

Der Nordatlantik als Teil des Erdsystems: Pilot-Anwendungen eines Beobachtungs-, und Diagnosesystems zur regionalen Abschätzung der Zirkulation im Nordatlantik und in der Nordsee

BMBF Verbundvorhaben als Beitrag zur nationalen und internationalen Erdsystemforschung

Abschlussbericht Nordatlantik-Projekt

Förderkennzeichen 03F0605

vorgelegt am 05.April 2013

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: AP2.3: Ursachen klimarelevanter Wärmetransportschwankungen über dem Grönland-Schottland-Rücken AP4.1: Bestimmung von Klima-Schlüsselprozessen der nordatlantischen Zirkulation durch Datensynthesen AP4.3: Wechselwirkungen zwischen Atlantik und Nordwesteuropäischem Schelfmeer unter Verwendung realistischer Randbedingungen im Bereich der Schelfkante Koordination	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Detlef Stammer Dr. Armin Köhl Dr. Thomas Pohlmann Prof. Dr. Detlef Quadfasel Dr. Antje Tittebrand Prof. Dr. Rolf Käse	5. Abschlussdatum des Vorhabens
	6. Veröffentlichungsdatum 30.03.2013
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20146 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0605A
	11. Seitenzahl 16
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 9
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Für das Verständnis von 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. Das Teilprojekt 4.1 beschäftigte sich (1) mit der Frage eines hinreichenden Beobachtungssystems zur Bestimmung wesentlicher Schlüsselgrößen und (2) mit der Erstellung einer Synthese der Zirkulation des Nordatlantiks bis heute mit einer hohen räumlichen Auflösung unter Verwendung des ECCO adjungierten Modells. Zur Erreichung des ersten Ziels wurden ausgehend von verschiedenen realistischen Verteilungen von Argo Temperatur- und Salzgehaltsprofilen Meeresspiegeländerungen und deren Komponenten rekonstruiert und die Fehler in Abhängigkeit der Anzahl in die Analyse eingehender Floatpositionen berechnet. Die Synthese wurde für den Zeitraum 2000-2010 abgeschlossen und mit Fokus auf die Schwankungen der meridionalen Umwälzbewegung für den Zeitraum der RAPID Daten analysiert. Das Teilprojekt 4.3 hat den Einfluss von Schwankungen in der Nordatlantikzirkulation und von Änderungen des lokalen atmosphärischen Antriebs auf die Variationen von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden untersucht. Ergebnisse dieser Untersuchungen zum Einfluss des Nordatlantiks auf die Zirkulation der Nordsee und auf Extremereignisse wie Sturmfluten sind von großer Relevanz für die operationelle Modellierung, wie sie vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben wird. Die Koordination kümmerte sich um die allgemeine Übersicht über die Teilprojekte des Forschungsverbundes Nordatlantik in der 2. Förderphase. Dazu gehörte die Aufgabenabstimmung innerhalb des Verbundprojektes, Information des Verbundes, Bündelung von Ergebnissen in Berichtsform sowie die Öffentlichkeitsarbeit, Veranstaltungsplanung und der Aufbau einer webbasierten Datensammlung (Inventur) zu hydrographischen Datenquellen in Nordatlantik.	
19. Schlagwörter	
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 Final report of the University of Hamburg: AP2.3: Ursachen klimarelevanter Wärmetransportschwankungen über dem Grönland-Schottland-Rücken AP4.1: Bestimmung von Klima-Schlüsselprozessen der nordatlantischen Zirkulation durch Datensynthesen AP4.3: Wechselwirkungen zwischen Atlantik und Nordwesteuropäischem Schelfmeer unter Verwendung realistischer Randbedingungen im Bereich der Schelfkante Koordination	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Detlef Stammer Dr. Armin Köhl Dr. Thomas Pohlmann Prof. Dr. Detlef Quadfasel Dr. Antje Tittebrand Prof. Dr. Rolf Käse	5. end of project
	6. publication date 30.03.2013
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20146 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0605A
	11. no. of pages 16
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 9
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. Subproject 4.1 deals with two tasks. The first is the question of an adequate monitoring system for determining essential key variables with a given accuracy. The second part was dedicated to create a synthesis of the North Atlantic circulation with the highest possible spatial resolution using the ECCO adjoint model. To achieve the first objective, reconstructions of sea level changes and their components were calculated on the basis of different temperature and salinity profiles with realistic distributions according to the Argo float positions and the error depending on the number of assumed float positions was determined. The synthesis was completed for the period 2000-2010 and analyzed with focus on the fluctuations of the meridional overturning circulation during the period of the RAPID measurements. The subproject 4.3 deals with the influence of variability in the North Atlantic circulation and with changes of the local atmospheric forcing on the variations of physical parameters in the North Sea on timescales from months to decades. A main focus is set onto the consequences of global warming in the North Sea region, as well as the influence of decadal atmospheric oscillations (NAO) on changes of the water level, the circulation and hydrography (salinity and temperature) in the North Sea. These investigations are of great importance for the operational modeling, as it is done by the Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). The coordination kept a general overview on the subprojects on the North Atlantic project. This included coordinating the tasks in the project, informing the network about important news, acquiring results and public relations, as well as the construction of a web-based data archive of hydrographic data sources in the North Atlantic.</p>	
19. keywords North Atlantic syntheses, Interaction subpolar-subtropical Atlantic, hydrodynamic modeling, setting boundary values, hindcast run, validation	
20. publisher	21. price

Abschlussbericht

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Aufgabe 1 (AP 2.3)

Die Overflows von dichtem Wasser durch die Passagen des Grönland-Schottland-Rückens und die damit verbundene Einmischung von leichterem Umgebungswasser (Entrainment) tragen je zu etwa einem Drittel zur meridionalen Umwälzzirkulation des Atlantiks bei. Schwankungen des damit verbundenen Wärmetransports haben eine unmittelbare Auswirkung auf das europäische Klima. Daher ist ein Kernziel des Projektes die Erstellung einer langfristigen Messreihe der Massen- und Wärmetransporte zwischen dem Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik zur Analyse saisonaler, zwischenjährlicher und dekadischer Ozeanvariabilität.

Aufgabe 2 (AP 2.3)

Der Austausch durch die engen und flachen Passagen im Grönland-Schottland-Rücken ist hydraulisch limitiert. Mit Hilfe eines prognostischen Modells soll die Sensitivität von Transportschwankungen (Volumen und Wärme) auf geänderte atmosphärische Antriebe und auf unterschiedliche Schichtungsverhältnisse analysiert werden. Neben den Passagen des Grönland-Schottland-Rückens soll jetzt erstmals auch der Austausch durch die tiefe Framstraße modelliert und mit Beobachtungen verglichen werden.

Aufgabe 3 (AP 2.3)

Schwankungen der Wärmetransporte über den Grönland-Schottland-Rücken sind nicht nur durch die Variabilität der Volumentransporte sondern auch durch Änderungen der Eigenschaften der beteiligten Wassermassen bedingt. Um diesen Einfluss zu quantifizieren und die Ausbreitung von Wärme und Frischwasseranomalien im Nordmeer abzuschätzen, werden historische und rezente hydrographische Daten aus Schiffskampagnen und aus dem internationalen ARGO Programm analysiert.

Aufgabe 1 (AP 4.1)

Die Möglichkeiten und Grenzen des gegenwärtigen Beobachtungssystems zur Beschreibung von Schlüsselgrößen der Klimavariabilität im Nordatlantik sollten anhand von Modelldaten evaluiert werden und Vorschläge zur Verbesserung der Beobachtungsstrategie erarbeitet werden.

Aufgabe 2 (AP 4.1)

In diesem Rahmen sollte eine Synthese/Reanalyse der Zirkulation des mit höchstmöglicher räumlicher Auflösung und unter Verwendung des ECCO adjungierten Modells erstellt werden. Als Beobachtungsgrundlage dienen alle frei erhältlichen Datensätze, 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.

Aufgabe 1 (AP 4.3)

Dieses Projekt sollte den Einfluss von Schwankungen in der Nordatlantikzirkulation und von Änderungen des lokalen atmosphärischen Antriebs auf die Variationen von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden untersuchen. Insbesondere wurden die Auswirkungen der globalen Erwärmung und des damit verbundenen Anstiegs des Meeresspiegels sowie von dekadischen atmosphärischen Schwankungen (NAO) auf Änderungen des Wasserstandes, der Zirkulation, und der Hydrographie (Salzgehalt und Temperatur) der Nordsee untersucht. Diese Untersuchungen zum Einfluss des Nordatlantiks auf die Zirkulation der Nordsee und auf Extremereignisse wie Sturmfluten sind von großer Relevanz insbesondere für die operationelle Modellierung, wie sie vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betrieben wird.

Aufgabe 1 (Koordination)

Die Koordination kümmerte sich um die allgemeine Übersicht über die Teilprojekte des Forschungsverbundes Nordatlantik in der 2. Förderphase. Dazu gehörte die Aufgabenabstimmung innerhalb des Verbundprojektes, Information des Verbundes, Bündelung von Ergebnissen in Berichtsform sowie die Öffentlichkeitsarbeit, Veranstaltungsplanung und der Aufbau einer webbasierten Datensammlung (Inventur) zu hydrographischen Datenquellen in Nordatlantik.

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

2.3 Die beteiligten Gruppen besitzen langjährige 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.

4.1 Als technische Voraussetzungen für die Durchführbarkeit von Ozeansynthesen ist ein Synthesesystem erforderlich, mit dessen Hilfe Ozeanmodelle in Übereinstimmung mit gemessenen Daten gebracht werden. 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.

4.3 Die einzelnen Modellkomponenten, die im Rahmen dieses Vorhabens benutzt und gekoppelt werden sollten, wurden bereits in unterschiedlichen Anwendungen betrieben und getestet. Die Kontakte mit der Sachgebietsleitung „Operationelle Modelle“ aus dem BSH-Referat „Vorhersagedienste“ sind seit vielen Jahren etabliert.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

2.3 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 METEOR Reisen M82/1 und M85/2, FS MARIA S MERIAN Reise MSM21/1 und FS POSEIDON PO437). Unsere Verankerungen im Färöer-Bank Kanal wurden von unseren Partnern von den Färöer Inseln gewartet und ebenfalls durch hydrographische Aufnahmen ergänzt. Auch der im Antrag vorgelegte Plan zu den Modellarbeiten in AP2.3 wurde im Wesentlichen eingehalten, wobei jedoch einige Modifikationen in Bezug auf die Länge der Modellläufe wie auch der angestrebten Modellauflösung vorgenommen werden mussten.

4.1 Der im Antrag vorgelegte Arbeitsplan wurde im Wesentlichen eingehalten, wobei jedoch einige Modifikationen im Bezug auf die Länge der Modellläufe der hochauflösenden Synthesen gemacht werden mussten. Die Möglichkeiten, mit hochauflösenden Synthesen in Bereiche langer Zeitskalen vorzustoßen, sind begrenzt, da eine hochauflösende Synthese über 50+ Jahre anderenfalls Jahre in Anspruch nehmen würde. Jedoch wurde erfolgreich einer Synthese über die letzte Dekade 2000-2010 erstellt.

4.3 Geplant war eine Einbettung des Schelfmeermodells HAMSOM für den Nordwesteuropäischen Schelf in die beckenweite Modellierung und Assimilierung des AP 4.1. Hierzu wurden die Ergebnisse von Assimilationsexperimenten (GECCO) verwendet, um realistische Randbedingungen für regionale Nordseemodelle zu erzeugen. Zum Vergleich wurden aber auch Randwerte des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modells MPIOM-REMO herangezogen. Das Modellnesting wurde hierbei zunächst als unidirektionales Nesting durchgeführt, d.h., es hat keine physikalischen Rückwirkungen vom Schelf auf den Atlantik gegeben. Da das Modellnesting derzeit immer noch zu einem aktuellen Forschungskomplex gehört, wurden verschiedene Nesting-Algorithmen getestet, um eine optimale Kopplung zwischen Ozean- und Schelfmodell zu erzielen.

Koordination Die Aufgaben der Koordination wurden wie geplant durchgeführt. Diese beinhalteten unter anderem die Erstellung einer Projekt Webseite, sowie einer webbasierten Datenübersicht über hydrographische Datenquellen im Nordatlantik.

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

2.3 Die Arbeitsgruppe zu AP 2.3 war bereits am ersten Antragszeitraum des Nordatlantik-Projekts beteiligt, in dessen Rahmen die Verfahren erprobt und angewendet werden konnten.

4.1 Ein wesentlicher Vorteil der Arbeitsgruppen lag in der früheren und teilweise gleichzeitigen Beteiligung an einem 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

durchgeführt, in denen dynamische Modelle der Ozeanzirkulation mit Hilfe einer Variationsmethode (adjungierte Methode) in Übereinstimmung mit Messdaten aus Feldmessungen wie auch aus Satelliten gestützten Messverfahren gebracht werden können. Diese Ergebnisse haben ein breites Anwendungsspektrum vom Verständnis von Zirkulationsänderungen zur Initialisierung gekoppelter Klimavorhersagen.

4.3 Die Formulierung von offenen Randbedingungen ist seit längerem ein wissenschaftlich hochinteressantes und ungelöstes Problem. Um ein Modell mit offenen Rändern vorwärts laufen lassen zu können, muss man in der Regel die Randbedingungen überspezifizieren. Ein zweites Problem ist das der ungenügenden Information darüber, welche Eigenschaften von außen über die offenen Ränder in das Modellgebiet hinein propagieren. Als Resultat führen regionale Modelle, die mit offenen Rändern betrieben werden, normalerweise zu anderen Ergebnissen als solche, die beckenweit mit der gleichen Auflösung und gleichem Antrieb gerechnet werden. Das letztere Problem kann in der Regel nur durch Datenassimilation innerhalb des Schelfmeermodells gelöst werden (z.B. Bennett and Macintosh, 1992, Zhang and Marotzke, 1999). Ein solcher Ansatz soll in der Zukunft angestrebt werden, indem ein Schelfmeermodell aktiv in ein Atlantikmodell genestet und Datenassimilation für das Gesamtsystem betrieben wird.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2.3 Innerhalb des Verbundes hat das AP 2.3 eng mit den anderen experimentellen Gruppen (APs 1.3, 2.1, und 2.2) zusammengearbeitet, sowohl in logistischer Hinsicht bei der Durchführung der Seereisen als auch bei der Integration und Synthese der im Subpolar-Wirbel gewonnenen Daten. Bei der umfangreichen Arbeit zur Gewinnung der Messdaten konnte weiterhin 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, Norwegen (Drs. Drange & Østerhus) wurde ebenfalls fortgesetzt.

4.1 Die Anwendungen der Synthesen liegen zum einen in der Initialisierung von gekoppelten Klimamodellen mit der Gruppe von Herrn Marotzke am MPI Hamburg wie auch bei der Analyse von Interpretation von Messdaten z. B. wie sie im Rahmen des RAPID Projekts am National Oceanography Centre Southampton gesammelt werden.

4.3 Das Projekt hat eng mit dem Projekt AP4.1 zusammengearbeitet, dass die Randwertdaten aus dem dort erstellten 50-Jahrelauf bereitstellt. Außerdem war AP4.1 bei der Entwicklung der Kopplungsalgorithmen beratend tätig, denn zur Erarbeitung der Algorithmen ist eine genaue Kenntnis der Charakteristiken der Randwerte erforderlich. Des Weiteren wurde mit dem Projekt AP3.1 eng kooperiert: Wie oben ausführlich beschrieben werden auch von AP 3.1 Randwerte übernommen, um damit im Vergleich den Einfluss der Assimilation im Nordatlantik auf die Güte der Modellergebnisse in der Nordsee abschätzen zu können. AP 3.1 und 4.3 haben sich beide mit der Frage der Randwertformulierung für BSHcmod auseinandergesetzt.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Zu Aufgabe 1 (AP 2.3): Analyse der Transportzeitserien

Die Aufnahme langer Strömungs-Zeitreihen des Overflows über den Grönland-Schottland Rücken wurden über den Projektzeitraum erfolgreich fortgesetzt (Abb. 1) und Transporte des Overflows durch die Dänemarkstraße und den Färöer-Bank-Kanal bestimmt. Die mittlerweile vorhandenen langfristigen Zeitreihen (Messungen in 13 Jahren seit 1996) wurde jetzt verwendet, um für die Dänemarkstraße den Transport durch statistische Methoden in den Jahren zu rekonstruieren, in denen nur Daten aus einem Messgerät vorlagen. Dadurch erhöht sich die Datenlage für diese Passage erheblich (Abb. 1, schwarze Kurve). Eine Beschreibung dieser Methode und der statistischen Eigenschaften der kompletten Zeitreihe wurde veröffentlicht (Jochumsen et al., 2012).

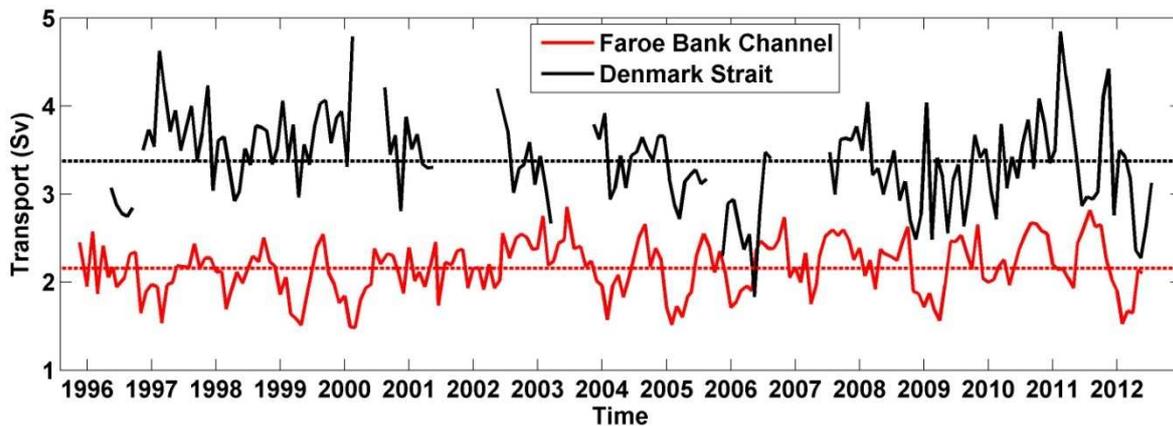


Abb. 1: Zeitreihen der aus den Daten von verankerten Strömungsprofilmessern bestimmten Volumentransporte des Färöer-Bank-Kanal-Overflows (rot) und des Dänemarkstraßen-Overflows (schwarz).

Der mittlere Overflow-Transport durch die Dänemarkstraße ist 3.4 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Da nunmehr eine große Anzahl von Messungen vorliegt, kann dieser Mittelwert mit hoher Qualität bestimmt werden: der Standardfehler beträgt nur $\pm 0.05 \text{ Sv}$. Eine signifikante Abnahme des Transports ist in keiner der aus den Beobachtungen bestimmten Transportzeitreihen der Overflows ermittelt worden, obwohl Modellstudien diese als Folge der globalen Erwärmung erwarten lassen.

Aus den Zeitserien der Bodentemperatur- und Salzgehaltmessungen konnte der Anteil des Dänemarkstraßen-Overflows am gesamten meridionalen Wärmetransport über den Grönland-Schottland-Rücken mit 5 TW abgeschätzt werden. Dieser ist aber vernachlässigbar für das Budget des Arktischen Mittelmeeres.

Die Analyse der neuesten Daten vom Sommer 2012 aus 75 kHz ADCP Strömungsprofilmessern zeigte einen unbeständigen Bias in den unteren 100 – 200 m der gemessenen Strömungsprofile. Dieses Problem wird momentan mit dem Hersteller der Geräte diskutiert. Zurzeit kann lediglich der daraus resultierende Fehler auf ca. 20% des Gesamttransports abgeschätzt werden. Die Transporte sind zu niedrigeren Werten hin verschoben. Dies gilt für alle Transporte des Dänemarkstraßen-Overflows.

Im Färöer-Bank Kanal wurden Laufzeitmessungen eines von 2007-2011 verankerten invertierten Bodenecholotes (PIES) zur Rekonstruktion von hydrographischen Profilen verwendet, die die Entwicklung der Temperaturschichtung im Kanal zeigen. Die Tiefe der 3°C Isotherme, die häufig zur Abgrenzung des Overflow-Wassers verwendet wird, stimmt in der aus den PIES gewonnenen Zeitreihe gut mit den Ergebnissen aus hydrographischen Schiffsmessungen überein. Durch den Einsatz von PIES kann also die Schichtdicke des Overflows beobachtet werden und in Kombination mit den Daten aus den verankerten Strömungsprofilmessern wird eine verbesserte Bestimmung des Wärmetransports ermöglicht. Diese Untersuchungen werden im Rahmen des EU-Projekts NACLIM fortgesetzt.

Zu Aufgabe 2 (AP 2.3): Austausch durch Passagen im Modell

Wenn das Volumen des Reservoirs V dichten Wassers als Produkt der Fläche A und der Reservoirhöhe h geschrieben wird, ergibt sich mit Hilfe hydraulischer Beziehungen die nichtlineare Gleichung:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_s}{A} - \alpha h^2$$

Dabei sind Q_s die Quelle dichten Wassers und der negative Term der hydraulisch kontrollierte Ausstrom. Die in den Koeffizienten α einfließende Dichtedifferenz wird dabei als zeitlich konstant angesehen. Bei Kenntnis der Quellstärke ist so die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des Overflows möglich. Die Gültigkeit der Volumenbilanz wurde mit dem hochauflösenden ROMS-Modell nachgewiesen. Ein Vergleich der Beobachtungsdaten mit den Ergebnissen des hochauflösenden MITgcm aus dem AP 4.1 zeigt in den Anfangsjahren eine gute Übereinstimmung. Am Ende der Zeitserien wichen die Transporte aus den Beobachtungen deutlich von denen der hydraulischen Vorhersage ab. Offensichtlich ist nicht nur die Reservoir Höhe nach 2009 alleine maßgebend, sondern die Dichtedifferenz zwischen Nordmeer und subpolarem Atlantik auf dem Niveau der Schwelle scheint sich geändert zu haben.

Um die Abhängigkeit des Overflows vom Dichteunterschied nördlich und südlich der Schwelle zu erfassen, wurde zunächst von jeweils zwei homogenen Wassermassen mit 5°C Temperaturunterschied auf beiden Seiten ausgegangen. Der Wärmetransport normal zu den Schwellen zeigte sich in vier Modellläufen direkt zu unserem neu definierten Overturning und der Dichtedifferenz gegeben durch eine lineare Beziehung zur Temperaturdifferenz proportional (Abb. 2). Diese Zusammenhänge wurden danach mit klimatologischen Anfangs- und Antriebsfeldern weiter untersucht.

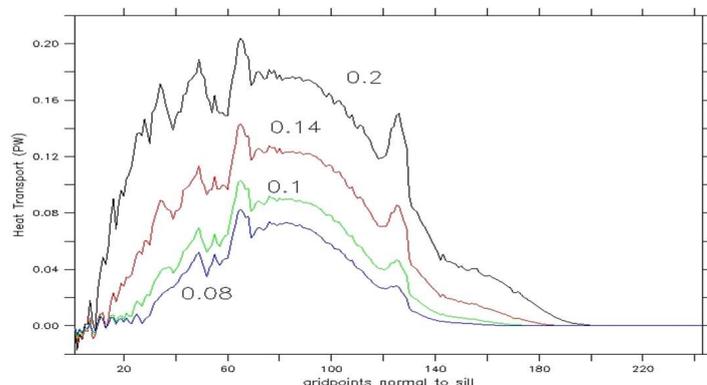


Abb.2 : Wärmetransporte normal zur Schwelle für die vier unterschiedlichen Dichterelationen mit den angegebenen Koeffizienten.

Die weiteren Arbeiten standen im Zusammenhang mit der Ausdehnung des bisherigen regionalen Modells auf einen Großteil der Arktis. Dabei wurde zunächst analog zum System Nordmeer - subpolarer Atlantik der Austausch von Masse, Wärme und Salz durch die nördliche Grenze des europäischen Nordmeeres (der Framstraße) untersucht. Dies wurde in einem System von zwei großen Meeresbecken mit realistischer Topographie, die durch die Framstraße verbunden sind, verwirklicht.

Zunächst wurde das Modell mit dem historischen Datensatz WOA-2003 bezüglich der Hydrographie initialisiert, aber aus der Ruhe gestartet (kein externer Antrieb, ebenso kein sog. Restoring an die Klimatologie). Die beiden Becken wurden mit jeweils einem homogenen Tracer markiert. Dadurch war es möglich, den Transport einer definierten Wassermasse, z.B. Wasser dichter als $\sigma_0=28.0 \text{ kgm}^{-3}$ der Herkunft nach zu beschreiben. Um den Einfluss des Windes zu ermitteln, wurde bei Neustart des Modells jeweils ein idealisiertes zyklonales Windfeld unterschiedlicher Stärke genutzt.

Bemerkenswert ist die Netto-Bilanz des Flusses zwischen Arktis und Nordmeer: Ohne Wind findet ein länger dauernder Transport des dichten Wasser durch die Framstraße nach Norden statt. Dies ist kompatibel mit dem Hunkins-Whitehead Konzept, bei dem das salzärmere (leichtere) Wasser südwärts durch die Framstraße und das salzreichere (dichtere) zur Kompensation in die Arktis fließt. Mit Wind ist der nach Süden gerichtete Transport deutlich größer.

Zu Aufgabe 3 (AP 2.3): Ausbreitung von Anomalien

Basierend auf den 2001 im Europäischen Nordmeer begonnenen Messungen mit profilierenden Argo-Floats wurde die mittlere Entwicklung der Hydrographie in den tiefen Becken auf saisonalen bis dekadischen Zeitskalen untersucht. Die oberen 500-750 m der Wassersäule in allen Becken sind vom saisonalen Signal mit Amplituden von maximal 2.5 K dominiert. Als am tiefsten eindringendes Signal zeigt sich die durch starke Wärmeverluste an die Atmosphäre hervorgerufene winterliche Konvektion. Maximale Konvektionstiefen reichten im Zeitraum 2001 bis 2012 von 250 m auf dem Island-Plateau bis zu 1700 m in der Grönlandsee. Mit Hilfe einer harmonischen Analyse wurde das saisonale Signal im Detail beschrieben und konnte von den in den Zeitserien enthaltenen längerfristigen Signalen separiert werden.

Bei einer maximalen Länge der Zeitserien von 11 Jahren ist allerdings eine Separierung von inter-annualer und dekadischer Variabilität nicht möglich. Die Temperatur- und Salzgehaltsentwicklung in der Grönlandsee und im Norwegen-Becken wurde aber im Zusammenhang mit der Propagation von Anomalien in den Eigenschaften des einströmenden Atlantischen Wassers interpretiert. In der Grönlandsee werden steigende Temperaturen und Salzgehalte seit Beginn der Messungen 2001 in den oberen 1300 m der Wassersäule beobachtet und im Norwegenbecken steigende Salzgehalte in 0 bis 500 m Tiefe und steigende Temperaturen im Zwischenwasser in 500 bis 1300 m Tiefe seit 2002. Dies zeigt, wie sich die Anomalien mit der Advektion des Atlantischen Wassers bis in die tiefen Becken im Inneren des Europäischen Nordmeeres ausbreiten und mit der winterlichen vertikalen Vermischung auch ins Zwischenwasser eingetragen werden.

In der Grönlandsee dokumentieren die Zeitserien zudem die große inter-annuale Variabilität des oberflächennahen Salzgehalts. Extrem-Ereignisse beim Eintrag von Frischwasser im Spätsommer dämpfen danach die Konvektion im folgenden Winter stark (Abbildung 3).

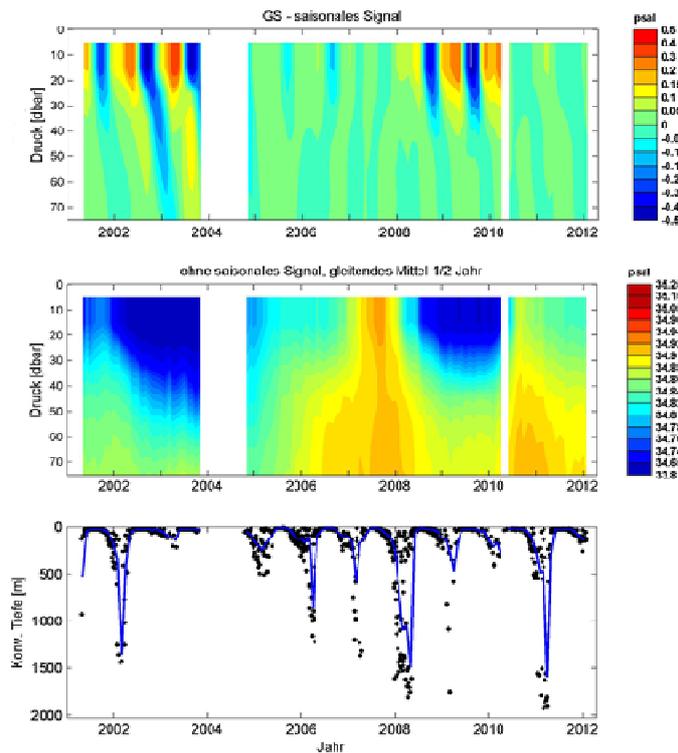


Abb. 3: Entwicklung des Salzgehalts in den oberen 75 m der Grönlandsee für das saisonale Signal (oben) und ohne das saisonale Signal sowie nach Glättung mit einem gleitenden Mittel über ein halbes Jahr (Mitte); beide Farbskalen sind nichtlinear. (Unten) Konvektionstiefe in der Grönlandsee im gleichen Zeitraum.

Zu Aufgabe 1 (AP 4.1): Evaluation eines Beobachtungssystems

Es wurde untersucht inwieweit das vorhandene, auf Argo-Profildaten beruhende Beobachtungssystem ausreichend ist, um Schlüsselgrößen der Klimavariabilität und der Zirkulation im Nordatlantik zu rekonstruieren. Die Ergebnisse basieren auf den in Aufgabe 2 erstellten und in der vorherigen Projektphase beschriebenen hochauflösenden Konfigurationen des (8 km) Zirkulationsmodells des Atlantiks, einschließlich der Arktis und realistischen wie auch zufälligen Verteilungen der Argo Profile. Das Modellgebiet wurde dazu in 4 Regionen mit unterschiedlichen dynamischen Regimen aufgeteilt. Das Ziel war die Rekonstruktion der Meeresspiegeländerungen sowie seiner Komponenten in den Regionen auf Basis der an den Positionen der Argo-Profile extrahierten Modelldaten. Die Güte der Rekonstruktion wurde mit den vollständigen Modelldaten evaluiert. Da die Analyse auf monatlichen gemittelten Modelldaten beruht, konnten Effekte auf kürzeren Zeitskalen bzw. Ungenauigkeiten auf Grund von nicht aufgelösten Zeitskalen nicht berücksichtigt werden. Die Rekonstruktion beschäftigt sich daher nur mit den sterischen Anteilen der Meeresspiegeländerungen, die hauptsächlich auf Zeitskalen von mehr als einem Monat stattfinden.

Im Detail wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Sind halosterische und thermosterische Anteile der Meeresspiegeländerungen gleich gut rekonstruierbar?
- Auf welchen Zeitskalen kann die Variabilität, mit welcher Genauigkeit bestimmt werden?
- Abhängigkeit des Rekonstruktionsfehlers von der Anzahl der eingesetzten Floats und von der Homogenität ihrer räumlichen Verteilung.

Um den Einfluss des regulären saisonalen Zyklus zu minimieren wurden nur die Anomalien im Vergleich zur Modellklimatologie analysiert. Dies ermöglicht insbesondere eine bessere Rekonstruktion der jährlichen Mittelwerte. Die lokalen Daten wurden dann mit Hilfe einer Gaußschen Wichtungsfunktion auf das Modellgitter interpoliert.

Eine höhere Anzahl von Floats als die gegenwärtige Argo-Verteilung würde vor allem auf monatlicher Zeitskala die Rekonstruktionen um 20-60 % verbessern. Bei den saisonalen Variationen zeigt eine zufällige Verteilung bei gleicher Anzahl von Floats Vorteile gegenüber der Argoverteilung, die deutlich

weniger Positionen in den westlichen Randströmen realisiert. Zwischenjährliche Variationen können gut wiedergegeben werden und sind weniger abhängig von der Art der Verteilung (zufällig vs. Argo). Steigende Floatzahlen führen zu unterschiedlichen Auswirkungen in verschiedenen Boxen

Zu Aufgabe 2 (AP 4.1): Synthese der Nordatlantischen Zirkulation

Eine dynamisch konsistente Beschreibung der Nordatlantischen Zirkulation über die Jahre 2000-2010, einschließlich der zugehörigen Antriebsfelder, wurde durch eine Modell-Daten-Synthese unter Verwendung der adjungierten Methode mit einer Auflösung, die Wirbel zulässt (16 km), erstellt. Die Methode entspricht dem Variationsprinzip und basiert auf der Minimierung der Beobachtungen-Modell Abweichungen unter der Nebenbedingungen der Erhaltung der dynamischen Modellgleichungen.

Hochauflösende Ozean-Synthese

Die assimilierten Beobachtungsdaten waren:

- monatliche Temperatur und Salzgehaltsprofile CTDs, XBTs und ARGO;
- tägliche Along-Track Meeresoberflächenauslenkungsanomalien (SSH) aus Satellitenaltimetrie;
- monatliche Oberflächentemperaturen von Satellitenmikrowellen-Sensoren.

Die Kontrollvariablen wurden alle 3 Tage angepasst, um eine Konsistenz zwischen Modell und Beobachtungen zu erreichen und umfassen:

- Temperatur und Salzgehalt Anfangsbedingungen;
- Oberflächen-Randbedingungen: 2-m Lufttemperatur und Luftfeuchte, Niederschlag, 10-m Wind.

Die Differenz Modell-Beobachtungen wurde über den Zeitraum 2000-2010 um rund 40% (nach 9 Iterationen) reduziert, wobei die größten Kostensenkungen für Salzgehalt und Temperatur eingetreten sind. Kleinere Verbesserungen ergaben sich für SSH, da die Vorwärtsintegration bereits in der Nähe des akzeptierten Fehlers war, jedoch könnte es auch bedeuten, dass die Anpassung der Wirbelvariabilität in einem bereits wirbelzulassenden Modell problematisch ist. Die Biasreduktion ist für Salzgehalt und Temperatur in Abb. 4 gezeigt:

- Im vertikalen Profil zeigt sich eine Reduktion hauptsächlich in den oberen 400m und in der Schicht 800-2000m.
- Die räumliche Verteilung der Biasreduktion zeigt eine große Auswirkung am Ausgang der Labradorsee, vor allem dort, wo der größte Bias gefunden wurde.

Mittlere Korrekturen gegenüber dem atmosphärischen Zustand der NCEP Reanalyse:

- Lufttemperaturkorrekturen werden durch Abkühlung an lokalisierten Stellen, z.B. nördlich des Golfstroms, in der Barents und Labrador See dominiert.
- Niederschlagskorrekturen zeigen verstärkten Niederschlag über dem Subpolarwirbel und eine Verringerung über der westlichen Grenze des subtropischen Atlantiks (insbesondere über dem Golfstrom).
- Windkorrekturen sind wichtig nördlich von 40° N und zeigen zwei starke zyklonale Windanomalien im nördlichen Nordatlantik (südlich der Grand Banks von Neufundland und im isländischen Becken) und eine antizyklonale Windanomalie über der Norwegischen See.

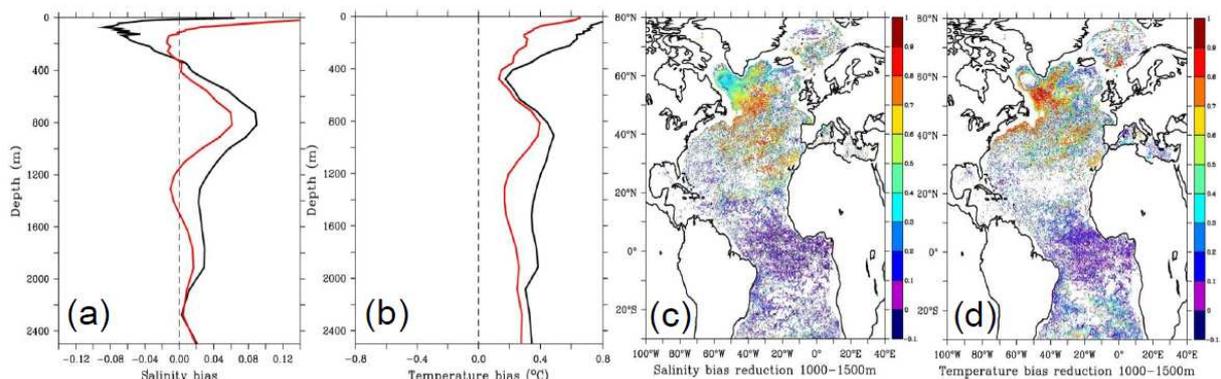


Abb. 4: Salzgehalts- (a) und potentieller Temperaturbias (b) von der Simulation (schwarz) und dem optimierten Modell (rot). (c, d) Reduktion des Salzgehalts- und des potentiellen Temperaturbias in der Schicht 1000-1500m.

Die Meridional Umwälzzirkulation (MOC) bei 27° N inklusive ihrer Komponenten stimmen sehr gut mit den Beobachtungsdaten und den daraus resultierenden Transportschätzungen von RAPID (Rayner et al. 2011) überein, sowohl auf saisonalen wie auch auf zwischenjährlichen Frequenzen (Abb. 5a, b). Die MOC zeigt eine ausgeprägte Anomalie während 2009/2010. In Übereinstimmung mit McCarthy et al. (2012), kann die Anomalie aufgrund einer Überlagerung von einem sehr niedrigen Winter Nord Atlantische Oszillations (NAO) Index in 2009/2010 mit den Transportanomalien aufgrund einer

Reduzierung des nordwärtigen Ekmantransports erklärt werden. Interessant ist jedoch auch, dass der nicht Ekman getriebene obere südwärtige Rückstrom eine längerfristige Verstärkung des Transports erfährt (d.h. MOC Abnahme). Dieser Rückstrom kann nachweislich die gleiche Variabilität wie der Transport in einer Tiefe von 1100-5000m, in der der tiefe westliche Randstrom (DWBC) Nordatlantisches Tiefenwasser (NADW) nach Süden bringt, haben. Abbildung 5c zeigt diesen Transport aufgeteilt in die obere und die tiefere Komponente, der Großteil des Signals ist aufgrund der Variabilität in der Schicht 3000-5000 m.

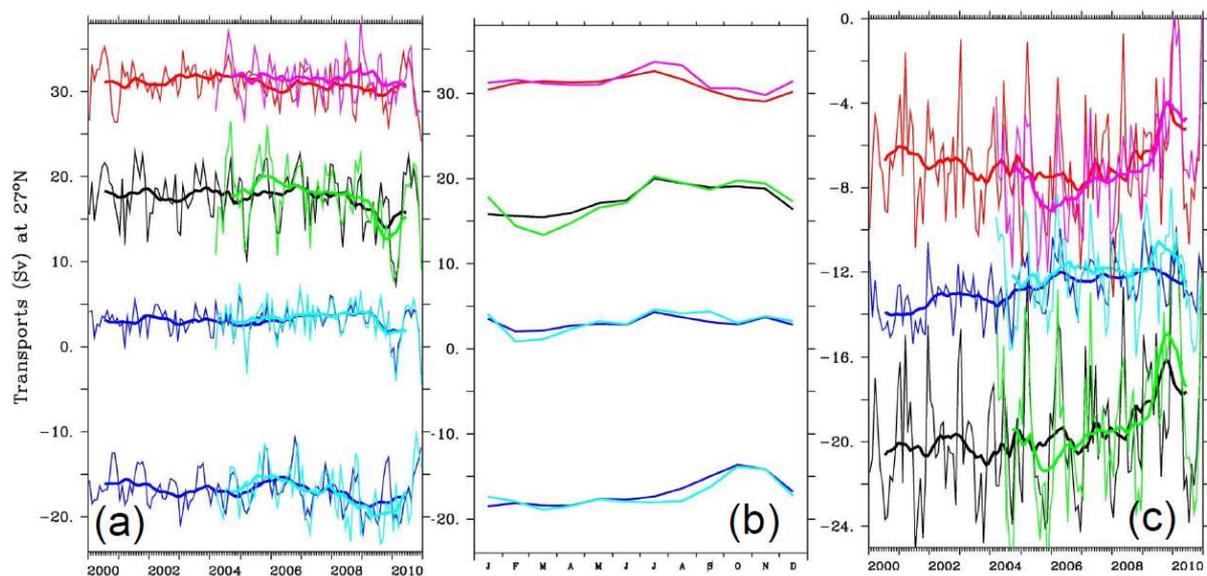


Abb. 5: Simulierte MOC bei 27°N (schwarz) zerlegt in den Anteil in der Florida Straße (rot), die Ekman Transporte (oberes blau), sowie die Anteile des oberen Ozeans (unteres blau). RAPID Schätzungen sind als kürzere Zeitreihen überlagert. Panel (b) zeigt den Vergleich der jährlichen Klimatologie von Synthese und Beobachtungen. (c) zeigt den simulierten Transport in Schicht 1100-5000m (schwarz) sowie die Aufteilung in einen oberen (1100-3000m) und unteren (3000-5000m) Anteil, wieder sind die kürzeren Zeitreihen aus RAPID.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine hochauflösende Ozean-Synthese unter Verwendung des MITgcm adjungierten Modells erstellt wurde. Nach Datenassimilation sind die Biase in Salzgehalt und Temperatur in den oberen 2000m zurückgegangen, insbesondere innerhalb des Subpolarwirbels. Vergleiche zwischen den gemessenen und simulierten wichtigsten Zeitreihen zeigten, dass die Synthese im Einklang mit den in situ Messungen (sowohl Mittelwert und Variabilität) bei saisonaler und zwischenjährlicher Variabilität steht. Vier wichtige ozeanographische Themen wurden behandelt, von denen nur das Letztere oben exemplarisch dargestellt wurde:

- Die simulierten positiven Trends des Wärme- und Frischwassergehalts im Nordatlantik stehen im Einklang mit den jüngsten ARGO-basierten Schätzungen von Ivchenko et al. (2012);
- Der gesamte Austausch dichten Wassers über den Grönland-Island-Schottland-Rücken beträgt in Übereinstimmung mit den Beobachtungen in den Synthese ~ 6 Sv. Als Reaktion auf Variationen in der Bildung von dichtem Wasser in den östlichen Becken (2-3 Sv) ändert sich der Import aus der Arktis (2-4 Sv) und/oder das Reservoir an dichtem Wasser.
- LSW Bildung in der Synthese variiert von 2 bis 4 Sv während der 2000er Jahre. Die simulierten Transporte des DWBC bei 53°N und bei 47°N sind vergleichbar mit den Messungen von Fischer et al. (2010) und C. Mertens (pers. comm.)
- Die simulierte MOC bei 27°N und seine Komponenten vergleichen sich sehr gut mit den RAPID Schätzungen (Rayner et al., 2011). Der sehr geringe Wert der MOC im Winter 2009/2010 (McCarthy et al., 2012) wurde durch einen niedrigen Wärmetransport begleitet. Die Ursache war ein ungewöhnlich schwacher nordwärtiger Ekman Transport zusammen mit einer Verstärkung des südwärtigen Transports des oberen Ozeans.

Literatur

- Fischer et al. (2010): Interannual to decadal variability of outflow from the Labrador Sea, GRL, 37, L24610.
- Ivchenko et al. (2012): Variability of heat and salinity content in the North Atlantic over the last decade, <http://www.noc.soton.ac.uk/ooc/PROJECTS/MONACO>

McCarthy et al. (2012): Observed interannual variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N, GRL, 39, L19609, doi: 10.1029/2012GL052933.

Rayner et al. (2011): Monitoring the Atlantic meridional overturning circulation, DSR II, 58, 1744-1753.

Zu Aufgabe 1 (AP 4.3): Wechselwirkungen zwischen Atlantik und Nordwesteuropäischem Schelfmeer unter Verwendung realistischer Randbedingungen im Bereich der Schelfkante

Die Anpassung des Modells HAMSOM an die Nordsee-Region konnte zu Beginn des Projektes wie geplant abgeschlossen werden. Die Topographie ist in Abb. 6 dargestellt. Die roten Punkte kennzeichnen hierbei die Eintragspositionen für Frischwasser an Flussmündungen bzw. an Fjordeingängen im Bereich der norwegischen Küste. Die Auflösung des Modellgebietes beträgt ca. 3 km mit 21 Modellschichten. Um mit dieser feinen Auflösung Langzeit-Simulationen durchführen zu können, musste der HAMSOM-Code für den neuen Hochleistungsrechner am DKRZ, die IBM-Power6, optimiert werden. Hierzu erfolgte eine Parallelisierung des Codes, wobei die Kommunikation der einzelnen Prozessoren mit Hilfe vom MPI erfolgte. Außerdem musste die gesamte Array-Verwaltung in HAMSOM umgestellt werden, um einen optimalen Durchsatz des CPU Caches zu erzielen.

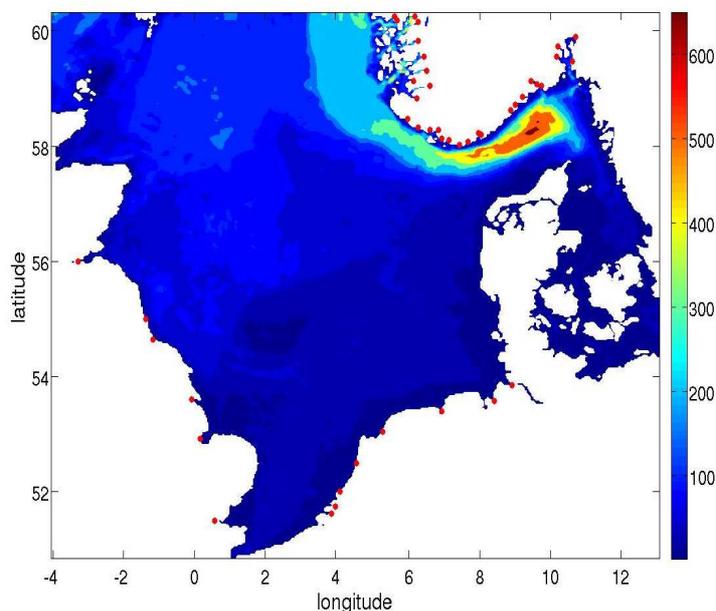


Abb. 6: Nordsee-Modelltopographie (m), rote Punkte kennzeichnen Frischwassereintragsorte

Durchführung der Modellvalidation

Eine erste Langzeitsimulation über 60 Jahre von 1948 bis 2007 konnte im ersten Projektjahr durchgeführt werden. Um die Qualität der Simulationsergebnisse zu überprüfen, wurde eine stichprobenartige Validation der Modellergebnisse anhand von Beobachtungen durchgeführt. Hierzu zeigt Abb. 7. einen Vergleich der Oberflächentemperaturen zwischen BSH-Beobachtung und HAMSOM-Ergebnis für Januar 2002 sowie für Juli 2002. Der Vergleich zeigt, dass HAMSOM sowohl im Sommer als auch im Winter in der Lage ist, die beobachteten Temperaturen zu reproduzieren. Das betrifft zum einen die allgemeinen Strukturen und Gradienten, aber auch die Absolutwerte, die sehr gut getroffen werden. Ein entsprechender Vergleich für den Oberflächensalzgehalt, ebenfalls für Winter und Sommer 2002, zeigt auch für diesen Parameter eine befriedigende Übereinstimmung von Beobachtungen und Simulation. Allerdings wachsen die Abweichungen zum Atlantik und zur Ostsee hin an, was auf Schwächen in der alten Formulierung der offenen Randbedingungen hindeutet. Hier zeigt sich deutlich, dass bezüglich der Randbedingungsformulierung noch Verbesserungsbedarf besteht. Unter Berücksichtigung der hier gesammelten Erkenntnisse erscheint die im Antrag formulierte Suche nach verbesserten Randbedingungen von großer Bedeutung für die Nordseemodellierung zu sein, insbesondere in Hinblick auf den nördlichen Eingangsbereich der Nordsee.

Test verschiedener Modellkopplung-Algorithmen

Zu Beginn des Projektes wurden weiterhin Fallstudien mit verschiedenen Kopplungsalgorithmen durchgeführt. Hierfür wurde das HAMSOM-Modell auf eine Boxtopographie angepasst, die eine konstante Wassertiefe von 100 m und vier offene Ränder aufweist. Es handelt sich hierbei um ein Modellsystem, bei dem ein kleineres Modell in ein Modell genestet wurde, welches eine größere

Region abdeckt. An den offenen Rändern des inneren Modells werden die Wasserstände, Temperaturen und Salzgehalte des übergreifenden Modells vorgeschrieben. Um keine Interpretationsprobleme in Bezug auf eine unterschiedliche Auflösung zu bekommen, sind sowohl die horizontale als auch die vertikale Auflösung von innerem und äußerem Modell identisch. Durch Verwendung dieser speziellen künstlichen Konfiguration ist es möglich, auf sehr einfache Weise die Güte der Kopplung des inneren Modells an das äußere Modell zu überprüfen. Bei einer optimalen Kopplung wären keine Unterschiede zwischen den Verteilungen von Parametern (z.B. Temperatur) im Gebiet des inneren und im gleichen Gebiet des äußeren Modells zu erkennen.

Abb. 8 zeigt diesen Vergleich für die Temperaturverteilung nach 2500 Stunden Simulation mit einem Südwind der Stärke 5 m/s. Das obere Bild zeigt die Verteilung für das größere Modellgebiet, wobei die Region des inneren Modells durch die schwarz umrandete Box gekennzeichnet ist. In der unteren Reihe ist in der Mitte die Verteilung in dieser Box noch einmal vergrößert dargestellt, um einen optimalen Vergleich zu ermöglichen. In der Abbildung links ist das Ergebnis des inneren Modells mit der ursprünglich in HAMSOM verwendeten Randwertformulierung dargestellt. Demgegenüber ist rechts die Verteilung dargestellt, die sich nach unseren ausführlichen Tests für den optimal angepassten Kopplungsalgorithmus ergibt. Für letzteren Fall erkennt man eindeutig eine bessere Übereinstimmung der Strukturen zwischen großem und innerem Modell, was eindeutig auf signifikante Verbesserung der Randwertbehandlung hinweist.

