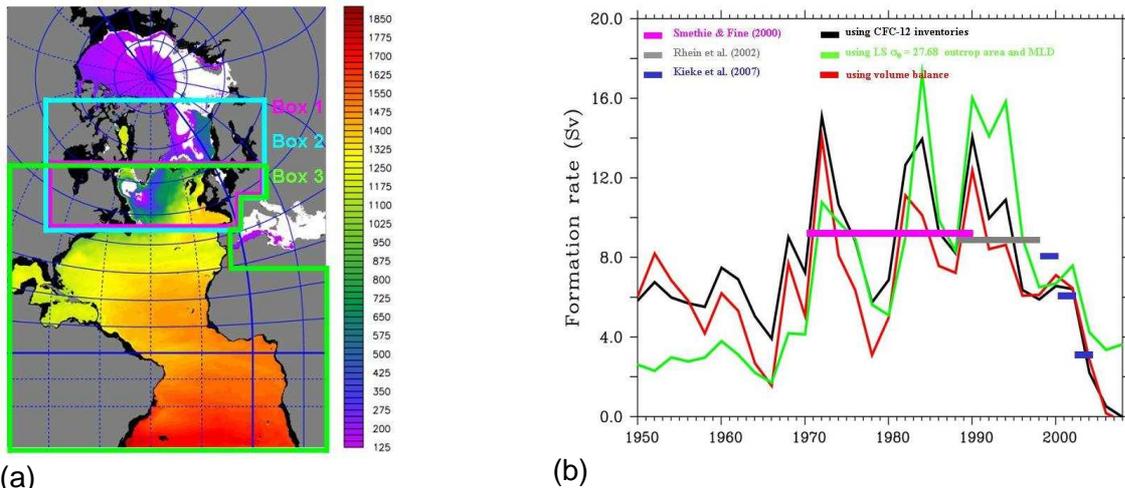
Zunächst wurde ein gekoppeltes Ozean-Meereis Modell aufgesetzt und über einen Zeitraum der letzten 60 Jahre integriert. Die Modellkonfiguration basiert auf dem numerischen Code des MITgcm (Marshall et al., 1997). Zwei Versionen verschiedener Auflösungen, $1/3^\circ$ und $1/6^\circ$, wurden für die Region des Atlantiks, einschließlich der Arktis und des Europäischen Nordmeers, erstellt. Diese Modellversionen wurden zunächst auf die Qualität ihrer Simulationen hin untersucht und mit globalen Synthesen verglichen. Sie werden inzwischen für erste Modell-Datensynthesen verwendet.

Variabilität der Tiefenwasserbildung im Subpolarwirbel und ihre Auswirkungen auf die Umwälzzirkulation des Atlantiks

Das in der Labrador See (Abbildung 5a) im Winter durch Tiefenkonvektion gebildete Labradorseewasser (LSW), wird nachfolgend aus der Konvektionsregion exportiert. Im AP 4.1 lag ein Schwerpunkt auf der Variabilität der LSW -Bildung im subpolaren Nordatlantik und deren Beziehung zur dekadischen Variabilität der Atlantischen Umwälzbewegung (MOC). LSW wird hier als die Wassermasse des subpolaren Nordatlantiks zwischen den Isopyknen $\sigma_\theta=27.68 \text{ kg m}^{-3}$ und $\sigma_\theta=27.80 \text{ kg m}^{-3}$ definiert (Kieke et al., 2007).

Drei Methoden wurden hier verwendet, um eine Zeitreihe der LSW Bildung für den Zeitraum 1948-2007 aus der Hindcast-Simulation abzuschätzen. Dazu gehört auch die Verwendung von simulierten CFC-12-Konzentrationen (Rhein et al., 2002). Die Schätzungen aus den drei Methoden sind in Abbildung 5b dargestellt, wobei im allgemeinen, insbesondere für die auf CFCs und der auf Volumenbalancen basierenden Methode, eine Übereinstimmung festgestellt wurde. Die auf Deckschichttiefen basierenden Berechnungen zeigen kleinere Werte als die beiden anderen Schätzungen vor 1980 und danach größere Werte. Die modellierte LSW Bildung stieg von Mitte der 60er Jahre bis Mitte der 90er Jahre mit zwei starken Ereignissen zwischendurch. Die LSW-Bildungsrate beläuft sich auf $6,9 \pm 3,3 \text{ Sv}$ im Zeitraum 1948-2007 mit erheblicher zwischenjährlicher bis dekadischer Variabilität. Eine klare Korrelation mit der North Atlantic Oscillation (NAO) kann festgestellt werden mit Spitzenwerten von rund 9 Sv, die in hohen NAO Phasen während 1970-1975, 1980-1985 und 1990-

1995 erreicht werden. Der Mittelwert in einem Zeitraum mit niedrigem NAO ist 5.0 ± 2.1 Sv (1951-1970) und während hohem NAO beträgt er 7.8 ± 2.4 Sv (1985-2004).

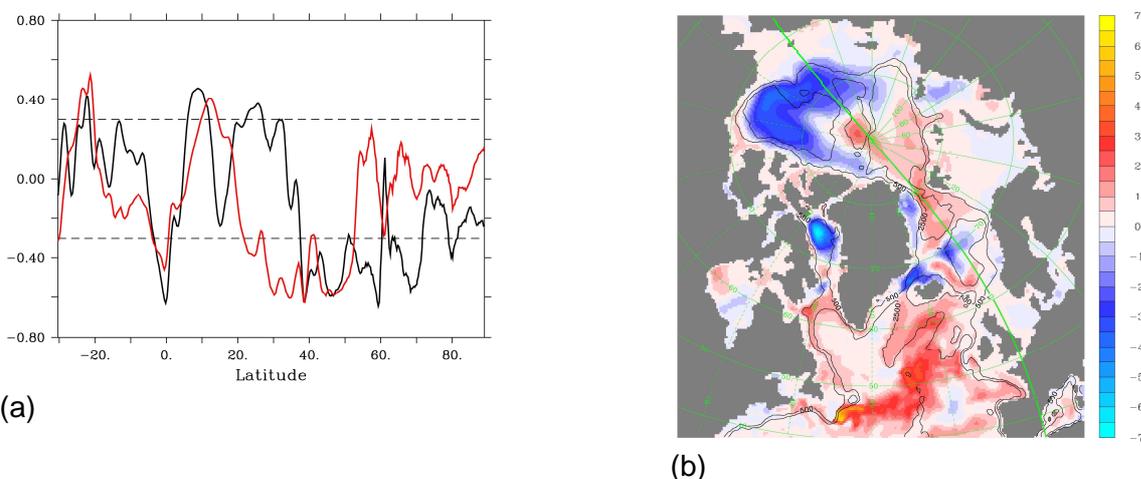


(a) Mittlere Tiefe (in m) der $\sigma_0=27.68 \text{ kg m}^{-3}$ Isopykne im Februar. Die roten Linien beschreiben die Grenzen der Boxen, die für die CFCs Integrationen verwendet wurden. (b) Labradorseewasserbildungs-raten: (rot) volumetrische Schätzung, (schwarz) Schätzung auf Basis von CFC-12 Inventaren und (grün) auf Basis von Deckschichttiefen.

Der Rückgang der Tiefenwasserbildung in der Labradorsee steht im Modell mit einem ausgeprägten Rückgang der MOC bei 45° N in Zusammenhang, der aber weiter südlich bei 26° N (nicht gezeigt) nicht festgestellt werden kann. Die MOC bei 45° N in 1000 m (nicht gezeigt) ist gut korreliert mit unserer Schätzung der LSW Bildung wie auch mit der Oberflächelufttemperatur über der Labradorsee und dem NAO-Index. Unsere Ergebnisse bestätigen die Vermutung von Eden und Jung (2001), dass die Stärke des Subpolarwirbels durch Veränderungen im Wärmefluss bedingt ist und, dass dessen Abschwächung die MOC unmittelbar südlich der Subpolarregionen beeinflusst. Jedoch können wir in unseren Simulationen keinen Rückgang der MOC in subtropischen Breiten, nämlich bei 25° N , wie von Bryden et al. (2005) beobachtet, nachweisen. Ihre Schätzungen der MOC Veränderungen fallen für den Zeitraum nach 1980 in eine Standardabweichung, jedoch zeigt sich hier kein signifikanter Trend.

Zu Aufgabe 2 (AP 4.1)

Sensitivität der modellierten MOC, des Wärmetransports und der FW Bilanz gegenüber atmosphärischen Antriebsänderungen



(a) Korrelationskoeffizient zwischen Overturning und Gyre Anteil des meridionalen Wärmetransports (schwarz – NCEP; rot – ERA40); Das Konfidenzintervall ist als gestrichelte Linie gezeigt. (b) Differenz des mittleren Frischwassergehalts (in m) der oberen 500m zwischen dem NCEP und dem ERA-40 Lauf.

Als Robustheitstest unserer Modellergebnisse wurde die $1/3^\circ$ Version des Modells, das auch Grundlage der Syntheseansätze ist, verwendet. Dabei wurden für den Zeitraum 1958-2008 zwei unterschiedliche Felder atmosphärischer Reanalysen, die NCEP RA1 und die ECMWF ERA40-Daten, als Antrieb genutzt. Der größte Unterschied zwischen diesen beiden Simulationen besteht in der zeitlich gemittelten MOC; ERA40 führt zu einer mehr als 2 Sv stärkeren MOC, während die zeitliche Variabilität ähnlich bleibt. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch für den Wärmetransport bei 25°N , während bei 48°N größere Unterschiede sichtbar sind. Der Wärmetransport bei 26°N zeigt Schwankungen mit einer etwa 5-jährigen Periode und einem konstanten Mittelwert nach 1980. Bei 48°N ist keine klare Periodizität sichtbar, jedoch sind Trends vorhanden. Im Folgenden wird die zeitliche Variabilität der Beiträge von Overturning- und Gyre-Komponente, insbesondere deren Korrelation bzw. Antikorrelation, untersucht. Die Korrelationskoeffizienten der Regression dieser Komponenten des Wärmetransports sind in Abbildung 6a gezeigt. Im NCEP-Lauf (schwarze Kurve) zeigt sich eine deutliche Antikorrelation nördlich von 35°N zwischen Overturning und Gyre-Komponente. Gleiches gilt für den ERA-40-Lauf, jedoch nun in dem Breitenband von 20°N bis 50°N .

Synthese der Nordatlantischen Zirkulation

Die Datensynthese auf Grundlage der adjungierten Methode verwendet das MITgcm Ozeanzirkulations-Modell zusammen mit seiner adjungierten Version (Marotzke et al., 1999). Das System basiert auf der GECCO-Konfiguration (Stammer et al., 2004; Köhl und Stammer, 2008), die auf das Modellgitter des Nordatlantikmodells mit höherer Auflösung ($1/3^\circ$) angepasst wurde. Die Konfiguration umfasst den Arktischen Ozean, ein Eis-Modell, sowie offene Randbedingungen in der Bering-Straße und bei 33°S , sowie Flüsse, die über Bulk-Formeln berechnet werden.

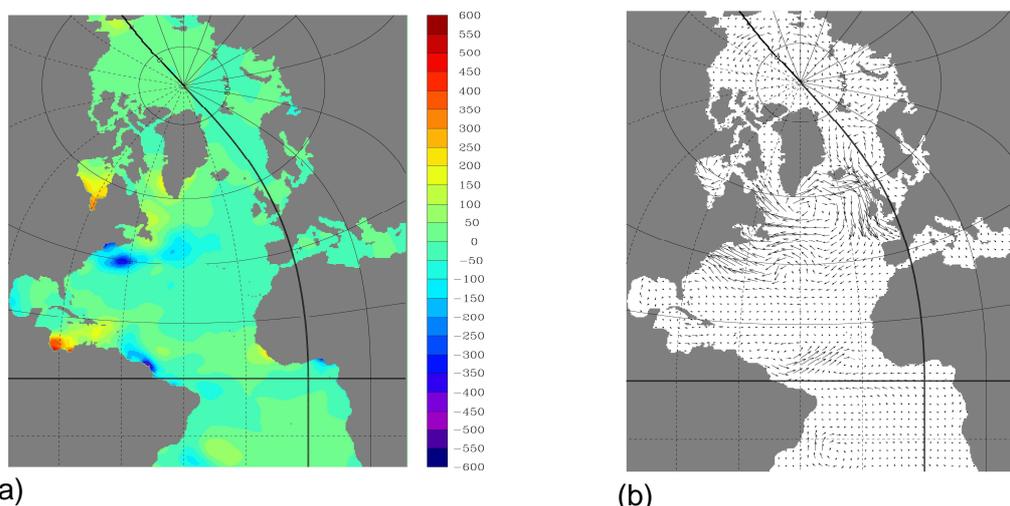


Abb. 7. Mittlere Korrekturen des (a) NCEP Niederschlags (in mm/yr) und des (b) NCEP 10m Wind (größte Vektorlänge: 2 m/s).

Die zu assimilierenden Daten wurden gesammelt und auf das Modellgitter interpoliert. Die Beobachtungsdaten umfassen Profildaten für Ozeantemperatur und Salzgehalt von CTD- und XBT-Sonden sowie von ARGO-Floats (Met. Office Hadley Center EN3 Datenbank). Tägliche Werte von Oberflächenauslenkungsanomalien aus allen altimetrischen Missionen, nämlich Topex/Poseidon, ERS-1/2, Jason1 und Gfo (AVISO-Datenbank), sowie SST-Messungen (NCDC ERSST.v3 Datenbank) und eine mittlere dynamische Topographie (GGM02-Lösung) wurden ebenfalls auf das Gitter interpoliert. Die Kontrollvariablen des Systems sind die Anfangsbedingungen für Temperatur und Salzgehalt, und die veränderlichen atmosphärischen Zustandsvariablen. Tests wurden durchgeführt, um die Stabilität des Systems und die Verwendbarkeit der Gradienten zur Optimierung zu ermitteln. Abb. 7 zeigt vorläufige Optimierungsergebnisse. Als Beispiel sind die zeitlich gemittelten Korrekturen des NCEP Niederschlags und Winds gezeigt. Derzeit wird versucht, den Synthesezeitraum soweit wie möglich zu erweitern, um eine Periode von zunächst 15 Jahren zu realisieren. Lange Synthesen mit hochauflösenden Modellen stellen noch technologisches Neuland dar, insbesondere ist die Stabilität des adjungierten Modells über längere Zeiträume problematisch.

Globale Synthesen

Die globale GECCO Synthese 1952-2001 (Köhl and Stammer, 2008b,a) wurde um die Periode 2002-2007 erweitert und wird im folgenden als GECCO2 bezeichnet. GECCO und GECCO2 beruhen auf einer ähnlichen Konfiguration des MIT Modells, jedoch wurde für die Erweiterung sowohl die

horizontale als auch die vertikale Auflösung erhöht. Des Weiteren wurde das Modellgebiet um das Gebiet der Arktis erweitert und die Modellkonfiguration beinhaltet nun auch ein Meereismodell. Die assimilierten Daten umfassen wie auch bei der GECCO Synthese vorher, Altimeterdaten von Topex / Jason, ERS / Envisat und der Geosat Follow On-Mission, AMSR/E SST, Anomalien der Argo Temperatur und Salzgehalt Profile und ein Feld des mittleren Meeresspiegels aus der Kombination des Geoid des GRACE Gravity Model 02 mit der mittleren Meeresoberfläche nach Tapley et al. (2005). Eine weitere Synthese wurde unter Einbeziehung neuartiger GRACE Bodendruckdaten der GRACE Mission vom Center for Space Research (CSR) Texas erstellt, die im Folgenden einfach als GRACE bezeichnet wird. Nach 20 Iterationen des Optimierungsverfahrens wurde eine Lösung gefunden, die hier kurz mit GECCO und verfügbaren Messungen der MOC bei 25 N verglichen werden soll.

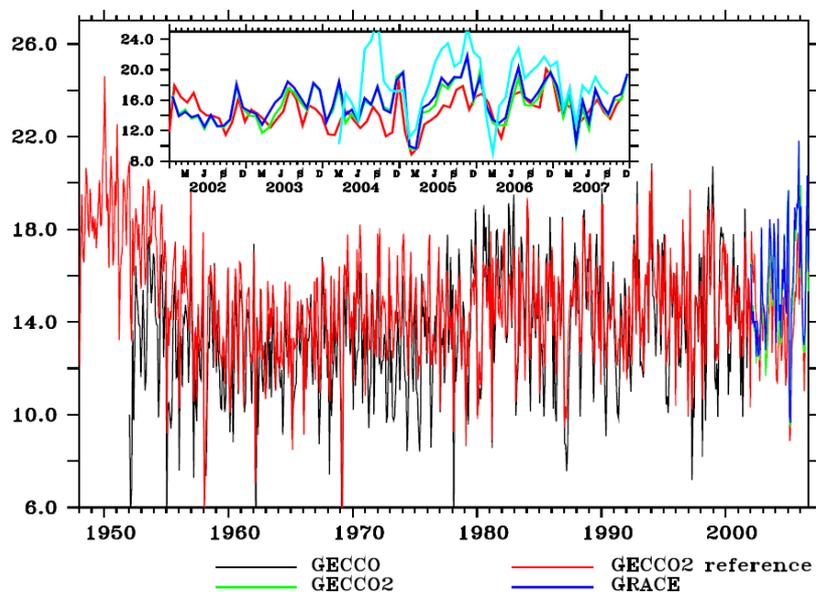


Abb. 8. Meridionales Overturning bei 25 N von GECCO, GECCO2 Referenz, GECCO2 und die GRACE Synthese. Der vergrößerte Ausschnitt für den Zeitraum 2002-2007 zeigt den Vergleich mit den auf dem RAPID-Array basierenden Schätzungen von Cunningham et al. (2007). Der Koeffizienten der Korrelation zwischen den RAPID Daten und den verschiedenen Produkten ist 0.54, 0.68 und 0.66 für GECCO2 Referenz, GECCO2 und GRACE.

Wir haben uns entschlossen, die GECCO Synthese 1952-2001 durch eine Synthese mit höherer Auflösung und besserer Physik fortzuführen. Als kurzer Vergleich zwischen GECCO und der neuen Simulation sind hier Zeitserien des meridionalen Overturning bei 25°N dargestellt (Abb. 8). Für den Zeitraum 1952-2001 ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen GECCO und die Simulation von 1948-2007, auf dessen Basis im Jahr 2002 GECCO2 und GRACE gestartet wurden. Besonders nach Mitte der 1980er Jahre stimmen die Variabilitäten auf allen Zeitskalen gut überein. Daraus resultiert, dass GECCO2 eine vernünftige Fortsetzung für GECCO darstellt. Der Einsatz in Abb. 8 zeigt für den Zeitraum 2002-2007 einen Vergleich der drei Läufe mit den Schätzungen des RAPID Arrays (Cunningham et al., 2007). Obwohl für alle Simulationen die Variabilität und die Mittelwerte niedriger als die der RAPID Schätzung sind, zeigt die Variabilität auf Jahresskala eine recht gute Übereinstimmung. Bei der Assimilation der Daten steigt die Korrelation von 0.54 für die Referenzsimulation auf 0.68 bzw. 0.66 für GECCO2. Auch wenn diese Synthesen nur 6 Jahre umfassen, wurde gegen Ende 2009 eine neue Synthese mit gleicher jedoch gegenüber GECCO höherer Auflösung gestartet, die den gesamten Zeitraum 1948-2009 umfasst. Ergebnisse werden voraussichtlich im Herbst dieses Jahres zur Verfügung stehen.

Literatur

- Böning, C., M. Scheinert, J. Dengg, A. Biastoch, and A. Funk, Decadal variability of subpolar gyre transport and its reverberation in the North Atlantic overturning, *Geophys. Res. Letters*, 33, doi:10.1029/2006GL026906, 2006.
- Bryden, 2007: Temporal variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N, *Science*, 317, 935–938.
- Bryden, H.L., H.R. Longworth, and S. A. Cunningham, Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N, *Nature*, 438, 655-657, 2005.
- Cunningham, S. A., T. Kanzow, D. Rayner, M. O. Baringer, W. E. Johns, J. Marotzke, . R. Longworth, E. M. Grant, J. J.-M. Hirschi, L. M. Beal, C. S. Meinen, and H. L.
- Eden C, and T. Jung, North Atlantic interdecadal variability: Oceanic response to the North Atlantic oscillation (1865-1997), *J. Climate*, 14, 676-691, 2001.

- Hansen, B., Turrell, W. R. and Østerhus, S. 2001. Decreasing overflows from the Nordic Seas into the North Atlantic Ocean through the Faroe Bank Channel since 1950. *Nature* 411, 927–930.
- Kieke, D., M. Rhein, L. Stramma, W.M. Smethie, J.L. Bullister, and A. LeBel, Changes in the pool of Labrador Sea Water in the subpolar North Atlantic, *Geophys. Res. Letters*, 34, L06605, 2007.
- Köhl, A., and D. Stammer, 2008a: Decadal sea level changes in the 50-year GECCO ocean synthesis, *J. Climate*, 38, 1876–1890.
- Köhl, A., and D. Stammer, 2008b: Variability of the meridional overturning in the North Atlantic from the 50 years GECCO state estimation, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 1913–1930.
- Marotzke, J., R. Giering, K.Q. Zhang, D. Stammer, C. Hill, and T. Lee, Construction of the MIT ocean general circulation model and application to Atlantic heat transport sensitivity, *J. Geophys. Res.*, 104, 29529-29547, 1999.
- Marshall J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey, A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers, *J. Geophys. Res.*, 102, 5753-5766, 1997.
- Olsen S. M., B. Hansen, D. Quadfasel and S. Østerhus, 2008: Observed and modelled stability of overflow across the Greenland-Scotland ridge, *Nature*, 455, 519-523.
- Rhein, M., J. Fischer, W.M. Smethie, R. Smythe-Wright, R.F. Weiss, C. Mertens, D.H. Min, U. Fleischmann, and A. Putzka, Labrador Sea Water: Pathways, CFC inventory, and formation rates, *J. Phys. Oceanogr.* 32 (2), 648-665, 2002.
- Stammer, D., K. Ueyoshi, A. Köhl, W.B. Large, S. Josey, and C. Wunsch, Estimating air-sea flux estimates through global ocean data assimilation, *J. Geophys. Res.*, 109, C05023, doi:10.1029/2003JC002082, 2004.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgegeben, und zwar zum größten Teil für die Beschäftigungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Nuno Serra (AP4.1) und Dr. Christian Rodehacke (AP2.1). Mit ihnen konnten Wissenschaftler eingestellt werden, die eine Expertise in verschiedenen Modellierungsaspekten wie auch bei der Auswertung von Messdaten vorzuweisen haben.

Die Investitionen in AP2.3 beinhalteten einen selbstregistrierenden akustischen Doppler Strömungsmesser (ADCP), durch den unser Dänemarkstrassen Array erweitert werden konnte, zwei Pressure-Inverted Echosounder (PIES) zur Messung der Sprungschichttiefe in beiden Kanälen, sowie 52 Temperaturrecorder zum Aufbau von Temperaturmessketten. Letztere haben den Einsatz leider nicht überlebt, da 40 der Recorder sowohl in der Dänemarkstrasse als auch im Färöer-Bank Kanal den dortigen Fischereiaktivitäten zum Opfer fielen.

Das bewilligte Verbrauchsmaterial und die Reisemittel wurden überwiegend zur Durchführung der Expeditionen verwendet.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war im Rahmen des Antrags notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Als ein Beitrag zur Grundlagenforschung hat das Projekt keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten. Das Projekt soll jedoch langfristig zu einer operationellen Anwendbarkeit im Rahmen des BSH und CSC führen.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes besteht ein reger Austausch über die Fortschritte der einzelnen TP, sowohl bei den entsprechend anberaumten Treffen und auch zwischenzeitlich bei Bedarf. Außerhalb des Verbundes werden die üblichen Informationsquellen der aktuellen Literatur sowie wissenschaftlicher

Tagungen genutzt. Es sind keine Fortschritte bekannt geworden, die eine Änderung des Arbeitsplans notwendig gemacht hätten.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- Brath, M., and M. Scharffenberg, N. Serra, and D. Stammer, 2010: Eddy transports in the subpolar North Atlantic as seen by the TOPEX/JASON-1 tandem mission data. *J. of Geodesy*, in press.
- Dickson B., S. Dye, S. Jönsson, A. Köhl, A. Macrander, M. Marnela, J. Meincke, S. Olsen, B. Rudels, H. Valdimarsson, and G. Voet, "The overflow flux west of Iceland: variability, origins and forcing.", *in: Arctic-Subarctic Ocean Fluxes, edited by Dickson RR et al.*, Springer Science and Business Media B.V., 427-441, 2008
- Friedrichs, A. 2009. Overflow in Denmark Strait: a vorticity balance. BSc Arbeit, Universität Hamburg, 32 pp.
- Käse, R. H. (2006), A Riccati model for Denmark Strait overflow variability, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21S09, doi:10.1029/2006GL026915.
- Käse, R. H., N. Serra, A. Köhl, and D. Stammer (2009), Mechanisms for the variability of dense water pathways in the Nordic Seas, *J. Geophys. Res.*, 114, C01013, doi:10.1029/2008JC004916.
- Köhl A. and D. Stammer (2008): Decadal Sea Level Changes in the 50-Year GECCO Ocean Synthesis. *J. Climate.*, 38,1876-1890
- Köhl A. and D. Stammer (2008): Variability of the Meridional Overturning in the North Atlantic from the 50 years GECCO State Estimation, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 1913-1930.
- Martinez, N., N. Serra, D. Stammer and P. Minnett, 2010: Response of the eastern sub-tropical Atlantic SST to Saharan Dust: a modeling and observational study. *J. of Geophys. Res.*, in press.
- Olsen, S. M., B. Hansen, D. Quadfasel und S. Østerhus (2008) Observed and modelled stability of overflow across the Greenland-Scotland Ridge, *Nature*, 455, 519-522 ,doi:10.1038
- Østerhus, S., T. Sherwin, D. Quadfasel, and B. Hansen , "The overflow transport east of Iceland. In Dickson RR et al.(eds): *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes*", Springer Science + Business Media B.V., 427-441, 2008
- Pohlmann H., J. Jungclaus, A. Köhl, D. Stammer and J. Marotzke (2009): Improving Decadal Climate Predictability through the Initialization of a Coupled Model with the GECCO Oceanic Synthesis, *J. Climate*, 22, 3926-3938.
- Quadfasel, D. und R. Käse (2007) Present-Day Manifestation of the Nordic Seas Overflows. In: *Ocean Circulation – mechanisms and impacts – past and future changes of the meridional overturning*. Eds: A Schmittner, JCH Chiang, SR Hemming. Geophysical Monograph, 173, AGU, Washington DC, 75-90.
- Romanova V., A. Köhl, D. Stammer, C. Klepp, A. Andersson, and S. Bakan (2010), Sea Surface Freshwater Flux Estimates from GECCO, HOAPS and NCEP, *Tellus* 62B, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00447.x.
- Serra N., R. H. Käse, A. Köhl, D. Stammer, and D. Quadfasel (2010), On the low-frequency phase relation between the Denmark Strait and the Faroe-Bank Channel overflows, *Tellus* 62A, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00445.x.
- Vogt, M. (2007) Overflow über dem Island-Färöer Rücken. Dipl.-Arbeit, Universität Hamburg, 81 pp.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Nordatlantik I – 1.1 Die Bedeutung des Süßwasserhaushalts für die zukünftige Entwicklung der thermohalinen Zirkulation 1.2 Rolle des äquatorialen Atlantiks als Schlüsselregion für Klimaschwankungen im atlantischen Raum 2.2 Schwankungen der tiefen Randstromzirkulation am Ausgang der Labradorsee 3.2 Schwankungen der thermohalinen Zirkulation in hoch auflösenden Modellen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Claus Böning Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Carsten Eden Dr. Jürgen Fischer Prof. Dr. Mojib Latif Prof. Dr. Andreas Oschlies Dr. Lothar Stramma Prof. Dr. Martin Visbeck		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2009
		6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2010
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IFM-GEOMAR, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) 03F0443B
		11. Seitenzahl 15
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. Literaturangaben
		14. Tabellen 2
		15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Die Kieler Arbeitsgruppen haben sichtbare Beiträge zu ersten vier Aspekten des Vorhabens geleistet. Es wurde das quantitative Verständnis von Schlüsselprozessen in Schlüsselregionen des Atlantischen Ozean verbessert. Neue Ozean- und gekoppelte Modelle wurden hinsichtlich saisonaler bis dekadischer Klimaänderungen analysiert und Verfahren zu deren Verbesserung entwickelt. Weiterhin wurde der Einfluss von Zirkulationsschwankungen auf die ozeanische CO ₂ -Aufnahme untersucht. Intensive Feldbeobachtungen wurden zum ersten Mal im tropischen äquatorialen Atlantik erfolgreich durchgeführt. Sie dienen als Basis für ein besseres Verständnis der Rolle des tropischen Atlantiks für Klimaschwankungen im atlantischen Raum und mögliche Vorhersagbarkeiten auf saisonalen Zeitskalen. Der andere Beobachtungsfokus lag auf dem Ausgang der Labradorsee bei etwa 53°N, in der sich die verschiedenen Komponenten des Nordatlantischen Tiefenwassers zum tiefen westlichen Randstrom (DWBC) vereinigen. Mit Hilfe eines Verankerungssystems im tiefen Randstrom am Kontinentalabhang vor Labrador wird dieses Signal kontinuierlich erfasst, um eventuelle Schwankungen der thermohalinen Zirkulation zu dokumentieren. Die Kieler Beobachtungen sind zusammen mit weiteren nationalen und internationalen großräumigen Beobachtungen (Schiffsmessungen, Argo) sowie unsere Modellsysteme und Modellstudien wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen regionalen Ozean-Klima-Analysesystems.		
19. Schlagwörter Ozeanzirkulation, MOC, Klima, Labradorsee		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Nordatlantik I – 1.1. The role of the freshwater budget for the future development of thermohaline circulation 1.2 Role of the equatorial Atlantic as a key region for climate variability in the Atlantic sector 2.2 Variability of the boundary circulation at the exit of the Labrador Sea 3.2 High-resolution modeling of thermohaline circulation variability and its effects on carbon uptake		
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Claus Böning Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Carsten Eden Dr. Jürgen Fischer Prof. Dr. Mojib Latif Prof. Dr. Andreas Oschlies Dr. Lothar Stramma Prof. Dr. Martin Visbeck		5. end of project 31.10.2009
		6. publication date 30.04.2010
		7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) IFM-GEOMAR, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel		9. originator's report no.
		10. reference no. 03F0443B
		11. no. of pages 15
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. no. of references
		14. no. of tables 2
		15. no. of figures 7
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Visible results were obtained by the working groups in Kiel on the first four aspects of the project, resulting in improvements of the quantitative knowledge of key processes and key regions in the Atlantic Ocean. New ocean and coupled ocean-atmosphere models were analyzed with regard to seasonal and decadal climate changes, as well as optimization techniques. In addition, the influence of circulation variability on oceanic CO ₂ uptake was investigated. Intense field studies were carried out successfully in two regions: The measurements obtained in the equatorial Atlantic serve as the basis for a better understanding of the role of the tropical Atlantic for climate fluctuations in the Atlantic in general, and also provide predictability indicators for seasonal forecasts. The second focal area of field work was the southern region of the Labrador Sea near 53°N where different components of the North Atlantic Deep Water merge to form the deep western boundary current (DWBC). Here a mooring array has been deployed for the past 13 years to monitor this branch of the thermohaline circulation exiting the Labrador Sea. In collaboration with other national and international large-scale observations (ship-based measurements, Argo floats, etc.) and modeling efforts, the field work carried out by the Kiel working groups provides a significant contribution toward a sustainable regional ocean-climate analysis system.		
19. keywords Ocean Circulation, MOC, Climate, Labrador Sea		
20. publisher	21. price	

Teilprojekte

- 1.1 Die Bedeutung des Süßwasserhaushalts für die zukünftige Entwicklung der thermohalinen Zirkulation
- 1.2 Rolle des äquatorialen Atlantiks als Schlüsselregion für Klimaschwankungen im atlantischen Raum
- 2.2 Schwankungen der tiefen Randstromzirkulation am Ausgang der Labradorsee
- 3.2 Schwankungen der thermohalinen Zirkulation in hoch auflösenden Modellen: Mechanismen, Beobachtbarkeit und Kohlenstoffaufnahme

1.1 Aufgabenstellung

1.1 Die Entwicklung des Beobachtungs- und Vorhersagesystems zum Zustand der thermohalinen Zirkulation (THZ) im Nordatlantik setzt ein verbessertes Verständnis der steuernden Prozesse in der Atmosphäre und im Ozean voraus. Ziel des Teilprojektes ist die Ableitung relevanter Parameter und Schlüsselregionen, die das Verhalten der THZ bestimmen. Von besonderer Bedeutung sind die Veränderungen in der Süßwasserbilanz der nördlichen Hemisphäre und des Atlantischen Ozeans.

1.2 Hauptziel des Vorhabens war ein besseres Verständnis der Rolle des tropischen Atlantiks für Klimaschwankungen im atlantischen Raum. Es sollten Zirkulationsschwankungen und deren Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur und Wärmebilanz des oberflächennahen Ozeans untersucht werden.

2.2 Der Ausgang der Labradorsee bei etwa 53°N stellt eine Schlüsselregion der Thermohalinen Zirkulation dar, in der sich die verschiedenen Komponenten des Nordatlantischen Tiefenwassers zum tiefen westlichen Randstrom (DWBC) vereinigen. Ob und wie weit die Variabilität der Wassermasseigenschaften auch von Transportschwankungen begleitet wird, ist Gegenstand der aktuellen Forschung. In einem Feldprogramm, das im Wesentlichen auf einem Verankerungssystem im tiefen Randstrom am Kontinentalabhang vor Labrador beruht, wird dieses Signal kontinuierlich erfasst und es ist davon auszugehen, dass diese Messungen ein wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen regionalen Ozean - Klima - Analysesystems werden.

3.2 Die Klärung der Ursachen und raum-zeitlichen Strukturen von Fluktuationen der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) stellen wichtige Grundlagen für die Entwicklung eines Diagnose- und Beobachtungssystems klimarelevanter Schwankungen im Nordatlantik dar. In diesem Teilvorhaben ging es darum, mit einem Modellsystem hoher Auflösung zu einem verbesserten quantitativen Verständnis der verschiedenen Erzeugungsmechanismen der MOC-Variabilität auf interannualen-dekadischen Zeitskalen beizutragen, die Manifestierung der Zirkulationsvariabilität in den regionalen hydrographischen Verhältnissen des Atlantischen Ozeans zu verstehen sowie ihren Einfluss auf die Kohlenstoffaufnahme abzuschätzen.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.1 Für die Arbeiten zum Projekt besteht direkter Zugriff auf die Modellergebnisse der PCMDI-IPCC Datenbank. Am IFM-GEOMAR wird das Kiel Climate Model (KCM) erfolgreich betrieben und weiterentwickelt. Für die Projektarbeiten stehen hieraus umfangreiche Simulationsergebnisse zur Verfügung.

