

BMBF-Verbundvorhaben „RACE – Beobachtungen, Simulation und Synthese (multi-) dekadischer Schwankungen der Atlantikzirkulation“

Abschlussbericht der Teilprojekte am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

TP 1.1 Die Rolle des tropischen Atlantiks für Klimaschwankungen im atlantischen Raum (Antragsteller: P. Brant, M. Dengler, J. Fischer)

TP 1.4 Mechanismen für Zirkulationsschwankungen im Nordatlantik in gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen (Antragsteller: M. Latif)

TP 2.2 Die veränderliche Ozeanzirkulation am Westrand des subpolaren Nordatlantiks (Antragsteller: J. Fischer, M. Visbeck, J. Karstensen)

TP 3.1 Veränderungen der atlantischen Zirkulationssysteme in hochauflösenden Ozeanmodellen: Ursachen und regionale Auswirkungen (Antragsteller: C. Böning, A. Biastoch)

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

TP 1.1 Hauptziel des Vorhabens war ein besseres Verständnis der Rolle des tropischen Atlantischen Ozeans für Klimaschwankungen im atlantischen Raum. Es sollten Zirkulationsschwankungen im tropischen Atlantik, deren Zusammenhang mit ozeanischer Variabilität im Nord- und Südatlantik und deren Auswirkungen auf das Klima im atlantischen Raum untersucht werden. Kern dieses Teilprojekts waren ein Verankerungsarray sowie schiffsgestützte Messungen bei 11°S sowie 5°S vor Brasilien, um das westliche Randstromsystem, speziell den Nordbrasilunterstrom (NBUC), zu vermessen und die Variabilität des Systems auf intrasaisonalen bis dekadischen Zeitskalen zu untersuchen.

TP 1.4 Ziel der Untersuchungen des Teilprojektes war das bessere Prozessverständnis der dekadischen Schwankungen der meridionalen Umwälzbewegung im Atlantik (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC). Mit zahlreichen Experimenten sollten mit dem Kiel Climate Model (KCM), einem gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Meereis Modell (AOGCM), folgende Aspekte untersucht werden. Erstens, der Anteil an dekadischer und multi-dekadischer Variabilität, der im Nordatlantik selbst erzeugt wird. Zweitens, die Bedeutung von Wind, Temperatur und Salzgehalt für die AMOC Schwankungen. Drittens, die Identifizierung möglicher Vorgänge im Atlantik, die außerhalb des Nordatlantiks stattfinden, die für die Variabilität der AMOC besonders relevant sind. Viertens, die Einschätzung der Bedeutung von gekoppelten Rückkopplungen im Bereich des Nordatlantiks für die Variabilität. Fünftens, die Abschätzung des Einflusses anderer Meere auf die AMOC. Und sechstens, die Analyse der Resultate zur AMOC Variabilität in Hinblick auf Zirkulationsänderungen als Folge der globalen Erwärmung.

TP 2.2 Das übergeordnete Ziel dieses Teilprojekts war bereits im Dachpapier formuliert; darin geht es darum, *Änderungen der zukünftigen Atlantikzirkulation (10 – 100 Jahre) als Teil des globalen Wandels hochaufgelöst regional zu simulieren* sowie ein Beobachtungs- und Diagnosesystem zu definieren und zu betreiben. Eine Komponente ist das 53°N-Observatorium am Ausgang der Labradorsee, das der Quantifizierung von zwischenjährlichen bis dekadischen Randstrom-Fluktuationen durch nachhaltige Messungen der Strömungen, der Beobachtung von T/S Eigenschaften im tiefen Labradorstrom; und von

Tiefenwassertransportschwankungen als Teil der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) dient.

TP 3.1 In diesem Teilprojekt wurden Ursachen, raum-zeitliche Strukturen und Schwankungen der großräumigen Zirkulation im Atlantik untersucht, die entscheidend sind für die Interpretation und Einordnung der Beobachtungssysteme im Atlantik. Im Fokus der Arbeiten stand dabei die Entwicklung eines Modellsystems, das wichtige Ozean-Atmosphärenfeedbacks darstellen kann und gleichzeitig realitätsnah bleibt. Vorherige Ergebnisse in der Interpretation beobachteter Zirkulationsschwankungen durch das vorhandene Modellsystem führte zu einer Ausweitung der Modellregion auf den Südatlantik um das komplexe System der atlantischen Zirkulationen vollständig zu beschreiben. Die Arbeiten zu Atmosphärenbeschreibung und hochaufgelöster Ozeanmodellierung zusammen bieten eine solide Grundlage in Hinblick auf geplante hochaufgelöste Zukunftsprojektionen.

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

TP 1.1 Feldarbeiten: Das Feldprogramm umfasst ein System von Verankerungen im westlichen tropischen Atlantik (bei 11°S), sowie schiffsgestützte Messungen entlang von 11°S und 5°S. In Erweiterung früherer Arbeiten am GEOMAR im Rahmen des CLIVAR/marine Programms, welche im gleichen Gebiet zwischen 2000 und 2004 durchgeführt wurden, ermöglichte dies auch längerfristige Schwankungen des Randstromsystems zu untersuchen.

Modellierung: Am GEOMAR wird das im Südatlantik hochaufgelöste Ozeanmodell INALT01 betrieben. Die Schwankungen des NBUC auf zwischenjährlichen Zeitskalen, die aus den bisherigen Beobachtungen bestimmt wurden, konnten mit den zwischenjährlichen Schwankungen des NBUC in diesem Modell verglichen werden.

Das Forschungsprojekt ist ein Bestandteil des internationalen SAMOC Programms, bei dem die Schwankungen der AMOC im Südatlantik untersucht und deren Auswirkungen auf das Klima abgeschätzt werden sollen.

TP 1.4 Seit vielen Jahren wird am GEOMAR das KCM erfolgreich betrieben und für Fragen der Ozean- und Klimavariabilität eingesetzt. Die Arbeitsgruppe, die die Projektarbeiten durchführte, besitzt langjährige Erfahrungen in der Durchführung und wissenschaftlichen Analyse von Simulationen mit AOGCMs, im speziellen mit dem KCM. Alle beteiligten Wissenschaftler beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Klimavariabilität auf zwischenjährlichen bis multi-dekadischen Zeitskalen mit Schwerpunkt auf der Rolle des Ozeans. Für die Projektarbeiten bestand ein direkter Zugriff auf die Modelldaten des „Climate Model Intercomparison Project“ Phase 5 (CMIP5) Projektes.

TP 2.2 Am GEOMAR existiert eine langfristige Expertise von Feldarbeiten mit Verankerungen und Schiffsbeobachtungen im westlichen subpolaren Nordatlantik und insbesondere in der Labradorsee. Die Kombination wissenschaftlicher und technischer Vorarbeiten mit dem seit 1997 installierten Observatorium und seinem einzigartigen Gerätepool macht das GEOMAR zu einem wichtigen Partner des Gesamtprogramms. Wissenschaftlich ist die Fragestellung nach klimatisch relevanten Schwankungen der MOC zu Beginn des Projekts und auch nach dessen Ablauf ein zentrales Thema der Klima- und Ozeanforschung. Insbesondere die Ozeanbeobachtung in Verbindung mit realitätsnaher hochaufgelöster Ozeanmodellierung innerhalb RACE sind wichtiger Bestandteil für den Erfolg des Programms.

TP 3.1 Das Forschungsprojekt betraf ein zentrales Thema internationaler Forschung im Atlantischen Ozean. Die auf dem NEMO-Code-System basierenden Modellentwicklungsarbeiten waren eng verzahnt mit entsprechenden Entwicklungen auf europäischer Ebene,

insbesondere im Rahmen der DRAKKAR-Kooperation (Barnier et al., 2014¹); die Konzeption der Modellexperimente folgte weitgehend den im CLIVAR Ocean Model Development Panel (OMDP) entwickelten Vorstellungen für ein international koordiniertes Ozeanmodellierungsprogramm (Co-ordinated Ocean-Ice Reference Experiments, CORE) (Griffies et al., 2009²). Mitarbeiter des Projekts waren eng sowohl in die DRAKKAR- als auch CORE-Diskussionen und Konzeptentwicklungen eingebunden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

TP 1.1 Feldarbeiten: Forschungsfahrten (Tabelle 1) und Verankerungsauslegung konnten wie geplant durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Analyse der gewonnenen Daten sowie der historischen Daten, bzw. bereits zu Beginn des Projekts vorliegenden Verankerungsdaten gingen in einige Publikationen ein.

Tab. 1: Forschungsfahrten.

TP	Forschungsfahrt	Schiff	Zeitraum	Ort
1.1	M 98 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	Juli 2013	Tropischer Südatlantik
1.1	M 106 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	April/Mai 2014	Tropischer Atlantik
1.1	M 119 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	September/Oktober 2015	Tropischer Atlantik
2.2	MSM 12/1 (FL: Prof. Quadfasel, ZMAW)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2009	Labradorsee
2.2	M 82/1 (FL: Prof. Quadfasel, ZMAW)	Meteor	Juli/ Aug. 2010	Labradorsee
2.2	M 85/2 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Meteor	Aug. 2011	Labradorsee
2.2	MSM 21/1 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2012	Labradorsee
2.2	MSM 40 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Thalassa	August 2014	Labradorsee
2.2	MSM 54 (FL: J. Karstensen, GEOMAR)	Maria S. Merian	Mai/Juni 2016 in Vorbereitung	Labradorsee

TP 1.4 Die im Projektantrag formulierten Fragestellungen wurden erfolgreich bearbeitet. Der wesentliche Arbeitsschwerpunkt konzentrierte sich auf die Durchführung und Auswertung von Simulationen mit einem AOGCM. Hierfür wurden mit der aktuellsten KCM-Version verschiedene Experimente durchgeführt. Im Verlauf der Arbeiten erschien es sinnvoll, die Experimente an die bis dahin gewonnenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen anzupassen.

¹ Barnier, B., Blaker, A. T., Biastoch, A., Böning, C. W., Coward, A., Deshayes, J., Ducez, A., Hirschi, J., Le Sommer, J., Madec, G., Maze, G., Molines, J.-M., New, A., Penduff, T., Scheinert, M., Talandier, C., Treguier, A.-M. (2014) DRAKKAR: developing high resolution ocean components for European Earth system models. CLIVAR Exchanges, 65: 18-21.

² Griffies, S. M., Yin, J., Durack, P. J., Goddard, P., Bates, S. C., Behrens, E., ... Zhang, X. (2014) An assessment of global and regional sea level for years 1993-2007 in a suite of interannual core-II simulations. Ocean Modelling, 78: 35–89. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.03.004

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des KCM mit denen aus dem CMIP5 Projekt verglichen.

TP 2.2 Das Vorhaben konnte wie geplant durchgeführt werden. Beobachtungsprogramme (siehe Schiffseinsätze Tabelle 1), Datenaufbereitung und Speicherung sind abgeschlossen. Wissenschaftliche Analysen machen weiterhin gute Fortschritte auch über das Projektende hinaus. Insbesondere das Beobachtungsprogramm mit der Datenerhebung durch verankerte Instrumente war sehr erfolgreich, und es liegt ein einzigartiger Datensatz der Randstromintensität vor Labrador vor. Dieser Datensatz enthält Messungen über alle Stockwerke des Nordatlantischen Tiefenwassers. Analysen von längerfristigen Exportschwankungen wie auch dezidierte Vergleiche mit Modellen des Verbundes sind somit möglich. Transportzeitserien in Wassermassen-Klassen wurden berechnet und stehen, auch für externe Nutzer, als Vergleichsdatensätze zur Verfügung.

TP 3.1 Die Modellierungsarbeiten erfolgten wie geplant auf Basis verschiedener Versionen des globalen Ozeanmodells ORCA mit Gitterauflösungen von $1/2^\circ$, $1/4^\circ$ und $1/12^\circ$ sowie hochauflösenden ($1/10^\circ$ - $1/20^\circ$) Regionalkonfigurationen im Agulhasregime (AG01) und im subpolaren Nordatlantik (VIKING20). Die regionalen Konfigurationen waren mit Hilfe eines 2-Wege Nestings in globale Modelle größerer Auflösung ($1/2^\circ$ bzw. $1/4^\circ$) eingebettet. Während nicht-wirbelauflösende Simulationen auf dem lokalen Vektorrechner (NEC SX-ACE) der Universität Kiel realisiert werden konnten, wurden die aufwändigen, höher aufgelösten Experimente auf den Höchstleistungs-Rechnersystemen des HLRS (Hochleistungsrechenzentrum, Stuttgart), DKRZ (Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg) und HLRN (Hochleistungsrechnern, Hannover, Berlin) durchgeführt.