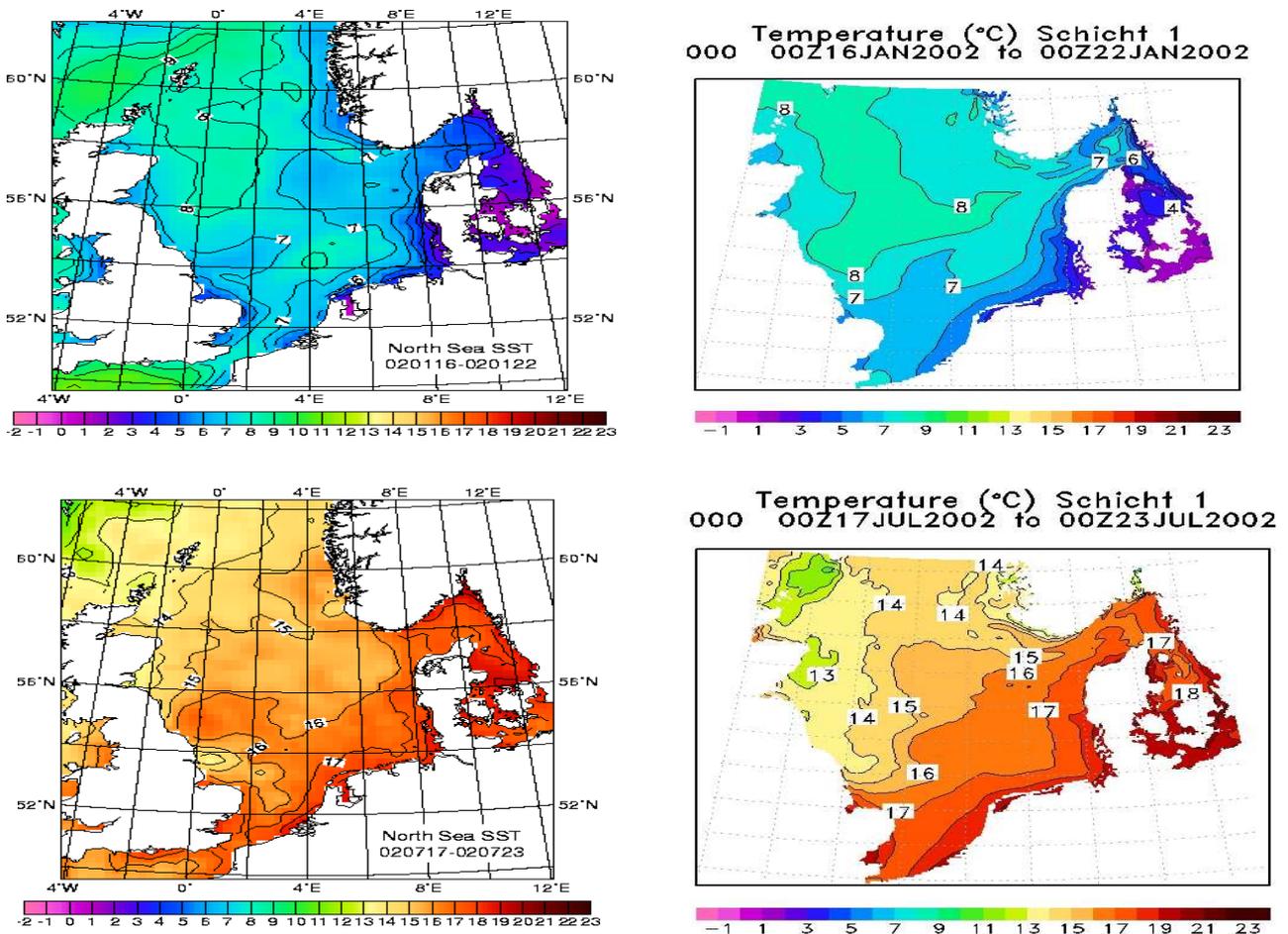


Abb. 7: Vergleich der Oberflächentemperatur (°C) für Winter (oben) und Sommer (unten). (links Beobachtung (Quelle: BSH), rechts Simulation)

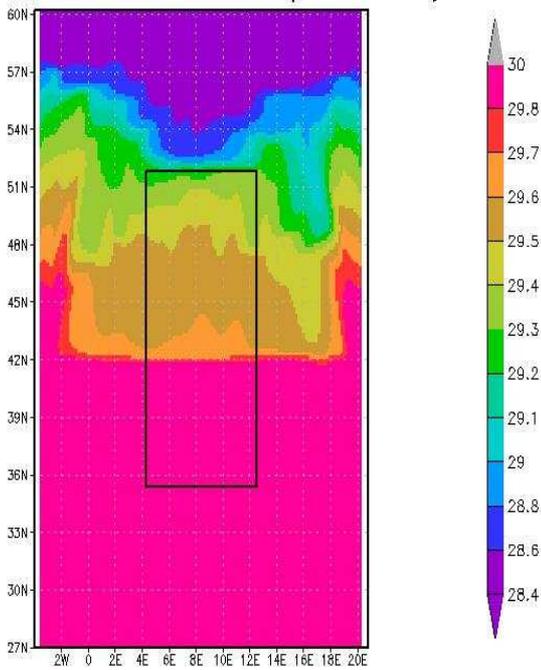
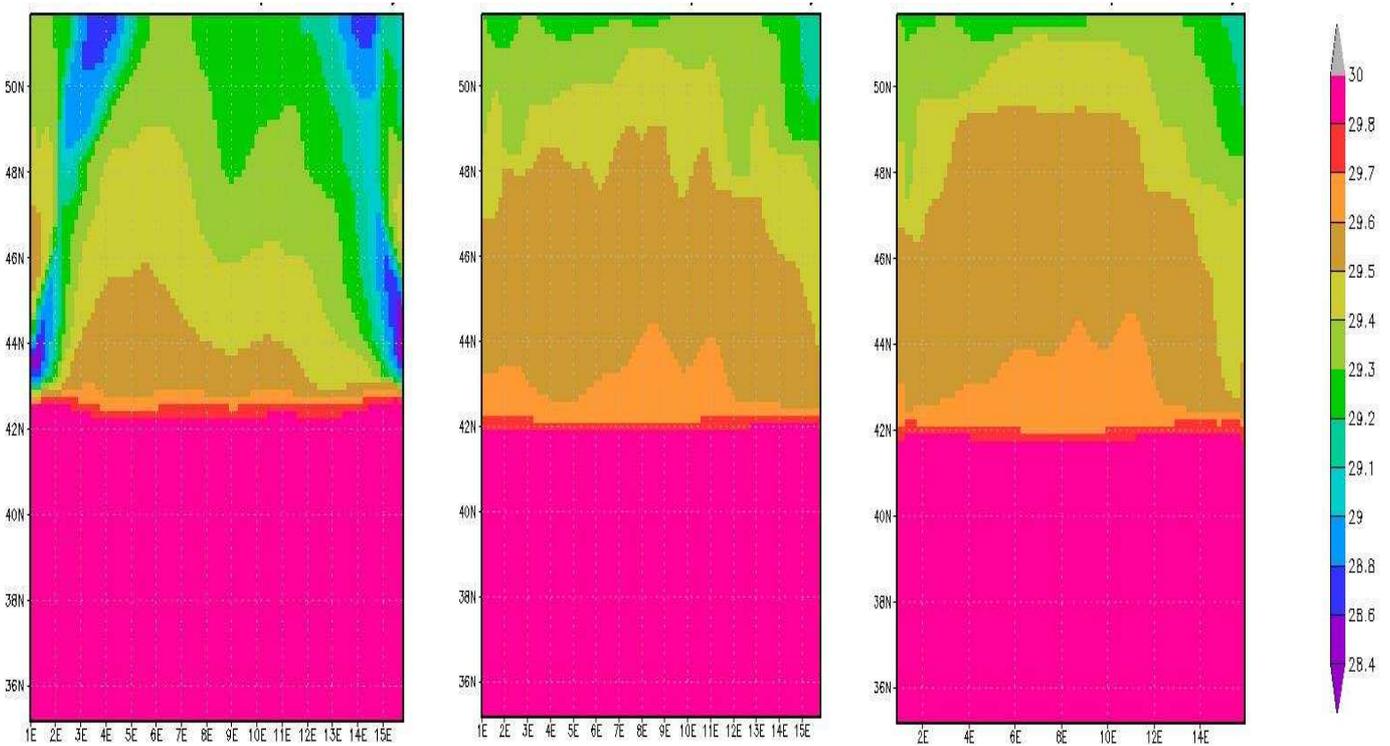


Abb.8: Temperaturverteilung (°C) nach 2500 h Simulationszeit mit Südwind der Stärke 5 m/s (oben: Region des großen Modells, schwarze Box zeigt Region des inneren Modells; unten: Ausschnitt des inneren Modells) Mitte: vergrößerter Ausschnitt aus dem großen Modell Links: alter Kopplungsalgorithmus Rechts: verbesserter und optimal angepasster Algorithmus



Bestimmung der Wärme- und Salzflüsse

Ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt im weiteren Verlauf des Projektes lag auf der Analyse der Wechselwirkungen zwischen Nordsee und Atlantik. Hierfür wurde insbesondere auf die Wärme- und Salzflüsse eingegangen, die den entscheidenden Einfluss auf die länger-periodischen Schwankungen in der Nordsee ausüben. Um die Relevanz der advektiven Salz- und Wärmeflüsse abschätzen zu können, wurden diese den lokalen Salz- und Wärmeflüssen gegenübergestellt, welche direkt an der Grenzfläche Wasser-Luft stattfinden. Über diese genannten Studien hinausgehend konnten im Projekt AP 4.3 zusätzlich erstmals die advektiven Wärmeflüsse quantitativ mit hinreichender Genauigkeit erfasst werden. Für die gleichen Monate wie für die lokalen Wärmeflüsse sind dementsprechend in Abbildung 9 die advektiven Wärmeflüsse dargestellt, welche über die gesamte Wassersäule vertikal integriert wurden. Es zeigt sich, dass der advektive Wärmefluss gegenüber dem lokalen Wärmefluss weitgehend zu vernachlässigen ist. Während ersterer in den

Hauptsaisons, Größenordnungen zwischen 100 und 200 W/m² aufweist, erreichen die advektiven Wärmeflüsse mit wenigen Ausnahmen lediglich Werte zwischen -50 und +50 W/m², d.h., sie erreichen nur ca. 25% der lokalen Wärmeflüsse.

In AP 4.3 konnte jetzt quantitativ gezeigt werden, dass der Wärmefluss in der Nordsee im Wesentlichen durch lokale Prozesse gesteuert wird und der advektive Transport für den Wärmefluss nur eine untergeordnete Rolle spielt. Im Gegensatz dazu ist für den Salzgehalt der Nordsee bekannt, dass er weitaus konservativere Eigenschaften aufweist, d.h., er unterliegt während des Transports in der Nordsee weniger starken zusätzlichen meteorologisch bedingten Einflüssen, da Niederschlag und Verdunstung sich weitgehend kompensieren, was bereits Schott (1966) gezeigt hat. Um den Unterschied zu den Wärmeflüssen besser herauszuarbeiten, wurden in AP 4.3 erstmals die Salzflüsse näher analysiert. Es zeigt sich eine relativ geringe saisonale Variabilität mit geringsten negativen Salzflüssen (Frischwassereintrag) im März, bevor die Schneeschmelze einsetzt. Dieses deutet darauf hin, dass sich die generellen Muster von Verdunstung und Niederschlag sowie von Flusseinträgen im Jahresverlauf nicht grundlegend ändern. Wiederum wurde dem lokalen Salzfluss der vertikal integrierte advektive Salzfluss gegenübergestellt. Im Gegensatz zum Wärmefluss liefert der advektive Salzfluss den dominanten Beitrag zu den durch Salzflüsse verursachten Salzgehaltsänderungen in der Nordsee. Die advektiven Flüsse erreichen Werte zwischen -8 und +4 *10⁻⁶ psu/m², was um ca. eine Größenordnung über den lokalen Salzflüssen liegt. Letztere sind somit nahezu zu vernachlässigen. Auch in diesem Fall zeigen die advektiven Salzflüsse keine ausgeprägte saisonale Variabilität, was auf saisonale Beständigkeit der Strömungs- und Salzgehaltsverteilungsmuster hindeutet. Die gesamte westlich Nordsee ist geprägt von einem positiven advektiven Salzfluss, während in der östlichen Nordsee ein negativer Salzfluss vorherrscht. Hier zeigt sich klar das Signal des einströmenden salzreicheren Atlantikwassers entlang der britischen Küste sowie der Ausstrom von Wassermassen, die durch Flusseinträge beeinflusst sind, im Bereich der östlichen Nordsee.

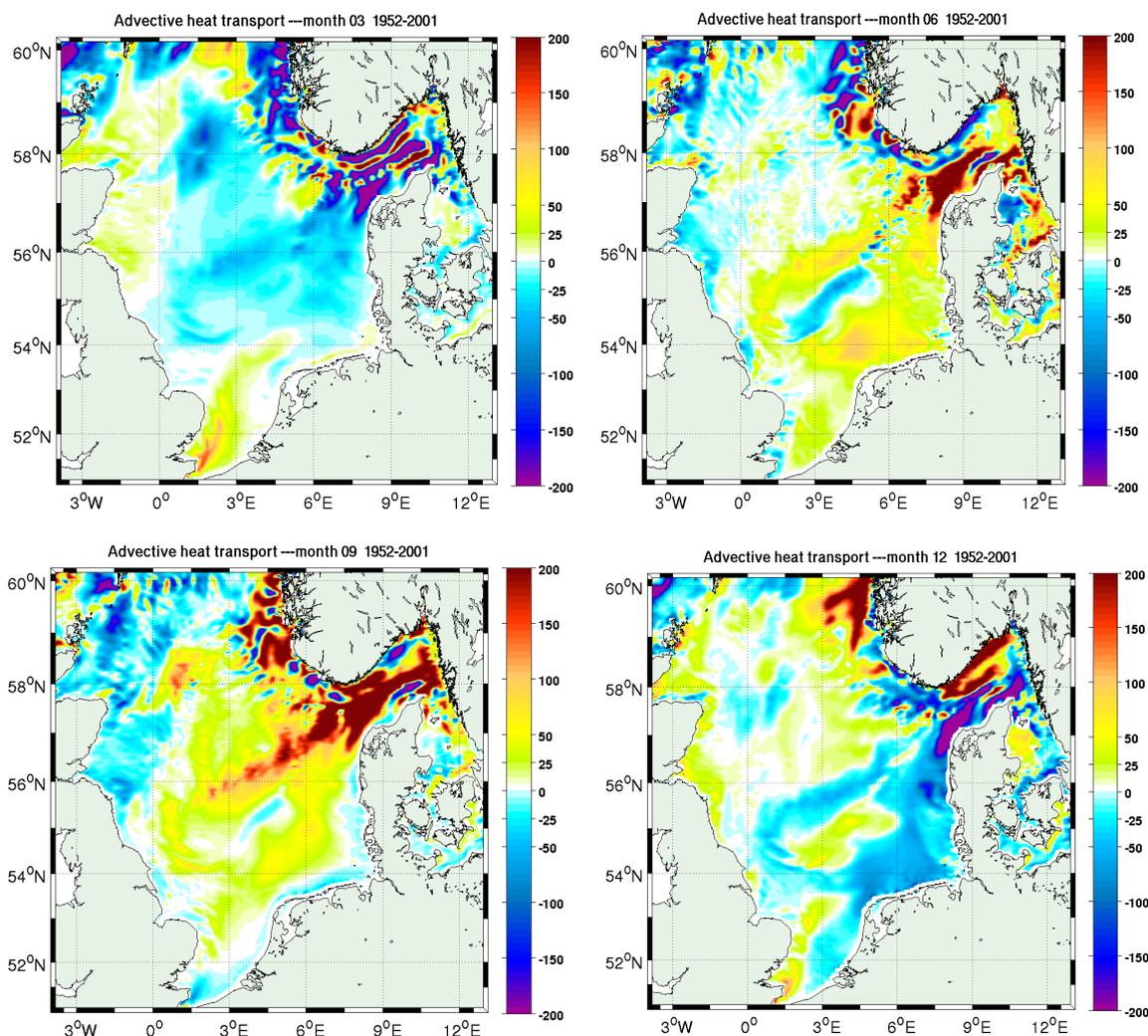


Abb. 9: Vertikal integrierter advektiver Wärmefluss (W/m²) als klimatologisches Monatsmittel gebildet über die Jahre 1952-1982, a) März, b) Juni, c) September, d) Dezember.

Literatur

Bennett, A.F. and P.C. Macintosh (1992): Open ocean modeling as an inverse problem: Tidal theory. JPO 12, 1004-1018.

Zhang and Marotzke (1999): The importance of open-boundary estimation for an Indian Ocean GCM-data synthesis. Journal of Marine Research 57 (2): 305-334.

Zur Aufgabe der Koordination

Die Koordination war für drei Aufgabenbereiche verantwortlich: a) Öffentlichkeitsarbeit, b) Koordinationstätigkeiten inkl. Veranstaltungsplanung und c) Übersicht hydrographischer Daten im Atlantik

a) Öffentlichkeitsarbeit: Das Nordatlantik-Projekt II wurde auf der neu erstellten Webseite <http://nordatlantik.zmaw.de> präsentiert und ständig aktualisiert. Ein Schwerpunkt 2011-2012 war die Erstellung einer Broschüre „Klimaforschung im Ozean - Veränderte Ozeanströmungen und zukünftiges Klimageschehen“, welche die Bedeutung und Auswirkungen der veränderlichen Zirkulation (mit Fokus auf den Atlantik) behandelt und neben Anwenderbeispielen vor allem auch Herausforderungen in der Infrastruktur und somit Herausforderungen an die Forschung insgesamt auf diesem Gebiet für die nächsten Jahre zeigt. Die Broschüre wurde als BMBF Broschüre gedruckt und im September 2012 im Rahmen einer internationalen Veranstaltung (siehe Punkt b) veröffentlicht. Eine englische Übersetzung (noch nicht im Druck) wurde von der Koordination angefertigt. Im Rahmen der internationalen Abschlusskonferenz des NA II Projektes in Zusammenarbeit mit EU THOR im September 2012 wurden in einer deutschsprachigen Auftaktveranstaltung “Stand der deutschen Meeresforschung” Politik, Wissenschaft und Presse eingeladen, das Thema zu erörtern. Pressemitteilungen, sowie Beiträge in Print- und Funkmedien zeugen vom großen Interesse an diesem Thema (siehe <http://nordatlantik.zmaw.de/> unter Medien).

b) Projektkoordination, d.h. Unterstützung des Verbundes bei Berichten, Anträgen und Veröffentlichungen, Veranstaltungsplanung: Ein Schwerpunkt in NAII war die Vorbereitung des Verbundes auf ein neues Verbundprojekt: RACE (Regional Atlantic Circulation and Global Change). Dazu wurde von der Steuergruppe im Vorfeld beim BMBF durch Präsentation aktueller Arbeiten und neuer Strategien das neue Konzept für ein mögliches Folgeprojekt erörtert. Die Koordination hat aktiv die Antragsteller unterstützt und begleitet. Die Begutachtung des Projektes war erfolgreich und RACE startete im Oktober 2012, zunächst für 3 Jahre. Weiterhin unterstützt die Koordination die Verbundmitglieder bei Konferenzen und Meetings, sowie bei der Berichtsschreibung (Zwischen- und Abschlussberichte) durch Vorgabe der Templates und wichtiger Informationen und zeigte sich verantwortlich für die pünktliche Übergabe ans PTJ. Während der 2. Förderphase wurden mehrere Steuergruppenmeetings und 3 Statusseminare organisiert. Die Vorträge und Poster sind auf den internen Seiten des Projektes abgelegt. In Zusammenarbeit mit dem Projekt EU THOR arbeitete die Koordination ca. ein Jahr an der Organisation der gemeinsamen Abschlusskonferenz „North Atlantic Climate Variability“ der Projekte EU THOR und BMBF Nordatlantik vom 24.-26. September 2012. Die Konferenz brachte über 150 internationale Wissenschaftler und Politiker zusammen. Die Koordination organisierte eine Beteiligung des BMBF und der Presse (Pressekonferenz) mit entsprechender Öffentlichkeitsarbeit.

c) Datensammlung für den (Nord-) Atlantik: Eine Schwerpunktarbeit der Koordination in NAII war die Erstellung einer webbasierten Datenübersicht über hydrographische Datenquellen im Nordatlantik (CTD, Moorings, etc.), d.h. die Darstellung/Visualisierung dieser Daten, möglichst umfassend und für den Nutzer interaktiv. Die Webseite ist online verfügbar und für erste Datensätze (Schiffsreisen aus Nordatlantik und THOR, Argos, Moorings und Drifter) anwendbar. Die Aufbereitung der Datensätze sowie die Programmierung zur Darstellung der Datensätze für den Mapserver erfolgten durch die Koordination. Ein von der Koordination erstellter User Guide ermöglicht eine einfache Handhabung des Programms und schnellen Zugriff des Nutzers auf die Informationen (siehe Zwischenberichte der Koordination). Es können örtliche und zeitliche Abfragen, sowie Abfragen der Daten nach einzelnen Projekten erstellt werden.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.3 Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgegeben, und zwar zum größten Teil für die Beschäftigungen der wissenschaftlichen Mitarbeiter Matthias Köller und Katrin Latarius. 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), zwei akustische Auslöser sowie drei Microcats zur Messung von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit. Diese wurden in der Dänemarkstraße und im Färöer-Bank-Kanal eingesetzt. Das bewilligte Verbrauchsmaterial und die Reisemittel wurden überwiegend zur Durchführung der Expeditionen verwendet.

4.1 Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgeben, und zwar zum größten Teil für die Beschäftigung der wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Weiqiang Wang und Dr. Nuno Serra, dem im November 2011 Dr. Chuanyu Liu nachfolgte. Mit ihm konnte ein Wissenschaftler eingestellt werden, der eine Expertise in Datenassimilation sowie bei der Analyse von Modelldaten hat.

4.3 Die für Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgeben, und zwar für Herrn Xiping Chen von November 2009 bis Juli 2012.

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 und es haben sich auch keine unerwartet eröffnet. Das Projekt soll jedoch zu einer operationellen Anwendbarkeit im Rahmen des BSH und Climate Service Centers (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

Berx, B., B. Hansen, S. Østerhus, K. M. Larsen, T. Sherwin, and **K. Jochumsen** (2013): Combining in-situ measurements and altimetry to estimate volume, heat and salt transport variability through the Faroe Shetland Channel. *Ocean Sci. Discuss.*, 10, 153-195, doi: 10.5194/osd-10-153-2013.

Chen, X. C. Liu, K. O'Driscoll, B. Mayer, J. Su, **T. Pohlmann** (2013): On the nudging terms at open boundaries in regional ocean models, *Ocean Modelling* (accepted).

Chen, X., K. O'Driscoll, B. Mayer, J. Su, M. Mathis, **T. Pohlmann** (2013): The role of surface and advective heat and salt fluxes in the variability of North Sea temperature and salinity, *Journal of Marine Systems* (submitted).

Darelius, E., I. Fer, and **D. Quadfasel** (2011): Faroe Bank Channel Overflow: Mesoscale Variability. *J. Phys. Oceanogr.*, 44(11), 2137-2154, doi: 10.1175/JPO-D-11-035.1.

Fer, I., **G. Voet**, K. S. Seim, B. Rudels, and **K. Latarius** (2010): Intense mixing of the Faroe Bank Channel overflow. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L02604, doi: 10.1029/2009GL041924.

Gouretski V., J. Kennedy, T. Boyer and **A. Köhl** (2012): Consistent near-surface ocean warming since 1900 in two largely independent observing networks, submitted to *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2012GL052975.

Jochumsen, K., D. Quadfasel, H. Valdimarsson and S. Jonsson (2012): Variability of the Denmark Strait Overflow: moored time series from 1996 – 2011, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2012JC008244.

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.**, F. Siegmund and **D. Stammer** (2012): Impact of Assimilating Bottom Pressure Anomalies from GRACE on Ocean Circulation Estimates, *J. Geophys. Res.*, 17, doi: 10.1029/2011JC007623.
- Köller, M., R. H. Käse, P. Herrmann** (2010): Interannual to multidecadal variability and predictability of North Atlantic circulation in a coupled earth system model with parametrized hydraulics. In: *Tellus - A*, 62, 569-578, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00450.x.
- Latarius, K. and D. Quadfasel** (2010): Seasonal to interannual variability of temperature and salinity in the Greenland Sea: heat and freshwater budgets, *Tellus* 62 (4) 497-515.
- Liu, C., A. Köhl and D. Stammer** (2012): Adjoint Based Estimation of Eddy Induced Tracer Mixing Parameters in the Global Ocean, *J. Phys. Oceanogr.* 42, 1186–1206, doi: 10.1175/JPO-D-11-0162.1.
- Mathis, M., B. Mayer, T. Pohlmann** (2013): An Uncoupled Dynamical Downscaling for the North Sea: Method and Evaluation. *Ocean Modelling* (submitted).
- O'Driscoll, K., B. Mayer, T. Ilyina, **T. Pohlmann** (2013): Modelling the cycling of persistent organic pollutants (POPs) in the North Sea system: fluxes, loading, seasonality, trends, *Journal of Marine Systems* 111-112, 69-82.
- Paka, V., B. Rudels, **D. Quadfasel** and V. Zhurbas, 2010: A new tool to measure turbulence in the deep ocean: application to the Denmark Strait overflow, *Doklady Akademii Nauk*, (in Russian).
- 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-Shetland Channel dense overflow, *Tellus*, 62, 530—550, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00445.
- Våge, K., R. Pickart, A. Sarafanov, Ø. Knutsen, H. Mercier, P. Lherminier, H. van Aken, J. Meincke, **D. Quadfasel**, S. Bacon (2011): The Irminger Gyre: Circulation, convection, and interannual variability, *Deep-Sea Res. I* 58, 590–614.
- Voet, G. and Quadfasel, D.** (2010): Entrainment in the Denmark Strait overflow plume by meso-scale eddies, *Ocean Science*, 6, 301-310
- Voet, G., D. Quadfasel, K.A. Mork, and H. Søyland** (2010): The mid-depth circulation of the Nordic Seas derived from profiling float observations, *Tellus* 62 (4), 516-529.
- Wang, W., **A. Köhl and D. Stammer** (2012): The Deep Meridional Overturning Circulation in the Indian Ocean Inferred from the GECCO Synthesis, *Dyn. of Atm. Ocean.*, 58, 44-61, doi:10.1016/j.dynatmoce.2012.08.001.

Bachelor- und Masterarbeiten, Dissertationen:

- Eisner, R.** (2012): Die Entwicklung der Deckschicht im Islandbecken und ihr Beitrag zum Nordatlantischen Tiefenwasser. Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Esser, K.** (2012): Langfristige Variabilität der Wirbelaktivität im Overflow der Dänemarkstraße. Diplomarbeit, Universität Hamburg.
- Esters, L.** (2011): Rekonstruktion von Strömungsschwankungen aus Verankerungsdaten in der Dänemarkstrasse mit Hilfe von spektralen Methoden. Bachelor-Arbeit, Universität Hamburg.
- Friedrichs, A.** (2010): Overflow in der Dänemarkstraße: Eine Vorticity Bilanz. Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 32 S.
- Friedrichs, A.** (2011): The Overflow in the Faroe Bank Channel – A Frequency Analysis. Masterarbeit, Universität Hamburg
- Kleppin, H.** (2010): Zirkulation des atlantischen Wassers in der Arktis, Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Klockmann, M.** (2010): Lagrangian study of the Subtropical-Subpolar gyres water exchange, Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Klockmann, M.** (2012): Atmospheric pressure adjustments associated with spin-down over sea surface temperature fronts - A regional and seasonal study, Masterarbeit, Universität Hamburg.
- Köhler, J.** (2011): Analysis of Sea Salinities as seen by SMOS, Masterarbeit, Universität Hamburg.
- Köllner, M.** (2012): Signal propagation and entrainment of Denmark Strait Overflow Water as measured at Ammassalik, 2007-2012. Masterarbeit, Universität Hamburg.
- Kortz, E.** (2011): Die Rolle von Wirbeln für Massen- und Wärmetransporte in Passagen. Diplom-Arbeit, Universität Hamburg.
- Latarius, K.** (2013): Über die Wassermassentransformation im Europäischen Nordmeer – Prozess-Studien und Budgets, Dissertation, Universität Hamburg, 170 S.
- Moritz, M.** (2011): Der Einfluss mesoskaliger Wirbel auf Strömungsmessungen des Overflows in der Dänemarkstrasse. Bachelorarbeit, Universität Hamburg.

- Müller, V.** (2011): Freshwater balance in the western tropical Atlantic, a model study, Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Paulsen, H.** (2011): Entstehungsmechanismen der Nordbrasilstromringe, Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Scharffenberg, M.** (2010): The large-scale geostrophic flow-field and eddy variability as seen from the TOPEX/Poseidon and Jason-1 Tandem Mission, Dissertation, Universität Hamburg.
- Schnurr, S. M.** (2012): Distribution of selected Munnopsidae (Crustacea, Isopoda, Asellota) species around Iceland linked to long-term oceanographic data. Master-Arbeit, Universität Hamburg.
- Slama, T.** (2012): Rekonstruktion von hydrografischen Profilen anhand von PIES Daten. Bachelorarbeit, Universität Hamburg.
- Voet, G.** (2010): On the Nordic Overturning Circulation. Dissertation, Universität Hamburg, 97 S.

Veröffentlichungen in Vorbereitung:

- Chen, X., N. Narayan, K. O'Driscoll, B. Mayer, J. Su, **T. Pohlmann** (2013): The influence of the North Atlantic Oscillation on the sea-level of the North Sea: the steric effects due to temperature and salinity, Geophysical Research Letters.
- Fischer, J., J. Karstensen, R. Zantopp, M. Visbeck, A. Biastoch, E. Behrens, C. Böning, **D. Quadfasel**, **K. Jochumsen**, H. Valdimarson, S. Bacon, P. Holliday, S. Dye, M. Rhein, und C. Mertens (2013): Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic.
- Käse, R.H.** und **N. Serra** (2013): The effect of wind and buoyancy forcing on Arctic dense water exchange through Fram Strait.
- Käse, R.H., N. Serra, G. Voet, D. Quadfasel** und **C. Rodehacke** (2013): The overflow in the western channel of the Iceland-Faroe Ridge (Revidierte Fassung nach Einreichen bei J. Geophys. Res. Oceans)
- Latarius, K.** und **D. Quadfasel** (2013): The Development of hydrography in the deep basins of the Nordic Seas on seasonal to decadal time scales.
- Latarius, K.** und **D. Quadfasel** (2013): Contribution of the deep basins of the Nordic Seas to the water mass transformation in the Arctic Mediterranean: Analyses of heat and freshwater budgets.
- Liu C., **A. Köhl** and **D. Stammer** (2013): Interpretation of Isopycnal Layer Thickness Advection in Terms of Eddy–Topography Interaction.
- Mathis, M., **Pohlmann, T.** (2013): Projected Forecast of Hydrodynamic Conditions in the North Sea for the 21st Century.
- Mathis, M., **Pohlmann, T.** (2013): Spatial Correlation Patterns of the General Circulation and Sea Water Temperature in the North Sea.
- Wang, W., **N. Serra, A. Köhl** and **D. Stammer** (2013): Reconstructions of sea level variations from Argo profiles.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Nordatlantik II – 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: Ursachen und regionale Signaturen in wirbelauflösenden Modellen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Jürgen Fischer Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Arne Biastoch Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Mojib Latif Dr. Marcus Dengler Prof. Dr. C. Böning	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2012
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2013
	7. Form der Publikation Schlussbericht
	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	10. Förderkennzeichen *) 03F0605B
	11. Seitenzahl 16
	12. Literaturangaben 56 (44 Veröffentlichungen)
14. Tabellen 1	15. Abbildungen 10
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Die Kieler Arbeitsgruppen haben sichtbare Beiträge zu den ersten vier Aspekten des Vorhabens geleistet. Es wurde das quantitative Verständnis von Schlüsselprozessen in Schlüsselregionen des Atlantischen Ozeans verbessert. Hochauflösende Ozeanmodelle wurden hinsichtlich saisonaler bis dekadischer Zirkulationsänderungen analysiert und deren Bedeutung für die klimarelevanten Prozesse der thermohalinen Zirkulation studiert. Intensive Feldbeobachtungen wurden zum einen 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. Hier vereinigen sich die verschiedenen Komponenten des Nordatlantischen-Tiefenwassers zum tiefen westlichen Randstrom (DWBC); und das 53°N Observatorium erfasst Prozesse und klimatische Bedingungen seit den späten 90er Jahren. Diese Beobachtungen dienen dazu, mögliche Schwankungen der thermohalinen Zirkulation zu dokumentieren. Die Kieler Beobachtungen, sowie unsere Modellsysteme und Modellstudien sind 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 II 1.1 The role of the freshwater budget for the future evolution of the thermohaline circulation: signal detection. 1.2 The role of the tropical 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 Variability of the thermohaline circulation: origin and regional signatures in eddy-resolving models		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Jürgen Fischer Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Arne Biastoch Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Mojib Latif Dr. Marcus Dengler Prof. Dr. C. Böning	5. end of project 09/30/2012	6. publication date 03/31/2013
8. performing organization(s) (name, address) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	7. form of publication Final Report	
	9. originator's report no.	
	10. reference no. 03F0605B	11. no. of pages 16
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references 56 (44 publications)	14. no. of tables 1
16. supplementary notes	15. no. of figures 10	
	17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>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. High-resolution ocean models were analyzed with regard to seasonal to decadal circulation changes and their relevance for the climatic important processes of the thermohaline circulation. 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 exit of the Labrador Sea near 53°N. Here, the components of the North Atlantic Deep Water merge into the deep western boundary current (DWBC). The 53°N moored observatory documented processes and climate signals since the late 90ies. In collaboration with the groups in NAII and other national and international efforts, the field work carried out by the Kiel working groups and modeling provides a significant contribution toward a sustainable regional ocean-climate analysis system.</p>		
19. keywords Ocean Circulation, MOC, Climate, Labrador Sea		
20. publisher	21. price	

BMBF-Verbundvorhaben „Nordatlantik“

Abschlussbericht der Teilprojekte am GEOMAR

- 1.1 Die Bedeutung des Süßwasserhaushalts für die zukünftige Entwicklung der thermohalinen Zirkulation (Antragsteller: M. Latif)
- 1.2 Rolle des äquatorialen Atlantiks als Schlüsselregion für Klimaschwankungen im atlantischen Raum (Antragsteller: P. Brandt, M. Latif, M. Dengler, N. Keenlyside)
- 2.2 Schwankungen der tiefen Randstromzirkulation am Ausgang der Labradorsee (Antragsteller: M. Visbeck, J. Fischer)
- 3.2 Schwankungen der thermohalinen Zirkulation: Ursachen und regionale Signaturen in wirbelauflösenden Modellen (Antragsteller: C. Böning, A. Biastoch)

I.1 Aufgabenstellung

Die Fragestellungen wurden mit einer Kombination von Klima- (A1.1) und hochauflösender Ozeanmodellierung (A3.2) sowie durch Beobachtungsprogramme (A1.2 und A2.2) in Schlüsselregionen bearbeitet.

Die Entwicklung des Beobachtungs- und Vorhersagesystems zum Zustand der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik setzt ein verbessertes Verständnis der steuernden Prozesse in der Atmosphäre und im Ozean voraus. In NAII, A1.1 sollte untersucht werden, inwieweit man bereits ein anthropogenes Signal in der meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik (AMOC) vor dem Hintergrund der natürlichen Variabilität erkennen kann bzw. ab wann man damit im Laufe des 21. Jahrhunderts rechnen kann.

Beobachtungen der Zirkulationsschwankungen in Bezug auf Klimavariabilität und MOC Variationen waren der Fokus der Teilprojekte A1.2 (tropischer Atlantik) und A 2.2 (Ausgang der Labradorsee). Im tropischen Atlantik (bei 23° W) standen Untersuchungen zu Wechselwirkungen der äquatorialen Zirkulation mit Oberflächentemperatur und Wärmebilanz im Vordergrund. Verankerungen, Schiffsbeobachtungen und Gleiter waren die eingesetzten Instrumente zur Bestimmung des Wärme- und Frischwasserbudgets.

Im TP A2.2 wurde das 53° N-Observatorium am Ausgang der Labradorsee betrieben, um Exportschwankungen des Tiefenwassers als Teil der MOC auf Zeitskalen von Jahren bis dekadisch zu quantifizieren. Schiffsbeobachtungen und Analysen hochauflösender Modelldaten ergänzten die Eulerschen Beobachtungen des tiefen Labradorstromes.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten in NAII waren die Untersuchungen von raum-zeitlichen Strukturen der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) mittels Ozeanmodellierung. Während in früheren Studien vor allem die Auswirkung thermohaliner Prozesse im subpolaren Nordatlantik im Vordergrund stand, deuten aktuelle Ergebnisse auf zusätzliche Einflüsse dynamischer Prozesse im Agulhasregime hin, die bis in den tropischen Nordatlantik hinein reichen.

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

Für die Arbeiten zum Projekt (A1.1) bestand direkter Zugriff auf die Modellergebnisse der PCMDI-IPCC Datenbank. Zusätzlich wird am GEOMAR das Kiel Climate Model (KCM) erfolgreich betrieben und weiterentwickelt. In der Arbeitsgruppe bestanden sowohl technisch als auch wissenschaftlich langjährige Erfahrungen mit der Analyse von Simulationsergebnissen aus gekoppelten Klimamodellen.

Dies gilt auch für die Beobachtungsprogramme (A1.2 und A2.2), wo die technisch wissenschaftliche Expertise wichtige Voraussetzung war. Neuartige autonome Instrumente (Glider, profilierende CTD's) sind neben den klassischen Verankerungen Teil des Instrumentariums das hier betrieben wurde. Daneben gibt es einen großen und vielfältigen Instrumentenpark mit dem die anfallenden Fragen angegangen wurden.

Die Forschungsprojekte sind ein zentraler Bestandteil des internationalen CLIVAR Programms und dabei insbesondere Bestandteil des „Tropical Atlantic Climate Experiments“ (TACE), ein von CLIVAR befürwortetes Programm. Der Projektleiter (A1.2) ist Leiter der CLIVAR-TACE Beobachtungsarbeitsgruppe. Die subpolaren Untersuchungen sind ebenfalls in internationale Programme eingebunden und dies ist eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Projekte.

Besondere Voraussetzungen für das Gesamtprojekt und die Beobachtungsprogramme sind die hochauflösende Ozeanmodellierung (A3.2) zur Interpretation der lokalen Daten im großräumigen Kontext. Die Modellentwicklungsarbeiten waren eng verzahnt mit entsprechenden Entwicklungen auf

europäischer Ebene, insbesondere im Rahmen der DRAKKAR-Kooperation (DRAKKAR Group, 2009); die Konzeption der Modellexperimente folgte weitgehend den in der CLIVAR ‚Working Group for Ocean Modelling‘ (WGOMD) entwickelten Vorstellungen für ein international koordiniertes Ozeanmodellierungsprogramm (Co-ordinated Ocean-Ice Reference Experiments, CORE) (Griffies et al., 2009).

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Zielsetzung (A1.1) wurde, wie im Projektantrag beschrieben, erfolgreich erarbeitet. Zum Zeitpunkt der Antragstellung lagen in der PCMDI Datenbank die Modellrechnungen zu CMIP3 vor. Im Verlauf des Projektes wurde die deutlich umfangreichere Datenbank der Modellergebnisse nach dem CMIP5 Protokoll (Taylor et al., 2012) aufgebaut. Durch die parallele Bearbeitung von beiden Datensätzen konnte die Grundlage für dieses Teilprojekt deutlich ausgeweitet werden. Darüber hinaus wurde die Methodik zur Datenauswertung der Fragestellung angepasst. Hinzu kamen Simulationen mit einem globalen Ozean-Atmosphärenmodell (KCM) und deren Analyse.

Forschungsfahrten, Verankerungsauslegung und Gleitermessungen der beobachtenden Teilprojekte (A1.2, A2.2) wurden wie geplant durchgeführt, und die Ergebnisse der Analysen gingen in eine Vielzahl von Publikationen ein.

Tab. 1: Forschungsfahrten.

TP	Forschungsfahrt	Schiff	Zeitraum	Ort
2.2	MSM 12/1 (FL: Prof. Quadfasel, ZMAW)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2009	Labradorsee
1.2	M 80/1 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	Okt./Nov. 2009	Tropischer Atlantik
2.2	M 82/1 (FL: Prof. Quadfasel, ZMAW)	Meteor	Juli/ Aug. 2010	Labradorsee
1.2	MSM 18/2 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2011	Äquatorialer Atlantik
2.2	MSM 21/1 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2012	Labradorsee
1.2	MSM 22 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Maria S. Merian	Oktober/November 2012	Äquatorialer Atlantik
2.2	Mer_Met 12-05 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Maria S. Merian	Juli/August 2014	Labradorsee

Insbesondere machen Datenaufbereitung und Analysen gute Fortschritte auch über das Projektende (NA II) hinaus.

Die Modellierungsarbeiten erfolgten wie geplant auf Basis verschiedener Versionen des globalen Ozeanmodells ORCA mit Gitterauflösungen von 1/2°, 1/4° und 1/12° sowie hochauflösenden (1/10°-1/20°) Regionalkonfigurationen im Agulhasregime (AG 01) und im subpolaren Nordatlantik (VIKING20). Die regionalen Konfigurationen waren mit Hilfe eines 2-Wege Nestings in globale Modelle größerer Auflösung (1/2° bzw. 1/4°) eingebettet. Während nicht-wirbelauflösende Simulationen auf dem lokalen Vektorrechner (NEC SX9) der Universität Kiel realisiert werden konnten, wurden die aufwändigeren, höher aufgelösten Experimente auf den Höchstleistungs-Rechnersystemen des HLRS (Stuttgart), DKRZ (Hamburg) und HLRN (Hannover, Berlin) durchgeführt.

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

Seit vielen Jahren wird diskutiert, ob ein Zusammenhang der globalen Erwärmung und der Abschwächung der atlantischen Umwälzbewegung (AMOC) in den nächsten Jahrzehnten sichtbar wird. Referenzdaten der AMOC, die ein möglicherweise bereits vorhandenes anthropogenes Signal erkennen können, sind nicht vorhanden oder zu kurz (Kanzow et al. 2007). Eine besondere Schwierigkeit ist dabei die Überlagerung langfristiger MOC-Signale durch ein breites Spektrum höherfrequenter Fluktuationen infolge lokaler Windanregung oder interner Ozeandynamik. Demgegenüber stand der Konsens aus Klimamodellrechnungen, dass sich die AMOC langfristig, d. h. gegen Ende des 21. Jahrhunderts im Mittel um ca. 25%, abschwächen wird (Schmittner et al. 2005 und IPCC 2007), aber durch starke interne multi-dekadische Variabilität der AMOC (Latif et al. (2006)) maskiert sein kann. Einblicke in die Ursachen, Größenordnungen und Mechanismen von MOC-Schwankungen auf Zeitskalen von Dekaden und länger stammen daher im Wesentlichen aus Modellstudien. Dies war der Stand an den angeknüpft wurde.

Auf der anderen Seite gab es in den letzten Jahren erheblichen Wissensgewinn über die tropische atlantische Klimavariabilität; wobei aber viele Fragen weiterhin ungeklärt sind. Insbesondere ist die Ursache für die systematischen Modellfehler in der Oberflächentemperatur nicht vollständig verstanden. Seit Projektbeginn hat sich aber die Verfügbarkeit von hydrographischen und Strömungsdaten im tropischen Atlantik deutlich verbessert. Dazu beigetragen haben auch verschiedene internationale Projekte (u.a. AMMA, PIRATA) mit denen eng kooperiert wird.

Im subpolaren NA (A2.2) wurde an die Vorstudien und das Beobachtungssystem aus der NA I Phase angeschlossen. Dabei haben wir als wesentliche Ergänzung des Observatoriums bei 53° N den Tiefenhorizont des DSOW mit zusätzlichen Stationen bestückt. 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 niedriger Auflösung nur ungenügend reflektiert wird.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der gesamten Projektdauer aber auch bereits davor waren die vier Teilprojekte des GEOMAR untereinander und mit den anderen Teilprojekten des Verbundes eng verzahnt. Besonders hervorzuheben sind Synergien durch die Zusammenarbeit zwischen den beobachtenden Teilprojekten und den Modellierer-Gruppen.

Die Daten der Klimamodellrechnungen (A1.1) zum „Climate Model Intercomparison Project“ (CMIP) wurden durch das „Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison“ (PCMDI) zusammengestellt. Die Projektarbeiten entstanden in enger Kooperation mit den Projektpartnern des EU-Projekts THOR.

Kooperationen (A3.2) bestanden im Rahmen des europäischen Modellierverbundes DRAKKAR mit Kollegen am LEGI, Grenoble (B. Barnier), LOCEAN, Paris (G. Madec), IFREMER (A.M. Treguier) und NOC, Southampton (A. New). Die Konzeption koordinierter Modellierprogramme und atmosphärische Antriebsfelder (CORE) erfolgte in Zusammenarbeit mit S. M. Griffies (GFDL, Princeton), W. Large (NCAR, Boulder). Wissenschaftliche Analysen zur Tiefenwasserausbreitung erfolgten mit M. S. Lozier und S. F. Gary (Duke University).

Die Zusammenarbeit mit internationalen Beobachtungsgruppen ist ebenfalls eine wichtige Komponente; im tropischen Atlantik (A1.2) sind das die Gruppen von: RSMAS, Miami; USA (B. Johns), verschiedene französische Institute im Rahmen von AMMA (CNRM/GAME, Météo-France/CNRS, Toulouse; Université de Toulouse, UPS, LEGOS, Toulouse; IRD, Brest/Toulouse; LOCEAN-IPSL, Université Paris), sowie dem PIRATA Konsortium (B. Bourles, IRD; R. Lumpkin, NOAA/AOML). Im subpolaren NA (A2.2) wird hauptsächlich mit Forschungsgruppen in EU-Programmen (ASOF, MERSEA, THOR) zusammen gearbeitet. Durch die thematische Einbindung hat das hier beantragte Vorhaben eine enge Beziehung zum internationalen CLIVAR.

II. Eingehende Darstellung

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

1.1 Die Bedeutung des Süßwasserhaushalts für die zukünftige Entwicklung der thermohalinen Zirkulation

Die räumlichen Zusammenhänge in der Variabilität der Ozeanoberflächentemperatur auf multidekadischen Zeitskalen beschrieben Park und Latif (2010). Hierfür wurde eine Simulation über 4500 Jahre mit dem Kieler Klimamodel (KCM) analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei den zwei führenden multidekadischen Moden, die Pacific decadal variability (PDV) und die Atlantic multidecadal variability (AMV), um *unabhängige* Phänomene in dem Modell handelt. Beide haben leicht unterschiedliche Perioden: Bei der PDV dominieren Perioden um 45 Jahre, wo hingegen die AMV eher Perioden um 60 Jahre zeigt. Die mit der Variabilität verbundenen SST Muster sind für die PDV stationär und im Falle der AMV nicht stationär.

Das Klima der nördlichen Hemisphäre ist im 20. Jahrhundert durch eine langfristige Erwärmung im Ozean und über Land gekennzeichnet. Es konnte gezeigt werden, dass ein Erwärmungssignal im Bereich des nördlichen Atlantiks bzw. im angrenzenden Bereich der Arktis zu einem bedeutenden Anteil an der Erwärmung der nördlichen Hemisphäre beiträgt. Der Antrieb durch Anomalien der Wärmeflüsse an der Ozeanoberfläche wurde auf den nördlichen Nordatlantik und auf den angrenzenden Bereich der Arktis begrenzt. Diese regional begrenzten Anomalien führen zu einem relativ starken Erwärmungssignal über die gesamte nördliche Hemisphäre. Der arktische Anteil des Antriebs spielt für die nördliche Hemisphäre eine wichtige Rolle und erklärt in unseren Experimenten bis zu 60% der Erwärmung am Boden (Semenov et al., 2010). Die Ergebnisse der Untersuchung legen nahe, dass die natürliche interne Variabilität auf multidekadischen Zeitskalen im Bereich des

Nordatlantiks und der angrenzenden Arktis einen signifikanten Einfluss auf die nördliche Hemisphäre hat und damit einen Anteil zu der beobachteten Klimaerwärmung beigetragen haben kann.

Unsere Arbeiten zum Nordatlantikprojekt führen zu zwei wesentliche Aussagen, die für die Arbeiten richtungweisend waren: Zum einen wurde gezeigt, dass die natürliche Variabilität auf multidekadischen Zeitskalen im Bereich des Nordatlantiks und der angrenzenden Arktis einen signifikanten Einfluss auf die nördliche Hemisphäre und damit einen Anteil an der zu beobachtenden Klimaerwärmung haben. Zum anderen konnten wir zeigen, dass die Prognosen der CMIP3- und CMIP5-Modellrechnungen bis zum Ende dieses Jahrhunderts die atlantische Umwälzbewegung im Ozean (AMOC) durch die Modellunsicherheit dominiert wird.

In unseren Untersuchungen haben wir die Ursachen, die zu den großen Unsicherheiten in den AMOC Prognosen führen, weiter identifiziert (Abb. 1). Die Abschätzung der Vertrauenswürdigkeit der Modellprognosen ist eine wichtige Voraussetzung, um überhaupt eine Aussage zur Änderung der AMOC zu erlauben. Die genaue Kenntnis der Antriebsmechanismen der AMOC sind weiterhin lückenhaft und Gegenstand der aktuellen Forschung. Wir haben die Sensitivität der AMOC in den verschiedenen Klimamodellen aus dem CMIP3- (21 Modelle) und CMIP5-Datensätzen (24 Modelle) gegenüber verschiedenen Schlüsselparametern untersucht. Ein möglicher Faktor für die Güte der AMOC Prognose wurde in den Unterschieden des prognostizierten Windfeldes vermutet. Der oberflächennahe Wind in der Atmosphäre ist mit der meridionalen ozeanischen Umwälzbewegung durch den Ekmantransport verknüpft. Weitere wichtige Parameter sind die Tiefe der tropische Pycnoclinen, die Tiefe der AMOC, der Süßwassertransport an der Oberfläche des Atlantiks und der meridionale Dichteunterschied im Ozean.

Es zeigt sich, dass es große Unterschiede gibt, je nachdem, ob man den mittleren Zustand der AMOC in einem Modell beschreibt oder sich auf die mögliche Änderung der AMOC in bis zum Ende des Jahrhunderts bezieht. Für den mittleren Zustand der AMOC fanden sich in den Modellen ein guter Zusammenhang zwischen dem Windfeld des südlichen Atlantiks, dem Netto-Salzeintrag im tropischen Atlantik und der meridionalen Differenz des vertikal integrierten Dichteunterschieds. Die von den Modellen unterschiedliche prognostizierte Abschwächung der AMOC steht in Relation zu der Stärke des jeweiligen Süßwassereintrags im Bereich des Subpolarwirbels und zu der meridionalen Dichtedifferenz zwischen 30°S und 75°N.

Die prognostizierte Abschwächung der AMOC wird bis zu dem Jahr 2030, mit einer Sicherheit von 95%, größer als die Unsicherheiten der Vorhersage selbst. Die Modellprognosen der CMIP5-Rechnungen deuten auf einen früheren Zeitpunkt der Signalerkennung hin, es muss aber berücksichtigt werden, dass die Anzahl der eingehenden Modellergebnisse hier geringer ist als bei den CMIP3-Rechnungen. Das maximale Signal-Rauschverhältnis bleibt auch bis zum Ende des Jahrhunderts unterhalb von 1.5.

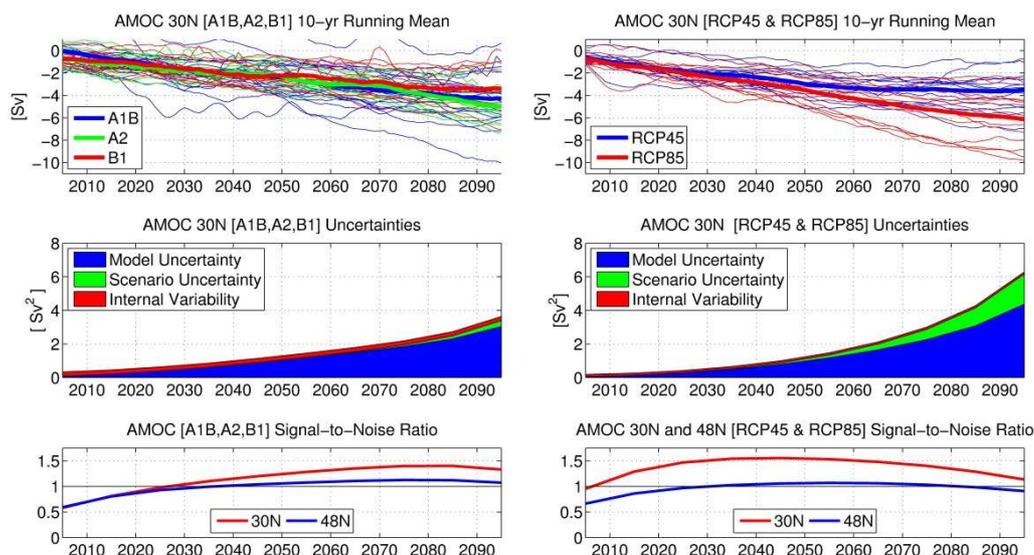


Abb. 1: Die Komponenten der Unsicherheiten in der AMOC Prognose bei 30°N aus den CMIP3- (links) und CMIP5-Rechnungen (rechts): a.) Die Zeitserien der AMOC für unterschiedliche Szenarien (dünne Linien) und für das jeweiligen Mittel aus allen Modellen (dicke Linien), b.) Die zeitliche Entwicklung der absoluten Unsicherheit der einzelnen Komponenten, c.) Die zeitliche Entwicklung des Verhältnisses der Prognoseunsicherheiten zur Änderung der AMOC.

Die meridionale Dichteverteilung im Nordatlantik ist ein weiterer wichtiger Antrieb für die AMOC. Die größten Anomalien im meridionalen Dichteprofil werden bei der Betrachtung aller Modellprognosen (CMIP3 und CMIP5) bis zum Ende des Jahrhunderts in den nördlichen Breiten und in der Arktis vorhergesagt. Das Maximum der Anomalien tritt in den obersten Schichten des Ozeans auf. Wir konnten zeigen, dass die größten absoluten Unsicherheiten in den Prognosen der Dichteänderungen räumlich sehr eng bei den größten Anomalien auftreten. Der Vergleich des Einflusses der Unsicherheiten in der Salz- und Temperaturverteilung im Ozean zeigt, dass die Unsicherheiten in der Dichteverteilung von den Unsicherheiten in der Salzverteilung fast vollständig bestimmt werden. Abbildung 2 zeigt die mittlere Verteilung der Salzgehaltsänderung über alle Modellprognosen. Die meridionale Verteilung mit dem Anstieg des Salzgehaltes in den Tropen und Subtropen und die deutliche Abnahme in den hohen Breiten deuteten darauf hin, dass die Süßwassertransporte durch die Ozeanoberfläche eine wichtige Rolle in der prognostizierten Salzgehaltsänderung spielen. Die größten Unsicherheiten in den Prognosen zum Salzgehalt treten im Ozean in den obersten 200 m nördlich von 30° N auf (Abb. 2). Der Vergleich der totalen Unsicherheit mit der Modellunsicherheit zeigt die Dominanz der Unsicherheiten aus den Modellunterschieden. In unseren Untersuchungen ist die Unsicherheit der internen Variabilität für die Prognosen der Dichteverteilung nur von geringer Bedeutung.