1.2 Technische Voraussetzungen

Verankerungen: Im Rahmen von Vorarbeiten zum BMBF Nordatlantik Projekt wurde vom IFM-GEOMAR ein Verankerungsarray bestehend aus 3 Strömungsmesserverankerungen bereits vor Projektbeginn ausgelegt. Das vollständige Array wurde dann erstmals im März

2008 ausgelegt und im November 2009 vollständig aufgenommen und wieder ausgelegt. Alle Geräte standen zur Verfügung und konnten planmäßig eingesetzt werden.

Gleiter: Zu Beginn des Projektes wurde ein Gleiter angeschafft. Weitere Gleiter aus Institutsmitteln standen zur Verfügung und wurden planmäßig auf dem 23°W Schnitt zwischen dem Äquator und den Kapverden eingesetzt.

1.2 Wissenschaftliche Voraussetzungen

Das Forschungsprojekt ist ein zentraler Bestandteil des internationalen CLIVAR Programms und dabei insbesondere Bestandteil des „Tropical Atlantic Climate Experiments“ (TACE), ein von CLIVAR befürwortetes Programm. Der Projektleiter ist Leiter der CLIVAR-TACE Beobachtungsarbeitsgruppe. Schwerpunkt von CLIVAR-TACE ist die Verbesserung des Verständnisses der tropischen Klimavariabilität und deren Vorhersagbarkeit.

2.2 Am IFM-GEOMAR existiert eine langfristige Expertise von Feldarbeiten mit Verankerungen und Schiffsbeobachtungen im westlichen subpolaren Nordatlantik und insbesondere in der Labradorsee. Die Kombination wissenschaftlicher und technischer Vorarbeiten im Verbund mit einem, für das hier beschriebene Projekt einzigartigen Gerätepool, machen das IFM-GEOMAR zu einem wichtigen Partner im Rahmen des Gesamtprogramms. Wissenschaftlich ist die Fragestellung nach klimatisch relevanten Schwankungen der MOC zu Beginn des Projekts und auch nach dessen Ablauf ein zentrales Thema der Klima- und Ozeanforschung.

3.2 Das Forschungsprojekt betraf ein zentrales Thema internationaler Forschung im Atlantischen Ozean. Die Modellentwicklungsarbeiten waren eng verzahnt mit entsprechenden Entwicklungen auf europäischer Ebene, insbesondere im Rahmen der Drakkar-Kooperation (Drakkar Grpup, 2009); die Konzeption der Modellexperimente folgte weitgehend den in der CLIVAR Working Group for Ocean Modelling (WGOMD) entwickelten Vorstellungen für ein international koordiniertes Ozean-modellierungsprogramm (Co-ordinated Ocean-Ice Reference Experiments, CORE) (Griffies et al., 2009). Mitarbeiter des Projekts waren eng sowohl in die Drakkar- als auch CORE-Diskussionen und Konzeptentwicklungen eingebunden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.1 Die Arbeiten wurden, wie im Projektantrag beschrieben, durchgeführt.

1.2 Feldarbeiten: Forschungsfahrten, Verankerungsauslegung und Gleitermessungen konnten wie geplant durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Analyse der gewonnenen Daten sowie der historischen Daten, bzw. bereits zu Beginn des Projekts vorliegenden Verankerungsdaten gingen in eine Vielzahl von Publikationen ein.

Tab. 1: Forschungsfahrten.

TP	Forschungsfahrt	Schiff	Zeitraum	Ort
2.2	MSM 05/2 (FL: Dr. Fischer, IFM-GEOMAR)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2007	Labradorsee
1.2	IFM-GEOMAR 4 (FL: Prof. Brandt, IFM-GEOMAR)	L'Atalante	Feb./März 2008	Tropischer Atlantik
2.2	MSM 09/2 (FL: Prof. Kucera, Tübingen)	Maria S. Merian	Aug./Sept. 2008	Labradorsee
2.2	MSM 12/1 (FL: Prof. Quadfasel, ZMAW)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2009	Labradorsee
1.2	M80/1 (FL: Prof. Brandt, IFM-GEOMAR)	Meteor	Okt./Nov. 2009	Tropischer Atlantik

Tab. 2: Gleitermessungen.

Gleiter-ID	Auslegung		Aufnahme		Zurückgelegte Strecke	Profile	Bemerkungen
IFM03	2008-01-11	16°46'N 25°6'W	2008-02-25	9°35'N 23°1'W	1150 km	293	
IFM02	2008-02-29	0°2'N 22°58'W	2008-04-14	6°56'N 22°24'W	1200 km	291	
IFM03	2008-09-15	16°47'N 25°6'W	2008-10-09	14°12'N 22°57'W	595 km	176	Frühzeitige Aufnahme aufgrund eines Lecks
IFM03	2009-08-22	16°44'N 25°6'W	2009-10-30	8°14'N 21°44'W	1390 km	280	

Modellierung: Geplanten Simulationen mit einem beckenweiten Ozeanmodell wurde wie geplant durchgeführt. Die Analyse von Ensemblevorhersagen mit einem globalen Ozean-Atmosphärenmodell (KCM) konnte wie geplant durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellanalysen führten ebenfalls zu einer Vielzahl von Veröffentlichungen.

2.2 Das Vorhaben konnte wie geplant durchgeführt werden, Beobachtungsprogramme, Datenaufbereitung und Analysen machen gute Fortschritte auch über das Projektende (NA I) hinaus. Technische Probleme mit Schiff und einzelnen Verankerungen konnten durch internationale Kooperationen und Rettungsaktionen weitgehend überwunden werden. Insbesondere das Verankerungsprogramm war sehr erfolgreich, und es liegt bereits ein einzigartiger Datensatz der Randstromintensität vor Labrador vor, der Analysen von längerfristigen Exportschwankungen erlaubt.

3.2 Die Modellierungsarbeiten erfolgten wie geplant auf Basis verschiedener Versionen des globalen Ozeanmodells ORCA mit Gitterauflösungen von 0.5° und 0.25° sowie einer sehr hochauflösenden (1/12°) Konfiguration des regionalen Atlantikmodells FLAME. Während nicht-wirbelauflösende (0.5°)-Simulationen auf dem lokalen Vektorrechner (NEC SX8/9) der Universität Kiel realisiert werden konnten, wurden die aufwändigen, höher aufgelösten Experimente auf den Höchstleistungs-Rechnersystemen des HLRS (Stuttgart) und HLRE (DKRZ, Hamburg) durchgeführt.

1.4 Wissenschaftlich technischer Stand

1.1 Die Stärke der thermohalinen Zirkulation (THZ) im Treibhausklima zeigte im letzten Bericht (Third Assessment Report, TAR) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) große Unterschiede, sowohl im Grundzustand der einzelnen Modelle, als auch in den Prognosen zur zukünftigen Stabilität. Am wahrscheinlichsten erscheint ein graduelles Abschwächen der THZ. Einer der wichtigsten Prozesse, der die Stabilität der THZ bestimmt, ist vermutlich die Süßwasserbilanz über dem Atlantischen Ozean.

1.2 Obwohl in den letzten Jahren ein erheblicher Wissensgewinn über die tropische atlantische Klimavariabilität zu verzeichnen ist, sind viele Fragen weiterhin ungeklärt. Insbesondere ist die Ursache für die systematischen Modellfehler in der Oberflächentemperatur nicht vollständig verstanden. Gekoppelte Modelle zeigen immer noch zu hohe Temperaturen im tropischen Ostatlantik; ihr Vorhersagepotential ist damit weiterhin limitiert. Die Verfügbarkeit von hydrographischen und Strömungsdaten im tropischen Atlantik hat sich seit Projektbeginn deutlich verbessert. Dazu beigetragen haben auch verschiedene internationale Projekte (u.a. AMMA, PIRATA) mit denen eng kooperiert wird.

2.2 Neben den Instrumenten in den Tiefenbereichen des Labradorseewassers hatten wir bisher nur vereinzelte Instrumente im Bereich der Overflow-Komponenten, die aber besonders starke bodennahe Strömungen erfassten. Während wesentliche Teile des Randstroms barotrop (mit nur geringen vertikalen Scherungen) sind, ist der DSOW Kern in der Labradorsee ein starkes baroklines Signal, dessen Existenz in den Modellen nur

ungenügend reflektiert wird. Hierauf wollten wir besonderes Augenmerk legen und die Beobachtungen hinsichtlich Struktur und Zeitskalen in diesem Bereich verstärken. Entsprechend wurde das Array um zwei weitere bodennahe Verankerungen ergänzt.

Die Datenverarbeitung zum Teilprojekt AP 2.2 im Berichtszeitraum bestand vorrangig aus Aufnahme, Auslesen und Erstausswertung der verankerten Instrumente aus dem Randstromarray und K1 (Zentrale Labradorsee MSM05/2). In analoger Form wurden die auf den späteren Reisen (MSM 09/2; MSM 12/1) geborgenen Geräte bereits an Bord ausgelesen und weiterverarbeitet.

3.2 Die Identifizierung und Quantifizierung von Schwankungen der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) stellt eine der größten Herausforderungen eines globalen ozeanischen Beobachtungs- und Frühwarnsystems dar; im bisherigen Verständnis klaffen hier noch große Lücken hinsichtlich der raum-zeitlichen Charakteristika und dynamischen Mechanismen solcher Schwankungen. Bisherige Studien zeigten eine primär in den westlichen Randströmungen konzentrierte Reaktion der MOC auf Änderungen in der subpolaren Tiefenwasserbildung. In vielen Regionen scheint diese Transportvariabilität allerdings eingebettet in ausgedehnte Rezirkulationsstrukturen, das gesuchte thermohaline Signal zudem klein gegenüber hochfrequenter Variabilität durch ozeanische Instabilitätsprozesse oder windbedingte Strömungsfluktuationen. Die Identifizierung und Interpretation solcher signale aus lokalen Messungen erfordert deshalb die Einbindung in den beckenweiten Kontext eines Modells mit möglichst realistischer, also hoch aufgelöster Darstellung der Randstrom- und Frontenstrukturen.

Auch für die Quantifizierung der mittleren ozeanischen Kohlenstoffaufnahme und ihrer Schwankungen ist die genaue Darstellung von Frontensysteme und Konvektionsregimen erforderlich. Für die Untersuchung der totalen und anthropogenen Kohlenstoffaufnahme wurde daher ein gekoppeltes Modell aus hochauflösendem physikalischen Zirkulationsmodell und einem biogeochemischen Modell zugrunde gelegt.

1.5 Kooperationen

1.1 Die Projektarbeiten entstanden in enger Kooperation mit dem EU Projekten ENSEMBLES und DYNAMITE und dem Exzellenz Cluster „The future Ocean“ sowie dem SFB 754 und der Rechnergruppe des DKRZ in Hamburg.

1.2 RSMAS, Miami; USA (B. Johns) - Verankerungsprogramm zur Untersuchung des EUCs im östlichen Atlantik; verschiedenen französischen Institute im Rahmen von AMMA (CNRM/GAME, Météo-France/CNRS, Toulouse; Université de Toulouse, UPS, LEGOS, Toulouse; IRD, Brest/Toulouse; LOCEAN-IPSL, Université Paris) - Bedeutung des Ozeans für den Niederschlag über Afrika; PIRATA Konsortium (B. Bourles, IRD; R. Lumpkin, NOAA/AOML) – gemeinsame Instrumentierung der Verankerungen und Auswertung von Schiffsschnitten.

2.2 Wesentliche Komponenten des Verbundes sind nachhaltige Beobachtungen, die repräsentativ sind für die längerfristige Variabilität im Ozean. Diese Projekte, die innerhalb des WP 2 zusammengefasst sind, sind sowohl inhaltlich/wissenschaftlich als auch logistisch verzahnt (Quadfasel, AP2.3 sowie Rhein, AP 2.1). Datensynthesen (AP4.1, Stammer und Köhl) und hochauflösende Modellierung (AP3.2 Böning und Biastoch) sind einerseits Abnehmer der Messungen für Assimilationen und Modellvalidierung, werden aber auch intensiv genutzt für die Einordnung der Beobachtungen in die großräumige Zirkulation und deren längerfristige Schwankungen.

Außerhalb des Verbundes sind Kooperationen mit aktuellen EU-Programmen (ASOF, MERSEA, THOR) vorhanden. Besonders THOR ist ein Abnehmer der Ergebnisse aus den hier durchgeführten Beobachtungen der Randstromintensität in der Labradorsee. Durch die thematische Einbindung hat das hier beantragte Vorhaben eine enge Beziehung zum internationalen CLIVAR Programm. Mit der gerade bewilligten Fortsetzung des

Beobachtungsprogramms bei 26°N (RAPID; Zusammenarbeit mit S. Cunningham, NOCS und Bill Johns, RSMAS Miami) und den US-Aktivitäten südlich der Grand Banks (Line W, J. Toole WHOI) und des sogenannten Move-Arrays bei 16°N gäbe es dann vier komplementäre Meßkampagnen in den verschiedenen Regionen des Nordatlantik, die auf Untersuchungen von mehrjährigen Schwankungen der MOC und ihrer Komponenten, zielen. Hier geht es neben den regionalen Unterschieden um komplementäre Ansätze, Randstrom-Quantifizierung im Vergleich zu beckenweiten (teuren) Beobachtungssystemen.

3.2 LEGI, Grenoble (B. Barnier), LODYC, Paris (G. Madec), IFREMER (A.M. Treguier) und NOC, Southampton (A. New) – abgestimmte Modellentwicklung und Modellstudien im Rahmen des Drakkar-Verbundes; S. M. Griffies (GFDL, Princeton), W. Large (NCAR) – Konzeption koordinierter Modellierprogramme und atmosphärische Antriebsfelder (CORE); A. Bower (WHOI), M. S. Lozier und S. F. Gary (Duke University) – Modellanalysen zur Tiefenwasserausbreitung.

1.6 Wissenschaftlich technische Ergebnisse

1.1 Klimasimulationen für lange Zeiträume von einigen tausend Jahren zeigen Schwankungen in der Umwälzbewegung auf den unterschiedlichsten Zeitskalen. Unsere Simulationen für den MOC Index (Maximum der meridionalen Stromfunktion der THZ bei 30° N) mit dem Kiel Climate Model (KCM) liefern für den MOC Index im Mittel 13.6 Sv und Schwankungen zwischen 11-18 Sv auf Zeitskalen von Jahrhunderten und Dekaden, denen eine starke zwischenjährliche Schwankung überlagert ist. Die THZ variiert signifikant stärker über Periodizitäten zwischen 50 - 100 Jahren und zwischen 300 – 400 Jahren. Beide Bereiche erhöhter Variabilität sind dabei klar voneinander getrennt. Unsere Untersuchungen deuten auf eine Intensivierung der Nordatlantischen Tiefenwasserzelle hin, die sich bis in größere Tiefen ausdehnt. Der stärkste Einfluss findet sich auf dieser Zeitskala bei 30°S und legt nahe, dass die THZ Schwankungen im Bereich von Jahrhunderten ihren Ursprung im südlichen Ozean hat. Die multidekadischen Schwankungen zeigen eine ähnliche Intensivierung der NADW Zelle. Die größten Änderungen liegen hier jedoch nahe 40°N, das auf einen Antrieb der Schwankungen in höheren Breiten schließen lässt. Entsprechende Rechnungen mit der Oberflächentemperaturen (SAT) bestätigt die regionalen Kopplung der Schwankungen mit den beiden herausragenden Perioden.

Der Schwankungen der Oberflächentemperatur, die sich in Verbindung mit der Schwankungen des MOC Indexes bringen lässt, wird erzeugt durch eine interne Variabilität (die Wechselwirkungen zwischen dem Ozean, der Atmosphäre und der Kryosphäre) und von außen auf das System aufgeprägten externen Variabilität (Vulkane, Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen und Schwankungen in der solaren Einstrahlung). Ebenso wie die Oberflächentemperatur reagiert der MOC Index auf die Schwankungen in der solaren Einstrahlung. Die zeitliche Verzögerung der ozeanischen Zirkulation zur Störung aus der solaren Einstrahlung ist gering und liegt im Bereich von wenigen Dekaden. Die erzeugten Schwankungen der THZ hängen dabei stark von der Anregungsperiodizität des Signals ab. Die Ergebnisse der Modelrechnungen sind im Besonderen von Interesse für die Abschätzung einer möglichen Vorhersagbarkeit der THZ. Hierbei ragt der nordatlantische und arktische Bereich mit einem höheren Vorhersagepotential heraus. Aus den Ergebnissen von verschiedenen Modellstudien und aus Beobachtungen wurden die Intensität und die Herkunft der natürlichen Variabilität der vergangenen Dekaden untersucht. Unsere Arbeiten lassen vermuten, dass die Arktis eine der Schlüsselregionen ist. Eine höhere THZ im Atlantik ist mit einem erhöhten Wärmetransport verbunden. Dieses könnte zu einer verstärkten Abgabe der Wärmeenergie des Ozeans an die Atmosphäre führen. Diese Voraussetzung begünstigt einen besonders deutlichen Rückgang des Meereises in der Arktis.

Die Untersuchung zu den extern angeregten Schwankungen der THZ bauen auf den Resultaten der Modellrechnungen zu den IPCC Szenarien auf. Bedeutend für den Antrieb der THZ sind die Regionen im nördlichen Atlantik, in denen man die Tiefenwasserbildung

durch Absinkprozesse vermutet. In den meisten Klimamodellen liegt diese Zone nahe bei 60° N. Die Arbeiten haben gezeigt, dass der lokale Süßwasserfluss an der Ozeanoberfläche in diesen Regionen wichtig für die Steuerung der meridionalen Umwälzbewegung ist. Alle untersuchten Klimamodelle zeigen eine einheitliche Erhöhung des Süßwassereintrags in den hohen Breiten bei einer gleichzeitig stärkeren Verdunstung in den Tropen. Es hat sich aber auch gezeigt, dass das vorhergesagte Maß der Reduktion der THZ in den einzelnen Modellrechnungen nicht nur mit der lokalen Intensivierung des hydrologischen Kreislaufes erklärbar ist. Es müssen also noch weitere Prozesse für das vollständige Verständnis der Änderung der THZ berücksichtigt werden.

Eine mögliche Steuerung der Intensitätsänderung in der THZ ist die mittlere meridionale Dichteverteilung im Ozean. Auf langen Zeitskalen zeigen die Untersuchungen, dass eine Änderung des meridionalen Gradienten in der vertikalen Dichteschichtung in Relation zu den Änderungen der Intensität der THZ steht. Betrachtet man die Unterschiede zwischen 60°N und 30°S, so zeigt sich, dass in den IPCC Szenarien besonders die mittlere Dichte in hohen Breiten abnimmt. Die mittlere Dichte der Wassersäule kann durch lokale Änderungen des Wärme- und des Salztransportes reduziert werden. Alle Modelle prognostizieren einheitlich für das IPCC SRES A1b Szenarium eine Zunahme der Niederschläge in den mittleren und hohen Breiten. Über die in den Modellen enthaltenen Abflüsse führt dieses in den arktischen Schelfmeeren zum Anstieg des Süßwassereintrags und damit zu einer Reduktion des Salzgehaltes. Zum Teil wird der zusätzliche Eintrag nicht in der Arktis gespeichert, sondern in die subpolare Region exportiert (Abb. 1). Erste Rechnungen zur Süßwasserbilanz für die subpolaren Breiten deuten an, dass der reduzierte Salzgehalt des aus der Arktis exportierten Wassers für die Reduktion der Dichte in den subpolaren Regionen verantwortlich ist.

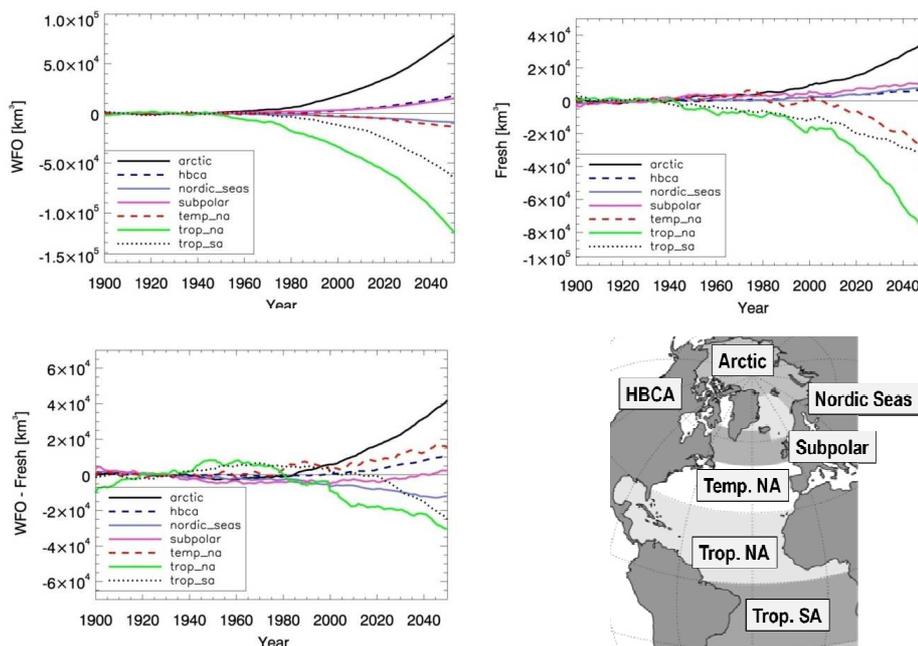


Abb. 1: Zeitserien der Mittelwerte über die Simulationen aller Modelle. Oben links: Lokaler Süßwassereintrag in den Ozean; oben rechts: Abschätzung des Süßwassergehaltes im Ozean aus der zeitlichen Veränderung des Salzgehaltes; unten links: Bilanz aus beiden Größen; unten rechts: Bezeichnung der Gebiete

1.2 Hauptuntersuchungsgegenstand des Arbeitspakets ist die tropische atlantische Klimavariabilität (TAV), die den atlantischen Nino oder zonalen Mode mit einschließt. Dazu wurden sowohl gekoppelte Ozean-Atmosphäre Simulationen als auch separate Simulationen

mit dem Ozeanmodell durchgeführt und analysiert. Der Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur in der Kaltwasserzunge im Nordsommer und der äquatorialen Zirkulation (Abb. 2), der anhand von hochauflösenden Modellsimulationen (Hormann und Brandt, 2007) analysiert wurde, konnte nun anhand von Beobachtungen für ein Warm- und ein Kaltereignis (2002 und 2005) gezeigt werden (Hormann und Brandt, 2009). Die Studien zeigen, dass eine Vorhersagemöglichkeit der Oberflächentemperatur in der Kaltwasserzunge auf kurzen Zeitskalen besteht. Diese Möglichkeit resultiert aus der Ausbreitung von äquatorialen Kelvin-Wellen, die etwa einen Monate vom Westatlantik in den Ostatlantik benötigen. Dabei ist der direkte Einfluss der Kelvin-Wellen auf die Oberflächentemperatur eher gering, sie führen aber zu einer Neigung der Thermokline entlang des Äquators, die entsprechend ein Warm- oder Kaltereignis konditionieren kann (siehe Liste erfolgreicher und geplanter Publikationen für andere untersuchte Themen).

Durch die Kombination von Strömungsdaten, die vom Schiff aus während der Forschungsfahrten gewonnen wurden und Strömungszeitserien aus Verankerungen konnten erstmals Zeitreihen des EUC Transports berechnet werden (Abb. 3).

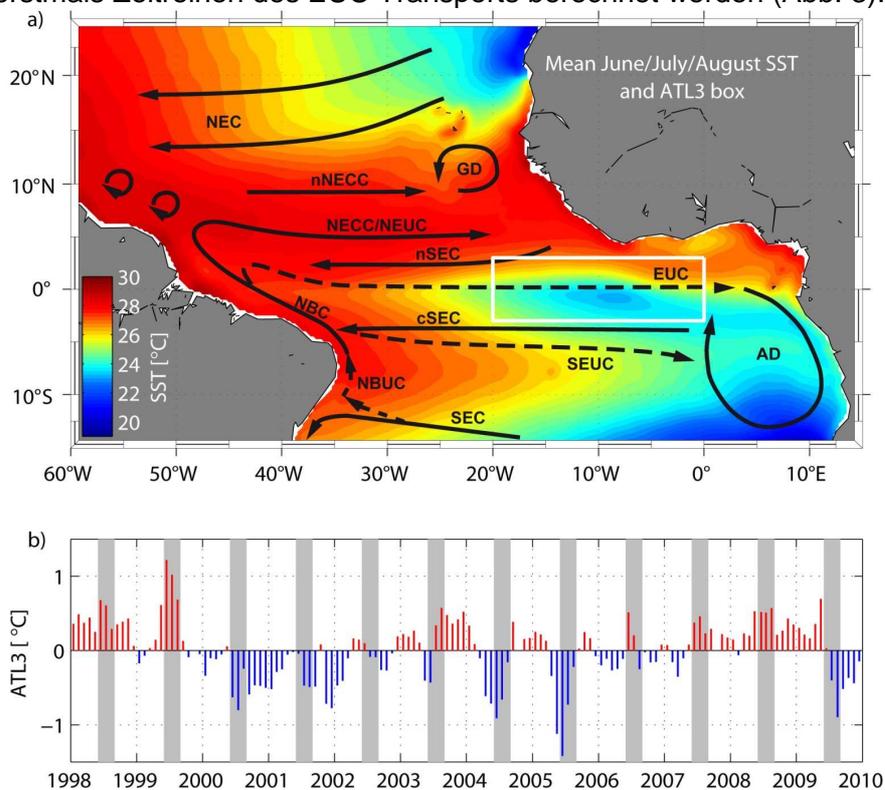


Abb. 2: a) Mittlere Juni/Juli/August Oberflächentemperatur im tropischen Atlantik (gemittelt zwischen 1998 und 2009) zusammen mit den wichtigsten Oberflächenströmungen (durchgezogen) und Thermoklinenströmungen (gestrichelt). Die weiße Box markiert die Region, für die der ATL3 SST Index berechnet wird. Die zeitliche Variabilität des Indexes ist in b) dargestellt (aus Brandt et al. 2010a).

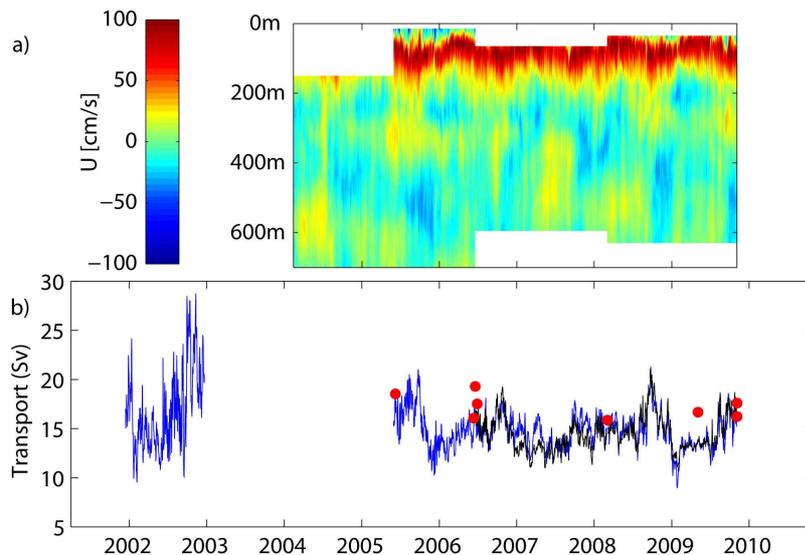
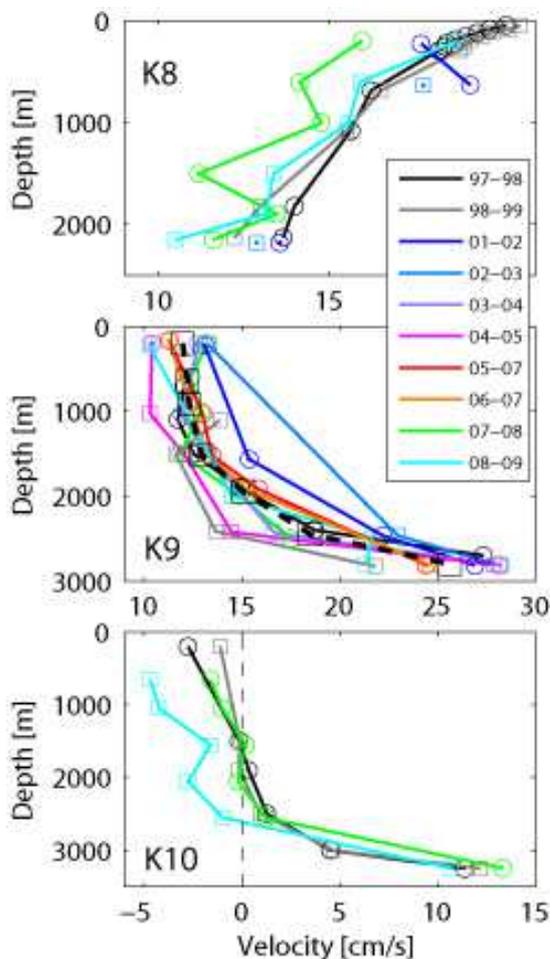


Abb. 3: a) Zonalkomponente der äquatorialen Strömungen bei 0°N, 23°W. Die Zonalkomponente zeigt den ostwärts strömenden EUC mit einem starken Jahresgang in Stärke und Tiefe und den westwärts strömenden EIC darunter, der von langperiodischen (~4 Jahres) Signalen überlagert ist. b) EUC Transport berechnet durch Anpassung der Strömungszeitserien an Variabilitätsmuster aus Schiffsschnitten unter Benutzung von drei Verankerungen (schwarze Linie) sowie unter Benutzung nur der zentralen Verankerung (blaue Linie). EUC Transporte aus Schiffsschnitten sind durch einen roten Punkt markiert.

2.2 Entsprechend des Arbeitsplans wurde mit der Analyse existierender Beobachtungsdaten begonnen (siehe auch Schott et al., 2004, 2006; Dengler et al., 2006). Der Schwerpunkt liegt dabei auf Untersuchungen zu den langfristigen Schwankungen des Randstromsystems der Labradorsee und den korrespondierenden Schwankungen der Wassermasseneigenschaften.



Der tiefe Kern des DLC (Abb. 4, K9 und K10) ist das stabilste Signal des Randstroms in den Strömungsmessungen. Hier strömt das DSOW als ein konzentriertes Band um die Labradorsee herum, und die Untersuchungen konzentrieren sich auf längerfristige Schwankungen dieses Signals. Diese Untersuchungen beziehen sich auch auf Variationen in den Quellregionen (in Zusammenarbeit mit den Overflow-Komponenten des Verbundes). Entsprechend lange Zeitserien der Strömungen liegen mit der Aufnahme der Verankerungen im Sommer 2009 jetzt ebenfalls vor, und erlauben Studien der zwischenjährlichen- bis dekadischen Schwankungen des gesamten Tiefenwasserexports aus der Labradorsee und die Aufspaltung des Gesamttransportes in die verschiedenen Tiefenwasserkomponenten.

Abb. 4: Profile der Jahresmittel des tiefen Labradorstroms bei 53°N für die jeweilige Verankerung (K8, K9 und K10). Die einzelnen Jahre sind farblich codiert.

Wenn man die Strömungen auf längeren Zeitskalen (zwischenjährlich bis dekadisch) betrachtet, so erkennt man zwar zwischenjährliche Fluktuationen, aber keine langfristigen Trends. Das gilt offensichtlich für alle Tiefenhorizonte des Randstroms. Außerdem finden wir bisher keine Anzeichen einer Reaktion auf den letzten starken Konvektionswinter (2008) – das muss allerdings noch genauer untersucht werden, wenn auch die anderen Verankerungen des Arrays vom Mai/Juni 2009 analysiert sind. Diese Arbeiten werden jetzt intensiviert und ein Manuskript ist in Arbeit (Fischer et al., 2010).

Labrador Sea convection and subpolar North Atlantic Deep Water export in the SODA assimilation model (Schott et al., 2009)

Die Konvektion in der Labradorsee hatte ihre stärkste Intensität und Tiefenausdehnung Anfang der 90er Jahre, gefolgt von flacherer und mehr variabler Konvektion nach 1995. Das SODA (Simple Ocean Data Assimilation) Modell Version 2.0.2/2.0.4 wurde zur Untersuchung der Konvektionsaktivitäten im Nordatlantik während des Zeitraums 1992-2007 herangezogen. Die verhältnismäßig guten hydrographischen Beobachtungsdaten während dieser Periode dienen zum Vergleich modellierter und beobachteter Deckschichttiefen und Wassermassenanomalien in Bezug auf Änderungen der Transporte des westlichen Randstroms und der meridionalen Umwälzzirkulation am Ausgang des subpolaren Beckens.

OceanObs'09 White Paper – Randstrom-Strategien und MOC Beobachtungssysteme

Im Rahmen der OceanObs'09 Tagung gab es eine Reihe von zukunftsweisenden White Papers, die dort vorgestellt wurden. Aus unserem Teilprojekt sind J. Fischer und M. Visbeck da beteiligt, wo es um die Definition des gegenwärtigen und zukünftigen Beobachtungssystems der MOC und des westlichen Randes geht (z.B. Cunningham et al., Send et al., 2009).

3.2 Die Untersuchungen beinhalteten eine Serie von Modellstudien mit neu-entwickelten globalen Ozean-Meereis-Modellen auf Basis des NEMO-Modellsystems. Modellkonfigurationen beinhalteten Versionen mit horizontalen Auflösungen von 0.5° und 0.25° , zu Abschätzung des Einflusses des ozeanischen Wirbelfeldes wurden vergleichende Analysen zu höher aufgelösten regionalen (Atlantik) Modellsimulationen (FLAME, $1/12^\circ$) herangezogen. Das Arbeitsprogramm des AP 3.2. wurde zudem flankiert durch DFG-finanzierte Studien des Einflusses der Agulhasregion: während in bisherigen Studien zur MOC-Variabilität vor allem die Auswirkung thermohaliner Prozesse im subpolaren Nordatlantik im Vordergrund stand, zeigten diese Studien zusätzliche Einflüsse dynamischer Prozesse im Agulhasregime hin, die bis in den tropischen Nordatlantik hinein von vergleichbarer Größenordnung erscheinen.