I.4 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere: 1) Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden, 2) Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

TP 1.1 Obwohl in den letzten Jahren ein erheblicher Wissensgewinn über die tropische atlantische Klimavariabilität zu verzeichnen ist, sind viele Fragen weiterhin ungeklärt. Modellstudien zeigen, dass der NBUC besonders sensitiv auf Schwankungen der AMOC und der Subtropischen Zelle (STC) reagiert. Bisher lagen jedoch keine Beobachtungen mit direkten Strömungsmessungen vor, die eine Bestimmung der längerfristigen Schwankungen des NBUC ermöglicht hätten. Die Daten des Verankerungsarrays können nun genutzt werden, um die Signalausbreitung von Schwankungen innerhalb der AMOC, die in den Tiefenwasserbildungsgebieten des subpolaren Nordatlantik oder der Agulhasregion aufgeprägt werden, zu untersuchen. Außerdem kann der Zusammenhang von NBUC Schwankungen und Transportschwankungen des Äquatorialen Unterstroms bei 23°W sowie deren Auswirkungen auf die klimarelevanten Oberflächentemperaturen im äquatorialen Ostatlantik analysiert werden.

TP 1.4 Zu Beginn des Projektes zeigten verschiedene Studien, dass Klimamodelle dekadische Schwankungen der nordatlantischen Meeresoberflächentemperatur (SST), die unter dem Namen Atlantic Multidecadal Oscillation/Variability (AMO/V) bekannt sind, und der AMOC simulieren (Delworth and Mann 2000³). Dabei unterscheiden sich die Mechanismen erheblich, was davon zeugte, dass die Mechanismen der AMOC Variabilität nicht sehr gut verstanden waren. So gab es keine einheitliche Beziehung zwischen dem Nordatlantischen Oszillation (NAO) Index und der AMOC Stärke in den Modellen. Eine Vielzahl von Mechanismen für die dekadische Variabilität werden in der Literatur vorgeschlagen (Latif

³ Delworth, T. L., Mann, M. E. (2000) Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 16: 661-676. DOI: 10.1007/s003820000075

1998⁴, Visbeck 2007⁵, Latif and Keenlyside 2011⁶, Liu 2011⁷). Spielen die Tropen vielleicht doch eine größere Rolle, als man bisher angenommen hat wie von Vellinga und Wu (2004)⁸ vorgeschlagen? Ebenso offen war die Diskussion bezüglich der relativen Bedeutung von Windschub, Temperatur und Salzgehalt für die Variabilität.

TP 2.2 Während der Laufzeit des Programmes haben wir als wesentliche Ergänzung des Observatoriums bei 53°N den Tiefenhorizont des DSOW (Denmark Strait Overflow Water) mit zusätzlichen Instrumenten bestückt. Während wesentliche Teile des Randstroms barotrop (mit nur geringen vertikalen Scherungen) sind, ist der DSOW Kern in der Labradorsee ein stark baroklines Signal. In Modellen mit niedriger Auflösung wird diese Struktur nur ungenügend reproduziert. Dieser Datensatz ist somit wertvoll bei der Evaluierung hochauflösender Modelle, die diesen tiefen Strömungskern hinsichtlich Struktur und Zeitskalen beschreiben. Hinzu kommt die internationale Zusammenarbeit mit Kanadischen Kollegen und deren Erweiterung des Arrays auf den Schelf. Im Gegenzug wurde das Array durch zusätzliche Instrumente nahe der Oberfläche erweitert und damit hinsichtlich der Einbindung in das internationale OSNAP Programm optimiert.

TP 3.1 Die Detektion gradueller anthropogener Trends in der MOC, wie von Klimasimulationen für den 3. und 4. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) für das 21. Jahrhundert prognostiziert, stellt für Beobachtungssysteme eine große Herausforderung dar. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Überlagerung langfristiger MOC-Signale durch ein breites Spektrum höherfrequenter Fluktuationen infolge lokaler Windanregung oder interner Ozeandynamik dar; dieses Rauschen bildet ein wesentliches Charakteristikum mehrjähriger Transportzeitreihen, sowohl des tiefen westlichen Randstroms (DWBC) als auch für die beckenintegrierte MOC aus dem RAPID-array bei 26°N. Einblicke in die Ursachen, Größenordnungen und Mechanismen von MOC-Schwankungen auf Zeitskalen von Dekaden und länger stammen daher im Wesentlichen aus Modellstudien

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

TP 1.1 Enge Zusammenarbeit innerhalb des Verbundvorhabens besteht mit dem Teilprojekt zur hochauflösende Modellierung der atlantischen Zirkulationssysteme (TP 3.1 Böning und Biastoch). Die gewonnenen Zeitreihen der westlichen Randstromzirkulation sind wesentliche Grundlage der Validierung von Ozean- und gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen. Modelle erlauben auf der anderen Seite eine Einordnung der Signale in großräumige und langfristige Ozean- und Atmosphärenvariabilität. Außerhalb des Verbundes besteht eine enge Zusammenarbeit mit mehreren Projekten, die sich mit der Ausbreitung von Signalen besonders entlang des Äquators bis zum östlichen Rand beschäftigen (SFB754, PIRATA, EU PREFACE, BMBF SACUS). Die unternommenen Forschungsreisen wurden gemeinsam mit BMBF SACUS (2013) oder dem SFB754 (2014, 2015) durchgeführt. BMBF SACUS ist Teil des SPACES Programms, innerhalb dessen insbesondere die Zirkulation und Änderungen von Wassermasseneigenschaften im Südostatlantik und in der Agulhasregion untersucht werden. Änderungen im Austausch zwischen indischem und atlantischen Ozean können auch Signale am westlichen Rand bei 11°S hervorrufen.

⁴ Latif, M. (1998) Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models. *Journal of Climate*, 11: 602-624. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<0602:DOIIVIC>2.0.CO;2

⁵ Visbeck, M. (2007) Power of pull. *Nature*, 447: 383. DOI 10.1038/447383a

⁶ Latif, M., Keenlyside, N. S. (2011) A Perspective on Decadal Climate Variability and Predictability. *Deep Sea Research*, 58:1880-1894. DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.10.066.

⁷ Liu, Z. (2012) Dynamics of Interdecadal Climate Variability: A Historical Perspective. *Journal of Climate*, 25: 1963-1995. DOI: 10.1175/2011JCLI3980.1

⁸ Vellinga, M., Wu, P. (2004) Low-latitude freshwater influences on centennial variability of the Atlantic thermohaline circulation. *Journal of Climate*, 17: 4498–4511. DOI: 10.1175/3219.1

Eine enge internationale Zusammenarbeit besteht mit der Universität in Recife, Brasilien (Moacyr Araujo, Doris Veleda), die regelmäßig an den Forschungsfahrten teilnimmt, weitere Datensätze zur Verfügung stellt und an der Analyse der gewonnenen Daten mitarbeitet. Weitere Kooperationspartner sind:

NOAA/AOML/PHOD, Miami; USA (Christopher Meinen, Renellys Perez) – Verankerungsprogramm und (S)AMOC Bestimmung im Südatlantik;

RSMAS, Miami; USA (B. Johns) - Verankerungsprogramm zur Untersuchung des Äquatorialen Unterstroms im östlichen Atlantik;

PIRATA Konsortium (B. Bourles, IRD; R. Lumpkin, NOAA/AOML, M. Araujo, UFPE) – gemeinsame Instrumentierung der Verankerungen und Auswertung von Schiffsschnitten.

TP 1.4 Zusätzlich zu der projektinternen Kooperation bestand eine Zusammenarbeit zu den Datenarchiven des CMIP. Die Projektarbeiten entstanden in enger Kooperation mit den Projektpartnern des EU Projekts NACLIM.

TP 2.2 Wesentliche Komponenten des Verbundes sind nachhaltige Beobachtungen, die repräsentativ sind für die längerfristige klimarelevante Variabilität im Ozean. Diese Projekte, Arbeitspakete AP 1.2 (Zirkulations- und Wassermassenänderung im subpolaren Nordatlantik) und AP 1.3 (Rolle der Overflows bei der Variabilität des Wärmetransports über den Grönland-Schottland Rücken), sind sowohl inhaltlich/wissenschaftlich als auch logistisch verzahnt. Datensynthesen und hochauflösende Modellierung (TP 3.1 Böning und Biastoch) sind Abnehmer der Messungen zur Modellvalidierung, werden aber auch intensiv genutzt für die Einordnung der Beobachtungen in die großräumige Zirkulation und deren längerfristige Schwankungen (diese Arbeiten sind aktuell und werden fortgesetzt).

Außerhalb des RACE-Verbundes existieren Kooperationen mit aktuellen EU-Programmen (NACLIM und AtlantOS); besonders NACLIM ist ein Abnehmer der Ergebnisse aus den hier durchgeführten Beobachtungen der Randstromintensität und Transporte in der Labradorsee. Durch die thematische Einbindung hat das hier beantragte Vorhaben eine enge Beziehung zum internationalen CLIVAR Programm. Mit dem MOC-Beobachtungsprogramm bei 26°N (RAPID; Zusammenarbeit mit G. McCarthy, NOCS und Bill Johns, RSMAS Miami) und den US-Aktivitäten südlich der Grand Banks (Line W, J. Toole, WHOI) und des sogenannten Move-Arrays bei 16°N (U. Send) sowie der RACE Komponente A1.1 gibt es zeitgleich Meßkampagnen in verschiedenen Randstrom-Regionen des Nordatlantik, die auf Untersuchungen von mehrjährigen Schwankungen der MOC und ihrer Komponenten zielen. Dabei geht es neben den regionalen Unterschieden auch um komplementäre Ansätze, Randstrom-Quantifizierung im Vergleich zu beckenweiten (teuren) Beobachtungssystemen.

TP 3.1 Kooperationen 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). Die Weiterentwicklung des atmosphärischen Antriebskonzepts (atmosphärisches Grenzschichtmodell) erfolgte in Zusammenarbeit mit Kollegen der Florida State University (FSU), Tallahassee, FL, USA (B. Deremble, W. Dewar); die Einbindung dieser Entwicklung in NEMO erfolgte in Zusammenarbeit mit LGGE/MEOM Grenoble (B. Barnier, J.-M. Molines).

II. Eingehende Darstellung

II.1 der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

TP 1.1 Die Rolle des tropischen Atlantiks für Klimaschwankungen im atlantischen Raum

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten innerhalb des TP 1.1 ist die Bestimmung von längerfristigen Transportschwankungen des NBUC sowie des DWBC. Hier konnten erste Erkenntnisse durch den Vergleich der neuen Beobachtungen mit Daten aus den Jahren 2000-2004 gewonnen werden.

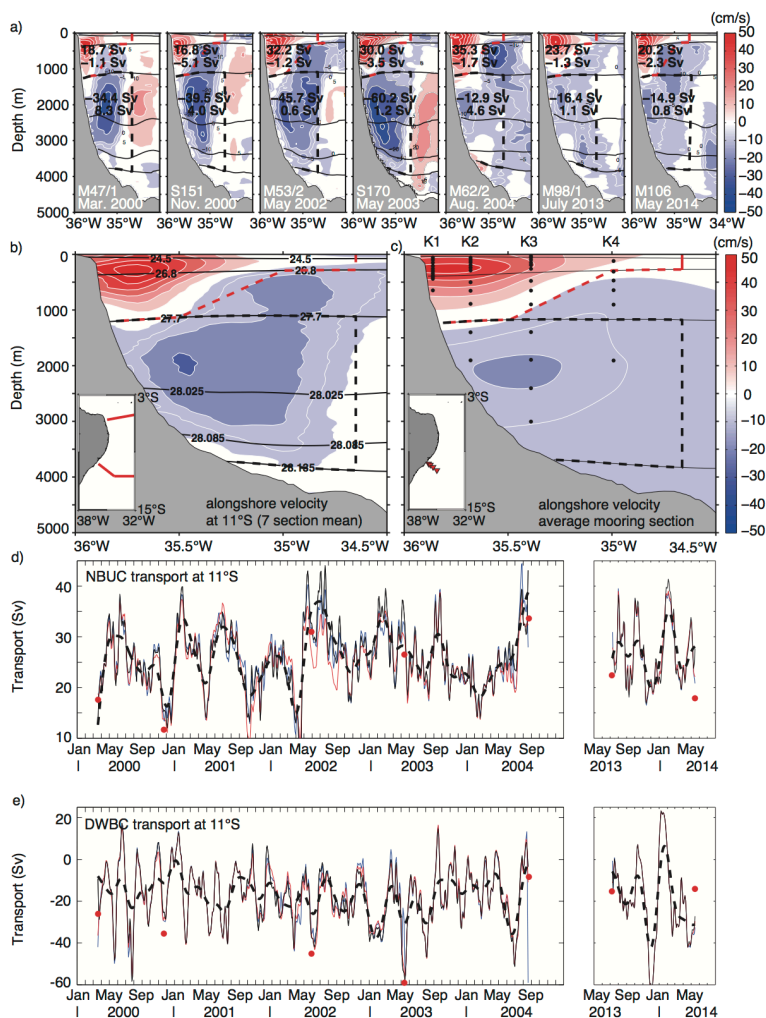


Abb. 1: a) Einzelne Schiffsschnitte der küstenparallelen Geschwindigkeit. Die Transporte wurden in den markierten Boxen berechnet. b) Mittlerer Schnitt der küstenparallelen Geschwindigkeit aus den 7 Schiffsschnitten aus a). c) Mittlerer Schnitt der Geschwindigkeit entlang der Küste aus den Verankerungsdaten. Rote/schwarze gestrichelte Linien in a), b) und c) markieren die Boxen für NBUC/DWBC Transportberechnungen. Die geographischen Karten in b) und c) zeigen die Orientierung und Lage der Schnitte und Verankerungen. d) Transportzeitserien des NBUC und e) DWBC aus den Verankerungsdaten (schwarze Linie) zusammen mit der 90 Tage tiefpass-gefilterten Zeitserie (schwarze gestrichelte Linie). Für die schwarzen Linien wurden die Datenlücken mit EOFs aus den Schiffsdaten gefüllt, für die blauen Linien wurden Datenlücken mit EOFs aus den Verankerungsdaten selbst gefüllt, während für die roten Linien die Daten mit der MSSA Methode gefüllt wurden. Die roten Punkte in d) und e) sind die Transporte, die aus den Schiffsschnitten berechnet wurden (aus Hummels et al. 2015⁸).