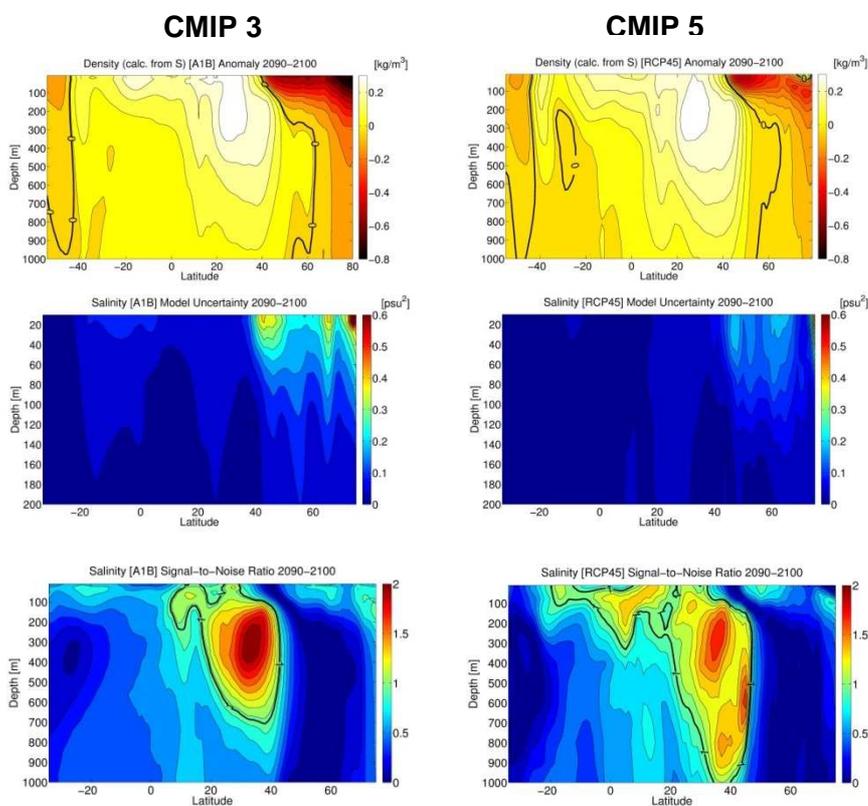


Abb. 2: Ergebnisse der Untersuchungen zum mittleren meridionalen Profil des Salzgehaltes im Atlantik in den Modellprognosen aus CMIP3 (links) und CMIP5 (rechts). Die mittlere Änderungen des Salzgehaltes aus allen Modellrechnungen (oben) und die Stärke der Unsicherheiten in den Prognosen (Mitte), sowie die meridionale Verteilung des Signal-Rauschverhältnisses (unten).

Die großen Unterschiede in der prognostizierten Dichteänderung bis zum Ende dieses Jahrhunderts sind zu einem überwiegenden Teil aus den Prognoseunsicherheiten zur Änderung des Salzgehaltes zurück zu führen. Die Salzgehaltsänderungen und die räumliche Verteilung der Extrema in den Unsicherheiten legen nahe, dass die Ursachen in der unterschiedlichen Darstellung des hydrologischen Kreislaufes der einzelnen Modelle begründet liegen.

Intensiv wurde die Rolle des Süßwassereintrag (Summe der Änderung von Verdunstung, Niederschlag und Einträge durch Flüsse sowie die Veränderungen in der Meereisbedeckung) in den Ozean untersucht. Alle Modelle zeigen, dass sich in der Zukunft der hydrologische Kreislauf der Atmosphäre im Vergleich zum heutigen Klima intensivieren wird. In Regionen nördlich von 50° N nimmt der Süßwassereintrag in den Ozean relativ zu den Verhältnissen im Jahr 2000 zu. In den Tropen verstärkt sich der mittlere Verlust an Süßwasser. Betrachtet man die Unsicherheiten in den Prognosen, so fällt auf, dass auch hier die Modellunsicherheit die dominierende Größe ist. Obwohl alle Modelle eine ähnliche Änderung prognostizieren, ist das Verhältnis der Unsicherheiten zur mittleren Änderung der

betrachteten Größe ähnlich wie bei der Prognose der Salzgehaltänderungen. Das Maximum des Signal-Rauschverhältnisses liegt bis zum Ende des Jahrhunderts unterhalb von 1.5.

Literatur

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. WG-1 Report to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kanzow, T., Cunningham, S. A., Rayner, D., Hirschi, J. J.-M., Johns, W. E., Baringer, M. O., Bryden, H. L., Beal, L. M., Meinen, C. S., and Marotzke, J. (2007): Observed flow compensation associated with the MOC at 26.5°N in the Atlantic. *Science*, 317, doi:10.1126/science.1141293.

Latif, M., C. Böning, J. Willebrand, A. Biastoch, J. Dengg, N. Keenlyside, U. Schweckendiek, and G. Madec (2006): Is the thermohaline circulation changing? *J. Climate*, 19 (18), 4631-4637.

Park, W. and M. Latif (2010): Pacific and Atlantic Multidecadal Variability in the Kiel Climate Model. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24702, doi:10.1029/2010GL045560.

Schmittner, A., M. Latif and B. Schneider (2005). Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L23710, doi:10.1029/2005GL024368.

Semenov, V., M. Latif, D. Dommenget, N. Keenlyside, A. Strehz, T. Martin, and W. Park (2010): The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, Vol. 23, 5668-5677, doi: 10.1175/2010JCLI3347.1.

Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl (2012): An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

1.2 *Rolle des äquatorialen Atlantiks als Schlüsselregion für Klimaschwankungen im atlantischen Raum*

Klimaschwankungen im tropischen Atlantik sind durch großräumige Ozean-Atmosphäre-Wechselwirkungen bestimmt. Ihre Auswirkungen erkennt man insbesondere in der tiefen atmosphärischen Konvektion über dem Ozean und den angrenzenden Kontinenten. Neben Einflüssen durch die pazifische El Niño - Südliche Oszillation (ENSO), sowie der Nordatlantischen Oszillation (NAO), wird die Klimavariabilität im tropischen Atlantik durch zwei verschiedene gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modi der Variabilität bestimmt. Der meridionale Mode ist durch meridionale Meeresoberflächentemperaturgradienten gekennzeichnet und zeigt hauptsächlich Schwankungen auf dekadischen Zeitskalen, der zonale Mode ist entsprechend durch zonale Meeresoberflächentemperaturgradienten gekennzeichnet, allerdings mit dominanten Schwankungen auf zwischenjährlichen Zeitskalen. Innerhalb von BMBF Nordatlantik konnten wir zeigen, dass auch die intrinsische Dynamik des tiefen äquatorialen atlantischen Ozeans Auswirkungen auf die SST, Wind und Niederschläge im tropischen Atlantik haben kann. Sie bildet einen 4,5-Jahre-Klima-Zyklus (Brandt et al. 2011). Insbesondere wurden vertikal alternierenden Strömungen mit kleiner vertikaler Wellenlänge, einer Periode von etwa 4,5 Jahren und Amplituden von mehr als 10 cm/s im tiefen Atlantik beobachtet. Die Energie dieser Strömungen breitet sich nach oben, in Richtung Oberfläche aus. An der Meeresoberfläche ist der 4,5-Jahre-Zyklus mit Strömungs- und Temperaturschwankungen von ca. 6 cm/s und 0,4°C, sowie mit Schwankungen von Wind und Niederschlägen verbunden (Abb. 3). Solche zwischenjährlichen Oszillationen können durch äquatoriale Beckenschwingungen beschrieben werden, die durch ost- und westwärtige Ausbreitung von hoch-baroklinen Kelvin- und Rossbywellen entlang des Äquators gekennzeichnet sind. Durch Simulationen mit einem Flachwassermodell konnten verschiedene Eigenschaften einer solchen Beckenschwingung reproduziert werden (Greatbatch et al. 2012, Brandt et al. 2012). Außerordentlich starke El Niño-Ereignisse, wie die von 1982/83 und 1997/98, verursachen Wetterkapriolen auf der ganzen Welt und haben große sozio-ökonomische Auswirkungen. Trotz erheblicher Fortschritte in unserem Verständnis dieses Phänomens, verbesserter Modelle und verbesserter Beobachtungsnetzwerke, besitzen wir nicht die Fähigkeit solche Großereignisse vorherzusagen.

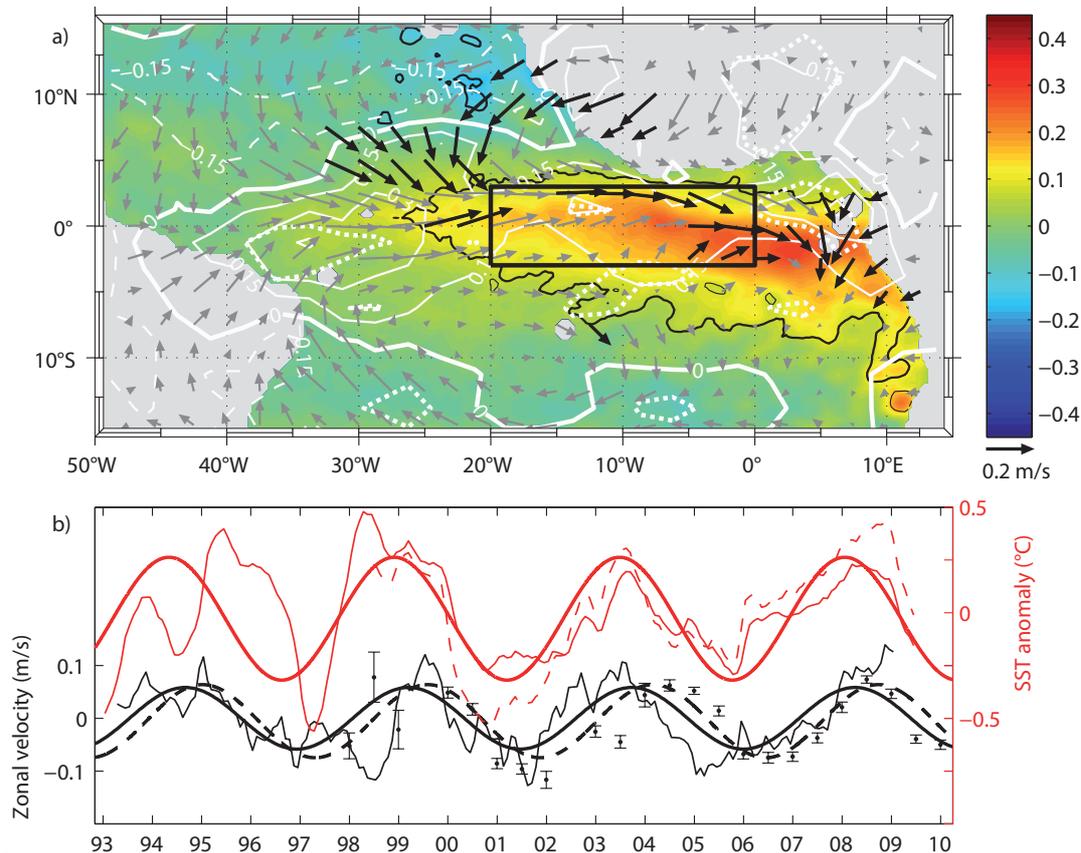


Abb. 3: Zwischenjährliche Schwankungen im tropischen Atlantik aufgrund des 4,5-Jahre-Klima-Zyklus. a) Anomalien der SST (Farben, °C), der Ob erflächenwinde (Pfeile), und des Niederschlags (weiße Konturlinien alle 0.15 mm/d, durchgezogen positiv, gestrichelt negativ) bestimmt durch eine Regression an die harmonische Anpassung der SST Anomaly (Microwave Optimally Interpolated SST), die in der markierten Box gemittelt wurden (ATL3; 3°S–3°N, 20°W–0°); signifikante Korrelationen (95%) der harmonischen Kurve mit der SST sind durch schwarze Linien, mit den Winden durch schwarze Pfeile, und mit dem Niederschlag durch weiße, gepunktete Linien gekennzeichnet. b, ATL3 SST Anomaly (Microwave Optimally Interpolated SST: rot, gestrichelt; HadISST: rot, dünn, durchgezogen) mit der 4,5-Jahre harmonischen Anpassung (rot, dick, durchgezogen), zonale Oberflächenströmungsanomalie (Äquator, 35°W–15°W: s schwarz, dünn) mit der 4,5-Jahre harmonischen Anpassung (schwarz, dick, durchgezogen), und Zonale Strömung in 1000 m Tiefe (1°S–1°N, 35°W–15°W: schwarze Punkte mit Standardfehler) mit der 4,5-Jahre harmonischen Anpassung (schwarz, dick, gestrichelt)(aus Brandt et al. 2011).

Hier konnten wir mit Hilfe von verschiedenen Modellexperimenten zeigen, dass die SST im äquatorialen Atlantik, die Vorhersage der großen El Niños über borealen Frühling hinaus, signifikant verbessert. Ursache ist der Einfluss der atlantischen SST auf die atmosphärische Zirkulation im äquatorialen Pazifik während der kritischen Entwicklungsphase von El Niño (Ding et al. 2011, Keenlyside et al. 2012). Wir haben die Auswirkungen der SST Variabilität des äquatorialen Atlantiks auf die El Niño -Vorhersage mit einem hochmodernen Klimamodell untersucht. Dabei haben wir zwei Gruppen von saisonalen Vorhersageexperimenten durchgeführt: die erste mit und die zweite Gruppe ohne Anpassung der Modell SST an die beobachtete SST in Teilen des Atlantiks. Die Ergebnisse implizieren, dass eine bessere Vorhersage der großen El Niño-Ereignissen durch eine verbesserte saisonale Vorhersage im äquatorialen Atlantik erreicht werden könnte.

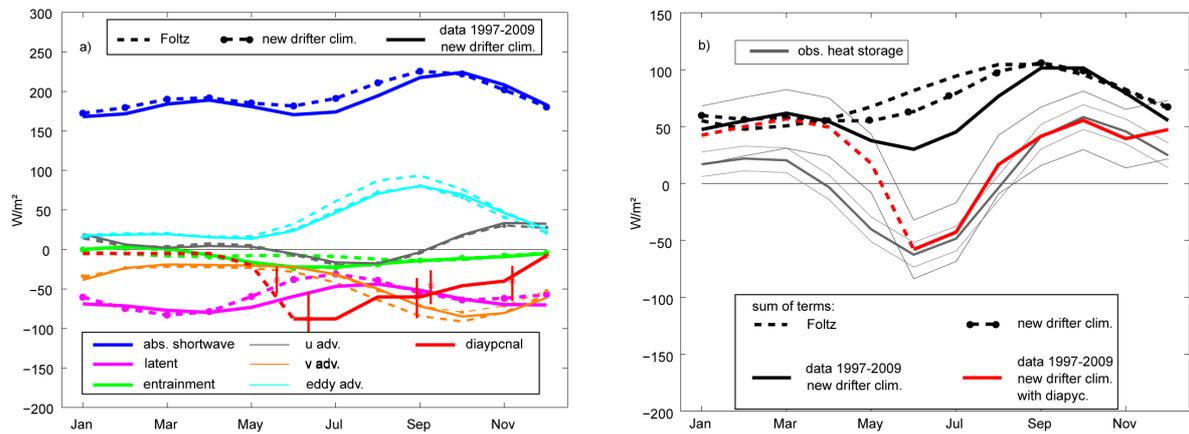


Abb. 4: a) Einzelne Terme des Wärmebudgets der ozeanischen Deckschicht im Zentrum der Kaltwasserzunge bei $10^{\circ}W, 0^{\circ}N$: gestrichelte Linien markieren die Reproduktion von Ergebnissen aus Foltz et al. (J. Geophys. Res., 2003), die mit einer geringeren Oberflächendrifterauflösung sowie mit Daten aus den Jahren 1997-2002 gewonnen wurden; Strichpunktlinien wurden berechnet mit höherer Oberflächendrifterauflösung aber ebenfalls mit Daten aus den Jahren 1997-2002; durchgezogene Linien wurden berechnet mit höherer Oberflächendrifterauflösung und mit Daten aus den Jahren 1997-2009; die roten Balken in a) geben die Vertrauensgrenze für die mittleren diapycnische Wärmeflüsse unterhalb der ozeanischen Deckschicht an, b) schwarze Linien stellen die Summe aller Terme, die zum Wärmebudget beitragen außer der diapycnische Wärmefluss, dar (Linienstile haben dieselbe Bedeutung wie in a)), rote Linie stellt die Summe aller Terme einschließlich des diapycnischen Wärmeflusses dar (aus Hummels et al., 2013).

Eine detaillierte Beobachtungstudie der Wärmebilanz, der ozeanischen Deckschicht im äquatorialen Atlantik unter Benutzung PIRATA Daten, der Oberflächendrifterklimatologie und Mikrostrukturdaten, die während 8 Forschungsfahrten gesammelt wurden, zeigte, dass während der borealen Sommermonate der diapycnische Wärmefluss den größten Beitrag zur Abkühlung und zur Ausbildung der Kaltwasserzunge liefert. Während dieser Zeit ist der latente Wärmefluss bei seinem saisonalen Minimum (Abb. 4a). Im September sind der diapycnische Wärmefluss, die latente Wärme und Kühlung durch meridionale Advektion von Wärme von ähnlicher Größe und im November dominieren meridionale Advektion und latente Wärme das Abkühlen der ozeanischen Deckschicht. Für den Zeitraum, für den mittlere diapycnische Wärmeflüsse zur Verfügung stehen, stimmt die Summe aller Terme des Wärmebudgets gut mit den Veränderungen in Wärmespeicherung überein (Abb. 4b). Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer genauen Parametrisierung von Mischprozessen unterhalb der ozeanischen Deckschicht, um die SST in Ozean- und Klimamodellen realistisch darstellen zu können.

Während der Forschungsfahrt mit Maria S. Merian im Mai/Juni 2011 konnten alle Verankerungen des äquatorialen Strömungsmesserrarrays erfolgreich geborgen werden. Die eingesetzten Instrumente arbeiteten im Allgemeinen sehr gut und es wurde eine sehr gute Datenausbeute von etwa 90% erzielt. Ein zusammenfassende Arbeit zur Variabilität des EUC und der Beziehung zur tropischen atlantischen Variabilität ist in Arbeit (Brandt et al. 2013). Ebenfalls ein großer Erfolg war das erste Gleiterschwarmexperiment im offenen Ozean. Die Gleiter wurden noch während der Warmphase der Kaltwasserzunge ausgesetzt und konnten wichtige Daten während der starken Abkühlung und der Entstehung der Kaltwasserzunge sammeln. Durch die Analyse dieser Daten werden wir in der Lage sein, die Entwicklung des Wärme- und Frischwasserbudgets der Kaltwasserzunge zu quantifizieren und damit vorhersagbare und nichtvorhersagbare Elemente der Entwicklung der SST zu identifizieren. Die Daten gehen in die Doktorarbeit von Michael Schlundt ein. Eine Veröffentlichung zum Wärme- und Frischwasserbudget der Kaltwasserzunge 2011 ist in Arbeit (Schlundt et al. 2013).

2.2 Schwankungen der tiefen Randstromzirkulation am Ausgang der Labradorsee

Der Ausstrom aus der Labradorsee stellt einen wichtigen Brennpunkt im Gesamtsystem der Thermohalinen Zirkulation im Atlantik dar. Die seit 1997 kontinuierlich durchgeführten Messungen von Wassermasseneigenschaften und Strömungen zeigen eine signifikante Erwärmung des Subpolarmeers in der Tiefe ($0.5^{\circ}C$ über 10 Jahre), die jedoch eher Teil multidekadischer Schwankungen und nicht Ausdruck der globalen Erwärmung sind. Unsere Messungen (Abb. 5) deuten gegenwärtig auf ein Ende des Erwärmungstrends hin. Gleichzeitig konnte in den vergangenen 13 Jahren keine eindeutige Änderung in Struktur und Stärke des Ausstroms festgestellt werden. Diese bemerkenswerte Stabilität des Ausstroms auf unterschiedlichen Zeitskalen und die angedeutete Umkehr der Tiefenerwärmung gilt es weiterhin zu beobachten und zu dokumentieren.

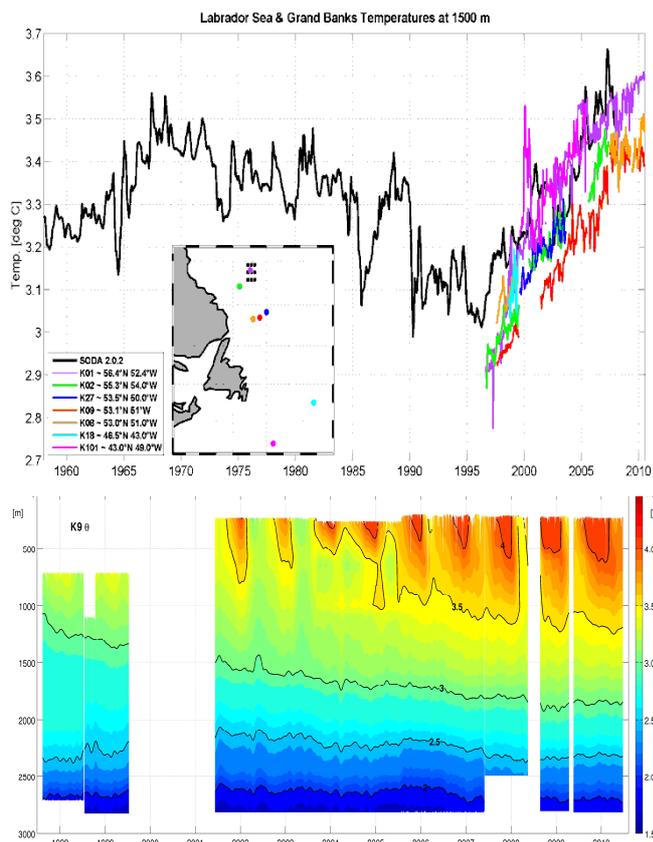


Abb. 5: Entwicklung der Temperaturverteilung im Bereich des DWBC, aus Beobachtungen und aus dem SODA Modell. Unten wird die Erwärmung des Randstroms (DLC) in dessen Zentrum (Verankerung K9) gezeigt.

In NAI lag der Fokus einerseits auf der Fortführung (Abb. 5) und der Erweiterung des tiefen Export-Array's bei 53°N (Aufgabe 1 des Antrags) und andererseits in vergleichenden Studien mit *State of the Art* Modellen. Letztere sind ein wichtiger Schritt in der Definition von Integralen Größen (Indices und Energieverteilung im Randstrom, Aufgabe 2), mit denen Modellvergleiche möglich und sinnvoll sind. Als 3. Aufgabe wurde eine besonders detaillierte Erfassung des tiefen DSOW Kerns definiert.

Die Zeitserien des Strömungsfeldes liegen jetzt in aufbereiteter Form vor und stehen dem Verbund, aber auch einer wesentlich größeren Gemeinschaft (international OceanSites Initiative) zur Verfügung. Dies wird deutlich durch die Arbeiten, an denen Mitarbeiter des TP A2.2 mitwirkten:

a) Eine Studie der Variabilität im subpolaren Atlantik auf der Basis von Altimeterdaten, in die unsere Beobachtungen zur Verifizierung der Ergebnisse eingeflossen sind (Han et al. 2010). In dieser Arbeit konnte eine mehrjährige Schwankung des Randstroms (Labradorstrom) nachgewiesen werden – ein Trend war jedoch nicht zu erkennen. Dies zeigt sehr deutlich, dass aus kurzen Zeitserien-Segmenten keine Rückschlüsse auf Variationen mit langen Zeitskalen getroffen werden können – das bedarf auch langer und gleichzeitig detaillierter Beobachtungen (wie sie hier gefördert und vorgenommen wurden).

b) Eine Arbeit die sich speziell mit der Randstromentwicklung im 53°N-Observatorium befasst (Abb. 6; Fischer et al., 2010). Und die als Vorstufe einer umfassenden Arbeit über die tiefen Transportschwankungen unter Einbeziehung der DSOW Verankerungen zu sehen ist.

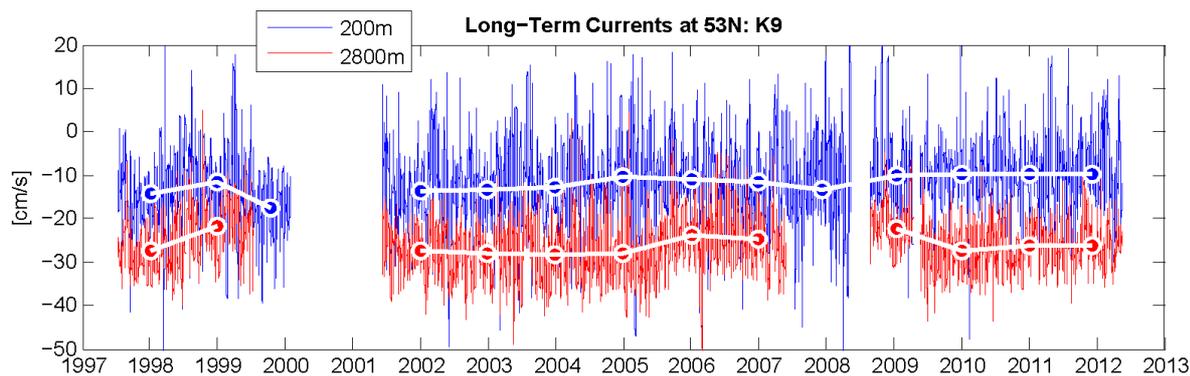


Abb. 6: Zeitserien (hochaufgelöst und Jahresmittel) der Strömungen an der zentralen Station (K9) des 53°N-Observatoriums. In Blau die oberflächennahen S Strömungen und in Rot die wesentlich stärkeren Strömungen im tiefen DSOW-Kern des Randstroms.

c) Eine Arbeit, die unter der Federführung von Xiaobiao Xu (Xu et al., 2013, s. Abb.7) vom Stennis Space Center vorgenommen wurde, und in der unsere Beobachtungen zum Vergleich mit dem HYCOM Modell herangezogen wurden.

Hier (NAII) steht der tiefe Kern des DWBC im Beobachtungs-Fokus. Selbst hochauflösende Modelle haben je nach Formulierung der Randbedingungen und der Auflösung Probleme, diesen tiefen Kern

realitätsgetreu abzubilden. In den Beobachtungen am Ausgang der Labradorsee ist dieser Kern das stabilste Signal der Tiefenzirkulation; das DSOW strömt hier als konzentriertes Band um die Labradorsee herum, um dann den tiefsten Teil des tiefen NADW in der MOC zu bilden. Der weitere Verlauf des DSOW Bandes beim Umrunden von Flemish Cap ist aber eher unklar, und wird im Teilprojekt (Rhein et al.) behandelt. Weiter stromab an den Grand Banks nimmt dieses Wasser ein großes Volumen ein und beinhaltet damit trotz geringer Strömungen einen signifikanten Anteil an der MOC.

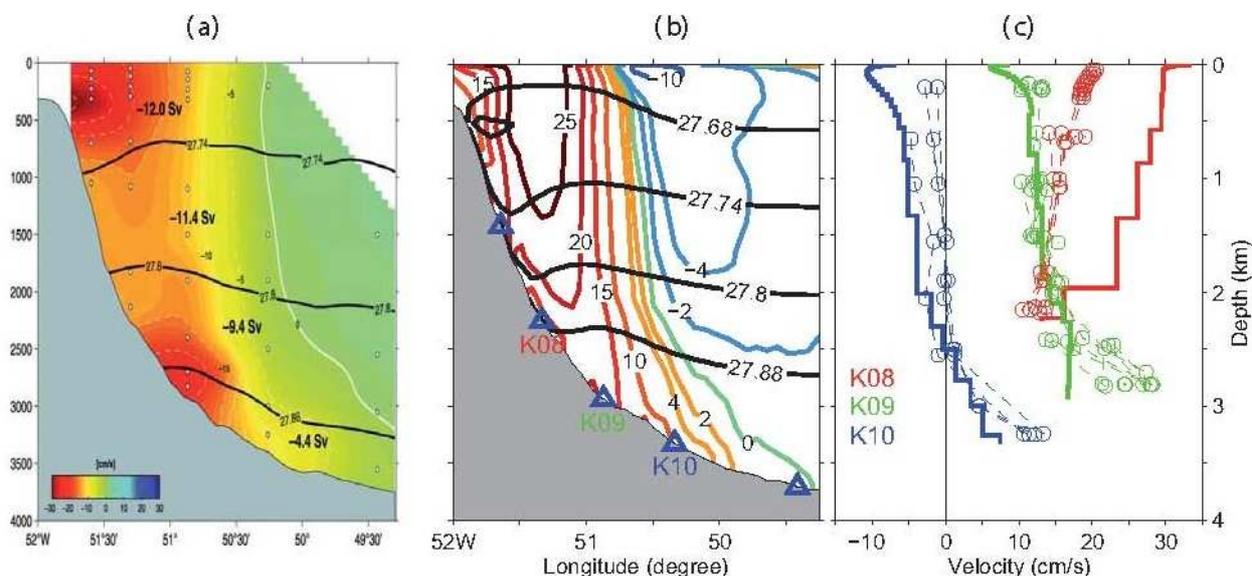


Abb. 7: aus Hu et al., 2013: Vergleich der HYCOM Strömungen bei 53°N mit denen aus den beobachteten Zeitserien des 53°N Observatoriums. Insbesondere ist das Modell in der Lage einen tiefen Stromkern am Boden zu erzeugen.

Interpretiert man alle Transportschätzungen des westlichen SPNA, dann wird schnell klar, dass vor dem Hintergrund großer Zirkulations-Fluktuationen auf kurzen Zeitskalen es sehr schwierig ist, zu signifikanten Aussagen bezüglich kleiner langfristiger Trends zu gelangen. Diese hochfrequenten (Intrasaisonalen) Schwankungen sind Thema einer Arbeit im Rahmen von NA II und international im EU Program THOR (siehe Fischer et al. 2013; in Vorbereitung).

Zunächst einmal gibt es durch die Advektion von warmem, salzreichem Wasser in die Konvektionsregionen (zentrale Labradorsee) und bei Ausbleibender Tiefen-Konvektion eine Langfristige Erwärmung seit Mitte der 90er Jahre. Dies ist aber kein Trend, sondern Teil einer multidekadischen Schwankung. Dies erkennt man in Verbindung mit Hindcast Studien durch assimilierende Modelle (im Verbund und international) aber auch mit hochauflösenden Ozeanmodellen (hier VIKING 20).

Nicht so einfach ist es, Zirkulationsschwankungen an den Schlüsselpositionen (z.B. 53° N Observatorium) zu bestimmen. Hierbei ist es unerlässlich, die Daten detailliert zu erfassen, um damit auch kurzzeitige synoptische (in den Schiffsschnitten) Strömungsschwankungen besser ausblenden zu können. Das Ziel muss also sein, nachhaltige Messungen über einen langen Zeitraum aufrecht zu erhalten, und gleichzeitig auch die kurzzeitigen Prozesse aufzulösen. Dies geht nur im Verbund verschiedener Messmethoden vom Schiff, Satelliten und mit autonomen Verfahren wie verankerte Stationen und Floats (Argo ist hier ein Eckpfeiler).

3.2 Schwankungen der thermohalinen Zirkulation: Ursachen und regionale Signaturen in wirbelauflösenden Modellen

Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Durchführung von ‚hindcast‘-Experimenten zur atmosphärisch getriebenen Variabilität des Atlantischen Ozeans in den letzten Jahrzehnten. Als Basismodelle dienten wie geplant globale Ozean-Meereis-Modelle mit mittlerer (ORCA025, 1/4°) und hochauflösender (ORCA12, 1/12°, Abb. 8) Auflösung. Als Grundlage für den atmosphärischen Antrieb diente der CORE Datensatz (Large und Yeager, 2009). Da globale Ozeanmodelle mit einer ‚bulk‘-Wärmefluss-Formulierung prinzipiell hochsensibel auf Details des Frischwasserbudgets reagieren, ging es in einer Serie von Experimenten um die Untersuchung von Abhängigkeiten. Als Ergebnis konnte eine Konfiguration für den Frischwasserantrieb entwickelt werden, mit der trotz einer nur sehr schwachen

Salzgehalts-Relaxation eine stabile thermohaline Umwälzbewegung im Atlantischen Ozean simuliert werden kann (Behrens et al., 2012).

Unabhängig vom o.g. Langzeitverhalten der MOC wurde die relative Bedeutung deterministischer gegenüber stochastischer Variabilität untersucht. Ein Vergleich der mit den verschiedenen Modellversionen ($1/2^\circ$, $1/4^\circ$ und $1/12^\circ$ -Auflösung) simulierten MOC-Zeitreihen im Nordatlantik (26°N) gibt Einblick in die Robustheit der durch den atmosphärischen Antrieb aufgeprägten Schwankungen (Abb. 8).

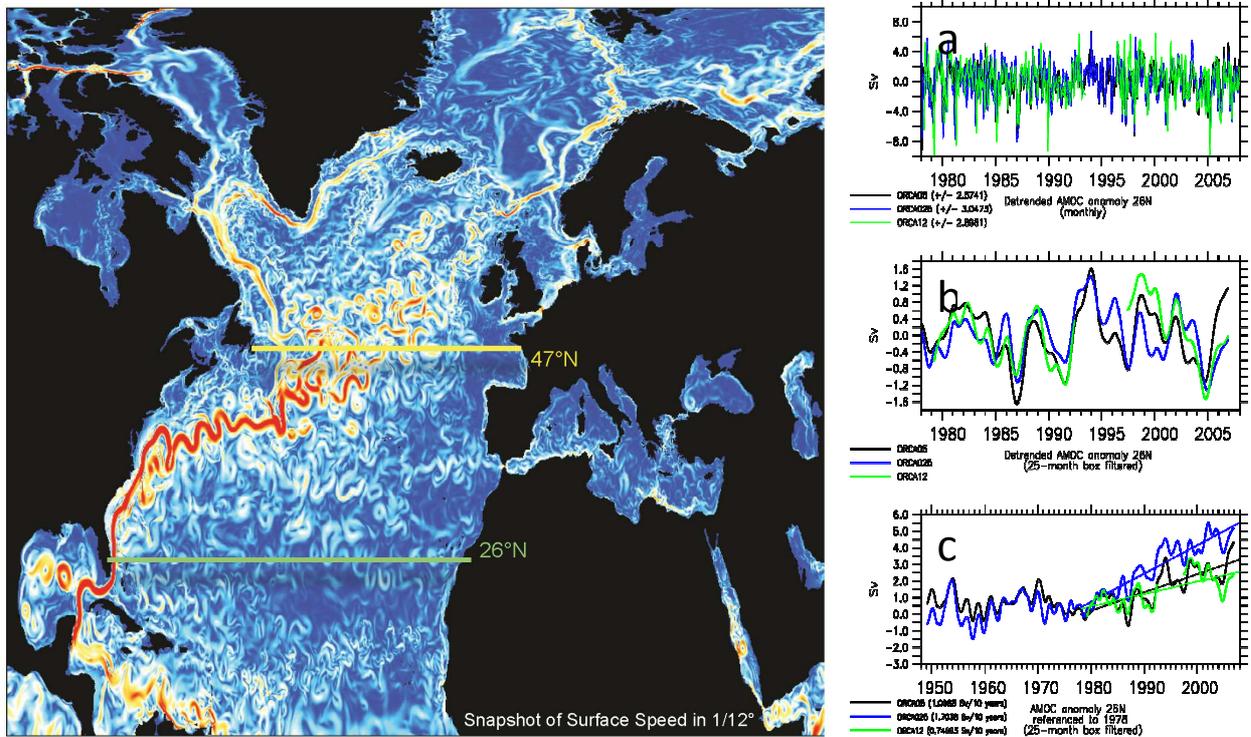


Abb. 8: Links: Momentaufnahme des Betrags der Oberflächengeschwindigkeit im globalen $1/12^\circ$ Modell (ORCA12). Rechts: Schwankungen der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) in 26°N (in Sv) in den Hindcast-Simulationen mit den $1/2^\circ$, $1/4^\circ$ und $1/12^\circ$ Modellversionen, (a) Zeitserien von Monatsmittelwerten, (b) tiefpass-gefiltert, relativ zum linearen Trend des jeweiligen Modells; (c) Monatsmittelwerte, relativ zum MOC-Transport im Jahr 1978.

Der subpolare Nordatlantik stellte einen Schwerpunkt der Analysen dar. Aufgrund der besonderen Bedeutung der mesoskaligen Variabilität wurde ein regionales, in das globale ORCA025 genestete, Modell mit $1/20^\circ$ Auflösung (VIKING20) aufgesetzt. Neben einer Verbesserung der Golfstromablösung kam es zu einer Verbesserung der Konvektion bzw. Bildung von Tiefenwasser in der Labrador See und dem Europäischen Nordmeer gegenüber nicht-wirbelauflösenden Modellen, sowie Verbesserung der Überströmung des Grönland-Island-Schottlandrückens, der eine wichtige Komponente des tiefen Astes der MOC darstellt. Im direkten Vergleich mit den Beobachtungen in AP 2.2 ergab sich eine verbesserte Repräsentierung des westlichen Randstromsystems bei 53°N (Abb. 9).

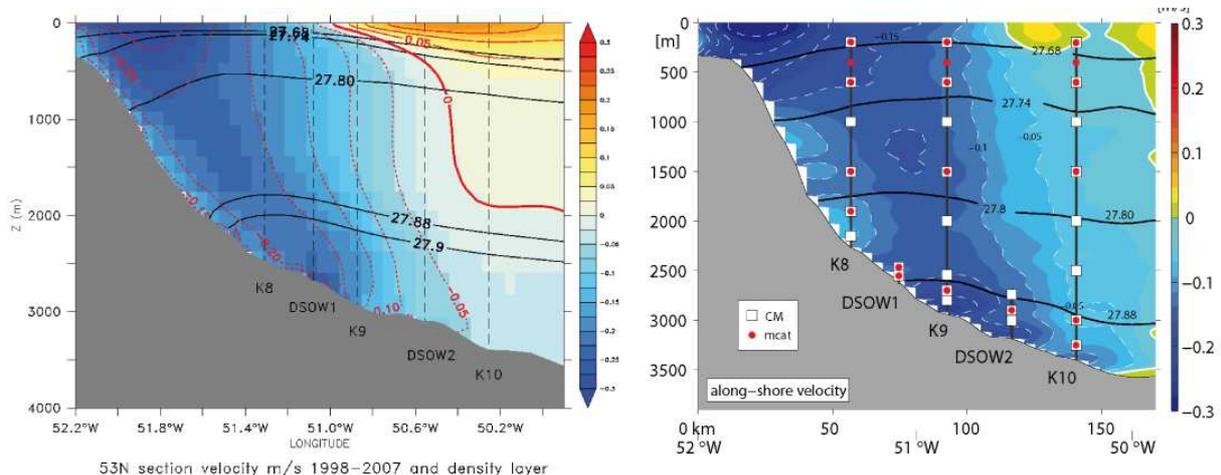


Abb. 9: Mittlere Meridionalgeschwindigkeiten (1998-2007) im westlichen Randstrom bei 53°N in der regionalen 1/20°-Simulation VIKING20 (links) und aus Beobachtungen (rechts).

Neben dem subpolaren Nordatlantik wurden die Änderungen auf die Zirkulation mit Ursprung aus der Agulhasregion untersucht. Arbeiten in Phase 1 hatten gezeigt, dass Änderungen in den südhemisphärischen Windfeldern zu einer Verstärkung des interozeanischen Austausches zwischen Indischem und Atlantischem Ozean durch das Agulhasregime führen (Blastoch et al., 2009). Diese Zunahme im ‚Agulhas Leakage‘ manifestiert sich in einer verstärkten Zufuhr von Wärme und Salz in den Atlantik; ein signifikanter Anteil findet dabei seinen Weg in den Nordatlantik. Arbeiten mit aus Klimarechnungen abgeleiteten Windfeldern zeigen eine Zunahme im Agulhas Leakage, die einher geht mit einer Zunahme im Salzgehalt im Südatlantik (Abb. 10, Blastoch und Böning, 2013). Diese Salzanomalie breitet sich auf nach Norden aus und wird dort eine Rolle im Süßwasserhaushalt des Nordatlantiks spielen.

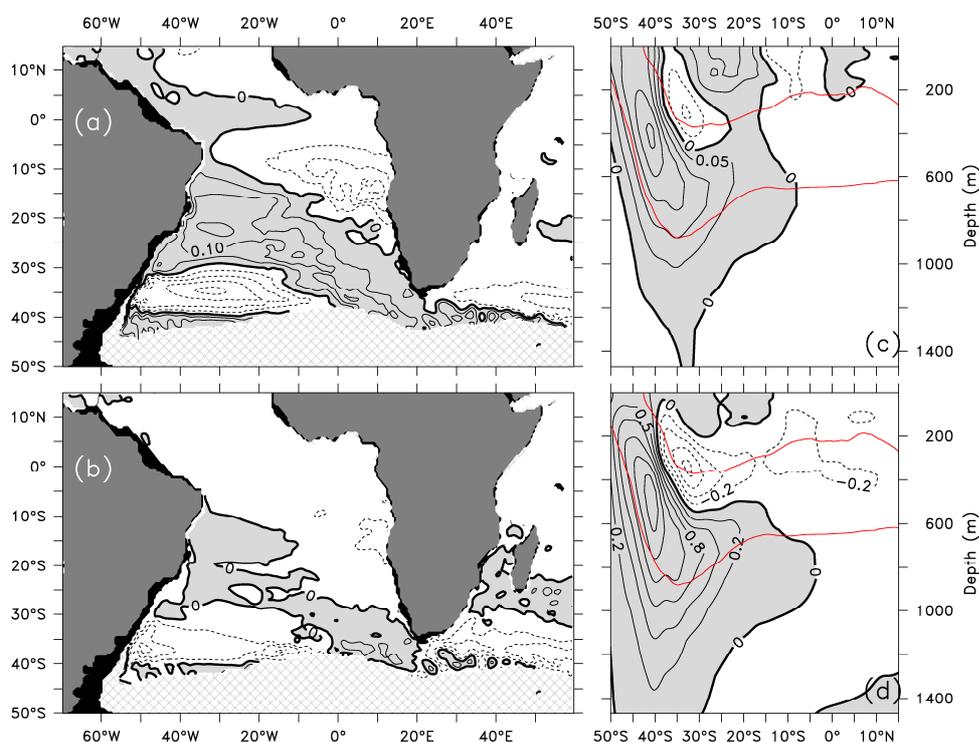


Abb. 10: Wassermassenänderungen im Atlantik durch Änderungen der südhemisphärischen Windsysteme. (a) Salzgehalts- und (b) Temperaturänderungen in der oberen Thermokline. Änderungen im zonalen Mittel von (c) Salzgehalt und (d) Temperatur im Atlantik. (Abb. aus Blastoch und Böning, 2013).

Literatur

Large, W. G., & Yeager, S. (2009): The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Climate Dynamics*, 33, 341–364.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Während in den modellierenden Teilprojekten der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung für Personal eingesetzt wurde, ist dies bei den Projekten mit beobachtendem Schwerpunkt nur ein Anteil. Der zweite Anteil an den Mitteln wurde für Verbrauchsmaterial bei Verankerungen sowie für die großen Expeditionen (Meteor, Merian) für Reisekosten und Transporte eingesetzt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Fokus der TP's standen Fragestellungen nach dem Ursprung für die unterschiedliche Bewertung der zukünftigen AMOC Abschwächung in Klimamodellen und eine Abschätzung der Erkennbarkeit des Signals. Im Rahmen des Projektes wurden alle weltweit verfügbaren Klimamodellrechnungen (CMIP3 und CMIP5) in Hinblick auf diese Fragestellung untersucht. Eine vergleichbare Studie liegt bisher aus keiner anderen Arbeitsgruppe vor. Sehr wichtig und damit notwendig und angemessen waren parallele hochauflösende Modellierung und die Beobachtungsprogramme – zu gegenseitiger Unterstützung bei Validierung und Interpretation.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Die erzielten Ergebnisse sind wichtige Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten im BMBF Projekt RACE und in EU-geförderten Projekten. Darüber hinaus liefern die Projektarbeiten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Vorhersagbarkeit der AMOC. Während die Beobachtungsdaten über einen längeren Zeitraum (bis dekadisch) erst jetzt eine Validierung der Modelle auf diesen Zeitskalen ermöglichen, sind die Modelle unabdingbar zur Interpretation lokaler Messungen in Bezug auf die großskaligen und langfristigen Prozesse.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Im Verlauf des Projektes (A1.1) wurde die neuen Modelrechnungen nach dem CMIP5 Protokoll veröffentlicht. Diese werden einen wichtigen Beitrag zum neuen IPCC Sachstandsbericht liefern. Wir haben die neuen Klimamodellrechnungen in unserer Arbeit berücksichtigt.

Von 2006-2011 fand das internationale CLIVAR TACE (Tropical Atlantic Climate Experiment) statt, zu dem A1.2 ein wesentlicher Beitrag war. Auf der Abschlusskonferenz wurde eine Bilanz der tropischen Atlantik Forschung gezogen. Demnach gab es wesentliche Fortschritte beim Verständnis von Ozean- und Atmosphärenprozessen, aber kaum Verbesserung bei der Reduzierung von systematischen Fehlern in Klimamodellen.

(s. <https://conferences.geomar.de/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=0>).

Der subpolare NA war Thema mehrerer internationale Untersuchungen, deren Ergebnisse einen Einfluss auf das Vorhaben haben. Hier sind insbesondere die EU geförderten Initiativen THOR und NACLIM zu nennen, die von den überströmten Schwellen (Dänemarkstraße, Island-Schottland Rücken) bis zum Einstrom in die Labradorsee die Tiefenwasserausbreitung beobachten. Dies muss man als ein gesamtes Beobachtungssystem des subpolaren Nordatlantiks betrachten. Auch zukünftige Aktivitäten werden international (BIO und US-AMOC Gruppen) koordiniert.

Untersuchungen zur MOC-Variabilität stellen einen Schwerpunkt ozeanographischer Studien zur großräumigen Zirkulation im Nordatlantik dar. Die mittlerweile mehrjährigen Zeitreihen des RAPID-Projekts stellen auf saisonalen bis zwischenjährlichen Zeitskalen ein Benchmark dar, sind aber noch zu kurz, um Aussagen über längerfristige Trends machen zu können. Neben den o.g. Aktivitäten im subpolaren Nordatlantik rücken die Einflüsse aus dem Süden immer mehr in den Fokus internationaler Programme. (z.B. im Rahmen der SCOR-Arbeitsgruppe zur klimatischen Bedeutung der Agulhasregion).

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

1.1

Behrens, L. K. (2012); Das arktische Meereis in Klimamodellen - Variabilitäten und anthropogener Klimawandel. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany, 167 pp

Behrens, L. K., Martin, T., Semenov, V. und Latif, M. (2012); The Arctic Sea ice in the CMIP3 climate model ensemble – variability and anthropogenic change. *The Cryosphere Discussions*, 6 (6), pp. 5317-5344, DOI 10.5194/tcd-6-5317-2012, (unter Begutachtung).

Ding, H., N. S. Keenlyside, and M. Latif (2010): Equatorial Atlantic interannual variability: the role of heat content. *J. Geophys. Res.*, 115, C09020, doi: 10.1029/2010JC006304.

Ding, H., N. S. Keenlyside, and M. Latif (2012): Impact of the Equatorial Atlantic on the El Niño Southern Oscillation. *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-011-1097-y.

Latif, M. and N. S. Keenlyside (2011): A Perspective on Decadal Climate Variability and Predictability, *Deep Sea Research*, doi: 10.1016/j.dsr2.2010.10.066.

Martin, T., W. Park, and M. Latif (2012): Multi-Centennial Variability Controlled by Southern Ocean Convection in the Kiel Climate Model, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-012-1586-7.

Menary, M. B., W. Park, K. Lohmann, M. D. Palmer, M. Latif, and J. Jungclaus (2011): A multimodel comparison of centennial Atlantic meridional overturning circulation variability, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-011-1172-4.

Park, W. and M. Latif (2011): Atlantic Meridional Overturning Circulation Response to Idealized External Forcing, *Climate Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-011-1212-0.

Reintges, Annika (2011): Abschätzung der Genauigkeit von Klimasimulationen im Bereich des Nordatlantiks .Bachelorarbeit, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany, 59 pp.

Reintges, A, T. Martin, M. Latif and N. S. Keenlyside (2013): Uncertainty in Atlantic Meridional Overturning Circulation Projections for the 21st Century and the North Atlantic/Arctic Freshwater Budget. *Journal of Climate*, (unter Begutachtung)

Semenov, V. and M. Latif (2012): The Early Twentieth Century Warming and Winter Arctic Sea Ice. *The Cryosphere*, 6, 1231-1237, doi: 10.5194/tc-6-1231-2012.

O. R. Salau, B. Schneider, W. Park, V. Khon, and M. Latif (2012): Modeling the ENSO Impact of Orbitally-induced Mean State Changes. *J. Geophys. Res. (Oceans)*, 117, C05043, doi: 10.1029/2011JC007742.

Semenov, V., M. Latif, D. Dommenget, N. Keenlyside, A. Strehz, T. Martin, and W. Park (2010): The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, Vol. 23, 5668-5677, doi: 10.1175/2010JCLI3347.1.

1.2

Brandt, P., A. Funk, V. Hormann, M. Dengler, R. J. Greatbatch, J. M. Toole (2011): Interannual atmospheric variability forced by the deep equatorial Atlantic Ocean, *Nature*, **473**, 497-500, doi: 10.1038/nature10013.

Brandt, P., G. Caniaux, B. Bourlès, A. Lazar, M. Dengler, A. Funk, V. Hormann, H. Giordani, and F. Marin (2011): Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon, *Atmospheric Science Letters*, **12**, 24–30, doi: 10.1002/asl.287.

Brandt, P., R. J. Greatbatch, M. Claus, S.-H. Didwischus, V. Hormann, A. Funk, J. Hahn, G. Krahnemann, J. Fischer, and A. Körtzinger (2012): Ventilation of the equatorial Atlantic by the equatorial deep jets, *J. Geophys. Res.*, **117**, C12015, doi: 10.1029/2012JC008118.

Brandt, P., M. Araujo, B. Bourlès, P. Chang, M. Dengler, W.E. Johns, A. Lazar, C.F. Lumpkin, M.J. McPhaden, P. Nobre, L. Terray (2013): Tropical Atlantic Climate Experiment (TACE), CLIVAR Exchanges, in press.

Brandt, P., A. Funk, A. Tantet, W. Johns, J. Fischer, The Equatorial Undercurrent in the central Atlantic and its relation to tropical Atlantic Variability, in preparation.

Ding, H., N. S. Keenlyside, and M. Latif (2009): Seasonal cycle in the upper equatorial Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 114, C09016, doi: 10.1029/2009JC005418.

Ding, H., N.S. Keenlyside and M. Latif (2011): Impact of the Equatorial Atlantic on the El Niño Southern Oscillation. *Clim. Dyn.*, 38, 1965-1972.

Ding, H., N. Keenlyside, M. Latif, S. Wahl, and W. Park: The sensitivity of Equatorial Atlantic Variability to model formulation. *Clim. Dyn.* submitted.

Greatbatch, R., P. Brandt, M. Claus, S. Didwischus, and Y. Fu (2012): On the width of the equatorial deep jets, *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1729–1740, doi:10.1175/JPO-D-11-0238.1.

Hormann, V., and P. Brandt (2009): Upper equatorial Atlantic variability during 2002 and 2005 associated with equatorial Kelvin waves, *J. Geophys. Res.*, **114**, C03007, doi: 10.1029/2008JC005101.

Hummels, R., M. Dengler, and B. Bourlés (2013): Seasonal and regional variability of upper ocean diapycnal heat flux in the Atlantic Cold Tongue, *Prog. Oceanogr.*, doi:10.1016/j.pocean.2012.11.001.

Keenlyside, N., H. Ding, and M. Latif (2013): Potential of Equatorial Atlantic Variability to Enhance El Niño Prediction. *GRL*, submitted.