Alle Modellstudien deuten darauf hin, dass die in den höheren Breiten beider Hemisphären induzierten MOC-Anomalien durch Randwellen entlang des amerikanischen Kontinents sehr schnell in Richtung Äquator und darüber hinaus propagieren können und innerhalb weniger Jahre eine beckenweite Reaktion des Strömungsfeldes und damit verbundener Parameter, insbesondere auch des Meeresspiegels, induzieren können. Die Detektion dieser dekadischen, beckenweiten MOC-Anomalien wird in lokalen Beobachtungszeitreihen allerdings empfindlich durch höherfrequente, winderzeugte Fluktuationen und Wirbeleffekte gestört; im subtropischen Nordatlantik scheinen diese lokalen Prozesse das primäre Signal in MOC-Zeitreihen darzustellen. Bei der Interpretation beobachteter Zirkulationschwankungen im subtropischen und tropischen Atlantik müssen daher sowohl die Einflüsse südatlantischen Ursprungs als auch die lokal induzierte Variabilität berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf die mit MOC-Schwankungen verbundenen Meeresspiegeländerungen wiesen die Modellstudien auf eine markante Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Zeitskalen hin (Abb. 5).

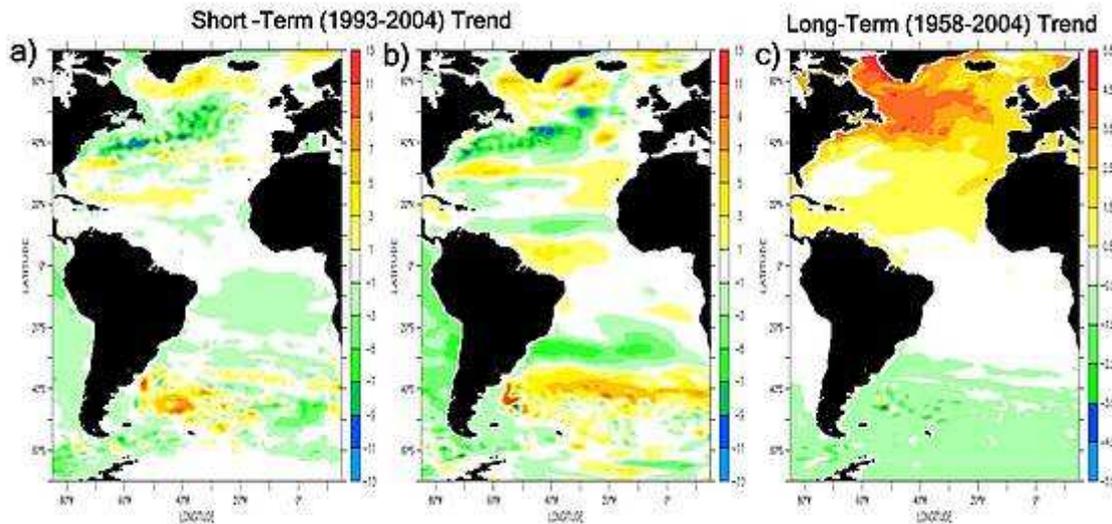


Abb. 5: Meeresspiegeltrends (in mm/Jahr) im Atlantischen Ozean: linearer Trend (1993-2004) aus Satellitendaten (AVISO) und (b) Simulation mit $1/4^\circ$ -Modell (ORCA025) als Beispiel für typische Muster der interannuell-dekadischen SSH-Variabilität; (c) linearer Trend über 4 Jahrzehnte in einer Modellsimulation mit künstlich herbeigeführter, allmählicher Abschwächung der MOC um ca. 1 Sv/Dekade : im Gegensatz zu den höherfrequenten Schwankungen schlägt sich ein MOC-Trend in beckenweiten Signalen im Nord- und Südatlantik (interhemisphärischer Dipol) nieder (Lorbacher et al., 2010).

Hindcast-Experimente der Variabilität der letzten 50 Jahre reproduzierten dabei das aus Satelliten-Altmetermessungen bekannte Muster gegenläufiger Signale (Dipolmuster) im subpolaren Wirbel und Golfstrom/Nordatlantischen Strom, konnten diese Muster aber als primären Einfluss der windgetriebenen Zirkulation identifizieren, d.h. als kaum geeignet zur Unterstützung von MOC-Beobachtungsprogrammen. Ein anderes, beckenkaliges Muster von Meeresspiegeländerungen ergibt sich dagegen als Reaktion auf langzeitige (multi-dekadische Trends) der MOC, wie sie infolge der anthropogenen Klimaänderungen im 21. Jahrhundert erwartet werden: die Modellstudien lassen danach einen dynamischen Anstieg des Meeresspiegels (d.h. zusätzlich zum hier nicht betrachteten, globalen sterischen Effekt) von einigen dm im Nordatlantik erwarten. Während ein solches Trend-Signal im westlichen Nordatlantik durch starke, kurzfristige Schwankungen überlagert ist und daher dort nur schwer detektierbar sein dürfte, ist das Signal/Rausch-Verhältnis im östlichen Nordatlantik erheblich größer: nach den Modellstudien dürfte danach eine allmähliche Abnahme der MOC von 1 Sv pro Dekade (eine typische Größenordnung in IPCC-Klimaprojektionen) bereits nach etwa 20 Jahren zu einem in Altimetermessungen detektierbaren Signal führen.

Zur Quantifizierung der natürlichen Schwankungen der Kohlenstoffaufnahme des Nordatlantiks wurde eine 150-jährigen Oberflächenantriebszeitreihe für Windstress und Wärmefluss rekonstruiert, um damit ein gekoppeltes biogeochemisch/physikalisches Zirkulationsmodell des Atlantischen Ozeans (FLAME. Eden und Oschlies, 2006) anzutreiben. Dazu wurden die ersten n EOFs des Luftdrucks (SLP) der 50-jährigen NCEP/NCAR-Reanalysedaten auf eine 150-jährige SLP-Zeitreihe von Allan und Ansell (2006) regressiert um 150-jährige „PCs“ des SLP zu gewinnen. Diese PCs wurden dann mit den mit den EOFs des SLP in Verbindung stehenden Muster der interannualen Windstress- und Wärmeflusschwankungen (wiederum gewonnen aus den NCEP/NCAR-Daten) multipliziert, die ersten n Moden addiert und zu dem klimatologischen Antrieb eines Ozeanmodells addiert. Es ist nun möglich n zu variieren, d.h. nur mit der 1. EOF des SLP, der 1.+2., etc zu rekonstruieren, wobei natürlich ein „Überfitten“ vermieden werden muss. Umfangreiche Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen der Antriebfelder (Windstress vs.

Wärmefluss) und der für die Rekonstruktion erforderlichen PCs (1,2,4,...) wurden durchgeführt und analysiert.

Nach der Validierung der Antirefelder selbst, wurden zunächst die Simulationen mit den rekonstruierten Antriebsfeldern mit einer Simulation der letzten 50 Jahre - angetrieben durch die "vollen" NCEP/NCAR-Windstress und Wärmeflussfeldern - verglichen. Es zeigte sich, dass während die Zirkulationsvariabilität des Nordatlantiks und die interannuale bis dekadische Schwankungen in der MOC und des nordwärtigen Wärmetransports zu einem großen Teil bereits durch die 1.EOF beschrieben werden kann (Eden und Willebrand, 2001, Löptien und Eden, 2010), für die Beschreibung der Schwankungen der CO₂-Aufnahme allerdings mehr, d.h. grösser als 4 EOFs, zur Rekonstruktion erforderlich sind. Die 1.EOF des SLP ist sehr ähnlich zur Nordatlantischen Oszillation (NAO), d.h. die Schwankungen der MOC und des nordwärtigen Wärmetransports stehen in einem engen Zusammenhang zur NAO, während dies für die interannualen, d.h. höherfrequenten Schwankungen der CO₂-Aufnahme nicht der Fall zu sein scheint.

In den 150-jährigen Simulationen zeigte sich aber in allen Fällen, d.h. unabhängig von der Rekonstruktion der Antriebsdaten eine interdekadische Schwankung der natürlichen CO₂-Aufnahme des Atlantiks von 0.02 Pg C/yr (Abb. 6). Diese interdekadische Schwankung steht in Zusammenhang mit einer gleichphasigen Schwankung der MOC und des nordwärtigen Wärme-, sowie Frischwassertransports (Eden und Jung, 2001), wobei diese Schwankungen durch ein entsprechendes langperiodisches Signal in der NAO angetrieben werden. Während also die interannualen Schwankungen der CO₂-Aufnahme nicht mit den entsprechenden höherfrequenten Signalen der NAO korrelieren, gilt dies allerdings für die längerperiodischen Signale.

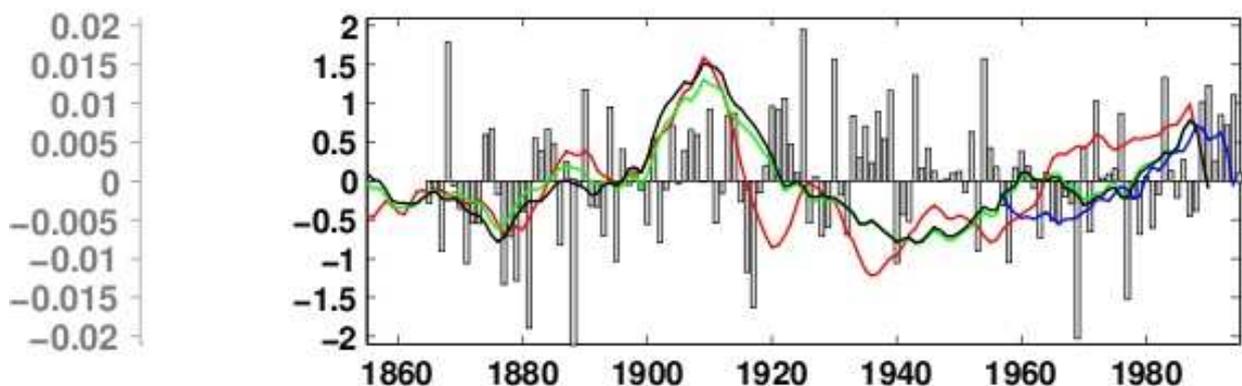


Abb. 6: Beckengemittelte natürliche Schwankung der CO₂-Aufnahme des Nordatlantiks in PgC/yr (Einheit auf der linken Ordinate) und NAO-Index (Balken, Einheit auf der rechten Ordinate). Gezeigt sind Ergebnisse einer 50-jährigen Simulation angetrieben mit den NCEP/NCAR-Reanalysisdaten (blau), und Ergebnisse verschiedener 150-jähriger Simulationen in denen die ersten 1 (rot), 2 (grün) und 4 (schwarz) EOFs des SLP zur Rekonstruktion des Antriebs verwendet wurden. Die Zeitreihen der CO₂-Aufnahme wurden zeitlich geglättet (10 Jahres gleitendes Mittel).

Der Grund für die fehlende Korrelation auf interannualen Zeitskalen ist ein gegenläufiges Oberflächensignal in Temperatur, Salzgehalt und Dissolved Inorganic Carbon (DIC)-Konzentration im subpolaren Nordatlantik: Während negative CO₂-Flussanomalien im westlichen subpolaren Nordatlantik durch Windstressänderungen in Verbindung mit hohem NAO hervorgerufen werden, sind gegenläufige Flussanomalien im zentralen subpolaren Nordatlantik zu finden, die wiederum auch durch NAO-Wärmeflussänderungen hervorgerufen werden (Abb. 7). Auf interannualen Zeitskalen gleichen sich Wind- und Wärmeflusseffekte aus, so dass es zu keinem kohärenten Signal kommen kann, während auf längeren Zeitskalen der Einfluss der Wärmeflussantriebs dominiert und die interdekadischen Änderungen der CO₂-Aufnahme hervorruft.

Die interdekadischen Schwankungen machen 10-20% der anthropogenen Kohlenstoffaufnahme des Nordatlantiks aus und sind dadurch durchaus im Bereich der

kürzlich diskutierten anthropogen erzeugten Trends der Kohlenstoffaufnahme, wie z.B. im Südlichen Ozean (LeQuere et al 2000). Insbesondere ergibt sich eine ansteigende CO_2 -Aufnahme in den 60er bis 90er Jahren des letzten Jahrhunderts die mit den langzeitlichen Trends der NAO in Verbindung steht, welche wiederum mit interdekadischen Änderungen der MOC einhergeht. Die simulierte interdekadische Schwankung der Kohlenstoffaufnahme im Zusammenhang mit der NAO und der MOC wird durch die beobachtete Zunahme des Oberflächenpartialdrucks von CO_2 über die letzten zwei Dekaden im subpolaren Nordatlantik unterstützt (Lefevre et al 2004, Corbiere et al, 2008, Schuster und Watson, 2007). Der Trend in der NAO scheint in den letzten Dekaden verstärkt zu sein, daher soll in der zweiten Phase dieses Teilprojekts die zukünftigen Änderungen der Kohlenstoffaufnahme mit Hilfe von Antriebsdaten aus Klimaszenariosimulationen abgeschätzt werden.

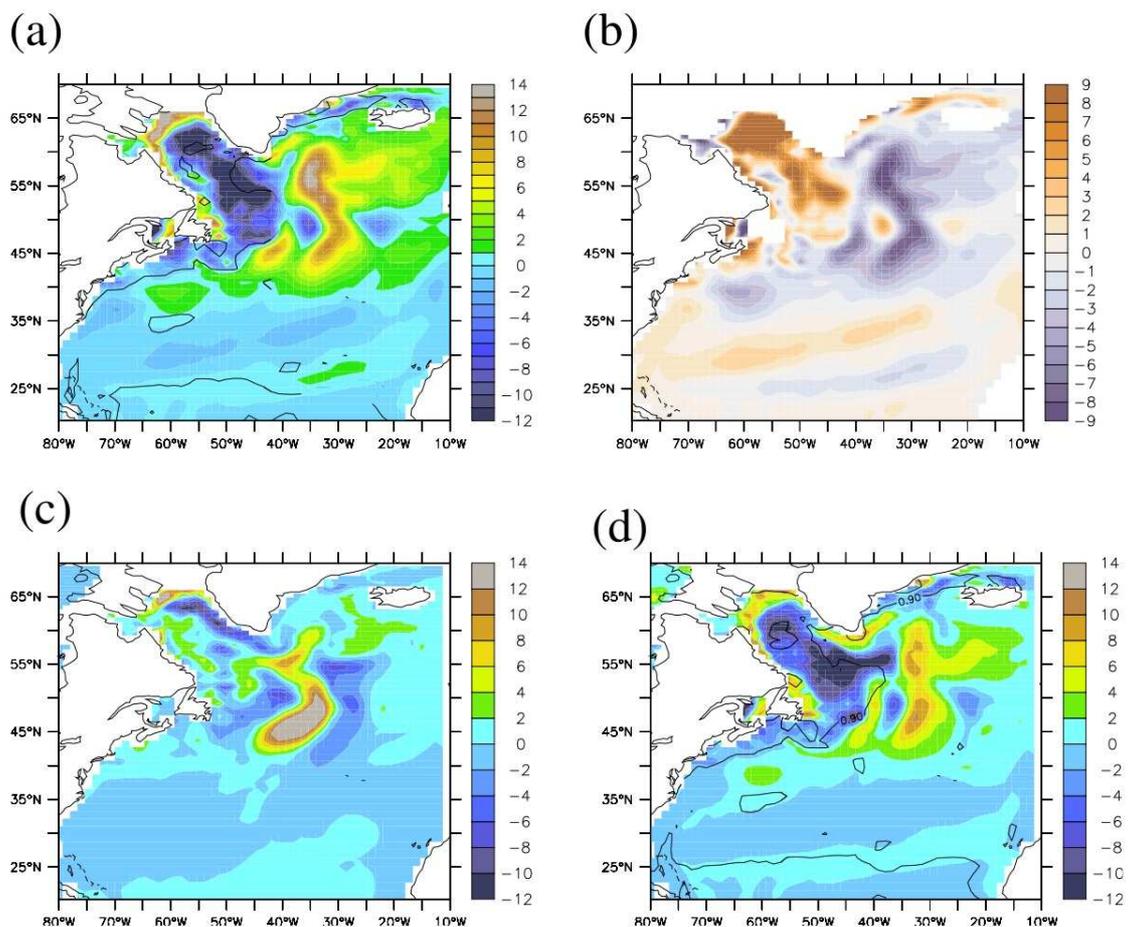


Abb. 7: a) Differenz der simulierten CO_2 Oberflächenflüsse gemittelt von 1920-1940 und 1960-1980 [$\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$] in einer Simulation angetrieben mit den "vollen" Feldern von NCEP/NCAR. Die Perioden repräsentieren eine interdekadisch besonders hohe bzw. niedrige NAO-Phase. b) Differenz im simulierten CO_2 -Oberflächenpartialdruckdifferenz [ppm]. c) wie a) aber für ein Experiment angetrieben nur mit Wärmeflussanomalien korreliert mit dem NAO. d) wie a) aber für ein Experiment angetrieben nur mit Windstressanomalien in Verbindung mit dem NAO.

1.7 Wissenschaftlicher Fortschritt Dritter

1.1 Es gibt mittlerweile einen Konsens dahingehend, daß sich die MOC langfristig, d. h. gegen Ende des 21. Jahrhunderts im Mittel um ca. 25% abschwächen wird. Es ist zurzeit unklar, ob man heute bereits ein anthropogenes Signal in der MOC erkennen kann. Das

Problem das möglicherweise bereits vorhandene anthropogene Signal zu erkennen besteht u. a. darin, daß es erst seit kurzem direkte Messungen der MOC gibt.

1.2 Bei der Simulation der tropischen atlantischen Variabilität sind besonders die Arbeiten von Chang et al. (2008) und Chiang et al. (2008) hervorzuheben. Chang et al. (2008) schlug anhand von gekoppelten Klimasimulationen einen Fernverbindungsmechanismus vor. Dem entsprechend würde eine abgeschwächte atlantische Umwälzelle aufgrund veränderter Ausbreitungspfade in der flachen subtropischen Zelle eine Oberflächentemperaturänderung im tropischen Atlantik auslösen. Es konnten damit Auswirkungen auf den Niederschlag des Afrikanischen Monsuns gezeigt werden. Chiang et al. (2008) erläuterte, dass eine Änderung der Stärke der Umwälzelle eine Nord-Süd Asymmetrie der Oberflächentemperatur in den Tropen hervorruft.

In Bezug auf den zonalen Mode als wesentlicher Bestandteil der tropischen atlantischen Klimavariabilität und dessen Rolle für Niederschlagsvariabilität wurde insbesondere wissenschaftlicher Fortschritt durch die Analyse der Daten aus dem französischen EGEE und dem internationalen AMMA Programm erzielt. Hervorzuheben ist die Arbeit von Marin et al. (2009), die zum Verständnis der zwischenjährlichen Variabilität der Oberflächentemperatur beiträgt. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, daß neben den Ostwindanomalien im äquatorialen Westatlantik (wie auch in Hormann und Brandt, 2009, gezeigt) auch intrasaisonale Schwankungen des Windfeldes über der Kaltwasserzunge entscheidend für die Entwicklung der Kaltwasserzunge sind.

2.2 Mehrere internationale Gruppen führen Untersuchungen im subpolaren Atlantik durch, deren Ergebnisse einen Einfluss auf das Vorhaben haben. Hier sind insbesondere die Aktivitäten des Bedford Institutes in Halifax zu nennen (I. Yashayaev) und das RAFOS-Floatprogramm am WHOI (A. Bower, S. Lozier), mit denen eng zusammengearbeitet wird. Auch zukünftige Projekte in den USA (US-AMOC) im subpolaren Bereich werden komplementäre Erkenntnisse und Datensätze bringen – wir sind an der Diskussion beteiligt.

3.2 Untersuchungen zur MOC-Variabilität stellen einen Schwerpunkt ozeanographischer Studien zur großräumigen Zirkulation im Nordatlantik dar. Die mittlerweile gewonnenen, mehrjährigen Zeitreihen des RAPID-Projekts im subpolaren Nordatlantik bestätigen die bereits früher in Modellen gefundene starke Variabilität auf Zeitskalen von Wochen-Monaten, sind aber noch zu kurz, um Aussagen über längerfristige Trends machen zu können.

1.8 Erfolgte und geplante Publikationen

1.1

Latif, M., W. Park, et al. (2009). "Internal and external North Atlantic Sector variability in the Kiel Climate Model." *Meteorologische Zeitschrift* 18(4): 433-443.

Park, W. and M. Latif (2008). "Multidecadal and multicentennial variability of the meridional overturning circulation." *Geophysical Research Letters* 35(22).

Semenov, S. A. , M. Latif, D. Dommenges, N. S. Keenlyside, A. Strehz, T. Martin, and W. Park (2010). "The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature"; eingereicht bei *Journal of Climate*.

Martin, T. and M. Latif (2010). "The Role of Freshwater in Anthropogenic Induced MOC Weakening", Manuskript in der Erstellung.

1.2

Brandt, P., V. Hormann , B. Boulès, J. Fischer , F. Schott , L. Stramma , M. Dengler, Oxygen tongues and zonal currents in the equatorial Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 113, C04012, doi:10.1029/2007JC004435, 2008.

Brandt, P., G. Caniaux, B. Boulès, A. Lazar, M. Dengler, A. Funk, V. Hormann, H. Giordani, F. Marin, Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon, *Atmospheric Science Letters*, submitted Feb. 2010a.

Brandt, P., V. Hormann, A. Körtzinger, M. Visbeck, G. Krahnemann, L. Stramma, R. Lumpkin, C. Schmid, Changes in the ventilation of the oxygen minimum zone of the tropical North Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.*, in press Apr. 2010b.

- Ding, H., N. S. Keenlyside, and M. Latif, Seasonal cycle in the upper equatorial Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 114, C09016, doi:10.1029/2009JC005418, 2009.
- Hormann, V., and P. Brandt, Atlantic Equatorial Undercurrent and associated cold tongue variability, *J. Geophys. Res.*, 112, C06017, doi:10.1029/2006JC003931, 2007.
- Hormann, V., and P. Brandt, Upper equatorial Atlantic variability during 2002 and 2005 associated with equatorial Kelvin waves, *J. Geophys. Res.*, 114, C03007, doi:10.1029/2008JC005101, 2009.
- Hüttl-Kabus, S. and Böning, C.W., Pathways and variability of the off-equatorial undercurrents in the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 113, C10018, doi:10.1029/2007JC004700, 2008.
- Keenlyside, N. and M. Latif, Understanding equatorial Atlantic interannual variability. *J. Climate*, 20 (1), 131-142, 2007.
- Keenlyside, N., M. Latif, J. Jungclaus, L. Kornbluh, and E. Roeckner, Advancing Decadal-Scale Climate Prediction in the North Atlantic Sector. *Nature*, 453, 84-88, 2008.
- Kirchner, K., Rhein, M., Hüttl-Kabus, S., Böning, C., On the spreading of South Atlantic water into the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 114, C05019, doi: 10.1029/2008JC005165, 2009.
- Lohmann, K., and M. Latif, Influence of El Niño on the upper-ocean circulation in the tropical Atlantic Ocean. *J. Climate*, 20, 5012-5018, 2007.
- Lübbecke, J.F., C.W. Böning, N.S. Keenlyside, and S.-P. Xie, On the connection between Benguela and Equatorial Atlantic Niños and the role of the South Atlantic Anticyclone, *J. Geophys. Res.*, submitted Nov. 2009.
- Park, W., N. Keenlyside, M. Latif, A. Ströh, R. Redler, E. Roeckner, and G. Madec, Tropical Pacific Climate and Its Response to Global Warming in the Kiel Climate Model. *J. Climate*, 22, 71–92, 2009.
- von Schuckmann, K., C. Eden, and P. Brandt, A counter-current to the NBUC, *Geophys. Res. Lett.*, submitted Apr. 2010.
- von Schuckmann, K., P. Brandt, and C. Eden, Generation of tropical instability waves in the Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 113, C08034, doi:10.1029/2007JC004712, 2008.
- Wahl, S., M. Latif, W. Park, and N. Keenlyside, On the Tropical Atlantic SST warm bias in the Kiel Climate Model, *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-009-0690-9, 2009.
- 2.2
- Schott F., L. Stramma, B. Giese, and R. Zantopp, 2009: Labrador Sea convection and subpolar North Atlantic Deep Water export in the SODA assimilation model. *Deep-Sea Research I*, doi:10.1016/j.dsr.2009.01.001
- Fischer, J., M. Visbeck, R. Zantopp, and N. Nunes, 2010; Observing decadal variability of outflow from the Labrador Sea, in Vorbereitung
- Cunningham, S., M. Baringer, W. Johns, John Toole, Svein Østerhus, J. Fischer, A. Piola, E. McDonagh, S. Lozier, U. Send, T. Kanzow, J. Marotzke, M. Rhein, S. Garzoli, S. Rintoul, B. Sloyan, S. Speich, L. Talley, J. Baehr, C. Meinen, A.-M. Treguier, P. Lherminier: The present and future system for measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and heat transport. (2009; submitted) *OceanObs'09, Community White Paper*.
- Send, U., R. Davis, J. Fischer, S. Imawaki, W. Kessler, C. Meinen, B. Owens, D. Roemmich, T. Rossby, D. Rudnick, J. Toole, S. Wijffels, L. Beal: A global boundary current circulation observing network. (2009; submitted) *OceanObs'09, Community White Paper*.
- 3.2
- Biastoch, A. C. W. Böning, J. Getzlaff, J.-M. Molines, and G. Madec, 2008: Causes of interannual-decadal variability in the meridional overturning circulation of the mid-latitude North Atlantic Ocean. *J. Climate* 21, doi: 10.1175/2008JCLI2404.1.
- Bower, A., M. S. Lozier, S. F. Gary, and C. W. Böning, 2009: Interior pathways of the North Atlantic meridional overturning circulation. *Nature*, 459, 243-247.
- Drakkar Group (B. Barnier, et al.), 2007: Eddy-permitting ocean circulation hindcasts of past decades, *Clivar Exchanges*, 12, 8-10.
- Gary, S. F., M. S. Lozier, C. W. Böning, A. Biastoch, 2010: Deciphering the pathways for the deep limb of the Meridional Overturning Circulation. *Deep-Sea Res.* (submitted)
- Griffies, S. M., A. Biastoch, C. W. Böning, et al., 2009: Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs), *Ocean Modelling*, 26, 1-46.
- Kirchner, K., Rhein, M., Hüttl-Kabus, S., Böning, C., On the spreading of South Atlantic water into the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 114, C05019, doi: 10.1029/2008JC005165, 2009.

- Latif, M., C. W. Böning, J. Willebrand, A. Biastoch, J. Dengg, N. Keenlyside, G. Madec, U. Schreckendiek, 2006: Is the thermohaline circulation changing? *J. Climate*, 19, 4631-4637.
- Lorbacher, K., J. Dengg, C. W. Böning, and A. Biastoch, 2010: Regional patterns of sea level change related to interannual variability and multi-decadal trends in the Atlantic meridional overturning circulation. *J. Climate* (in press).
- Rhein, M., D. Kieke, S. Hüttel-Kabus, A. Ströh, C. Mertens, R. Meissner, B. Klein, C. Böning, and I. Yashayev, 2010: Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep-Sea Res.* (submitted).

1.9 Literatur

1.2

- Chang et al. 2008. Oceanic link between abrupt changes in the North Atlantic Ocean and the African monsoon. *Nature Geoscience*, 1, 444.
- Chiang, J. C. H., W. Cheng, and C. M. Bitz 2008. Fast teleconnections to the tropical Atlantic sector from Atlantic thermohaline adjustment, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07704, doi:10.1029/2008GL033292.
- Marin F, Caniaux G, Bourlès B, Giordani H, Gouriou Y, Key E. 2009. Why were sea surface temperatures so different in the eastern equatorial Atlantic in June 2005 and 2006? *Journal of Physical Oceanography* 39(6): 1416–1431.

3.2

- Allan, R., and T. Ansell (2006), A New Globally Complete Monthly Historical Gridded Mean Sea Level Pressure Dataset (HadSLP2): 1850–2004, *J. Climate*, 19 (22), 5816–5842.
- Corbiere, A., N. Metz, G. Reverdin, C. Brunet, and T. Takahashi (2007), Interannual and decadal variability of the oceanic carbon sink in the North Atlantic subpolar gyre, *Tellus B*, 59B, 168–178.
- Eden, C., and T. Jung (2001), North Atlantic interdecadal variability: oceanic response to the North Atlantic oscillation (1865–1997), *J. Climate*, 14 (5), 676–691.
- Eden, C., and C. Oschlies (2006), Adiabatic reduction of circulation-related CO₂ air-sea flux biases in North Atlantic carbon-cycle models, *Glob. Biochem. Cycles*, 20 (GV2008), doi:10.1029/2005GB002521.
- Eden, C., and J. Willebrand (2001), Mechanism of interannual to decadal variability of the North Atlantic circulation, *J. Climate*, 14 (10), 2266–2280.
- Lefevre, N., A. Watson, A. Olsen, A.R.F. Perez, and T. Johannessen (2004), A decrease in the sink for atmospheric CO₂ in the North Atlantic, *Geophys. Res. Letters*, 31 (7), DOI:10.1029/2003GL018957,.
- LeQuere, C., J. C. Orr, P. Monfray, O. Aumont, and G. Madec (2000), Interannual variability of the oceanic sink of CO₂ from 1979 to 1997, *Glob. Biochem. Cycles*, 14, 1247–1265.
- Löptien, U. and Eden, C. (2010), Multidecadal CO₂ uptake variability of the North Atlantic. *J. Geophys. Res.* (in press).
- Schuster, U., and A. J. Watson (2007), A variable and decreasing sink for atmospheric CO₂ in the North Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 112, DOI:10.1029/2006JC003941.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart: Abschlussbericht	
3a. Titel des Berichts Abschlussbericht des Teilprojektes AP 2.1		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Rhein, Monika	5. Abschlussdatum des Vorhabens: 31.08.2009	
	6. Veröffentlichungsdatum	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Umweltphysik Abteilung Ozeanographie Otto-Hahn-Allee, Geb. NW1 28359 Bremen	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen *) 03F0443 C	
	11a. Seitenzahl Bericht 16	
	11b. Seitenzahl Publikation	
16. Zusätzliche Angaben	12. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen 8	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Der Subpolarwirbel im Nordatlantik ist die Schlüsselregion, in der die Bildung von Wassermassen mit Bedeutung für die globale meridionale ozeanische Umwälzbewegung erfolgt. Außerdem wird durch den Subpolarwirbel warmes salzreiches Nordatlantikwasser ins Europäische Nordmeer transferiert und Wasser aus dem Nordmeer in die tiefe, kalte atlantische Umwälzbewegung eingespeist. In einem großräumigen Feldprogramm (Hydrographie/FCKWs/SF ₆ , kombiniert mit Daten von Argo-Driftern und von verankerten invertierten Echoloten, PIES) sollen die Veränderungen in der Tiefenwasserbildung, in der Wassermassentransformation und im Ausbreitungsmuster im subpolaren Nordatlantik erfasst werden und mit den Schwankungen der Stärke des Subpolarwirbels in Beziehung gesetzt werden. Die in diesem Teilprojekt durchgeführten Beobachtungen und daraus abgeleitete Größen (Schwankungen in der Tiefenwasserbildung, und in der Stärke des Subpolarwirbels) werden innerhalb des Verbundes in Modelle assimiliert bzw. mit Modellergebnissen verglichen werden.		
19. Schlagwörter Physikalische Ozeanographie, Wassermassen-Transformation, Tiefenwasser-Bildung, Transport - Zeitreihen		

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart: Abschlussbericht	
3a. Titel des Berichts Abschlussbericht des Teilprojektes AP 2.1		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Rhein, Monika	5. Abschlussdatum des Vorhabens: 31.08.2009	
	6. Veröffentlichungsdatum	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation	
	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Umweltphysik Abteilung Ozeanographie Otto-Hahn-Allee, Geb. NW1 28359 Bremen	10. Förderkennzeichen *) 03F0400B	
	11a. Seitenzahl Bericht 16	
	11b. Seitenzahl Publikation	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen 8	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung The supolar gyre in the North Atlantic ist he key region fort he formation and transformation of water masses important for the global meridional overturning circulation. We combine a large-scale field programme (hydrography, CFC/SF6) with data from Argo drifters and moored inverted echosounders (PIES) to infer the change in the deep water formation, the water mass transformation and changes in the spreading pathways in conjunction with the fluctuations of the strength of the subpolar gyre. The data will be assimilated and/or compared to model results.		
19. Schlagwörter physical oceanography, water mass formation and transformation, transport time series		

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Abschlussbericht zu Teilprojekt 2.1

Teilprojektleiterin:

Prof. Dr. Monika Rhein

Institut für Umweltphysik, Abt. Ozeanographie

Universität Bremen

Tel. 0421 218 2408

Email: mrhein@physik.uni-bremen.de

www.ocean.uni-bremen.de

Wissenschaftlicher Mitarbeiterinnen:

Dr. Dagmar Kieke

Petra Günnewig

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Aufgabe 1 Untersuchung von Transportschwankungen im Einstrom des warmen, salzreichen Nordatlantikstroms (NAC) in den Nordostatlantik. Es gibt Hinweise für ein Abschwächen der Stärke des NACs in den letzten Jahren. Anhand von 4 verankerten invertierten Echoloten (PIES) entlang des Mittelatlantischen Rückens sollen die Transportschwankungen bestimmt werden. In die Auswertung sollen auch Altimeterdaten einbezogen werden. Änderungen der T/S-Eigenschaften werden durch die Auswertung von Argo-Driftern und Schiffsbeobachtungen untersucht.

Aufgabe 2 Bestimmung der Schwankungen in der Bildungsrate von Labradorseewasser (LSW) für den Zeitraum 2005-2007 und großräumige Vermessung der T/S-Änderungen im LSW, sowie die Bestimmung der LSW-Dichteschichten, die durch Konvektion erneuert werden. Die Fortsetzung unserer Zeitserie zur Tiefenwasserbildung im Rahmen von AP 2.1 wird darüber Auskunft geben, ob sich der Trend hin zu abnehmenden Bildungsraten fortsetzt und damit auch Hinweise auf die Ursachen geben (Treibhauseffekt?). 2007 sollen parallel die FCKW- und die SF₆-Inventare bestimmt werden, damit ab 2009 die Zeitreihe der Bildungsraten mit SF₆ fortgesetzt werden kann. Diese Methodenänderung wird nötig, da aufgrund der abnehmenden bzw. stagnierenden atmosphärischen FCKW-Konzentrationen in naher Zukunft das Signal/Rausch-Verhältnis für die FCKWs zu schwach wird. SF₆ hingegen kann für die nächsten Jahrzehnte gut für die Bestimmung der Bildungsraten eingesetzt werden.