Die Transporte des NBUC und des DWBC aus den Schiffsschnitte aus dem neuen Beobachtungszeitraum 2013/2014 sind eher gering im Vergleich zu den Transporten für den Zeitraum 2000 und 2004 (Abb. 1a). Die Analyse der ersten Verankerungsperiode zeigt jedoch, dass die intrasaisonale Variabilität, insbesondere die tiefen Wirbel im Bereich des DWBC noch immer existieren und ähnliche Eigenschaften haben wie im vorherigen Verankerungszeitraum. Außerdem wird aus den Verankerungsdaten klar, dass die Schiffsbeobachtungen zu Zeitpunkten schwacher Wirbelaktivität durchgeführt wurden. Die Variabilität auf längeren Zeitskalen ist sowohl für den NBUC als auch für den DWBC geringer und lässt bisher keine signifikanten Veränderungen beim Vergleich der beiden Beobachtungszeiträume erkennen (Hummels et al. 2015⁹). Tatsächlich passen die zwischenjährlichen Schwankungen des NBUC Transports aus den Beobachtungen sehr gut zu den zwischenjährlichen NBUC Schwankungen, die aus einem numerischen Ozeanmodell (INALT01) bestimmt wurden.

Die Analyse der hydrographischen Daten zeigte eine signifikante Zunahme im Salzgehalt für den Bereich des Zentralwassers (100-600m). Im Bereich des Nordatlantischen Tiefenwassers (NADW, ca. 1500-4000m) konnte eine Abnahme im Salzgehalt festgestellt werden. Die Salzgehaltszunahme im Bereich des Zentralwassers spricht für eine Zunahme des Eintrags von Wassermassen aus dem Indik, wie sie auch in früheren Studien vermutet wurde (e.g. Biastoch et al. 2009¹⁰). Die Salzgehaltsabnahme im Bereich des mittleren und tiefen NADW scheint mit Änderungen im subpolaren Nordatlantik einherzugehen.

In einer weiteren Studie wurden die Ausbreitungspfade sowie die räumlichen und zeitlichen Änderungen der Wassermasseneigenschaften im Bereich des NADW und des Antarktischen Bodenwassers (AABW) im nördlichen Brasilbecken untersucht. Dafür wurden direkte Strömungsbeobachtungen sowie hydrographische Daten entlang von zwei zonalen (5°S und 11°S) und zwei meridionalen (35°W und 23°W) Schnitten im westlichen tropischen Atlantik analysiert. NADW kann im tropischen Atlantik in drei 3 Dichteklassen aufgeteilt werden, auch wenn diese 3 Bestandteile des NADW (oberes=uNADW, mittleres=mNADW und unteres=INADW) nicht mehr die Eigenschaften der originalen Wassermassen aus dem subpolaren Nordatlantik aufweisen. Während ein Teil des NADW sich mit dem DWBC nach Süden ausbreitet, gibt es einen zweiten Ausbreitungspfad nach Osten parallel zum Äquator. Auch das AABW lässt sich in eine leichtere und eine schwerere Komponente unterteilen, wobei das leichtere AABW sich hauptsächlich entlang des westlichen Randes nach Norden und sogar bis in den Nordatlantik ausbreiten kann. Die schwerere Variante bewegt sich dagegen weiter im Beckeninneren nach Norden und schlägt bei etwa 5°S einen ostwärtigen Pfad entlang des Äquators ein. Im DWBC kommt es zwischen dem nach Süden strömenden INADW und dem nach Norden fließenden, leichteren AABW aufgrund der starken Geschwindigkeitsscherung vermehrt zur Vermischung, weshalb sich die Wassermasseneigenschaften beider Wassermassen angleichen.

Da der analysierte Datensatz 25 Jahre umfasst (1990-2014), war es auch möglich längerfristige Trends in der Temperatur des Bodenwassers zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass das schwere AABW im gesamten westlichen tropischen Atlantik eine Erwärmung von etwa 2.5-3 m°C/Jahr aufweist (siehe Abb. 2). Dieser Wert stimmt gut mit früheren Studien

⁹ Hummels, R., Brandt, P., Dengler, M., Fischer, J., Araujo, M., Veleda, D., Durgadoo, J. V. (2015) Interannual to decadal changes in the western boundary circulation in the Atlantic at 11°S. *Geophysical Research Letters*, 42: 7615-7622. DOI: 10.1002/2015GL065254

¹⁰ Biastoch, A., Boening, C. W., Schwarzkopf, F. U., Lutjeharms, J. R. E. (2015) Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, 462 (7272): 495-U188. DOI: 10.1038/nature08519

überein und konnte mit einer Abnahme des Volumens des schweren AABW assoziiert werden (Herrford et al. 2016¹¹).

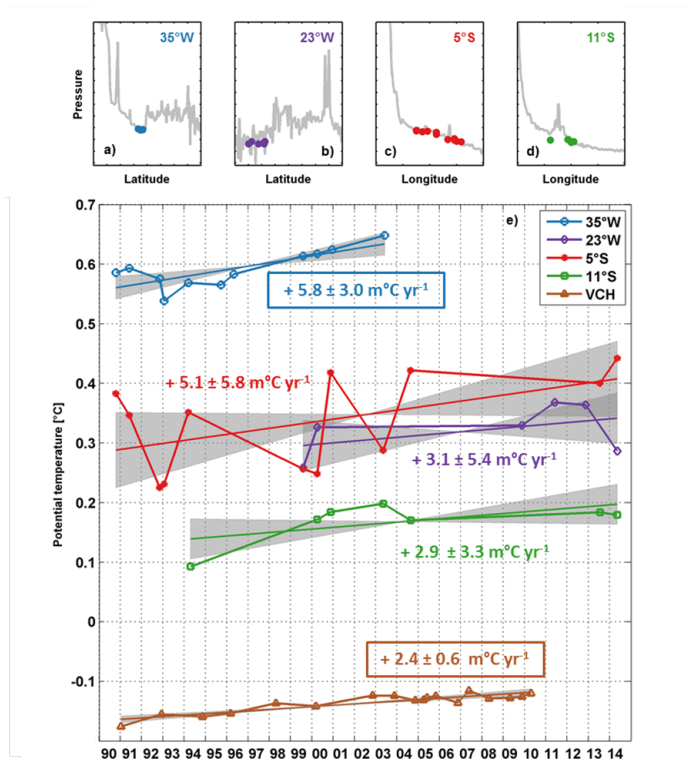


Abb. 2: Zeitserien der potentiellen Temperatur θ [°C] des kältesten AABW, welches auf den Schnitten bei 35°W, 23°W, 5°S, 11°S sowie im Vema Kanal (VCH) gefunden wurde. Lineare Trends sind als farbige Linien eingezeichnet, die entsprechenden farbigen Zahlen entsprechen den Steigungen (Trends) in $\text{m}^\circ\text{C yr}^{-1}$. Zusätzlich sind die 95% Konfidenz-intervalle der Trends angegeben (der Standardfehler der Steigung ist mit 1.96 multipliziert), die auch durch graue Schattierungen dargestellt sind. Die Boxen markieren diejenigen Trends, die sich mit 95% Konfidenz von Null unterscheiden. In a-d ist die Lage der kältesten Temperaturen eingezeichnet zusammen mit der Topographie, die von ETOPO1 abgeleitet wurden.

Das System des westlichen Randstroms ist über die Subtropische Zelle mit dem zentralen und östlichen äquatorialen Atlantik gekoppelt. Deshalb ist es möglich, dass sich Schwankungen am westlichen Rand im Bereich des NBUC (obere 1000m) auf die Variabilität im zentralen und östlichen Atlantik und damit auf die dortigen, klimarelevanten Oberflächentemperaturen auswirken. Um die Kohärenz von Signalen innerhalb der STC zu untersuchen, sollen möglichst lange Zeitserien des NBUC sowie des Äquatorialen Unterstroms (EUC) bei 23°W gemeinsam analysiert werden. In Brandt et al. (2014)¹² wurden verschiedene Methoden angewandt, um das Geschwindigkeitsfeld des EUCs zwischen 1.2°N/S aus den Beobachtungen dreier Verankerungen bei 0°45'S, 0°N und 0°45'N zwischen Juni 2006 und Juni 2011 zu rekonstruieren.

¹¹ Herrford, J., Brandt, P., Zenk, W. (2016) The Pathways and Property Changes of Deep and Bottom Waters in the Western Tropical Atlantic. Deep Sea Research, submitted.

¹² Brandt P., Funk, A., Tantet, A., Johns, W., Fischer, J. (2014) The Equatorial Undercurrent in the central Atlantic and its relation to tropical Atlantic variability. Climate Dynamics, 43:2985-2997. DOI: 10.1007/s00382-014-2061-4

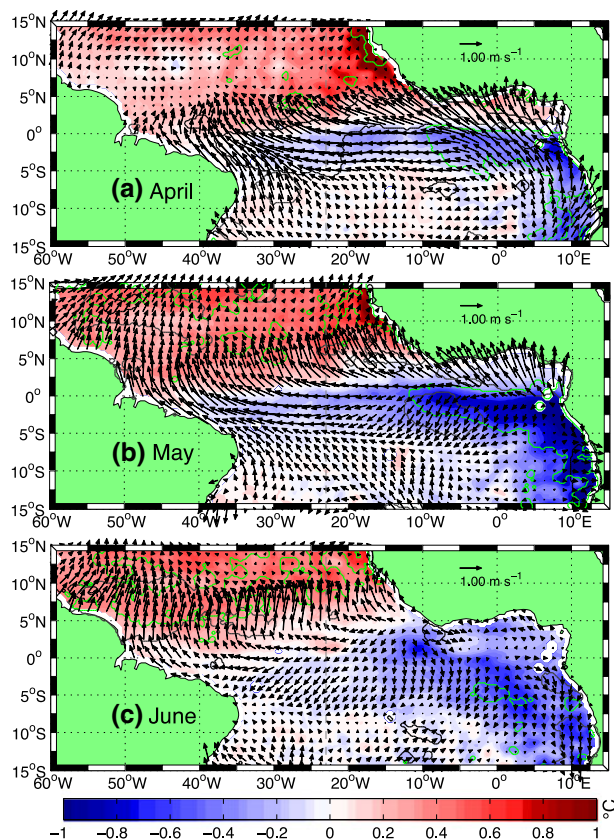


Abb. 3: a) Karten der Regression von SSTs (farbig) und Winden (Pfeile) auf den EUC Transport im Juni normiert mit seiner Standardabweichung. Regressionen wurden für Winde und SST in den verschiedenen Monaten (April-Juni) separat berechnet (a-c). Signifikante Korrelationen (95%) zwischen dem EUC Transport im Juni und SST sind durch grüne Linien markiert, zwischen dem EUC Transport im Juni und den Winden mit schwarzen Linien. Es gibt hier 6 Freiheitsgrade, die der Anzahl der Jahre für den die Daten für den EUC Transport vorliegen, entsprechen.

Die Rekonstruktion des gesamten Geschwindigkeitsfeldes erlaubt es verschiedene EUC Charakteristiken wie den EUC Transport, die Kerntiefe des EUC, die maximale Geschwindigkeit im EUC Kern sowie den Breitengrad des EUC Kerns und deren Variabilität auf verschiedenen Zeitskalen zu untersuchen.