Lübbecke, J.F., C.W. Böning, N.S. Keenlyside and S.P. Xie (2010): On the connection between Benguela and equatorial Atlantic Niños and the role fo the South Atlantic Anticyclone. *Journal of Geophysical Research*, 115, C09015, doi: 10.1029/2009JC005964

Park, W., N. Keenlyside, M. Latif, A. Ströh, R. Redler, E. Roeckner, and G. Madec (2009): Tropical Pacific Climate and Its Response to Global Warming in the Kiel Climate Model. *J. Climate*, 22, 71–92.

Rhein, M., M. Dengler, J. Sültenfu., R. Hummels, S. Hüttl-Kabus and B. Bourles (2010): Upwelling and associated heat flux in the equatorial Atlantic inferred from helium isotope disequilibrium, *J. Geophys. Res.*, 115, C08021, doi:10.1029/2009JC005772.

Schlundt, M., P. Brandt, G. Krahnemann, T. Fischer, M. Dengler, J. Karstensen (2013): Heat and freshwater variability associated with the onset of the Atlantic cold tongue in 2011, in preparation.

Wahl, S., M. Latif, W. Park, and N. Keenlyside (2009): On the Tropical Atlantic SST warm bias in the Kiel Climate Model, *Climate Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-009-0690-9.

2.2

Fischer, J., Visbeck, M., Zantopp, R. J. und Nunes, N. (2010): Interannual to decadal variability of outflow from the Labrador Sea *Geophysical Research Letters*, 37, L24610, DOI: 10.1029/2010GL045321.

Han, G., Ohashi, K., Chen, N., Myers, P. G., Nunes, N. und Fischer, J. (2010): Decline and partial rebound of the Labrador Current 1993-2004: Monitoring ocean currents from altimetric and CTD data *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 115 . C12012. DOI: 10.1029/2009JC006091.

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 (2010): The present and future system for measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and heat transport, *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. (2010) *OceanObs'09, Community White Paper*.

Schott, F. A., L. Stramma, B.S. Giese, and R. Zantopp (2009): Labrador Sea convection and subpolar North Atlantic Deep Water export in the SODA assimilation model. *Deep-Sea Res.* 1,56. doi: 10.1016/j.dsr.2009.01.001.

Xu X., H. E. Hurlburt, W. J. Schmitz Jr., R. Zantopp, J. Fischer, and P. J. Hogan (2013): On the currents and transports connected with the Atlantic meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, doi: 10.1002/jgrc.20065.

Fischer, J., J. Karstensen, R. Zantopp, M. Visbeck, A. Biastoch, E. Behrens, C. Böning, D. Quadfasel, K. Jochumsen, H. Valdimarson, S. Jónsson, S. Bacon, P. Holliday, S. Dye, M. Rhein, C. Mertens (2013): Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic, in preparation

3.2

Behrens, E., A. Biastoch, and C. W. Böning (2012): Spurious drift of the AMOC in global ocean sea-ice models related to subarctic freshwater forcing, in revision for *Ocean Modell*.

Biastoch, A., C. W. Böning, F. U. Schwarzkopf, and J. R. E. Lutjeharms (2009): Increase in Agulhas leakage due to poleward shift in the southern hemisphere westerlies, *Nature*, 462, 495-498, doi: 10.1038/nature08519.

Biastoch, A. and C. W. Böning (2013): Anthropogenic Impact on Agulhas Leakage, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2012GL055037, in press.

Gary, S. F., M. S. Lozier, A. Biastoch, and C. W. Böning (2012): Reconciling tracer and float observations of the export pathways of Labrador Sea Water, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24606, doi: 10.1029/2012GL053978.

Gary, S. F., M. S. Lozier, C. W. Böning, and A. Biastoch (2011): Deciphering the pathways for the deep limb of the Meridional Overturning Circulation, *Deep-Sea Res.* II, 58, 1781-1797, doi: 10.1016/j.dsr2.2010.10.059.

Griffies, S. M., C. W. Böning, A. Biastoch, F. Bryan, G. Danabasoglu, E. Chassignet, M. England, R. Gerdes, H. Haak, R. W. Hallberg, W. Hazeleger, J. Jungclaus, W. G. Large, G. Madec, A. Pirani, B. L. Samuels, M. Scheinert, A. S. Gupta, C. A. Severijns, H. A. Simmons, A. M. Treguier, M. Winton, S. Yeager, and J. Yin (2009): Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs), *Ocean Modell.*, 26, 1-46, doi: 10.1016/j.ocemod.2008.08.007.

McCarthy, G., B. King, P. Cippolini, J. Blundell, E. McDonagh, and A. Biastoch (2012): On the Sub-decadal Variability of South Atlantic Antarctic Intermediate Water, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10605, doi: 10.1029/2012GL051270.

Rattan, S., P. G. Myers, A.-M. Treguier, S. Theetten, A. Biastoch, and C. W. Böning (2010): Towards an Understanding of Labrador Sea Salinity Drift in Eddy-Permitting Simulations, *Ocean Modell.*, 35, 77-88.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht des Teilprojektes AP 2.1 im Verbundvorhaben NORDATLANTIK	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Rhein, Monika	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2012
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Bremen Institut für Umweltphysik Abteilung Ozeanographie Otto-Hahn-Allee, Geb. NW1 28359 Bremen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0605C
	11. Seitenzahl 16
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Vorhaben AP 2.1 steuert einen messenden Beitrag zu einem Diagnosesystem im Nordatlantik bei, das in Kombination mit Modellen erlaubt, frühzeitig für Westeuropa relevante Veränderungen in Klima und Meeresspiegel zu erkennen und ihre Auswirkungen vorherzusagen. Die Fragestellungen des Fortsetzungsantrags sind: Wie sind die Änderungen in der Produktion von Tiefenwasser in der Labradorsee? Wie ändert sich der Transport des Nordatlantikstroms (NAC) im Subpolarwirbel? Wie stark ändert sich der Export von Tiefenwasser im tiefen westlichen Randstrom bei 47°N? Sind diese Änderungen mit der Variabilität in der Produktion von Labradorseewasser korreliert? Gibt es einen Zusammenhang zu den Änderungen des Transports im Inneren des Westbeckens?	
19. Schlagwörter Physikalische Ozeanographie, Wassermassen-Transformation, Tiefenwasser-Bildung, Transport - Zeitreihen	
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 Final report of Proposal AP 2.1		
4. author(s) (family name, first name(s)) Rhein, Monika	5. end of project 31.08.2013	6. publication date
	7. form of publication	
	9. originator's report no.	
8. performing organization(s) (name, address) Universität Bremen Institut für Umweltphysik, Abteilung Ozeanographie, Otto-Hahn-Allee, Geb. NW1, 28359 Bremen	10. reference no. 03F0605C	
	11. no. of pages 16	
	12. no. of references	
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. no. of tables 3	
	15. no. of figures 15	
	16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The proposal AP 2.1 contributed measurements (moored and shipboard) to a diagnosis system of the North Atlantic. The overarching aim of the Verbundvorhaben is that together with models, the system should be able to tackle changes in the ocean relevant for sea level and climate in Western Europe. AP2.1 dealt with the following questions: How did the formation of LSW change? How are the transport fluctuations of the North Atlantic Current in the subpolar gyre? What are the fluctuations in the export of deep water in the Western Boundary Current? Are these fluctuations related to LSW formation rate changes? Or to the transport fluctuations in the interior?		
19. keywords Physical Oceanography, water mass transformation, deep water formation, transport time series		
20. publisher	21. price	

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

Wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen:

Aus dem Projekt: Dr. Dagmar Kieke, Fritz Karbe
Aus anderen Mitteln: Dr. Christian Mertens, Achim Rößler, geb. Ströh

Technische Mitarbeiter:

Aus dem Projekt: Klaus Bulsiewicz
Aus anderen Mitteln: Wolfgang Böke

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Aufgabe 1: Fortsetzung unserer Zeitserie der Tiefenwasser-Produktion in der Labradorsee durch großräumige Aufnahme der SF₆-Verteilung im subpolaren Nordatlantik 2011 und durch einige Punktmessungen im Bereich Neufundlandbecken/Labradorsee 2010 und 2012.

Aufgabe 2: Untersuchung der baroklinen und barotropen Transportschwankungen des Subpolarwirbels (NAC und LSW) beim Einstrom in den Nordostatlantik, abgeleitet aus verankerten Bodenecholoten (PIES), T/S-Profilen von Argo-Floats und CTD-Stationen sowie Altimeter-Daten.

Aufgabe 3: Bestimmung des Exports von Tiefenwasser im tiefen westlichen Randstrom bei 47° N durch verankerte MicroCATs (T/S-Sensoren) und akustische Strömungsmesser.

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 sowie Verankerungsarbeiten und PIES-Handling zur Verfügung, genauso wie die Expertise im Interpretieren und Veröffentlichen von ozeanographischen Datensätzen. Das Projekt profitiert auch stark von der exzellenten technischen, logistischen, und wissenschaftlichen Kooperation zwischen den beiden Arbeitsgruppen der Projektleiterinnen M. Rhein (Bremen) und Birgit Klein (BSH Hamburg)

Mit den Forschungsschiffen standen uns im Prinzip exzellente Plattformen zur Durchführung der Messungen zur Verfügung. Die Fahrt mit FS *Maria S. Merian* im Sommer 2009 (MSM-12/3) musste aufgrund technischer Probleme des Schiffes um 14 Arbeitstage gekürzt werden. Wir konnten weder die PIES auslesen noch die dringend benötigten CTD/LADCP Stationen entlang der PIES-Linie noch die Spurenstoff-Stationen im östlichen Nordatlantik durchführen. Die Senatskommission für Ozeanographie bewilligte eine Erweiterung meines Schiffsantrags für 2010, so dass wir im Sommer 2010 den Ostteil des WOCE-A2-Schnittes (*Meteor*-Reise M82/2) nachholen konnten. Des Weiteren wurde uns Schiffszeit auf dem isländischen Forschungsschiff *Arni Fridriksson* (Reise SUBPOLAR-09)

gewährt. Unter der Fahrtleitung von A. Rößler wurden im November 2009 drei von vier PIES erfolgreich ausgelesen. Die Schiffsexpeditionen 2011 und 2012 in diesem Projekt fanden planmäßig statt. 2011 konnten jedoch keine SF₆-Messungen durchgeführt werden, da das hierfür benötigte analytische System durch massive Verzögerungen im Rücktransport der AWI-Container (Havarie des Transportschiffes) nicht rechtzeitig aus der Antarktis nach Europa zurücktransportiert werden konnte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan wurde im Wesentlichen eingehalten. Es wurden in AP 2.1 exzellente Datensätze geschaffen, deren Aufbereitung jedoch noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Erste Analysen, die diese Datensätze benutzen, sind inzwischen veröffentlicht bzw. eingereicht, oder stehen kurz vor der Einreichung.

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, sowie für Verankerungsarbeiten, für die Behandlung von PIES und die Analyse von ozeanographischen Datensätzen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten im Projekt profitierten besonders durch die enge Zusammenarbeit im Verbund. Eine enge Kooperation entwickelte sich mit Amy Bower (WHOI), die unser Projekt mit acht Verankerungen in der Charlie-Gibbs Bruchzone erweiterte. Kooperation gab es auch mit I. Yashayaev, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Kanada, betreffs Analysen in der Labradorsee. Bezüglich der PIES-Auswertung hatten und 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

Tabelle 1 enthält eine Übersicht über die im Projektzeitraum durchgeführten Forschungsfahrten der Bremer Arbeitsgruppe. Details zu den durchgeführten Arbeiten sind im Anschluss daran aufgelistet.

Schiff	Reise	Datum	Geographischer Schwerpunkt
<i>Arni Fridriksson</i>	SUBPOLAR-09	02.11.-16.11.2009	Mittelatlantischer Rücken
<i>Meteor</i>	M82/2	05.08.-01.09.2010	47°N und Mittelatlantischer Rücken
<i>Meteor</i>	M85/1	24.06.-02.08.2011	Labradorsee, 47°N und Mittelatlantischer Rücken
<i>Maria S. Merian</i>	MSM-21/2	25.06.-24.07.2012	47°N und Mittelatlantischer Rücken

Tab. 1. Zusammenfassung der im Projektzeitraum durchgeführten Forschungsfahrten.

Reisen 2009:

Die durch die schiffstechnischen Probleme ausgefallenen Arbeiten im Sommer 2009 (FS *Maria S. Merian*, Reise MSM-12/3) konnten zum Teil nachgeholt werden, da uns für November 2009 insgesamt

15 Arbeitstage auf dem isländischen Forschungsschiff *Arni Fridriksson* (Reise SUBPOLAR-09) gewährt worden (siehe Abb. 1). 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 zu diesem Projekt erfolgreich ausgelegt werden. Im Dezember 2009 wurde unser PIES BP-12 an der irischen Küste gefunden und im Januar 2010 an uns zurückgegeben. Eine technische Überprüfung zeigte, dass das PIES lediglich für zwei Wochen Daten aufgezeichnet hatte.

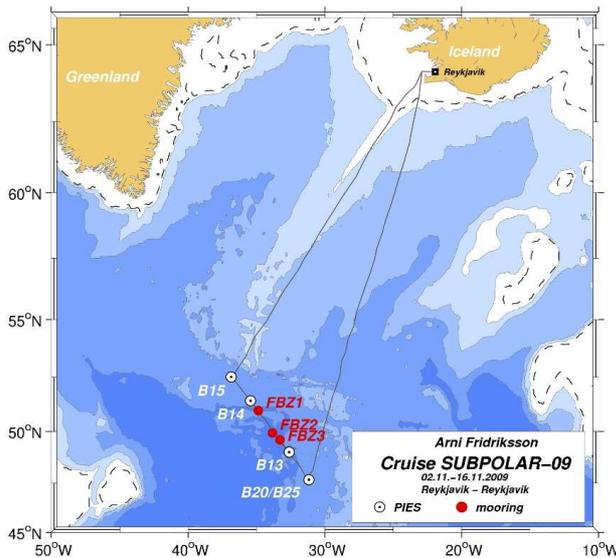


Abb. 1. Fahrtroute von FS *Arni Fridriksson*, Reise SUBPOLAR-09, November 2009, Reykjavik-Reykjavik.

Reisen 2010:

Vom 05.08. bis 01.09.2010 fand die Fahrt M82/2 mit FS *Meteor* unter der Leitung und Koordination von M. Rhein statt (Abb. 2). Beteiligt waren die Gruppen um B. Klein vom BSH, ebenfalls AP 2.1, und A. Bower (WHOI). Auf dieser Fahrt wurden drei Bremer Randstromverankerungen (Abb. 3) sowie die drei BSH-Verankerungen westlich der Faraday-Bruchzone am Mittelatlantischen Rücken (MAR) ausgewechselt und acht WHOI-Verankerungen in der Charlie-Gibbs-Bruchzone ausgelegt. Desweiteren erfolgten Arbeiten an den PIES bei 47° N und am MAR.

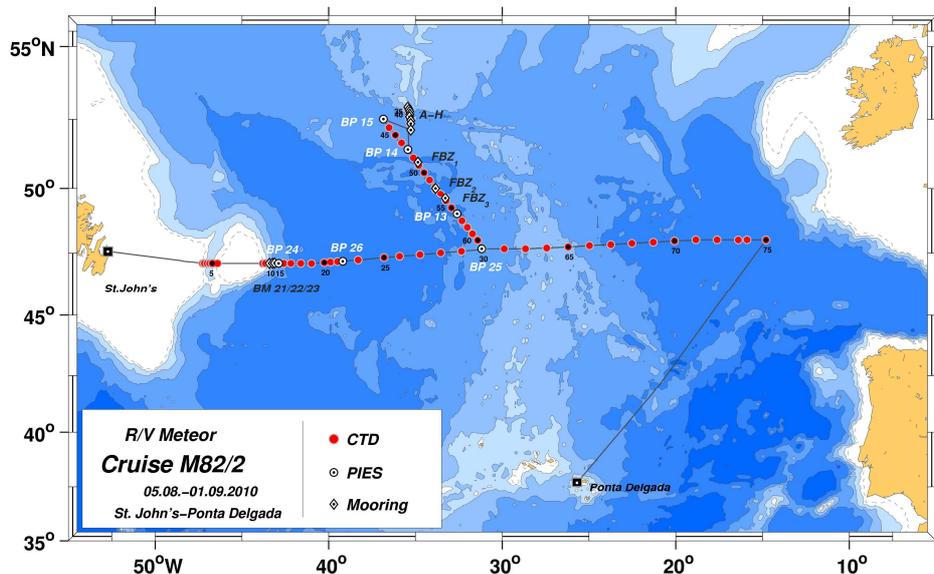


Abb. 2. Fahrtverlauf der Reise M82/2 mit FS *Meteor*. Das PIES BP14 konnte auf M82/2 und der nachfolgenden Reise M85/1 weder ausgelesen noch geborgen werden, so dass die Zeitreihe im

November 2009 unterbrochen wurde. Im Juli 2011 wurde das Gerät durch ein neues PIES aus der Grundausrüstung ersetzt. BM: Bremer Randstrom-Verankerungen; FBZ: Verankerungen des BSH (B. Klein); A-H: WHOI-Verankerungen (A. Bower).

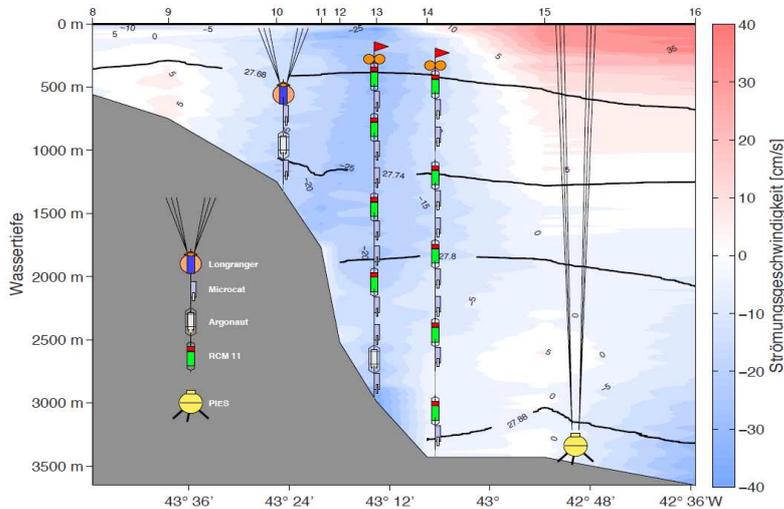


Abb. 3.
Bremer Verankerungsarray bei 47°N, Stand August 2010.

Reisen 2011:

Im Sommer 2011 (24.06.-02.08.2011) fand die Forschungsfahrt M85/1 mit FS *Meteor* unter der Leitung von D. Kieke statt (Brest - St. John's). Diese Fahrt hatte die großräumige Vermessung des Subpolarwirbels hinsichtlich Hydrographie und Spurenstoffverteilungen sowie den Austausch von Verankerungen und das Datenauslesen von PIES zum Ziel.

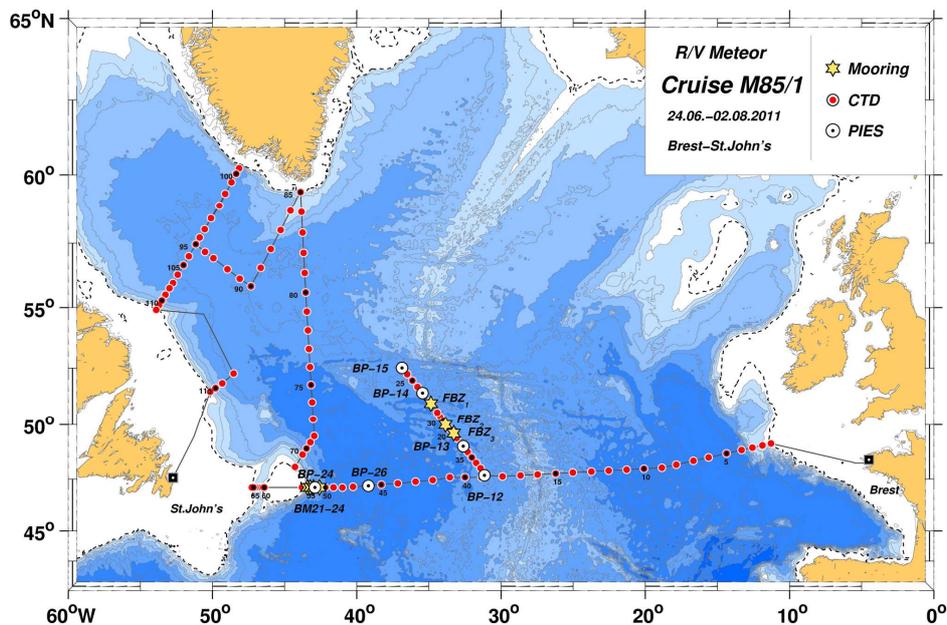


Abb. 4. Fahrtverlauf der Reise M85/1 mit FS METEOR, 24.06.-02.08.2011, Brest/Frankreich-St. John's/Kanada.

Unter Beteiligung der Projektpartner vom BSH (Gruppe von B. Klein) wurden drei Tiefseeverankerungen am MAR nahe der Faraday-Bruchzone geborgen und neu ausgelegt, zwei

Verankerungen im Randstrombereich bei 47°N geborgen und drei wiederausgelegt. Leider ging eine Tiefseeverankerung aus dem Randstrombereich verloren. Der Gerätewegfall wurde durch den Einsatz von Leihgeräten und eine vertikale Ausdünnung der Gerätetiefen kompensiert. Die Verankerungspositionen wurden zum Teil leicht verändert und nach Osten verlagert, um auch den tiefen Kern des DSOW (siehe Abb. 5, rechts, bzw. Abb. 7) mit Messgeräten abdecken zu können.

Zwei aus eigenen Mitteln angeschaffte PIES wurden ausgesetzt, um zum einen die PIES-Position BP14 am MAR wieder mit einem Gerät auszustatten und somit die PIES-Linie, bestehend aus vier PIES, zu vervollständigen (weder konnten 2010 die Daten von BP14 ausgelesen noch das Gerät geborgen werden). Das zweite PIES sollte ursprünglich auf dem 47° N-Schnitt positioniert werden. Allerdings zeigte das PIES BP13 am MAR massive Datenübertragungsprobleme an und wies nach einer Notbergung einen Wassereinbruch auf. Somit wurde auch das zweite mitgebrachte PIES am MAR installiert und das dortige PIES-Array komplettiert. Von den beiden bei 47° N installierten PIES musste eines geborgen werden, da auch hier Datenübertragungsprobleme auftraten. Nachdem das Gerät an den Hersteller geschickt wurde, ergab die Inspektion einen fehlerhaft arbeitenden Transducer. Nach der Reparatur stand das Gerät 2012 für die Neuauslage bereit. Die geplante großräumige Vermessung des subpolaren Nordatlantiks hinsichtlich der Spurenstoffe SF₆ und CFC-12 konnte nicht wie geplant durchgeführt werden, da aufgrund einer Havarie des Transport-Schiffes die notwendige Ausrüstung nicht rechtzeitig aus der Antarktis nach Europa zurückgebracht werden konnte. Der Wegfall der direkten Spurenstoff-Messungen wurde durch eine umfangreiche Wasserprobennahme für die Spurenstoff-offline-Analyse im Bremer Heimatlabor zum Teil kompensiert, so dass hier nach Ende der Labor-Analysen ein umfangreicher Spurenstoff-Datensatz hinsichtlich der Komponente CFC-12 zu erwarten ist. SF₆-Daten liegen dadurch leider nicht vor.

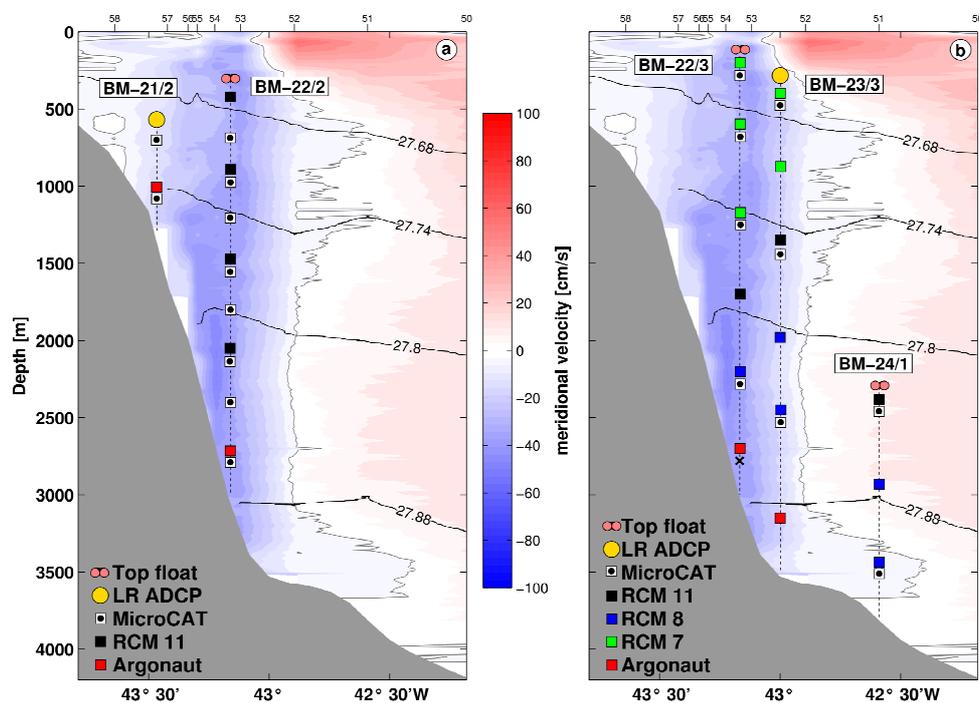


Abb. 5. Links: während M85/1 aufgenommenes Randstrom-Verankerungsarray (2010-2011); rechts: Neuauslegung des Randstrom-Arrays (2011-2012) im Sommer 2011.

Reisen 2012:

Auf der Fahrt MSM-21/2 (25.06.-24.07.2012) wurden vor allem Verankerungsarbeiten und CTD/LADCP Stationen auf 47° N und entlang der PIES-Linie durchgeführt. Wichtig in diesem Zusammenhang sind auch die Messungen des 38kHz-Schiffs-ADCP, die zusammen mit Geostrophie/LADCP dazu verwendet werden, die aus den PIES-Daten berechneten Transporte absolut zu machen.

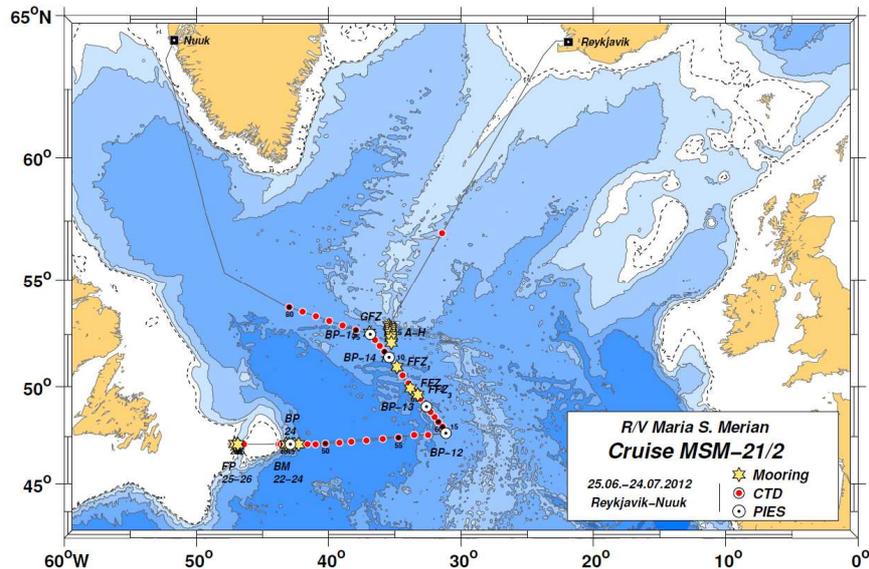
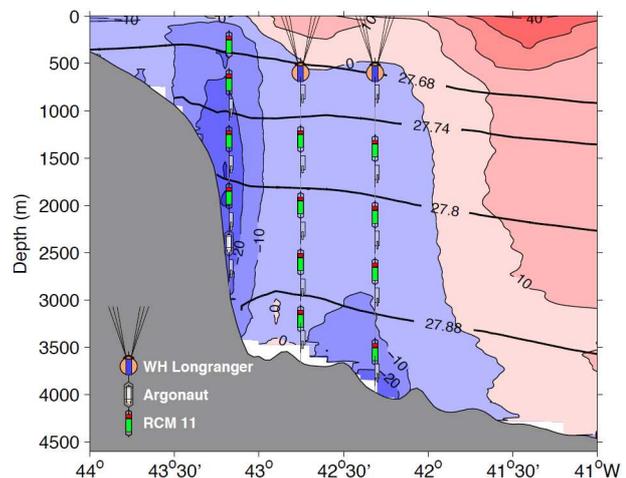


Abb. 6 Fahrtverlauf der Reise MSM-21/2 mit FS Maria S. Merian. Die Verankerungen „FP“ im Flemish Pass sind Teil eines DFG Projektes von D. Kieke (Bremen) und K. Jochumsen (Hamburg). Die Verankerungen „A-H“ in der Charlie-Gibbs-Bruchzone sind von A. Bower (WHOI) und wurden nach 2 Jahren Auslegezeit auf dieser Fahrt geborgen. Die Verankerungen „FFZ“ gehören zum BSH-Beitrag in diesem Projekt (B. Klein). Alle PIES und die drei Randstromverankerungen „BM“ bei 47° N sind Bremer Verankerungen, die durch Geräte des BSH erweitert wurden.

Die 2011 verlorene Randstrom-Verankerung bei 47°N (Abb. 5, 7) wurde durch Mittel der Grundausrüstung der Universität Bremen ersetzt, so dass 2012 drei volle Verankerungen im Randstrom ausgelegt werden konnten. Die Bergung wird im Juni 2013 erfolgen. Die drei BSH-Verankerungen nahe der Faraday-Bruchzone am Mittelatlantischen Rücken wurden ebenfalls erfolgreich geborgen und wieder ausgelegt. Ein PIES wurde ausgelegt, die Daten der anderen PIES wurden akustisch ausgelesen.

Abb. 7. Bremer Randstrom-Verankerungen bei 47° N. Im Hintergrund ist das mittlere LADCP-Strömungsfeld [cm/s] abgebildet. Blau: südwärtige, rot: nordwärtige Strömungsgeschwindigkeit. Dicke schwarze Linien kennzeichnen Isopyknen, die als Wassermassengrenzen benutzt werden.



II.1.2 Daten

CTD/LADCP, vm-ADCP

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.

Spurenstoffmessungen (CFC/SF₆)

Die Bremer Arbeitsgruppe verfügt über ein Heimatlabor-gestütztes Analyse-Verfahren zur Messung von sogenannten offline-Proben. Hierbei werden auf See Spurenstoff-Proben genommen, zur Lagerung aufbereitet und später im Bremer Heimatlabor mit einem Gas-chromatographischen Verfahren hinsichtlich der Spurenstoffe CFC-12 und CFC-11 analysiert. Je nach Auslastung des Labors können lange Zeiträume zwischen der Probennahme an Bord und der Analyse im Bremer Labor vergehen. Auch ist die Analyse der Proben im Bremer Labor sehr viel zeitaufwendiger, da im Unterschied zum Schiffsbetrieb nicht im „7-Tage/24-h“-Verfahren gearbeitet werden kann. Dieses Verfahren kommt zum Einsatz, wenn es die schiffs- oder reise-gegebenen Räumlichkeiten und die personellen Ressourcen nicht ermöglichen, das komplette Analyse-Gerät samt Personal auf einer Reise unterzubringen und einsetzen zu können, beispielsweise, weil nur 1-2 Plätze für Mitfahrer ermöglicht werden oder die notwendigen Laborplätze nicht gestellt werden können (siehe Tab. 1). Neben dem Labor-gestützten System gibt es seit 2008 ein seegängiges System, was auf See die direkte und sofortige Analyse von Wasserproben hinsichtlich der Spurenstoffe CFC-12 und SF₆ ermöglicht. Die Umstellung auf die Komponente SF₆ war notwendig geworden, da das in die Atmosphäre eingetragene CFC-Signal mittlerweile abnimmt und die zeitliche Zuordnung der im Wasser gemessenen CFC-Konzentrationen dadurch eine größere Unsicherheit erfährt. Im Gegensatz dazu zeigt SF₆ einen klaren ansteigenden Trend der atmosphärischen Konzentrationen und somit ein sehr viel besseres Signal-zu-Rausch-Verhalten zur Bestimmung der ozeanischer Konzentrationen. Die Bremer Arbeitsgruppe gehört zu den wenigen in der Welt, die über eine seegängige Messapparatur verfügt, um aus einer Wasserprobe beide Spurenstoff-Komponenten (SF₆ und CFC-12) zu messen und so die bestehenden CFC-12-basierten Bildungsraten von Labradorseewasser mit SF₆-Messungen fortführen zu können. Diese Apparatur wurde in Eigenarbeit gebaut und kam 2008 und 2009 zum ersten Mal im Nordatlantik erfolgreich zum Einsatz und erfuhr durch die auf See gewonnenen Erkenntnisse kontinuierlich diverse Modifikationen und Verbesserungen. Unter anderem zeigten sich Probleme bei der Bestimmung des Probenwasser-Volumens in der Extraktionsbürette, welche nach diversen Tests im Zuge einer Polarstern-Reise 2010/2011 modifiziert wurde. Diese Bestimmung ist für die Festlegung der gemessenen Konzentration von großer Bedeutung. Im Sommer 2011 war eine großräumige SF₆/CFC-12-Vermessung des subpolaren Nordatlantiks geplant, die dazu beitragen sollte, diese Probleme zu beheben und Korrekturen für die Messungen der Jahre 2008/2009 zu liefern. Geplante Messungen in den Tiefen- und Bodenwasserschichten des östlichen Beckens ließen äußerst geringe Spurenstoff-Konzentrationen erwarten, mit deren Hilfe eine Korrektur der Daten durchgeführt werden sollte. Aufgrund massiver Verzögerungen im Rücktransport des Polarstern-Expeditionsgepäcks aus der Antarktis nach Europa (Havarie des Transportschiffes) konnte das dort eingesetzte SF₆/CFC-12-System nicht rechtzeitig zum Beginn der *Meteor*-Reise M85/1 bereit gestellt werden. Die geplante direkte Vermessung des Subpolarwirbels hinsichtlich der Spurenstoffe SF₆ und CFC-12 konnte also nicht wie geplant durchgeführt werden und wurde eine durch erhebliche offline-Probennahme während M85/1 zum Teil kompensiert. Notwendige Tests und technische Modifikationen an der Messapparatur sowie die umfangreiche offline-Probennahme, u.a. in Schlüssel-Regionen des Nordatlantiks ab 2010 (siehe Tab. 2), führten zu einem Rückstau in der Probenaufarbeitung, so dass die Analyse der Daten ab 2010 im Projektzeitraum noch nicht abgeschlossen werden konnte und kontinuierlich fortgesetzt wird. Endgültige Kalibrationen der 2008/2009-Daten werden für das Frühjahr 2013 erwartet, wenn zum ersten Mal seit 2009 wieder direkt SF₆/CF-12-Messungen im subpolaren Nordatlantik durchgeführt werden können.

Tabelle 2 enthält eine Übersicht über die im Projekt-Zeitraum durchgeführten Spurenstoff-Probennahmen im subpolaren Nordatlantik.

Jahr	Schiff	Reise	Messung	Probenanzahl	Gemessen	Problem
2008	Maria S. Merian	MSM-09/1*	SF ₆ /CFC-12, direct	720	X	Büretten-Volumen
	Thalassa	SUBPOLAR-08	SF ₆ /CFC-12, direct	760	X	Büretten-Volumen
2009	Maria S. Merian	MSM-12/3*	SF ₆ /CFC-12, direct	930	X	Büretten-Volumen
2010	Meteor	M82/1**	CFCs, offline	400	X	---
	Meteor	M82/2	CFCs, offline	980	X	---
	Pelagia	64PE319**	CFCs, offline	260	X	---
	Pelagia	64PE321**	CFCs, offline	420	noch nicht	k.A.
2011	Meteor	M85/1	CFCs, offline	1800	noch nicht	k.A.
	Meteor	M85/2**	CFCs, offline	320	noch nicht	k.A.
2012	Maria S. Merian	MSM-21/2	CFCs, offline	360	noch nicht	k.A.
	Sarmiento de Gamboa	CATARINA**	CFCs, offline	560	noch nicht	k.A.

Tab. 2. Die mit (*) gekennzeichneten Reisen wurde bereits im VV-Nordatlantik I finanziert. Die Finanzierung der mit (**) gekennzeichneten Reisen stammt aus anderen eigenen Mitteln.

Bodenecholote mit Drucksensor: PIES

Die Tagesmittelwerte der Laufzeit und des Bodendrucks werden über akustische Telemetrie übertragen. Die 30min-Werte (volle Datenauflösung) können erst beim Bergen des Geräts ausgelesen werden. Den Auslegerekord hält BP15, das nördlichste Gerät entlang des MAR. Es wurde im August 2006 ausgesetzt und im Sommer 2010 erfolgreich geborgen (Abb. 8).

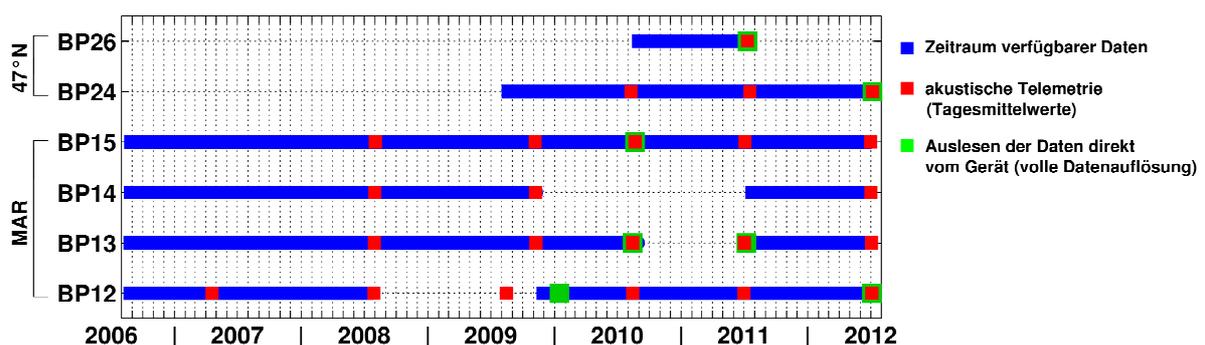


Abb. 8. Datenverfügbarkeit bei den Bremer PIES, 2006-2012. BP12-BP15 liegen entlang des Mittelatlantischen Rückens, BP24 bzw. BP26 entlang 47°N. Die Auswertung der PIES bei 47°N ist noch nicht erfolgt. Das in Irland Ende 2009/Anfang 2010 gefundene Gerät BP-12 hat leider nicht aufgezeichnet, was zu einer Datenlücke vom Sommer 2008 bis November 2009 führte.

Randstrom – Verankerungen bei 47°N

Die Randstromverankerungen wurden 2009 kurz vor Beginn des Projekts zum ersten Mal ausgelegt (Tab. 3). Die Daten der geborgenen Instrumente (T/S-Sensoren, Strömungsmesser) aus den

Verankerungsperioden bis 2011 liegen kalibriert vor, die Auswertung der Messungen Sommer 2011 – Sommer 2012 ist in Arbeit.

Verankerung	Geogr. Breite	Geogr. Länge	Wassertiefe	Auslegung	Bergung
BM21-1	47°06.05' N	43°25.00' W	1295 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM22-1	47°05.85' N	43°14.18' W	2980 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM23-1	47°06.00' N	43°07.19' W	3495 m	31 Jul 2009	07 Aug 2010
BM21-2	47°06.00' N	43°24.97' W	1295 m	10 Aug 2010	15 Jul 2011
BM22-2	47°06.30' N	43°13.85' W	3000 m	10 Aug 2010	13 Jul 2011
BM23-2	47°05.86' N	43°07.17' W	3500 m	10 Aug 2010	lost
BM22-3	47°05.67' N	43°13.80' W	3000 m	17 Jul 2011	06 Jul 2012
BM23-3	47°05.67' N	42°59.96' W	3570 m	17 Jul 2011	07 Jul 2012
BM24-1	47°05.85' N	42°35.55' W	3660 m	17 Jul 2011	06 Jul 2012
BM22-4	47°06.00' N	43°13.70' W	3000 m	11 Jul 2012	2013
BM23-4	47°06.00' N	42°45.00' W	3600 m	10 Jul 2012	2013
BM24-2	47°06.00' N	42°16.50' W	4000 m	10 Jul 2012	2013

Tab. 3. Bremer Randstromverankerungen bei 47°N

Für die Auslegungsperioden 2009-2011 sind in Abb. 9a die Strömungsgeschwindigkeiten in der zentralen Verankerung dargestellt, die bis auf eine kurze Periode parallel zum Kontinentalabhang nach Süden gerichtet sind. Die Geschwindigkeiten sind in 325m Tiefe nicht sehr viel höher als am Boden. Das zwei-jährige Mittel der Meridionalgeschwindigkeit ist in der zentralen Verankerung in 1400m Tiefe mit über 30 cm/s am höchsten, aber alle drei Verankerungen zeigen in allen Tiefen eine mittlere Strömung nach Süden, die am Boden immer noch 20 cm/s übersteigt (Abb. 9b). Diese Messungen werden zusammen mit den Schiffsbeobachtungen im Neufundlandbecken, kombiniert mit Modellergebnissen und Altimeter-Daten ausgewertet, die Arbeit wird noch im Frühjahr 2013 eingereicht werden (Mertens et al.).

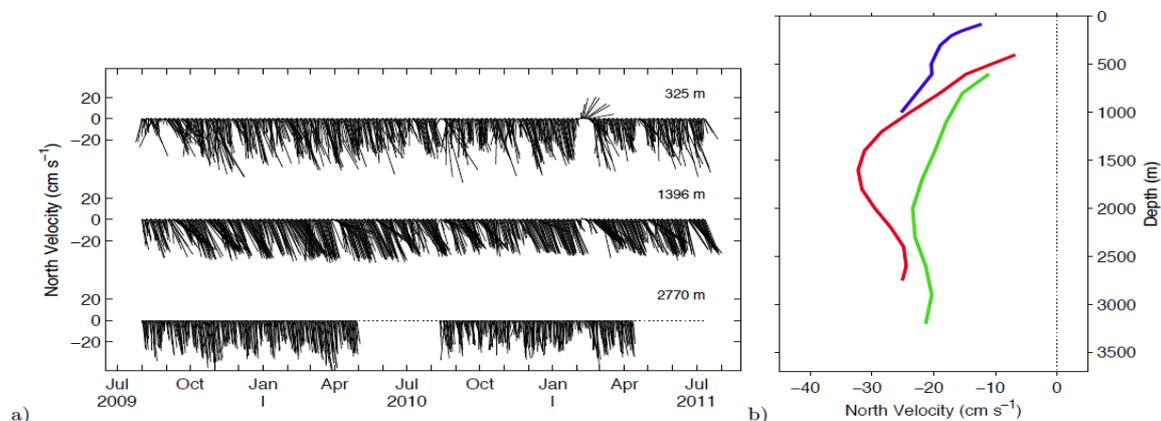


Abb. 9. (a) Zeitreihe der Geschwindigkeiten in der zentralen Verankerung BM22 (Position siehe Tab. 1), 2009 – 2011 vom obersten Strömungsmesser in 325m, vom Gerät in 1400m und in Bodennähe

von 2270m Tiefe. (b) Zweijahresmittel der Meridionalgeschwindigkeit in der westlichen Verankerung BM21 (blau), der zentralen BM22 (rot) und der östlichen Verankerung BM23 (grün). (aus Mertens et al.)

II.1.3 Auswertung

Zur Thematik von AP 2.1 wurden verschiedene Arbeiten eingereicht, bzw. sind in Vorbereitung und werden in Kürze eingereicht werden. Herr Rößler hat im Januar 2013 seine Promotion abgeschlossen. Hier ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Manuskripte und der Dissertation:

1.3.1 Transportschwankungen des Subpolarwirbels

Seit 2006 wird im Verbundvorhaben *Nordatlantik* die Stärke des Subpolarwirbels entlang des MAR mit Hilfe von vier verankerten PIES (Bodenecholote, bestückt mit Drucksensoren) erfolgreich gemessen (Rhein et al., 2011; Position der PIES siehe Abb 1, 2, 4 und 6). Aus den von den PIES gemessenen Laufzeiten lässt sich mit Hilfe von CTD- und Argo-Daten der geostrophische Transport relativ zu einem Referenzniveau ausrechnen, die Geschwindigkeit im Referenzniveau ergibt sich aus den Bodendruckmessungen. Aufgrund der unbekannt Drift der Drucksensoren können nur die Geschwindigkeitsschwankungen, aber nicht die mittleren Geschwindigkeiten im Referenzniveau bestimmt werden. Dafür werden Schiffsmessungen benötigt. Die notwendigen Techniken wurden im Projekt *Nordatlantik* entwickelt und optimiert und stehen nun zur Anwendung bereit.

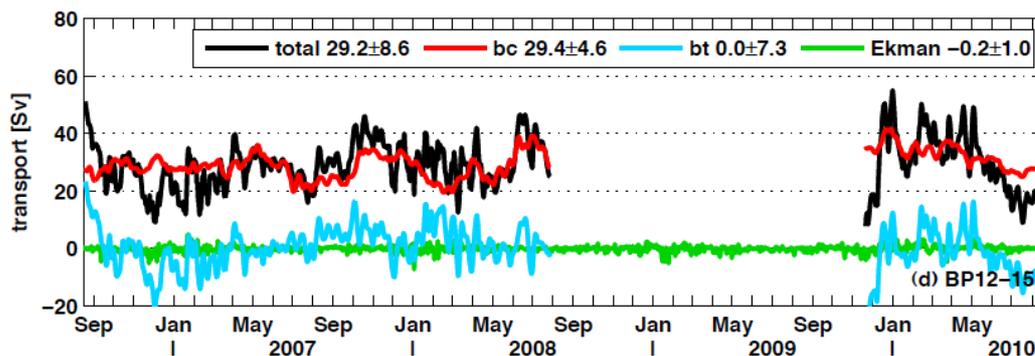


Abb. 10. Transportschwankungen [Sv] zwischen dem südlichsten (BP12) und dem nördlichsten PIES (BP15), 2006-2010. Rot: Transportschwankung relativ zum Referenzniveau (3400 dbar); blau: Transportschwankungen im Referenzniveau; grün: Ekman-Transport; schwarz: Gesamttransport (Rößler, 2013).

Die hohe Korrelation (0.73) zwischen den Oberflächengeschwindigkeiten, dem Transport relativ zum Referenzniveau (Abb. 10) und den aus Altimeter-Daten berechneten Geschwindigkeiten erlaubt es, die Transportzeitreihe bis zum Beginn der Altimeter-Daten im Jahr 1992 auszuweiten (Abb. 11). Dabei kam uns zu Hilfe, dass die PIES entlang eines Altimeter-Tracks an den Kreuzungspunkten ausgelegt wurden, so dass wir nicht auf gegitterte Daten zurückgreifen mussten.

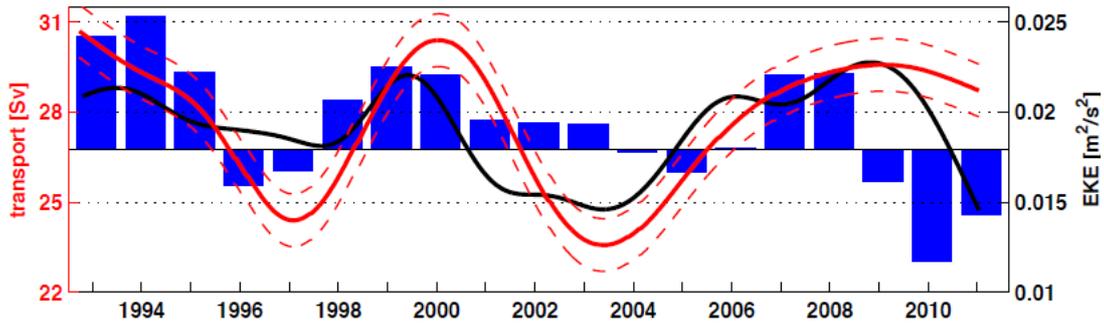


Abb. 11. Rot: Transportzeitreihe [Sv] am Mittelatlantischen Rücken, ermittelt aus einer Kombination von PIES- und Altimeterdaten; schwarz: Eddy Kinetic Energy (EKE) [m^2/s^2] aus Altimeterdaten; blaue Balken: Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO). Alle Zeitreihen sind gefiltert (3 Jahre Tiefpass-Filter). Die gestrichelte rote Linie ist die Unsicherheit von ± 0.9 Sv der Transport-Zeitreihe (Rößler, 2013).

Die Transportzeitreihe (Abb. 11) zeigt eine 2-3 Jahre Verzögerung gegenüber dem NAO-Index. Der Unterschied in den Transporten zwischen hoher und niedriger NAO beträgt ca. 6-7 Sv, d.h., ca. 20-23% des gesamten Transports. Der Trend einer abnehmenden Stärke des Subpolarwirbels, der von Häkkinen und Rhines (2004) veröffentlicht wurde, ist in diesen Altimeter-Daten nicht zu sehen. Unsere Messungen liegen im Bereich des NAC und damit des südlichen Teils des Subpolarwirbels. Das Signal von Häkkinen und Rhines (2004, 2008) liegt weiter nördlich im Bereich des Zentrums des Wirbels und scheint keine Korrelation zum NAC-Transport zu haben. Ein Manuskript zu diesen Ergebnissen ist in Vorbereitung (Roessler et al.)

1.3.2 Randstromtransporte bei 47°N

Im Rahmen des Verbundvorhabens *Nordatlantik* werden Wassermasseneigenschaften und Volumentransport im tiefen westlichen Randstrom bei 47° N kontinuierlich bestimmt. Der mittlere Transport über die beiden Auslegungsperioden beträgt 19 ± 5 Sv. Der Zeitraum 2011-2012 ist noch nicht vollständig ausgewertet. Zu fast allen Zeitpunkten war der Transport nach Süden gerichtet und schwankte zwischen 10 und 30 Sv, ein Jahresgang ist nicht erkennbar (Abb. 12, links). Eine deutliche Ausnahme stellt die Stromumkehr im Februar 2011 dar, zu diesem Zeitpunkt zeigten alle Strömungsmesser nordwärtige Geschwindigkeiten. Die Varianz-erhaltenden Spektren für die Randstromgeschwindigkeit (Abb. 12, oben rechts) zeigt die stärksten Signale in 300m Tiefe bei etwa 30 Tagen. Die zonale Geschwindigkeit (Abb. 12, unten rechts) zeigt eine höhere Varianz in 1400m Tiefe.

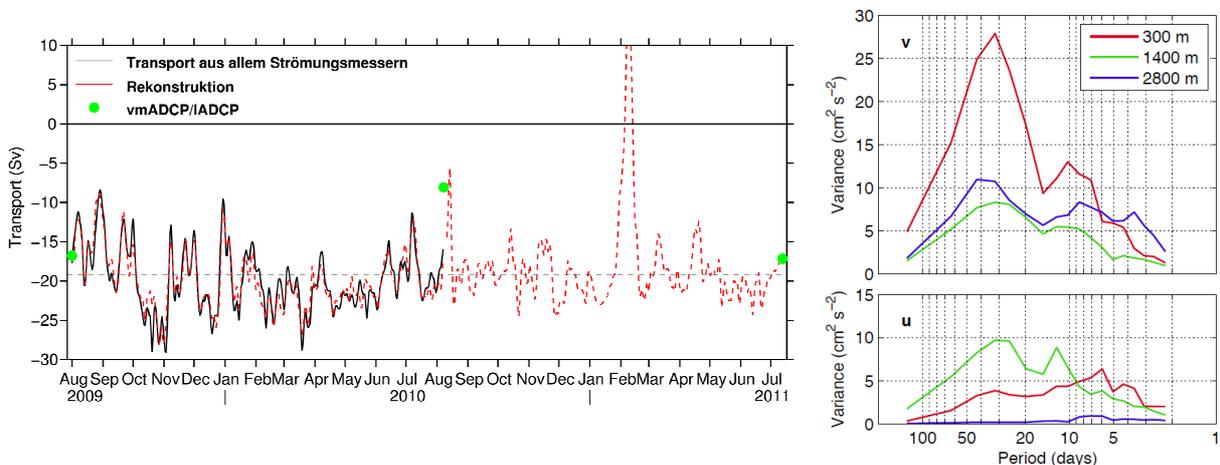


Abb. 12. Links: DWBC-Transport [Sv] bei Flemish Cap, 47°N. Grün: Transport aus den 3 Schiffsschnitten bei der Auslegung im August 2009, August 2010, und Juli 2011 (vmADCP und

LADCP). Schwarz: Transport berechnet aus allen Strömungsmessern während der ersten Auslegung von drei Randstromverankerungen. Rot: Rekonstruktion aus Strömungsmessern im oberen Teil der zentralen Verankerung, bei diesen Instrumenten war die Korrelation mit dem Gesamttransport in der ersten Auslegungsphase maximal. Für die zweite Auslegungsphase konnte der Gesamttransport nur aus den beobachteten Korrelationen aus der ersten Phase berechnet werden, da eine Verankerung verloren ging. **Rechts:** Spektrale Energiedichte aus der Strömungsmesserzeitreihe der zentralen Randstrom-Verankerung. Oben: Meridional-, unten Zonalgeschwindigkeit in verschiedenen Tiefen (rot: 300m, grün: 1400m, blau: 2800m Tiefe) (Mertens et al.)