Aufgabe 3 Erstellung eines Indexes für die Tiefenwasserbildung in der Labradorsee. Bis jetzt ist die einzige Möglichkeit einer quantitativen Abschätzung der LSW-Bildungsrate die Berechnung aus den Änderungen der Freon-Inventare im LSW im subpolaren Nordatlantik. Diese Inventaränderungen sind nur durch großskalige Aufnahmen der FCKW-Verteilung zu bekommen. Anhand der bald vorliegenden dekadischen Zeitserie (1997-2007) der LSW-Bildungsrate und der dazugehörigen Messungen (Hydrographie, T/S aus Argo-Driftern, Tracer) soll ein Verfahren ermittelt werden, um einen Index für die Änderungen der Tiefenwasserbildungsrate zu bekommen. Zur Entwicklung und zum Test eines solchen Indexes sollen auch Modellergebnisse herangezogen werden. Ein solcher Index stünde auch für die Analyse historischer Daten zur Verfügung.

Aufgabe 4 Untersuchung des Wassermassenaustausches, insbesondere des Exports von tiefen Wassermassen in den Subtropenwirbel, und des Ausbreitungsmusters zwischen dem Subtropen- und dem Subpolarwirbel anhand von Beobachtungen entlang des WOCE-Schnitts A2/AR19 bei ca. 47°N. Dieser Schnitt wurde seit 1993 etwa 10mal beprobt, diese Zeitserie soll in diesem Projekt ab 2007 fortgesetzt werden. Die Auswertung der Schnitte

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

zeigte bis jetzt, dass Änderungen in der Konvektionstätigkeit in der Labradorsee mit Änderungen in der thermohalinen Zirkulation bei 47°N verknüpft waren.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.

Die Abt. Ozeanographie der Universität Bremen hat schon viele Forschungsexpeditionen geplant und durchgeführt, und es steht eine ausgezeichnete technische Expertise für Spurenstoffmessungen, hydrographische Arbeiten und PIES Handling zur Verfügung, genauso wie die Expertise im Interpretieren von ozeanographischen Datensätzen.

Mit den Forschungsschiffen standen uns im Prinzip exzellente Plattformen zur Durchführung der Messungen zur Verfügung. Leider hat FS MARIA S. MERIAN diese Erwartungen nicht erfüllt. 2007 und 2009 mussten meine Expeditionen wegen Schäden an den Pod-Antrieben frühzeitig abgebrochen werden, mit Verlust von 21 Arbeitstagen 2007 und von 14 Arbeitstagen 2009. Der Ausfall 2007 konnte 2008 durch eine Zwei-Schiffe-Expedition mit MARIA S. MERIAN und THALASSA nachgeholt werden. Da das Projekt am 31.08.2009 endete und meine Forschungsfahrt MSM-12/3 am 04.08.2009 abgebrochen werden musste und am 12.08.2009 vorzeitig in Bremerhaven endete, konnten die ausgefallenen Arbeitstage 2009 nicht innerhalb des Projektzeitraums nachgeholt werden.

Mein im Sommer 2009 bei der Senatskommission für Ozeanographie gestellter Antrag wurde dahingehend genehmigt, dass wir den Ostteil des WOCE-A2-Schnittes im Sommer 2010 während der METEOR-Reise M82/2 beproben können. Desweiteren wurde uns Schiffszeit auf dem isländischen Forschungsschiff ARNI FRIDRIKSSON (Reise SUBPOLAR-08) gewährt, so dass wir im November 2009, nach Ablauf dieser Projektphase, drei von vier PIES erfolgreich auslesen konnten.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der im Antrag vorgelegte Arbeitsplan wurde in einigen wesentlichen Teilen eingehalten, in anderen Teilen kam es jedoch zu Einschränkungen und Verzögerungen. Kurz vor Beginn des Projektes im August 2006 wurden die vier PIES entlang des Mittelatlantischen Rückens ausgelegt. Durch einen Motorschaden von FS POSEIDON musste das anvisierte hydrographische Begleitprogramm dieser Reise jedoch aufgegeben werden. Aufgrund von technischen Problemen im Antrieb der MARIA S. MERIAN gingen 2007 bei der Forschungsreise MSM-05/1 21.5 von 32 Arbeitstagen verloren. Die verkürzte Arbeitszeit verhinderte, dass die in diesem Teilprojekt vorgesehenen Arbeiten (großräumige Aufnahme der SF₆/FCKW-Inventare, Auslesen der im August 2006 verankerten PIES) durchgeführt werden konnte. Es reichte lediglich zu Messungen im Westteil des WOCE-A2-Schnittes und zu einem Randstromschnitt bei 47°N. Von den vier in vertierten Echoloten (PIES) konnte nur das südlichste erreicht und erfolgreich ausgelesen werden. Die nachfolgende Reise von Herrn Dr. Jürgen Fischer (MSM-05/2, AP 2.2) musste ebenfalls erheblich gekürzt werden, so dass auch die von uns vorgesehene Probennahme in der Labradorsee nicht im vorgesehenen Maße durchgeführt werden konnte. Andererseits ist es uns gelungen, das holländische Forschungsschiff PELAGIA zu bekommen (25.10.-19.11.2007), um Messungen (CTD/LADCP, Tracer) in der Irmingersee durchführen zu können. Leider haben sehr schlechte Wetterbedingungen eine Probennahme in der Irmingersee unmöglich gemacht. Es konnten jedoch etwa 50 Stationen im Nordostatlantik beprobt werden. Diese Forschungsreise wurde aus eigenen Mitteln bezahlt, da die Kosten in AP 2.1 für eine zusätzliche Reise nicht ausreichten. Die DFG lehnte die Übernahme der Kosten ab, da die Reise eindeutig AP 2.1 zuzuordnen sei. Weitere FCKW-Proben wurden in Zusammenarbeit mit Henrik van Aken (NIOZ) und Steven van Heuven (Universität Groningen) auf einer weiteren PELAGIA-Reise gewonnen, die in etwa den früheren WOCE A1E-Schnitt beprobte (Abb.1). Das entsprechende Verbrauchsmaterial wurde aus eigenen Mitteln finanziert.

Im Jahr 2008 konnte die Fahrt mit FS MARIA S. MERIAN wie geplant durchgeführt werden (MSM-09/1, FL M.Rhein). Um die ausgefallenen 21 Arbeitstage von 2007 nachzuholen wurde mir 2008 zusätzlich das französische Forschungsschiff THALASSA für 21 Arbeitstage zur Verfügung gestellt. Die Fahrt fand gleich anschließend an MSM-09/1 statt, Fahrtleitung hatte Frau Dr. Kieke aus dem AP 2.1. Die zusätzlich angefallenen Kosten für die THALASSA-Fahrt mussten aus Eigenmitteln bezahlt werden, d.h. das Projekt bekam 2 zusätzliche Fahrten, die aus Mitteln der Grundausrüstung bezahlt wurden.

2009 wurden 32 Arbeitstage mit FS MARIA S. MERIAN bewilligt, und die Fahrt fand vom 15.07. bis 22.08.2009 statt (MSM-12/3). Wie bereits geschildert musste die Fahrt vorzeitig wegen Pod-Schäden abgebrochen werden. Die Fahrt endete am 12.08.2009 vorzeitig in Bremerhaven. Dankenswerterweise bekam das Projekt die Bewilligung, Teile der Mittel umzuwidmen, um auf dieser Fahrt schon die Randstromverankerungen auslegen zu können, die Teil des neuen BMBF Verbundvorhabens ‚Nordatlantik-Teil des Erdsystems‘ sind, das im September 2009 startet. Dies konnte wie geplant durchgeführt werden. Somit konnte 1 Jahr an zusätzlichen Daten gewonnen werden. In Bezug auf die PIES konnte nur die Position des südlichsten PIES erreicht werden. Leider konnten weder die Daten ausgelesen, noch das Gerät geborgen werden. Das Erreichen und Auslesen der drei weiteren PIES wurde durch den vorzeitigen Abbruch der Reise verhindert.

Trotz der schiffstechnischen Probleme wurden in AP 2.1 exzellente Datensätze geschaffen, deren Aufbereitung jedoch noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Erste Analysen, die diese Datensätze benutzen, werden zur Veröffentlichung vorbereitet, bzw. sind schon veröffentlicht.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Antragstellerin und ihre Gruppe verfügt über jahrelange Erfahrung in der Planung und Durchführung von Forschungsfahrten, in der Analyse von Spurenstoffen und anderen hydrographischen Daten. Expertise liegt auch für Verankerungsarbeiten, für die Behandlung von PIES und die Analyse von ozeanographischen Datensätzen vor. Außerdem profitierte das Projekt von der Fertigstellung der Messanlage zur Analyse von SF₆-Daten an Bord, die 2008 und 2009 erfolgreich eingesetzt wurde. Die Anlage wurde von der DFG finanziert.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten im Projekt profitierten besonders durch die enge Zusammenarbeit im Verbund. Kooperation gab es auch mit I. Yashayaev und J. Smith, beide vom Bedford Institute of Oceanography, Halifax, Kanada, betreffs Analysen in der Labradorsee und Probennahme von Jod-Isotopen im westlichen Randstrom. Die Zusammenarbeit mit der französischen ‚OVIDE‘ Gruppe war leider nicht so fruchtbar, da die Gruppe bisher nicht bereit war, Daten auszutauschen. Sehr gut entwickelte sich die Zusammenarbeit mit dem NIOZ (Henrik van Aken, Hein de Baar). Bezüglich der PIES-Auswertung haben wir enge Kontakte zu S. Garzoli und C. Meinen (beide NOAA, Miami).

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

II.1.1 Forschungsfahrten

2006

Im Zeitraum 01.08.-15.08.2006 wurde die Forschungsreise P341 mit FS POSEIDON durchgeführt (Lissabon-Vigo). Diese Reise diente in erster Linie dem Aussetzen der vier Invertierten Echolote (PIES), von denen zwei aus dem AP 2.1 und zwei aus der Grundausrüstung finanziert wurden. Die PIES sind für einen Zeitraum von 5 Jahren verankert und sollen in jährlichen Abständen akustisch ausgelesen werden. Das

beabsichtige Hydrographie-Programm dieser Reise entlang des Mittelatlantischen Rückens musste aufgegeben werden, da durch einen Maschinenschaden von FS POSEIDON die Anzahl der Arbeitstage erheblich gekürzt wurde.

2007

Aufgrund von technischen Problemen im Antrieb der MARIA S. MERIAN gingen bei der AP 2.1 Forschungsreise mit der MSM-05/1 21.5 von 32 Arbeitstagen verloren. Die verkürzte Arbeitszeit verhinderte, dass die in diesem Teilprojekt vorgesehenen Arbeiten (großräumige Aufnahme der SF₆/FCKW-Inventare, Auslesen der im August 2006 verankerten PIES) durchgeführt werden konnte. Es reichte lediglich zu Messungen im Westteil des WOCE A2 Schnittes und zu einem Randstromschnitt bei 47°N.

Von den vier Invertierten Echoloten (PIES) konnte nur das südlichste erreicht und erfolgreich ausgelesen werden. Die nachfolgende Reise von Herrn Dr. Jürgen Fischer (MSM-05/2) musste ebenfalls erheblich gekürzt werden, so dass auch die von uns vorgesehene Probennahme in der Labradorsee nicht ganz im vorgesehenen Maße durchgeführt werden konnte. Andererseits ist es uns gelungen, das holländische Forschungsschiff PELAGIA zu bekommen (25.10.-19.11.2007), um Messungen (CTD/LADCP, Tracer) in der Irmingersee durchführen zu können. Leider haben sehr schlechte Wetterbedingungen eine Probennahme in der Irmingersee unmöglich gemacht, es konnten aber etwa 50 Stationen im Nordostatlantik beprobt werden.

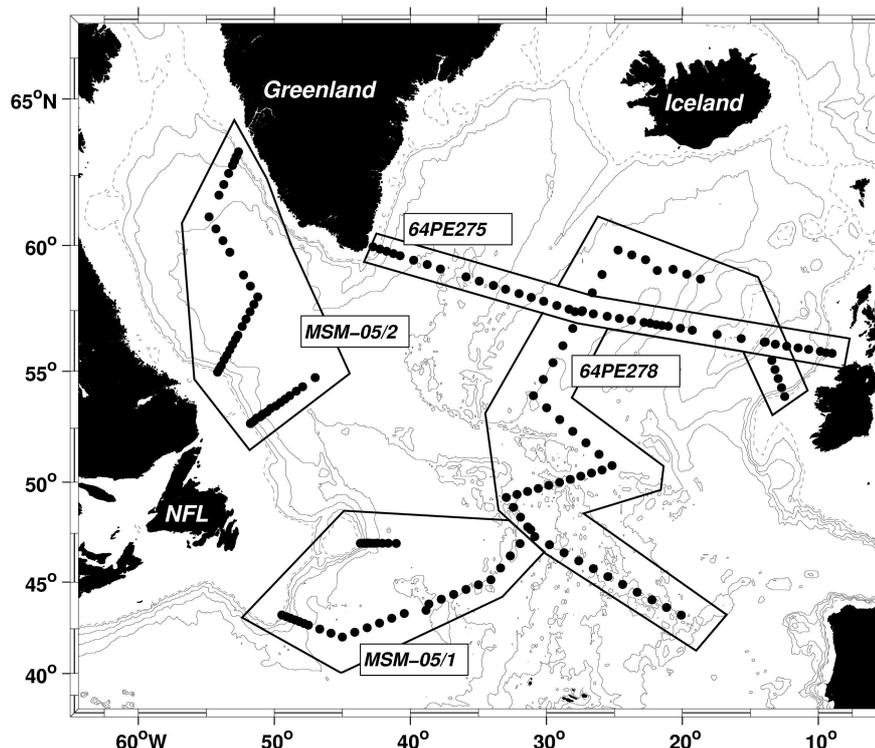


Abb.1. Fahrten mit FCKW-Probennahme 2007. MSM-05/1: FL M. Rhein, AP 2.1; MSM-05/2: FL J. Fischer, IFM-GEOMAR, AP 2.2; 64PE278: FL D. Kieke, AP 2.1; 64PE275: FL H.van Aken, NIOZ, Texel.

Diese Forschungsreise wurde aus eigenen Mitteln bezahlt, da die Kosten in AP 2.1 für eine zusätzliche Reise nicht ausreichten und die DFG abgelehnt hat, die Kosten zu übernehmen, da die Reise eindeutig zu AP 2.1 zuzuordnen sei. Weitere Proben wurden in Zusammenarbeit mit Henrik van Aken (NIOZ) und Steven van Heuven (Universität Groningen) auf einer weiteren PELAGIA-Reise (64PE275) gewonnen, die in etwa den früheren WOCE A1E-Schnitt beprobte (Abb.1).

2008

In diesem Jahr wurden von uns zwei Forschungsfahrten organisiert und durchgeführt. Die erste Fahrt erfolgte mit FS MARIA S. Merian (MSM-09/1) und die zweite mit dem französischen Forschungsschiff THALASSA (SUBPOLAR-08). Beide Fahrten führten zu einer guten Datenabdeckung im westlichen Teil des subpolaren Nordatlantiks (Abb. 2). Alle 4 PIES konnten erfolgreich akustisch ausgelesen werden.

2009

Diese Fahrt fand mit FS MARIA S. MERIAN (MSM-12/3) statt und diente neben der Vermessung der großräumigen Spurenstoff-Verteilungen auch dem akustischen Auslesen der PIES, dem Auslegen von 3 Randstromverankerungen bei 47°N und von 3 Tiefseeverankerungen des BSH am Mittelatlantischen Rücken (Abb.3). Allerdings konnten wir nicht alle diese Pläne umsetzen. Die Fahrt MSM-12/3 musste vorzeitig wegen Schäden an beiden Pod-Antrieben abgebrochen werden. Lediglich die Messungen in der Labradorsee und im Neufundlandbecken konnten durchgeführt werden. Von den PIES konnte nur das südlichste am MAR erreicht werden. Zum ersten Mal, seit meine Gruppe PIES anwendet, waren wir weder in der Lage, die Daten über akustische Telemetrie zu erhalten, noch ließ sich das PIES bergen. Die durch die schiffstechnischen Probleme ausgefallenen Arbeiten konnten zum Teil nachgeholt werden, da uns für November 2009 15 Arbeitstage auf dem isländischen Forschungsschiff ARNI FRIDRIKSSON (Reise SUBPOLAR-09) gewährt worden. Während dieser Fahrt wurden die drei nördlichen PIES erfolgreich ausgelesen und ein aus Eigenmitteln finanziertes PIES an der südlichsten PIES-Position neu ausgelegt, um einen potentiellen Verlust des Gerätes und damit Verlust der Messdaten zu kompensieren und zeitliche Daten-Lücken in den PIES-Zeitreihen zu minimieren. Auch die BSH-Verankerungen konnten als Vorarbeit zum Nachfolge-Projekt „Nordatlantik – Teil des Erdsystems“ erfolgreich ausgelegt werden. Im Dezember 2009 wurde das Gerät an der irischen Küste gefunden und im Januar 2010 an uns zurück gegeben. Eine technische Überprüfung zeigte, dass das PIES lediglich für zwei Wochen Daten aufgezeichnet hatte.

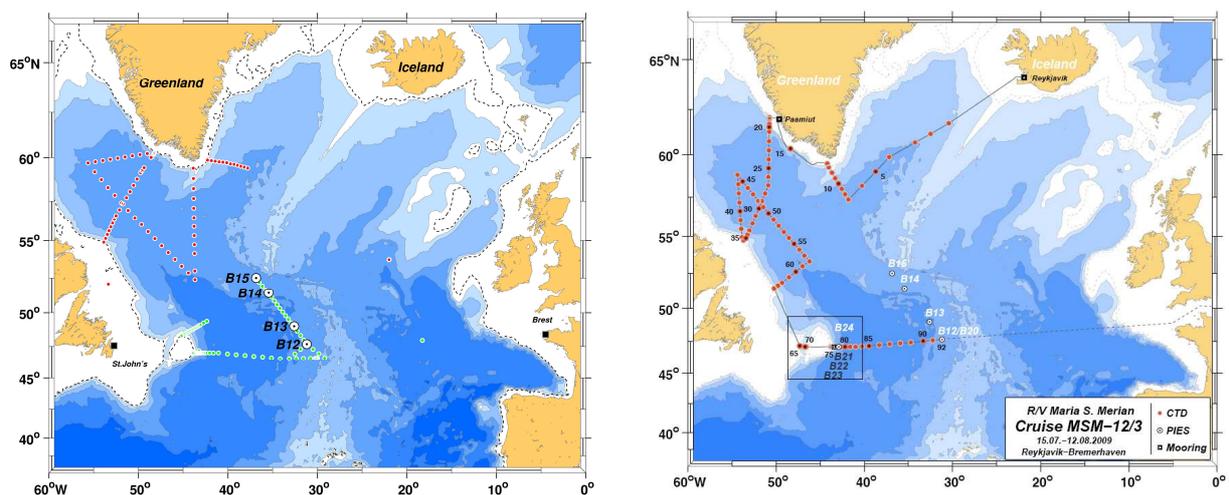


Abb.2. Links: AP 2.1-Fahrten 2008. Grün: MARIA S. MERIAN-Reise MSM-09/1, FL M. Rhein, rot: THALASSA-Reise SUBPOLAR-08, FL D. Kieke. Rechts: MARIA S. MERIAN, Reise MSM-12/3.

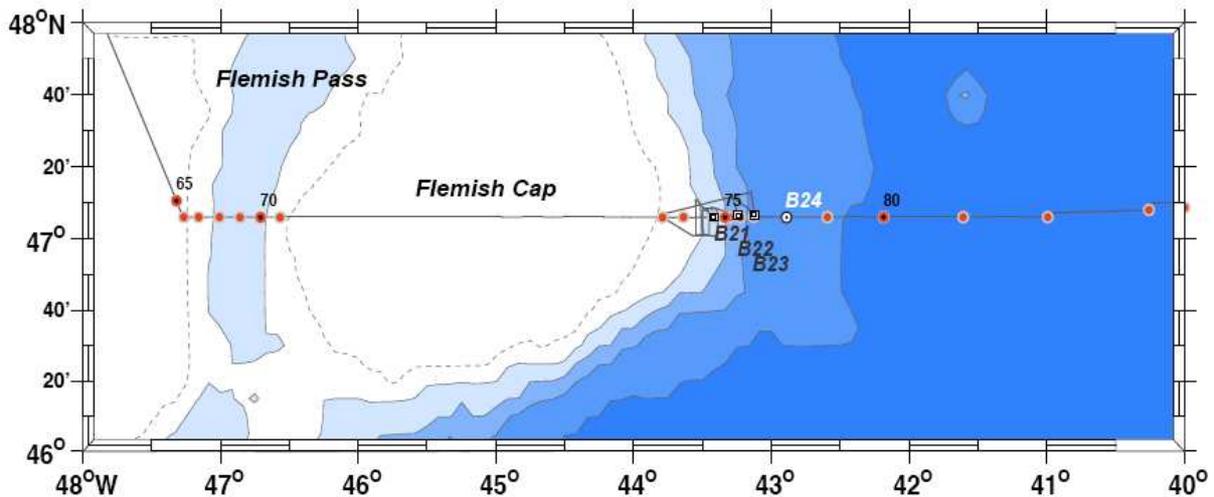


Abb. 3. Fahrt MSM-12/3, 14.7. -12.8.2009, Detail der Messungen im Flemish Pass und im westlichen Randstrom. B21-B23: Verankerungen, B24: PIES.

Aus diesem Projekt konnte mit Zustimmung des Geldgebers eine kostenneutrale Umwidmung von Mitteln sicher stellen, dass die Randstromverankerungen bei 47°N vor Neufundland bereits im Juli 2009 ausgelegt werden konnten, obwohl sie Teil des Vorhabens „Nordatlantik – Teil des Erdsystems“ sind, das im September 2009 begann. Auf diese Weise kann die Zeitreihe des Randstromtransports um 1 Jahr verlängert werden. Durch den Verlust von 14 Arbeitstagen 2009 war es nicht möglich, die dringend benötigten Messungen im Ostatlantik durchzuführen. Ein entsprechender Antrag an die Senatskommission für Ozeanographie wurde dahingehend genehmigt, dass wir diese Messungen im Sommer 2010 auf der METEOR-Reise M82/1 (FL M. Rhein) durchführen können.

II.1.2 Daten

Alle $CTDO_2$ Daten auf den AP2.1 Fahrten wurden bereits auf der Fahrt kalibriert, so dass der endgültige Datensatz bereits nach Ende der Reise zur Verfügung stand. Die Schiffs-ADCP und LADCP-Daten der AP 2.1-Fahrten lagen ebenfalls am Ende der Fahrt in endgültiger Form vor. FCKW- und SF_6 -Proben wurden auf den Fahrten MSM-09/1, SUBPOLAR-08 und MSM-12/3 an Bord analysiert und lagen 1-2 Monate nach der Fahrt in endgültiger Form vor. Die Tracerproben aller anderen Fahrten (MSM-05/1, MSM-05/2, 64PE278, 64PE275) mussten im Bremer Labor analysiert werden. Entsprechende FCKW-Daten der 2007er Fahrten mit MARIA S. MERIAN liegen erst seit 09/2009 vor und werden im Nachfolgeprojekt „Nordatlantik-Teil des Erdsystems“ ausgewertet. Die Labormessung der PELAGIA-Proben ist für 2010 anvisiert. Daher gibt es bisher kein vollständiges FCKW-Inventar für 2007 basierend auf Daten aller durchgeführten Reisen.

Bei der akustischen Telemetrie können die Daten der PIES nicht hoch aufgelöst übertragen werden, da sonst die benötigte Zeit viel zu lang wäre. Deshalb werden nur Tagesmittelwerte der akustischen Laufzeit und des Bodendrucks übertragen. Bei der Übertragung können Fehler passieren, die man durch wiederholtes Auslesen eliminieren kann. Die Übertragung funktionierte 2008 sehr gut, so dass ein analysefähiger Datensatz von 2 Jahren Länge vorliegt. Wie schon geschildert, scheiterte das Auslesen der Daten 2007 und 2009 an den Antriebsschäden der MARIA S. MERIAN, die jeweils zum vorzeitigen Abbruch der Fahrt führten.

Die Konversion der akustischen Laufzeiten in T/S-Profile bzw. Geopotential-Anomalien geschieht durch eine Transfer-Funktion, dem sogenannten Gravest Empirical Mode (GEM, Meinen, C.S., and D. R. Watts (1998), *Calibrating inverted echo sounders equipped with pressure sensors*. *J.A.O.Tech.* 15, 1339-1345). Da es kaum CTD-Daten aus dem Winter gibt

waren die T/S-Daten aus dem Argo-Programm eine große Hilfe, um auch die Laufzeiten in den Wintermonaten interpretieren zu können. Insgesamt standen 239 CTD und 2548 Argo-Profile zur Analyse zur Verfügung (Zeitraum Januar 2000 -August 2009).

II.1.3 Auswertung

Zur Thematik von AP 2.1 wurden verschiedene Arbeiten veröffentlicht bzw. eingereicht, die die Bildungsrate von ULSW/LSW quantifizierten und mit Indizes für die Stärke des NAC verglichen und die Ausbreitung von ULSW und LSW im subpolaren Nordatlantik zum Thema hatten. Die LSW-Produktionsraten wurden mit Hilfe von FCKW-Inventaren bestimmt, wobei 2005 die Datenabdeckung außerhalb der Labradorsee nicht ausreichend war, um die Inventare allein aus Tracer-Daten zu berechnen. Stattdessen wurde die Methode durch die Einbeziehung von Korrelationen der FCKWs zu anderen hydrographischen Parametern wie Salzgehalt weiter entwickelt. Die Methode wurde für die Jahre mit genügender räumlicher Abdeckung getestet und die Ergebnisse stimmen sehr gut (2-2.5%) mit den Inventaren aus den gemessenen Tracer-Verteilungen überein. Dieser methodische Teil wird zurzeit in einem Manuskript zusammengefasst und soll veröffentlicht werden. Der abnehmende Trend der LSW-Bildungsrate setzte sich 2003-2005 fort und geht einher mit dem abnehmenden baroklinen Massentransport zwischen Bermuda und der zentralen Labradorsee.

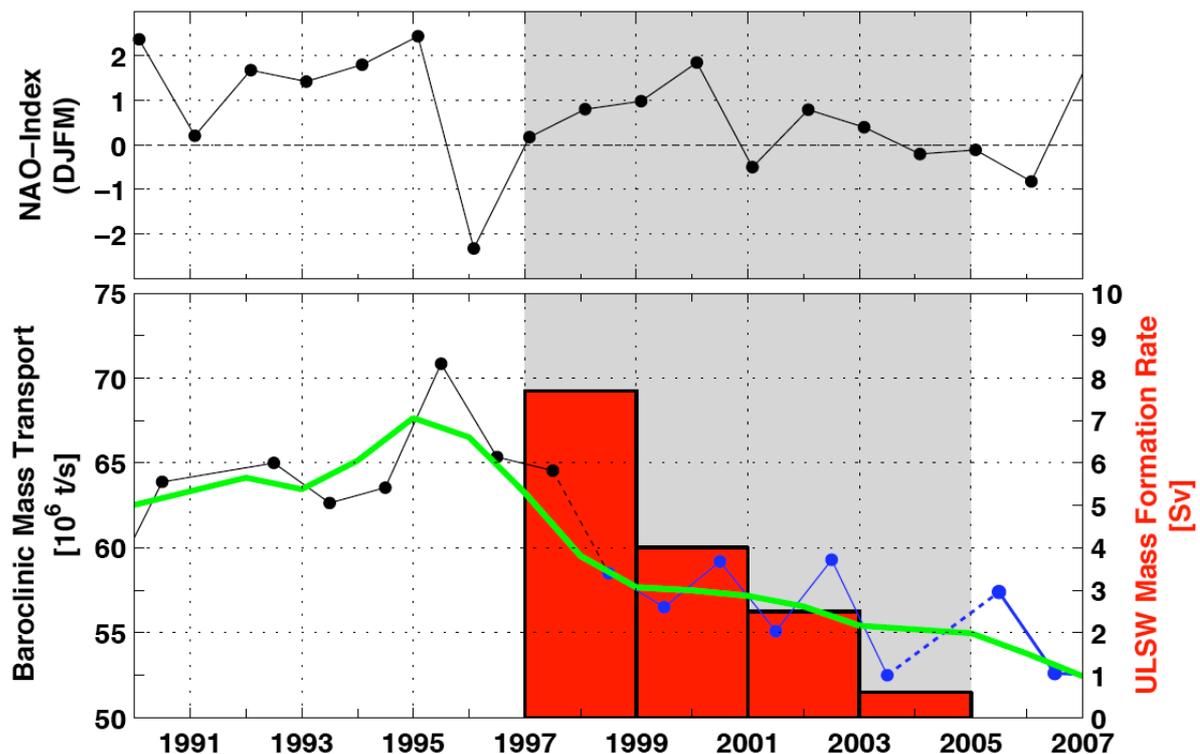


Abb. 4. NAO-Index (obere Kurve). Unten: Barokliner Transport zwischen Bermuda und Labradorsee (grün: 3-Jahre-Filter) als Indikator für die Stärke des Subpolarwirbels. Rote Balken: Bildung von LSW (Kieke et al., 2007, aktualisiert).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es trotz der ungenügenden Datenabdeckung für 2005 und 2007 außerhalb der Labradorsee möglich ist, Abschätzungen der LSW-Produktionsrate für diesen Zeitraum zu bekommen, wenn auch mit größerer Unsicherheit als in den früheren Jahren. 2008 war die Probedichte für das Westbecken nördlich von 45°N für eine Inventarberechnung ausreichend. Es ist 2008 gelungen, SF_6 zusammen mit der FCKW-12-Verteilung zu messen. Damit können wir in den folgenden Jahren die

Berechnungen der LSW-Produktionsrate anhand der Änderungen im SF_6 -Inventar durchführen. Die atmosphärische Konzentration des SF_6 steigt im Gegensatz zu den FCKWs weiter stark an, so dass SF_6 ein sehr viel stärkeres Signal/Rausch Verhältnis bietet. Dazu kommt, dass SF_6 etwa 50 Jahre nach dem Auftreten der FCKWs in den Ozean eingetragen wurde. Die Voraussetzungen für die Anwendung der Tracer-Methode (Rhein et al., 2002; Kieke et al., 2006, 2007) werden daher heute und in den folgenden Jahrzehnten von SF_6 sehr viel besser erfüllt als von den FCKWs.

In Zusammenarbeit zwischen AP 2.1, AP 2.2, B. Klein (BSH, Hamburg) und L. Stramma (IFM-GEOMAR, Kiel) entstand ein Manuskript, in dem hydrographische Daten entlang des WOCE-A2- und des GOOS-Schnittes mit historischen BSH-Verankerungen an der Westflanke des MAR kombiniert wurden, um die Ausbreitung von LSW im Inneren des Westbeckens zu untersuchen. Eines der Ergebnisse war, dass sich die LSW-Anomalien graduell nach Osten ausbreiten, die Zeitspanne von der Bildung in der Labradorsee und der Ankunft am A2-Schnitt (43-48°N) liegt je nach geographischer Länge zwischen 2-6 Jahren (Abb. 5, aus Kieke et al., 2009). Als Grund für die ostwärtige Propagation wird die Wechselwirkung zwischen dem tiefen westlichen Randstrom und dem nach Nordosten setzenden Nordatlantikstrom (NAC) angegeben. Die Verankerungszeitreihen der Geschwindigkeiten und T/S-Werte im Bereich des LSW waren durch eine hohe Variabilität geprägt. Es gibt Hinweise darauf, dass gelegentlich LSW in den Subtropenwirbel transportiert wird, aber im Vergleich zum westlichen Randstrom hat diese Exportroute eine geringe Bedeutung (Kieke et al., 2009).

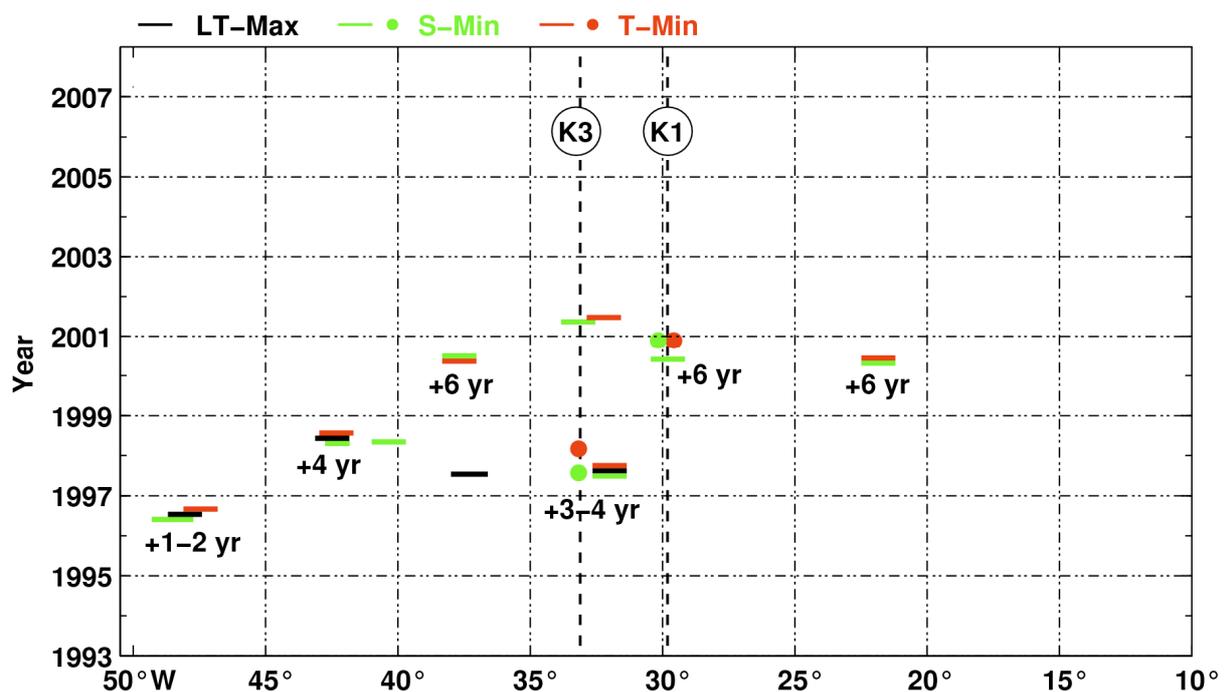


Abb. 5. Abschätzungen der Ankunftszeit von Anomalien des Labradorseewassers. K3 und K1 geben die Position historischer BSH-Verankerungen am MAR an. Die Zeiten beziehen sich auf die Zeit seit dem Auftreten der Anomalie in der Labradorsee im Jahr 1994 (aus Kieke et al., 2009).