Desweiteren können die Zeitserien dieser verschiedenen EUC Charakteristiken benutzt werden, um sie auf ihren Zusammenhang zur zwischenjährlichen tropischen Klimavariabilität zu untersuchen. Dafür wurden Regressionsanalysen durchgeführt, bei denen die Regression der SST und Winde im tropischen Atlantik auf den EUC Transport berechnet wurden. Die Hypothese ist, dass ein starker (schwacher) EUC während des Sommers mit einer anomal kalten (warmen) Kaltwasserzunge gekoppelt ist. Der starke (schwache) EUC wiederum steht mit starken (schwachen) Winden im westlichen äquatorialen Atlantik in Verbindung. Die Regression von monatlichen SSTs und Winden (April-Juni) auf den EUC Transport im Juni (Abb.3) zeigt, dass dies in sogenannten kanonischen Jahren tatsächlich der Fall ist. Allerdings gibt es auch sogenannte nicht-kanonische Jahre, in denen trotz anomal schwacher Winde und anomal schwachem EUC eine anomal starke Abkühlung in der Kaltwasserzunge festzustellen ist (Brandt et al. 2014¹¹).

Während der Forschungsfahrt M119 mit der FS Meteor im September/Oktober 2015 konnten alle Verankerungen des Strömungsmesserarrays im westlichen Randstromsystem erfolgreich geborgen werden. Die eingesetzten Instrumente arbeiteten im Allgemeinen sehr gut und es wurde eine sehr gute Datenausbeute von über 90% erzielt. Das heißt, dass die Transportzeitserien für den NBUC sowie den DWBC nun bis September/Oktober 2015 vorliegen. Außerdem konnten die Daten der beiden Bodendrucksensoren bei 300m und 500m erfolgreich ausgelesen werden. Für beide liegen jetzt also Daten von Juli 2013 -Oktober 2015 vor. Zusammen mit entsprechenden Daten der Bodendrucksensoren vor Angola sollen sie dazu genutzt werden innerhalb der nächsten Phase von RACE, den Transport im inneren des

Ozeans abzuschätzen. Dieser soll dann zusammen mit dem Ekmantransport und den Transporten der beiden Randstromsysteme im West- und Ostbecken genutzt werden, um eine AMOC-Abschätzung für 11°S zu erstellen.

TP 1.4 Mechanismen für Zirkulationsschwankungen im Nordatlantik in gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen

Die Untersuchungen der Mechanismen, die für die Zirkulationsschwankungen im Nordatlantik von Bedeutung sind, basieren auf umfangreichen Modellexperimenten mit dem KCM und auf Daten des CMIP5 Projektes. Von besonderem Interesse war die natürliche Klimavariabilität in verschiedenen Regionen und deren Bedeutung für die Prozesse im Nordatlantik. Einen weiteren Schwerpunkt bildeten Untersuchungen von unterschiedlichen KCM-Simulationen zur Relevanz von einzelnen Parametern und den damit verbundenen Prozessen für die Zirkulationsschwankungen im Nordatlantik. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Rolle der AMOC.

Bedeutung der internen Variabilität im Ozean

Die Ozeanzirkulation im Nordatlantik unterliegt einer natürlichen Variabilität auf den unterschiedlichsten Zeitskalen. Für die Validierung von numerischen Simulationen mit Beobachtungen und für die Entwicklung eines Vorhersagesystems ist das Verständnis über die natürliche Variabilität grundlegend. In Bordbar et al. (2015)¹³ haben wir mit dem KCM untersucht, inwieweit das Vorhersageergebnis bei einer möglichen Klimaänderung von den gewählten Anfangsbedingungen im Ozean und in der Atmosphäre abhängt. Untersucht wurden hierzu projizierte Trends im „dynamic sea level“ (DSL). Die Studie basiert auf zwei Ensembles von je 22 Simulationen mit einem jährlichen CO₂-Zuwachs von einem Prozent. Im ersten Ensemble wurde mit verschiedenen Zuständen aus einem Kontrolllauf gestartet, wobei sich sowohl die atmosphärischen als auch die ozeanischen Bedingungen unterschieden. In einem weiteren Ensemble wurde mit lediglich einem einzigen Zustand des Ozeans aus dem Kontrolllauf gestartet, und nur die atmosphärischen Zustände variierten. Abb. 4 zeigt die räumliche Verteilung des mittleren hundertjährigen Trends (Ensemblemittelwert) und die mittlere Abweichung zwischen den Rechnungen. Es wird der starke Einfluss der internen langfristigen Variabilität auf die Vorhersage deutlich. Darüber hinaus hat die Studie gezeigt, dass eine optimale Kenntnis über den Zustand des Ozeans einen maßgeblichen Einfluss auf die zukünftige Vorhersage der AMOC hat.

Einige Modellstudien deuten darauf hin, dass die Prozesse im Atlantik einer ausgeprägten Variabilität auf sehr langen Zeitskalen unterliegen, deren Ursache in den Austauschprozessen mit dem tiefen Ozean im südlichen Atlantiks vermutet wird (z.B. Park und Latif, 2012¹⁴; Martin et al. 2015¹⁵). Für eine Untersuchung zur Bedeutung dieses Zusammenhangs mit der AMOC haben wir in einer Versuchsreihe die thermische Kopplung an der Ozeanoberfläche im Südatlantik und für alle Regionen außerhalb des Atlantiks mit unterschiedlicher Intensität unterbunden. Die Auswertung der Modellergebnisse zeigt, dass durch die thermische Entkopplung von Atmosphäre und Ozean außerhalb des Nordatlantiks kaum Auswirkungen

¹³ Bordbar, M. H., Martin, T., Latif, M., Park, W. (2015) Effects of long-term variability on projections of twenty-first century dynamic sea level. *Nature Climate Change*, 5(4): 343-347. DOI: 10.1038/nclimate2569

¹⁴ Park, W., Latif, M. (2012) Atlantic Meridional Overturning Circulation response to idealized external forcing. *Climate Dynamics*, 39: 1709-1726. DOI: 10.1007/s00382-011-1212-0

¹⁵ Martin, T., Park, W., Latif, M. (2015) Southern Ocean Forcing of the North Atlantic at Multi-centennial Timescales in the Kiel Climate Model. *Deep-Sea Research II - Topical Studies In Oceanography*, 114: 39-48. DOI: 10.1016/j.dsr2.2014.01.018

auf die Eigenschaften der AMOC haben. Weder die mittlere Stärke der AMOC noch die Variabilität zeigen signifikante Veränderungen im Vergleich zum Kontrolllauf. Es kann daher vermutet werden, dass die Ursache für die geringe Sensitivität der AMOC in der überragenden Bedeutung der Prozesse im Nordatlantik liegen.

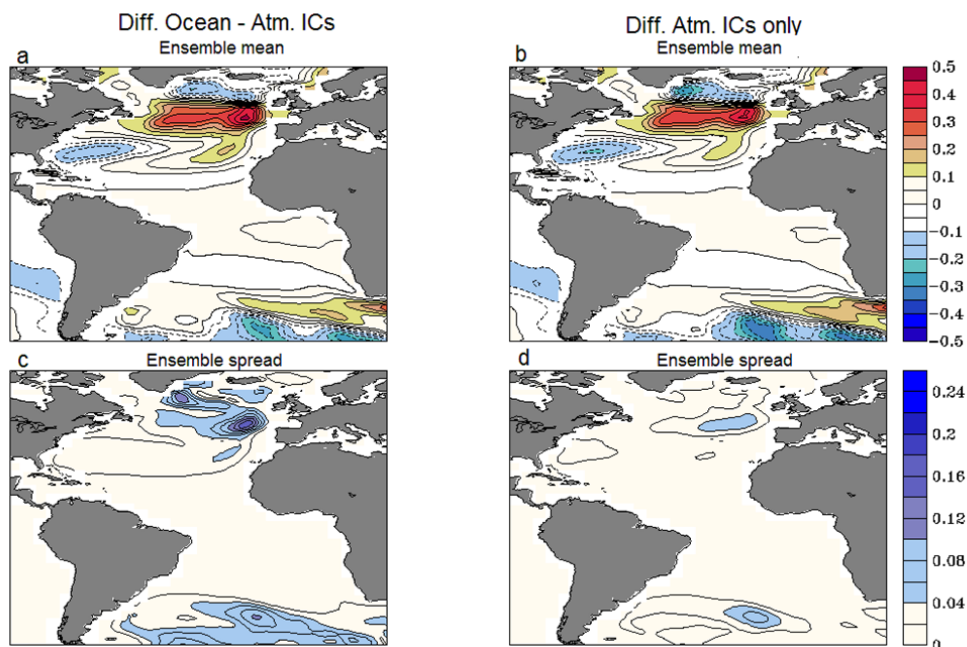


Abb 4: Der Einfluss der internen Variabilität auf den langfristigen Trend des dynamischen Meeresspiegels (DSL) in zwei Ensembles mit jeweils 22 Treibhaussimulationen; a) Mittlerer Trend (m/Jahrhundert), wenn sowohl die ozeanischen wie auch die atmosphärischen Anfangsbedingungen variieren; b) mittlerer Trend bei „bekanntem“ Ozeanzustand und Variation nur der atmosphärischen Anfangsbedingungen; c) Unsicherheit (Streuung) des Trends durch die interne Variabilität in Ozean und Atmosphäre; d) Unsicherheit des Trends bedingt durch die interne Variabilität in der Atmosphäre (Bordbar et al., 2015¹²).

Bedeutung der Prozesse im Nordatlantik für die multi-dekadische Variabilität der AMOC

Von besonderer Bedeutung für die Entwicklung der dekadischen Variabilität der AMOC sind die Wechselwirkungen zwischen dem Ozean und der Atmosphäre. Die AMOC-Variabilität ist dabei eng verbunden mit der NAO. Auf zwischenjährlichen Zeitskalen erzeugt die NAO Anomalien in der SST. Umgekehrt sind die Verhältnisse auf den dekadischen und multi-dekadischen Zeitskalen. Hierbei werden die SST-Schwankungen von der Ozeandynamik bestimmt (Gulev et al., 2013¹⁶). Nach der gängigen aus theoretischen Überlegungen abgeleiteten und durch Messungen der SST gestützten Theorie, treten die als AMO/V bezeichneten beckenweiten Temperaturanomalien nahezu zeitgleich mit Veränderungen der AMOC auf.

Unsere Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Variabilität der AMOC und der nordatlantischen SST zeigen, dass Klimamodelle sehr verschiedene Zusammenhänge

¹⁶ Gulev, S. K., Latif, M., Keenlyside, N. S., Park, W., Koltermann, K. P. (2013) North Atlantic Ocean Control on Surface Heat Flux at Multidecadal Timescales. *Nature*, 499: 464-467, DOI: 10.1038/nature12268

simulieren (Ba et al., 2014¹⁷), die man auf der Basis des heutigen Wissens über die AMOC in bestimmten Modellen als fehlerhaft beschreiben kann. So kann eine falsche Lage der Gebiete mit Tiefenkonvektion zu einer verfälschten Sensitivität gegenüber langperiodischen Schwankungen der NAO und der mit ihnen verbundenen turbulenten Wärmeflüsse an der Grenzfläche Ozean-Atmosphäre führen. Das kann möglicherweise die Ursache dafür ist, dass viele Modelle eine salzgehaltsgetriebene dekadische AMOC Variabilität simulieren, wie das auch im KCM der Fall ist (Ba et al., 2013¹⁸). Für das tiefere Verständnis der Antriebsprozesse für die AMOC ist es somit wichtig, sowohl das räumliche als auch zeitliche Muster der internen und externen Variabilitätsursachen genauer zu verstehen. Systematische Modellfehler müssen bei der Bewertung von Ursachen Berücksichtigung finden.

Einfluss der Variabilität des Windfeldes auf die Entwicklung der AMOC

Die NAO bestimmt großräumig die mittleren Windfelder über dem Nordatlantik und damit die Variabilität des Windstress an der Ozeanoberfläche. Die räumlichen Anomalien in der Zirkulation der oberen Ozeanschichten führen zu regionalen Schwankungen des Ekmantransports und zu einer lokal begrenzten Variabilität der Umwälzbewegung zwischen 30°N und 60°N (Tuchen, 2013¹⁹).

Bedeutung der turbulenten Wärmeflüsse auf die AMOC

Die mit der NAO verbundenen Schwankungen der Wärmeflüsse in den hohen Breiten führen in den oberen Schichten der Wassersäule zu einer Anomalie der Dichte und zu Veränderungen der Tiefenkonvektion im subpolaren Nordatlantik. Das führt im Zusammenspiel mit advektiven Prozessen u. a. zu einer Oszillation mit einer Periode von etwa 9 Jahren in der AMOC und in der NAO (Reintges, 2014²⁰). Interessanterweise kann man eine derartige Periode auch in Messungen der SST und des NAO Index identifizieren. Diese sub-dekadische Oszillation ist unabhängig von der AMO/V, die auf den längeren Zeitskalen dominant ist.