1.3.3 Zirkulation im Neufundlandbecken

Das mittlere Strömungsfeld, erzeugt aus sechs LADCP-Schnitten (2003-2010), zeigt die wesentlichen Komponenten der Zirkulation bei 47° N (Abb. 13). Westlich von 43° W befindet sich der stark fokussierte Randstrombereich, der im Zeitraum 2009-2011 auch von den Verankerungen abgedeckt wurde. In direkter Nachbarschaft (43°W-42°W) befindet sich ein weiteres südliches Strömungsband, mit den höchsten südlichen Geschwindigkeiten in Bodennähe. Der mittlere aus Schiffsschnitten bestimmte DWBC-Transport westlich von 43° W ist, mit 13.6 Sv geringer als der aus den Verankerungen bestimmte Transport von 19 Sv. Zum Zeitpunkt der Schiffsmessung stimmen die verschiedenen Abschätzungen jedoch überein (Abb. 12, links). Aufgrund der starken zeitlichen Variabilität des Strömungsfeldes (Abb. 12) ist es nicht möglich, allein aus Schiffsschnitten einen repräsentativen Mittelwert für den Randstromtransport zu ermitteln.

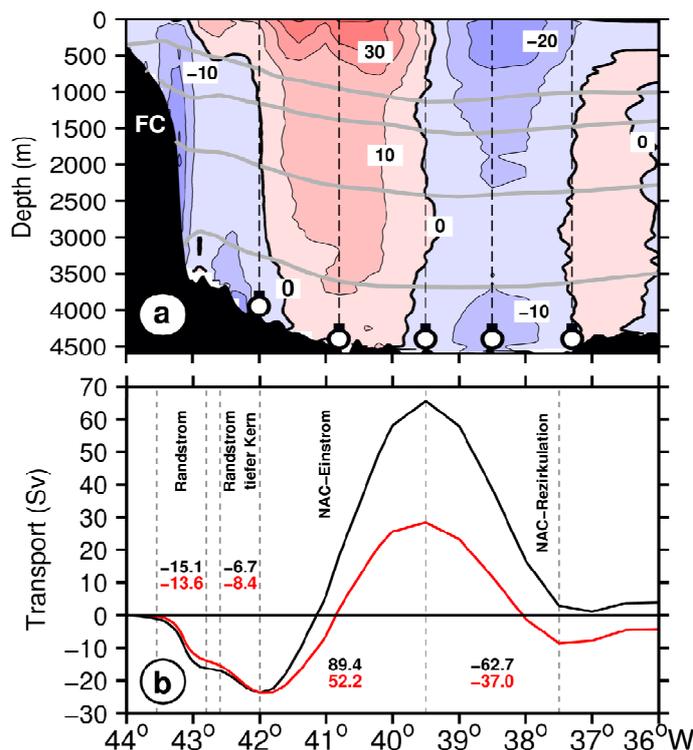


Abb. 13.

(a) Mittleres meridionales Strömungsfeld entlang 47°N, von Flemish Cap (FC) bis 36°W, aus sechs LADCP-Schnitten, drei der Realisierungen liegen in der Verankerungsperiode (Abb. 10). Positionen der im RACE-Antrag geplanten PIES-Auslegungen sind durch Symbole am Meeresboden gekennzeichnet.

(b) Gemittelte Transporte aus den sechs Realisierungen, getrennt (von links nach rechts) in den Randstrom am Kontinentalabhang, den südwardigen Transport am Kontinentalsockel, den NAC-Einstrom und die NAC-Rezirkulation. Schwarz: Gesamt-Transport, rot: Tiefenwasser-Transport.

Östlich von 42° W befindet sich der bis zum Boden reichende nordwärtige Einstrom des NAC (Abb. 13), zwischen 39°30'W und 37°30'W schließt sich erneut ein südwardiges Strömungsband an (NAC-Rezirkulation). Die Transporte dieser beiden Pfade sind mit fast 90 Sv Einstrom (top to bottom) sehr groß (Abb. 13b). Die beobachteten Gesamt-Transporte für die einzelnen Schiffsrealisierungen schwanken zwischen 40 und 160 Sv. Im Mittel gehören davon 52.5 Sv zum Tiefenwasser ($\sigma_\theta > 27.68$ kg/m³), und 37.0 Sv Tiefenwasser strömen im NAC-Rezirkulationsband nach Süden. Die in Abb. 13a

gezeigten Strombänder ähneln der mittleren Strömung aus dem hoch-auflösenden FLAME-Modell (Rhein *et al.*, 2011). Die hohen Werte im NAC-Einstrom korrespondieren zu den Transporten von 90-142 Sv (ohne Mann-Eddy), die weiter südlich bei ca. 42° N gefunden wurden (Meinen *et al.*, 2000; Meinen, 2001). Der große Einstrom bei 47° N wird jedoch durch einen nach Süden gerichteten Transport in der NAC-Rezirkulation auf etwa 30 Sv reduziert. Die zeitlichen Schwankungen sind jedoch im NAC-Einstrom und in der Rezirkulation sehr groß, so dass man auch hier allein aus Schiffsmessungen keinen guten Mittelwert bekommen kann. Notwendige hochaufgelöste Zeitreihen sollen daher im Projekt RACE mit verankerten PIES gemessen werden (Abb. 13a).

Wenn man die in unserem Nordatlantik-Projekt gewonnenen Daten im Neufundlandbecken mit veröffentlichten Transporten im Randstrom kombiniert, erhält man die Zirkulation in diesem kritischen Bereich zwischen Subtropen- und Subpolar-Zirkulation (Abb. 14). Die Auswertungen der Randstromtransporte und die Zusammenhänge mit der Zirkulation im Neufundlandbecken anhand unserer Beobachtungen und Analysen des Kieler hochauflösenden NEMO-Modells sind kurz vor dem Abschluss. Die Ergebnisse werden im Frühjahr 2013 als Manuskript eingereicht (Mertens *et al.*).

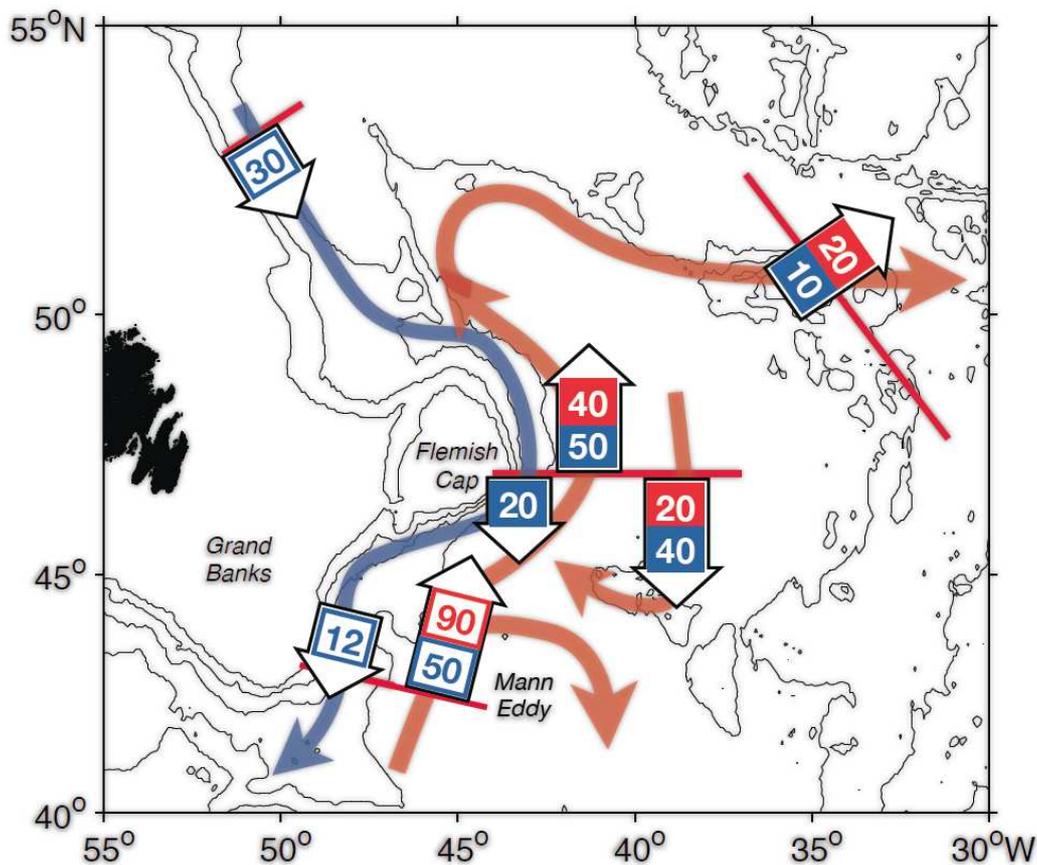


Abb. 14. Zirkulation im Neufundlandbecken in Sv für den NAC (rot) und das Tiefenwasser (blau). Die gefüllten Pfeile mit Transportzahlen sind Ergebnisse aus unserem Projekt, die offenen Pfeile sind bereits veröffentlichte Transporte von Fischer *et al.* (2004, 2010) bei 53°N, und Schott *et al.*, (2004; 2006) bei 42°N.

1.3.4 Bildungsrate Labradorseewasser

Die Bildungsrate von LSW lässt sich nicht direkt messen, sie wird stattdessen aus den Änderungen von Spurenstoff-Inventaren (FCKWs und SF₆) berechnet. Abb. 15 zeigt die neueste Zeitreihe der Bildungsrate zusammen mit dem Winter-Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und einem Index für den baroklinen Transport zwischen Bermuda und der zentralen Labradorsee (aktualisiert,

aus Rhein et al., 2011). Die LSW-Bildung hat von 1997 bis 2005 abgenommen und steigt zwischen 2005 und 2008 wieder an. Geschuldet ist dies dem anomal kalten Winter 2007/2008 in der Labradorsee, der zu einem starken Auftriebsverlust und sogar zu einer Bildung von LSW dichter als $\sigma_\theta = 27.74 \text{ kg/m}^3$ führte, was seit 1997 nicht mehr beobachtet wurde (Yashayaev und Loder, 2009). Die Ventilation führte zu einem FCKW-Anstieg im LSW. Die nachfolgenden Winter waren wieder wärmer, so dass die Bildung von tiefem LSW nicht mehr möglich war. Die Korrelation zwischen LSW Bildungsrate und NAO-Index ist nicht hoch, da die Bildungsrate nicht nur von den Oberflächenflüssen, sondern auch von der Dichteschichtung in der Labradorsee abhängt. Die Schichtung nimmt bei Ausbleiben der Konvektion zu. Sie wird auch durch die Advektion von Anomalien in Salz und Wärme aus dem Westgrönlandstrom beeinflusst.

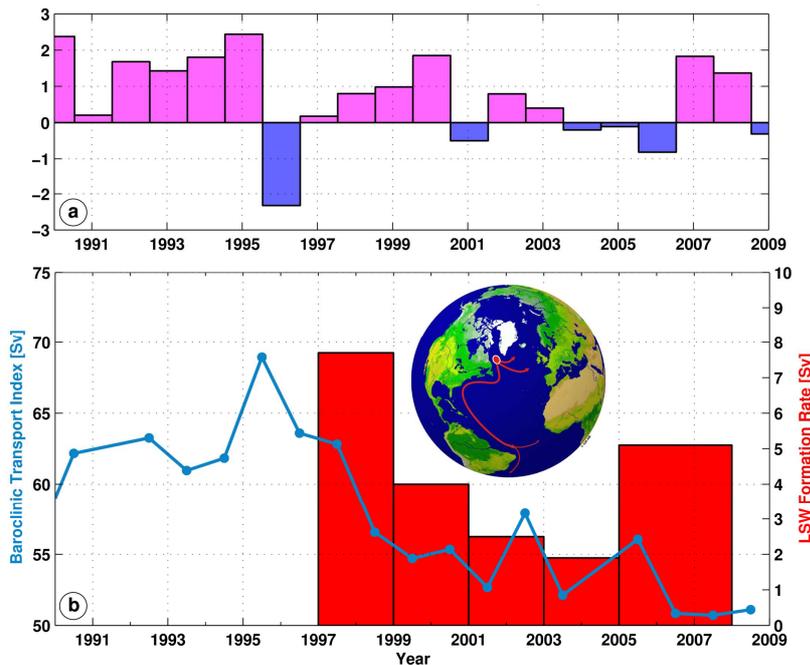


Abb. 15. (a) Winterlicher NAO-Index, (DFJM) 1990-2009.

(b) Aktualisierte Zeitreihen der LSW-Bildungsrate (rot) und des Transport-Indexes (blau) für den ostwärtigen baroklinen Transport zwischen Bermuda und der zentralen Labradorsee in den oberen 2000m der Wassersäule, bezogen auf ein Referenzniveau von 2000m Tiefe. Der eingebundene Kartenausschnitt zeigt das LSW-Bildungsgebiet und die Hauptausbreitungspfade (Kieke et al., 2006, 2007; Rhein et al., 2011).

Der barokline Transport-Index umfasst den nördlichen Subtropenwirbel und den Subpolarwirbel (Curry und McCartney, 2001; Kieke et al., 2007; Rhein et al., 2011) und wird als ozeanisches Analogon zur NAO gesehen (Curry und McCartney, 2001). Der Index nimmt seit 1997 ebenfalls ab, was als Abschwächen der zonalen Zirkulation und damit auch des Subpolarwirbels interpretiert werden kann. Häkkinen und Rhines (2004, 2009) folgerten aus Altimeter-Daten, dass der Subpolarwirbel seit Anfang der 1990er Jahre bis 2005 abnahm. Unsere Rekonstruktion des Transports des südlichen Zweigs des Subpolarwirbels aus PIES- und Altimeter-Daten zeigt allerdings, wie oben berichtet, keinen Trend.

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 Herrn Dipl.-Oz. Fritz Karbe besetzt, der sich insbesondere um die Auswertung der Verankerungsdaten bei 47° N kümmern sollte. Herr Karbe hat uns zu Ende des Projektes verlassen. Die technische Stelle wurde mit Herrn Klaus Bulsiewicz besetzt, ohne dessen Erfahrung (er hat auch die Bremer SF_6 -Anlage aufgebaut) und Expertise die Spurenstoffmessungen nicht durchgeführt werden können.

Die für Investitionen zur Verfügung stehenden Mittel wurden wie bewilligt für die Beschaffung eines Bodenecholots (PIES), eines akustischen Auslösers und für akustische Strömungsmesser eingesetzt.

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. Ähnliche Erwartungen haben wir in Bezug auf die Zeitreihen der Transportschwankungen im Subpolarwirbel, die wir jetzt in Kombination mit Altimeter-Daten auf den Zeitraum 1992-2011 ausgeweitet haben, und die Randstromtransporte bei 47°N.

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 Erfolge und geplante Veröffentlichungen (ab Sep. 2009)

Veröffentlicht:

Rößler, A., (2013): Observed subpolar gyre transports at the Mid-Atlantic Ridge. *Dissertation*, Universität Bremen, 121 pgs, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:46-00103001-19>

Stendardo, I., and N. Gruber (2012): Oxygen trends over five decades in the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 117, C11, C11004, doi: 10.1029/2012JC007909.

Rhein, M., D. Kieke, S. Hüttl-Kabus, A. Rößler, C. Mertens, R. Meissner, B. Klein, C. W. Böning and I. Yashayaev (2011): Deep-water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep-Sea Res. II*, doi: 10.1016/j.dsr2.2010.10.061.

Steinfeldt, R., T. Tanhua, J. L. Bullister, R. M. Key, **M. Rhein**, and **J. Köhler** (2010): Atlantic CFC data in CARINA. *Earth System Science Data*, 2, 1-15.

Cunningham, S., M. Baringer, W. Johns, J. Toole, S. 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 (2010): The Present and Future System for Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Heat Transport. *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, Italy, 21-25 September 2009, Hall, J., Harrison, D. E. & Stammer D., Eds., ESA Publication WPP-306.

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.

Eingereicht:

Walter, M. and **C. Mertens** (12/2012): North Atlantic Current variability and associated mixing, *Geophys. Res. Lett.*, in revision.

In Vorbereitung:

Fischer, J., ..., **C. Mertens, M. Rhein**, et al. (2013): Intraseasonal variability in the DWBC in the subpolar North Atlantic

Kieke, D., M. Rhein, and **R. Steinfeldt** (2013): The importance of the DWBC for the propagation of the newly formed deep water in the North Atlantic.

Mertens, C., M. Rhein, et al. (2013): DWBC transports and circulation in the Newfoundland basin.

Roessler, A. et al. (2013): Subpolar gyre transports from PIES and altimeter data.

Scholz, P., G. Lohmann, M. Ionita, **D. Kieke**, and **M. Rhein** (2013): Model-data comparison of Labrador Sea Water properties using a finite-element sea-ice ocean model.

Stoerwald, I., D. Kieke, M. Rhein, and N. Gruber (2013): Interannual to decadal oxygen variability in the mode and intermediate waters along 47°N in the eastern North Atlantic Ocean.

Studienarbeiten, Doktor-, Diplom-, Master- und Bachelor-Arbeiten, die sich mit der Thematik und/oder mit Daten aus dem AP2.1 befassen: (ab Sep 2009)

Degenhard, P. (2010): Transporte im Subpolarwirbel, *Diplomarbeit*, Universität Bremen.

Meissner, R. (2010): Einfluss von mesoskaligen Wirbeln auf die Feinstruktur-Variabilität im subpolaren Nordatlantik, *Diplomarbeit*, Universität Bremen.

Schneider, L. (2011): Entwicklung der Mixed-Layer im subpolaren Nordatlantik, *Diplomarbeit*, Universität Bremen.

Uhe, C. (2011): Analysis of satellite altimetry data with regard to the North Atlantic Current, *Diplomarbeit*, Universität Köln/Universität Bremen.

Fehsenfeldt, F. (2012): Optimierte Messstrategie für die meridionale Umwälzbewegung im Nordatlantik bei 47°N, *Diplomarbeit*, Universität Bremen.

Horn, M. (2012): Frontenerkennung im subpolaren Nordatlantik aus SST Daten, *Bachelor-Arbeit*, Hochschule Bremerhaven/Universität Bremen.

Wittke, F. (2012): Schwankungen der Oberflächenzirkulation aus Altimeterdaten, *Bachelor-Arbeit*, Universität Bremen.

Rößler, A. (2013): Observed subpolar gyre transports at the Mid-Atlantic Ridge. *Dissertation*, Universität Bremen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht	
3. Titel AP1.3: Beiträge des Nordpolarmeers zu Veränderungen des Nordatlantiks im Verbundprojekt: Der Nordatlantik als Teil des Erdsystems: Vom Systemverständnis zur Analyse regionaler Auswirkungen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Gerdas, Rüdiger Karcher, Michael Kauker, Frank Rabe, Benjamin Schauer, Ursula	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2012	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2013	
	7. Form der Publikation Abschlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Deutschland	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen *) 03F0605 E	
	11. Seitenzahl 15	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen 10	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Nordpolarmeer akkumulieren große Mengen von Süßwasser (neben dem Niederschlagsüberschuss über dem Nordpolarmeer auch 10% Prozent der weltweiten Festlandsabflüsse und salzarmes Oberflächenwasser aus dem Pazifik). Süßwasser gelangt als Meereis und in flüssiger Form über unterschiedliche Meeresstraßen in die Tiefenwasserbildungsgebiete des Nordatlantik. Das Zwischenwasser ist ursprünglich Atlantikwasser, das durch verschiedene Prozesse im Nordpolarmeer modifiziert wurde und durch die Framstraße zurück in den Nordatlantik gelangt. Eigenschaften und Export aller Süßwasserkomponenten und Atlantikwassermassen unterliegen erheblichen jährlichen und dekadischen Schwankungen. Folgende Aufgaben wurden in diesem Arbeitspaket bearbeitet: A) Analyse der Veränderungen von Temperatur und Salzgehalten der oberen Schichten im Nordpolarmeer und Fortsetzung der Erfassung durch eisgetragene CTD-Profiler und Schiffsmessungen. B) Analyse der Zirkulation der oberflächennahen Schichten im Nordpolarmeer und Fortsetzung der Erfassung durch eisgetragene Strömungsprofiler und Schiffsmessungen. C) Dichteanomalien des Arktischen Zwischenwassers in Modellsimulationen des 20. Jahrhunderts.		
19. Schlagwörter Arktis, Nordpolarmeer, Süßwassergehaltsanstieg, Süßwasserexport, warme Atlantikwasserzirkulation		
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 “AP1.3: Beiträge des Nordpolarmeers zu Veränderungen des Nordatlantiks” (Contribution of the Arctic Ocean to changes in the North Atlantic) “im Verbundprojekt: Der Nordatlantik als Teil des Erdsystems: Vom Systemverständnis zur Analyse regionaler Auswirkungen” (within the joint project: The North Atlantic as part of the earth system: from systematic understanding to regional consequences)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Gerdes, Rüdiger Karcher, Michael Kauker, Frank Rabe, Benjamin Schauer, Ursula	5. end of project 30.09.2012	6. publication date 31.03.2013
	7. form of publication Report	
	8. performing organization(s) (name, address) Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Deutschland	
	9. originator's report no.	10. reference no. 03F0605 E
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		11. no. of pages 15
		12. no. of references
		14. no. of tables
15. no. of figures 10		16. supplementary notes
		17. presented at (title, place, date)
18. abstract Large volumes of freshwater accumulate in the Arctic Ocean; not only net precipitation in the North Polar Seas but also 10% of the worldwide continental runoff and low salinity surface water from the Pacific. In liquid form or as sea ice, freshwater reaches areas of deep water formation in the North Atlantic via various ocean passages. The intermediate water is originally Atlantic water that was modified in the Greenland-Iceland-Norwegian seas and returns to the North Atlantic via the Fram Strait. The properties and components of all freshwater components and Atlantic water masses are subject to strong annual and decadal fluctuations. In this project we worked on the following topics: A) Analysis of variability of temperature and salinity of the upper layers in the Arctic Ocean and continuation of observations using ice-tethered profiling systems and ship surveys. B) Analysis of the circulation in the upper layers of the Arctic Ocean and continuation of the observations with ice-tethered current profilers and ship surveys. C) Density anomalies of the Atlantic intermediate water in model simulations of the 20th century.		
19. keywords Arctic Ocean, Freshwater content increase, Freshwater export, warm Atlantic Water circulation		
20. publisher	21. price	

Abschlussbericht

AP1.3: Beiträge des Nordpolarmeers zu Veränderungen des Nordatlantiks

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: 03F0605 E
Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 1.9.2009 bis 30.9.2012	
Antragsteller: Prof. Dr. Ursula Schauer und Prof. Dr. Rüdiger Gerdes Projektwissenschaftler: Dr. Benjamin Rabe, Dr. Michael Karcher, Dr. Frank Kauker	

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Der Zustrom aus dem Nordpolarmeer liefert wichtige Beiträge zu den Wassermassen im Nordatlantik. Zum einen bildet der Zusammenfluss von Süßwasser im Nordpolarmeer, der letztlich in den Atlantik mündet, ein Steuerelement für die Tiefenwasserbildung. Zum anderen gelangen, durch Abkühlung und den Frier/Schmelzyklus im Nordpolarmeer, ventilierte Wassermassen direkt als ‚Overflow‘-Wasser in die meridionale Umwälzzirkulation. Aufgabe des Teilprojekts war es, den Einfluss dekadischer Variationen atmosphärischer und ozeanischer Bedingungen in der Arktis auf die thermohaline Zirkulation im Atlantik abzuschätzen.

Im Nordpolarmeer akkumulieren große Mengen von Süßwasser (neben dem Niederschlagsüberschuss über dem Nordpolarmeer auch 10% Prozent der weltweiten Festlandsabflüsse und salzarmes Oberflächenwasser aus dem Pazifik). Süßwasser gelangt als Meereis und in flüssiger Form über unterschiedliche Meeresstraßen in die 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 direkt beeinflusst. Die Transportrate durch die verschiedenen Meeresstraßen hängt unter anderem von der Süßwasserzirkulation innerhalb des Nordpolarmeers ab. Dieser Zusammenhang sollte hier untersucht werden. Das Zwischenwasser ist ursprünglich Atlantikwasser, das durch verschiedene Prozesse im Nordpolarmeer modifiziert wurde und durch die Framstraße zurück in den Nordatlantik gelangt. Eigenschaften und Export aller Komponenten unterliegen erheblichen jährlichen und dekadischen Schwankungen: beim Süßwasser bedingt durch Umverteilungen zwischen den Reservoirs Eis und Wasser, beim Zwischen- und Tiefenwasser abhängig sowohl von den Prozessen im Nordpolarmeer aber auch von den Eigenschaften des nach Norden transportierten Atlantikwassers selbst. Während in der ersten Projektphase, die mit dem internationalen Polarjahr (IPY2007/2008) zusammenfiel, ein Schwerpunkt auf der Erhebung umfangreicher Beobachtungen in der zentralen Arktis, unter anderem auch aus technologischen Neuentwicklungen, lag, sollte in der zweiten Projektphase der Fokus auf der Analyse dieser Daten liegen, um die skizzierten Zusammenhänge zu klären. Modellsimulationen zusammen mit der Kombination von historischen Beobachtungsdaten und den IPY-Daten, die erstmalig arktisweit synoptische Beobachtungen lieferten, sollten benutzt werden, um die Eigenschaften und Exportraten von Zwischenwasser sowie der Exportraten von flüssigem Süßwasser aus dem Nordpolarmeer und der Verteilung auf die einzelnen Straßen besser zu beschreiben. Um die Entwicklungen weiter zu verfolgen, sollten die Beobachtungen eingebunden in internationale Programme in geringerem Umfang fortgeführt werden. Die Wassermasseneigenschaften und

die Zirkulation der oberen Süßwasser führenden Schichten des Nordpolarmeeres sollten langfristig erfasst werden, um den Einfluss dekadischer Fluktuationen des Antriebs auf die 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. Salzgehalte im Nordpolarmeer, dem Europäischen Nordmeer und dem subpolaren Atlantik sind mit entscheidend für den großräumigen meridionalen Druckgradienten, der ein Maß für die Intensität der großräumigen Zirkulation ist. In den Jahrzehnten seit 1960 sind bedeutende Umverteilungen von Salz beobachtet worden, deren Ursachen nur unzureichend bekannt sind. Ferner bewirken die Veränderungen der physikalischen Rahmenbedingungen Fluktuationen im Beitrag des Nordpolarmeeres zum globalen Kohlenstoffkreislauf. Ziel des Projekts war es, durch Messungen und Analyse in Verbindung mit der Modellierung in AP1.1, sowie der Arbeiten in AP2.1, AP2.2, AP2.3, AP3.2 und AP4.1 zu entscheiden, welche Messungen ausreichen, um den großräumigen Zustand des Nordpolarmeeres zur Beantwortung der oben stehenden Fragestellungen hinreichend zu charakterisieren.

Zur Erfüllung der Aufgaben wurden folgende Ziele gesetzt:

- A) Analyse der Veränderungen von Temperatur- und Salzgehaltsschichtung der oberen Schichten im Nordpolarmeer und Fortsetzung der Erfassung durch eisgetragene CTD-Profiler und Schiffsmessungen
- B) Analyse der Zirkulation der oberflächennahen Schichten im Nordpolarmeer und Fortsetzung der Erfassung durch eisgetragene Strömungsprofiler und Schiffsmessungen
- C) Dichteanomalien des Arktischen Zwischenwassers in Modellsimulationen des 20. Jahrhunderts

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

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

Prof. Dr. U. Schauer, Projektleiterin, Prof. Dr. R. Gerdes, Projektleiter
Dr. Benjamin Rabe, Projektwissenschaftler, Dr. Michael Karcher, Projektwissenschaftler, Dr. Frank Kauker, Projektwissenschaftler
Dr. E. Fahrbach, C. Koeberle, G. Rohardt, 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 Nordpolarmeeres 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, BMBF Verbundvorhaben Nordatlantik – erste Projektphase). 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).

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Auf insgesamt 4 Expeditionen mit Polarstern in den Jahren 2011 und 2012 (ARKXXVI-3, ARKXXVII-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 Polar Ocean Profiling System, POPS) ergänzt, wodurch die räumliche und zeitliche Abdeckung des Untersuchungsgebiets erheblich verbessert werden konnte. Durch internationale Kooperation, auch nach dem Internationalen Polarjahr (IPY 2007/08), wurde der Datensatz weiter vervollständigt.

In der ersten Phase waren bereits vorhandene hydrographische Daten aus der Framstraße ausgewertet worden. Während POLARSTERN-Reisen in den Jahren 2003, 2004, 2005 und 2008 waren $\delta^{18}\text{O}$ -Daten gewonnen worden, 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. Dieser Datensatz und die Auswertung konnten durch Kooperation mit dem Norwegian Polar Institute (NPI, Tromsø, Norwegen) auf die Jahre 2009, 2010 und 2011 ausgeweitet werden

und somit weiter zum Verständnis der Süßwasseränderungen im Nordpolarmeer sowie den Exporten beitragen. Die Analysen der Änderungen im Süßwassergehalt aus der ersten Phase konnten zeitlich ausgeweitet werden und erstmals ein Verlauf (Trend) der Änderungen in der Zeit von 1992-2012 gezeigt werden.

Neben autonomen CTD-Profilsystemen wurde während der POLARSTERN-Expedition ARKXXVI-3 im Sommer 2011 auch ein weiteres ITAC (Ice-tethered Acoustic Current Profiler) zur autonomen Erfassung von Strömungen in den oberen 300 m im Eis ausgebracht. Leider führten ungünstige Bedingungen während des Ausbringens und ein Hardwarefehler dazu, dass das Gerät keine wissenschaftlich auswertbaren Messungen durchführen konnte.

Mit dem regionalen gekoppelten Eis-Ozean Modell NAOSIM (North Atlantic-Arctic Sea Ice Ocean Model) wurden die Dynamik des Süßwassergehaltes sowie die Ausbreitung von Dichteanomalien im Nordpolarmeer und der Austausch mit dem Nordatlantik untersucht. Außerdem fanden Tracerausbreitungsexperimente statt. Alle Experimente erfolgten über den Zeitraum von 1948 bis 2011 und benutzten Oberflächendaten der NCEP/NCAR Reanalyse. Die Ergebnisse dieser Experimente flossen in die Synthese von Beobachtungen und Modellergebnissen ein.

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

Das Nordpolarmeer liefert Süßwasser, als Eis und in flüssiger Form, in der Größenordnung von 0.15 Sv in den Nordatlantik (Aagaard und Carmack, 1989). Während die Zirkulation des Meereises durch satellitengestützte Beobachtungen und ein schon länger etabliertes Bojenmessnetz (IABP, International Arctic Buoy Programme) bestimmt werden können, ist die Messung der Ausbreitung des flüssigen Süßwassers von Aufnahmen der Hydrographie abhängig, die in der zentralen Arktis nur sehr sporadisch vorliegen. Die Abnahme des Volumens des Meereises um ca. 40% in den vergangenen vier Dekaden, begleitet durch einen zunehmendem Eintrag an Süßwasser (Peterson et al., 2002; Overeem et al., 2010), verstärkt die Notwendigkeit, die Zirkulation des flüssigen Süßwassers quantitativ zu erfassen.

Süßwasser aus dem Nordpolarmeer breitet sich zu den Bildungsgebieten von Tiefenwasser im subpolaren Atlantik aus. 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. Auch die horizontalen Wirbel reagieren unter Umständen sehr sensitiv auf den thermohalinen Antrieb (Brauch and Gerdes, 2005).

Die Prozesse, die die Akkumulation, sowie die Verlagerung von Süßwasser innerhalb der Arktis und seinen Export 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 weisen darauf hin, dass in den frühen 1990er Jahren, in einer Phase positiver Arktischer Oszillation, die Zirkulation salzarmen Pazifikwassers im Beaufortwirbel verschoben wurde und dadurch mehr Pazifikwasser in die Framstraße gelangte als zuvor. Danach nahm der südwärtige Transport von meteorischem Wasser (Kontinentalabfluss und Niederschlag) in der westlichen Framstraße zu (Rabe et al., 2009), was u. A. auf eine Änderung der Ausbreitungspfade zurückzuführen ist. So wurden um 2005, im Vergleich zu den frühen 1990ern, erhöhte Anteile meteorischen Wassers in der zentralen Arktis gemessen (Alkire et al., 2007; Jones et al., 2008). Des Weiteren konnten erhöhte Mengen von Eisschmelze und meteorischen Wassers im Beaufortwirbel identifiziert werden (Yamamoto-Kawai et al., 2008).

Erste Versuche der arktisweiten Analyse von flüssigem Süßwasser wurden von Polyakov et al. (2008) durchgeführt. Diese Analyse der Variabilität des Süßwassergehalts des oberen Nordpolarmeeres umfasst das gesamte 20. Jahrhundert. Leider beruht die Analyse auf einer spärlichen Datenlage. Die Studie stellt Zusammenhänge der Süßwassergehaltsänderungen zur großskaligen atmosphärischen Zirkulation, repräsentiert durch den Arctic Oscillation Index (Zhou et al., 2001), her. Rabe et al. (2011) stellten einen arktisweiten Anstieg des Süßwassergehalts zwischen den Zeitperioden 1992-1999 und 2006-2008 fest.

Neben Änderungen im arktischen Süßwassergehalt, wurde auch der Austausch von Süßwasser zwischen dem Nordpolarmeer und anliegenden Meeren quantifiziert. Der Export von Süßwasser (flüssig) aus der Framstraße (de Steur et al., 2009) zeigt keinen Trend über den Zeitraum von 1998 bis 2008 auf; entsprechende Abschätzungen für die Exporte durch das Kanadische Archipel waren bei Projektbeginn noch nicht verfügbar. Dmitrenko et al. (2008) zeigten einen Zusammenhang zwischen mehrjähriger Variabilität regionaler atmosphärischer Wirbelstärke und Änderungen im Süßwasseraustausch zwischen den arktischen Ozeanbecken und den sibirischen Schelfen. Eine arktisweite Zunahme im Kontinentalabfluss von 1977 bis

2007 (Overeem et al., 2010) bildet eine zusätzliche Komponente für die weitere Entwicklung des Süßwasserhaushalts des Nordpolarmeeres.

Der gesamte Süßwassertransport (flüssig und in Form von Eis) vom Nordpolarmeer in das Europäische Nordmeer und den subpolaren Atlantik, ist von einzelnen herausragenden Ereignissen gekennzeichnet. Die sogenannte „Große Salzgehaltsanomalie“ in den späten 1960er Jahren wurde wahrscheinlich durch einen über mehrere Jahre erhöhten Eistransport durch die Framstraße und die Barentssee ausgelöst (Häkkinen, 1993). Dem erhöhten Eisexport ging eine Reihe von Jahren mit erniedrigten Exportraten und daher einer Eisakkumulation im Nordpolarmeer voraus (Köberle und Gerdes, 2003). Durch die Akkumulation von Eis im Nordpolarmeer entstand eine Verzögerung zwischen atmosphärischem Antrieb und Eisexport. In der Regel reagiert der Eisexport aber unmittelbar auf Änderungen des Windes, daher besteht hinsichtlich der Eisexporte nur ein sehr beschränktes Vorhersagepotential. 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 and Gerdes, 2003).

Nach der „Großen Salzgehaltsanomalie“ 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 durch Analyse 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 vorausging. 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 wichtig zu sein. Damit erlangen die Speicherung von Süßwasser in der Halokline und die Umverteilungen von Salz innerhalb des Nordpolarmeers eine große Bedeutung für die Exportraten. Diese Prozesse laufen auf Zeitskalen von mehreren Jahren bis Jahrzehnten ab und beinhalten damit das Potential für Vorhersagen.

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.
- Alkire, M. B., K. K. Falkner, I. Rigor, M. Steele, and J. Morison (2007): The return of Pacific waters to the upper layers of the central Arctic Ocean, *Deep-Sea Res. I*, 54, 1509–1529.
- Belkin, I. M., S. Levitus, J. Antonov, and S. A. Malmberg (1998): “Great Salinity Anomalies” in the North Atlantic, *Prog. Oceanogr.*, 41, 1– 68.
- 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.
- 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
- de Steur, L., E. Hansen, R. Gerdes, M. Karcher, E. Fahrbach, and J. Holfort (2009): Freshwater fluxes in the East Greenland Current: A decade of observations, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23611, doi: 10.1029/2009GL041278.
- Dmitrenko, I. A., S. A. Kirillov, V. V. Ivanov, and R. A. Woodgate (2008): Mesoscale Atlantic Water Eddy off the Laptev Sea continental slope carries the signature of upstream interaction, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2007JC004491.
- Falck, E., G. Kattner, and G. Budéus (2005): Disappearance of Pacific Water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 32(14, L14619), doi: 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.

- Jones, E. P., L. G. Anderson, S. Jutterström, L. Mintrop, and J. H. Swift (2008): Pacific fresh water, river water and sea ice meltwater across Arctic Ocean basins: Results from the 2005 Beringia Expedition, *J. Geophys. Res.*, 113, C08012, doi: 10.1029/2007JC004124.
- 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.
- Overeem, I. and Syvitski, J. P.M. (2010): Shifting discharge peaks in Arctic rivers, 1977-2007. *Geogr. Ann.*, 92A(2), 285–296.
- Rabe, B., Mackensen, A., Schauer, U., Karcher, M., Hansen, E., and Beszczynska-Möller, A. (2009): Freshwater components and transports in the Fram Strait: Recent observations and changes since the late 1990s. *Ocean Sci.*, 5, 219–233.
- Rabe, B., Karcher, M., Schauer, U., Toole, J., Krishfield, R., Pisarev, S., Kauker, F., Gerdes, R., and Kikuchi, T. (2011): An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to 2006-2008, *Deep-Sea Res. I*, 58, 173–185.
- 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. C0202, FEB 26.
- Vinje, T. (2001): Fram Strait ice fluxes and atmospheric circulation, 1950– 2000, *J. Clim.*, 14, 3508–3517.
- Yamamoto-Kawai, M., F. A. McLaughlin, E. C. Carmack, S. Nishino, and K. Shimada (2008): Freshwater budget of the Canada Basin, Arctic Ocean, from salinity, 18o, and nutrients, *J. Geophys. Res.*, 113, C01007, doi: 10.1029/2006JC003858.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Feldarbeiten in AP1.3 wurden auf internationaler Ebene mit anderen Forschungsinstituten koordiniert. Insbesondere wurden die Messungen durch Material und Messungen von John Toole (WHOI) und Takashi Kikuchi (JAMSTEC) unterstützt bzw. ergänzt. Die Tracer-Messungen ($\delta^{18}O$) 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 der EU-Projektes DAMOCLES und ArcRisk 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 und der Ausbreitung von Tracern.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Die Zuwendungen wurden verwendet zur Finanzierung der Wissenschaftlerstellen für
 Dr. Benjamin Rabe, angestellt von 01.10.2009 bis 31.08.2012,
 Dr. Michael Karcher, angestellt von 01.10.2009 bis 30.09.2012,
 Dr. Frank Kauker, angestellt von 01.10.2009 bis 30.09.2012,

Inlandsreisen:

- Treffen der Steuergruppe BMBF NA-II in Hamburg, April und Oktober 2010, und im Februar 2012 (Schauer).
- BMBF NA-II Statusseminar in Hamburg, Juli 2010 (Gerdes, Schauer).
- BMBF NA-II Statusseminar in Kiel, Juli 2011 (Schauer, Gerdes, Rabe).
- BMBF NA-II Statusseminar in Hamburg, Mai 2012 (Schauer).
- THOR Konferenz (BMBF NA-II Abschlussveranstaltung) in Hamburg, September 2012 (Schauer).

Auslandsreisen:

DAMOCLES General Assembly in Brüssel, November 2009.
 American Geophysical Union Ocean Sciences Meeting in Oregon/USA, Februar 2010 (Rabe).
 International Liege Colloquium on Ocean Dynamics in Liege / Belgien, April 2010 (Rabe).
 European Geophysical Union General Assembly in Wien, April 2011 (Rabe).
 ASOF/THOR Meeting in Bergen, November 2011 (Karcher).
 Fahrtleitung RV Polarstern Reise ARKXXVI-3 von Tromsø / Norwegen nach Bremerhaven im August-Oktober 2011 (Schauer).
 Zusammenarbeit mit B. Rudels an der Universität in Helsinki, März 2012.
 Konferenz IPY: From Knowledge to Action in Montreal / Kanada, April 2012 (Karcher).

Folgende Studien wurden unternommen, untergliedert nach denen in 1. aufgelisteten Zielsetzungen:

Zu (A) : **Veränderungen des Süßwassergehaltes im Nordpolarmeer und Änderungen in der Intensität und Zusammensetzung der Süßwasserexporte**

In der ersten Projektphase waren Änderungen im Süßwassergehalt der oberen Becken des Nordpolarmeeres an Hand von Salzgehaltsmessungen in den Monaten Juli/August/September der letzten zwei Dekaden untersucht worden. Dabei zeigte sich ein Anstieg im Süßwassergehalt um ca. 20 % zwischen den Zeitperioden 1992-1999 und 2006-2008 (Rabe et al., 2011; siehe Publikationsliste). Diese Analysen wurden auf die Interpolation der Salzgehaltsmessungen von allen Jahreszeiten auf alle Monate von 1992 bis 2012 ausgeweitet (Abbildung 1). Hierbei zeigt sich, dass die Erhöhung im Kanadabecken noch zugenommen hat. Der Verlauf der Süßwassergehaltsanomalien zum zeitlichen Mittel zeigt einen Trend von $600 \pm 300 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$. Dies entspricht einem Anstieg von 12000 km^3 in 21 Jahren (Abbildung 2). Die laufenden Jahresmittel der Werte aus Beobachtungen, vergleichen generell sehr gut mit Jahresmitteln aus dem NAOSIM Modell. Interannuale und saisonale Schwankungen in den beobachteten Süßwassergehalten sind insbesondere seit Mitte der ersten Dekade der 2000er zu sehen, da durch den Einsatz von autonom messenden Plattformen, zur Erfassung von Salzgehaltsprofilen, auch ganzjährig flächendeckend Daten zur Verfügung stehen. Die Zeitreihe wird kontinuierlich durch neu verfügbare Salzgehaltsmessungen verbessert und erweitert. Nettosüßwasserexporte aus dem Nordpolarmeer im NAOSIM Modell zeigen ein gegenläufiges Verhalten zu den Süßwassergehalten. Der Export ist reduziert während der Süßwassergehalt zunimmt (Abbildung 3). Eine Publikation der Ergebnisse aus Abbildungen 1 und 2 ist momentan in Arbeit.

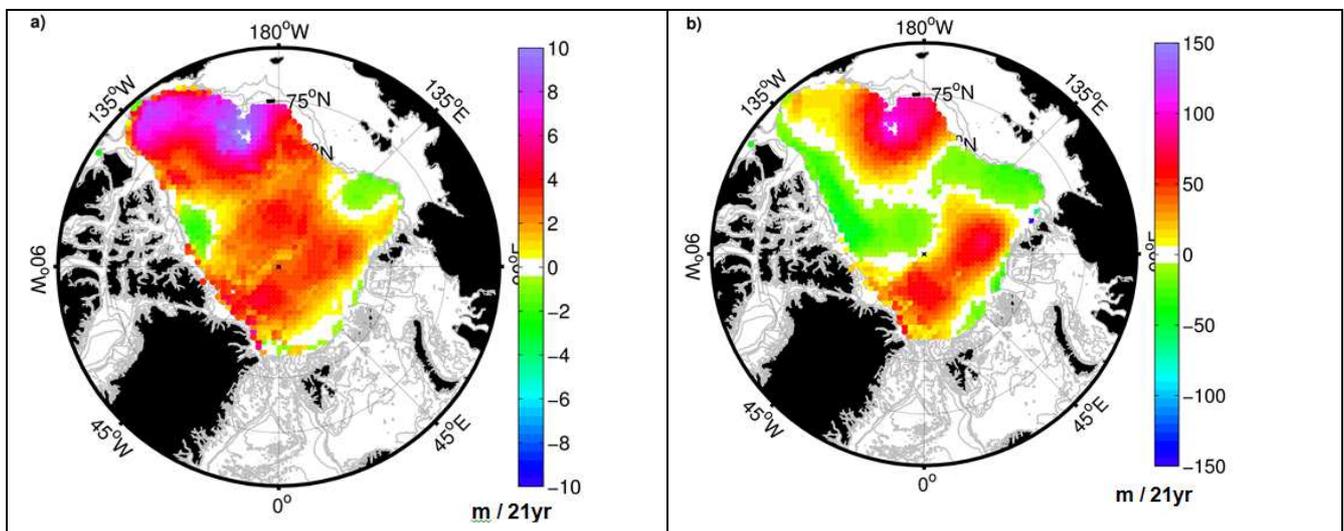


Abbildung 1:

Trend der flüssigen Süßwasserinventare zwischen der Isohaline 34 und der Oberfläche im Zeitraum 1992-2012 (a), sowie der Tiefe der Isohaline 34 (b). Die Süßwasserinventare wurden aus Salzgehaltsprofilen berechnet und horizontal auf ein gleichmäßig angeordnetes Gitter interpoliert ("objectively mapped").

In der ersten Projektphase waren südwärtige Transporte von Süßwasser aus Festlandabfluss und Niederschlag (meteorisches Wasser), aus Pazifikwasser sowie die Netto-Eisschmelze in der westlichen Framstraße untersucht worden. Messdaten des Salzgehalts, der Temperatur und von Sauerstoffisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) wurden mit Geschwindigkeitsmessungen kombiniert, um Volumen- und Wassermassentransporte zu berechnen. Diese Arbeiten wurden in der zweiten Projektphase um Messungen bis 2011 sowie um weitere

Messgrößen (Nährstoffe) zur Identifikation von Pazifikwasser erweitert. Die Ergebnisse zeigen erhöhte Transporte meteorischen Wassers von 1998 bis 2005, und sinkende nach 2008. Pazifikwasser wurde nur am

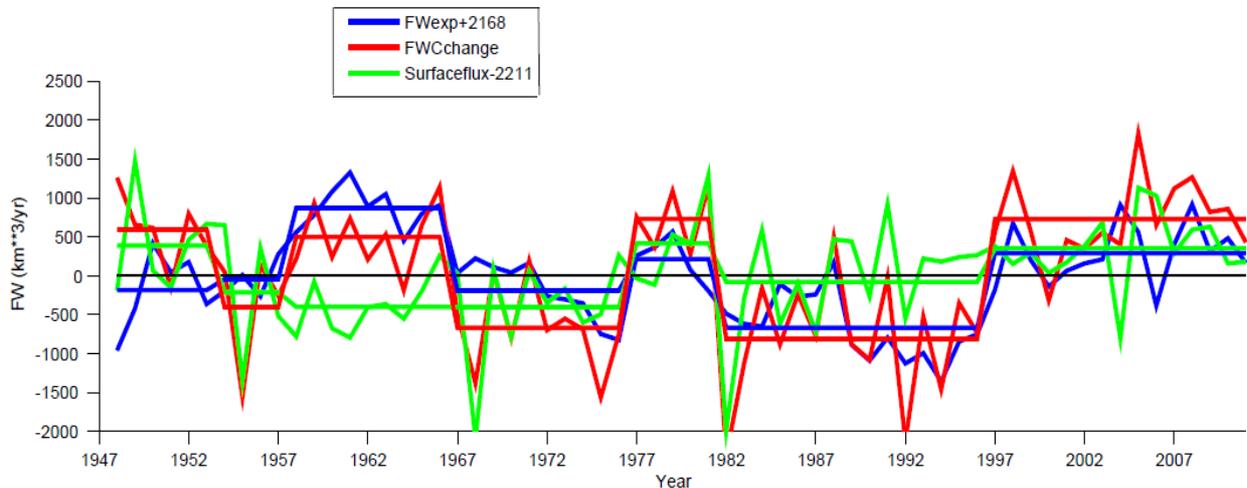
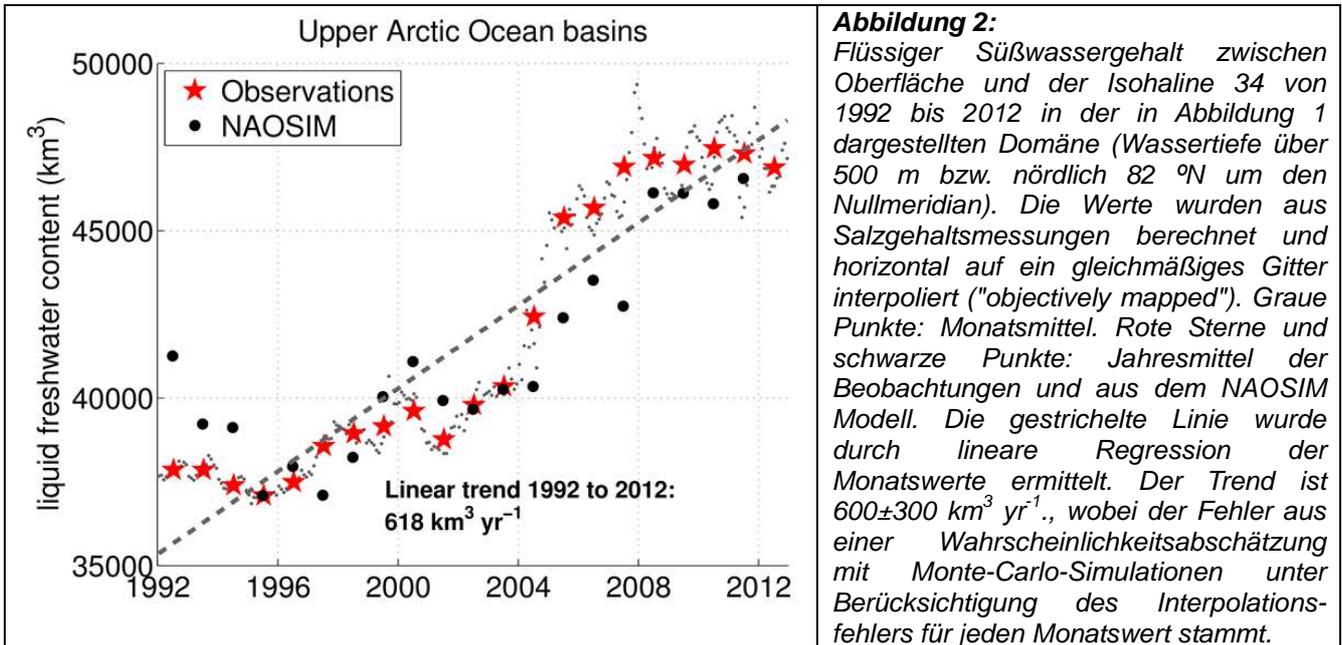
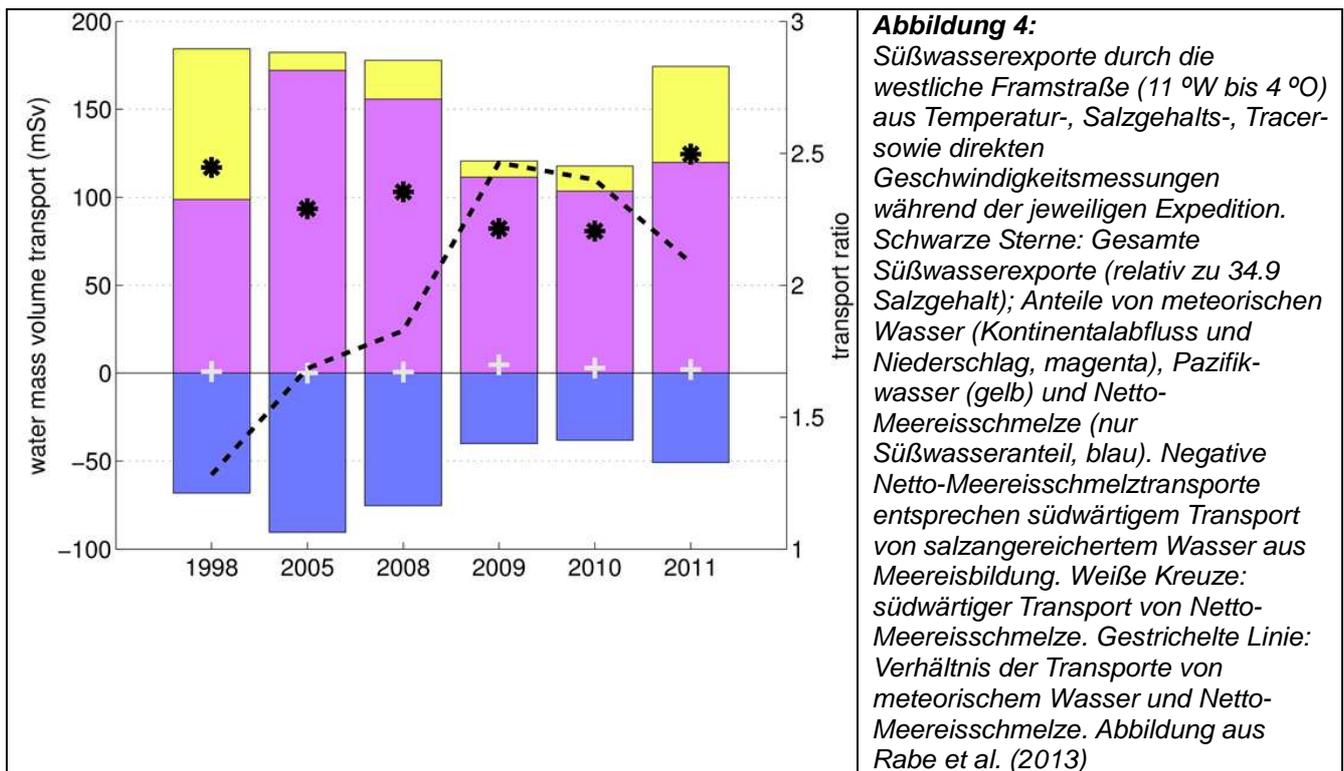


Abbildung 3:
 Zeitserie der jährlichen Änderung des flüssigen Süßwassergehalts im NAOSIM Modell zwischen der Isohaline 34 und der Oberfläche in der Gesamtarktis (rote Linie), der Nettoexportanomalie von Süßwasser (blaue Linie, negative Werte bedeuten erhöhten Export) und der Süßwasserflüsse durch die Ozeanoberfläche (grüne Linie). Seit 1998 nahm der Süßwassergehalt beständig zu, während der Export im Vergleich zu den 1990er Jahren anomal niedrig war. Die horizontalen Linien stehen für die Mittelwerte während Phasen kontinuierlicher Zu- oder Abnahme des Süßwassergehaltes.