Die Stärke des NAC bzw. des Subpolarwirbels wird seit August 2006 durch Bodenecholote mit hochpräzisen Drucksensoren (PIES) gemessen, die im Rahmen des AP 2.1 parallel zum MAR ausgelegt wurden. Durch die technischen Probleme der MARIA S. MERIAN konnte

2007 nur eine PIES-Position erreicht werden. Während der Reise MSM-09/1 im August 2008 wurden alle vier PIES akustisch ausgelesen. Sie lieferten zweijährige Datensätze des Bodendrucks und der akustischen Signallaufzeit bis zur Wasseroberfläche. Aus den übermittelten Daten können nun Zeitreihen der barotropen und baroklinen Transportschwankungen erstellt werden. Die gleichen technischen Probleme im Schiffsantrieb der MARIA S. MERIAN verhinderten auch 2009 das Auslesen der Daten. Aufgrund der Schäden musste die Fahrt MSM12/3 vorzeitig abgebrochen werden, so dass nur die Position des südlichsten PIES erreicht wurde. Wie schon erwähnt, konnten die Daten des dritten Auslegejahres erst nach Abschluss der Projektphase ausgelesen werden

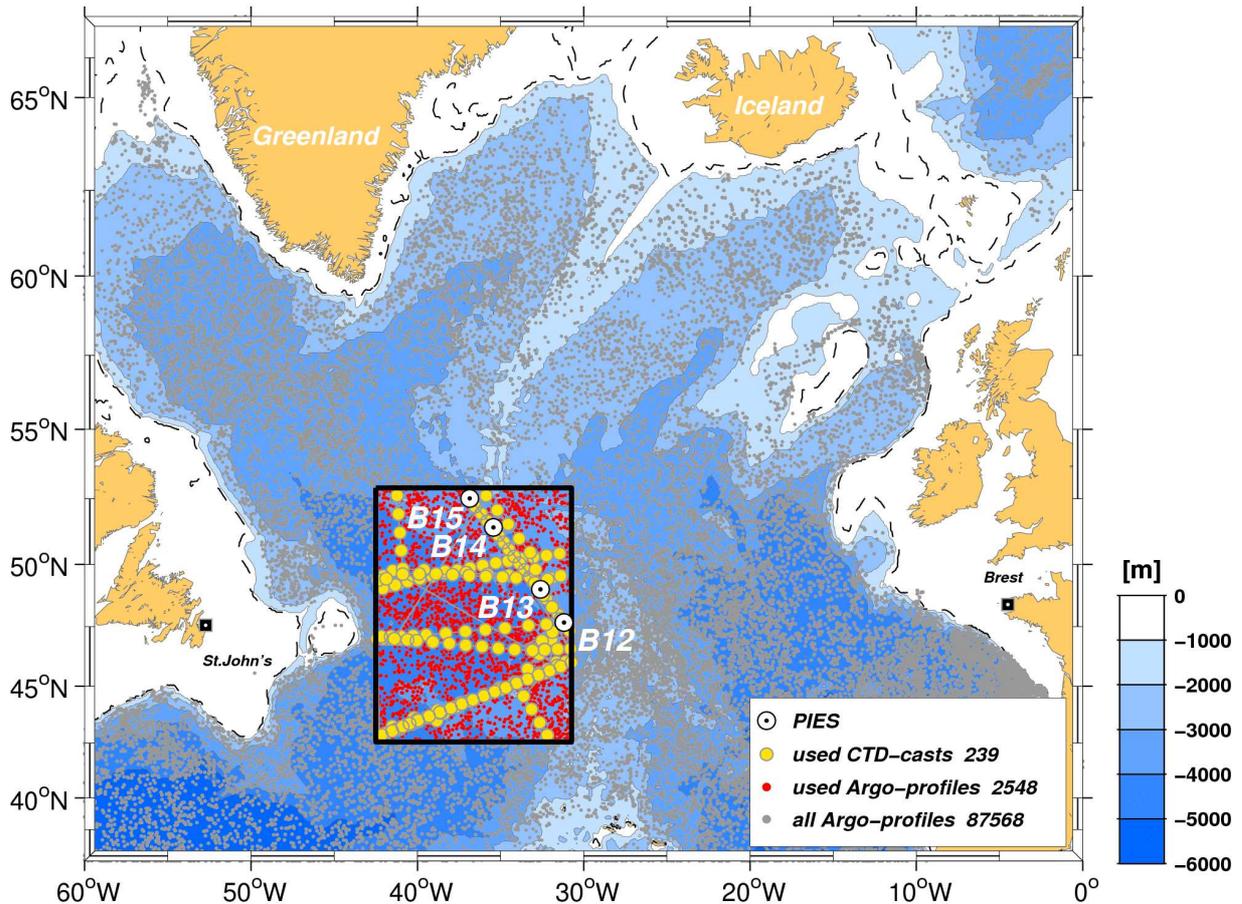


Abb. 6. Position der CTD- und Argo-Profilen, deren T/S-Daten für die Berechnung der GEMs verwendet wurden.

Für in Abb. 6 dargestellten CTD- und Argo-Profilen wurde die akustische Laufzeit von 1000 dbar bis zur Oberfläche und zurück berechnet. Diese Tiefe wurde gewählt, da so die Informationen aus den Argo-Profilen voll ausgenutzt werden können. Über die bis zum Boden reichenden CTD-Stationen wurde der lineare Zusammenhang zwischen dieser Laufzeit und den anderen verwendeten Größen festgestellt. Alle Beobachtungen wurden anhand ihrer akustischen Laufzeiten geordnet und mit kubischen Spline-Funktionen auf ein reguläres Gitter interpoliert (Laufzeiten von 0.1 ms und Tiefenintervallen von 25 dbar).

Zu Laufzeiten kleiner als 1.315 s liegen keine CTD Stationen vor, da diese Profile hauptsächlich aus dem Herbst bzw. Winter stammen. Die Lücken unterhalb der Argo-Tiefen wurden aus den CTD-Daten durch Extrapolation geschlossen. Anschließend wurden über

das gesamte Gitter vertikale kubische Splines gelegt. Als Beispiel wird in Abb. 7 der GEM für die geopotentielle Anomalie gezeigt, die für die Berechnung der Transporte benötigt wird.

Im nächsten Schritt werden die Transfer-Funktionen auf die akustischen Laufzeiten der PIES angewendet, und dann Zeitserien der Temperatur, des Salzgehaltes, der Dichte und der geopotentiellen Anomalie berechnet. Daraus lassen sich letztendlich die geostrophischen Transporte relativ zu 3400dbar bestimmen. Die absoluten Geschwindigkeiten am Referenzlevel von 3400m lassen sich nicht aus den PIES – Zeitserien berechnen, da der absolute Druck durch eine unbekannt zeitliche Drift gestört wird. Der Trend wird aus den Bodendruckserien nach dem Verfahren von Watts und Kontoyiannis (1990) entfernt (*Watts, D. R. & Kontoyiannis, H., Deep-Ocean Bottom Pressure Measurement - Drift Removal And Performance, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7, 296-306*). An wissenschaftlich auswertbaren Größen bleiben die Schwankungen des Bodendrucks, aus denen sich die Fluktuationen der geostrophischen Geschwindigkeit im Referenzniveau berechnen lassen.

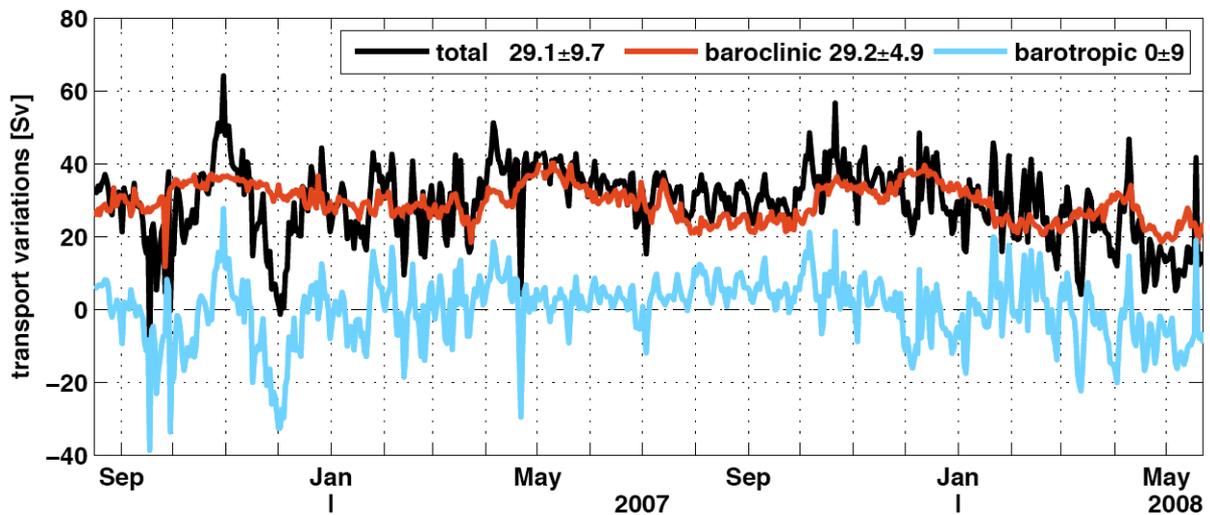


Abb. 7. Geostrophische Transport-Zeitserien zwischen PIES B12/B20 bei 47°40'N und PIES B15 bei 52°40'N in Sv ($1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), bezogen auf 3400 dbar. Positiv: nach Nordosten, negativ: nach Südwesten.

Abb. 7 zeigt die berechneten Transporte vom südlichsten (B12/B20) bis zum nördlichsten PIES (B15, siehe Abb. 6), bezogen auf ein Referenzniveau von 3400 dbar. Von den annähernd 30 Sv strömen etwa 60% zwischen den PIES, die die Faraday – Bruchzone begrenzen (B13 – B14). Ein Vergleich der Transport-Zeitserien zwischen B12/B20 – B13 und B13-B14 lässt ein Mäandrieren des NAC und damit des Subpolarwirbels erkennen (Abb. 8). Transporteinbrüche durch die Faraday-Bruchzone (B13-B14) werden durch erhöhte Transporte im südlicheren Abschnitt teilweise kompensiert. Die Transporte und Transportschwankungen nördlich von B14 sind sehr klein 0 ± 6 Sv). Man kann aber vermuten, dass hier der Beitrag der mittleren Geschwindigkeit im Referenzniveau hoch ist. Der Anteil soll aus einer Kombination von Schiffsbeobachtungen (Schiffs-ADCP, LADCP, Geostrophie) ermittelt werden. Leider konnte dies bis jetzt nur einmal durchgeführt werden, diese Messungen fielen 2007 und 2009 dem Abbruch der MERIAN Fahrten durch Schäden an den Pod-Antrieben zum Opfer, im August 2006 dem Maschinenschaden von FS POSEIDON.

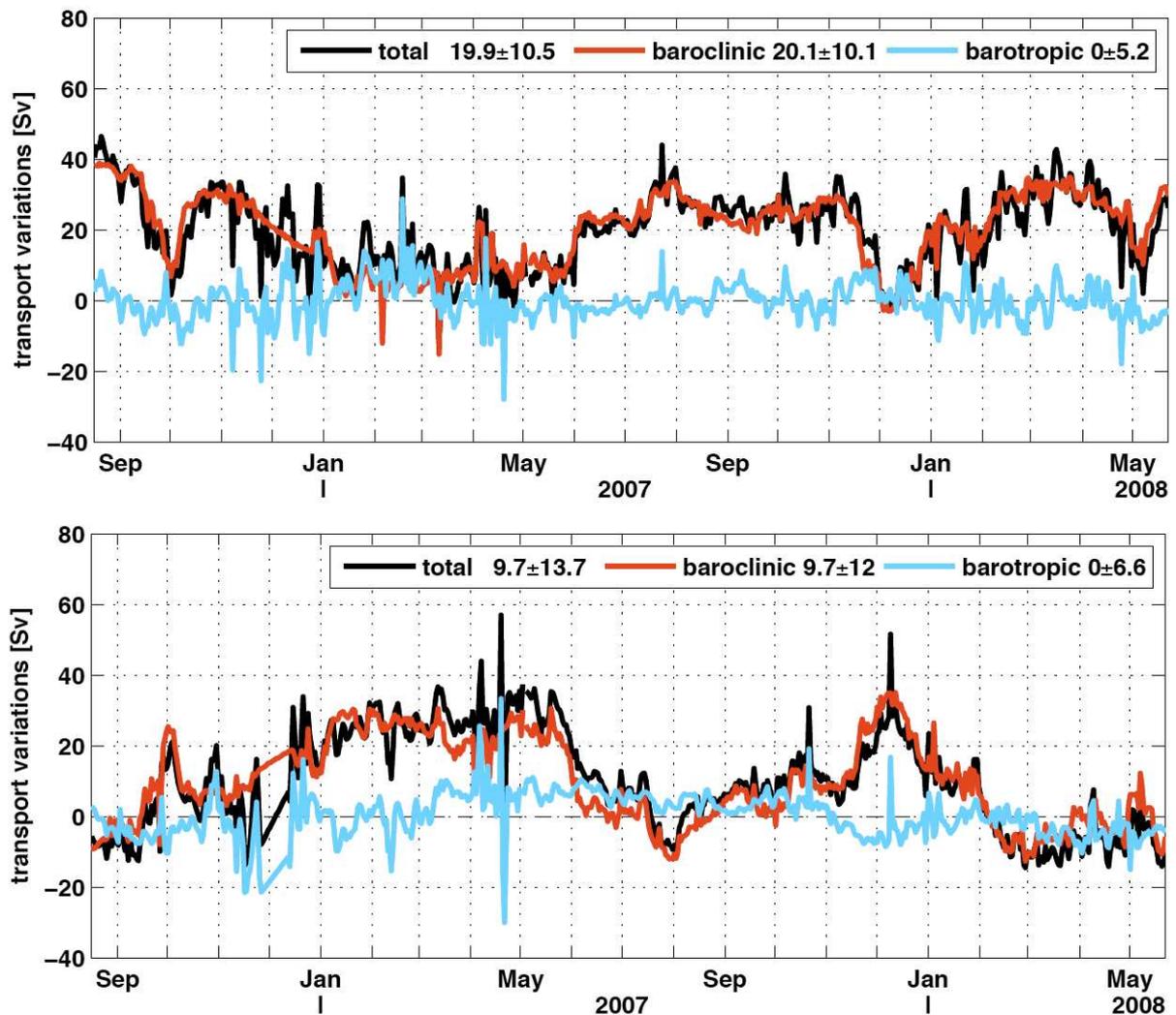


Abb. 8. Oben: Transportzeitreihe [Sv] zwischen den zentralen PIES B13 und B14. Unten: Transportschwankung [Sv] zwischen PIES B12/B20 und B13, Positionen der PIES siehe Abb. 6 [$1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$].

Ergebnisse, die sich auf dieses Projekt bzw. auf Daten aus diesem Projekt beziehen, wurden im Projektzeitraum in Form von Posterbeiträgen und zum Teil eingeladenen Vorträgen auf folgenden Workshops und Konferenzen vorgestellt. Hier sind nur die Vorträge aufgeführt, der von einem Mitglied meiner Arbeitsgruppe gehalten wurde.

Rapid Climate Change International Science Conference, Birmingham (UK), 10/2006	Kieke, D., M. Rhein , L. Stramma, W. M. Smethie, J. L. Bullister, "Variability in the formation of Labrador Sea Water"
North Atlantic Subpolar Gyre Workshop Kiel, 03/2007	Kieke, D. , L. Stramma, B. Klein, M. Rhein , K. P. Koltermann "Export of Labrador Sea Water out of the subpolar gyre"
	Rhein, M. "Rates of Deep Water Transformation in the Labrador Sea"
	Steinfeldt, R., M. Rhein , T. Tanhua "Inventory changes of anthropogenic carbon in the subpolar North Atlantic"
	Stöber, U., M. Walter, C. Mertens, M. Rhein "Mixing Estimates from Hydrographic Measurements in the Deep Western Boundary Current of the North"

	Atlantic”
2007	
EGU General Assembly 2007, Wien, 04/2007	Rhein, M., D. Kieke, R. Steinfeldt “Ventilation of Upper Labrador Sea Water, 2003-2005”
Ocean Sciences Meeting 2008, Orlando (US), 03/2008	Kieke, D., M. Rhein, L. Stramma, B. Klein, I. Yashayaev, K. P. Koltermann “Formation, spreading, and fate of Labrador Sea Water”
	Steinfeldt, R., M. Rhein, J. Bullister, T. Tanhua “Inventory changes of anthropogenic carbon in Labrador Sea Water”
	Stöber, U., M. Walter, C. Mertens, M. Rhein “Mixing estimates from hydrographic observations in deep water along the western boundary of the North Atlantic”
RSMAS-Seminar, Miami (US), 03/2008	Rhein, M. “Time series of mass and heat transport at 47°N, North Atlantic”
EGU General Assembly 2008, Wien, 04/2008	Günnewig, P., D. Kieke, M. Rhein “Evolution of properties related to ULSW formation during winters 2005-2007”
	Kieke, D., M. Rhein “Reconstruction of CFC inventories from hydrographic data”
	Rhein, M., D. Kieke, R. Steinfeldt “Changes in LSW formation rates inferred from CFC inventories”
	Steinfeldt, R., M. Rhein, J. L. Bullister, T. Tanhua “Inventory of anthropogenic carbon in the Atlantic”
First Euro-Argo Users Workshop, Southampton (UK), 06/2008	Kieke, D., K. Kirchner “Large-scale spreading of water masses in the North Atlantic based on Argo data analysis”
Labrador Sea Workshop, Halifax (CA), 11/2008	Rhein, M. “Deep water formation and the strength of the subpolar gyre”
EGU General Assembly 2009, Wien, 04/2009	Kieke, D., L. Stramma, B. Klein, M. Rhein, K. P. Koltermann “Variability and pathways of Labrador Sea Water in the southern subpolar gyre of the North Atlantic”
	Meißner, R., C. Mertens, M. Walter, M. Rhein, U. Stöber “Finestructure variability associated with mesoscale eddies in the subpolar North Atlantic”
	Rhein, M. “Labrador Sea Water production and the strength of the Subpolar Gyre”
	Steinfeldt, R., M. Rhein “Export Rates of North Atlantic Deep Water”
	Stöber, U., M. Walter, C. Mertens, M. Rhein “Observations of semi-diurnal energy fluxes at the western boundary of the North Atlantic at 16°N and 47/49°N”
	Ströh, A., M. Rhein, C. Mertens, D. Kieke “Variability of the Subpolar Gyre and the North Atlantic Current inferred from Pressure Inverted Echo Sounders”
First US AMOC Meeting, Annapolis (US), 05/2009	Rhein, M. “AMOC heat and volume transports in the subpolar North Atlantic”
MOCA-09, IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly, Montreal (CAN), 07/2009	Meißner, R., C. Mertens, M. Walter, M. Rhein, U. Stöber “Finestructure variability associated with mesoscale eddies in the subpolar North Atlantic”

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgegeben, und zwar zum größten Teil für die Beschäftigung der wissenschaftlichen Mitarbeiterin Dr. Dagmar Kieke. Mit ihr konnte eine Wissenschaftlerin für das Projekt gewonnen werden, die ihre Expertise in der Auswertung von Spurenstoff- und hydrographischen Daten im subpolaren Nordatlantik hat. Die halbe Wissenschaftlerstelle wurde mit Frau Dipl. Met. Petra Günnewig besetzt, die sich besonders um die Änderung der Wärmeinhalte im subpolaren Nordatlantik anhand von Argo-Daten beschäftigen sollte. Frau Günnewig hat das Projekt zum März 2009 verlassen. Die technische Stelle wurde mit Herrn Klaus Bulsiewicz besetzt, ohne dessen Erfahrung (er hat auch die Bremer SF₆ – Anlage aufgebaut) und Expertise die Spurenstoffmessungen nicht durchgeführt werden können.

Die für Investitionen zur Verfügung stehenden Mittel wurden wie bewilligt zur Beschaffung von zwei invertierten Echoloten (PIES), Wasserschöpfern und Hydrophon eingesetzt.

Ein Teil der frei werdenden Personalmittel (durch die Kündigung von Frau Günnewig) und Reisemittel (MARIA S. MERIAN Reise MSM12-3 endete vorzeitig in Bremerhaven) wurden hauptsächlich in Verbrauch für Verankerungen, und studentische Hilfskräfte für Verankerungen umgewidmet, um schon 2009 die drei Randstromverankerungen aussetzen zu können, die Teil des neuen Verbundvorhabens ‚Nordatlantik-Teil des Erdsystems‘ sind, das im September 2009 beginnt. Diese Arbeiten wurden auf der Fahrt MSM12/3 im Juli 2009 erfolgreich durchgeführt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war in vollem Umfang notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Dies ist ein Projekt der Grundlagenforschung, daher waren keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu erwarten und haben sich auch nicht unerwartet eröffnet. Die Zeitserie der Bildungsraten von Labradorseewasser und dessen Verteilungsmuster werden eine neue wichtige Referenz für die Validierung numerischer Modellsimulationen und ihrer Reaktion auf atmosphärische Schwankungen darstellen. Ähnlich Erwartungen haben wir in die Zeitreihen der Transportschwankungen im Subpolarwirbel.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes erfolgte die gegenseitige Information über Fortschritte der einzelnen TP bei entsprechend anberaumten Treffen und zwischenzeitlich per Email. Wissenschaftliche Fortschritte außerhalb des Verbundes wurden durch laufende Sichtung neuer Veröffentlichungen verfolgt, bzw. auf Workshops und Meetings diskutiert, und bei der eigenen Arbeit soweit relevant berücksichtigt. Es wurden aber keine Fortschritte an anderer Stelle bekannt, die das eigene Arbeitsprogramm nennenswert beeinflusst haben oder gar die angestrebten eigenen Ergebnisse vorweggenommen hätten.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in internationalen begutachteten Zeitschriften, die projektrelevant sind und/oder Daten aus dem Projekt verwenden. Die fett gedruckten AutorInnen sind Mitglieder meiner Arbeitsgruppe:

- Haine, T., C. W. Böning, P. Brandt, J. Fischer, A. Funk, **D. Kieke**, E. Kvaleberg, and **M. Rhein** (2008), North Atlantic Deep Water Transformation in the Labrador Sea, Recirculation through the Subpolar Gyre, and Discharge to the Subtropics. In: *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes - Defining the Role of the Northern Seas in Climate*, R. R. Dickson, J. Meincke, P. Rhines (Eds.), Springer, Vol. X, chap. 26.
- LeBel, D. A., W. M. Smethie Jr., **M. Rhein**, **D. Kieke**, R. A. Fine, J. L. Bullister, D.-H. Min, W. Roether, R. F. Weiss, C. Andrie, D. Smythe-Wright, and E. P. Jones (2008), The distribution of CFC-11 in the North Atlantic during WOCE: Inventories and calculated water mass formation rates. *Deep-Sea Res. I*, 55, 891-910.
- Kieke, D.**, B. Klein, L. Stramma, **M. Rhein**, and K. P. Koltermann (2009), Variability and propagation of Labrador Sea Water in the southern subpolar North Atlantic. *Deep-Sea Res. I*, 56(10), 1656-1674.
- Kieke, D.**, **M. Rhein**, L. Stramma, W. M. Smethie, J. L. Bullister, and D. A. LeBel (2007), Changes in the pool of Labrador Sea Water in the subpolar North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06605, doi:10.1029/2006GL028959.
- Mertens, C.**, **M. Rhein**, **K. Kirchner**, and **M. Walter** (2009), Modulation of the inflow into the Caribbean Sea by North Brazil Current Rings. *Deep-Sea Res. I*, 56(7), 1057-1076.
- Rhein, M.**, **D. Kieke**, and **R. Steinfeldt** (2007), Ventilation of Upper Labrador Sea Water, 2003-2005. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06603, doi:10.1029/2006GL028540.
- Smethie Jr., W. M., D. A. LeBel, R. A. Fine, **M. Rhein**, and **D. Kieke** (2007), Strength and variability of the deep limb of the North Atlantic meridional overturning circulation from chlorofluorocarbon inventories. In: *Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts*, A. Schmittner, J. Chiang, and S. Hemming (eds.), Geophysical Monograph Series, Vol. 173, pgs. 119-130.
- Steinfeldt, R.**, **M. Rhein**, J. L. Bullister, and T. Tanhua (2009), Inventory changes in anthropogenic carbon from 1997-2003 in the Atlantic Ocean between 20°S and 65°N. *Global Biogeochem. Cycles*, doi: 10.1029/2008GB003311.
- Stöber, U.**, **M. Walter**, **C. Mertens**, and **M. Rhein** (2008), Mixing estimates from hydrographic measurements in the Deep Western Boundary Current of the North Atlantic. *Deep-Sea Res. I*, 55(6), 721-736.

Eingereicht:

- Rhein, M.**, **D. Kieke**, **S. Hüttl-Kabus**, **A. Ströh**, **C. Mertens**, **R. Meissner**, B. Klein, C. W. Böning and I. Yashayaev (2010), Deep-water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep-Sea Res. II*, submitted

Geplante Veröffentlichungen

Kieke, Rhein, et al., LSW formation rates from combined CFC/SF₆ data.

Ströh, Rhein, Mertens, Kieke., NAC Transport fluctuations from PIES.

Kieke, Rhein et al., Spreading of Denmark Strait Overflow Water in the subpolar North Atlantic

Steinfeldt, R., M. Rhein, and D. Kieke, Ventilation and Formation Rates estimates based on TTDs derived from observed CFC data

Studienarbeiten, Doktor-, Diplom-, Master- und Bachelor-Arbeiten, die sich mit der Thematik und/oder mit Daten aus dem AP2.1 befassen:

Brüggemann, N. (2008), Die Untersuchung von Wirbeln im Nordatlantik mit Hilfe von Altimeterdaten. *Studienarbeit*, Universität Bremen, 37 pp.

Meissner, R. (2010), Die Rolle der Wirbel für die diapyknische Vermischung. Diplomarbeit, Universität Bremen, 104 pp.

Neugebauer, F. (2009), Analyse von Satelliten Altimeter Messungen im Hinblick auf Schwankungen des Nordatlantikstroms. *Bachelor-Arbeit*, Universität Bremen, 40 pp.

Stöber, U. (2009), Mixing and energy flux estimates from hydrographic measurements in the Deep Western Boundary Current of the North Atlantic. *Dissertation*, Universität Bremen, 99 pp.

Vollmer, L., (2009) Analyse von Strömungsdaten im tiefen westlichen Randstrom bei 47°N. *Bachelor-Arbeit*, Universität Bremen, 30 pp.

Begonnene Arbeiten:

Degenhardt, P. (2009-2010), Transporte im Subpolarwirbel aus Schiffsdaten (CTD/LADCP, vmADCP), Diplomarbeit, Universität Bremen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Schwankungen des Süßwassertransports aus dem Nordpolarmeer	
3b. Titel der Publikationen s. Anlage	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Schauer, Ursula; Gerdes, Rüdiger; Rabe, Benjamin; Karcher, Michael;	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.7.2009
4b. Autoren der Publikationen (Name, Vorname(n)) Diverse, s. Anlage	6. Veröffentlichungsdatum Von was?
	7. Form der Publikationen Artikel in Fachzeitschriften
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0443D
	11a. Seitenzahl Bericht 11
	11b. Seitenzahl Publikationen Diverse, s. Anlage
	12. Literaturangaben
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen -
	15. Abbildungen 7
	16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Arbeiten im Teilprojekt AP1_3 dienten dazu, Süßwasserprozesse im Arktischen Ozean im Bezug auf die Tiefenwasserbildung für die MOC im Nordatlantik besser zu verstehen. Durch Beobachtungen und Modellsimulationen wurden mehrjährige bis dekadischer Variationen des Exports von Süßwasser durch die Passagen westlich und östlich Grönlands als auch Prozesse innerhalb der Arktis untersucht. Aus Messdaten (Verankerungen, SchiffsADCP, Hydrographie und Sauerstoffisotopen) wurde der Export von Süßwasser und seiner Komponenten (Flusseintrag/Niederschlag und Meereisschmelze) aus der Arktis über die westliche Framstraße für die Jahre 1998, 2004 und 2005 analysiert. Trotz erheblicher Änderungen in der Komponentenzusammensetzung (in den 2000ern mehr meteorisches Wasser und gleichzeitig mehr durch Eisbildung aufgesalzenes Wasser) blieb der Gesamttransport konstant. Im Rahmen des Internationalen Polarjahrs 2007/08 (IPY) wurde die Änderung des Süßwassergehalts im tiefen Arktischen Ozean im Vergleich zu den 1990er Jahren analysiert. Dies wurde insbesondere durch die quasi-synoptische Aufnahme durch internationale Expeditionen und autonome eisgetragene Profiler (ITPs) ermöglicht, die erlauben, das ARGO-Programm auch auf den eisbedeckten Ozean auszudehnen. Der Vergleich ergab eine Zunahme des Süßwassergehalts um mehr als 3000 km ³ von 1992-1999 zu 2006-2008, das entspricht einer Erhöhung um 8 %. Eisgetragene Strömungsprofile (ITACs) erlaubten erstmalig direkte Strömungsmessungen der Deckschicht relativ zum Eis in verschiedenen Driftsituationen des Meereises. Oberflächennahe Strömung und Eisdrift verliefen fast parallel entlang von Fronten in Temperatur und Salzgehalt. Das gekoppelte regionale Eis/Ozeanmodell NAOSIM wurde verwendet um im Zeitraum 1948 bis 2004 die Ausbreitung von meteorischem Süßwasser mittels des Sauerstoffisotopenverhältnisses δ18O zu verfolgen. Die Transpolardrift als Transportpfad für Flusswasser von den Schelfen hin zur Framstraße hat sich als stark instationär und sogar zeitweilig unterbrochen gezeigt. Ein starkes Mäandrieren und zeitweiliges Abreißen der Transpolardrift macht die Problematik der Erfassung durch sporadische Messungen deutlich. In den frühen 90er Jahren brach die Transpolardrift zeitweise ab und das Flusswasser wurde in die ostsibirischen Schelfgebiete verfrachtet. Die Re-Etablierung der Transpolardrift in den 2000ern bewirkte den Transportanstieg von Flusswasser durch die Framstraße (s.o.) und damit der Kommunikation mit dem Nordatlantik.	
19. Schlagwörter Physikalische Ozeanographie, Arktischer Ozean, Süßwasserzirkulation und –bilanz, dekadische Veränderungen	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report
3a. Report Title Variability of freshwater transport in the Arctic Ocean	
3b. Title of Publication s. Attachment	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Schauer, Ursula; Gedes, Rüdiger; Rabe, Benjamin; Karcher, Michael;	5. End of Project 31. 7. 2009
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Various, see attachment	6. Publication Date Of what
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven	7. Form of Publications Articles in scientific journals
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 03F0443D
	11a. No. of Pages Report 11
	11b. No. of Pages Publication Various, see attachment
	12. No. of References
	14. No. of Tables -
	15. No. of Figures 7
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract AP1_3 aimed at better understanding of the fresh water processes in the Arctic Ocean that affect the MOC via the deep water formation in the subpolar North Atlantic. Multiyear and decadal variability of the fresh water export through the passages west and east of Greenland as well as changes in the interior Arctic were investigated by use of observations and model simulations. From observations (moored instruments, shipborne ADCP and CTD as well as oxygen isotopes) and model simulations the export of fresh water and its components through Fram Strait was analysed for the years 1998, 2004 and 2005. Despite considerable changes in the composition of the components (increase of meteoric water and increase of ice formation affected, i.e. more saline water) the total transport remained remarkably constant. In the framework of the International polar Year 2007/08 (IPY) changes of the fresh water content of the upper layers in the central Arctic were estimated in reference to the 1990s. This assessment was enabled through the quasi-synoptic survey through international expeditions as well as through ice.tethered profilers (ITPs) that form an extension of the ARGO programm into the polar ocean. The comparison resulted in an increase of the fresh water amount by 3000 km ³ from 1992-1999 to 2006-2008 which corresponds to 8%. Ice-tethered Acoustic Current profilers (ITAC) allowed direct current measurements in the upper layers relative to different ice drift situations. It turned out that the upper layer flows almost parallel to the sea ice and both are aligned to temperature and salinity fronts. The coupled regional Seaice Ocean model NAOSIM was used to trace the meteoric fresh water flow by using oxygen isotopes as a tracer. The Transpolar Drift (TpD), the main carrier of river water from the Siberian shelf seas towards Fram Strait, turned out to be rather instationary and even disappearing at times. Strong meandering and pulsations points at the problem of undersampling by sporadic observations. In the early 1990s the TpD broke off and river water was rather diverted towards east along the shelves. Reestablishment of the TpD in the 2000s caused the increased transfer of river water (meteoric water) through Fram Strait.	
19. Keywords Physical oceanography, Arctic Ocean, fresh water circulation, decadal variability	
20. Publisher	21. Price

Abschlussbericht

AP1.3: Schwankungen des Süßwassertransports aus dem Nordpolarmeer

im Verbundprojekt:

Der Nordatlantik als Teil des Erdsystems:
Vom Systemverständnis zur Analyse regionaler Auswirkungen

Zuwendungsempfänger: Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft	Förderkennzeichen: 03F0443D
Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 1.8.2006 – 31.7.2009	
Antragsteller: Prof. Dr. Ursula Schauer und Prof. Dr. Rüdiger Gerdes	
Projektwissenschaftler: Dr. Benjamin Rabe und Dr. Elena Sokolova	

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Aufgabe des Teilprojekts war es, Süßwasserprozesse im Arktischen Ozean im Bezug auf die Tiefenwasserbildung im Nordpolarmeer und dem Nordatlantik besser zu verstehen. Dabei sollten sowohl mehrjährige bis dekadischer Variationen des Exports von Süßwasser durch die Passagen westlich und östlich Grönlands als auch Prozesse innerhalb der Arktis betrachtet werden.