Bedeutung der räumlichen Temperatur- und Salzgehaltsverteilung auf die AMOC

Die Bedeutung der räumlichen Muster der Salz- und Temperaturverteilung auf die Entwicklung der AMOC wurde mit verschiedenen „restoring“ Experimenten untersucht. In einem „3D-restoring“ Experiment wurden im Atlantik nördlich von 10° N die 3-dimensionalen Felder für Salz und Temperatur mit einer Relaxationszeit von 180 Tagen auf die Klimatologie nach Levitus zurückgesetzt. Die Veränderungen der AMOC zeigen die Bedeutung des meridionalen Dichtegradienten im Atlantik. Die Rechnungen liefern eine mittlere AMOC von rund 19 Sv bei etwa 40° N. Es zeigt sich dabei, dass die mittlere Stärke der AMOC maßgeblich durch den über die Tiefe integrierten, meridionalen Dichtegradienten zwischen den hohen nördlichen Breiten und dem südlichen Atlantik bestimmt wird. Gleichzeitig verschwindet, bedingt durch die geringere Variabilität der Dichte im Ozean, die Variabilität der AMOC fast vollständig.

¹⁷ Ba, J., Keenlyside, N. S., Latif, M., Park, W., Ding, H., Lohmann, K., Mignot, J., Menary, M., Otterå, O.H., Wouters, B., Salas y Melia, D., Oka, A., Bellucci, A., Volodin, E. (2014) A multi-model comparison for Atlantic multidecadal variability. *Climate Dynamics*, 43: 2333-2348. DOI: 10.1007/s00382-014-2056-1

¹⁸ Ba, J., Keenlyside, N. S., Park, W., Latif, M., Hawkins, E., Ding, H. (2013) A mechanism for Atlantic multidecadal variability in the Kiel Climate Model. *Climate Dynamics*, 41(7-8): 2133-2144. DOI: 10.1007/s00382-012-1633-4

¹⁹ Tuchen, F. P. (2013) Einfluss des Windschubes auf die Atlantische Umwälzbewegung.

Bachelorarbeit, CAU Kiel.

²⁰ Reintges, A. (2014) The Response of the Atlantic Meridional Overtuning Circulation to heat flux forcing in the Kiel Climate Model. Master Thesis, CAU Kiel.

Bedeutung des Süßwassereintrags an der Ozeanoberfläche

In einem weiteren Experiment wurde lediglich der Salzgehalt an der Oberfläche (2D-surface-restoring) mit einer Relaxationszeit von 30 Tagen nördlich von 20° N an die Klimatologie von Levitus zurückgesetzt. Im Experiment führte dieses im Mittel nur zu einer geringen Verstärkung der AMOC. Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Experiment wird deutlich, dass die im Vergleich zum Kontroll-Experiment eine realistischere Salzgehaltsverteilung an der Oberfläche zu einer deutlich erhöhten Variabilität der AMOC führt.

Verbesserung der AMOC Darstellung in Klimamodellen

Die offensichtlichen Probleme in der Simulation des nordatlantischen Stromsystems in Klimamodellen und die bisherigen Untersuchungen zur Bedeutung einzelner Größen für die Entwicklung der AMOC haben wir in weiteren Modellexperimenten analysiert und deren Ursachen identifiziert (Park et al., 2016²¹). Vergleicht man das räumliche Muster des Süßwassereintrags im Nordatlantik aus einem langen Kontrolllauf des KCM mit dem Süßwassereintrag, der nötig wäre, um die Oberflächensalzverteilung der Levitus Klimatologie aufrecht zu erhalten, kommt man zu der in Abb. 5 gezeigten Verteilung.

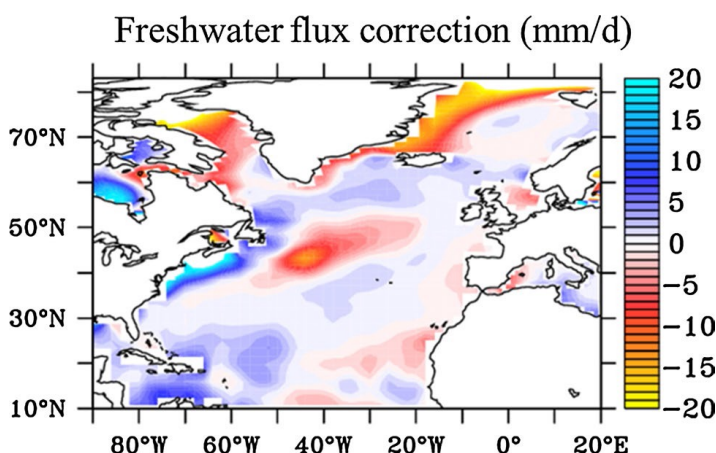


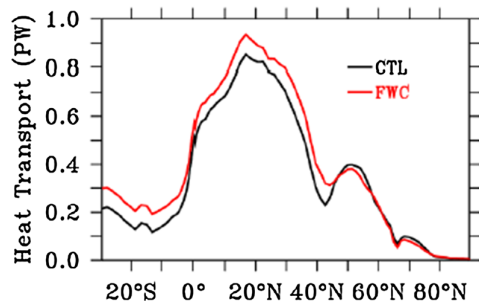
Abb. 5: Korrekturfeld des mittleren jährlichen Süßwassereintrags in mm/d. Das Feld basiert auf der Zeitserien einer KCM Simulation mit Oberflächensalzgehalt (SSS) „restoring“ auf Levitus Klimatologie (Park et al. 2016²⁰).

Korrigiert man den Süßwassereintrag an der Oberfläche im Bereich des Nordatlantiks mit diesem Feld, wobei die Korrektur additiv ist und (in einem linearen Sinne) die Dynamik nicht beeinflusst, so zeigt das Modell in einem weiteren Experiment eine erhebliche Verbesserung in der Simulation der AMOC (Abb. 6) und in der meridionalen Verteilung der Wärmetransporte (Abb. 7).

Besonders bedeutende Verbesserungen zeigen sich zudem in der sehr viel realistischeren Wechselwirkung zwischen den Prozessen im Ozean und in der Atmosphäre mit der AMOC (Abb. 8).

²¹ Park, T., Park, W., Latif, M. (2016) Correcting North Atlantic Sea Surface Salinity Biases in the Kiel Climate Model: Influences on Ocean Circulation and Atlantic Multidecadal Variability. *Climate Dynamics*, 1-18. DOI: 10.1007/s00382-016-2982-1

(a) Atlantic Meridional Heat Transport



(b) Atlantic Zonally Integrated Qnet

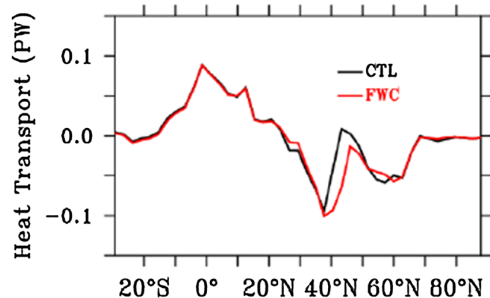


Abb. 6: Langjähriges Mittel der Stromfunktion in Sv. (a) Kontrolllauf (CTL); (b) mit Süßwasserkorrektur (FWC); (c) Differenz aus CTL und FWC; Konturlinien zeigen die Stärke der Stromfunktion aus CTL (Park et al. 2016²⁰).

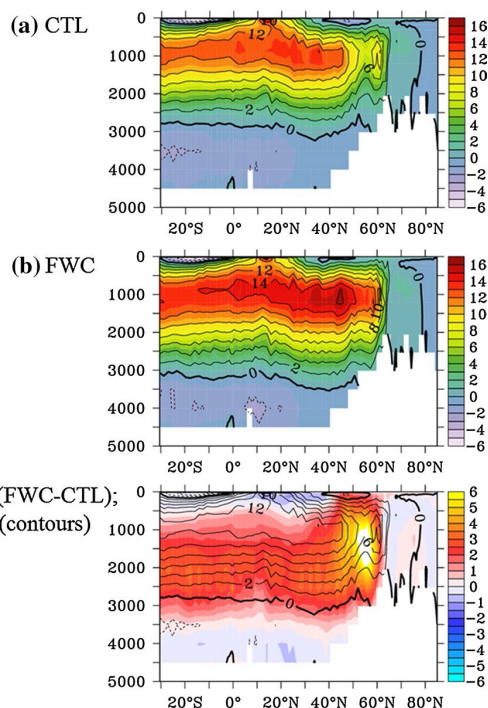


Abb. 7: (a) Der nordwärts gerichtete Wärmetransport in PW. (b) Der Nettowärmefluss an der Ozeanoberfläche. Jeweils für den Kontrolllauf (CTL, schwarz) und die Rechnung mit Süßwasserkorrektur (FWC, rot) (Park et al. 2016²⁰).

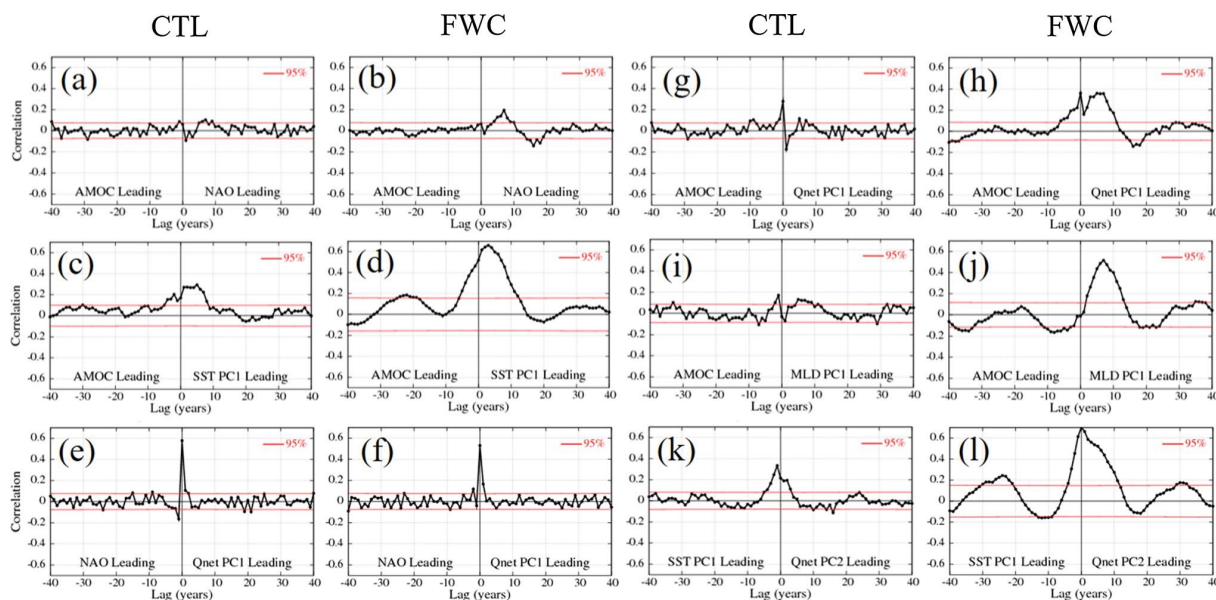


Abb. 8: Kreuzkorrelation als Funktion der Zeitverschiebung in Jahren für a, b) NAO Index und AMOC Index; c, d) AMOC Index und PC1 der SST; e, f) NAO Index und PC1 der Wärmeflüsse; g, h) AMOC Index und PC1 der Wärmeflüsse; i, j) AMOC Index und Tiefe der Deckschicht (Mixed Layer Depth, MLD); k, l) PC1 der SST und PC2 der Wärmeflüsse. Korrelationen im Kontrolllauf sind gezeigt in (a, c, e, g, i, k) und im Lauf mit Süßwasserkorrektur in (b, d, f, h, j, l), 95% Signifikanzniveau (rot). Der AMOC Index beschreibt das Maximum der Stromfunktion im Atlantik; PC1, bzw. PC2 sind die Zeitserien (principal components) aus einer EOF Analyse der jeweiligen Variablen im Nordatlantik (Details siehe Park et al., 2016²⁰).

TP 2.2 Die veränderliche Ozeanzirkulation am Westrand des subpolaren Nordatlantiks

Mit dem erfolgreichen Bergen und Wiederauslegen des 53°-Observatoriums liegen jetzt Datensätze des Strömungs- Temperatur- und Salzgehaltes bis Sommer 2014 vor und eine Übersichtsarbeit über den Gesamtzeitraum wird in Kürze eingereicht (Zantopp et al²²). Das Array wird in RACE II weitergeführt und befindet sich derzeit im Wasser. Eine Übersicht über die Stationen und die Länge der Zeitserien erkennt man in Abbildung 9.