Anfang und am Ende der Messzeitreihe beobachtet (Abbildung 4). Die Transporte variierten von Jahr zu Jahr im Wesentlichen durch unterschiedliche Konzentrationen von Netto-Eisschmelzen in der oberen westlichen Framstraße in 2009 und 2010. Die Änderung des Verhältnisses der Transporte, von meteorischem Wasser und Netto-Meereisschmelze (Abbildung 4), deutet auf veränderte Advektionspfade innerhalb der Arktis und

auf Veränderung der Eisformationsprozesse in den Schelfgebieten hin. Diese Ergebnisse wurden von Dodd et al. (2012) und Rabe et al. (2013) veröffentlicht.



In dieser Projektphase wurde die *Polarstern*-Expeditionen *TRANSARC 2011* und *ICEARC 2012* vorbereitet und durchgeführt. Während *TRANSARC* wurde die Salzgehalts- und Temperaturverteilung vom Eurasischen Becken bis in das nördliche Kanadabecken mit schiffsgebundenen und mobilen Systemen gemessen. Außerdem wurden Systeme zur autonomen Messung von Temperatur- und Salzgehaltsprofilen ausgesetzt. Während *ICEARC 2012* wurden diese Arbeiten im Eurasischen Bereich fortgeführt. Diese Messungen ermöglichen die Fortführung der Zeitreihe in Abbildungen 1 und 2. Außerdem wurden für ein Jahr Messsysteme nördlich der Laptewsee im Amundsen- und Nansenbecken verankert. Die Messungen von Strömung, Temperatur und Salzgehalt in verschiedenen Wassertiefen werden künftig zur Analyse der Ausbreitungspfade von warmem Atlantikwasser entlang des Gakkelrückens sowie der oberflächennahen Süßwasserzirkulation benutzt. Die Bergung von, in 2007 und 2008 entlang des Eurasischen Kontinentalhangs innerhalb des NABOS (Nansen Amundsen Basin Observational Study) Projektes, ausgebrachten Verankerungen wird eine verbesserte Analyse der warmen Atlantikwasserzirkulation entlang des Randstromes und des Austausches zwischen Schelfen und Becken ermöglichen. Außerdem wurden Verankerungen des BMBF Laptewseeprojekts entlang des äußeren Laptewseeschelfes in 2012 geborgen, die weiteren Aufschluss über den Schelf-Beckenaustausch geben werden.

Mechanismen der langfristigen Variation des Süßwassergehaltes im Nordpolarmeer:

Das Hindcast-Experiment mit NCEP-Antrieb wurde in Bezug auf die Variationen des Süßwassergehaltes auf dekadischen Zeitskalen untersucht und bis 2010 fortgesetzt. Die Schwankungen des Süßwassergehaltes, also die Phasen des Anstieges bzw. der Reduktion, sind auf den langen Zeitskalen durch die Intensität des Ekman Pumping bestimmt, welches vor allem im Amerasischen Becken die Veränderung der Tiefe der Polar Mixed Layer beeinflusst (Abbildung 5). Phasen intensiven Ekman Pumpings sind durch Zunahme, Phasen schwachen Ekman Pumping sind durch Abnahme des Süßwassergehaltes geprägt. Die stärksten Veränderungen des Süßwassergehaltes während der sechs Jahrzehnte des Experimentes sind die besonders starke Abnahme von 1980 bis 1998, und die darauf folgende Zunahme bis 2008. Während in den tiefen Becken die Zunahme in den beiden letzten Jahren zum Halten gekommen ist, trugen die Schelfe auch dann noch zu einem weiteren Anstieg des gesamt-arktischen Süßwassergehaltes bei (Abbildung 6). Besonders drastisch ist der, mit Verzögerung einsetzende, Anstieg im Beaufortwirbel, der im Zeitraum 2003 bis 2008 erfolgte. Weitere Untersuchungen der Zirkulation atlantischen Wassers mit Tracern, deuten auf eine starke Abschwächung der zyklonalen Zirkulation unterhalb des Beaufortwirbels in dieser Phase hin (Karcher et al., 2012). Dies würde auf eine Möglichkeit der Entkopplung zwischen der Zirkulation im Amerasischen und im

Eurasischen Becken hindeuten, mit Konsequenzen für die Eigenschaften des 'Arctic Intermediate Water' welches nach Verlassen der Arktis die Overflows speist.

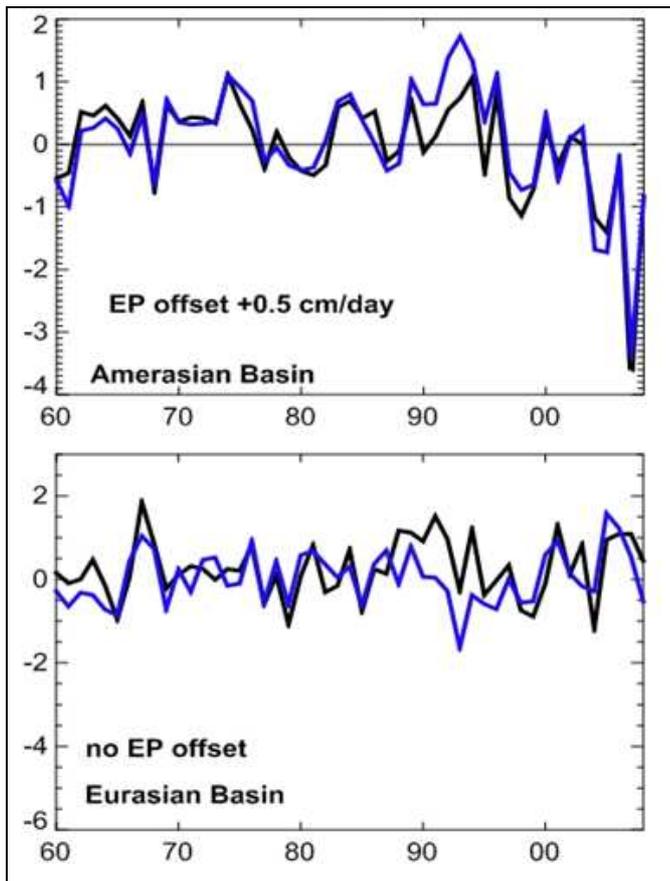


Abbildung 5: Ekman Pumping (EP; schwarz) und vertikale Verlagerung der 34.0 Isohaline (als Proxy für die Tiefe der Polar Mixed Layer; blau) für das Amerasische und das Eurasische Becken des Nordpolarmeeres (Zeitreihen für 1960 bis 2008, in cm / Tag). Für das Amerasische Becken ist das Ekman Pumping mit einem Versatz von 0.5 cm/Tag dargestellt, welches dem mittleren durch Austauschprozesse kompensierten Ekman Pumping entspricht.



Abbildung 6: Süßwassergehalt des Nordpolarmeeres im NAOSIM Hindcast-Experiment 1948-2010: gesamter Bereich (blau), Bereich mit Wassertiefen > 500 m (rot) und im Beaufortwirbel (grün). Letztere sind mit einem Versatz von +23000 km³ bzw. +50000 km³ versehen um eine gemeinsame Darstellung zu ermöglichen.

Zu (C) : **Simulationen bis 2028 zur Ausbreitung der Dichteanomalien in der 'Atlantic Water Layer' der Arktis**

In den 1990er und 2000er Jahren drang besonders warmes, und damit anomal leichteres, Atlantisches Wasser, in die Arktis ein. Diese Dichteanomalien des Atlantischen Wassers befanden sich in der zweiten Hälfte des Jahrzehntes in der Beaufortsee, bzw. im Eurasischen Becken. Um die Frage zu klären wie mögliche, weitere Ausbreitungswege aussehen könnten und ob die Anomalien das Potential zu einer Reduzierung der Overflows in den Nordatlantik haben, wurden zwei Experimente durchgeführt, die beide jeweils bis 2028 eine Untersuchung der Ausbreitung und Effekte der Dichteanomalien zulassen. Da die künftige atmosphärische Antriebssituation unbekannt ist, wurden zwei vergangene 20-jährige Perioden mit sehr unterschiedlicher Charakteristik in Bezug auf die Forcierung des Europäischen Nordmeeres und des Nordpolarmeeres ausgewählt um die Experimente im Anschluss an die Hindcastperiode 1948-2008 bis 2028 fortzusetzen: 1959-1978 und 1989-2008. Die Fortsetzungsexperimente legen nahe dass trotz einer advektiven Zeitskala von 15 bis 25 Jahren die Anomalien in der Lage sind ihre Passage durch das Nordpolarmeer zu überstehen. Beim Eintreffen im Europäischen Nordmeer modifizieren sie die Dichtestruktur nördlich der Dänemarkstraße. Unsere Experimente legen nahe, dass die Anomalien mit Abwärtsbewegungen der oberen Dichtegrenzfläche des Overflows um bis zu 150 m verknüpft sind und so zu Reduzierungen von dessen Volumentransport um bis zu 30% führen können (Abbildung 7). Die Ergebnisse wurden 2011 veröffentlicht (Karcher et al., 2011).

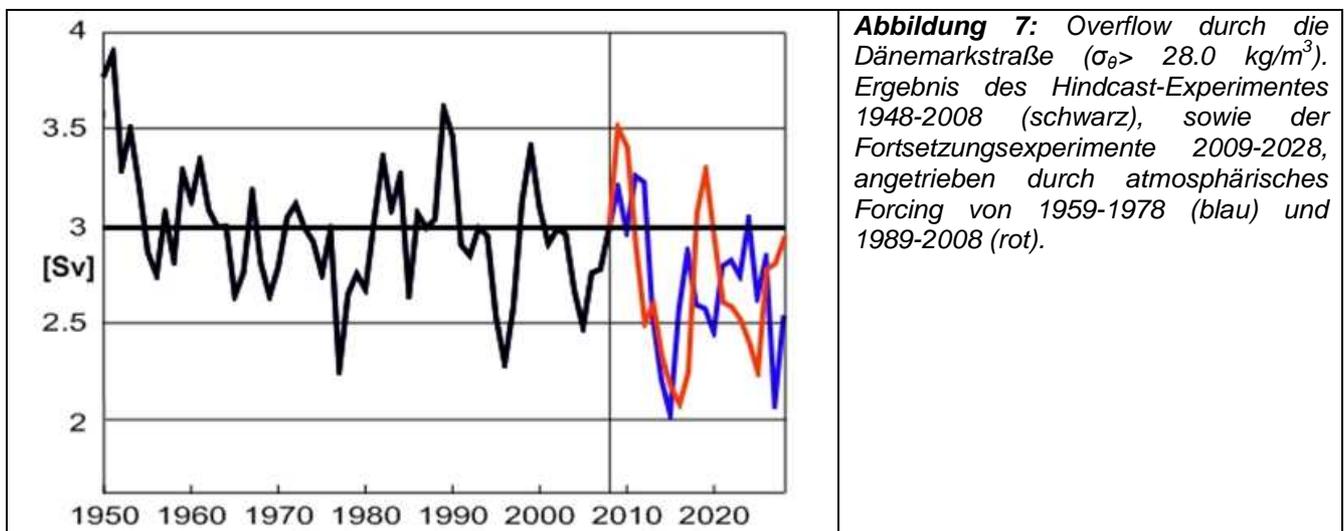


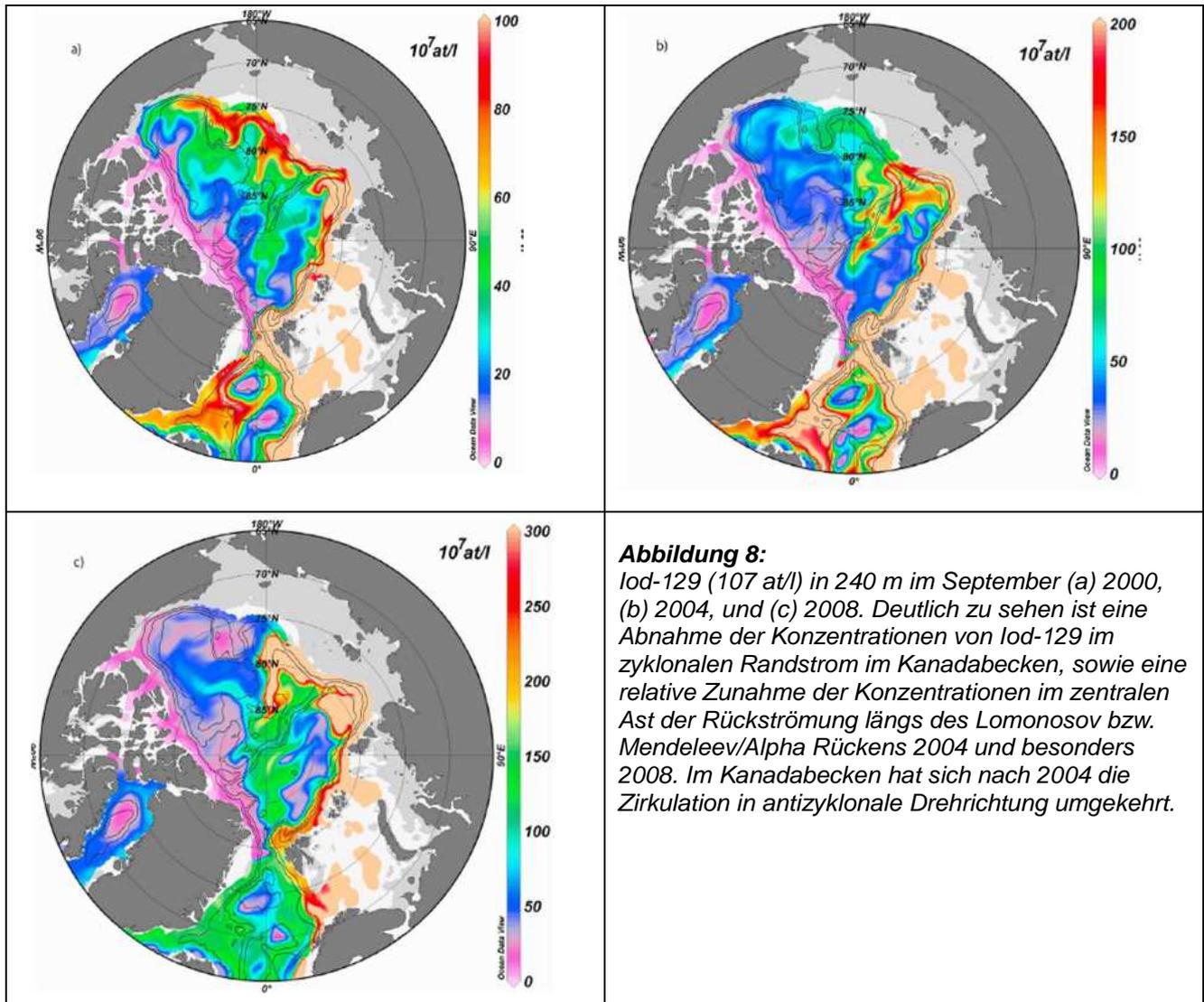
Abbildung 7: Overflow durch die Dänemarkstraße ($\sigma_{\theta} > 28.0 \text{ kg/m}^3$). Ergebnis des Hindcast-Experimentes 1948-2008 (schwarz), sowie der Fortsetzungsexperimente 2009-2028, angetrieben durch atmosphärisches Forcing von 1959-1978 (blau) und 1989-2008 (rot).

Zu (B) und (C): **Dynamik der 'Atlantic Water Layer' Zirkulation und die Ankopplung an die Oberflächenzirkulation**

Basis der Untersuchungen sind Experimente mit Tracern für Wasser atlantischen sowie pazifischen Ursprungs. Für ersteres ist das Radionuklid I-129 besonders geeignet. Es wird aus den europäischen Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield und La Hague eingeleitet und gelangt über den Norwegischen Küstenstrom und den angrenzenden Norwegischen Atlantischen Strom in das Nordpolarmeer. I-129 kann als konservativer Tracer behandelt werden. Freisetzungsdaten liegen seit 1970 vor. I-129 breitet sich im Nordpolarmeer mit dem eindringenden Atlantischen Wasser sowohl in Oberflächennähe, als auch in tieferen Wasserschichten aus. Hierhin gelangt es durch Tiefenwasserbildung, insbesondere in der Barentssee. I-129 ist in den 1990er Jahren in den tiefen Becken des Nordpolarmeeres umfangreich beprobt worden, weitere Messungen liegen aus den Jahren 2008-2010 vor. Es war daher möglich mit diesen Tracerverteilungen die Modellzirkulation über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten zu validieren. Darüber hinaus wurde das Experiment genutzt um die Veränderlichkeit der Zirkulation in den verschiedenen Stockwerken des polaren Wasserkörpers zu untersuchen (siehe Karcher et al., 2012).

Die Experimente deuten insbesondere im Kanadabecken auf eine Kopplung der Zirkulation in der Polar Mixed Layer und der Atlantischen Wasserschicht hin. In der Zeit des starken Süßwasseranstieges im Kanadabecken (2003 -2008), ausgelöst durch das anhaltende anomal intensive Ekman Pumping (siehe auch Abbildung 5), findet eine starke Abschwächung der zyklonalen Zirkulation unterhalb des Beaufortwirbels statt. Dies ist einerseits durch die Tracerverteilung ersichtlich (Abbildung 8), als auch durch eine Analyse der

Randstromgeschwindigkeiten und der Geschwindigkeiten im Beaufortwirbel (Karcher et al., 2012). Die Abschwächung der zyklonalen Zirkulation in der Atlantischen Wasserschicht führt zeitweise sogar zu einer Umkehrung in eine antizyklonale Richtung. Als Folge sind das Amerasische und das Eurasische Becken entkoppelt. Die Folgen dieser Entkopplung und der damit verbundenen Veränderung der Ausbreitungspfade (Abbildung 8) sowie der Eigenschaften des in das Europäische Nordmeer zurückströmenden Wassers mittlerer Tiefen bleibt näher zu untersuchen.



Auch in der Oberflächenschicht werden die Wassermassen atlantischen bzw. pazifischen Ursprungs durch die Veränderlichkeit des atmosphärischen Antriebs anders verteilt. Zur Untersuchung wurde ein künstlicher Tracer für pazifisches Wasser eingeführt (Wert 1 in der Beringstraße) und seine Ausbreitung von 1948 bis 2011 untersucht. Als Folge starker „Arctic Oscillation“ während der ersten Hälfte des Jahrzehnts war in den 1990er Jahren der pazifische Einfluss im Kanadabecken sehr klein (Abb. 9a). Dadurch konnte sich das durch die Beringstraße eingeströmte Wasser pazifischen Ursprungs nördlich des Kanadischen Archipels und Grönlands direkt bis in die Framstraße mit Konzentrationen von bis über 0.6 (=60%) ausbreiten. Die Verlagerung der Transpolardrift Richtung Sibirien und die Ausweitung des Beaufortwirbels gegen Ende des Jahrzehntes führte zu einer Ausweitung des pazifisch beeinflussten Bereiches (Abb. 9). Gleichzeitig gelangte weniger Pazifikwasser bis zur Framstraße und in den East Greenland Current. In der Mitte der 2000er Jahre weitete sich die Größe und Intensität des Beaufortwirbels weiter aus (Abbildung 10c). Die starke antizyklonale Zirkulation führte zu einer hohen Pazifikwasserkonzentration auf der kanadischen Seite der Transpolardrift sowie einem zeitweisen Abschnüren des Transports von Pazifikwasser nördlich der Framstraße (Abbildung 9c). Diese Simulationen zeigen in Bezug auf die Pazifikwasserkonzentrationen in der Framstraße sehr ähnliche Ergebnisse wie die Beobachtungen (Abbildung 4).

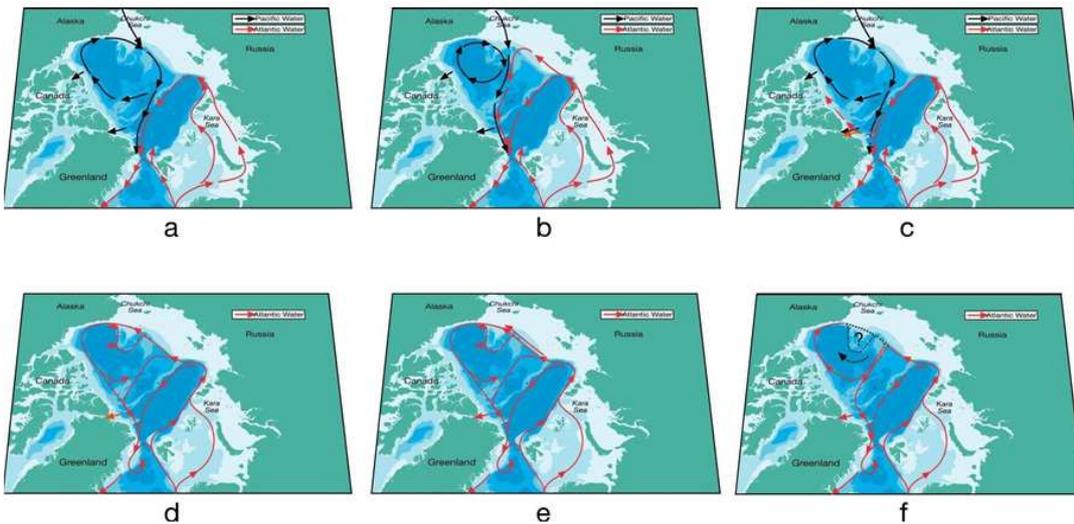


Abbildung 9: Zirkulationsschema für Wasser atlantischen (rot) sowie pazifischen Ursprungs (schwarz). Oberflächenströmungen in den (a) 1980er Jahren, (b) in den 1990er Jahren, (c) nach 2004 (gestrichelte Linien zeigen intermittierende Strömungen; Strömungen der Atlantischen Wasserschicht in den (d) 1980er Jahren, (e) 1990er Jahren (doppelte Pfeile im Makarow- und Kanadabecken zeigen verstärkten Transport im Randstrom), (f) nach 2004. Die gestrichelte Linie entlang des Lomonosov Rückens zeigt abgeschwächte Strömung Atlantischen Wassers. Unklare Strömungsverhältnisse: gepunktet und mit Fragezeichen versehen. Schwarzer gepunkteter Pfeil: Einstrom Atlantischen Wassers mit hohen Jodkonzentrationen in das zentrale Kanada-becken. Nach 2004 Wechsel zu einem sehr starken antizyklonalen Regime an der Oberfläche mit Umkehr der Zirkulation der Atlantischen Wasserschicht im Kanadabecken.

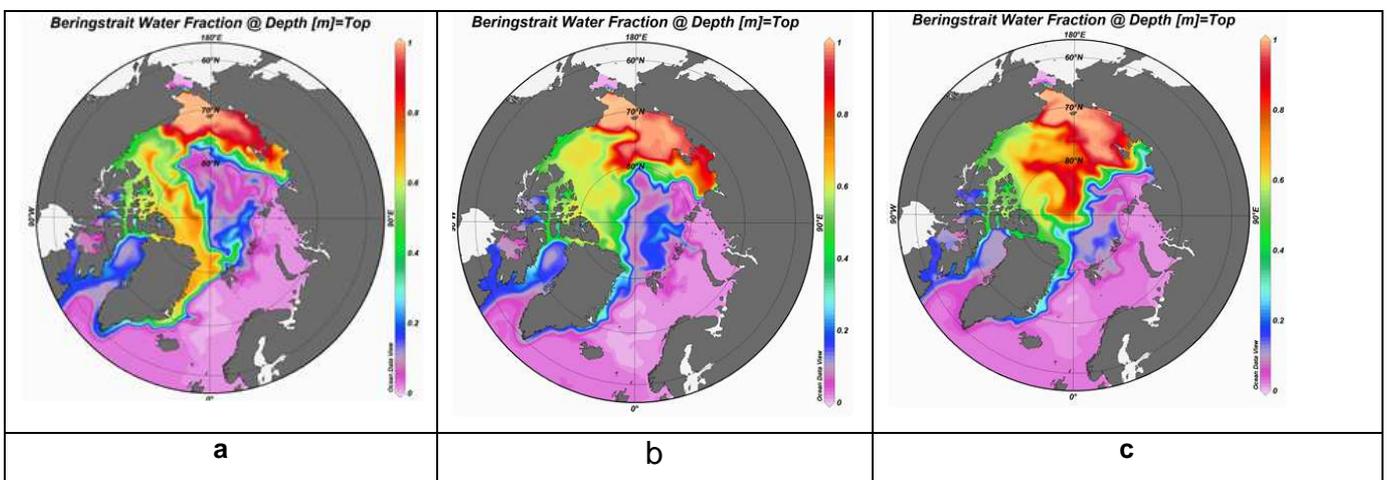


Abbildung 10: Konzentration eines künstlichen Tracers für Pazifikwasser (Bering Strait Water) an der Oberfläche in den Jahren (a) 1997, (b) 2000 und (c) 2004.

II. 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.

II. 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.

II.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.whoi.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 Süßwasserelexport 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 Wasserstands Erhöhung 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.

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), Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen (siehe Punkt II. 6.), Nutzung für die Lehre an der Hochschule Bremerhaven und an anderen Hochschulen.

II.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.

II.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- Beszczyńska-Möller, A., Woodgate, R. A., Lee, C., Melling, H. and **Karcher, M.** (2011): A Synthesis of Exchanges through the Main Oceanic Gateways to the Arctic Ocean, in: The Changing Arctic Ocean: Special Issue on the International Polar Year (2007/2009), *Oceanography*, 24(3) 99, 82, doi: 10.5670/oceanog.2011.59
- Dodd, P. A., **B. Rabe**, E. Hansen, E. Falck, A. **Mackensen**, E. Rohling, C. Stedmon, and S. Kristiansen (2012): The freshwater composition of the Fram Strait outflow derived from a decade of tracer measurements, *J. Geophys. Res.*, 117, doi: {10.1029/2012JC008011}.
- Jahn, A., Aksenov, Y., de Cuevas, B., de Steur, L., Haekkinen, S., Hansen, E., Herbaut, C., Houssais, M. N., **Karcher, M.**, **Kauker, F.**, Lique, C., Nguyen, A., Pemberton, P., Worthen, D. and Zhang, J. (2012): Arctic Ocean freshwater: How robust are model simulations?, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117 (C00D16), doi: 10.1029/2012JC007907
- Karcher, M.**, Beszczyńska-Möller, A., **Kauker, F.**, **Gerdes, R.**, Heyen, S., Rudels, B. and **Schauer, U.** (2011): Arctic Ocean warming and its consequences for the Denmark Strait overflow, *J. Geophys. Res.*, 116, C02037, doi: 10.1029/2010JC006265
- Karcher, M.**, Smith, J. N., **Kauker, F.**, **Gerdes, R.** and Smethie Jr, W. (2012): Recent changes in Arctic Ocean circulation revealed by 129-Iodine observations and modelling, *Journal of Geophysical Research - Oceans.*, AGU . doi: 10.1029/2011JC007513
- Rabe, B.**, **Karcher, M.**, **Schauer, U.**, Toole, J. M., Krischfield, R. A., Pisarev, S., **Kauker, F.**, **Gerdes, R.** and Kikuchi, T. (2011): An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the 2006-2008 period, *Deep-Sea Research I*, 58185, 173, doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.002
- Rabe, B.**, **A. Mackensen**, **U. Schauer**, **M. Karcher**, E. Hansen, A. Beszczyńska-Moeller (2009): „Freshwater components and transports in the FRAM Strait: recent observations and changes since the late 1990s“, *Ocean Sci.*, 5, 219-233.
- Roeske, T., D. Bauch, M. R. Van Der Loeff, and **B. Rabe** (2012): Utility of dissolved barium in distinguishing North American from Eurasian runoff in the Arctic Ocean, *MARINE CHEMISTRY*, 132, 1–14, doi: {10.1016/j.marchem.2012.01.007}.

Sumata, H., **F. Kauker**, **R. Gerdes**, **C. Köberle**, and **M. Karcher** (2013): A comparison between gradient descent and stochastic approaches for parameter optimization of a coupled ocean–sea ice model, *Ocean Sci. Discuss.*, 9, 3593-3642, 2012, www.ocean-sci-discuss.net/9/3593/2012/, doi: 10.5194/osd-9-3593-2012, in revision.

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.
- Dickson, R. R., Rudels, B., Dye, S., Karcher, M., Meincke, J., Yashayaev, I. (2007): Current Estimates of Freshwater Flux through Arctic & Subarctic seas, *Progress in oceanography*, 73(3/4), 210-230, doi:10.1016/j.pocean.2006.12.003.
- 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.
- Dorn, W., Dethloff, K., Rinke, A., Frickenhaus, S., Gerdes, R., Karcher, M., Kauker, F. (2007): Sensitivities and uncertainties in a coupled regional atmosphere-ocean-ice model with respect to the simulation of Arctic sea ice, *Journal of Geophysical Research*, 112, D10118, doi:10.1029/2006JD007814
- 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.
- Häkkinen, S., Dupont, F., Karcher, M., Kauker, F., Zhang, J. (2007): Model simulation of Greenland Sea upper-ocean variability, *Journal of geophysical research-oceans*, 112, C06S90, doi: 10.1029/2006JC003687
- Holloway, G., Dupont, F., Golubeva, E., Häkkinen, S., Hunke, E., Karcher, M., Kauker, F., Maltrud, M., Morales Maqueda, M., Maslowski, W., Platov, G., Stark, D., Steele, M., Worthen, D., Zhang, J. (2007): Water properties and circulation in Arctic Ocean models, *Journal of geophysical research-oceans*, 112, C04S03, doi: 10.1029/2006JC003642
- Karcher, M., Harms, I., Standring, W., Dowdall, M. and Strand, P. (2010): On the Potential for Climate Change Impacts on Marine Anthropogenic Radioactivity in the Arctic Regions, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 60, Issue 8, August 2010, Pages 1151-1159, doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.05.003
- 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.
- Karcher, M., Gerdes, R., Kauker, F. (2008): Long-term variability of Atlantic water inflow to the Northern Seas: insights from model experiments, *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the role of the Northern Seas in Climate*, Editors: B. Dickson, J. Meincke and P. Rhines, Springer, 111-130.
- Karcher, M., Kauker, F., Gerdes, R., Hunke, E., Zhang, J. (2007): [On the Dynamics of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean](https://doi.org/10.1029/2006JC003630), *Journal of geophysical research-oceans*, 112, C04S02. doi:10.1029/2006JC003630
- Kauker, F., Kaminski, T., Karcher, M., Giering, R., Gerdes, R. and Voßbeck, M. (2009): Adjoint analysis of the 2007 all time Arctic sea-ice minimum, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2008GL036323
- Kauker, F., Köberle, C., Gerdes, R. and 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.
- Kauker, F., Gerdes, R., Karcher, M., Kaminski, Giering, 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*.
- 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
- Losch, M., Sidorenko, D., and Beszczynska-Miller, A. (2005): FEMSECT: An inverse section model based on the finite element method, *J. Geophys. Res.*, 110, C12023, doi: 10.1029/2005JC002910.
- Proshutinsky, A., M.-L. Timmermans, I. Ashik, A. Beszczynska-Moeller, E. Carmack, I. Frolov, M. Itoh, T. Kikuchi, R. Krishfield, F. McLaughlin, S. Nishino, B. Rabe, U. Schauer, K. Shimada, V. Sokolov, M. Steele, J. Toole, W. Williams, R. Woodgate, M. Yamamoto-Kawai, and S. Zimmermann (2011): [the Arctic] Ocean [in State of the Climate in 2010.]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92 (6), S161-S163, <http://www.ncdc.noaa.gov/bams-state-of-the-climate/2010.php>

- 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.
- Schauer, U., and A. Beszczynska-Möller (2009): Problems with estimation and interpretation of oceanic heat transport - conceptual remarks for the case of Fram Strait in the Arctic Ocean, *Ocean. Sci.*, 5(4), 487–494.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel NORDATLANTIK II 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 ozeanischen Reanalysen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Ernst Maier-Reimer Prof. Jochem Marotzke Dr. Johann Jungclaus Dr. Wolfgang Müller	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2012
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Max Planck Institut für Meteorologie Bundesstrasse 53 20146 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0605D
	11. Seitenzahl 11
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung AP 3.1: Ein regional gekoppeltes Ozean/Atmosphäre-Modell MPIOM/REMO/HAMOCC, welches ein formal globales Ozean/Meereis/Biogeochemiemodell mit deutlich erhöhter Auflösung im nördlichen Nordatlantik und dem europäischen Nordmeer enthält, wurde erstellt, um die am Max Planck Institut für Meteorologie durchgeführten Klimaänderungssimulationen für den IPCC zu regionalisieren. Dabei wurden wichtige neue Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels in der Nord- und Ostsee gewonnen. Die Ergebnisse verdeutlichen die Empfindlichkeit der vertikalen und lateralen Nährstofftransporte vom Nordatlantik in die Nordsee gegenüber den sich erwärmenden oberflächennahen Wassermassen. Eine weiträumige Abschwächung der oberflächennahen Durchmischungszone führt in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu einer Reduzierung des Nährstoffimport der Nordsee um ca. 40%, was eine entsprechende Reduzierung der Primärproduktion auf dem Schelf zur Folge hat. Die Aufnahmefähigkeit der Nordsee für CO ₂ aus der Atmosphäre schwächt sich deutlich ab, im Zuge weiterer Erwärmung. AP4.2: Das Projekt zielt auf die Entwicklung eines dekadischen Vorhersagesystems unter Berücksichtigung von Ozeandaten. Hierbei wird das gekoppelte globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM mit Ozeandaten initialisiert. Zwei verschiedene Initialisierungsmethoden, zum einen basierend auf der GECCO Reanalyse, zum anderen auf NCEP/NCAR angetriebenen Ozeansimulationen. Die Vorhersagemöglichkeit für die atlantische Umwälzzirkulation, als wichtige dynamische Größe, wurde untersucht. Im direkten Vergleich mit Beobachtungen wurde festgestellt, dass sich durch die Initialisierung verbesserte Vorhersagen über einen Zeitraum von mehreren Jahren erreichen lassen. Darüber wurde die Vorhersagemöglichkeit und -qualität der meridionalen Wärmetransporte im Atlantik untersucht. Ein weiteres Arbeitsfeld ist die Untersuchung der Initialisierungsmethoden "Gesamtfeld" versus "Anomalie" und deren Implikationen für die Vorhersagequalität des nordatlantischen Klimas auf dekadischer Zeitskala.	
19. Schlagwörter	
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 II WP3.1: Physical and biogeochemical changes in the North Atlantic, interaction with the NW European shelf areas and impact on the North Sea WP4.2: Initialization of a global coupled model using oceanic reanalysis	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Ernst Maier-Reimer Prof. Jochem Marotzke Dr. Johann Jungclaus Dr. Wolfgang Müller	5. end of project 30.09.2012
	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. 03F0605D
	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 7
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>WP. 3.1: The regionally coupled ocean/atmosphere model MPIOM/REMO/HAMOCC, containing a global ocean-sea-ice-marine biogeochemistry model with increased resolution in the northern North Atlantic, has been developed to regionalize the anthropogenic climate change simulations conducted at the Max-Planck-Institute for Meteorology as contribution to IPCC. This resulted in new insights on the impacts of climate change for the North Sea and the Baltic Sea. The findings emphasize the sensitivity of vertical and lateral nutrient transports from the North Atlantic to the North Sea to warming surface temperatures. A widespread weakening of the surface mixed layer is predicted for the second half of the 20th century. In turn this leads to a drastic reduction of nutrient imports by ~40% in the North Sea. This causes a strong decline of primary production on the Northwest European Shelf. The uptake capability of the North Sea for atmospheric CO₂ declines with further climate warming.</p> <p>WP4.2: The Work Package contributes to the development of a forecast system for near-term (decadal) predictions. The Model is based on the general circulation models for the atmosphere, ECHAM5, and the ocean model MPIOM. Two different methods for the ocean initialization have been tested; one based on the ocean reanalysis product GECCO, the other based on stand-alone MPIOM simulations that were forced with atmospheric reanalysis (NCEP). The Atlantic Meridional Overturning Circulation has been identified as an important carrier of climate predictability. Comparison between direct observations and model hindcast demonstrated predictability for the AMOC at 26.5°N up to four years in advance. The analyses have been extended to include the assessment of predictability of ocean heat transports. The Work Package further investigated the comparative benefits of "full field" vs. "anomaly" initialization.</p>	
19. keywords	
20. publisher	21. price

Abschlussbericht Nordatlantik II

Max Planck Institut für Meteorologie

Teilprojekt 3.1: Physikalische und biogeochemische Zustandsänderungen im Nordatlantik: Wechselwirkungen mit den nordwesteuropäischen Schelfgebieten und Auswirkungen auf die Nordsee (Uwe Mikolajewicz)

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

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

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

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

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde gemäß der im Antrag dargelegten Planung durchgeführt.

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

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, zu entwickeln.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Intensiver fachlich-wissenschaftlicher Austausch und Zusammenarbeit bestand während der gesamten Projektlaufzeit mit dem Institut für Meereswissenschaften (IfM) der Universität Hamburg sowie mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg (BSH). 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.

II. Eingehende Darstellung

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

**Teilprojekt 3.1: Physikalische und biogeochemische Zustandsänderungen im Nordatlantik
Wechselwirkungen mit den nordwesteuropäischen Schelfgebieten und Auswirkungen auf die Nordsee (Uwe Mikolajewicz)**

1. Regionalisierung mit dem Atmosphärenmodell REMO

Es wurde ein gekoppeltes Atmosphäre/OZEAN/Marine Biogeochemie – Modell entwickelt. Ein primäres Projektziel war es, die am MPI turnusmäßig durchgeführten CMIP Simulationen für den Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für den Bereich des nordwesteuropäischen Schelfes zu regionalisieren. Als atmosphärische Komponente des gekoppelten Modells wurde das regionale Atmosphärenmodell REMO verwendet (Jacob et al. 2001). Die interaktive Kopplung des regionalen Atmosphärenmodells führt zu einer weitaus realistischeren Abbildung meteorologischer Parameter. Exemplarisch wird hier auf die Niederschläge eingegangen.

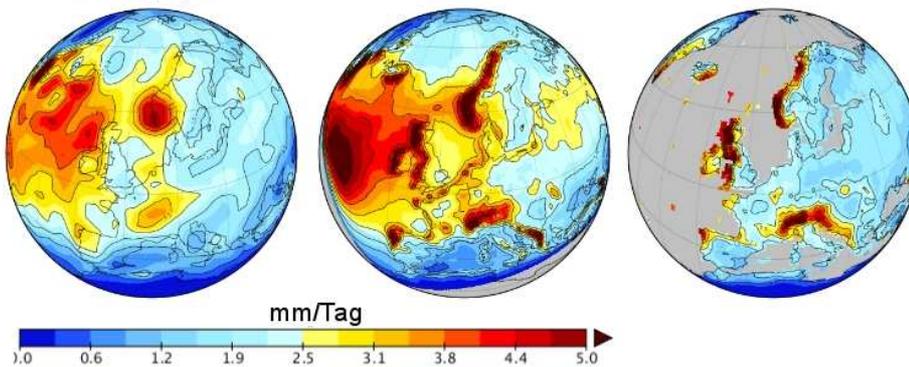


Abb1.: Niederschlag gemittelt über den Zeitraum 1960-1989. Links: Simulation mit Standard ECHAM6/MPIOM. Mitte: Regionalisierung mit regionalem Atmosphärenmodell ECHAM5/REMO/MPIOM Rechts: Beobachtungsdaten nach Mitchell and Jones (2005).

Kleinskalige konvektive Zirkulationsmuster wie sie z.B. typisch für die Küstenregion von Norwegen sind oder im Bereich des Alpen Orogens, werden sehr viel wirklichkeitsnaher abgebildet und führen dort zu erhöhten Niederschlägen.

2. Prognostizierte physikalische Zustandsänderungen für das Ende des 21. Jahrhunderts

Die zu erwartende Klimaerwärmung beeinflusst wichtige Wassermasseneigenschaften.

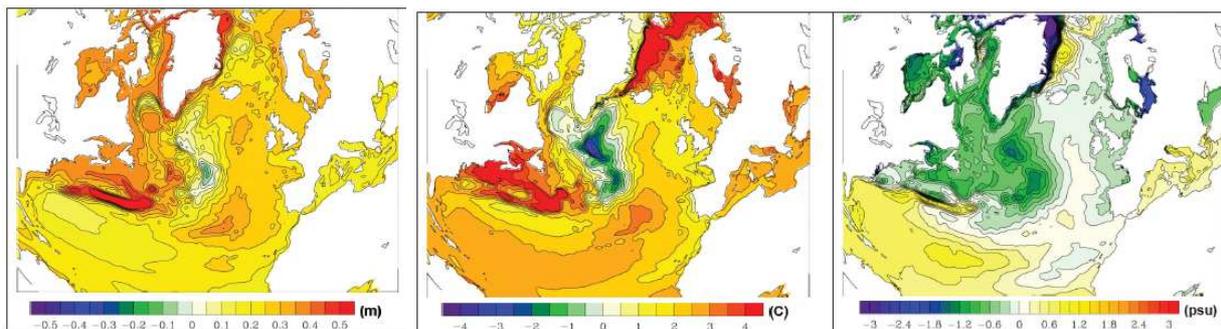


Abb.2: Simulierte ozeanographische Änderungen am Ende des 21. Jahrhunderts. Links: Meeresspiegel (sterische Komponente). Mitte: Meeresoberflächentemperatur. Rechts: Salzgehalt. Gezeigt ist die jeweilige klimatologische Differenz 1970-1999 minus 2070-2099.

Es kommt zu einer großräumigen Erwärmung von rund 2-3 K im nördlichen Nordatlantik. Nur südlich von Grönland ist eine deutliche Abkühlung von über 2 K zu sehen. Diese Abkühlung ist im Zusammenhang mit Positionsverlagerungen der Front zwischen subpolaren und subtropischen Wassermassen zu sehen. Durch den beschleunigten globalen Wasserkreislauf verstärken sich die atmosphärischen Feuchte-Transporte in die nördlichen Regionen, was die Salzgehalte im nördlichen Nordatlantik deutlich erniedrigt (Abb.2). Die Schichtung der Wassersäule stabilisiert sich großflächig aufgrund der schnellen Erwärmung des Oberflächenwassers und der Abnahme des Oberflächensalzgehalts, während die Erwärmung in den tieferen Schichten deutlich langsamer erfolgt. In den subtropischen Gebieten intensiviert sich der Überschuss an Verdunstung gegenüber Niederschlag. Dieses führt zu positiven Salzgehaltsanomalien südlich von etwa 40 N. Größere negative Salzgehaltsanomalien werden auch für den nordwesteuropäischen Schelf prognostiziert, wo

sich zusätzlich der erhöhte kontinentale Abfluss bemerkbar macht, insbesondere in der Ostsee, welche keine direkte Verbindung zum offenen Atlantik besitzt.

Das Muster der simulierten Meeresspiegeländerungen ergibt sich weitestgehend aus der veränderten Hydrographie am Ende des 21. Jahrhunderts. Der stärkste lokale Meeresspiegelanstieg im Nordatlantik (Abb.2, links) steht mit einer nordwärtigen Verlagerung des Golfstromes im Zusammenhang. Der starke Meeresspiegelanstieg in der Ostsee ist eine Folge der starken Salzgehaltserniedrigung und des daraus folgenden stärkeren Gradienten der Oberflächenauslenkung zur Nordsee.

3. Austauschprozesse zwischen dem Nordatlantik und dem nordwesteuropäischen Schelf sowie Auswirkung auf biogeochemische Zustandsparameter

Austauschprozesse mit dem offenen Ozean sind von besonderer Bedeutung für den biologischen und geochemischen Gesamtzustand der Schelfe, da diese aufgrund ihrer geringen Tiefe von nährstoffreichen Wässern unterhalb der photosynthetisch aktiven Zone weitestgehend abgeschnitten sind und die Nährstoffzufuhr aus kontinentalen Einträgen größtenteils auf die küstennahen Gebiete beschränkt ist. Ein prominentes Ergebnis des Teilprojektes, besteht in der gefundenen starken Abhängigkeit des Nährstofftransportes aus dem Nordostatlantik in die Nordsee von den zu erwartenden physikalischen Zustandsänderungen im Bereich der Schelfkante und des angrenzenden Kontinentalhanges. In dieser Schlüsselregion führt die bereits unter Punkt 2 genannte Stabilisierung der Wassersäule im Laufe des 21. Jahrhunderts zu einer Reduzierung der Nährstofftransporte über die Schelfkante (hier = 200m Isohypse) in die Nordsee um rund 40 % (Abb. 3c). Dieses hat eine drastische Abschwächung

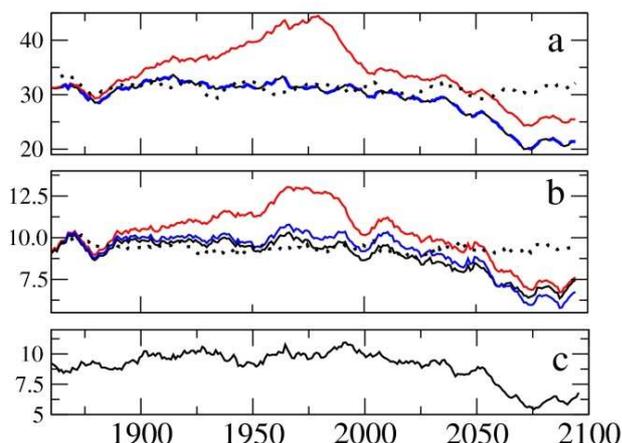


Abb.3: Jährliche Primärproduktion und b) Netto-Kohlenstoffaufnahme in der Nordsee (Mio. Tonnen Kohlenstoff.) Gestrichelt=Kontrolllauf ohne Klimaerwärmung, Schwarz=mit Klimaerwärmung, blau= wie schwarz + CO₂ Anstieg in der Atmosphäre, rot= wie blau + anthropogene Nährstoffeinträge über Flüsse. c) Nährstofftransport (gelöstes Nitrat in kmol/s) vom Nordatlantik über die Schelfkante in die Nordsee.

der biologischen Primärproduktion der Nordsee in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zur Folge (Abb.3a). Durch Vergleich mit einem Zwillingsexperiment ohne Beeinflussung durch Klimaerwärmung (schwarze gestrichelte Linie in Abb. 3a) kann der Klima-Effekt auf die Primärproduktion der Nordsee abgeschätzt werden. Gegenüber diesem Lauf ist ab etwa 2040 ein stetiger Abfall der Primärproduktion in den Läufen, in denen der Klima-Effekt berücksichtigt wurde (blau und schwarze Linien, Abb. 3a), zu sehen, der in den letzten beiden Dekaden des 21. Jahrhunderts etwa 30% beträgt. In Experimenten, in denen auch anthropogene Nährstoffeinträge aus vorwiegend landwirtschaftlichen Quellen berücksichtigt wurden, beträgt die Reduzierung der Primärproduktion sogar 39%, da in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts v.a. die Phosphateinträge reduziert werden konnten.

Eine andere zentrale Fragestellung des Teilprojektes war die Funktion der Nordsee als Senke für das CO₂ der Atmosphäre. Die Kohlenstoffabsorption in der Nordsee (~9-10 Mio. t C jährlich in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts, Abb. 3b) ist relativ unempfindlich gegenüber steigenden CO₂ Konzentrationen in der Atmosphäre, was sich zum einen durch eine sehr rasche Adaption des pCO₂ der flachen Nordsee an sich ändernde Randbedingungen der Atmosphäre erklärt. Zum anderen wird die CO₂ Absorption in der Nordsee zu gut 70% durch die biologische Fixierung anorganischen Kohlenstoffs bestimmt. Unter Berücksichtigung der anthropogenen Nährstoffeinträge über Flüsse, welche die biologische Produktion stimuliert, erhöht sich daher die CO₂ Absorption der Nordsee um bis

zu 25% in den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts. Eine drastische Abschwächung der biologischen Produktion wird für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts prognostiziert (Abb.3.1.2a) was mit einer entsprechenden Reduktion der Kohlenstoffaufnahme einhergeht. Ursächlich hierfür ist in erster Linie ein verminderter Nährstoffimport aus dem angrenzenden Nordatlantik ab etwa 2050 (Abb.3.1.2c) als Folge einer verringerten winterlichen vertikalen Durchmischung entlang der Schelfkante. Hierdurch erreichen weniger Nährstoffe aus den tieferen Lagen des Atlantiks die euphotische Zone. Sensitivitätsexperimente mit lokal über der Nordsee erhöhtem atmosphärischen pCO_2 zeigen, dass nur ca. 20% des in der Nordsee absorbierten und in den Atlantik exportierten Kohlenstoffs längerfristig der Atmosphäre entzogen ist. Grund hierfür ist, dass die exportierten Wassermassen zum größten Teil innerhalb der Durchmischungszone des Atlantiks verbleiben, wo sie ständig über den Gasaustausch dem Einfluss der Atmosphäre ausgesetzt sind. Die lokal erhöhte Absorption in der Nordsee führt somit unweigerlich zu einer weitläufig verminderten Absorption bzw. erhöhter Ausgasung im angrenzenden Nordatlantik. In den Sensitivitätsexperimenten verursachen die kohlenstoffreichen Wässer aus der Nordsee eine Anomalie in der Konzentration des gelösten anorganischen Kohlenstoffs in einer Kerntiefe von etwa 100m. Diese markiert den weiteren Ausbreitungspfad von Nordseewasser im Nordatlantik, wo es mit dem Norwegenstrom weiter verdriftet wird und schließlich die Barents See erreicht.