Neben der oberflächennahen Zirkulation beeinflusst arktisches Süßwasser auch Zwischenwasser, das direkt den tiefen westlichen Randstrom im Atlantik speist. Oberflächennahes Süßwasser gelangt als Meereis und in flüssiger Form über unterschiedliche Meeresstraßen in die unterschiedlichen Tiefenwasserbildungsgebiete des Nordatlantik: Der Transport durch die Framstraße beeinflusst die Dichteschichtung der Grönland-, Island- und Irmingersee, während der Transport durch den Kanadischen Archipel die Schichtung der Labradorsee beeinflusst. Die Transportrate durch die verschiedenen Meeresstraßen hängt unter anderem von der Süßwasserzirkulation innerhalb der Arktis ab. Dieser Zusammenhang sollte hier untersucht werden. Ziel des Projekts war es, durch Messungen, Modellierungen und Analysen in Verbindung mit der Modellierung in den Teilprojekten AP1.1, sowie der Arbeiten in AP2.1, AP2.2, AP2.3, AP3.2 und AP4.1 zu entscheiden, welche Messungen nötig sind, um den großräumigen Zustand des Nordpolarmeeres zur Beantwortung der oben stehenden Fragestellungen hinreichend zu charakterisieren. Diese Aussagen sollten zur Schaffung eines Frühwarnsystems herangezogen werden können.

Beobachtungen sollten im Rahmen internationaler Arbeiten im Nordpolarmeer erlauben Veränderungen des Süßwassergehalts in der zentralen Arktis zu bestimmen. Die Wassermasseneigenschaften und die Zirkulation der oberen Süßwasser führenden Schichten des Nordpolarmeeres sollten durch neuartige Messsysteme langfristig erfasst werden, um den Einfluss dekadischer Fluktuationen der Antriebsbedingungen auf die großräumigen Bedingungen in den Tiefenwasserbildungsgebieten zu untersuchen. Ferner sollten diese Daten zur Validierung von Modellrechnungen herangezogen werden, die die Rolle des Nordpolarmeeres für die thermohaline Zirkulation im Atlantik aufzeigen und sie sollten zur Assimilierung zur Verfügung stehen.

Zur Erfüllung der Aufgabenstellung wurden folgende Ziele gesetzt:

- A) Jährliche Erfassung der Wassermasseneigenschaften des Ausstroms in der Framstraße.
- B) Erfassung der Temperatur- und Salzgehaltsschichtung der oberen Schichten im Nordpolarmeer durch eisgetragene CTD-Profiler.

- C) Erfassung der oberflächennahen Zirkulation im Nordpolarmeer durch eisgetragene Strömungsprofile.
- D) Analyse des Zusammenhangs zwischen Salzgehaltsveränderungen im Nordpolarmeer und Süßwasserexport durch Modellsimulationen.

2. Voraussetzungen

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

Prof. Dr. U. Schauer, Projektleiterin, Prof. Dr. R. Gerdes, Projektleiter
Dr. Benjamin Rabe, Projektwissenschaftler, Dr. Elena Sokolova, Projektwissenschaftler
C. Köberle, Dr. E. Fahrbach, Dr. M. Karcher, Dr. F. Kauker, Dirk Kalmbach, Prof. Dr. A. Mackensen

Das AWI verfügt über eine umfassende Raum-, Rechner-, Labor- und Instrumentenausstattung, die dem Projekt zur Verfügung stand. Eine besondere Rolle spielte die Bereitstellung des Forschungseisbrechers POLARSTERN, durch den auch Messungen in der zentralen Arktis möglich sind. Die instrumentelle Ausstattung der messenden Ozeanographie erlaubte die Feldarbeiten weitgehend durch institutionelle Mittel abzudecken.

Die Arbeitsgruppe zur Modellierung der Zirkulation des Nordpolarmeers hatte in den Jahren vor Projektbeginn eine Hierarchie von Ozean-Meereis Modellen für das System aus Atlantik und Nordpolarmeer entwickelt (NAOSIM, North Atlantic-Arctic Ocean Sea Ice Models). Diese Modelle waren in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten zum Einsatz gekommen und mit anderen Modellen verglichen worden (unter anderem im SFB 512 und den Projekten DEKLIM, SIRRO, ASOF-N, VEINS, CONVECTION, DAMOCLES, AOMIP). NAOSIM-Versionen waren eingesetzt worden, um die Variabilität des Arktisch-Atlantischen Ozean-Meereissystems über die letzten 50 bis 60 Jahre zu beschreiben (z.B. Gerdes et al., 2003; Köberle and Gerdes, 2003; Karcher et al., 2003; Kauker et al., 2003; Drange et al., 2005; Gerdes et al., 2005).

3. Planung und Ablauf

Auf insgesamt 4 Expeditionen mit Polarstern in den Jahren 2007 und 2008 (ARKXXII-1, ARKXXII-2, ARKXXIII-1, ARKXXIII-3) wurden Daten zu Verteilung, Transport und Komponenten von Süßwasser im Nordpolarmeer gewonnen. Die Schiffsmessungen von Temperatur und Salzgehalt wurden arktisweit durch eisgetragene Messsysteme (Ice-Tethered Profiler, ITP, und Ice-Tethered Acoustic Current profiler, ITAC) ergänzt, wodurch die räumliche und zeitliche Abdeckung des Untersuchungsgebiets erheblich verbessert werden konnte. Durch internationale Kooperation im Rahmen des Internationalen Polarjahrs (IPY 2007/08) wurde der Datensatz weiter vervollständigt.

In der ersten Phase wurden bereits vorhandene hydrographische Daten aus der Framstraße ausgewertet. Während POLARSTERN-Reisen in den Jahren 2003, 2004 und 2005 wurden $\delta^{18}\text{O}$ -Daten gewonnen, die den bereits vorhandenen Datensatz aus den Jahren 1997 und 1998 erweiterten. Mit diesen Daten sollten Veränderungen im Anteil von Eisschmelze und Flusswasser/Niederschlag im Ostgrönlandstrom erfasst werden. Auf Reisen in die Framstraße mit MARIA S. MERIAN in 2006 und mit POLARSTERN in 2008 wurde der hydrographische Datensatz erweitert. In 2007 allerdings konnte die hydrographische Aufnahme aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit der MARIA S. MERIAN nicht in geplantem Umfang stattfinden. Somit wurde eine weitere, für 2007 geplante $\delta^{18}\text{O}$ -Aufnahme erst in 2008 durchgeführt.

Erstmalig wurden durch ITPs in großem Umfang Temperatur- und Salzgehaltsdaten aus eisbedeckten Gebieten ohne Schiffspräsenz gewonnen und durch ITACs autonome Strömungsmessungen in der oberflächennahen süßwasserhaltigen Wasserschicht durchgeführt. Die Einbindung dieser Geschwindigkeitsdaten erforderte besondere Verfahren, da sie nicht ortsfest gemessen wurden sondern vom sich unabhängig bewegenden Eis aus.

Drei erste ITPs wurden im Sommer 2007 während der POLARSTERN-Expedition ARKXXII-2 in der zentralen Arktis ausgebracht. Desweiteren wurde während dieser Expedition im Rahmen von DAMOCLES der erste Prototyp eines ITAC ausgebracht. Das im Eis verankerte Gerät driftete ca. 3 Monate lang entlang des Lomonosow-Rückens, bevor der Datenstrom vermutlich aufgrund von Eis-Rafting unterbrochen wurde. Im Sommer 2008 wurde eine leicht modifizierte Version des ITAC-Prototyps im nordöstlichen Kanadabecken während der POLARSTERN-Expedition ARKXXIII-3 ausgebracht. Leider wurden nur 9 Tage Geschwindigkeitsdaten erfasst, da das Strömungsmessgerät (Acoustic Doppler Current Profiler der Firma Research Development Instruments) einen Hardwarefehler aufwies.

Mit dem regionalen gekoppelten Eis-Ozean Modell NAOSIM (North Atlantic/Arctic Sea Ice Ocean Model) wurden Experimente zur Ausbreitung von Süßwasser meteorischen Ursprungs unternommen. Diese wurden mit atmosphärischen Daten des NCEP hindcasts aus dem Zeitraum 1948 bis 2008 angetrieben. Diese Experimente dienten zum Abgleich mit beobachteten Sauerstoffisotopendaten ($\delta^{18}\text{O}$). Ferner wurden Experimente zur Untersuchung der Dynamik des Süßwassergehaltes im Nordpolarmeer und dem Austausch

mit dem Nordatlantik durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente flossen in die Synthese von Beobachtungen und Modellierung ein. Des Weiteren wurden Vergleichsexperimente von NAOSIM und dem auf dem MITgcm basierenden NAOSIM-MIT durchgeführt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Nordpolarmeer liefert Süßwasser in der Größenordnung von 0.15 Sv in den Nordatlantik (Aagaard und Carmack, 1989), davon etwa zwei Drittel in fester und ein Drittel in flüssiger Form. Während die Zirkulation des Meereises durch Remote Sensing und ein etabliertes Bojenmessnetz (IABP, International Arctic Buoy Programme) zunehmend besser bestimmt werden können, ist die Ausbreitung des flüssigen Süßwassers lediglich aus sommerlichen Aufnahmen der Hydrographie bekannt, die in der zentralen Arktis nur sehr sporadisch vorliegen. Die Abnahme des Volumens des Meereis um ca. 40% in den vergangenen vier Dekaden bei zunehmendem Eintrag an Süßwasser (Peterson et al., 2002) verstärkt die Notwendigkeit, die Zirkulation des flüssigen Süßwassers quantitativ zu erfassen.

Süßwasser aus dem Nordpolarmeer erreicht Bildungsgebiete von Tiefenwasser im subpolaren Atlantik. Modellergebnisse besagen, dass große zusätzliche Süßwassereinträge in diese Gebiete auch einen Einfluss auf die großräumige ozeanische Zirkulation haben können (Häkkinen, 1999; Haak et al., 2003). Dabei ist nicht nur die meridionale Umwälzbewegung (MOC, Meridional Overturning Circulation) betroffen, sondern auch die horizontalen Wirbel reagieren unter Umständen sehr sensitiv auf den thermohalinen Antrieb (Brauch und Gerdes, 2005).

Prozesse, die Speicherung, Umlagerung und Export von Süßwasser im Nordpolarmeer bestimmen, sind bisher nicht gut verstanden (Häkkinen und Proshutinsky, 2004). Beobachtungen von Steele et al. (2003) in der zentralen Arktis und von Falck et al. (2005) in der Framstraße wiesen darauf hin, dass in den frühen 1990er Jahren, also in einer Phase positiver Arktischer Oszillation, die Zirkulation salzarmen Pazifikwassers im Beaufortwirbel verschoben wurde und dadurch mehr Pazifikwasser in die Framstraße gelangte als zuvor.

Der Süßwassertransport vom Nordpolarmeer in das Europäische Nordmeer und den subpolaren Atlantik ist von einzelnen herausragenden Ereignissen gekennzeichnet. In den späten 1960er Jahren wurde anscheinend die so genannte Große Salzgehaltsanomalie (GSA) durch einen über einige Jahre erhöhten Eistransport durch die Framstraße und die Barentssee ausgelöst (Häkkinen, 1993). Dem erhöhten Eisexport ging eine Reihe von Jahren mit erniedrigten Exportraten und einer Eisakkumulation im Nordpolarmeer voraus (Köberle und Gerdes, 2003). Durch die Akkumulation von Eis im Nordpolarmeer entsteht eine gewisse Verzögerung zwischen atmosphärischem Antrieb und Eisexport. In der Regel, insbesondere seit 1970, reagiert der Eisexport aber unmittelbar auf Änderungen des Winds, besonders auch in den Passagen. Bei dem letzten großen Eisexportereignis spielte die Eisdicke keine Rolle (Vinje, 1998) während die großen Eisexporte am Ende der 1960er Jahre anomal dickes Eis durch die Framstraße befördert haben (Köberle und Gerdes, 2003). Daher besteht hinsichtlich der Eisexporte nur ein sehr beschränktes Vorhersagepotential.

Nach der GSA gab es im subpolaren Atlantik zwei weitere Salzgehaltsminima in den 1980er und 1990er Jahren (Belkin et al., 1998), die zunächst auf lokale Prozesse in der Labradorsee (Belkin, 2004) oder Änderungen im Transport des Subpolarwirbels (Häkkinen, 2002) zurückgeführt wurden. Karcher et al. (2005) zeigten aber in einer Verbindung von Modellergebnissen und Beobachtungen entlang der kanadischen und grönländischen Küste, dass die Aussüßung in den 1990er Jahren als Folge eines erhöhten Transports von flüssigem Süßwasser aus dem Nordpolarmeer angesehen werden muss. Ferner zeigten sie, dass dem Süßwasserexport eine Umverteilung des Salzgehalts in der Halokline des Nordpolarmeers vorausgeht. Beim flüssigen Süßwasser gibt es, wie beim Eis, eine unmittelbare Antwort des Transports auf Änderungen des atmosphärischen Antriebs, die durch Änderungen der Schichtdicke des polaren Wassers und damit des geostrophischen Transports in der Framstraße zustande kommt. Daneben scheint die Versorgung der Passagen mit großen Mengen polaren Wassers von großer Bedeutung zu sein. Damit erlangen die Speicherung von Süßwasser in der Halokline und Umverteilungen von Salz innerhalb des Nordpolarmeers eine große Bedeutung für die Exportraten. Diese Prozesse besitzen Zeitskalen von mehreren Jahren bis Jahrzehnten und beinhalten damit ein Vorhersagepotential. Dieses Potential sollte in diesem Projekt genauer bestimmt werden und auf die Verteilung der Exporte auf verschiedene Passagen ausgebaut werden. Die Verzögerung des flüssigen Süßwassertransports gegenüber dem Eistransport betrug beim erhöhten Transport der 1990er Jahre zwischen drei und fünf Jahren.

Literatur

- Aagaard, K. and E. C. Carmack (1989), The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation, *Journal of Geophysical Research*, 94 (C10), 14,485-14,498.
- Belkin, I. M. (2004), Propagation of the "Great Salinity Anomaly" of the 1990s around the northern North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L08306, doi:10.1029/2003GL019334.

Belkin, I. M., S. Levitus, J. Antonov, and S. A. Malmberg (1998), "Great Salinity Anomalies" in the North Atlantic, *Prog. Oceanogr.*, 41, 1– 68.

Brauch, J.P., and R. Gerdes, 2005: Reaction of the northern North Atlantic and Arctic oceans to a sudden change of the NAO, *J.Geophys.Res.*, 110, C11018, doi:10.1029/2004JC002436

Falck, E., G. Kattner, and G. Budéus (2005), Disappearance of Pacific Water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 32(14, L14619), 10.1029/2005GL023400.

Gerdes, R., M. J. Karcher, F. Kauker, and U. Schauer (2003), Causes and development of repeated Arctic Ocean warming events, *Geophys. Res. Lett.*, 30(19), 1980, doi:10.1029/2003GL018080.

Haak, H., J. Jungclauss, U. Mikolajewicz, and M. Latif (2003), Formation and propagation of great salinity anomalies, *Geophys. Res. Lett.*, 30(9), 1473, doi:10.1029/2003GL017065.

Häkkinen, S. (1993), An Arctic source for the Great Salinity Anomaly: A simulation of the Arctic ice ocean system for 1955–1975, *J. Geophys.Res.*, 98, 16,397– 16,410.

Häkkinen, S. (1999), A simulation of thermohaline effects of a great salinity anomaly, *J. Clim.*, 12, 1781– 1795.

Häkkinen, S. (2002), Freshening of the Labrador Sea surface waters in the 1990s: Another great salinity anomaly?, *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2232, doi:10.1029/2002GL015243.

Häkkinen, S., and A. Proshutinsky (2004), Freshwater content variability in the Arctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 109, C03051, doi:10.1029/2003JC001940.

Karcher, M. J., R. Gerdes, F. Kauker, and C. Köberle (2003), Arctic warming-evolution and spreading of the 1990s warm event in the Nordic seas and the Arctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 108(C2), 3034, doi:10.1029/2001JC001265.

Karcher, M., Gerdes, R., Kauker, F., Köberle, C., Yashayev, I.(2005). Arctic Ocean change heralds North Atlantic freshening, *Geophysical research letters*, Vol.32, No21, L21606 .DOI: 10.1029/2005GL023861

Köberle, C., and R. Gerdes (2003), Mechanisms determining the variability of Arctic sea ice conditions and export, *J. Clim.*, 16, 2842– 2858.

Peterson, B., R. Holmes, J. McClelland, C. Vorosmarty, R. Lammers, A. Shiklomanov, I. Shiklomanov, and S. Rahmstorf (2002), Increasing river discharge to the Arctic Ocean, *Science*, 298(5601), 2171-2173.

Steele, M., J. Morison, W. Ermold, I. Rigor, M. Ortmeyer, and K. Shimada (2004), Circulation of summer Pacific halocline water in the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 109, No. C02027 FEB 26.

Vinje, T. (2001), Fram Strait ice fluxes and atmospheric circulation, 1950– 2000, *J. Clim.*, 14, 3508–3517.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Feldarbeiten in AP1.3 fanden im Rahmen des internationalen Kooperationsprojekts iAOOS (International Arctic Ocean Observing System) zum Internationalen Polarjahr 2007/2008 statt. Insbesondere wurden die Messungen mit denjenigen von John Toole (WHOI), Takashi Kikuchi (JAMSTEC) und aus dem EU-Projekt DAMOCLES finanziert. Die Tracer-Messungen (dO18) in der Framstraße wurden in Kooperation mit den Programmen GEOTRACES und ASOF durchgeführt. Das Verankerungsarray in der Framstraße wird mit dem Norwegian Polar Institute (NPI) durchgeführt.

Auch die modellierenden Aktivitäten des AP 1.3 waren in Bezug auf die Ausführung als auch die Interpretation eng mit Arbeiten des EU-Projektes DAMOCLES verknüpft. Darüber hinaus fanden sie beträchtliche Bereicherung durch die Anbindung an das International Arctic Ocean Model Intercomparison Project (AOMIP). Dies gilt insbesondere für die Simulation der dekadischen Variation des arktischen Süßwasserhaushaltes.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Vergleich zu Zielsetzung

Die Zuwendungen wurden verwendet zur Finanzierung der Wissenschaftlerstellen für

- Dr. Benjamin Rabe, angestellt von 23. 10. 2006 bis 31.7.2009,
- Dr. Agnieszka Beszczynska-Möller, angestellt von 1. Bis 31. 7. 2009,
- Dr. Elena Sokolova, angestellt von 15.10.2006 bis 31.7.2009,

sowie für einen Unterauftrag an Fa. O.A.Sys GmbH 'Model Intercomparison NAOSIM – MITgcm 0.25 degree versions' (18.12.2007) sowie für folgende Reisen:

Inlandsreisen:

- DAMOCLES General Assembly in Bremen, November 2006 (Rabe)
- BMBF NA Statusseminar in Kiel, Januar 2007 (Gerdes, Köberle, Rabe, Sokolova)
- BMBF NA Steuergruppentreffen, November 2007 (Schauer)
- BMBF NA Statusseminar in Hamburg, Februar 2008 (Gerdes, Rabe, Schauer, Sokolova)

Auslandsreisen:

- European Geophysical Union General Assembly in Wien, April 2008 (Schauer, Gerdes)
- DAMOCLES General Assembly in Sopot/Polen, November, 2008 (Rabe)
- DAMOCLES General Assembly in Oslo, November, 2007 (Rabe)
- Workshop on Numerical Methods in Ocean Models in Bergen, Norway, 2007 (Köberle)

Folgende Studien wurden unternommen:

Zu (A): Aus Messdaten und Modellsimulationen wurde der Export von Süßwasser aus der Arktis über die westliche Framstraße für die Jahre 1998, 2004 und 2005 analysiert. Dabei wurden die Komponenten Flusseintrag/Niederschlag (meteorisches Wasser) und Meereisschmelze durch die Messung von Sauerstoffisotopen unterschieden.

Zur Berechnung von Transporten der Süßwasseranteile wurden das Inversmodell FEMSECT (Losch et al., 2005) angepasst und aus Geschwindigkeitsdaten aus dem Verankerungsarray, schiffsbasierten ADCP-Messungen und Geostrophie aus CTD-Profilen wurden die Volumentransporte in den oberen 400 m der westlichen Framstraße berechnet.

Es zeigte sich, dass die Mengen an meteorischem Wasser und salzangereichertem Wasser aus Eisformation in 2005 höher waren als in 1998, was zu einem fast gleichbleibenden Süßwassertransport geführt hat (Abb. 1) (Rabe et al., 2009). Der relativ zu 1998 erhöhte Gehalt an meteorischem Wasser in der Framstraße in 2004 und 2005 konnte auch in einer NAOSIM-Simulation identifiziert werden. Die Ursache war ein temporärer Rückhalt von Flusswasser auf den sibirischen Schelfen am Anfang der 1990er, das Anfang der 2000er Jahre durch die zentrale Arktis in die Framstraße und das Kanadische Archipel advehiert wurde. Diese Zirkulationsänderungen können mit Änderungen der Zirkulation in der Atmosphäre in den letzten zwei Jahrzehnten in Zusammenhang gebracht werden (siehe Punkt I., 4.). Weitere Messungen und die Entnahme von Sauerstoffisotopenproben wurden im Juli 2008 durchgeführt und sind in Bearbeitung.

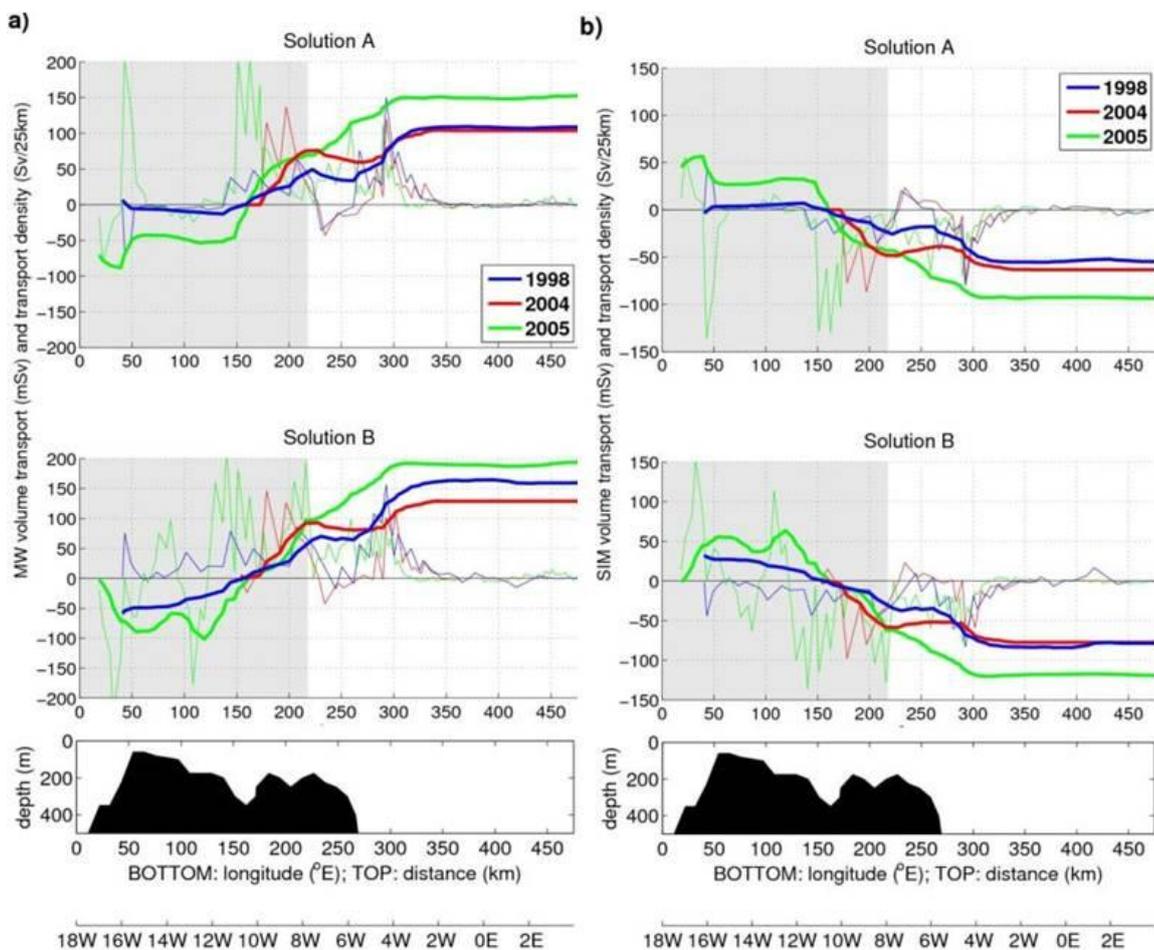
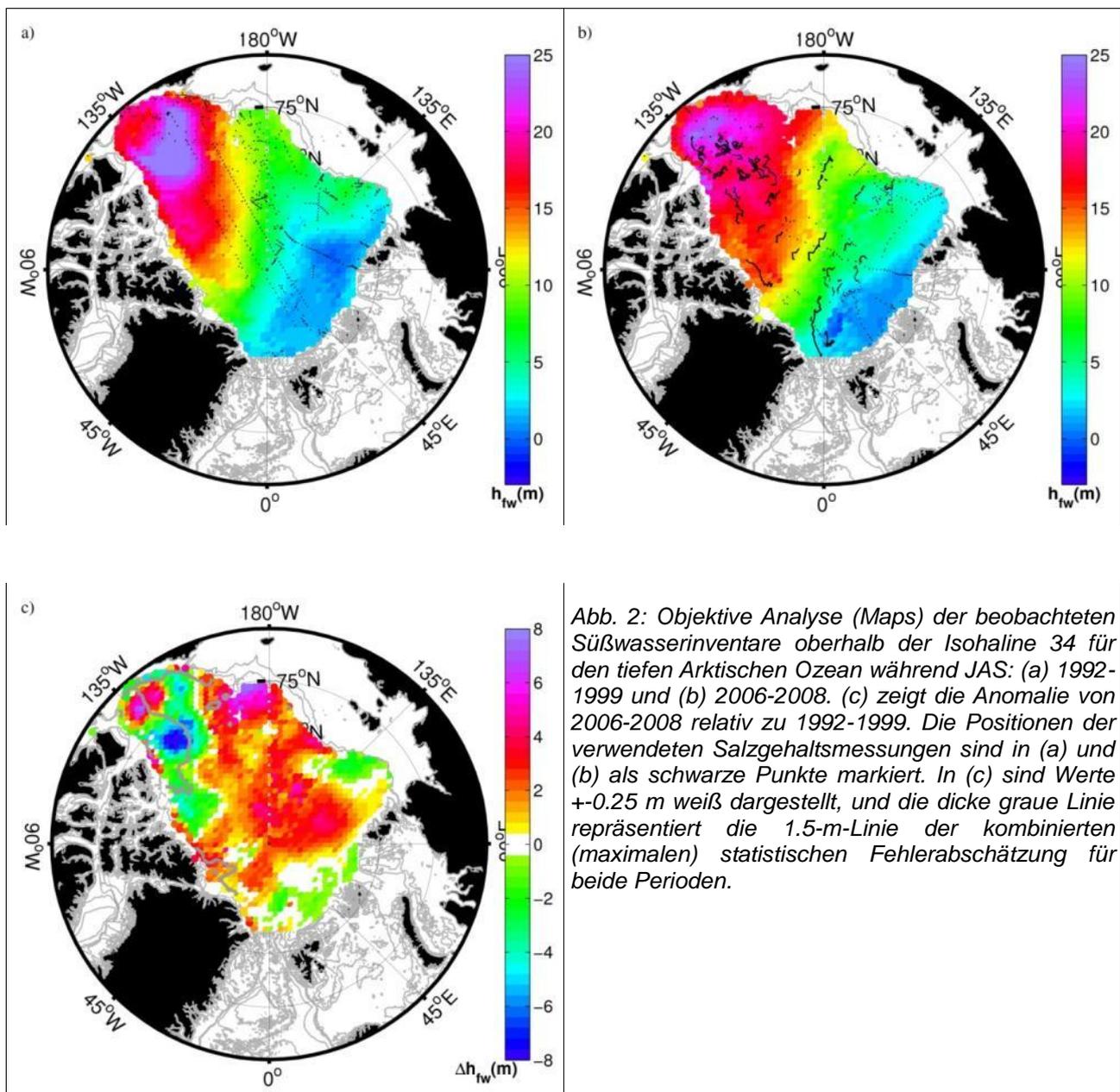


Abb. 1 : Meridionale Volumentransporte von MW (a) und SIM/IFB (b) entlang der Framstraße westlich von 4°E für 2004 (rot), 2005 (grün) und 1998 (blau). Südwardige Transporte sind positiv, dünne Linien repräsentieren Transporte über 25 km breite Segmente (Transportdichte), und dicke Linien zeigen die kumulativen Transporte von 10.6°W nach beiden Enden des Schnittes hin. Ergebnisse der FEMSECT Lösungen A und B sind im oberen und mittleren Teil der Abbildung gezeigt. Der Teil des Schnittes, der nicht in allen Jahren von Verankerungsmessungen abgedeckt war, ist grau schattiert (in 1998 lag die westlichste Verankerung um 7°W). Der untere Teil der Abbildung zeigt die Topographie entlang des Schnittes basierend auf der IBCAO Datenbank.

Zu (B) wurde Verteilung des Süßwassergehalts im oberen Teil des tiefen Arktischen Ozeans anhand von Daten der 1990er Jahre und neu gewonnenen Messungen aus dem IPY analysiert und miteinander verglichen (Abb. 2). Diese Analyse wurde insbesondere durch die quasi-synoptische hydrographische Aufnahme des tiefen Arktischen Ozeans durch international koordinierte Schiffsexpeditionen und die Erweiterung um autonom messende Plattformen (ITPs) während IPY ermöglicht. ITPs stellen in begrenztem Umfang erstmalig eine Möglichkeit dar, das fast weltweite ARGO-Programm auch auf den eisbedeckten Ozean auszudehnen. Der Vergleich ergab eine Erhöhung des Süßwassergehalts um mehr als 3000 km^3 von 1992-1999 zu 2006-2008. Die Ergebnisse wurden u.a. in Kombination mit Output einer $\frac{1}{4}^\circ$ horizontal aufgelösten NAOSIM Simulation analysiert (Rabe et al., 2010).

Zu (C): Die ITACs erlaubten erstmalig direkte Strömungsmessungen der Deckschicht relativ zum Eis in verschiedenen Driftsituationen des Meereises und ermöglichten entsprechende Parametrisierungen des Eis/Ozean-Modells. Zunächst wurden die Positions- und Geschwindigkeitsdaten in absolute Geschwindigkeiten umgerechnet und geeignete Mittelungsverfahren erarbeitet (Abb. 3). Die oberflächennahe Strömung und Eisdrift verliefen fast parallel entlang von Fronten in Temperatur und Salzgehalt (Abb. 4). Die Daten des zweiten, in 2008 ausgebrachten, ITAC beschränken sich aufgrund des Geräteausfalls auf 9 Tage und sind somit nur begrenzt auswertbar.

Zu D) wurde das gekoppelte regionale Eis/Ozeanmodell NAOSIM verwendet um im Zeitraum 1948 bis 2004 die Ausbreitung von meteorischem Süßwasser mittels des Sauerstoffisotopenverhältnisses $\delta^{18}\text{O}$ zu verfolgen



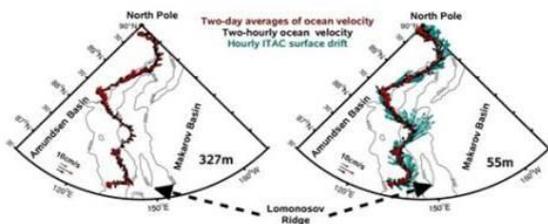


Abb. 3: ITAC-Geschwindigkeit auf 327m (links) und 55m (rechts) vom 15. Sep. bis 4. Nov. 2007. Maßstabsvektoren sind 10cm/s. Die Vektoren repräsentieren stündliche ITAC-Drift (cyan) und zweistündliche Mittel der Ozeangeschwindigkeiten (schwarz). Zweitäges-Mittel der Ozeangeschwindigkeiten (rot) sind auch dargestellt. Das ITAC driftet auf der gleichen Eisscholle wie das ITP#12.

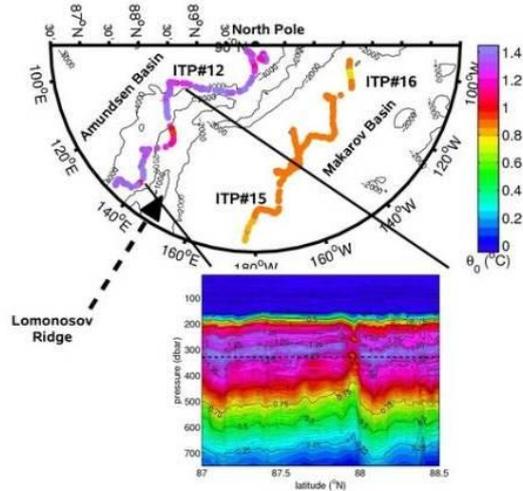


Abb. 4: Potentielle Temperatur (°C) bei 330m von drei ITPs. Der Schnitt aus Profilen des ITP#12 von 87° bis 88.5°N ist darunter gezeigt.

(siehe auch zu A). Dieses ist im Nordpolarmeer ein ausgezeichneter Indikator für die meteorische Süßwasserkomponente. Neben der Heranziehung der $\delta^{18}\text{O}$ -Simulation zur Interpretation der gemessenen meteorischen Anteile im Süßwasserelexport durch

die Framstraße wurde ein besseres Verständnis von Ausbreitung, Speicherung und Freisetzung von meteorischem Wasser im Nordpolarmeer erreicht. Entgegen der klassischen Vorstellung, im Wesentlichen gewonnen aus hydrographischen Klimatologien, hat sich die Transpolar drift als ein instationärer und zeitweilig unterbrochener Transportpfad für Flusswasser von den Schelfen hin zur Framstrasse gezeigt. Ein starkes Mäandrieren und zeitweiliges Abreißen der Transpolar drift macht die Problematik der Erfassung durch sporadische Messungen deutlich. In den frühen 90er Jahren brach die Transpolar drift zeitweise ab und das Flusswasser wurde in die ostsibirischen Schelfgebiete verfrachtet. Die Re-Etablierung der Transpolar drift in den 2000ern zeigt das Potential für großskalige Veränderungen der Ausbreitungspfade und letztlich der Kommunikation mit dem Nordatlantik (Abb 5). Die aufgezeigten Veränderungen sind konsistent mit den vorhandenen Messungen (Karcher et al., 2006).