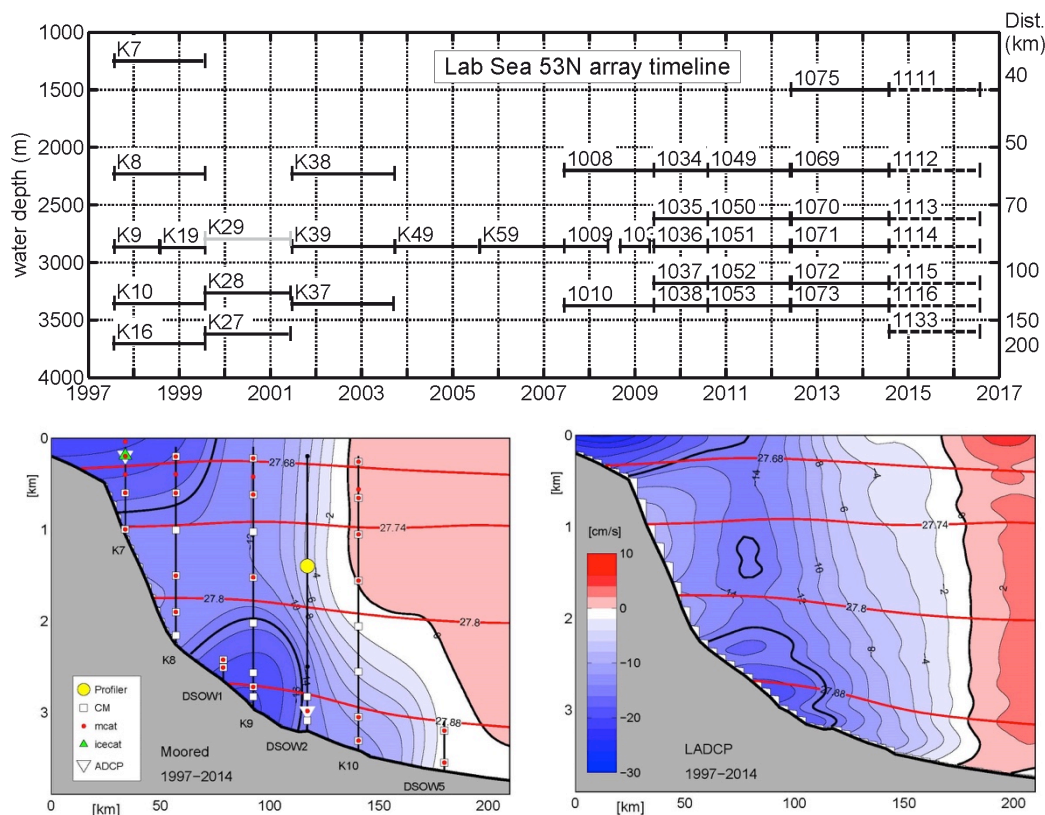


Abb. 9: Balkendiagramm der Stationen im 53°N Array vom Schelfrand (K7) bis in die tiefe Labradorsee (K16). Lage der jetzigen (2014) Verankerungen im Langzeitmittel der Verankerungsdaten (unten links) sowie mittlere Strömungen aus räumlich hoch aufgelösten Schiffsstationen mit Lowered Acoustic Doppler Current Profiler (LADCP).

Diese Daten sind die Basis für Langzeit-Analysen und Transportbestimmungen auf Zeitskalen von Tagen bis Dekaden (Ziele 1. Und 2. des Antrags)

Zeitreihen aus verankerten Arrays sind in der Regel nicht frei von Lücken, und so ist das auch hier (s. Abb. 9). Diese Lücken sind verschieden lang und stellen hohe Ansprüche an Verfahren mit denen die Lücken gefüllt werden. Hier wurde in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus dem RACE Verbund (AP 1.3) ein Verfahren angewendet mit dem Lücken variabler Länge gefüllt werden können, ohne die statistischen Eigenschaften signifikant zu ändern (dies geschieht iterativ mit Hilfe der SSA-Methode, Kondrashov, D., and M. Ghil, 2006²³). Als Endergebnis haben wir somit lückenlose Transportzeitserien (Abb. 10) für weitere Analysen und eine effektive Trennung von intrasaisonalen Noise (durch die

²² Zantopp, R., Fischer, J., Visbeck, M., Karstensen, J. (2016) 17-year long water mass transports by the DWBC at the Exit of the Labrador Sea. In Vorbereitung.

²³ Kondrashov, D., Ghil, M., (2006) Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes In Geophysics*, 13(2): 151-159. DOI: 10.5194/npg-13-151-2006

TRW's; Fischer et al., 2015²⁴) und langperiodischen Schwankungen. Ein markantes Ergebnis sind Jahresmittel der Transporte für die einzelnen Wassermassen und deren Definition, die dem Verbund und anderen Nutzern zur Verfügung stehen.

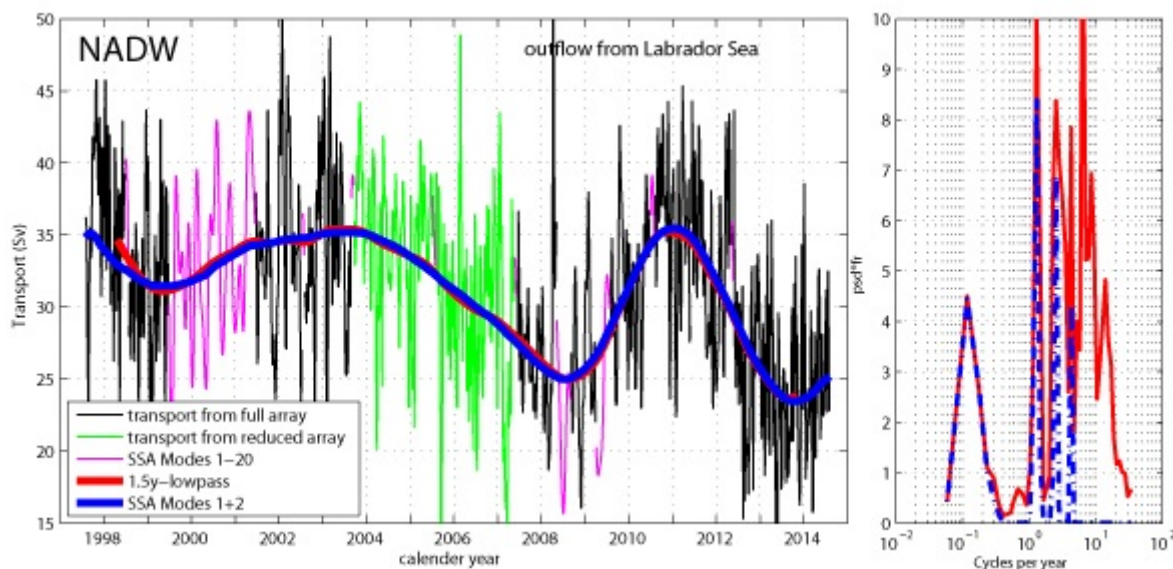


Abb. 10 Links: Tiefenwasser Export in Sverdrup zwischen 400m und dem Meeresboden in 5-Tage Auflösung. Voll besetztes Array als schwarze Linie, durch Regression bestimmter Transport in grün und aufgefüllte Datenlücken in magenta (siehe Legende). Die Varianz wird dominiert durch intra-saisonale Variabilität und durch quasi-dekadische Schwankungen (blau). **Rechts:** Transportspektrum.

Interessant ist hier die Rolle des Ozeans als Bandpass für zwischenjährliche Zeitskalen. Es existieren praktisch keine Schwankungen mit Zeitskalen zwischen 1.5 Jahren und 8-10 Jahren, wie das Spektrum in Abbildung 10 zeigt.

Der Ausstrom aus der Labradorsee ist ein Brennpunkt im Gesamtsystem der Meridionalzirkulation im Atlantik. Die seit bald zwei Dekaden kontinuierlich durchgeführten Messungen von Wassermasseneigenschaften und Strömungen zeigen eine signifikante Erwärmung des SPNA im Bereich des Labradorseewassers (0.5°C über 10 Jahre), die mit relativ schwacher Konvektion in der zentralen Labradorsee einhergeht. In den letzten Jahren gab es aber einzelne Winter mit tiefreichender Konvektion, und es ist bereits über eine Rückkehr zu starker LSW-Bildung spekuliert worden (Yashayaev und Loder, 2009²⁵). Mittels der in RACE bestimmten Transportzeitserien des tiefen Randstroms wurde der Frage nach gleichzeitiger Verstärkung des LSW-Exports aus der Labradorsee nachgegangen (Abb. 11).

Starke Zirkulationsänderungen im LSW Bereich sind nicht offensichtlich, und für eine abschließende Aussage wird die Datenanalyse vertieft- und durch hochaufgelöste Modellstudien (Viking20) unterstützt werden. Insgesamt sind die dekadischen Schwankungen im LNADW Bereich angesiedelt und diese sind mit der NAO korreliert. Dagegen ist das Labradorseewasser weniger Variabel und eher durch multiple Trends als durch langperiodische Oszillationen geprägt. Diese Unterschiede in den Wassermassenklassen

²⁴ Fischer, J., Karstensen, J., Zantopp, R., Visbeck, M., Biastoch, A., Behrens, E., Böning, C., Quadfasel, D., Jochumsen, K., Valdimarson, H., Jónsson, S., Bacon, S., Holliday, P., Dye, S., Rhein, M., Mertens, C. (2015) Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic. *Progress In Oceanography*, 132: 233-249. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.002

²⁵ Yashayaev, I., Loder, J. W. (2009) Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008. *Geophysical Research Letters*, 36: L01606, DOI: 10.1029/2008GL036162

stehen wahrscheinlich in Relation zu den Ursprungsregionen und Ausbreitungspfaden der Wassermassen. Untersuchungen zu diesem Thema werden im Verbund mit Modellen weitergeführt.

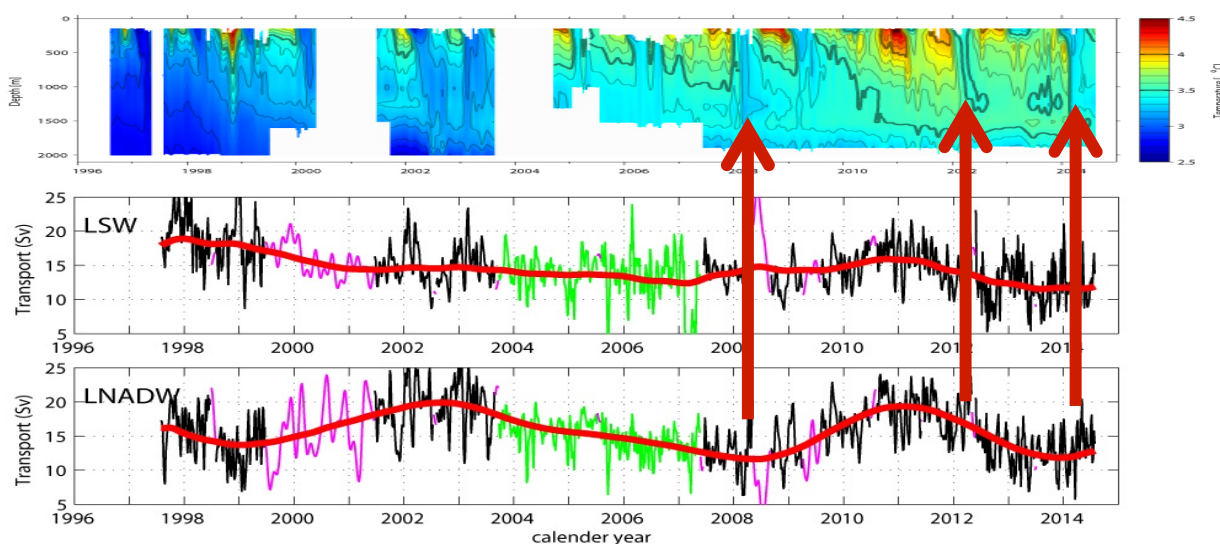


Abb 11: Die sukzessive Erwärmung der Zentralen Labradorsee in den letzten 17 Jahren wurde nur in einigen starken Wintern unterbrochen. Diese Ereignisse (rote Pfeile) führten zu tiefreichender Konvektion bis über 1500m Tiefe. Darunter sind Exportzeitserien des DWBC vor Labrador für das Labradorseewasser (LSW) und die Overflowkomponenten (LNADW).