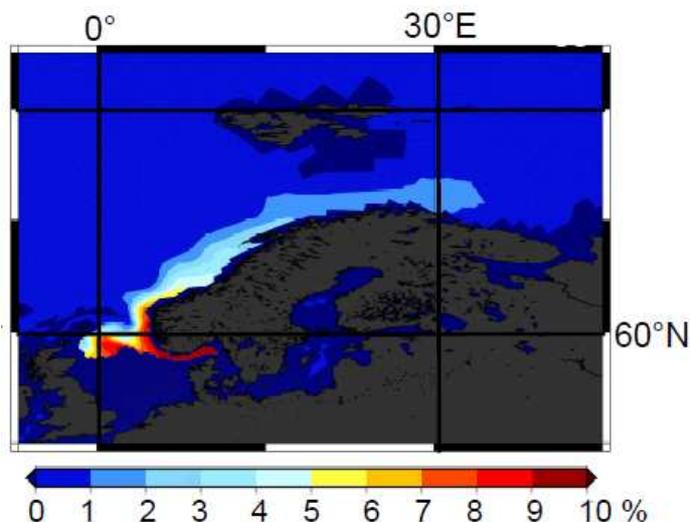


Abb. 4: Anomalie an gelöstem anorganischen Kohlenstoff in rd. 100m Wassertiefen in einer Modellsimulation in der die atmosphärische CO_2 Konzentration ausschließlich über der Nordsee auf den 4-fachen vorindustriellen Wert festgeschrieben wurde. Dargestellt ist das Mittel über die letzten 5 Jahre einer Modellintegration über 20 Jahre.

4. Regionalisierung globaler dekadischer Vorhersagen für Nordeuropa

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes bestand in der Regionalisierung dekadischer Ensemble-Läufe mit dem ECHAM6/MPIOM Model, welche im Rahmen des Teilprojektes TP4.2 durchgeführt wurden. Diese Läufe dienen dazu, zu klären inwieweit dekadische Klimaschwankungen auf regionalen Skalen prognostizierbar sind und wie sich künftige globale Klimaänderungen in Nordwesteuropa konkret auswirken. Hierzu wurde ein Satz Hindcast Experimente durchgeführt mit jeweils 3 Ensemble-Gliedern. Die Hindcasts wurden jeweils am 1. Januar der ungeraden Jahre zwischen 1969 und 2011 gestartet (1969, 1971,..., 2011) und mit den entsprechenden Ausgabefeldern des globalen ECHAM6/MPIOM Assimilationsexperimentes initialisiert. Abb.5 zeigt den „COR skill factor“ als Größe für die Phasendifferenz zwischen Vorhersage und Beobachtung (Matei et al., 2012). Für die simulierte Oberflächen-Temperatur des REMO/MPIOM Modells im Vergleich zum Globalmodell ECHAM6/MPIOM ist keine konsistente Verbesserung der Vorhersage feststellbar. Lediglich in der Grönland-Norwegen See ist die negative Korrelation zwischen Beobachtung und Vorhersage (im Globalmodell) verschwunden, wobei artifizielle Bias Effekte in der Initialisierung aufgrund des trägeren Ozeanmodells gerade im Bereich aktiver Tiefenkonvektion nicht ausgeschlossen werden können.

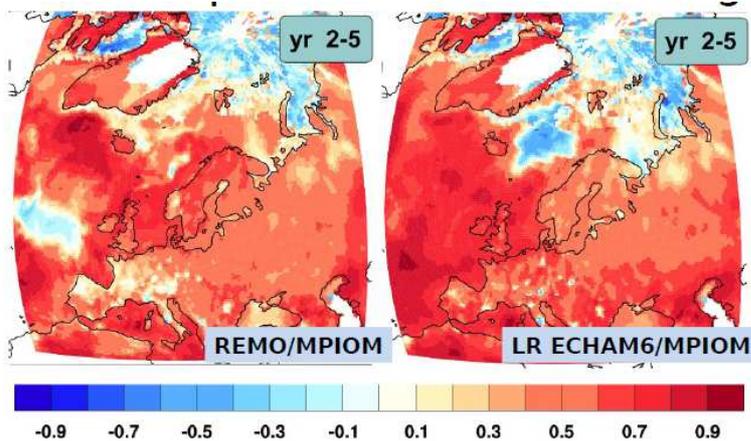


Abb.5: COR skill factor (Matei et al., 2012) für die prognostizierte Oberflächentemperatur mit „lead time“ von 2-5 Jahren. Die Beobachtungen wurden aus HadSST für die Meeresoberflächentemperatur und GHCN/CAMS für die Oberflächen-Lufttemperatur entnommen.

Für weite Teilregionen wie z.B. über Spanien, Frankreich sowie im Atlantik westlich der Biskaya sind sogar z.T. deutliche Verschlechterungen der Vorhersage im Vergleich zum global gekoppelten Model festzustellen. Die die Oberflächentemperatur steuernden Prozesse sind größtenteils an großräumige Zirkulationsmuster der Atmosphäre (wie z.B. die Nordatlantische Oszillation) gekoppelt, welche bereits in grob aufgelösten Globalmodellen sehr gut dargestellt sind.

Literatur

Matei, D., Pohlmann, H., Jungclaus, J., Müller, W., Haak, H., and Marotzke, J. (2012): Two Tales of Initializing Decadal Climate Prediction Experiments with the ECHAM5/MPI-OM Model, *Journal of Climate*, 25, 8502-8523.

Mitchell, T.D., and Jones, P.D. (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *International Journal of Climatology*, 25(6), 693-712.

Jacob, D., U. Andrae, G. Elgered, C. Fortelius, L. P. Graham, S. D. Jackson, U. Karstens, Chr. Koepken, R. Lindau, R. Podzun, B. Rockel, F. Rubel, H.B. Sass, R.N.D. Smith, B.J.J.M. Van den Hurk, X. Yang (2001): A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget during the BALTEX-PIDCAP Period. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 19-43.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Größte Posten für Projekte der numerischen Klimasimulationen am Max Planck Institut für Meteorologie sind Kosten für die Nutzung des Supercomputers des Deutschen Klimarechenzentrums sowie Personalkosten. Da das MPI als größter Gesellschafter der DKRZ GmbH Rechenkosten selber zur Verfügung hat, stellen Personalkosten die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises. Im Teilprojekt 3.1 wurden zwei erfahrene Wissenschaftler angestellt um das Modellsystem zu koppeln und abzustimmen sowie die Resultate auszuwerten und zu publizieren.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der finanzielle Rahmen der Teilprojekte war entsprechend der Beantragung notwendig und den gewonnen Resultaten angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Im Teilprojekt 3.1 wurden wichtige und nachhaltige Erfahrungen zur technischen Kopplung von Modellkomponenten verschiedener Teilbereiche des Klimasystems gemacht sowie zu deren gegenseitiger Feinabstimmung. Es konnten zudem zahlreiche wissenschaftliche Erkenntnisse zum Klimawandel im Nordatlantik sowie in der Nordsee und Ostsee gewonnen werden. Die Ausgabefelder

der hier durchgeführten Simulationen werden gegenwärtig als Randbedingung für reine Regionalmodelle die am Geophysikalischen Institut der Universität Bergen sowie am Institut für Meereskunde in Hamburg betrieben werden verwendet.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Es gibt keine Fortschritte bei anderen Stellen während des Vorhabens.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

M. Gröger, U. Mikolajewicz (2011): Note on the CO₂ air–sea gas exchange at high temperatures, *Ocean Modelling* 39, 284–290.

M. Markovic, S. Hüttl-Kabus, Birgit Klein, U. Mikolajewicz, H. Klein, and D. Sein (2011): Influence of North Atlantic variability on the North Sea, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-1863.

M. Gröger, U. Mikolajewicz, E. Maier-Reimer, and D. Sein (2011): Mechanisms of carbon absorption on shelves - a model case study for the NW European shelf, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-4675-1.

D. Sein, U. Mikolajewicz, E. Maier-Reimer, and M. Groeger (2011): Downscaling of climate change A1B scenario projection on North Atlantic- European shelves ocean – atmosphere system. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-3595.

M. Gröger, E. Maier-Reimer, U. Mikolajewicz, A. Moll, and D. Sein, NW European shelf under climate warming: implications for open ocean –shelf exchange, primary production, and carbon absorption, *Biogeosciences Discuss.*, 9, 16625–16662, 2012. doi:10.5194/bgd-9-16625-2012, Under revision for *Biogeosciences*.

Matthias Gröger, Uwe Mikolajewicz, Ernst Maier-Reimer, and Dmitry Sein, Influence of North Atlantic Oscillation on the hydrographical and biogeochemical conditions on the NW European shelf, (in prep).

Sein, D V., Mikolajewicz, U., Gröger, M., Maier-Reimer, E., Fast, I., and Hagemann, S., Regionally coupled atmosphere - ocean – sea ice – marine biogeochemistry model REMO/MPIOM/HAMOCC. Downscaling of future climate change A1B scenario for the North Atlantic and North European shelves (in prep.)

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

I.1 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) lässt sich die Realitätsnähe der Simulationen erheblich verbessern. Ein vollständiges gekoppeltes Datenassimilationssystem für Klimasimulationen ist allerdings bisher nicht realisiert worden. Ziel dieses Projekts ist es, 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 gestartet werden. Unter Einbeziehung assimilierter Ozeandaten sollen die Abweichungen des im gekoppelten Modell simulierten Ozeanzustands vom beobachteten Zustand analysiert, die Konsistenz der simulierten Klimaänderung des späten 20. Jahrhunderts mit den Reanalysedaten verglichen und Implikationen für die Vorhersagbarkeit des Klimas des 21. Jahrhunderts gewonnen werden. In der Phase II des Nordatlantikprogramms steht daneben die Untersuchung spezifischer Prozesse und Methoden im Vordergrund.

I.2 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 das Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) erstellt wurden und fügten sich in die Entwicklungsarbeiten zu den CMIP5 Simulationen ein. Am Deutschen Klimarechenzentrum stand ein Hochleistungsrechner (IBM Power6) zur Verfügung.

I.3 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.

I.4 Wissenschaftlich technischer Stand

Im Unterschied zu Wettervorhersagen, in welchen die Unsicherheiten auf die Anfangsbedingungen und Modellformulierungen zurückzuführen sind, und Projektionen des zukünftigen Klimas, die vornehmlich von Randbedingungen wie z.B. Treibhausgase abhängen, müssen für Vorhersagen auf dekadischen Zeitskalen sowohl Anfangs- als auch Randbedingungen berücksichtigt werden. Der Einfluss der ozeanischen Anfangsbedingungen auf die dekadische Vorhersagbarkeit, insbesondere die große potentielle Vorhersagbarkeit im Nordatlantik, wurde in einigen Studien demonstriert (z.B. Pohlmann et al. 2004). Weitere Analysen zeigen, dass Variationen über Dekaden im Nordatlantik (z.B. die unterschiedlichen Phasen der atlantischen meridionalen Umwälzbewegung (AMOC) implizit Klimavariablen über dem europäischen Kontinent beeinflussen (Pohlmann et al. 2006). Nachdem in der ersten Phase des Nordatlantikprojektes (Pohlmann et al., 2009) und in anderen Forschungsprogrammen (z.B., Hadley Centre, UK) erste Erfolge im Bereich der mittelfristigen Vorhersage erzielt wurden, ergab sich für die zweite Phase die Notwendigkeit, die Vorhersagbarkeitsgewinne methodisch genauer zu untersuchen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen, Kooperationen innerhalb des Verbundes

Die Initialisierung des gekoppelten Modells durch dreidimensionale und zeitabhängige Ozeanfelder ist entscheidend für die Abschätzung der dekadischen Klimavorhersagen. Diese benötigt eine enge Zusammenarbeit mit den Entwicklern der Ozeanreanalyse (AP 4.1). Des Weiteren wurden für die Reanalyse, wie auch für die Evaluierung der Klimamodelle weitere Beobachtungsinformationen von anderen Arbeitspaketen (wie etwa AP2.3) benötigt. Umgekehrt stellte AP4.2 atmosphärische und ozeanische Randbedingungen zur Verfügung, die für Modelle notwendig sind und die die Änderungen der Zirkulation und Ökosysteme im Nordatlantik und seiner Nebenmeere untersuchen (AP 3.1).

II. Eingehende Darstellung/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, 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 (Jungcla us et al., 2006).

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

II.1.1 Vergleich zweier Initialisierungsmethoden

Im Teilprojekt werden zwei verschiedene Initialisierungsstrategien verfolgt und deren Vor- und Nachteile analysiert. Im ersten Projektabschnitt 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. 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.

Eine Erkenntnis der Analysen der GECCO-Assimilation ist, dass die Unterschiede in der Modellphysik und –konfiguration zu Inkonsistenzen in der Darstellung der Wassermassen und der AMOC führen. Als Vergleich zu dem oben beschriebenen Experiment wird in Nordatlantik II ein alternativer Ansatz verfolgt, in dem dasselbe 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.

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 dreidimensionale Felder von konsistenten Temperatur- und Salzgehaltsanomalien produziert, die auf demselben Modellgitter für die Initialisierung und die vereinfachte Assimilation (nudging) verwendet werden. Die Simulationen zeigen über dem extratropischen Atlantik verbesserte Vorhersagefähigkeiten für die Meeresoberflächentemperatur (SST) und den Wärmeinhalt des oberen Ozeans (Matei et al., 2012a).

II.1.2 Vorhersage der atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation

Die herausragende Bedeutung der meridionalen Umwälzzirkulation im Atlantik (AMOC) für den ozeanischen Wärmetransport und die relative langen Zeitskalen ihrer Variabilität machen ihre Beobachtung und Vorhersage zu einem wichtigen Forschungsthema. Während bisherige Studien zur mittelfristigen Klimavorhersage, nordhemisphärische oder regionale Temperaturen bzw. deren Auswirkungen untersucht haben, fehlten bisher Analysen der zu Grunde liegenden dynamischen Größen. Im Teilprojekt 4.2 sind erstmals Vorhersagen der AMOC, die mit dem ECHAM5/MPIOM Modell erstellt wurden, mit direkten Beobachtungen des RAPID/MOCHA Projektes verglichen worden (Matei et al., 2012b).

Die AMOC in den „Nachhersage“ – Experimenten, einem Ensemble von Simulationen, die von dem initialisierten Zustand gestartet werden, stimmt mit den Beobachtungen besser überein als die nicht-initialisierten Experimente (Abb. 4.2.1). Die beste Übereinstimmung wird dabei mit dem Ensemblemittel erzielt. Die Vorhersageverbesserung wird durch den Anomalie-Korrelationskoeffizienten zwischen dem beobachteten und simulierten Verlauf der MOC bewertet. Danach ist die AMOC bei 26.5° N für drei der vier Ensembles bis zu vier Jahre im Voraus vorhersagbar (Abb. 4.2.1). Die Ensemblevorhersage ist auch der Persistenzvorhersage deutlich überlegen, die vereinfacht annimmt, dass die AMOC konstant bleibt. Die Vorhersagbarkeit beruht hauptsächlich auf der Dynamik der oberen und mittleren geostrophischen Transporte, die wiederum von Anomalien in den zonalen Dichtegradienten bestimmt werden. Ensemble von Vorhersagen, die wir jeweils im Januar der Jahre 2008-2011 beginnen, zeigen, dass der vorhergesagte Verlauf stabil ist mit Ausnahme einer zwar deutlichen, aber kurzfristigen Abnahme im Winter 2010. Da die AMOC wichtige Aspekte des Klimas, besonders in Europa, Afrika

und Nordamerika bestimmt, bildet der Nachweis ihrer Vorhersagbarkeit einen wichtigen Baustein für zukünftige mittelfristige Klimaprognosen.

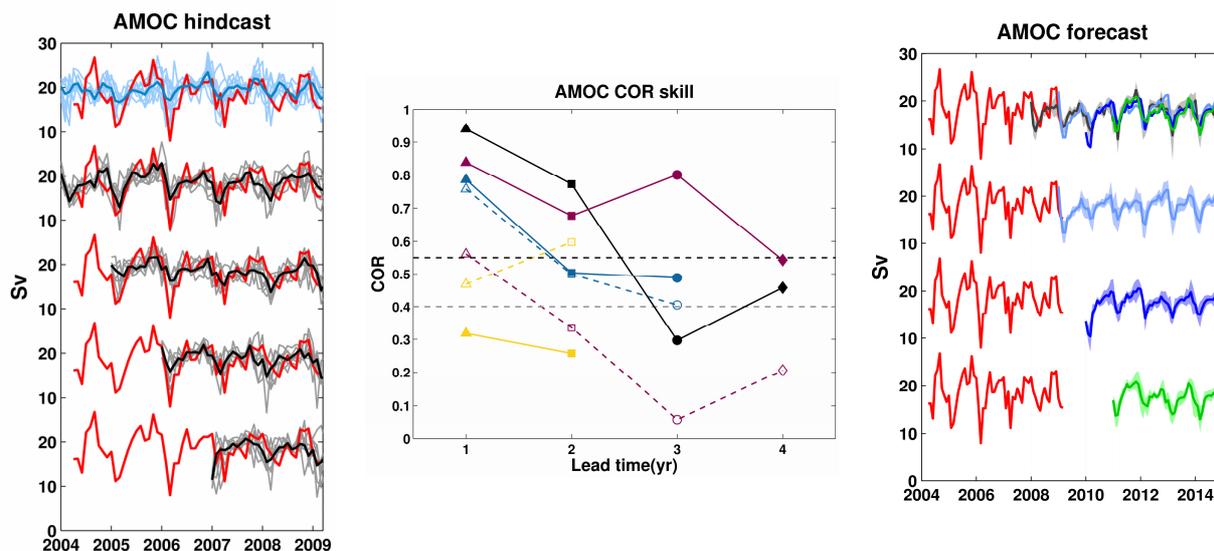
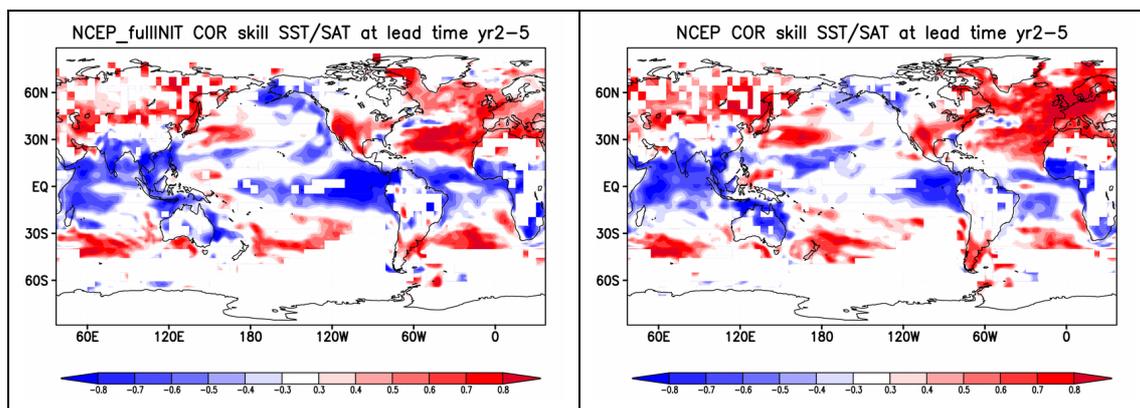


Abb. 4.2.1: (Links) AMOC-Stärke: zonal integrierter nordwärtiger Transport bei 26.5° N oberhalb von 1000m. Die beobachteten Transporte stammen von RAPID/MOCHA (rot), die individuellen "Nachhersagen" und ihr Ensemblemittel sind in Grau und Schwarz dargestellt. Transporte der nicht-initialisierten Simulation sind in hell- bzw. Dunkelblau dargestellt. (Mitte) Vorhersagegüte dargestellt als Korrelationskoeffizient (COR) für Startdatum Jan 2004 (schwarz), Jan 2005 (violett), Jan 2006 (blau) und Jan 2007 (orange) als durchgezogene Linien. Die entsprechenden Werte für die Persistenzvorhersage erscheinen als gestrichelte Linien. (Rechts) RAPID/MOCHA Zeitreihen (rot) und die AMOC Vorhersagen für die Startdaten Jan 2008 (grau/schwarz), Jan 2009 (hellblau), Jan 2010 (dunkelblau) und Jan 2011 (grün).

II.1.3 "Gesamtfeld" versus "Anomalie" -Initialisierung für dekadische Vorhersagen

Die bisher untersuchten Vorhersageexperimente verwenden durchgehend das sog. Anomalie-Initialisierungsverfahren. Im Gegensatz zur „Gesamtfeld-Initialisierung“ bietet dieses Verfahren den Vorteil, eine Drift des imperfekten Modells vom "perfekten" Beobachtungszustand zum modelleigenen, fehlerbehafteten Zustand, zu verhindern. In einer Pilotstudie untersuchen wir die Unterschiede, die sich für beide Methoden hinsichtlich der Vorhersagequalität ergeben. In beiden Fällen führen wir Ensemblesimulationen (3 Ensemblemitglieder) über 10 Jahre durch. Anfangszeitpunkte sind die Jahre 1960 – 2005 im Abstand von fünf Jahren (10 Startdaten). Erste Ergebnisse zeigen ähnliche Werte für die Verteilung der Vorhersagequalität. Insgesamt werden eher höhere Vorhersagegüten im Fall der Anomalie-Initialisierung erreicht, vor allem im Bereich des nordatlantischen Subpolarwirbels und im nordwestlichen Teil Europas (Abb. 4.2.2). Für die AMOC finden wir in mittleren Breiten potentielle Vorhersagbarkeiten über einen Zeitraum bis vier Jahre mit der Anomalie-Initialisierung und drei Jahre für die Gesamtfeld-Initialisierung.



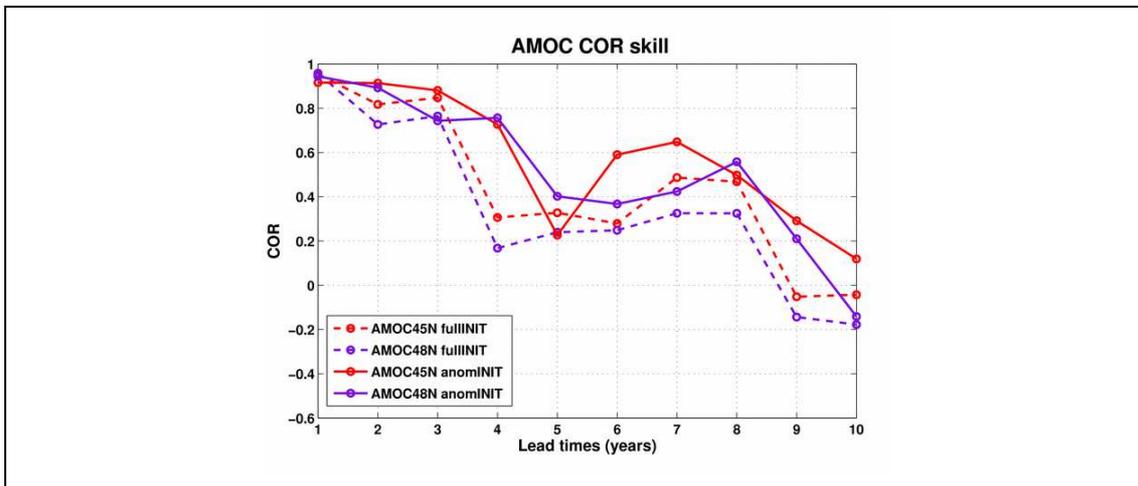


Abb. 4.2.4: (oben) Vorhersagegüte (COR-skill) der Nachhersagen für den Zeitraum der Jahre 2-5. Korrelation zwischen den Beobachtungsdaten und den initialisierten hindcasts unter Verwendung der Anomalie-Initialisierung (links) und Gesamtfeld-Initialisierung (rechts). (unten) Potentielle Vorhersagbarkeit der AMOC für die Anomalie-Initialisierung (durchgezogene Linie) bzw. Gesamtfeld-Initialisierung (gestrichelte Linie).

Literatur

- 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.
- 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.
- 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, und J. Marotzke (2009): Initializing Decadal Climate Predictions with the GECCO Oceanic Synthesis: Effects on the North Atlantic. *J. Climate*, 22, 3926–3938.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Größte Kostenfaktoren für Projekte der numerischen Klimasimulationen am Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M) sind Kosten für die Nutzung des Supercomputers des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) sowie Personalkosten. Die Rechenkosten sind über einen Projektantrag aus dem BMBF Kontingent sowie aus Hausmitteln des MPI-M abgedeckt. Daher stellen Personalkosten die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises. Im Teilprojekt 4.2 wurde eine erfahrene Wissenschaftlerin angestellt um das Modellsystem zu koppeln und abzustimmen sowie die Resultate auszuwerten und zu publizieren.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der finanzielle Rahmen der Teilprojekte war entsprechend der Beantragung notwendig und den gewonnen Resultaten angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Im Teilprojekt 4.2 wurden wichtige und nachhaltige Ergebnisse zur mittelfristigen Klimavorhersage erzielt. Diese Ergebnisse bildeten einen Teil des Fundamentes für das BMBF Forschungsprogramm „Mittelfristige Klimaprognose“ (MiKlip) und für weitere Studien im Rahmen des BMBF Ozeanforschungsprogramms „Regional Atlantic“ (RACE).

II.5 Wissenschaftlicher Fortschritt Dritter

Die mittelfristige Klimavorhersage ist ein innovatives und neuartiges Feld der Klimaforschung. Seine Bedeutung zeigt sich in der Einbeziehung der Dekadenvorhersagen in die CMIP5 Simulationen (Taylor et al., 2012). Zahlreiche Modellierungsgruppen sind weltweit dabei, ihre CMIP5 Ergebnisse auszuwerten und zu publizieren, so dass hier auf Einzelergebnisse nicht eingegangen wird. Einen Überblick liefern Meehl et al. (2013). Es ist zu erwarten, dass die Publikationen ihren Niederschlag im Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC) haben werden.

II.6 Erfolgte 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, in Proceedings of OceanObs09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, Vol. 2, edited by J. Hall, D.E. Harrison, and D. Stammer, ESA Publication WPP-306, doi:10.5270/OceanObs.cwp45.
- Matei, D., H. Pohlmann, J. Jungclaus, W. Müller, H. Haak, J. Marotzke (2012a): Two tales of initializing decadal climate prediction experiments with ECHAM5/MPI-OM model. *Journal of Climate*, **25**, 8502-8523, doi:10.1175/JCLI-D-00633.1.
- Matei, D., J. Baehr, J. Jungclaus, H. Haak, W. Müller, J. Marotzke (2012b): Multiyear Prediction of the Monthly Mean Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5° N. *Science*, **335**, 76-79, doi:10.1126/science.1210299.
- Meehl, G.A., L. Goddard, B. Kirtman, G. Branstator, G. Danabasoglu, E. Hawkins, A. Kumar, T. Rosati, D. Smith, R. Sutton, G. Boer, R. Burgman, C. Cassou, S. Corti, A. Karspeck, N. Keenlyside, M. Kimoto, D. Matei, J. Mignot, R. Msadek, A. Navarra, H. Pohlmann, M. Rienecker, E. Schneider, C. Tebaldi, H. Teng, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi, and S. Yeager (2013): Decadal Climate Prediction: An Update from the Trenches. *BAMS* (eingereicht).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussberichte der Teilprojekte AP 2.1, AP 3.1 und AP 4.3, bearbeitet durch das BSH.	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Klein, Birgit	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2012
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH Bernhard-Nocht-Str. 78 20359 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03F0606A
	11. Seitenzahl 15
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 11
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Teilprojekt 2.1 steuert einen messenden Beitrag des BSH zu einem Diagnosesystem im Nordatlantik bei, das es in Kombination mit Modellen erlaubt, frühzeitig für Westeuropa relevante Veränderungen im Klima und Meeresspiegel zu erkennen und ihre Auswirkungen vorherzusagen. Der Beitrag des BSH besteht aus drei Tiefseeverankerungen am Mittelatlantischen Rücken (MAR), die fester Bestandteil eines großräumig angelegten Beobachtungsnetzes aus Verankerungen in den wichtigen Bruchzonen am MAR und Randstromverankerungen sind. Die Verankerungen dienen der Quantifizierung der Wassermassen- und Transportvariabilität im subpolaren Nordatlantik. Das Teilprojekt 3.1 verbindet regionale und globale Modellierung mit dem derzeit vom BSH durchgeführten Monitoring der Nordsee, welches sowohl eine Beobachtungs- als auch eine Modellierungskomponente enthält, die auch für das Ökosystem relevante Größen erfasst. Der Fokus der wissenschaftlichen Auswertung in Zusammenarbeit mit dem MPI liegt auf der Abschätzung und Vorhersage großräumiger SSH Änderungen auf dem europäischen Schelf und speziell in der Nordsee und der Untersuchung der Kopplungsmechanismen. Dem Teilprojekt kommt somit eine Brückenfunktion zwischen grob auflösenden globalen Modellstudien und reinen Schelfmodellen zu. Das Teilprojekt AP 4.3 wurde mit dem regionalen Schelfmodell HAMSOM der Einfluss von Schwankungen in der Nordatlantikzirkulation und von Änderungen des lokalen atmosphärischen Antriebs auf Variationen von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden untersucht. Insbesondere wurden die Auswirkungen der globalen Erwärmung und des damit verbundenen Anstiegs des Meeresspiegels sowie von dekadischen atmosphärischen Schwankungen (NAO) auf Änderungen des Wasserstandes, der Zirkulation, und der Hydrographie (Salzgehaltes und Temperatur) der Nordsee analysiert.	
19. Schlagwörter Subpolarer Nordatlantik, Wassermasseneigenschaften, Transporte, Klimawandel, Kopplung Nordatlantik Nordsee, globale Modellstudien, regionale Modellstudien, dekadische Schwankungen, NAO	
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 Final report for the partial projects AP 2.1, AP 3.1 and AP 4.3		
4. author(s) (family name, first name(s)) Klein, Birgit	5. end of project 31.12.2012	6. publication date
	7. form of publication	
	8. performing organization(s) (name, address) Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH Bernhard-Nocht-Str. 78 20359 Hamburg	
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. originator's report no.
		10. reference no. 03F0606A
		11. no. of pages 15
16. supplementary notes		12. no. of references
		14. no. of tables
		15. no. of figures 11
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract <p>The project AP 2.1 is an operational contribution of the BSH to a North Atlantic diagnostic system. This system, in combination with models, allows forecasting relevant changes in climate and sea level changes and predicting their impact on Western Europe. The BSH provides three deep sea moorings at the Mid-Atlantic-Ridge (MAR). They are an inherent part of a large-scale operational pattern of moorings at important fracture zones at the MAR and at the western boundary. The measurements are used to quantify the water mass and transport variability in the subpolar North Atlantic.</p> <p>This project (AP 3.1) investigates the effects of the North Atlantic Circulation and other meteorological parameters on the physical processes in the North Sea, using the global ocean model MPI-OM (Max Planck Institute Ocean Model). High resolution is set onto the North and the Baltic sea. Inter-annual up to decadal scale changes were explored in this regard. Additionally, the effect of global climate change and basin scale climate oscillations, e.g. the North Atlantic Oscillation (NAO), on the sea level, the hydrography (temperature and salinity) and the thermodynamics of the North Sea were investigated. Also the influence of the coupling effect was examined.</p> <p>This project deals with the study of effect of North Atlantic circulation and other meteorological parameters in the physical processes of North Sea using regional ocean model HAMSOM (Hamburg Shelf Ocean Model). Inter-annual to decadal scale changes in North Sea were explored. Furthermore, the effect of global climate change and basin scale climatic oscillations like North Atlantic Oscillation (NAO) on sea level, hydrography (temperature and salinity) and thermodynamics of North Sea was also explored. The development of optimal coupling techniques of regional scale models with global climate models is needed in the future.</p>		
19. keywords		
20. publisher	21. price	

Abschlussbericht

Teilprojektleiterin:

Dr. Birgit Klein

In Kooperation mit:

Prof. Dr. Monika Rhein (IUP, TP 2.1)
Dr. Uwe Mikolajewicz (MPI-M, TP 3.1)
Dr. Ernst Maier-Reimer (MPI-M, TP 3.1)
PD Dr. Thomas Pohlmann (IfM, TP 4.3)
Prof. Dr. Detlef Stammer (IfM, TP 4.3)

Wissenschaftliche Mitarbeiter/in:

Claudia Denker (TP 2.1), Michaela Markovic (TP 3.1), Nikesh Narayan (TP 4.3)

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

2.1 Das Vorhaben AP 2.1 wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem BSH und der Universität Bremen durchgeführt. Die gemeinsamen Aufgabenstellungen sind im Fortsetzungsantrag von 2009 zu finden. Die Arbeitsgruppe des BSH beschäftigt sich insbesondere mit Aufgabe 3 und tauscht Ergebnisse und Daten mit der Uni Bremen zu den anderen Arbeitspaketen aus. Die ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans ist im Antrag unter Punkt 1.4 und insbesondere 1.4.3 und 1.4.4 zu finden.

3.1 Das Teilprojekt wurde in enger Kooperation mit dem MPI-M in Hamburg bearbeitet und befasste sich mit der Aufbereitung von Beobachtungsdaten zur Nutzung für den Vergleich mit dem Modell, für die Modellvalidierung der ungekoppelten und gekoppelten Experimente, der Erstellung und Analyse einer Randwertklimatologie für das BSH Modell und der Untersuchung der langfristig zu erwartenden Änderungen der Wassermasseneigenschaften und des Austausches zwischen nordwesteuropäischem Schelf und dem offenen Ozean.

4.3 In diesem Projekt wurde mit dem regionalen Schelfmodell HAMSOM der Einfluss von Schwankungen in der Nordatlantikzirkulation und von Änderungen des lokalen atmosphärischen Antriebs auf die Variationen von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden untersucht. Insbesondere wurden die Auswirkungen der globalen Erwärmung und des damit verbundenen Anstiegs des Meeresspiegels sowie von dekadischen atmosphärischen Schwankungen (NAO) auf Änderungen des Wasserstandes, der Zirkulation, und der Hydrographie (Salzgehalt und Temperatur) der Nordsee analysiert. Dazu mussten zunächst Techniken für die optimale Ankopplung des Schelfmeermodells an globale Assimilationsläufe zu entwickelt werden. Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Meereskunde in Hamburg und dem BSH durchgeführt, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten am BSH in der Modellvalidation und der anschließender Analyse der Langzeitläufe lag. Die genauen Aufgabenstellungen sind im Antrag vom Januar 2009 auf Seite 3 und 4 aufgelistet.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Die Abteilung operationelle Ozeanographie am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg war schon an vielen Forschungsexpeditionen beteiligt und es stehen ihr ausgezeichnete, technische und personelle Mittel für hydrographische Arbeiten, Verankerungsarbeiten, sowie für die Aufbereitung und Analyse von ozeanographischen Datensätzen zur Verfügung.

3.1 Ziel des Verbundvorhabens ist es, aus einem Verständnis der Rolle des Ozeans im globalen Klimasystem heraus, Klimavariationen im Nordatlantischen bzw. Nordwesteuropäischen Sektor besser beobachten und vorhersagen zu können. Langfristig soll daraus ein Monitoring und Frühwarnsystem für den Nordatlantik und seine nordwesteuropäischen Randmeere entstehen. Das hier beantragte Projekt verbindet die regionale und globale Modellierung mit dem derzeit vom BSH durchgeführten Monitoring der Nordsee.

4.3 Die vorrangige Aufgabe hydrodynamischer Schelfmodelle ist es, die hydrodynamische Situation von Schelfmeeren wie z.B. der Nordsee über die letzten Dekaden so realistisch wie möglich zu reproduzieren. Um zu realitätsnahen Beschreibungen des physikalischen Zustandes der Nordsee zu

gelangen, sind aber bestmögliche Beschreibungen der physikalischen Zirkulation erforderlich, wie sie heute z. B. durch Datenassimilationsmodelle für den offenen Ozean erzeugt werden. Allerdings liefern reine Assimilationsansätze aufgrund der Randbedingungsproblematik für den Schelfbereich derzeit noch keine befriedigenden Ergebnisse. Einen Ausweg aus diesem Dilemma ist das Nesting von großskaligen Modellen mit Schelfmeermodellen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Formulierung offener Randbedingungen von fundamentaler Bedeutung für jedes regionale Modell ist, das über hinreichend lange Zeit betrieben wird. Während für die Zukunft ein Ansatz angestrebt wird, indem ein Schelfmeermodell aktiv in ein Atlantikmodell genestet und Datenassimilation für das Gesamtsystem betrieben wird, wurden in diesem Projekt als erster, notwendiger Zwischenschritt, zunächst Techniken für die optimale Ankopplung eines Schelfmeermodells an globale Assimilationsläufe zu entwickelt. Die einzelnen Modellkomponenten, die im Rahmen dieses Vorhabens benutzt und gekoppelt wurden, wurden bereits in unterschiedlichen Anwendungen betrieben und getestet. Parallel zu den Simulationen mit dem HAMSOM Modells, sind Analysen mit dem globalen MPIOM im AP3.1 durchgeführt worden. Die Struktur von MPIOM macht letztendlich ein Modellnesting überflüssig. Am BSH stehen umfangreiche in-situ Datensätze für die Nordsee zur Verfügung, die zeitlich homogenisiert und zusammengeführt wurden. Anhand der beiden sehr unterschiedlichen Modelltypen (Regionalmodell HAMSOM und Globalmodell MPIOM (siehe TP3.1)) wurden die Wechselwirkungen zwischen Nordatlantik und Nordsee im Klimawandel analysiert und im Vergleich mit den in-situ Messungen eine Validierung durchgeführt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

2.1 Der im Antrag vorgelegte Arbeitsplan konnte zum größten Teil eingehalten werden. Aufgrund der verspäteten Einstellung der Mitarbeiter haben die Projektarbeiten verzögert begonnen und sind entsprechend bis Ende 2012 verlängert worden. Ein geänderter Arbeitsplan wurde mit dem PTJ abgesprochen und genehmigt. Mit dem Beginn der Verankerungsarbeiten konnte erst im November 2009 begonnen werden, da die dafür vorgesehene Merian Fahrt vorzeitig abgebrochen werden musste. Im November 2009 wurden daher erstmals die drei Tiefseeverankerungen im westlichen Einstrombereich der Faraday Bruchzone (FBZ), am Mittelatlantischen Rücken (MAR), ausgelegt. Im August 2010, im Juli 2011 und im Juli 2012 wurden diese Verankerungen jeweils erfolgreich geborgen, neu bestückt und wieder ausgelegt. Die bisherige Erfolgsquote der verankerten Messgeräte ist hoch, es gab nur wenige Geräteausfälle. Somit konnten die Messreihen in allen geplanten Tiefen fast kontinuierlich um die Verankerungszeiträume verlängert werden. Alle Verankerungsdaten wurden aufbereitet und zusammengestellt.

3.1 Der geplante Arbeitsablauf konnte im in allen Teilen eingehalten werden (siehe Arbeitsplan im Antrag), obwohl die Bearbeitung des Projekts am BSH aufgrund verspäteter Einstellung der Projektmitarbeiterin mit Verzug startete.

4.3 Der geplante Arbeitsablauf konnte im in allen Teilen eingehalten werden (siehe Antrag 2009, Seite 11), obwohl die Bearbeitung des Projekts am BSH aufgrund verspäteter Einstellung der Projektmitarbeiterin mit Verzug startete. Der Austausch der Modelldaten mit dem IfM, die Aufarbeitung der Beobachtungsdaten am BSH und anschließende Validation und Analyse der Modellsimulationen konnten zügig und erfolgreich durchgeführt werden.

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

2.1 Die Antragstellerin und ihre Mitarbeiter verfügen über jahrelange Erfahrung in der Durchführung von Verankerungsarbeiten, der Instandhaltung von Messgeräten sowie der Analyse und Aufbereitung der erhobenen ozeanographischen Daten. Diese dienen der Quantifizierung der Wassermassen- und Transportvariabilität im subpolaren Nordatlantik. Bestehende Schutzrechte werden von den Aktivitäten im Projekt nicht berührt.

3.1 Es ist davon auszugehen, dass sich das Klima in wenigen Dekaden aufgrund der Emission von anthropogenen Treibhausgasen deutlich ändern wird. Bisherige Studien weisen darauf hin, dass diese Änderungen im Bereich der Arktis besonders stark ausfallen werden und Auswirkungen auf das Klima und Nordeuropa bestehen könnten. Besonders deutliche Änderungen der Zirkulation mit ausgeprägten regionalen Unterschieden sind dabei im Nordatlantik zu erwarten. Über die Auswirkungen dieser Zirkulationsänderungen auf die Nordsee gab es bisher nur wenige Studien, die zudem auf Simulationen mit Regionalmodellen beruhten.

4.3 Die numerischen Methoden des Modellnestings sind noch nicht soweit ausgereift, dass ein allgemeiner, optimaler Kopplungsalgorithmus bekannt ist. Aus modelltechnischen Gründen und wegen häufig fehlender Randinformationen ist es weit verbreitete Praxis, geschlossene Ränder vorzuschreiben, bei denen Relaxationsbedingungen für Wassermassen an den seitlichen Rändern vorgeschrieben werden, um Wassermassentransformation außerhalb des Modellgebietes zu simulieren, aber auch um Reflexionen von Wellen zu dämpfen (z.B. Klink, 1995, Doescher et al., 1994). Die bessere Alternative für die Vernetzung ist die Verwendung offener Ränder, bei denen Wassermassen und Wellen sowohl in das Modellgebiet eindringen als es auch verlassen können (z.B., Orlanski, 1976, Bennett, 1992). Auch für den Nordwesteuropäischen Schelf wurde die Orlanski-Bedingung bislang eingesetzt. Hierbei wurden im Normalfall an den offenen Rändern Klimatologien vorgeschrieben (Pohlmann, 1996a), in denen interannuale Schwankungen naturgemäß nicht enthalten sind. Schrum und Backhaus (1999) haben versucht, dieses Problem durch Verwendung zeitlich abhängiger Daten zu umgehen, doch ist die Datenbasis insbesondere für die tieferen Schichten extrem lückenhaft (Janssen et al., 1999). Außerdem konnten mit diesem Verfahren nur Salz- und Temperaturwerte an den äußeren Rändern vorgeschrieben werden, während barotrope Störungen im Wasserstand nicht berücksichtigt werden konnten. Wie Bennett (1992) dargelegt hat, liegt bei der Festlegung von offenen Randbedingungen ein fundamental unterbestimmtes, mathematisches Problem des zugrundeliegenden dynamischen Modellsystems vor. Um ein Modell mit offenen Rändern vorwärts laufen lassen zu können, muss man daher in der Regel die Randbedingungen überspezifizieren, was mathematisch betrachtet im Normalfall nicht zu befriedigenden Lösungen führt. Ein zweites Problem ist das der ungenügenden Information darüber, welche Eigenschaften von außen über die offenen Ränder in das Modellgebiet hinein propagieren. Als Resultat führen regionale Modelle, die mit offenen Rändern betrieben werden, normalerweise zu anderen Ergebnissen als solche, die beckenweit mit der gleichen Auflösung und gleichem Antrieb gerechnet werden. Das letztere Problem kann in der Regel nur durch Datenassimilation innerhalb des Schelfmeers gelöst werden, wobei die Randbedingungen als Kontrollparameter definiert werden (z.B. Bennett and Macintosh, 1992, Zhang und Marotzke, 1999). Ein solcher Ansatz soll in der Zukunft angestrebt werden, indem ein Schelfmeermodell aktiv in ein Atlantikmodell genestet und Datenassimilation für das Gesamtsystem betrieben wird. Als erster, nützlicher Zwischenschritt macht es Sinn Techniken für die optimale Ankopplung eines Schelfmeermodells an globale Assimilationsläufe zu entwickeln und so sicherzustellen, dass das Schelfmeermodell an die großskaligen Volumen und hydrographischen Änderungen angepasst wird.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2.1 Im Teilprojekt AP 2.1 gibt es eine enge Zusammenarbeit zwischen dem BSH und der Universität Bremen. Des Weiteren profitieren die Arbeiten im Projekt besonders durch die ebenfalls enge Zusammenarbeit im gesamten Verbund (siehe Antrag unter Punkt 1.3.2 und 1.3.3). Mit einer Vielzahl nationaler und internationaler Institutionen (WHOI, AWI, IFM-GEOMAR, ZMAW, IFREMER) besteht eine enge Kooperation zur Auslegung von Floats im Atlantik. Das BSH ist zudem Teil des *North Atlantic Regional Data Center* und arbeitet dort eng mit dem IFREMER in Frankreich und dem *British Oceanographic Data Centre* (BODC) in England zusammen. Das BSH ist weiterhin Partner im Euro-Argo-Konsortium, das die Zusammenarbeit aller europäischen *Argo*-Betreiber organisiert.

3.1 AP 3.1 trägt durch die erhöhte regionale Auflösung in den Modellen zu einer verlässlicheren Abschätzung der klimabedingten Änderungen in der Nordsee bei. Damit leistet es, im Vergleich zu den globalen Klimamodellen, eine wesentliche Entwicklungsarbeit für ein regionales Vorhersagesystem für den Bereich Nord- und Ostsee. Daten aus den Ozeananalysen, die im AP 4.1 erstellt werden, standen zur Modellvalidation zur Verfügung. Im AP 4.3 wurden Experimente mit dem ozeanischen Regionalmodell HAMSOM durchgeführt. Das AP ist teilweise eng verbunden mit AP 3.3, das auf die CO₂-Aufnahme fokussiert.

4.3 Die geplanten Untersuchungen liefern wichtige Beiträge zu diversen Themen des Verbundprojekts. Von den unter 3.1. genannten Zielen werden Beiträge zu den Themenkomplexen 3, 4, 6, 7, 8 und 9 geleistet. Hierbei handelt es sich zum einen um die Auswirkungen von atlantischen Störungen auf das europäische Schelfmeer, wobei speziell auf Sturmfluten und andere Extremereignissen eingegangen wird. Ein tieferes Verständnis der beteiligten Prozesse und Übertragungsmechanismen ist Voraussetzung für Vorhersagbarkeiten auf der Dekadenskala. Das vorgestellte Projekt arbeitet eng mit dem Projekt AP4.1 zusammen, das die Randwertdaten aus dem dort erstellten 50-Jahrelauf bereitstellt. Des Weiteren wurde mit dem Projekt AP3.1 eng kooperiert und von AP 3.1 Randwerte übernommen, um damit im Vergleich den Einfluss der Assimilation im

Nordatlantik auf die Güte der Modellergebnisse in der Nordsee abschätzen zu können.

II. Eingehende Darstellung

II.1 der Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Zu Teilprojekt 2.1: Forschungsfahrten und Verankerungszeiträume

Detaillierte Darstellungen der Forschungsrouten sowie eine Tabelle der Ausfahrten und Forschungsschiffe, sind im Abschlussbericht 2012 zum Teilprojekt AP 2.1 der Universität Bremen (Projektleiterin: Prof. Dr. Monika Rhein) zu finden.

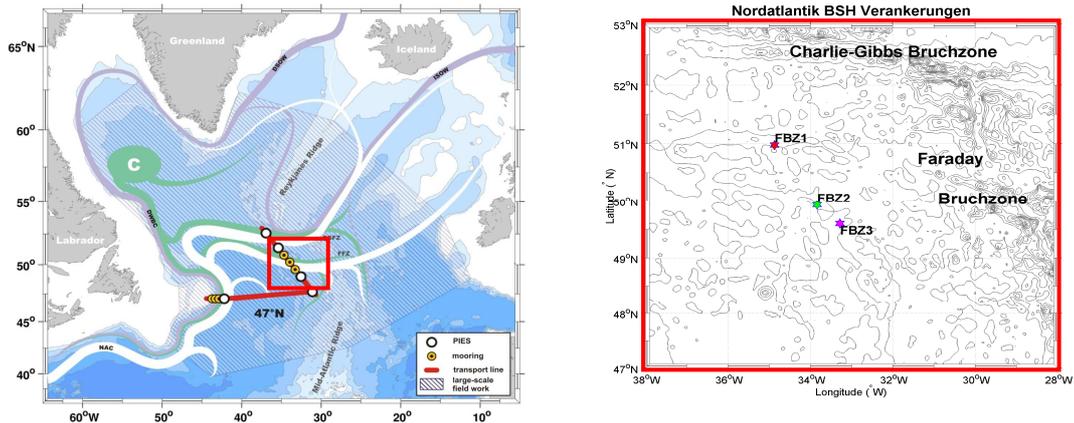


Abb.1: Links: Lage der verankerten Messgeräte (PIES und Verankerungen) im TP2.1. Rechts: Lage der BSH Verankerungen im Bereich der Faraday Bruchzone mit Bodentopographie.

Daten

Die drei Verankerungen im Einstrombereich der Faraday Bruchzone (FBZ) am MAR haben eine Konzentrierung der Geräte auf den ULSW/ LSW Bereich und dem Bereich des Nordatlantikstroms (NAC). Die Messgeräte, bestehend aus Strömungsmessern, Microcats und Thermistorrekordern, zeichnen Daten der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung sowie Temperatur, Leitfähigkeit und Salzgehalt auf. Zur Kontrolle der Gerätetiefen werden an ausgewählten Geräten auch Druckmessungen durchgeführt. Neben den Verankerungsdaten werden auch die Schiffsmessungen der CTD und LADCP's in den Analysen verwendet. Weitere Quellen, die genutzt werden, sind Oberflächenfelder, wie „Sea Surface Height“ (SSH) und „Sea Surface Temperature“ (SST), die durch Satelliten Messungen erhoben werden.

Auswertung

Die wichtigen Fragestellungen, die anhand der hier gewonnenen Datensätze bearbeitet wurden, sind:

- Wo liegen die Hauptstromzweige des NAC, wenn sie den Mittelatlantischen Rücken überqueren?
- Gibt es Zusammenhänge zwischen den Transporten des Nordatlantikstroms (NAC) im Subpolarwirbel und dem LSW?
- Welche TS-Eigenschaften hat das LSW beim Überqueren des Rückens?
- Wodurch wird die Lage und Intensität des NAC, der SPF und des SPG beeinflusst?

Fragenkomplex: Wo liegen die Hauptstromzweige des NAC, wenn sie den Mittelatlantischen Rücken überqueren?

Die Zirkulation des NAC ist im Bereich zwischen der CGBZ und der FBZ von hoher Variabilität geprägt und schwankt zwischen Zirkulationsmustern mit einem oder zwei Strombändern (Schott et al. 1999; Bower und Von Appen, 2008). Zusätzlich gibt es starke Änderungen in der Position der einzelnen Strombänder über dem MAR. In der Arbeit von Bower und von Appen (2008) wurde die oberflächennahe Lage der NAC-Strombänder über Maxima der Zonalgeschwindigkeit aus Altimeterdaten festgelegt. Abb. 9 im Zwischenbericht für 2011 zeigt die Fortführung dieser Analyse bis Ende 2011 und die daraus abgeleitete Lage der ostwärts setzenden NAC-Zweige über den Bruchzonen des MAR. Über dem MAR (29° W, Abb.9, Mitte, aus Zwischenbericht) ist die Präferenz

der NAC Zweige über den Bruchzonen und die Schwankungen zwischen Mustern mit ein oder mehreren Strombändern klar zu erkennen. Nach Jahren mit einem schwächer ausgeprägten NAC-Zweig über der CGBZ ab 2002, entwickeln sich ab 2006 dort wieder Geschwindigkeitsmaxima und ab 2009 findet sich dort ein besonders starker und ausgeprägter Zweig über dieser Bruchzone. Der Zweig über der FBZ, der in der Zeit von 2002-2006 dominierte, ist auch bis zum Ende der Zeitreihe 2012 kontinuierlich vorhanden, weist aber größere räumliche Schwankungen auf. Es ist allerdings zu beachten, dass Aufgrund der Neigung des MAR die FBZ bei 29°W nicht direkt erfasst wird, sondern ein Stück weiter westlich liegt. Im Verlauf der Verankerungsauslegungen ab Nov. 2009 macht der Zweig über der FBZ einen deutlichen Versatz nach Süden und zusätzlich ist ein weiterer südlicher Zweig über der Maxwell-Bruchzone (MBZ) existent. Als Erweiterung der bisherigen Analysen wurden hier zusätzlich Trajektorien von Argo-Floats in die Analyse einbezogen und die geographische Breite der MAR Überquerung ermittelt. Es ist offensichtlich, dass die im Tiefenniveau des LSW driftenden Floats (1000 bzw. 1500 m) mit den Strombändern des NAC über den MAR transportiert werden. Das entsprechende Diagramm für 35 °W (Abb. 9, unten, aus Zwischenbericht), welches ungefähr der Lage der FBZ Verankerung entspricht, zeigt im Wesentlichen einen dominanten Stromzweig zwischen 50-51°N, mit ausgeprägten Schwankungen nach Süden. Die Verankerungsperioden weisen deutlich unterschiedliche Verläufe auf, die mit einer Verschiebung der NAC Zweige einhergehen. Von November 2009 bis August 2010 (erste Periode) sind die Strömungen an den beiden südlichen Verankerungen (FBZ2, FBZ3) hoch korreliert und deutlich höher als während der zweiten Periode (August 2010 – Juli 2011) (Abb. 2 im Zwischenbericht).

Fragenkomplex: Wodurch wird die Lage und Intensität des NAC, der SPF und des SPG beeinflusst?