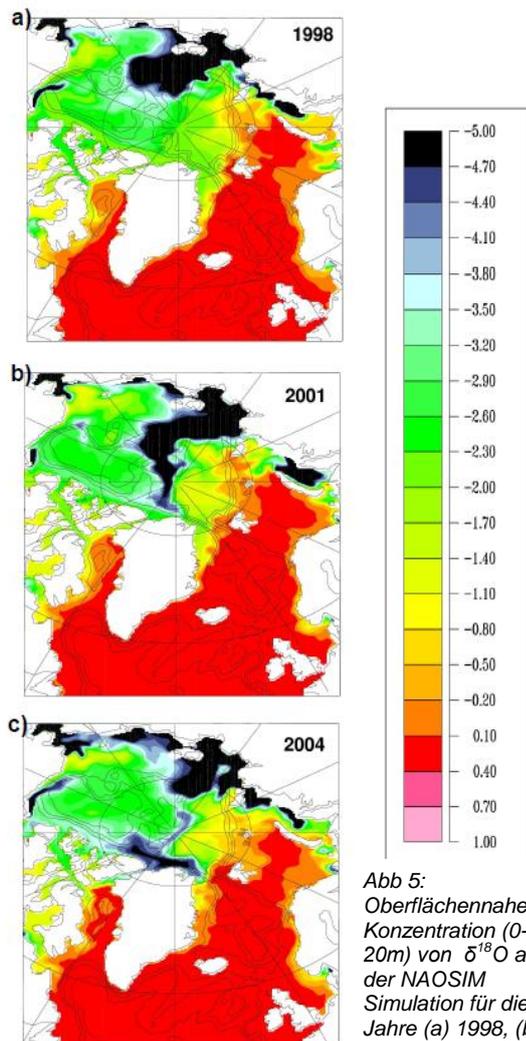


Abb 5: Oberflächennahe Konzentration (0-20m) von $\delta^{18}\text{O}$ aus der NAOSIM Simulation für die Jahre (a) 1998, (b) 2001 und (c) 2004

NAOSIM-Experimente mit unterschiedlichen Antrieben NCEP (Kalnay et al., 1996) bzw. CORE (Common Ocean-ice Reference Experiment) (Large and Yaeger, 2004) sowie topographischen Konfigurationen (Auflösung, Durchströmung der Beringstrasse) wurden durchgeführt. Eine Analyse des Süßwassergehaltes im gesamten Simulationszeitraum des NCEP Experimentes von 1948 bis in die 2000er Jahre zeigt, dass Phasen von Speicherung (Zunahme) und Verlust (Export) mit Zeiten dominant antizyklonaler, bzw. zyklonaler Drehrichtung des Stresses an der Meeresoberfläche assoziiert sind (Abb. 6). Diese werden i.W. durch den Windstress erzeugt und durch interne Stresse des Meereises moduliert. Die starke Zunahme des Süßwassergehaltes in den letzten Jahren geht auf ein außergewöhnlich starkes antizyklonales Windfeld seit 2005 zurück. Im Rahmen eines Vergleiches der aus Messungen (siehe

zu B) und dem NAOSIM Experiment (NCEP Antrieb) gewonnenen Änderung des Süßwassergehaltes zwischen 1992-99 und 2006-2008 wurde das Gebiet zwischen Chukchi Plateau und Lomonosowrücken als wichtig identifiziert (Abb. 7). Sowohl in den Messungen als auch in der Modellsimulation fanden hier die größten Veränderungen statt. Hintergrund hierfür sind die oben erwähnte Verlagerungen der Transpolardrift, welche die zwischen dem von Süßwasser und Pazifikwasser dominierten Bereich und dem von Atlantikwasser dominierten Bereich darstellt. Dies bedeutet dass entgegen herkömmlicher Sichtweise die Erfassung des Beaufort Wirbels im Kanadischen Becken nicht ausreicht um die wesentlichen Veränderungen des nordpolaren Süßwassergehaltes zu dokumentieren (Rabe et al., 2010).

Die Modellvergleichsexperimente von NAOSIM mit unterschiedlichen Antriebsdatensätzen (NCEP vs. CORE) haben eine große Sensitivität der Zirkulation des Atlantischen Wassers aufgezeigt. Diese ist im Kanadischen Becken besonders groß und hat damit auch Bedeutung für die dortige Süßwasserspeicherung. Die für den Export von Süßwasser wichtige Transpolardrift ist im Falle des CORE Antriebes deutlich schwächer ausgeprägt als im Falle des NCEP Antriebes. Die große Sensitivität geht auf die unterschiedlichen Oberflächenflüsse, wie sie durch die beiden Antriebsdatensätze hervorgerufen werden, zurück. Dieses Ergebnis ist konsistent mit einer Studie die im Rahmen des AOMIP Modellvergleichsprojektes durchgeführt wurde (Karcher et al., 2007). Im Vergleich mit Beobachtungen zeichnen sich NCEP angetriebene Experimente durch realitätsnähere Ergebnisse aus als die mit CORE angetriebenen.

Vergleiche der Modelle NAOSIM und NAOSIMit bei Verwendung des gleichen Anfangszustandes, gleicher Konfiguration und gleichen Antriebes, zeigten erhebliche Differenzen. Insbesondere weist NAOSIMit einen erheblich stärkeren Einstrom atlantischen Wassers in die Arktis auf, mit Konsequenzen für den Salz- und Temperaturhaushalt des Nordpolarmeeres. Dies geht auf unterschiedliche Ausprägungen der saisonalen Zyklen der SST, vor allem entlang des Pfades des Nordatlantikstromes, zurück. Insbesondere findet die Erwärmung im Frühjahr deutlich schneller und die Abkühlung im Herbst deutlich langsamer statt. Hier sind weitere Arbeiten zur Untersuchung der jeweiligen Formulierungen der Oberflächenflüsse notwendig.

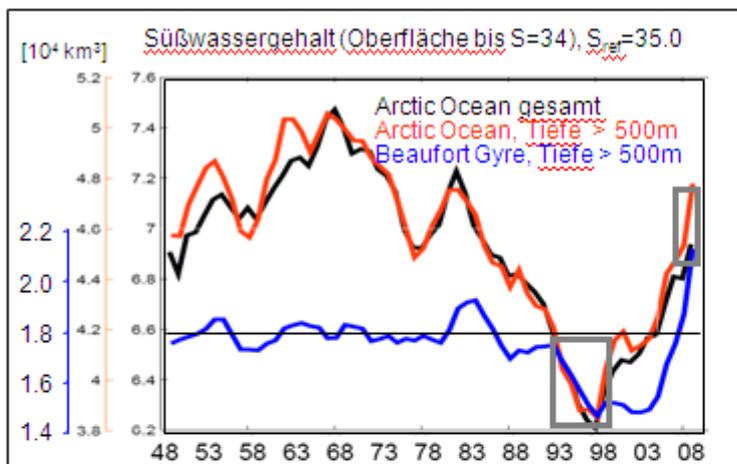


Abb 6: Der Verlust des Süßwassergehaltes des Nordpolarmeeres von den 1960er bis in die 1990er Jahre findet i.W. außerhalb des Beaufort-Wirbels statt. Der starke Wiederanstieg des FWC bis 2008 hingegen geschah sowohl im Beaufort-Wirbel, als auch in anderen Gebieten des Nordpolarmeeres. Die grauen Boxen zeigen die Phasen 1992-99 und 2006-08, die für den Vergleich mit den Beobachtungsdaten relevant sind.

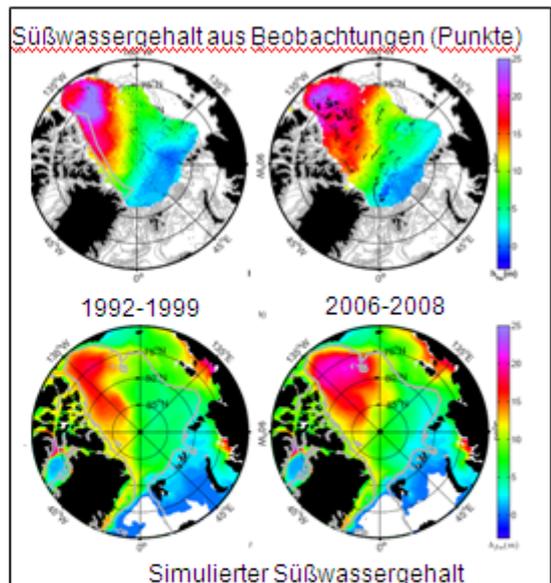


Abb. 7: Beobachteter und simulierter Süßwassergehalt in 1992-99 und 2006-08. Beide zeigen den größten Zuwachs in der Chukchi Sea und im Makarovbecken. Unterschiede weisen sowohl auf lückenhafte Beobachtungsdaten, als auch auf Modelldefizite hin. (Rabe et al., 2010)

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis kann in einem separat von der Haushaltsabteilung des AWI übermittelten Dokument eingesehen werden und ist daher hier nicht nochmals aufgeführt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleisteten Beobachtungen und Modellsimulationen tragen zum Systemverständnis, insbesondere der großskaligen Wechselwirkung zwischen Atlantik, Europäischem Nordmeer und Nordpolarmeer, bei. Die Beobachtungen liefern quantitative Korrekture für die Modellsimulationen. Die Modellsimulationen erlauben die Zusammenhänge auf der großen räumlichen Skala zu verknüpfen.

4. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans

Die Arbeiten im AP1.3 sind der Grundlagenforschung zuzuordnen. Die Verwertbarkeit der Daten und Produkte betrifft die nicht-kommerzielle Nutzung durch die internationale Klimaforschung. Die Messdaten wurden an frei verfügbare Datenbanken gegeben und sind über das Internet abrufbar (<http://www.pangaea.de/> und <http://www.who.edu/itp/data/>).

Das Projekt leistete einen Beitrag zum Aufbau eines Systems, das ozeanische Entwicklungen in einer für den europäischen Raum besonders relevanten Meeresregion mit langer Vorlaufzeit quantitativ vorhersagen soll. Der im Zentrum des Projekts stehende Süßwasserexport aus dem Nordpolarmeer kann zu erheblichen Verlagerungen der Halokline im nördlichen Nordatlantik führen und damit die großräumigen Wirbel und die Umwälzbewegung im Nordatlantik stark beeinflussen. Diese Zirkulationsänderungen gehen mit Änderungen des Wasserstandes entlang der Europäischen Küsten einher. So verursacht allein die Abschwächung der großräumigen Umwälzbewegung im Atlantik um 50% im Modell von Gerdes et al. (2006) eine Wasserstandserhöhung von 40 cm entlang der norwegischen Küste und 25 cm an der Nordseeküste. Die Ergebnisse von AP1.3 können nun dafür verwendet werden, dieses Risiko anhand historischer Daten und Simulationen von Zukunftsszenarien quantitativ abzuschätzen. Darüber hinaus ist vorgesehen, eine mehrjährige Vorhersagekapazität für Änderungen des Wasserstandes aufgrund von interannuellen Schwankungen des Süßwasserexports aufzubauen.

Die aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse stehen wie folgt zur Verfügung:

Publikation in begutachteten Zeitschriften (siehe Punkt II., 6.),

Bereitstellung von Validationsdatensätzen für andere Teilnehmer des Verbunds und für die internationale Arktis- und Klimaforschung im nationalen Datenzentrum und in internationalen Daten-Management-Projekten (CLIC, DAMOCLES, IPY),

Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen (siehe Punkt II. 6.),

Nutzung für die Lehre an der Hochschule Bremerhaven und an anderen Hochschulen.

5. Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden einige Studien zu Veränderungen im Süßwassergehalt in der Arktis und Süßwasserkomponenten in der Framstraße veröffentlicht, die sich jedoch durch die Datenabdeckung, Zeitskala, regionale Abgrenzung der Änderungen und den Schlussfolgerungen wesentlich von unseren Arbeiten unterscheiden.

6. Veröffentlichungen

Bereits veröffentlichte oder eingereichte begutachtete Artikel:

B. Rabe, A. Mackensen, U. Schauer, M. Karcher, E. Hansen, A. Beszczynska-Moeller (2009a), „Freshwater components and transports in the FRAM Strait: recent observations and changes since the late 1990s“, *Ocean Sci.*, 5, 219-233.

B. Rabe, M. Karcher, U. Schauer, J. Toole, R. Krishfield, S. Pisarev, F. Kauker, R. Gerdes and T. Kikuchi (2010), „An assessment of pan-Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the IPY period“, *Deep-Sea-Research Part I*, eingereicht und in Revision.

Gerdes, R., Karcher, M., Köberle, C., Fieg, K. (2008). Simulating the long term variability of liquid freshwater export from the Arctic Ocean, *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate*, Editors: B. Dickson, J. Meincke and P. Rhines, Springer, 405-425.

Karcher, M., Beszczynska-Möller, A., Kauker, F., Gerdes, R., Heyen, S., Rudels, B., Schauer, U. (2009). Weakening of Denmark Strait Overflow as a Consequence of Arctic Ocean Warming, *JGR*, eingereicht

Kauker, F., Köberle, C., Gerdes, R., Karcher, M. (2008). Modeling the 20th century Arctic Ocean/Sea Ice system: Reconstruction of surface forcing, *Journal of Geophysical Research*, 113, C09027. doi:[10.1029/2006JC004023](https://doi.org/10.1029/2006JC004023)

Weitere relevante Artikel aus der Arbeitsgruppe:

de Steur, L., Hansen, E., Gerdes, R., Karcher, M., Fahrbach, E., Holfort, J. (2009). Freshwater Fluxes in the East Greenland Current: A decade of observations, *Geophysical Research Letters*, 36, L23611. doi: [10.1029/2009GL041278](https://doi.org/10.1029/2009GL041278)

Losch, M., Sidorenko, D., and Beszczynska-Möller, A. (2005). FEMSECT: An inverse section model based on the finite element method, *J. Geophys. Res.*, 110, C12023, doi:[10.1029/2005JC002910](https://doi.org/10.1029/2005JC002910).

Karcher, M., Kauker, F., Gerdes, R., Hunke, E., Zhang, J. (2007). On the Dynamics of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean, *Journal of geophysical research-oceans*, 112, C04S02.doi:10.1029/2006JC003630

Kauker, F., Gerdes, R., Karcher, M., Kaminski, Gieringc, R., Vossbeck, M., (2009). Arctic Sea Ice in summer 2009 - an outlook, *Sea Ice Outlook: monthly reports*. http://www.arcus.org/search/seaiceoutlook/2009_outlook

Kauker, F., Gerdes, R., Karcher, M. (2008). Arctic Sea Ice in summer 2008 - an outlook, *Sea Ice Outlook: monthly reports*.

Dorn, W., Dethloff, K., Rinke, A., Frickenhaus, S., Gerdes, R., Karcher, M., Kauker, F. (2006). Sea-ice simulations with AWI's coupled regional atmosphere-ocean-ice model HIRHAM-NAOSIM, in: *Global Implications of Arctic Climate Processes and Feedbacks* (edited by A. Rinke and K. Dethloff), *Reports on Polar and Marine Research*, Vol. 520, p. 41-44.

Karcher, M., Gerdes, R., Kauker, F. (2006). Modeling of $\delta^{18}\text{O}$ and ^{99}Tc dispersion in Arctic and subarctic seas, *ASOF Newsletter*, Issue No 5, April 2006.

Richter-Menge, J., Overland, J., Proshutinsky, A., Romanovsky, V., Bengtsson, L., Brigham, L., Dyurgerov, M., Gascard, J. C., Gerland, S., Graverson, R., Haas, C., Karcher, M., Kuhry, P., Maslanik, J., Melling, H., Maslowski, W., Morison, J., Perovich, D., Przybylak, R., Rachold, V., Rogor, I., Shiklomanov, A., Stroeve, J., Walker, D., Walsh, J. (2006). *State of the Arctic Report*. NOAA OAR Special Report, NOAA/OAR/PMEL, Seattle, WA, 36.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel AP3.1: Physikalische und biogeochemische Zustandsänderungen im Nordatlantik, Wechselwirkungen mit den nordwesteuropäischen Schelfgebieten und Auswirkungen auf die Nordsee AP4.2 Initialisierung eines globalen Klimamodells aus ozeanische Reanalysen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Ernst Maier-Reimer Prof. Dr. Jochem Marotzke Dr. Johann Jungclaus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2009	
	6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2010	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Max Planck Institut für Meteorologie Bundesstrasse 53 20146 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen *) 03F0443E	
	11. Seitenzahl 10	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Ein regional gekoppeltes Ozean/Atmosphäre-Modell MPIOM/HAMOCC/REMO, bestehend aus einem formal globalen Ozean/Meereis/Biogeochemiemodell mit deutlich erhöhter Auflösung im nördlichen Nordatlantik und dem europäischen Nordmeer und maximaler Auflösung an den deutschen Küsten ist fertiggestellt worden. Das regional Atmosphärenmodell REMO ist im Interessensgebiet (Nordatlantik, Nordsee) gekoppelt. Mit dem Modell wurden Simulationen für die Jahre 1958 bis 2002 durchgeführt. An den Rändern des Modellgebiets wurden dabei sechsstündige Randwerte aus den ERA-40 Reanalysen vorgeschrieben. Der Einfluss von Gezeiten auf die mittlere Zirkulation im Nordatlantik und den nordwesteuropäischen Schelfbereich wurde untersucht, indem sowohl Simulationen unter Einschluss des vollen lunisolaren Gezeitenpotential als auch ohne durchgeführt wurden. Weitere Untersuchungen widmeten sich den Austauschprozessen von Wasser und Nährstoffen zwischen der Nordsee und dem Nordatlantik. Wichtige gezeitenbedingte Effekte auf dynamische ozeanographische Prozesse sind u.a. die Verstärkung der vertikalen Durchmischung einhergehend mit einer deutlichen Absenkung der Meeresoberflächentemperatur sowie intensiviertere Bodenströmungen in der küstennahen Nordsee und im Ärmelkanal. Teilprojekt 4.2 hatte zum Ziel, die Vorhersagefähigkeit des globalen Klimamodells ECHAM5/MPIOM dadurch zu verbessern, indem der Ozean durch Daten initialisiert wird, die den Verlauf der Klimaentwicklung beinhalten. Dabei wurden zwei verschiedene Methoden analysiert und verglichen. Zunächst wurden Temperatur- und Salzdaten aus dem Syntheseprodukt GECCO (Teilprojekt 4.1) verwendet. Für den Nordatlantik wurden gegenüber Persistenz- bzw. Trendvorhersage Verbesserungen der Vorhersage für jährliche, 5-jährige, und 10-jährige Mittelungsperioden erreicht. Als alternativer Ansatz wurde ein Temperatur- und Salzdatensatz für die Zeit 1948-2007 mit dem MPIOM Ozeanmodell unter Verwendung atmosphärischer Antriebsfelder aus Reanalysen (NCEP) erstellt. Diese Methode bietet den Vorteil, dass die Initialisierungsdaten mit demselben dynamischen Modell erzeugt werden, mit dem die Assimilation- und Vorhersageexperimente durchgeführt werden..		
19. Schlagwörter Dekadische Klimavorhersagen, Ozeaninitialisierung, Vorhersagbarkeit, Einfluss der Gezeiten, CO ₂ Aufnahme der Nordsee, Austauschprozesse mit dem Nordatlantik		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title NORTHATLANTIC. AP 3.1: Physical and biogeochemical Changes in the Northatlantic, Interaction with northwest european shelf areas and impacts on the Northsea. AP 4.2Initialization of a global climate model from oceanic reanalysis data	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Ernst- Maier-Reimer Prof. Dr. Jochem Marotzke Dr. Johann Jungclaus	5. end of project 31.10.2009
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Max Planck Institute for Meteorology Bundesstrasse 53 20146 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0443E
	11. no. of pages 10
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract A regionally coupled Ocean/Atmosphere-Model MPIOM/HAMOCC/REMO consisting of a formally global ocean/sea ice/biogeochemistry model with increased resolution in the northern North Atlantic and maximal resolution in the northwest european shelf areas and at the german coast has been build-up. Simulations have been carried out for the time period between 1948 and 2002. Six-hourly boundary fields taken from the ERA reanalysis data were prescribed at the sidewalls of the regional atmosphere model component REMO. The influence of tides on the mean circulation in the North Atlantic and on the northwest european shelf areas has been investigated by conducting model experiments including tidal forcing and without. Further investigations were focused on exchange processes of water and nutrients between the North Sea and the adjacent North Atlantic. Important tidal effects on hydrodynamic Processes in the ocean were found which force an intensification of the vertical mixing which in turn leads almost everywhere to lowered sea surface temperatures as well as stronger bottom currents near the coast of the North Sea and in the English Channel, which causes increased erosion and sediment resuspension there. The forecast skill of decadal climate predictions is investigated using two different initialization strategies. First we apply an assimilation of ocean synthesis data provided by the GECCO project (project 4.1) as initial conditions for the coupled model ECHAM5/MPI-OM. The use of the anomaly coupling scheme during the initialization avoids the main problems with drift in the climate predictions. Viewed over the time scales analyzed here (annual, 5yr and 10yr-mean), greater skill for the North Atlantic SST is obtained in the hindcast experiments than in either a damped persistence or trend forecast. We pursue an alternative approach to the representation of the observed North Atlantic climate for the period 1948-2007. Using the same MPI-OM ocean model as in the coupled system, we perform an ensemble of four NCEP integrations. The ensemble mean temperature and salinity anomalies are then nudged into the coupled model, followed by hindcast/forecast experiments. The results of the NCEP-forced approach show promising skill up to decadal time scales particularly over the extratropical North Atlantic. Potential predictability is also found in the Atlantic MOC and Nordic Seas Overflows up to about 5-6 years in advance.	
19. keywords Ocean initialization; Decadal climate prediction; AMOC and overflow predictability Influence of tides, CO ₂ uptake in the North Sea, Exchange mechanisms with the North Atlantic	

Schlussbericht

1 Teilprojekt 3.1: (Dr. Uwe Mikolajewicz, Dr. Ernst Maier-Reimer)

Aufgabenstellung

Es war vorgesehen ein regional gekoppeltes Ozean/Atmosphärenmodell, bestehend aus einem formal globalen Ozean/Meereis/Biogeochemiemodell mit deutlich erhöhter Auflösung im nördlichen Nordatlantik und max. Auflösung an den deutschen Küsten zu erstellen. Das Modell sollte dazu verwendet werden um Wechselwirkungen zwischen den nordwesteuropäischen Schelfgebieten und dem angrenzenden Atlantik zu untersuchen.

Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde am Max Planck Institut für Meteorologie durchgeführt, welches eine ausreichende Infrastruktur sowohl hinsichtlich schnell verfügbarer Teilmodelle als auch hinsichtlich vorhandener IT Ressourcen als Gesellschafter des Deutschen Klimarechenzentrums verfügt.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde gemäß der im Antrag dargelegten Planung durchgeführt.

Wissenschaftlich technischer Stand

Zu Projektbeginn existierten zahlreiche globale grob aufgelöste Klimavorhersagemodelle sowie regionale Schelfmodelle mit hoher Auflösung die operationell für Wasserstandsvorhersagen usw. betrieben werden. Aus wissenschaftlicher Sicht ergab sich daher die Notwendigkeit für ein Modell globaler Abdeckung, jedoch mit ausreichend hoher Auflösung in der Region von Interesse, d.h. die Nordsee.

Kooperationen

Intensiver fachlich-wissenschaftlicher Austausch und Zusammenarbeit bestand während der gesamten Projektlaufzeit mit dem Institut für Meereswissenschaften der Universität Hamburg sowie mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg. Daten zu Randbedingungen für den Betrieb verschiedener Regionalmodelle wurden den Kooperationspartnern bereits zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden aus Modellsimulationen erstellt die in diesem Teilprojekt durchgeführt wurden. Umgekehrt wurden ozeanographische Datensätze von den Kooperationspartnern zur Verfügung gestellt, die zur Validierung der Modellkomponenten verwendet werden konnten. Eine weitere Zusammenarbeit mit beiden Kooperationspartnern ist für die Zukunft geplant. Ferner bestand intensive Zusammenarbeit mit verschiedenen Arbeitsgruppen des MPI hinsichtlich der Modellentwicklung und Kopplung.

Wissenschaftlich technische Ergebnisse

Teil 1 Modellentwicklung und physikalische Zustandsänderungen

Das Modellsystem wurde zunächst in einer gröberen Auflösung mit formal 1.5 Grad aufgesetzt, die zum Testen und zum Optimieren der Modellparameter verwendet wurde. Für diese Modellversion wurden Simulationen mit NCEP Antrieb für die Periode 1958 bis 2007 durchgeführt. Als Beispiel aus diesen Simulationen ist hier die zeitliche Entwicklung der SST im Bereich der Nordsee in Abb. 1 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung ist dabei recht gut. Im Gegensatz zu ungekoppelten Simulationen die mit Reanalyse-/Beobachtungsdaten angetrieben werden, bei denen eine solche Übereinstimmung als Folge der vorgeschriebenen bodennahen Lufttemperatur relativ leicht erzielt werden kann, ist ein solches Resultat in einem gekoppelten Modell, keineswegs trivial, da sich auch die Atmosphäre in dem diesem Modell frei entwickeln kann.

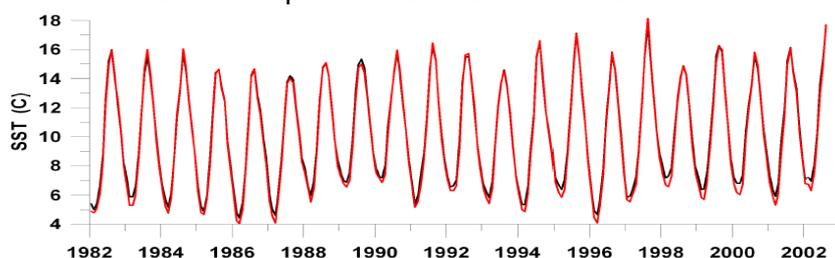


Abb. 1: Simulierte (rot) und beobachtete SST gemittelt über die Nordsee von 1982 –2002

Die über den NCEP Zeitraum simulierte Oberflächentemperatur gibt die großräumige Zirkulation im Nordatlantik gut wieder. So spiegelt sich die Hauptkomponente des nordwärtigen Wärmetransports, bestehend aus Golfstrom, Nordatlantikdrift und Norwegenstrom in starken Ost-West Temperaturgradienten der Grönland-Norwegensee wider. Entsprechend sind die Abweichungen zu Beobachtungsdaten moderat. Insbesondere im Bereich der Nordsee und der Ostsee sind nur geringe Abweichungen zu sehen. Lediglich im Bereich ozeanischer Fronten, deren genaue Lage auch einer natürlichen Variabilität unterliegt können größere Abweichung entstehen, so z.B. im Übergangsbereich Ostgrönlandstrom zu Norwegenstrom wo Wassermassen polaren und subtropischen Ursprungs aufeinandertreffen.

Durch Hinzunahme des vollen lunisolaren Gezeitenpotenzials und der damit notwendigen Reduzierung des Zeitschrittes, erhöhte sich der Gesamtrechenaufwand um ca 15 – 20% im Ozeanmodell. Die dynamische Wirkung von Gezeiten im Gebiet des Nordatlantiks führt zu einer leichten Abschwächung der Zirkulation im Inneren des Nordatlantiks und zu einer deutlichen Intensivierung der Zirkulation an der Schelfkante des nordwesteuropäischen Schelfs.

Die gezeitenbedingte Verstärkung der vertikalen Vermischung führt fast überall zu geringeren Meeresoberflächentemperaturen verglichen mit dem Lauf ohne Gezeiten (Abb. 2). Positive SST-Anomalien (bis zu 3 K) treten jedoch in der Nähe von den Amphidromien der M2 und S2 Gezeiten in der Nähe von Island und in der Mitte des Nordatlantiks auf.

Bei Tests der simulierten Gezeiten (angetrieben nur durch Vorgabe des Gezeitenpotentials) zeigte sich, dass eine relativ hohe räumliche Auflösung zur wirklichkeitsnahen Darstellung der Gezeiten benötigt wird. Daraus ergibt sich die Anforderung an einen relativ kurzen Zeitschritt (1/40 Tag), mit entsprechend langen Modellaufzeiten. Inzwischen ist auch die höheraufgelöste Version mit formal 0.6° Auflösung im Ozean (entspricht einer Auflösung im Bereich der deutschen Bucht von wenigen km) lauffähig.

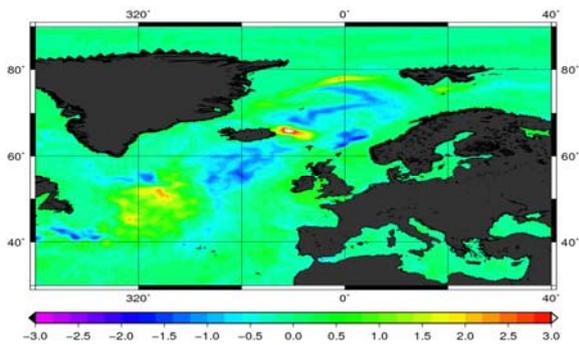


Abbildung 2: Differenz der Oberflächentemperaturen zwischen Modellläufen mit eingeschaltetem Gezeitenantrieb und ohne Gezeiten.

Ein wesentliches Ziel lag auch in der Verbesserung der Simulation des Flusswassereintrages in die Nordsee durch Verwendung des HD Modells für kontinentalen „Runoff“ in Kombination mit der dynamischen Regionalisierung der klimatologischen Randbedingungen durch das Regionalmodell REMO. Dies ist eine essentielle Voraussetzung für eine wirklichkeitsnahe Simulation der Pyknoklientiefen sowie der Verdriftung von Frischwasserfahnen im Bereich der deutschen Nordseeküste.

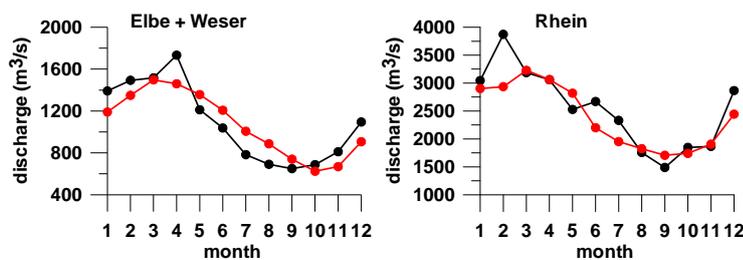


Abbildung 3: Simulierter (rot) und beobachteter Durchfluss gemittelt von 1948 bis 2006

Exemplarisch hierfür sind in Abbildung 3 Flusswassereinträge für den Rhein sowie für Elbe und Weser dargestellt. In Übereinstimmung mit Beobachtungsdaten zeigt sich der Jahresgang mit frühjährlichem Maximum und spätherbstlichem Minimum im Abfluss. Für die Flüsse Elbe und Weser sind die Abflüsse etwas zu gering in der kalten Jahreszeit bzw. etwas zu hoch während der Sommermonate. Generell liegen die modellierten Abweichung jedoch innerhalb der starken natürlichen Variabilität

Teil 2: Modellexperimente zu Biogeochemie und zu CO₂ Austauschkapazität der Nordsee.

Mit dem grob aufgelösten Modellsystem HAMOCC/MPIOM wurden Simulationen für den Zeitraum 1958 bis 2001 durchgeführt. Der Antrieb erfolgte mit ERA-Daten, welche in wiederholter Abfolge über einen Zeitraum rund 140 Jahren angewandt wurden, um das gekoppelte Modell einzuschwingen. Um die Rolle der Nordsee als Senke für atmosphärisches CO₂ zu untersuchen wurden zwei weitere Läufe aufgesetzt, wobei die atmosphärische CO₂ Konzentration einmal konstant bei 278 ppm gehalten wurde und im anderen Lauf entsprechend der tatsächlichen Entwicklung vorgeschrieben wurde.

Der Einstrom atlantischer Wässer erfolgt hauptsächlich an der nördlichen Grenze über die Schelfkante zwischen Schottland und den Orkney Inseln sowie westlich der submarinen Grabenstruktur parallel der Norwegischen Küste. Östlich davon erfolgt ein starker Export von Wassermassen zum atlantischen Becken mit dem Küstenstrom vor Norwegen. Ein zweiter

starker Einstrom erfolgt durch den Ärmelkanal der im Modell zwischen 0.1 und 0.2 Sv variiert. Dieses generelle Strömungsmuster bestimmt weitgehend die Zirkulation während des gesamten Jahres, ist jedoch am stärksten während der Wintermonate ausgeprägt. Abb. 4 zeigt den Verlauf der Brutto-Jahresmittelwerte des Wassermasseneinstromes in die Nordsee für den Zeitraum der Simulation. Die Importe über den Ärmelkanal zeigen einen relativ konstanten Einstrom mit Werten zwischen 0.2 und 0.5 Sverdrup ohne signifikanten Trend (Abb. 4, oben). Bedeutender ist der Einstrom über die nördliche Schelfkante mit Absolutwerten von z. T. über einen Sv (Abb. 4, unten). Ab etwa 1980 deutet sich ein leichter Trend zu höheren Einstromwerten an. Zudem ist über den gesamten Zeitraum ein deutlicher Zusammenhang mit der Nordatlantischen Winter-Oszillation erkennbar. Die positive Winterphase der NAO korrespondiert hierbei mit intensiviertem

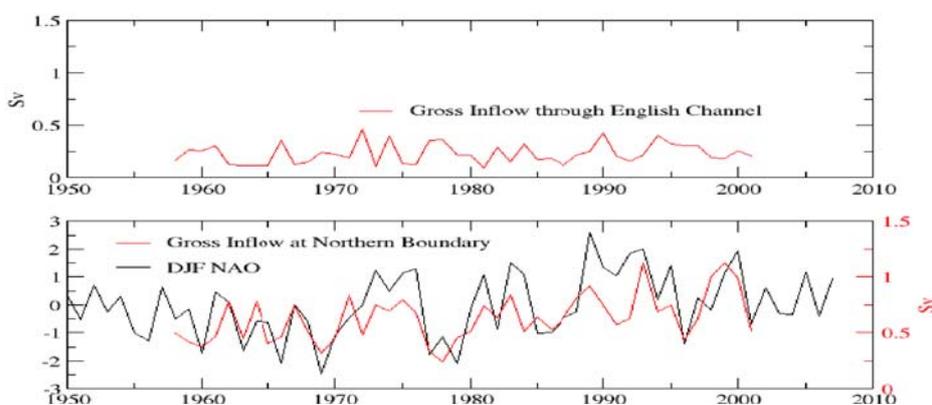


Abbildung 4: Brutto Transporte (Sv) durch den Ärmelkanal (Mittel) und über die nördliche Schelfkante in die Nordsee.

Wassermasseneinstrom über die nördliche Schelfkante, was vermutlich über stärkere lokale Westwinde gesteuert wird.