TP 3.1 Veränderungen der atlantischen Zirkulationssysteme in hochauflösenden Ozeanmodellen: Ursachen und regionale Auswirkungen

Zusammenfassung. Auf Basis des in der Arbeitsgruppe entwickelten Systems globaler Ozean-Meereis-Modelle mit Gitterauflösungen von 0.5° bis 0.05° wurde eine Serie von Experimenten zur Untersuchung der Ursachen und regionalen Auswirkungen von Zirkulationsschwankungen im Atlantischen Ozean durchgeführt. Den Kern des experimentellen Programms bildeten ‚Hindcast‘-Simulationen, die die Reaktion des Ozeans auf die atmosphärischen Antriebsfluktuationen der letzten 60 Jahre nachbilden sollten. Zur weiteren Aufschlüsselung der dynamischen Mechanismen von Zirkulationsschwankungen wurden diese Simulationen ergänzt durch Experimente mit gezielt modifizierten Antriebsbedingungen, etwa einem wiederholten ‚normal-year forcing‘ zur Separation von extern und intern erzeugter interannueller Variabilität. Die Integrationsstrategie gründete sich auf die im Rahmen von CORE entwickelten atmosphärischen Reanalyse-Produkte und Bulk-Formulierungen für den atmosphärischen Antrieb. Die Basisversionen der Modelle (mit 0.5° und z.T. 0.25° -Auflösung) wurden zudem (außerhalb des eigentlichen RACE-Programms) in die verschiedenen internationalen CORE-Modellvergleichsstudien einbezogen (u.a. Danabasoglu et al. 2014²⁶; 2016²⁷; Griffies et al., 2014²⁸), deren Ergebnisse Rückschlüsse auf

²⁶ Danabasoglu, G., Yeager, S. G., Bailey, D., Behrens, E., Bentsen, M., Bi, D., ... Wang, Q. (2014) North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states. *Ocean Modelling*, 73: 76–107. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.10.005

²⁷ Danabasoglu, G., Yeager, S. G., Kim, W. M., Behrens, E., Bentsen, M., Bi, D., Biastoch, A., Bleck, R., ... Yashayaev, I. (2016) North Atlantic Simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part II: Inter-Annual to Decadal Variability. *Ocean Modelling*, 97: 65-90, DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.11.007

bestehende Modellsensitivitäten erlaubten und eine wichtige Grundlage für die höherauflösenden Modellkonfigurationen im RACE-Programm darstellten. Die Ergebnisse der Simulationen wurden in Zusammenarbeit mit verschiedenen beobachtenden RACE-Projekten eingehenden Modell-Daten-Vergleichen unterzogen, die eine Grundlage dafür bildeten, verschiedene lokale Messprogramme in einen erweiterten räumlichen und zeitlichen Kontext zu stellen. Im letzten Jahr stand dann zunehmend die Weiterentwicklung der Modellkonfigurationen im Hinblick auf die in RACE-II geplanten Aufgabenstellungen im Mittelpunkt. Zum einen ging es dabei um die Erweiterung der VIKING20-Nestkonfiguration auch auf den Südatlantik; zum anderen die Entwicklung eines alternativen atmosphärischen Antriebskonzepts, in dem statt vorgegebener atmosphärischer Bedingungen ein vereinfachtes Modell der atmosphärischen Grenzschicht (CheapAML) zum Einsatz kommen soll, um wichtige Aspekte der Wechselwirkung Ozean-Atmosphäre in die Modelldynamik einbeziehen zu können.

(a) Modellhierarchie. Als Grundlage der Modellsimulationen und -analysen dienen Konfigurationen des Ozean/Meereis-Modells NEMO mit Gitterauflösungen von $\frac{1}{2}^\circ$, $\frac{1}{4}^\circ$ und $1/12^\circ$ (ORCA05, ORCA025, ORCA12), ergänzt durch eine globale $\frac{1}{4}^\circ$ -Version mit regionaler Gitterverfeinerung durch ‚two-way nesting‘ im Nordatlantik ($\sim 30^\circ\text{N}$ bis 80°N) auf $1/20^\circ$ (VIKING20) sowie $\frac{1}{2}^\circ$ -Konfigurationen mit $1/10^\circ$ -Nestern im tropischen Atlantik (TRATL01) und im Agulhasregime (AG01). Der atmosphärische Antrieb beruht auf den ‚bulk‘-Formulierungen der Flüsse und atmosphärischen Reanalyseprodukten des CORE-Programms, die derzeit von 1948 bis 2009 zur Verfügung stehen. Die Modelle wurden an verschiedenen nationalen Großrechner-Systemen implementiert; für die extrem aufwändigen, hochauflösenden Simulationen wurden Projektkontingente am HLRN (Berlin, Hannover) und am DKRZ (Hamburg) eingeworben.

Die wirbelaufösende VIKING20 Konfiguration ermöglichte eine realistischere Darstellung der Strömungsverhältnisse und der damit verbundenen Variabilität im Nordatlantik, wie z.B. des tiefen westlichen Randstromes, der Nordatlantisches Tiefenwasser nach Süden transportiert. Weiterhin erkennt man in den VIKING20 Ergebnissen den Einfluss des Nordatlantischen Stroms und seiner Variabilität, die Lage der „Nordwest Corner“, die in diesem Fall die Ausbreitung der Meeresoberflächenauslenkung (SSH, aber auch in Temperatur und Salzgehalt) Anomalie nach Südosten begrenzt (Abb. 12). Dementsprechend konnten die Ergebnisse von ‚Hindcasting‘-Simulationen mit Reanalyse-Antrieb über die letzten Jahrzehnte, sowohl von dieser wirbelaufösenden Konfiguration als auch gröber aufgelösten Konfigurationen (ORCA05, ORCA025, ORCA12, TRATL01, AG01) bereits von mehreren Beobachtungsprojekten zur Interpretation lokaler Messungen und Modell-Daten-Vergleiche genutzt werden.

(b) Mesoskalige Variabilität. Durch Vergleich mit den seit Anfang der 1990-Jahre kontinuierlich durchgeführten Satelliten-Altimetermessungen konnten quantitative Evaluierungen der oberflächennahen Intensitäten der in den Modellen simulierten Wirbelfelder durchgeführt werden. Dabei zeigte sich, dass in den $\frac{1}{2}^\circ$ - und $1/12^\circ$ -Konfigurationen nicht nur die Muster der langjährig gemittelten Wirbelenergie, sondern auch der in den letzten Jahren in verschiedenen Regionen identifizierte Jahresgang der Energie gut reproduziert wird. Die Modellergebnisse konnten daraufhin genutzt werden, weitere Einblicke in die räumlichen Strukturen und Ursachen dieses Phänomens zu erhalten, dass sich durch ein

²⁸ Griffies, S. M., Yin, J., Durack, P. J., Goddard, P., Bates, S. C., Behrens, E., ... Zhang, X. (2014) An assessment of global and regional sea level for years 1993-2007 in a suite of interannual core-II simulations. *Ocean Modelling*, 78: 35–89. DOI: 10.1016/j.ocemod.2014.03.004

Sommermaximum der Energie in allen subtropischen Ozeanregionen auszeichnet (Rieck et al., 2015²⁹).

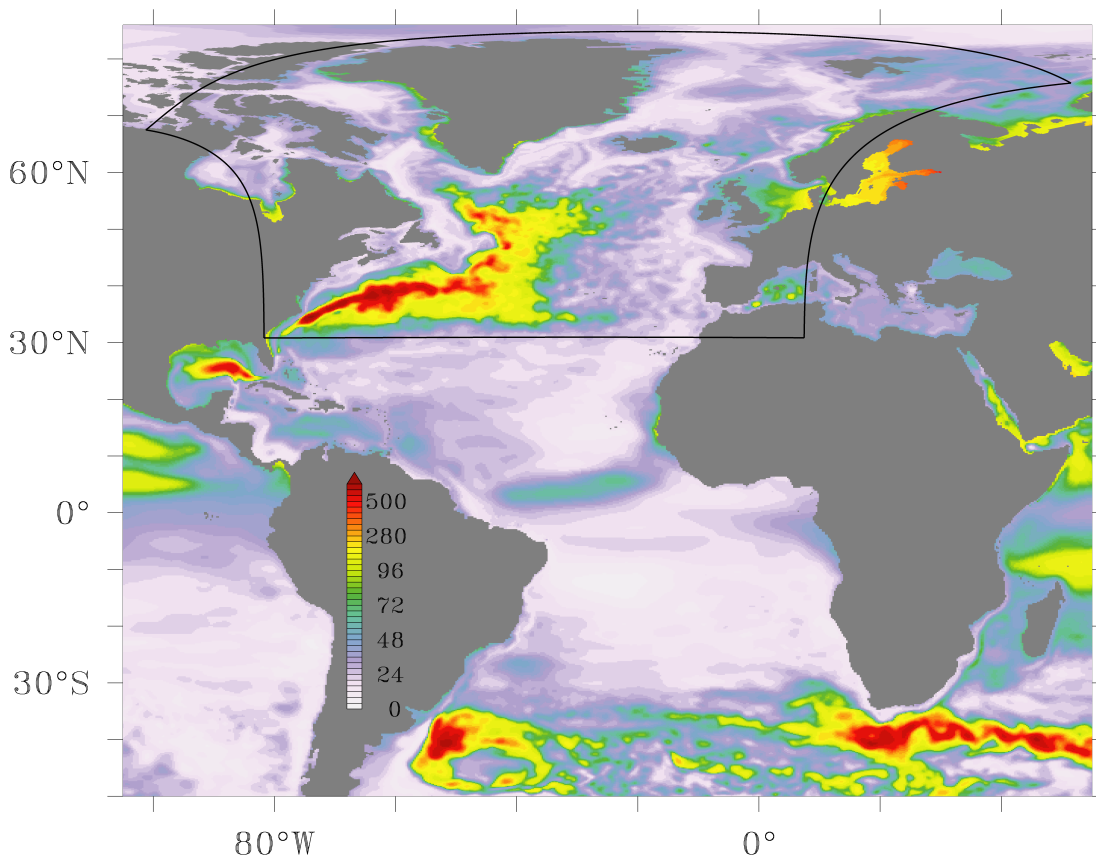


Abb. 12: Ausschnitt der mittleren SSH Varianz (1998–2007) in cm^2 der VIKING20 Referenzkonfiguration. Die SSH Varianz verdeutlicht hier zum Beispiel den Pfad des Nordatlantischen Stroms und der dazugehörigen Variabilität. Die schwarze Box markiert die hochaufgelöste $1/20^\circ$ Nestregion der VIKING20 Konfiguration.

(c) Internationales Modellvergleichs-Programm. Als Beitrag zum ‚Coordinated Ocean-ice Reference Experiments‘-Programm (CORE) wurden die $1/2^\circ$ - und $1/4^\circ$ -Konfigurationen des Modells entsprechend des international vereinbarten CORE-Protokolls in 300-Jahres-Simulationen (fünfmalige Wiederholung des 60-Jahre Zyklus‘ 1948-2007) gerechnet. Auswertungen der Ergebnisse der 18 beteiligten Modelle bezogen sich u.a. auf die Simulation des mittleren Zustands und der Schwankungen der AMOC (Danabasoglu et al., 2014²⁵; 2016²⁶) sowie der regionalen Muster der Meeresspiegelveränderungen der letzten beiden Jahrzehnte (Griffies et al., 2014²⁶), aus denen wichtige Erkenntnisse über Modellsensitivitäten gezogen werden konnten, die in die Weiterentwicklung der für die RACE-Analysen eingesetzten, hochauflösenden Modellversionen einfließen.

(d) Modell-Daten Synthese. Mit der sehr hochauflösenden, $1/20^\circ$ -Simulation der VIKING20-Konfiguration konnte eine erheblich realistischere Darstellung einiger kritischer Aspekte der Zirkulation im subpolaren Nordatlantik erreicht werden. Wesentliche Verbesserungen ergaben sich in der Darstellung des Overflow-Prozesses und somit auch der vertikalen Schichtungsverhältnisse, die sich in der Vertikalstruktur sowohl der subpolaren Randströme

²⁹ Rieck, J. K., Böning, C. W., Greatbatch, R. J., Scheinert, M. (2015). Seasonal variability of eddy kinetic energy in a global high-resolution ocean model. *Geophysical Research Letters*, 42: 9379-9386. DOI:10.1002/2015GL066152

(Abb. 13) als auch der beckenweiten AMOC niederschlagen; in der räumlichen Struktur und Intensität der winterlichen Konvektion in der Labradorsee; sowie des Verlaufs von Golfstrom und Nordatlantischem Strom („Nordwest Corner“). Simulationsergebnisse dieses Modells konnten daher als gute Grundlage für datenorientierte Studien regionaler Zirkulationsschwankungen in weiteren Teilprojekten dienen (Fischer et al., 2015³⁰; Mertens et al., 2014³¹).