Westliche Randströme (WBC) spielen eine große Rolle für die beckenweite Klimavariabilität und sind Gebiete mit hoher zwischenjährlicher und dekadischer SST Variabilität (Kwon et al., 2010). Verstärkt wird die Variabilität auch durch mesoskalige Wirbel, wiederauftauchende Anomalien aus vorherigen Wintern aus tiefen Deckschichten und Variabilität im Windstresscurl, die zu dynamischer Anpassung des Ozeans durch Rossbywellen führt, welche sich von Osten nach Westen ausbreiten und so Einfluss auf die Stärke und Position der WBC haben können. Während für den Pazifik mehrere Studien existieren, die eine Beziehung zwischen der Lage des Randstroms und Windvariabilität im Ostbecken belegen (Schneider and Miller 2001; Qiu 2003; Taguchiet al. 2007), ist der Einfluss von Rossbywellen auf den Golfstrom im Atlantik weniger klar aufgrund der kleineren Beckendimension und der Tatsache das der Golfstrom meridional geneigt ist. Rossbywellensignale entlang des Golfstroms können daher aus unterschiedlichen Breiten stammen und unterschiedliche Phasen haben. Zusätzlich können dort andere langperiodische Schwankungen, wie z.B. Variationen in der AMOC die Stärke und Lage des Golfstroms beeinflussen. Im subtropischen Bereich des Atlantik (~33°N) ist die westwärtige Phasenausbreitung der SSH Anomalien klar zu erkennen (Abb. 8 bei Kwon et al., 2010). In höheren Breiten, in der Höhe der FBZ Verankerungen, sind die Strukturen hingegen weniger klar ausgeprägt (hier nicht abgebildet). In der Kombination der Verankerungsdaten, Satellitenmessungen der SSH und atmosphärischer Antriebsfelder, sind Untersuchungen zu den Ursachen für die Variabilität zurzeit noch im Gange und werden im Projekt RACE! fortgeführt.

Fragekomplex: Welche TS-Eigenschaften hat das LSW beim Überqueren des Rückens?

Die drei Verankerungen im Einstrombereich der FBZ haben eine Konzentrierung der TS Recorder auf den ULSW/LSW-Bereich und im Bereich des NAC. Im Laufe der letzten Dekaden traten in den Wassermasseneigenschaften des LSW starke Veränderungen auf, die sich auf den Hauptausbreitungspfaden des LSW in die angrenzenden Becken verbreiten. LSW-Zeitreihen (1950-2009) aus der Labradorsee, der Irmingersee und dem Islandbecken weisen ähnliche multidekadische Schwankungen auf (van Aken et al., 2011). Sie zeigen einen stetigen Anstieg der Temperatur und des Salzgehalts, der Mitte der 1990er Jahre zuerst in der Labradorsee beginnt und ca. 2-3 Jahre verzögert im Islandbecken auftritt (siehe Abb. 5 in van Aken et al., 2011). Die Hypothese einer Verbindung zwischen dem NAC-Transport Richtung Osten und LSW-Ausbreitung Richtung Ostatlantik taucht in der Literatur schon bei Talley und McCartney (1982) auf. Hydrographische Daten der Jahre 1957-1962 legen zum Beispiel bei etwa 50°N unterhalb des NAC einen LSW-Export in Richtung Islandbecken nahe. Die Advektion von LSW-Anomalien Richtung MAR und die zeitliche Verbindung zu den Wassermasseneigenschaften im Bildungsgebiet wurde daher anhand der aufgezeichneten Temperatur- und Salzgehaltszeitreihen der drei Verankerungen im LSW Bereich (1800 dbar) untersucht. Die hier dargestellte dekadische Zeitreihe des LSW-Salzgehalts am MAR (Abb. 2) basiert auf den noch sehr kurzen Zeitreihen der FBZ-Verankerungen, die mit Hilfe von Argo-Profilen aus einem Umkreis von maximal 80 km verlängert wurden (siehe auch Kieke et al., 2009). Zum Vergleich

sind hier auch noch die Zeitreihen aus der Labrador See sowie die Werte, die direkt über dem MAR gemessen wurden, dargestellt.

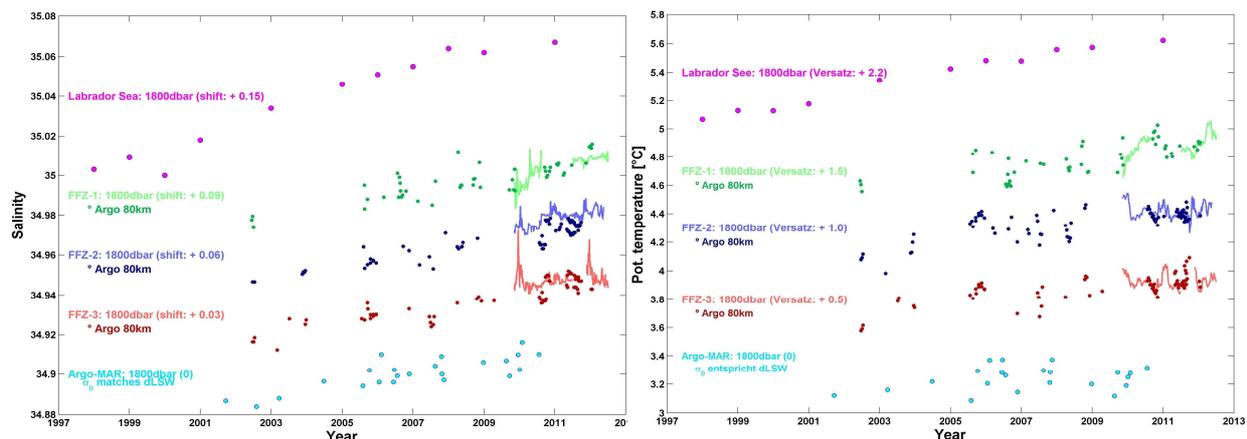


Abb. 2: Zeitreihen des LSW-Salzgehalts (1800 dbar) aus den FBZ-Verankerungen am Mittelatlantischen Rücken (Linien) und aus Argo-Profilen (Punkte), die maximal 80 km entfernt von der Verankerungsposition gemessen wurden. Des Weiteren die Jahresmittelwerte aus der Labrador See (Magenta) und Argo-Messungen direkt über dem MAR (Cyan). Zur besseren Sichtbarkeit wurden die Zeitreihen vertikal versetzt abgebildet.

Die kontinuierlichen Aufzeichnungen an den Verankerungen zeigen für den Zeitraum der drei Auslegeperioden von 2009-2012 einen Anstieg der Salzgehalte analog zum Bildungsgebiet (Kieke et al., 2007; Rhein et al., 2011; Vage et al., 2009; Yashayaev et al., 2009). Der Anstieg im Salzgehalt im Bereich der FBZ beträgt zwischen 2002 und 2012 ~ 0.03 . In den kontinuierlichen Zeitreihen der Verankerungen wird deutlich, dass es lokal kurzfristige Variationen des Salzgehalts in der Größenordnung 0.01 gibt, die dem langfristigen Trend überlagert sind. Für die Dekade 2002-2012 reicht die Abdeckung mit T/S-Daten durch vorbeidriftende Argo Floats aus, um die Trendverläufe wiederzugeben. Da der Vergleich mit den kontinuierlichen Messungen an den Verankerungen gezeigt hat, dass Messungen innerhalb eines Radius von 80 km genügend korreliert sind, um den zeitlichen Verlauf adäquat wiederzugeben, soll dies mit historischen CTD Daten noch weiter in die Vergangenheit verlängert werden.

Fragekomplex: Gibt es Zusammenhänge zwischen den Transporten des Nordatlantikstroms (NAC) im Subpolarwirbel und dem LSW?

Mit Hilfe von vier verankerten PIES messen die Bremer Kollegen die Stärke des Subpolarwirbels entlang des MAR und berechnen die geostrophischen Transporte aus den Laufzeiten der PIES. Direkte Strommessungen der BSH Verankerungen liegen zwischen diesen PIES Positionen und können für einen Methodenvergleich genutzt werden. Allerdings sind die räumlichen Strukturen der Strombänder so klein, dass sie durch den Abstand der Verankerungen nicht adäquat aufgelöst werden und durch zusätzliche Informationen erweitert werden müssen. Die Bremer Kollegen nutzten hohe Korrelationen zwischen PIES und Altimetergeschwindigkeiten, um ihre Transportzeitreihen bis 1992 auszuweiten (siehe Abschlussbericht AP2.1, Monika Rhein). Signifikante Korrelation zwischen den Oberflächensignalen in den Altimeterdaten und Strömungsgeschwindigkeiten im NAC Niveau sind ebenfalls gegeben und in Abb. 11 (im Zwischenbericht von 2011) für das Beispiel der Verankerung FB22 dargestellt. Für eine weitere Reduzierung des Rauschens ist eine genauere Betrachtung der Wirbelaktivitäten mit Hilfe von Satelliten Messungen und Argo Daten notwendig.

Literatur

- Bower, A. S., von Appen, W.-J. (2008): *Interannual variability in the pathways of the North Atlantic Current over the Mid-Atlantic Ridge and the impact of topography*. *J. Phys. Oceanogr.*, 38(1), 104-120.
- Kieke, D., Rhein, M., Stramma, L., Smethie, W. M., Bullister, J. L., LeBel, D. A. (2007): *Changes in the pool of Labrador Sea Water in the subpolar North Atlantic*. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06605, doi:10.1029/2006GL028959.
- Kieke, D., Klein, B., Stramma, L., Rhein, M., Koltermann, K. P. (2009): *Variability and propagation of Labrador Sea Water in the southern subpolar North Atlantic*. *Deep-Sea Res. I*, 56(20), 1656-1674.

- Kwon Y.-O., M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu, und L. Thompson (2010): *Role of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio Systems in Large-Scale Atmosphere–Ocean Interaction: A Review*, J. of Climate, Vol. 23, 3249–3281, DOI: 10.1175/2010JCLI3343.1,
- Qiu, B. (2003): *Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Response and potential feedback*. J. Phys. Oceanogr., 33, 2465–2482.
- Rhein, M., D. Kieke, S. Hüttl-Kabus, A. Rößler, C. Mertens, R. Meissner, B. Klein, C. W. Böning and I. Yashayaev (2011): *Deep-water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic*, Deep-Sea Res. II (2011), doi: 10.1016/j.dsr2.2010.10.061.
- Schott, F.A., R. Zantopp, L. Stramma, M. Dengler J. Fischer and M. Wibaux (1999): *Circulation and deep-water export at the western exit of the subpolar North Atlantic*, J. Phys. Oceanogr. 34 (84), 817–843.
- Schneider, N., and A. J. Miller (2001): *Predicting western North Pacific Ocean climate*. J. Climate, 14, 3997–4002.
- Taguchi, B., S.-P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai (2007): *Decadal variability of the Kuroshio Extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast*. J. Climate, 20, 2357–2377
- Talley, L. D., McCartney, M. S. (1982): *Distribution and circulation of Labrador Sea Water*. J. Phys. Oceanogr., 12, 1189–1205.
- Våge, K., R.S. Pickart, V. Thierry, G. Reverdin, C.M. Lee, B. Petrie, T.A. Agnew, A. Wong, and M.H. Ribergaard (2009): *Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008*. Nature Geoscience 2, 67–72, doi: 10-1038/NGEO382.
- van Aken, H.M., M. Femke, I. Yashayaev (2011): *Decadal and multi-decadal variability of Labrador Sea Water in the north-western North Atlantic Ocean derived from tracer distributions: Heat budget, ventilation and advection*, Deep-Sea Res. I, 58, 505–523.
- Yashayaev, I., Loder, J. W. (2009): *Enhanced production of Labrador Sea in 2008*. Geophys. Res. Lett., 36, L01606, doi:10.1029/2008GL036162

Zu Teilprojekt 3.1:

Aufbereitung der Beobachtungsdaten und deren Auswertung der gekoppelten und ungekoppelten Hindcast-Experimente (1.5.3; 1.5.4)

Oberflächentemperatur

Als eine robuste Validationsgröße haben sich die Oberflächentemperaturen der Nordsee angeboten, für die im BSH seit 1968 wöchentlich operationelle Karten erstellt werden, und anhand derer sowohl die zeitliche als auch räumliche Struktur für die Validation der MPI-OM Daten durchgeführt werden konnte.

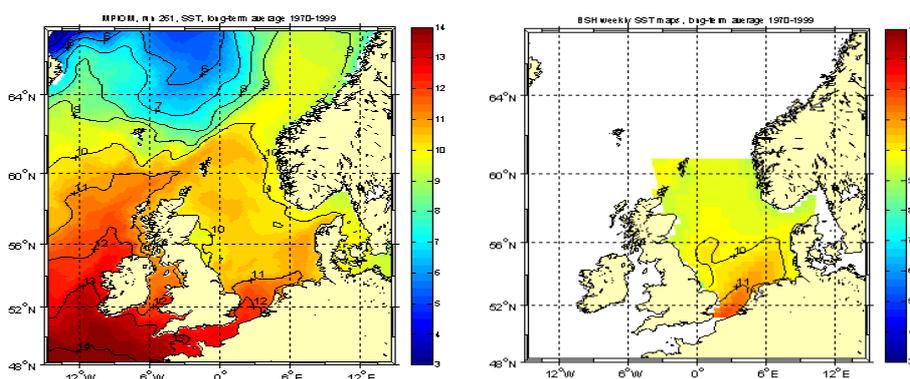


Abb. 3: Klimatologisches Mittel der Oberflächentemperatur für den Zeitraum 1970 – 1999. Links: ungekoppelter Hindcastlauf, rechts: Mittel aus den wöchentlichen Oberflächentemperaturanalyse des BSH

Das MPI-OM ist in der Lage die klimatologische Struktur der Oberflächentemperaturverteilung im Zeitraum 1970 – 1999 wiederzugeben. Allerdings sind in der nördlichen Nordsee die Temperaturen im Hindcast Lauf mit NCEP bis zu einem Grad wärmer als in der Beobachtung (Abb. 3). Dies ist zurückzuführen auf die zu hohe Einstrahlung im NCEP Antriebsdatensatz. In den SST Beobachtungen zeigt sich, dass die Oberflächentemperaturen bereits im Zeitraum 1970–2010 deutlich angestiegen sind. Dieser Anstieg setzte sich aus graduellen und sprunghaften Änderungen zusammen (Löwe et al. 2009). Auch die Hindcast Simulationen mit dem MPI Modell geben diese Entwicklung realitätsnah wieder, wie schon im Jahresbericht 2011 dokumentiert wurde (siehe dort Abb. 1).

Wassermassen und Schichtung

Für ein flaches Schelfmeer wie die Nordsee ist es wichtig, dass die Tiefenlage und Stärke der Deckschicht im Modell realitätsnah simuliert werden kann. Im Jahresbericht 2011 findet sich dazu ein Vergleich von Temperatur- und Salzgehaltsverteilungen für einen ausgewählten Schnitt bei 58° N mit entsprechenden Verteilungen aus der Janssen Klimatologie (Janssen et al. 1999). Der Vergleich zeigt generell vorzügliche Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten. So ist z.B. der Übergang zwischen niedrigen Salzgehalten im Ausstrom aus der Ostsee und höheren Salzgehalten in der Atlantischen Wassermasse gut wiedergegeben. Als weitere integrative Diagnostik wurden klimatologische TS Diagramme, basierend auf den Modellläufen, konstruiert und mit den entsprechenden Verteilungen aus der Janssen Klimatologie verglichen (siehe Jahresbericht 2011, Abb.3). Anhand der TS Diagramme ließ sich zeigen, dass die saisonale Entwicklung der Temperatur- und Salzgehaltsschichtung im Modell realistisch wiedergegeben wird und in dieser Modellkonfiguration der Austausch von atlantischem Wasser über den Schelfrand zu einer korrekten Simulation der dazugehörigen Temperatur- und Salzgehaltsverteilungen in der tiefen Norwegischen Rinne führt.

Einfluss der Nordatlantischen Oszillation

Als flaches Schelfmeer wird die Nordsee stark von atmosphärischer Variabilität beeinflusst, dies gilt besonders für die winterliche Variabilität. Anhand von verschiedenen Untersuchungen (Wakelin et al. 2009; Hjollo et al. 2009) ist eine hohe Korrelation verschiedener ozeanographischer Variablen in der Nordsee mit der Nordatlantischen Oszillation (NAO) bekannt. Diese Korrelationen finden sich so auch in den Modellsimulationen wieder. So korrelieren beispielsweise Oberflächentemperatur, Transport in die Nordsee und Meeresspiegelhöhe in hohem Maße mit der NAO. Im Fall des Einstroms in die Nordsee zeigt sich, dass dieser mit einer Verzögerung von einem Monat dem NAO Signal folgt. Die Variabilität des Meeresspiegels korreliert ebenfalls eng mit der NAO, wobei die höchsten Korrelationen in der Deutschen Bucht vorgefunden werden (siehe Abb. 7. im Jahresbericht 2011). Diese Zunahme lässt sich als Windstauphänomen interpretieren, da der positive (negative) NAO Zustand gleichbedeutend mit einer intensivierten (abgeschwächten) Zonalströmung in der Atmosphäre ist.

Arbeiten zur Analyse der Randwertklimatologie für das BSH Modell (1.5.5):

Zeitliche Variabilität an den Rändern der Nordsee

Für die Verbindung zwischen regionaler und globaler Modellierung interessieren vor allem die klimainduzierten Änderungen in den Einstromgebieten der Nordsee (Englischer Kanal, Nordrand und Skagerrak). Dieses ist ein Schwerpunkt der Arbeiten im Berichtszeitraum 2012 gewesen. Die zeitliche Variabilität am Nordrand ist in Hovmoeller Diagrammen (Abb. 4.) für Oberflächentemperatur/Oberflächensalzgehalt und Bodentemperatur/Bodensalzgehalt dargestellt. In den Jahresmitteltemperaturen (Abb. 4, links) ist eine deutliche Temperaturerhöhung ab 2030 offensichtlich, die beide dargestellten Tiefenniveaus und mithin die gesamte Wassersäule betrifft. Die Jahresmitteltemperatur liegt ab 2030 ständig oberhalb von 10.5 °C. In diesem speziellen Lauf von ECHAM5 (Lauf 3) ist die Erwärmung am Ende des 20. Jahrhunderts nicht stark ausgeprägt und im zeitlichen Ablauf tritt eine verstärkte Erwärmung erst im 21. Jahrhundert auf. Räumlich gliedert sich das Variabilitätsmuster in drei Bereiche, die mit den Zirkulationspfaden am Nordrand verbunden sind. Im Westen der Einstrom des atlantischen Wasser zwischen Orkneys und Fair Isle Kanal, im zentralen Bereich der Einstrom über das Shetland-Schelf und im Osten der Ausstrom von Ostseewasser in der Norwegischen Rinne. Die verstärkte Erwärmung des Ostseewassers tritt ebenfalls besonders ab 2030 in Erscheinung. Der große Kontrast zwischen den atlantischen Wassermassen und dem salzarmen Ostseewasser dominiert die Abbildung für den Salzgehalt (Abb. 4, rechts) und macht es schwierig die langfristige Abnahme des Salzgehalt in der zentralen Teilen des Schnittes um ca. 0.25 abzulesen. Daher sind in Abb. 5 die Anomalien für Temperatur und Salzgehalt für die gesamte Wassersäule dargestellt. Verstärkte Salzgehaltsanomalien treten sowohl am Westrand als auch am Ostrand des Schnittes auf, verbunden mit Schwankungen in den Frischwassereinträgen aus Flüssen. Der Salzgehalt schwankt zudem auf deutlich längeren Zeitskalen als die Temperatur. Dem Klimatrend mit abnehmenden Salzgehalten aus dem verstärkten hydrologischen Zyklus ist eine ca. 30 jährige periodische Schwankung überlagert. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts macht sich die starke Salzgehaltsabnahme in der Ostsee in den anhalten negativen Anomalien im Ostseeausstrom bemerkbar.

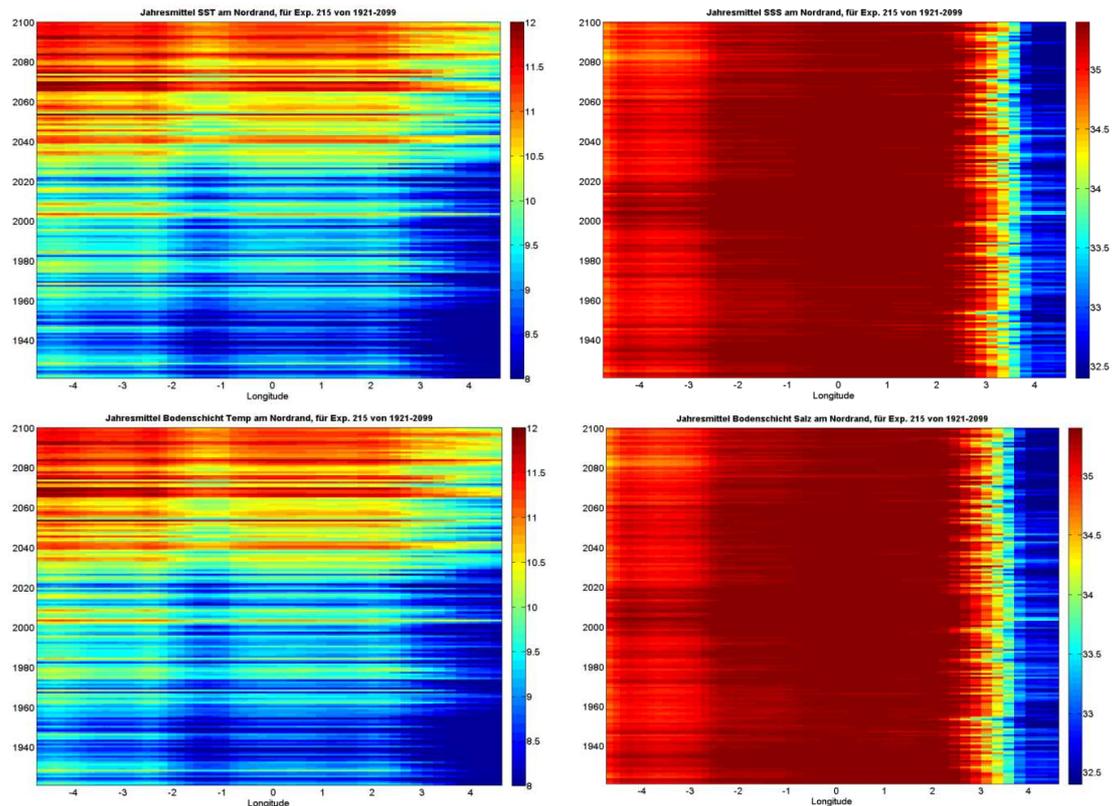


Abb. 4: Hovmoeller Diagramme für den Zeitraum 1921 – 2099 entlang nominell 60 N: Oberflächentemperatur [°C] (oben links) und Oberflächensalzgehalts (oben rechts), Bodentemperatur (unten links) und Bodensalzgehalt (unten rechts). Der ausgewählte Schnitt folgt dem gekrümmten Gitter des MPI-OM Modells und zeigt Jahresmittelwerte,

Änderungen der Zirkulation und des Austausches mit dem Atlantik

Die zeitliche Variabilität des Austausches von Wassermassen zwischen Nordsee und Atlantik und mit der Ostsee wurde an ausgewählten Schnitten analysiert (Abb. 6). Die räumlichen Transportmuster (hier nicht gezeigt) sind ebenfalls mit den wenigen verfügbaren direkten Messungen vereinbar. In allen drei Zeitreihen aus dem Szenarienlauf sind deutliche zwischenjährliche Schwankungen zu erkennen, aber bis auf die Zeitreihe des Einstroms durch den Englischen Kanal sind keine langfristigen Trends erkennbar. Eine augenfällige Abnahme des Einstroms im Englischen Kanal tritt ab Ende des 20. Jahrhunderts auf, eine geringere aber kontinuierliche Abnahme folgt bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Beachtenswert sind außerdem die multidekadischen Schwankungen im Austausch mit der Ostsee, die eine Periode von ungefähr 30 Jahren haben und eng mit Schwankungen im Salzgehalt korrelieren (hier nicht gezeigt). Wie schon bei den langfristigen Änderungen von Temperatur und Salzgehalt aus dem Szenarienlauf (siehe Jahresbericht 2011) wurden die Änderungen in den Oberflächenströmungen aus Differenzen für zwei 30jährige Klimaperioden abgeleitet. In Abb. 7 sind diese Differenzen für die beiden Klimaperioden 1970-1999 und 2070-2099 dargestellt. Im Nordatlantik zeigen sich entlang der Schelfkante ausgeprägte zonale Muster mit Abnahme und Zunahme der Oberflächenzirkulation. Diese weisen auf Änderungen in der Lage der Stromzweige des Nordatlantikstroms hin (Abb. 7, links).

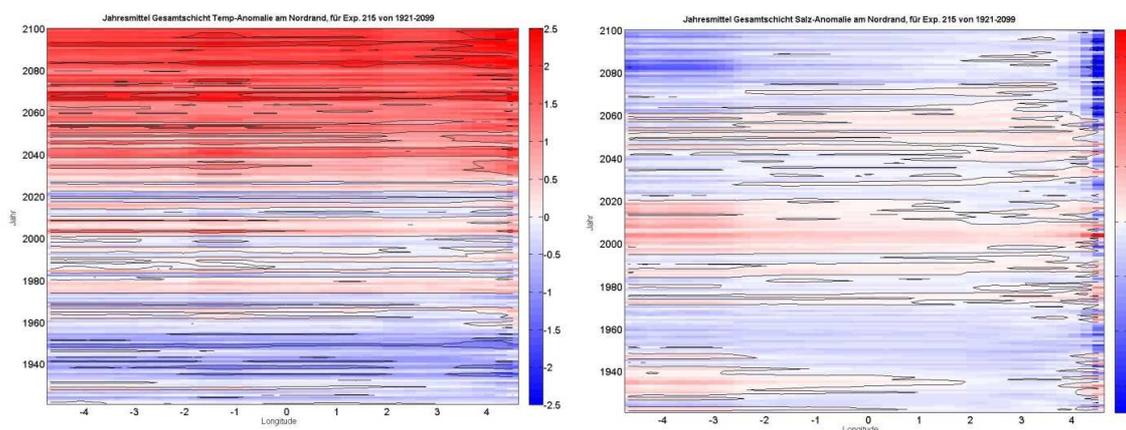
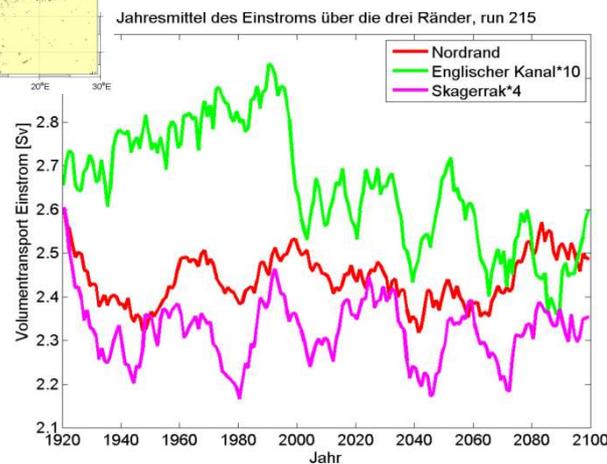


Abb. 5: Hovmoeller Diagramme für den Zeitraum 1921 – 2009 entlang nominell 60°N: Temperaturanomalien [°C] (links) und Salzgehaltsanomalien (rechts) als Mittel über die gesamte Wassersäule. Die Anomalien sind Abweichungen des Jahresmittels bezogen auf den Referenzzeitraum 1970-1999.

Direkt an der Schelfkante zeigt sich zwar eine Verstärkung der Zirkulation zum Ende des 21. Jahrhunderts (Abb. 7a), die aber auf den Einstrom in die Nordsee keine Auswirkungen hat, da die topographische Führung der Strömung im Wesentlichen dafür sorgt, dass die Strömungen entlang der Schelfkante verlaufen. Daher weist die Zeitreihe des Einstromtransports am Nordrand (Abb. 6, rote Kurve) keinen zeitlichen Trend auf. In der südlichen Nordsee hingegen wird großräumig eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten zum Ende des Jahrhunderts prognostiziert, die mit einer anomalen ostwärtigen Strömungskomponente einhergeht (Abb. 7, rechts).



Abb.6 links oben: Lage der ausgewählten Transportschnitte; unten rechts: Transportzeitreihen des Einstroms in die Nordsee [1 Sv = 10⁶ m³/s]. Die einzelnen Transportzeitreihen sind unterschiedlich skaliert, um gemeinsam abgebildet werden zu können. Die Skalierungsfaktoren sind der Legende zu entnehmen.



Der Import von Nährstoffen aus dem Atlantik in die Nordsee wird durch Änderungen der winterlichen Deckschichttiefen am Nordrand der Nordsee beeinflusst. Infolge der Klimaerwärmung nehmen die winterlichen Deckschichttiefen im nördlichen Atlantik dramatisch ab. Hier werden Änderungen in der Deckschichttiefe von 500 m prognostiziert (Abb. 8), infolge der abnehmenden winterlichen Konvektion. Dies hat Auswirkungen auf die vertikale Vermischung von Nährstoffen und führt in der Folge dazu, dass der Import von Nährstoffen in die Nordsee im einströmenden Atlantikwasser deutlich abnimmt (Gröger und Mikolajewicz, 2011; Gröger, persönliche Mitteilung 2012) und sich die Primärproduktion in der Nordsee abschwächt.

Änderungen des Meeresspiegels

Analysen der zu erwartenden Änderungen im Meeresspiegel für die gesamte Nordsee wurden schon im vorherigen Jahresbericht aufgezeigt. Dabei zeigte sich, dass die Erhöhung des Meeresspiegel aus sterischen und dynamischen Gründen mit ~ 26 cm in 100 Jahren moderat ist und im Gebiet der Nordsee räumlich ziemlich homogen auffällt. In Abb. 9 ist der zeitliche Verlauf des Meeresspiegelanstiegs im Mittel über die gesamte Nordsee dargestellt. Der natürlichen Variabilität im 20. Jahrhundert überlagert sich ab etwa 2020 ein starker Anstieg von ca. 4mm/Jahr. Diese Änderungsrate beruht nur auf sterischen und dynamischen Effekten, eventuellen Massenänderungen (z.B. durch Abschmelzen arktischer und antarktischer Eismassen) wäre auf diesen prognostizierten Anstieg noch zu addieren.

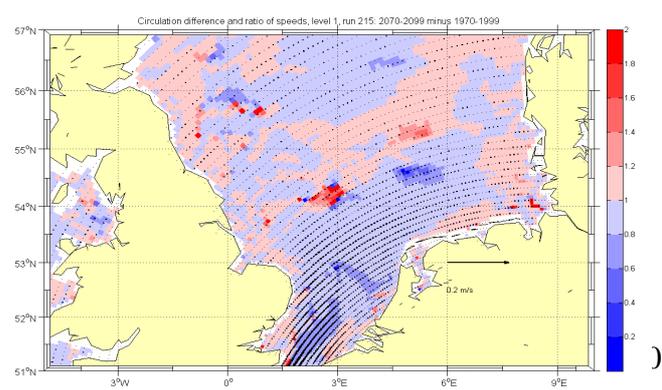
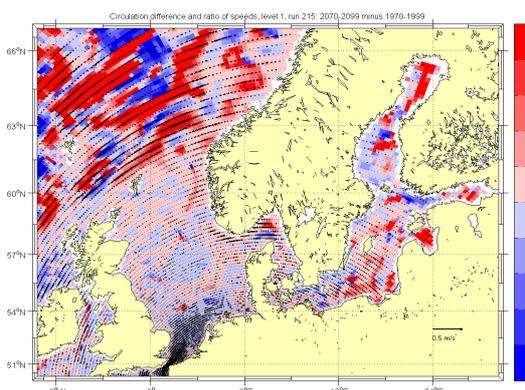


Abb. 7: links: Strömungsdifferenz zwischen den Mittelungsperioden (1970 – 1999) und (2070 – 2099); rechts: Strömungsdifferenz mit Fokus auf die südliche Nordsee.

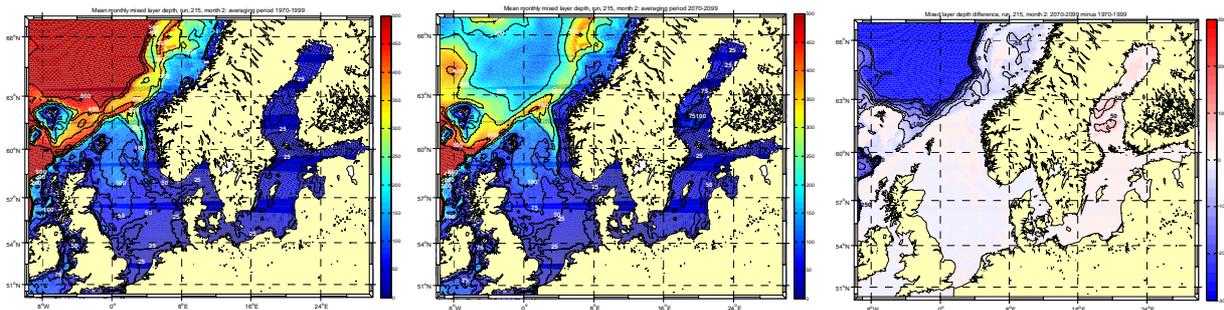


Abb.8: Änderungen der Deckschichttiefe links: 1970 – 1999; Mitte: 2070 – 2099; rechts: Differenz

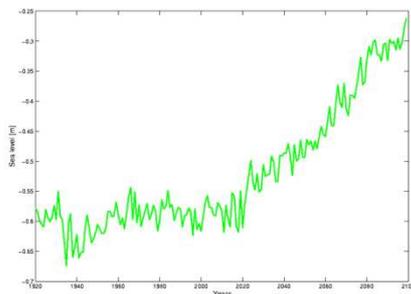


Abb. 9: Zeitreihe des Meeresspiegels im MPIOM Szenarienlauf, gemittelt über die gesamte Nordsee.

Literatur

- Gröger, M. and U. Mikolajewicz (2011): Note on the CO₂ air–sea gas exchange at high temperatures. *Ocean Modelling*, 39, 284–290.
- Hjøllø, S. S., M. D. Skogen and E. Svendsen (2009): Exploring currents and heat within the North Sea using a numerical model, *Journal of Marine Systems*, 78, 180–192, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.06.001.
- Holland, M.M., and C.M. Blitz (2003): Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dyn.*, 21, 221-232.
- Janssen F., C. Schrum and J.O. Backhaus (1999): A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *German Journal of Hydrography*, Supplement 9, 245pp.
- Landerer, F. W., J. H. Jungclaus and J. Marotzke (2007): Regional Dynamic and Steric Sea Level Change in Response to the IPCC-A1B Scenario, *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 296-312, doi: 10.1175/JPO3013.1.
- Löwe, P., S. Schmolke, G. Becker, U. Brockmann, S. Dick, A. Frohse, J. Hermann, B. Klein, H. Klein, H. Nies, St. Schmolke, D. Schrader, A. Schulz, N. Theobald und S. Weigelt (2006): Nordseezustand 2004. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, Nr. 40, 217pp.
- Mikolajewicz, U., B. D. Santer, and E. Maier-Reimer (1990): Ocean response to green house warming. *Nature*, 345, 589-593.

Zu Teilprojekt 4.3:

Die Arbeiten in diesem Teilprojekt werden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Meereskunde in Hamburg durchgeführt und basieren auf den Modellergebnissen des regionalen Schelfmodells HAMSOM. Die Entwicklung der numerischen Methoden zum Modellnesting wurde durch das Institut für Meereskunde bearbeitet, so dass neben den Läufen mit klimatologischer Randbedingung auch Läufe mit Randbedingungen basierend auf GECCO-Reanalysen zur Verfügung standen. Alle Läufe werden mit atmosphärischen Daten aus NCEP/NCAR angetrieben. Ein wichtiger Schwerpunkt der Analysen lag auf der Identifizierung von Bereichen und Prozessen, die sensitiv auf klimatologische Schwankungen reagieren, auf der Analyse der Trends der letzten 50 Jahre und der Ermittlung von Indices die Änderungen im Atlantik an die Nordsee koppeln. Weiterhin wurde durch vergleichende Analysen mit Ergebnissen aus dem MPI-OM Modell an Fragen zum Einfluss von Auflösung und Kopplung auf die Prozessbeschreibung in der Nordsee gearbeitet. Hier lag der Schwerpunkt der Analysen auf der NAO induzierter Variabilität.

Modellvalidation:

Simulationen des hochauflösenden Schelfmodells HAMSOM (~3 km Gitterweite) wurden in den Läufen mit klimatologischer Randbedingung aus dem Levitus Datensatz (Lauf 1) und mit Randbedingung aus der GECCO Reanalyse (LAUF 109) durchgeführt. Viele Details der Modellvalidation wurden bereits im Jahresbericht 2011 aufgelistet. Der Vergleich der Zeitreihen der über die gesamte Nordsee gemittelten Oberflächentemperatur aus den beiden Modellläufen mit unabhängigen Beobachtungsdaten (Abb. 10a) zeigt eine gute Übereinstimmung in zeitlicher Variabilität und Amplitude. Es ist allerdings zu vermerken, dass der Lauf mit GECCO-Klimatologie am nördlichen Rand (Lauf 109) prinzipiell niedrigere Temperaturen produziert als der Lauf mit der Levitus Klimatologie (Lauf 1) und die Übereinstimmung mit den Beobachtungen vor allem in den frühen Jahren (1970-1980) weniger gut ist. Der saisonale Verlauf der SST Entwicklung (Abb. 1b) wird ebenfalls in beiden Läufen gut getroffen. Die Tendenz des Laufs mit Levitus Randbedingung (Lauf 1) die sommerliche Erwärmung zu überschätzen wird in dem Lauf mit GECCO Randbedingung deutlich reduziert. Die Ergebnisse für fünf weitere MARNET Stationen in der deutschen AWZ (hier nicht abgebildet) zeigen ähnliches Verhalten.

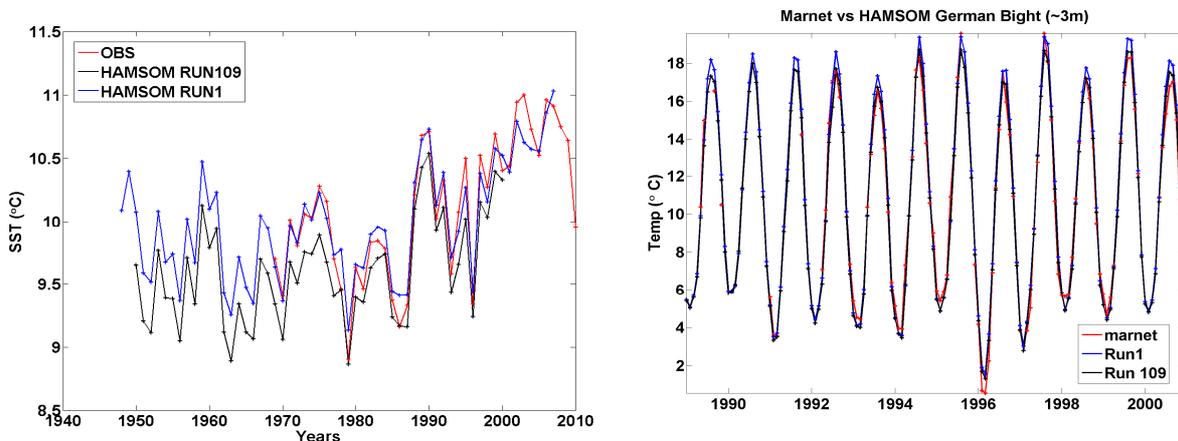


Abb. 10: a) Vergleich der modellierten und beobachteten Oberflächentemperaturen in der Nordsee. Die seit 1969 verfügbaren Beobachtungsdaten stammen aus den wöchentlichen Temperaturkarten für die Nordsee aus dem Datensatz des BSH, basieren auf der Verschmelzung von Satellitenbeobachtungen und in-situ Schiffsdaten. HAMSOM Lauf 1 wurde mit klimatologischer Randbedingung (Levitus) durchgeführt, HAMSOM Lauf 109 mit Randbedingung aus GECCO. b) Vergleich der HAMSOM SST mit Daten der MARNET Station (deutschen Bucht).

Eine weitere Validation wurde anhand von Vertikalschnitten der Temperatur und des Salzgehalts durchgeführt. Wie im Jahresbericht 2011 aufgeführt wurde, ist die Übereinstimmung der Modelldaten mit den klimatologischen Verhältnissen basierend auf der Janssen Klimatologie (Janssen et al., 1999) im Wesentlichen sehr gut. Allerdings sind im tiefen Norwegischen Graben die Temperaturen zu hoch und Salzgehalte im Vergleich zur Klimatologie zu niedrig. Hier hat auch der Übergang von der Levitus Klimatologie zur GECCO Randbedingung kaum Verbesserung gebracht. Als integrales Maß für die Modelldarstellung der hydrographischen Verhältnisse wurden klimatologische TS Diagramme untersucht. Beim Übergang zur GECCO Randbedingung (siehe Abb. 4 im Jahresbericht 2011) zeigen sich glattere TS Verteilungen. Im Sommer (August) sind die Oberflächentemperaturen etwas niedriger und entsprechen damit eher der Klimatologie. Die TS Diagramme für den Winter (Februar) zeigen für den GECCO Lauf einen deutlicheren Gradienten von kaltem, salzarmem Oberflächenwasser zu warmem, salzreichem atlantischem Wasser am Boden, allerdings wird der Gradient deutlich überschätzt. Die Darstellung der Meeresspiegelvariabilität im Modell wurde gegen Daten des PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level; Woodworth und Player, 2003) getestet. Die Pegeldata wurden mit dem Modell von Peltier et al. (2004) um die glazialen Ausgleichsbewegungen korrigiert und sind in im Jahresbericht 2011 (siehe dort Abb. 7) zusammen mit SSH Daten aus dem Satellitenaltimetrieprodukt von AVISO für die Position von Cuxhaven gezeigt. Die Modelldaten aus dem Lauf mit GECCO Randbedingung geben die saisonalen und zwischenjährlichen Variationen der Meeresspiegelvariabilität befriedigend wieder, unterschätzen aber die Amplitude der Meeresspiegelvariabilität konsistent. Dies gilt auch für andere Pegelstandorte in der Nordsee (hier nicht gezeigt).

Dekadische Trends und Zusammenhang mit atmosphärischer Variabilität (NAO):

In zahlreichen Beobachtungen ist belegt, dass die Nordsee sich in den 90er Jahren stark erwärmt hat (Belkin, 2009; Hughes et al., 2011, Meyer et al., 2011) und dass dieser Effekt besonders stark in den Wintermonaten ausgeprägt ist. Dieser Trend ist auch in den Modelldaten gut wiedergegeben, da er zu großen Teilen aus Änderungen im atmosphärischen Antrieb resultiert. Bei Nutzung einer klimatologischen Randbedingung am nördlichen Rand und im englischen Kanal (siehe Jahresbericht 2011) werden aber die ebenfalls beobachteten Änderung im einströmenden Atlantischen Wasser nicht wiedergeben und im Vergleich zum Lauf mit den GECCO Randbedingung sind die Erwärmungsraten in den Dekaden 1981-1990 und 1991-2000 geringer. In beiden Läufen ist die Dekade der 90ziger Jahre, die mit den größten Erwärmungsraten, aber nur im Lauf mit GECCO Randbedingung (Lauf 109, nicht abgebildet) sind starke Erwärmungssignale mit dem Einstrom atlantischen Wassers durch den englischen Kanal verbunden, die in den beiden Dekaden auch so in Beobachtungen wiederzufinden sind. Die Variabilität der winterlichen SST Verteilung wird im Wesentlichen von der NAO beeinflusst und zeigt starke positive Korrelationen vor allem in den südlichen Teilen der Nordsee. In Phasen mit starken NAO+ zeigt sich entlang von 58°N die Ausbreitung von warmem Wasser im Norwegischen Graben östlich von 6°E, resultierend aus der verstärkten Zonalzirkulation in der Atmosphäre. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen betraf Variationen des Meeresspiegels in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden. Insbesondere wurden die Auswirkungen der globalen Erwärmung und des damit verbundenen Anstiegs des Meeresspiegels, sowie von dekadischen atmosphärischen Schwankungen (NAO) auf Änderungen des Wasserstandes der Nordsee untersucht. Für die winterliche Variabilität des Meeresspiegels sind atmosphärische Fluktuationen, parametrisiert durch den NAO Index, von überragender Bedeutung. In den Analysen von Wakelin et al. (2003) und Woodworth et al., (2007), mit barotropen Wasserstandsvorhersagemodellen, hatten sich über weite Bereiche der Nordsee hohe positive Korrelationen zwischen winterlichen (DJF) monatlichen Wasserständen und dem NAO Index abgezeichnet. Diese Korrelation wurde auch an den Wasserständen der Modellläufe gefunden (siehe Abb. 5, Jahresbericht 2011). Beide Läufe zeigten vergleichbare Muster in der Korrelation zum NAO mit maximalen positiven Korrelationen in der Deutschen Bucht.

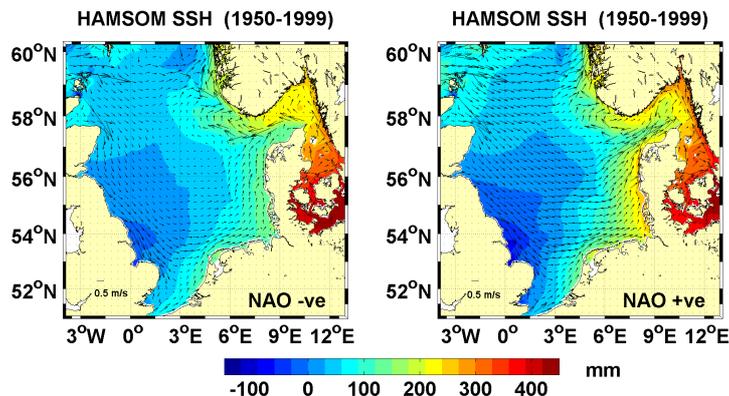


Abb. 11: (links) Mittlere Meeresspiegelhöhe und Oberflächenzirkulation für Phasen mit negativem NAO Index, (rechts) für Phasen mit positivem NAO Index.

Generell sind die Korrelationen in dem Lauf mit Levitus Klimatologie höher als in dem Lauf mit GECCO Randbedingung. Im Lauf mit GECCO Randbedingung finden sich neben den positiven Korrelationen in der Deutschen Bucht aber verstärkte negative Korrelationen an der englischen Küste bzw. im Bereich des Norwegischen Grabens. Barotrope Wasserstandsvorhersagemodelle, wie in den Analysen von Wakelin et al. (2003) und Woodworth et al., (2007), hatten in Übereinstimmung mit dem 2D Experiment mit HAMSOM eine durchgehend positive Korrelation zwischen SSH und Winter NAO Index ergeben. Der Einfluss von Schichtung und baroklinem Geschwindigkeitsfeld macht sich hier deutlich. Meeresspiegelfelder und Oberflächenzirkulation in der Nordsee aus Modelllauf 109 sind in Abb. 11 für Phasen positiven und negativen NAO Indexes gemittelt dargestellt. Als Response auf die verstärkten Westwinde in der Atmosphäre in einer NAO+ Phase (Abb. 11, rechts) verstärkt sich im Modell der Einstrom aus dem Atlantik in die nördliche Nordsee, wie auch generell die zyklonale Zirkulation in der Nordsee in dieser Phase. Im Bereich der deutschen Bucht und entlang der dänischen Küste führt der Windstau zu erhöhten Wasserständen.

Literatur

Bennett, A.F. and P.C. Macintosh (1992): Open ocean modeling as an inverse problem: Tidal theory, JPO 12, 1004-1018.

- Bennett A. F. (1992): *Inverse Methods in Physical Oceanography*, Cambridge Univ. Press, 346 pp.
- Belkin, I. M. (2009): Rapid warming of Large Marine Ecosystems, *Progress in Oceanography* 81, 207–213, doi: 10.1016/j.pocean.2009.04.011.
- Doescher, R., C.W. Boening, and P. Herrmann (1994): Response of circulation and heat transport in the North Atlantic to changes in thermohaline forcing in northern latitudes: A model study, *JPO* 24, 2306-2320.
- Hughes, S. L., N. P. Holliday and A. Beszczynska-Möller (Eds.) (2011): *ICES Report on Ocean Climate 2010*, ICES Cooperative Research Report, No. 309, 69pp.
- Janssen, F., C. Schrum und J. O. Backhaus (1999): A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *German Journal of Hydrography*, Suppl. 9, 245pp, DOI: 10.1007/BF02933676.
- Klink, J.M. (1995): Thermohaline structure of an eddy-resolving North Atlantic Model: the influence of boundary conditions, *JPO* 25 1174-1195.
- 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.
- Meyer, E., T. Pohlmann, R. Weisse (2011): Thermodynamic variability and change in the North Sea (1948-2007) derived from a multi decadal hindcast, *Journal of Marine Systems* 86, 35-44.
- Orlanski, I., (1976): A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, *Journal of Computational Physics*, 21, 251-269.
- Peltier W.R (2004): Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE, *Ann. Rev. Earth. Planet.Sci.* 32,111-149.
- Pohlmann, T. (2006): A meso-scale model of the central and southern North Sea: consequences of an improved resolution, *Continental Shelf Research* 26, 2367 – 2385.
- Schrum, C. und J. O. Backhaus (1999): Sensitivity of atmosphere-ocean heat exchange and heat content in the North Sea and the Baltic Sea, *Tellus. Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, Vol. 51, no. 4, 526-549.
- Wakelin, S. L., P. L. Woodworth, R. A. Flather, and J. A. Williams (2003): Sea-level dependence on the NAO over the NW European Continental Shelf, *Geophys. Res. Lett.*, 30(7), 1403, DOI: 10.1029/2003GL017041.
- Woodworth, P. L. and R. Player (2003): The permanent service for Mean Sea Level: an update to the 21st century, *Journal of Coastal Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 287-295.
- Zhang und Marotzke (1999): The importance of open-boundary estimation for an Indian Ocean GCM-data synthesis, *Journal of Marine Research* 57 (2): 305-334.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung.

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 Erfahrungen

2.1 Dies ist ein Projekt der Grundlagenforschung, daher waren keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu erwarten und haben sich auch nicht unerwartet eröffnet. Die neu erworbenen Zeitserien werden eine neue wichtige Referenz für die Validierung numerischer Modellsimulationen und ihrer Reaktion auf atmosphärische Schwankungen darstellen.

3.1 Es handelt sich hier um ein Projekt der Grundlagenforschung, daher waren keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu erwarten. Anpassungsstrategien an das sich ändernde Klima stehen im Mittelpunkt des BMVBS finanzierten KLIWAS Programms. Ziel von KLIWAS ist daher auch die Zusammenstellung geeigneter regionaler Klimaanalysen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus TP3.1 haben die Möglichkeiten eines solchen Modellsetups in der Brücke zwischen grobauflösenden globalen Modellstudien und reinen Schelfmodellen demonstriert. Sie haben gezeigt, dass sich hiermit grundsätzlich wichtige Erkenntnisse gewinnen lassen, die langfristig in die Anpassungsstrategie einfließen werden.

4.3 Es handelt sich hier um ein Projekt der Grundlagenforschung, daher waren keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten zu erwarten. Für regionale Klimamodelle ist die Entwicklung einer optimalen Kopplung ein wichtiger Schritt für die zukünftige Nutzung von Klimastudien. Die in dem Teilprojekt validierten Modellanalysen werden daher als notwendige Referenz für die Modellstudien mit bi-direktionaler Kopplung auch in Zukunft verwertbar sein. Zurzeit

ist noch nicht absehbar inwieweit sich die Erkenntnisse aus diesem Projekt direkt in die Weiterentwicklung des operationellen BSH Modells einfließen werden. Ungeachtet dessen, haben die wissenschaftlichen Erkenntnisse dieses Projekts für die öffentlichen Aufgaben im Bereich der Klimamodellierung grundsätzlich wichtige Erkenntnisse gebracht, und werden in die langfristig in die Anpassungsstrategie einfließen.

II.5 Fortschritte bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes erfolgte die gegenseitige Information über Fortschritte der einzelnen TP auf den jährlich abgehaltenen Statusseminaren, und bei regelmäßigen Treffen der beiden Kooperationspartner. 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 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

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.

Rhein, M., D. Kieke, S. Hüttl-Kabus, A. Rößler, C. Mertens, R. Meissner, **B. Klein**, C. W. Böning and I. Yashayaev (2011): Deep-water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. *Deep-Sea Res. II*, doi: 10.1016/j.dsr2.2010.10.061.

Narayan, N., X. Chen, **B. Klein**, T. Pohlmann and **H. Klein**: The influence of NAO on sea level and thermodynamics of the North Sea: results from HAMSOM simulations, in prep.