Der starke Einstrom atlantischer Wässer während der Wintermonate führt zu Nährstoffakkumulation in der nördlichen Nordsee (Abb. 5b), da die schwache Sonnenlichteinstrahlung die biologische Produktivität limitiert. Dies ändert sich jedoch im Frühling, wo die biologische Produktivität rasch ansteigt und im März/April das Jahresmaximum der Phytoplanktonkonzentration erreicht wird (Abb. 6d).

Die regionale Verteilung der Phytoplanktonkonzentration folgt dabei weitgehend der akkumulierten Nährstoffkonzentrationen (Abb 5b). Mit den Phytoplanktonblüten geht ein rascher Abbau der Nährstoffkonzentrationen einher (Abb.5c).

Die alljährliche Phytoplanktonblüte im Frühjahr ist in der nördlichen Nordsee dann weitestgehend von Nährstoffimporten aus dem Atlantik gesteuert. Dies verdeutlicht die Korrelation zwischen der durchschnittlichen Phytoplanktonkonzentration und dem Transport von Nährstoffen in die Nordsee (Abb. 6).

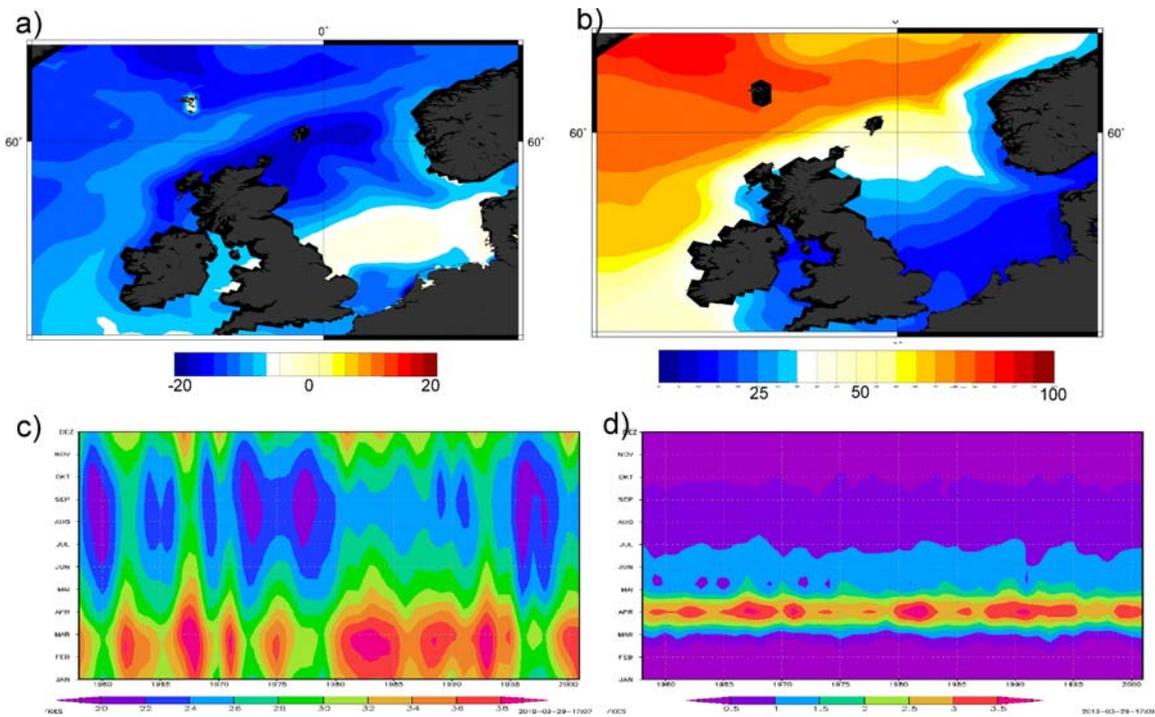


Abbildung 5: a) Jährlicher mittlerer CO_2 Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre [$1 \cdot 10^{-8} \text{ kmolC/m}^2$]. Durchschnittliche Winter-Phosphatkonzentration [$1 \cdot 10^{-8} \text{ kmolPm}^2$]. c) Jahresgang der gemittelten Phosphatkonzentration [$1 \cdot 10^{-8} \text{ kmolPm}^2$] in der Nordsee. d) wie c) jedoch für die Phytoplanktonkonzentration [$1 \cdot 10^{-8} \text{ kmolPm}^2$].

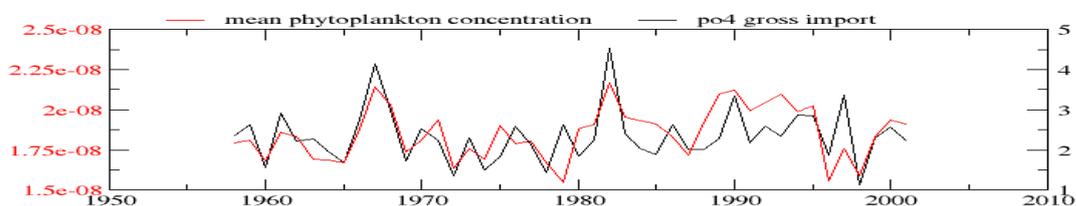


Abbildung 6: Durchschnittliche Phytoplanktonkonzentration [kmolP/m^3] gemittelt die Monate März, April und Mai sowie über das gesamte Nordseebecken (rot). Transport von Phosphat [$1 \cdot 10^{-1} \text{ kmolP/sec}$]

Auf Jahresbasis ermittelte Nährstofftransporte weisen für die Nordsee eine insgesamt positive Massenbilanz aus, d.h. es werden mehr Nährstoffe importiert als exportiert. Insgesamt lässt sich aus den Simulationen ein durchschnittlicher jährlicher Importüberschuss von rund 0.73 Megatonnen Phosphat abschätzen, welcher letztlich durch die durch den Export von organisch gebundenem Phosphat ausgeglichen wird. Entscheidend für den Importüberschuss sind die Netto-Massentransporte durch den Ärmelkanal (Abb. 7 oben), welche über den gesamten Simulationszeitraum Nettoimporte sind. Bis in die achtziger Jahre hinein ist auch hier ein Zusammenhang mit der NAO angedeutet. Dem steht eine relativ ausgeglichene Massenbilanz durch die Transporte über die Schelfkante im Norden der Nordsee gegenüber (Abb. 7, unten). Für einige Jahre errechnen sich hier auch deutliche Massentransportdefizite, so z.B. für 1959, 1972, und 1989. Negative Nährstoffimporte an der Nordgrenze konzentrieren sich auf die warme Jahreszeit. So ergibt sich für die Sommermonate JJA ein jährliches Defizit von rund 0.98 Megatonnen und für die Herbstmonate ein Defizit von immerhin 0.39 Megatonnen

Phosphor.

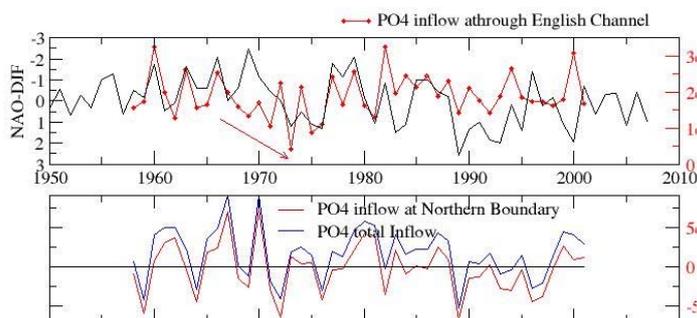


Abbildung 7: Oben: Jahresmittel-Brutto Importe [$1 \cdot 10^{-2}$ kmolP/sec] in die Nordsee über den Ärmelkanal. Unten: Brutto Importe in die Nordsee über die nördliche Schelfkante [$1 \cdot 10^{-2}$ kmolP/sec].

Ozeanische CO₂ Aufnahme

Die Nordsee fungiert als Senke für atmosphärisches CO₂ (Abb. 5a). Die regionale CO₂ Aufnahme in der Nordsee ist geprägt durch die Zentren der biologischen Produktivität. So führen importierte Nährstoffe in der südwestlichen Nordsee sowie in der nördlichen Nordsee zu lokalen Maxima in der CO₂ Aufnahme, da der marine CO₂ Partialdruck hier durch die stattfindende Photosynthese niedrig gehalten wird. In der nährstoffarmen zentralen Nordsee ist die CO₂ Aufnahme dagegen, ebenso wie die biologische Produktivität, am schwächsten. Die durchschnittliche Aufnahme von Kohlenstoff liegt bei etwa 17.5 Megatonnen pro Jahr für die gesamte Nordsee/Ostsee. Ein Trend zu höheren Flüssen ist hier nicht erkennbar, da die Nordsee flach ist, bzw. die Durchmischungszone gering bleibt und somit Gradienten im CO₂ Partialdruck relativ schnell ausgeglichen werden. Anders sieht das im globalen Maßstab aus, wo großskaliges Auftriebsgeschehen bzw. Tiefenkonvektion den Austausch mit Tiefenwässern ermöglichen und so die effektive CO₂ Aufnahmekapazität des Ozeans erhöhen. Im globalen Maßstab ist daher die CO₂ Aufnahme deutlich verzögert was zu erhöhten CO₂ Partialdruckgradienten führt und somit ein Trend zu erhöhten Netto-CO₂ Flüssen in den Ozean nach sich zieht. Demgegenüber reagieren flache mäßig bis wohl temperierte Schelfareale wie die Nordsee schnell auf veränderte atmosphärische CO₂ Konzentrationen, sofern es im Zuge des Klimawandels zu keiner signifikanten Abschwächung der biologischen Produktivität kommt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass mit fortschreitender Klimaerwärmung großskalige Umstellungen in der Nordatlantikzirkulation stattfinden werden, die nachhaltige Änderungen im Nährstoffangebot des Atlantiks nach sich ziehen und so letztlich auch die Nährstoffzufuhr und die biologische Produktivität der nordwesteuropäischen Schelfe negativ beeinflussen.

Wissenschaftlicher Fortschritt Dritter

Es ist derzeit kein wissenschaftlicher Fortschritt seitens Dritter mit größeren Schnittmengen mit TP 3.1 bekannt.

Erfolge und geplante Publikationen

D. Sein, U. Mikolajewicz, M. Gröger, and E. Maier-Reimer: European shelves ocean atmosphere circulation simulated by coupled AOGCM REMO/MPI-OM/HD. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010-9512, 2010

Matthias Gröger, Ernst Maier-Reimer, Uwe Mikolajewicz, Joachim Segsneider, and Dmitry Sein: Changes in water mass exchange between the NW shelf areas and the North Atlantic and their impact on nutrient/carbon cycling. Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010-9754 2010

D.Sein, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, J. Segsneider: Interactions between European shelves and the Atlantic simulated by coupled AOGCM REMO/MPI-OM/HAMOCC. Regional Climate modelling. Lund, 2009

Literatur

Mikolajewicz.,U., D.V.Sein, D.Jacob, T.Kahl, R.Podzun, T.Semmler (2005).Arctic sea ice variability with a coupled regional atmosphere-ocean-sea ice model Deutsche Meteorolog. Zeitschrift, 14 (6), 793-800

Marsland, S.J., H. Haak, J.H. Jungclaus, M. Latif und F. Röske, 2003: The Max- Planck- Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. Ocean Modelling, 5, 91-127.

E. Maier-Reimer, I. Kriest, J. Segsneider, P. Wetzel (2005): The Hamburg Ocean Carbon Cycle Model Hamocc 5.1, Technical Description Release 1.1. Berichte zur Erdsystemforschung, 14, 2005.

Teilprojekt 4.2: Initialisierung eines globalen Klimamodells aus ozeanische Reanalysen (Prof. Dr. Jochem Marotzke, Dr. Johann Jungclaus)

Aufgabenstellung

Simulationen mit gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen sind ein zentrales Werkzeug, um den für die nächsten Jahrzehnte zu erwartenden anthropogenen Klimawandel abzuschätzen. Durch die Kombination von Modellen und Beobachtungen auf statistisch stringente Weise (Datenassimilation) ließe sich die Realitätsnähe der Simulationen erheblich verbessern. Ein vollständiges gekoppeltes Datenassimilationssystem für Klimasimulationen ist allerdings bisher nicht realisiert worden. Ziel dieses Projekts ist es, erste Erfahrungen mit „globalen Klimasimulationen als Anfangswertproblem“ zu machen und die Ergebnisse anderen Gruppen des Verbundprojekts als vermutlich realistischste globale Klimavorhersage zur Verfügung zu stellen. Das globale gekoppelte Modell des Max-Planck- Instituts für Meteorologie (MPI-M) soll von ozeanischen Reanalysen des Estimation the Circulation and Climate of the Ocean (ECCO) Projektes (Stammer et al. 2002) und den gleichzeitig in diesem Verbund (TP 4.1) erstellten neuen Reanalysen gestartet werden. Unter Einbeziehung assimilierter Ozeandaten aus dem ECCO Projekt und aus den Reanalysen des TP 4.1 sollen die Abweichungen des im gekoppelten Modell simulierten Ozeanzustands vom beobachteten Zustand analysiert werden, die Konsistenz der simulierten Klimaänderung des späten 20. Jahrhunderts mit den Reanalysedaten verglichen werden und Implikationen für die Vorhersagbarkeit des Klimas des 21. Jahrhunderts gewonnen werden.

Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am MPI-M konnte auf umfangreiche Erfahrung des wissenschaftlichen und technischen Personals hinsichtlich der Klimamodellierung zurückgegriffen werden. Die im Teilprojekt durchgeführten Simulationen bauten auf den Klimasimulationen auf, die für den vierten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change erstellt wurden. Am Deutschen Klimarechenzentrum stand ein Hochleistungsrechner (NEC SX6) zur Verfügung.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Fortschritt dieses Teilprojektes (AP4.2) ist termingerecht verlaufen. Es gibt keine Änderungen am Finanzplan. Die vorgesehenen Projektziele konnten erreicht werden. Der Wechsel in der Position des Projektmitarbeiters (von Dr. Pohlmann zu Dr. Matei) erforderte eine neue Einarbeitungszeit, die aber erfolgreich abgeschlossen wurde.

Wissenschaftlich technischer Stand

Gegenüber der klassischen Wettervorhersage, in der die Vorhersagemodelle täglich auf der Grundlage von aktuellen meteorologischen Beobachtungen initialisiert werden, unterscheiden sich die Klimaprojektionen mit gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodellen in einem fundamentalen Punkt: Sie werden bislang nicht von einem Zustand gestartet, der auf bestmögliche Weise aktuelle Beobachtungen reflektiert. Stattdessen wird relativ willkürlich ein Zeitpunkt in der Vergangenheit herausgegriffen (ca.1860) das gekoppelte Modell von dort bis in die Gegenwart und Zukunft gerechnet. Der zum Ende des 20. Jh. erreichte Zustand wird, je nach Qualität des Modells und seiner zu Grundlegenden Parameterisierungen mehr oder weniger weit von den hydrographischen Beobachtungen abweichen. Der simulierte zeitliche Verlauf der Klimaänderung am Ende des 20. Jh., zu einem Zeitpunkt also, an dem schon ein erheblicher Effekt der anthropogenen Treibhausgase auf das Klima erwartet wird, wird zudem durch Modelldrift (insbesondere im tiefen Ozean) überlagert. Um das Vertrauen in die

Klimaszenarien zu erhöhen, sollten sie konsistent mit heutigen Beobachtungen sein, und aus einem solchen Zustand heraus initialisiert werden.

Eine Verbesserung der Vorhersagequalität auf dekadischer Zeitskala durch Initialisierung hängt von den langsamen Komponenten und des Klimasystems ab und damit in erster Linie vom Ozean. Das Vorhandensein von niederfrequenter Variabilität ist dabei eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung (Boer, 2000). In den letzten Jahren ist das Problem der Vorhersagbarkeit hauptsächlich mit der Methode des „perfekten“ Modellexperimentes untersucht worden. Dabei werden nur Informationen verwendet, die aus dem Modellsystem selber stammen, nicht aber Beobachtungsdaten. Vorhersagbarkeit auf dekadischer Zeitskala fand sich dabei über den Ozeanen, insbesondere über dem Nordatlantik (Pohlmann et al., 2004). Erste Studien (Pierce et al., 2004), in denen Beobachtungsdaten als Anfangszustand verwendet worden, zeigten, dass das Modell auf Grund von inhärenten Modellfehlern und der daraus resultierenden Drift den Initialisierungszustand schnell „vergisst“. Eine weitere Einschränkung ist die geringe zeitliche und räumliche Überdeckung des Ozeans mit Meßsystemen. Zurzeit arbeiten mehrere Forschungsgruppen daran, die verfügbaren Daten mit Hilfe dynamischer Ozeanmodelle und Datenassimilationstechniken in Synthesen des Ozeanzustands zu integrieren. Ein Beispiel ist die Synthese, die im ECCO Projekt (Stammer et al. 2002) erstellt wurde. ECCO Reanalysedaten sind bereits zur Initialisierung von Vorhersagemodellen auf saisonaler/jährlicher Basis (ENSO Experimente: Dommenget und Stammer, 2004) und für Vorhersagen im Bereich von Dekaden (Pierce et al., 2004) verwendet worden.

Kooperationen innerhalb des Verbundes

Die Kooperationspartner des Arbeitspaketes 4.1 erstellten eine Ozeansynthese im Rahmen des German Estimation the Circulation and Climate of the Ocean (GECCO). Diese bietet eine Grundlage für die Ozeaninitialisierung im Arbeitspaket 4.2.

Zusammenarbeit besteht auch mit dem Arbeitspaket 2.3 bei der Auswertung der Modellergebnisse und dem Vergleich zwischen Beobachtungen und Simulationen.

Wissenschaftlich technische Ergebnisse

Ziel des Teilprojektes ist es, die Vorhersagefähigkeit eines globalen Klimamodells dadurch zu verbessern, indem der Ozean durch Daten initialisiert wird, die den Verlauf der Klimaentwicklung beinhalten. Bei dem Modell handelt es sich um das gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modell ECHAM5/MPIOM (Roeckner et al., 2003; Marsland et al., 2003), in einer Konfiguration wie sie auch für die Rechnungen zum Vierten Sachstandsbericht (AR4) des International Panel of Climate Change (IPCC) am Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M) verwendet worden ist. Es besitzt eine numerische Gitterauflösung von etwa 1.875° in der Atmosphäre und 1.5° im Ozean (Jungclaus et al., 2006).

Im Teilprojekt werden zwei verschiedene Initialisierungsstrategien verfolgt und deren Vor- und Nachteile analysiert. Zunächst wurden Daten aus dem „German contribution to Estimating the Circulation of the Ocean“ (GECCO) und dem Teilprojekt 4.1 des Nordatlantik-Verbundes zur Initialisierung des Ozeanmodells verwendet um Vor- und Nachhersagen zu erstellen.

Als Vergleichsmaßstab oder „freier“ Modelllauf wurde zunächst ein Ensemble von drei Klimamodellexperimenten über das 20. Jh. und 21. Jh. durchgeführt, die über den historischen Zeitraum mit beobachteten Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen angetrieben werden und für die Zukunftsprojektionen dem IPCC A1B Szenario folgen. Anfangsbedingungen für den Ozean werden willkürlich aus einem Kontrollexperiment entnommen, das den vorindustriellen Zustand darstellt. Um Anfangsbedingungen für „hindcast“ Experimente zu erstellen wurde ein „Assimilationsexperiment“ durchgeführt, in dem

dem Klimamodell Temperatur- und Salzgehaltsanomalien aus der GECCO Synthese für die Jahre 1952-2001 aufgeprägt wurden. Die Resultate (Pohlmann et al., 2009) zeigen verbesserte Vorhersageeigenschaften bis hin zur dekadischen Zeitskala für die nordatlantische und globale Meeresoberflächentemperatur und die atlantische meridionale Umwälzzirkulation. Über alle in der Studie betrachteten Zeitskalen gesehen (jährlich, 5-jahres, 10-jahres Mittel) kann man nachweisen, dass die Vorhersagbarkeit besser als diejenige ist, die sich durch Persistenz- oder Trendanalyse erreichen lässt (Abb. 2.1). Ein Ensemble von Vorhersageexperimenten für die Zeit 2002-2007 zeigt eine verbesserte Übereinstimmung mit der beobachteten SST im Nordatlantik bis 2007 und eine stärkere Erwärmung als die „freien“ Simulationen (Pohlmann et al., 2009).

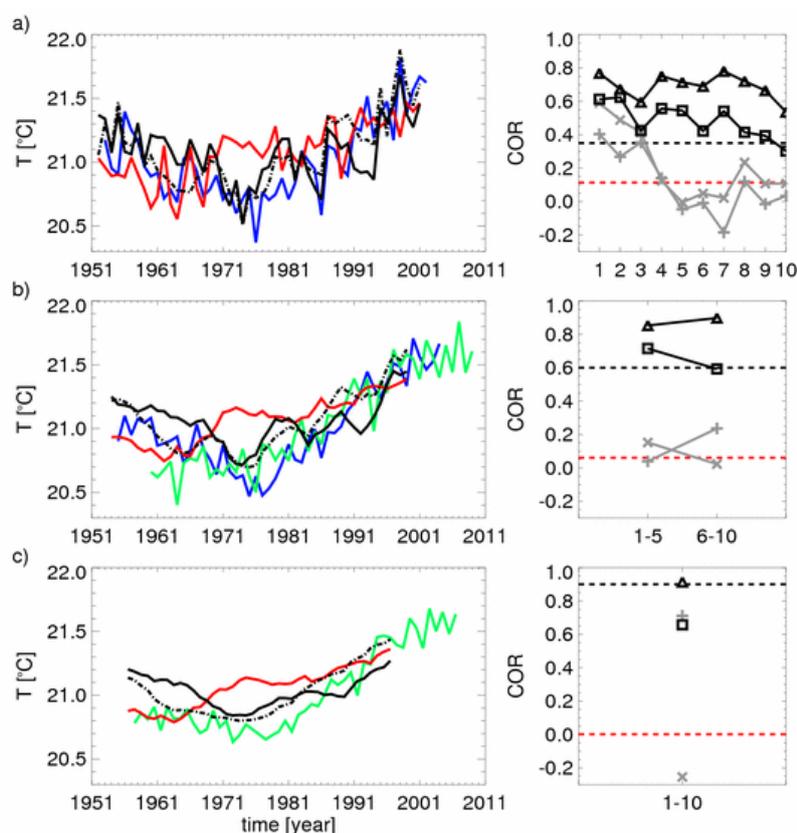


Abb. 2.1 Obere Zeile, links: Zeitserien des Maximums der AMOC (Jahresmittel, in Sverdrup) bei 48°N aus GECCO (strich-punkt), dem „hindcast“ Experiment für das erste Vorhersagejahr (blau) und das Ensembledittel der 20. Jh. Experimente (rot). Obere Zeile, rechts: Anomaliekorrelationskoeffizient zwischen den „hindcast“ und dem GECCO Experiment (Dreiecke) zusammen mit dem Anomaliekorrelationskoeffizienten zwischen dem 20. Jh. Experimenten und den Beobachtungen (rot, gestrichelt) sowie dem 95% Konfidenzbereich (gestrichelt, schwarz), der gedämpften Persistenz (Kreuze) und der Trendvorhersage (Pluszeichen).

Mittlere Zeile: Wie obere Zeile aber für Pentadenmittel. Die erste Pentade (blau) und die zweite Pentade (grün) entstammen den „hindcast“ Experiment.

Untere Zeile: Wie obere Zeile aber für Dekadenmittel. Die erste Dekade (blau) und die zweite Dekade (grün) entstammen dem „hindcast“ Experiment. (von Pohlmann et al., 2009)

Eine Erkenntnis der Analysen der GECCO-Assimilation ist, dass die Unterschiede in der Modellphysik und –konfiguration (GECCO-System mit MIT-Ozeanmodell und MPIOM) zu Inkonsistenzen in der Darstellung der Wassermassen und der AMOC führen. Als Vergleich zu dem oben beschriebenen Experiment wird zur Zeit ein alternativer Ansatz verfolgt, in dem das selbe Ozeanmodell zur Erstellung eines Synthesedatensatzes verwendet wird. Da für

MPIOM selbst kein Assimilationssystem zur Verfügung steht, wird der vereinfachte Ansatz gewählt, das Modell mit historischem atmosphärischen Antrieb aus den NCEP Reanalysen zu betreiben und daraus einen Temperatur-, Salzgehalts-, und Meereisdatensatz für die Jahre 1948-2007 zu gewinnen. Vorherige Studien (z.B., Haak et al., 2003; Olsen et al., 2008) haben gezeigt, dass solche Simulationen in der Lage sind, Elemente der beobachteten Klimavariabilität wie die „Grosse Salzgehaltsanomalie“ oder die Transportschwankungen in den „Overflows“ über den Grönland-Schottland-Rücken realistisch wiederzugeben.

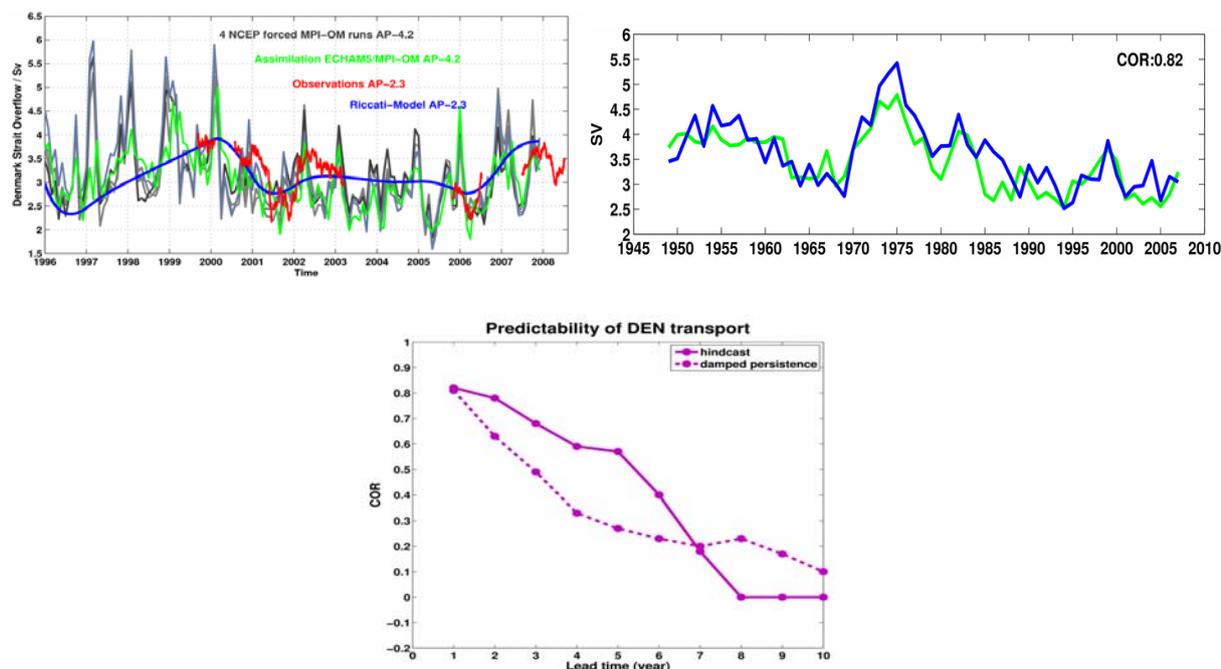


Abb 2.2: (oben linkw) Zeitreihen des Tiefenwassertransportes (Overflow) durch die Dänemarkstrasse (DEN) aus Beobachtungen (rot) und in den Experimenten mit NCEP Antrieb (grau) sowie den Assimilationsexperimenten (grün) im Vergleich zu dem Ergebnis eines vereinfachten Overflowmodells (blau) (Käse, 2006). (oben rechts) Zeitreihen der Overflowtransporte in den Assimilations- und Nachhersageexperimenten für das erste Vorhersagejahr. (Unten) Anomaliekorrelationskoeffizient zwischen dem Assimilationsexperiment und dem Nachhersageexperiment (durchgezogene Linie) im Vergleich zu der entsprechenden Korrelation mit gedämpfter Persistenz (gestrichelte Linie).

Insbesondere führt die spezifische Methode der Berechnung der Atmosphäre-Ozean Flüsse dazu, dass die simulierte SST relativ dicht an denen der NCEP Daten bleibt. Gleichzeitig geht die Methode über eine reine zweidimensionale Initialisierung mit der SST alleine (Keenlyside et al., 2008) hinaus. Es werden dreidimensionales Felder von konsistenten Temperatur- und Salzgehaltsanomalien produziert, die auf dem selben Modellgitter für die Initialisierung und die vereinfachte Assimilation (nudging) verwendet werden. Gegenüber der GECCO Methode besteht natürlich der Nachteil, dass keine Beobachtungsdaten unterhalb der Meeresoberfläche eingehen. Neben der Assimilation wurden 59 hindcast Experimente von je zehn Jahren Länge gerechnet, die jeweils in jedem Jahr der Assimilationsperiode gestartet wurden. Die Analysen zeigen ähnliche Vorhersagefähigkeiten bis in die dekadische Zeitskala wie die GECCO Methode. Insbesondere zeigen die Nachhersagen über dem extratropischen Atlantik verbesserte Vorhersagefähigkeiten für die Meeresoberflächentemperatur (SST) und den Wärmehalt des oberen Ozeans.

Die NCEP-getriebenen Experimente zeigen eine relativ gute Übereinstimmung der Transportschwankungen im „Overflow“ mit Beobachtungen (Olsen et al., 2008), die auch dem Assimilationsexperiment aufgeprägt werden (Abb.2). Dies bedeutet, dass ein wichtiger Teil

der AMOC Geschichte für die Initialisierung realitätsnah dargestellt werden kann. Nachhersageexperimente für die AMOC zeigen für Zeiträume bis zu 5-6 Jahren höhere Vorhersagbarkeit im Vergleich zu uninitialisierten Experimenten bzw. Dem Erwartungswert bei Annahme von gedämpfter Persistenz (Abb. 2.2).

Wissenschaftlicher Fortschritt Dritter

In einer jüngsten Arbeit konnten Smith et al. (2007) durch die Initialisierung eines gekoppelten Klimamodells eine deutliche Verbesserung der Vorhersagegüte der globalen Mitteltemperatur erreichen. Besonders nach den ersten zwei Jahren wird die Güte durch die Initialisierung des Wärmeinhaltes des oberen Ozeans bestimmt. Am IFM-GEOMAR wurde dasselbe gekoppelte Klimamodell ECHAM5/MPIOM mit Beobachtungsdaten der Ozeanoberflächentemperatur angetrieben, um Vorhersageexperimente durchzuführen. Die Ergebnisse sind ermutigend (Keenlyside et al., 2008), zeigen allerdings andererseits auch die Grenzen einer Assimilation unter ausschliesslicher Verwendung der SST auf. Die kritische Betrachtung dieser Methode führte unter anderem zu dem Ansatz, Experimente mit historischem atmosphärischen Antrieb für die Initialisierung zu verwenden.

Erfolge und geplante Publikationen

Hurrell, J., T. Delworth, G. Danabasoglu, H. Drange, S. Griffies, N. Holbrook, B. Kirtman, N. Keenlyside, M. Latif, J. Marotzke, G. Meehl, T. Palmer, H. Pohlmann, T. Rosati, R. Seager, D. Smith, R. Sutton, A. Timmermann, K. Trenberth, and J. Tribbia, 2010: Decadal Climate Prediction: Opportunities and Challenges. Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), Venice, Italy, 21-25 September 2009, ESA Publication WPP-306.

Matei, D., H. Pohlmann, J. Jungclaus, W. Müller, H. Haak, J. Marotzke, 2010: Two tales of initializing decadal climate predictions (in preparation).

Pohlmann, H., J.H. Jungclaus, A. Köhl, D. Stammer, and J. Marotzke, 2009: Initializing Decadal Climate Predictions with the GECCO Oceanic Synthesis: Effects on the North Atlantic. *J. Climate*, **22**, 3926–3938.

Pohlmann H., M. Balmaseda, N. Keenlyside, D. Matei, W. Müller, P. Rogel and D. Smith, 2010: Atlantic Meridional Overturning Circulation Variability in Decadal Climate Prediction Systems (in preparation).

Literatur

- Boer, G., 2000: A study of atmosphere-ocean predictability on long time scales. *Climate Dynamics*, 16, 469-472.
- Dommenges, D. und D. Stammer, 2004: Assessing ENSO simulations and predictions using adjoint ocean state estimates. *J. Climate*, 17, 4301-4315.
- Haak, H., J.H. Jungclaus, U. Mikolajewicz, und M. Latif, 2003: Formation and propagation of great salinity anomalies. *Geophysical Research Letters*, 30(9), 1473, doi:10.1029/2003GL017065.
- Jungclaus, J.H., M. Botzet, H. Haak, N. Keenlyside, J.-J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz, und E. Roeckner, 2006: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19, 3952-3972.
- Käse, R., 2006: A Riccati model for the Denmark Strait overflow variations. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L21S09, doi:10.1029/2006GL026915.
- Keenlyside, N.S., M. Latif, J.H. Jungclaus, L. Kornbluh, und E. Roeckner, 2008: Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature*, 453, 84-88, doi:10.1038/nature06921.
- Köhl, A., and D. Stammer, 2008: Variability of the meridional overturning in the North Atlantic from the 50 years GECCO state estimation. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 1913-1930.

Marsland, S.J., H. Haak, J.H. Jungclaus, M. Latif und F. Röske, 2003: The Max- Planck- Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling*, 5, 91-127.

Pierce, D.W., T.P. Barnett, R. Tokmakian, A. Semtner, M. Maltrud, J. Lysne, und A. Craig, 2004: The ACPI project, element 1: Initializing a coupled climate model from observed conditions. *Climatic Change*, 62, 13-28.

Pohlmann, H., M. Botzet, M. Latif, A. Roesch, M. Wild, und P. Tschuck, 2004: Estimating the decadal predictability of a coupled AOGCM. *J. Climate*, 17, 4463-4472.

Pohlmann, H., J.H. Jungclaus, A. Köhl, D. Stammer, and J. Marotzke, 2009: Initializing Decadal Climate Predictions with the GECCO Oceanic Synthesis: Effects on the North Atlantic. *J. Climate*, 22, 3926–3938.

Olsen, S.M., B. Hansen, D. Quadfasel und S. Osterhus, 2008: Observed and modelled stability of overflow across the Greenland Scotland Ridge. *Nature*, 455, 519-523.

Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, und A. Tompkins, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5, part I: Model description. Max- Planck- Institut für Meteorologie, Report No. 349, 127pp.

Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C.N. Hill und J. Marshall, 2002: Global ocean circulation during 1992-1997, estimated from ocean observations and a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 107(C9), 3118, doi:10.1029/2001JC000888.