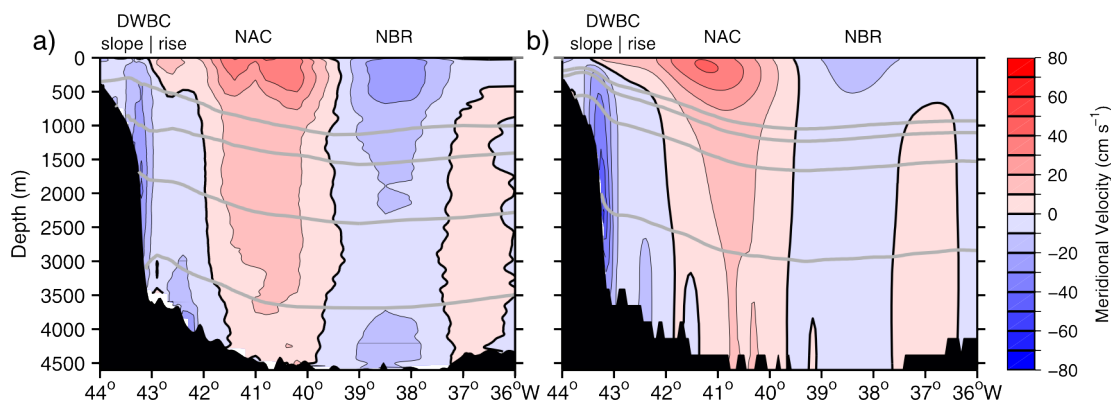


Abb. 13: Mittlere meridionale Strömung im Nordatlantik (47°N) aus Beobachtungen von sechs Forschungsfahrten (a) und aus 47 Jahren aus dem VIKING20 Modell (b). Kontourlinien sind die Dichteflächen $\sigma_\theta = 27.68, 27.74, 27.80$ und 27.88 kgm^{-3} . (Mertens et al., 2014³⁰).

(e) AMOC-Schwankungen und westlicher Randstrom. In Zusammenarbeit mit TP 1.1 konnten die Modellsimulationen dazu beitragen, die aus lokalen Messzeitreihen am Westrand des tropischen Atlantiks ermittelten Fluktuationen des Nordbrasilstroms (NBC) in einen erweiterten räumlichen und zeitlichen Kontext zu stellen (Hummels et al., 2015³²). Die aus den hier durchgeführten Modell-Daten-Vergleichen erhaltenen Erkenntnisse konnten in weiteren (außerhalb von RACE geförderten) Studien zur Beziehung zwischen den Schwankungen des NBC und der AMOC genutzt werden. Dabei zeigte sich, dass sich (multi-)dekadische Trends in der beckenweiten AMOC im tropischen Atlantik fast vollständig am Westrand konzentrieren und sich damit im NBC-Transport manifestieren, diese Schwankungen aber durch große windgetriebene Fluktuationen überlagert werden: die in den letzten Jahren simulierten (und beobachteten) dekadischen Schwankungen des NBC können damit primär auf das Windfeld im tropischen Atlantik zurückgeführt werden. Da sich dieser Einfluss aber relativ sicher auf der Basis vorliegender Windprodukte berechnen lässt, bedeuten die Ergebnisse andererseits auch, dass ein Monitoring des NBC-Transports ein wichtiges und vergleichsweise kostengünstiges Element eines Atlantik-weiten AMOC-Beobachtungssystems darstellen kann (Rühs et al., 2015³³).

³⁰ Fischer, J., Karstensen, J., Zantopp, R., Visbeck, M., Biastoch, A., Behrens, E., ... Mertens, C. (2015) Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 132: 233–249. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.002

³¹ Mertens, C., Rhein, M., Walter, M., Böning, C. W., Behrens, E., Kieke, D., ... Stöber, U. (2014) Circulation and transports in the Newfoundland Basin, western subpolar North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6): 3114–3127. DOI:10.1002/jgrc.20224

³² Hummels, R., Brandt, P., Dengler, M., Fischer, J., Araujo, M., Veleda, D., Durgadoo, J. V. (2015) Interannual to decadal changes in the western boundary circulation in the Atlantic at 11 degrees S. *Geophysical Research Letters*, 42(18): 7615–7622. DOI: 10.1002/2015GL065254

³³ Rühs, S., Getzlaff, K., Durgadoo, J. V., Biastoch, A., Böning, C. W. (2015) On the suitability of North Brazil Current transport estimates for monitoring basin-scale AMOC changes. *Geophysical Research Letters*, 42(19): 8072–8080. DOI: 10.1002/2015GL065695

(f) Biogeochemische Auswirkungen. Das $1/20^\circ$ Nest im subpolaren/subarktischen Nordatlantik (VIKING20) wurde für die Erklärung biogeochemischer Verteilungsmuster verwendet (Steinle et al. 2015³⁴). So zeigte sich, dass die zeitliche Strömungsvariabilität des West-Spitzbergenstroms die Abundanz von methanotrophen Bakterien am Kontinentalabhang vor Spitzbergen bestimmt und somit die dort zu verschiedenen Zeitpunkten gemessenen Konzentrationen erklären kann. Mit Hilfe der $1/12^\circ$ Globalkonfiguration (ORCA12) ließ sich dieses Ergebnis auf andere Regionen variabler Bodenströmungen im Weltozean übertragen.

(g) Entwicklung eines neuen Antriebskonzepts. Der atmosphärische Antrieb heutiger Ozeanmodelle wird typischerweise durch *bulk*-Formulierungen der turbulenten Ozean-Atmosphärenflüsse realisiert, in den die atmosphärischen Variablen (Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchte) durch entsprechende Reanalyseprodukte vorgeschrieben werden. Dies beinhaltet, vor allem auch in hochauflösenden Modellen, ein unphysikalisches Verhalten, da sich anders als in der Realität die vorgeschriebene Atmosphäre nicht an lokale Veränderungen in den ozeanischen Bedingungen anpassen kann. Im Bereich von Fronten, Wirbeln oder nahe der Meereisgrenze führt dies daher zu unrealistisch starken Oberflächenflüssen, die wiederum dazu führen, dass der Ozean sich der Atmosphäre anpasst. Eine Hauptaktivität in diesem TP bestand in den vergangenen Jahren daher in der Implementierung und dem Test eines alternativen Antriebskonzepts, in dem mit Hilfe eines vereinfachten atmosphärischen Grenzschichtmodells (CheapAML; Deremble et al., 2013³⁵). Das atmosphärische Grenzschichtmodell CheapAML stellt eine vereinfachte Beschreibung der atmosphärischen Mischungsschicht dar; die Prozesse sind in Abb. dargestellt. Es handelt sich um ein thermodynamisches Modell, Advektion wird vorgeschrieben. Über Land und Meereis werden vorgegebene atmosphärische Variablen (Reanalysedaten) genutzt.

Die neuartige Beschreibung des Oberflächenantriebs für Ozeanmodelle (im Folgenden werden Ergebnisse der Experimente mit ORCA05 gezeigt) wurde zunächst gegeben über der konventionellen Methode (vollgeschriebener Temperatur und Feuchte) verglichen. Dabei zeigt sich, dass in Regionen wie dem Nordatlantik, Nordpazifik und südlichen Ozeans, wo auch im Jahresmittel in Experimenten mit konventionellen Atmosphären-antrieb teilweise sehr unrealistische turbulente Wärmeflüsse zu finden waren, nun eine Verbesserung (gegenüber Reanalyseprodukten) zu erkennen ist. Beispielhaft lässt sich dies wie folgt erklären: über dem offenen Ozean ist die Temperaturdifferenz zwischen der unteren Atmosphäre und dem Ozean bis auf wenige Ausnahmen immer positiv (der Ozean ist wärmer). Dies bedeutet, dass auch der Fluss fühlbarer Wärme positiv ist. Sind jedoch die Temperaturdifferenzen negativ, so ist auch der Fluss fühlbarer Wärme negativ.

³⁴ Steinle, L., Graves, C. A., Treude, T., Ferré, B., Biastoch, A., Bussmann, I., Berndt, C., Krastel, S., James, R.H., Behrens, E., Böning, C.W., Greinert, J., Sapart, C.-J., Scheinert, M., Sommer, S., Lehmann, M.F., Niemann, H. (2015) Water column methanotrophy controlled by a rapid oceanographic switch. *Nature Geoscience*, 8: 378. DOI: 10.1038/ngeo2420

³⁵ Deremble, B., Wienders, N., Dewar, W. K. (2013) CheapAML: A Simple, Atmospheric Boundary Layer Model for Use in Ocean-Only Model Calculations. *Monthly Weather Review*, 141(2): 809–821. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00254.1

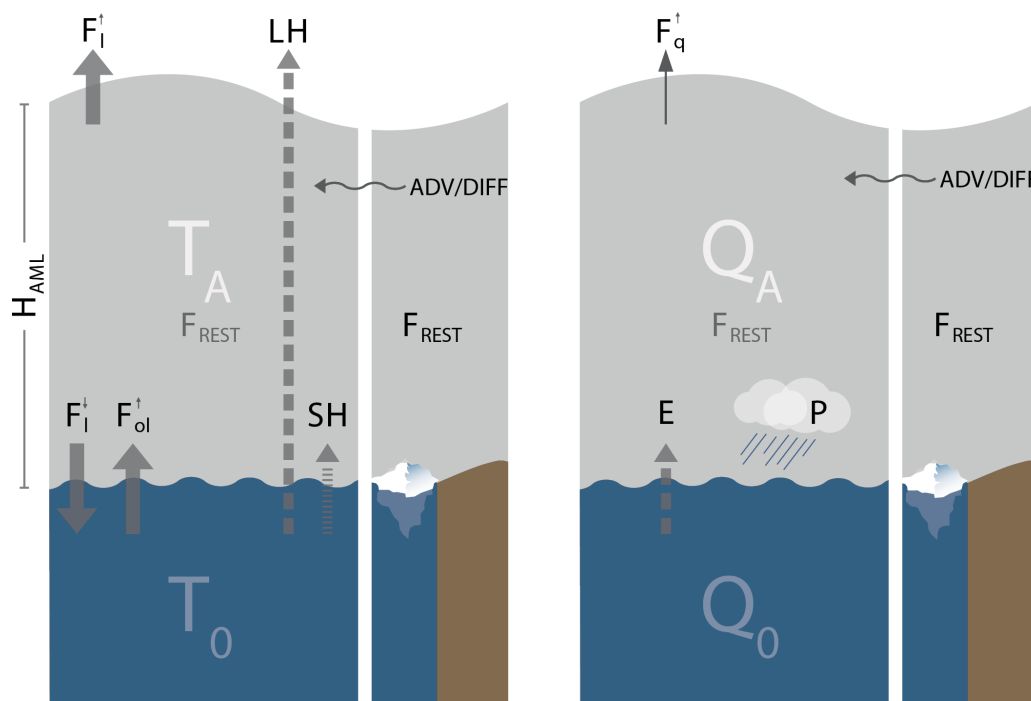


Abb. 14: CheapAML Flüsse. Horizontaler Transport durch Advektion (ADV) und Diffusion (Diff). T_A : Langwellige Strahlung (F_l , F_o), fühlbarer (SH) und latenter (LH) Wärmefluss, Resting (F_{REST}). Q_A : Verdunstung (E), Luftfeuchtigkeitseinströmung (F_q), Regen (P) und Resting (F_{REST}) LAND, ICE: Relaxation an vorgegebene atmosphärische Werte.

Neben den lokalen Prozessen ist es auch besonders wichtig in Ozeanmodellen die globalen Wärme- und Frischwasserbilanzen zu schließen oder Imbalancen gering zu halten, da dies durch die vorgeschriebenen Flüsse wie zum Beispiel langwellige Einstrahlung oder Flussausstrom nicht automatisch gegeben ist. Für die Wärmebilanz konnte gezeigt werden, dass die globale Imbalance bei ungefähr -2 W/m^2 liegt und damit relativ dicht an den aktuell besten Abschätzungen von 1 W/m^2 . Dies war zunächst nicht von einem so einfachen Atmosphärenmodell zu erwarten, aber Anpassungen der Originalversion von Deremble für ein gekoppeltes System haben dies möglich gemacht.

Die aktuellen Ergebnisse, die gerade zu einer Studie mit Fokus auf die globale Kopplung von CheapAML und ORCA05 und Beschreibung der AMOC Mechanismen zusammengefasst werden, sollen nun in RACE II ausgeweitet werden. Der Fokus ist hier auf die lokale Kopplung zwischen Ozean und Atmosphäre mit deutlich besserer Auflösung von mesoskaligen Prozessen (zunächst durch ORCA025 und dann durch VIKING20x). Hierbei ist von entscheidender Bedeutung, dass Reanalyse-Produkte mit einer Auflösung von 100-200km zu Verfügung stehen und damit noch stärkere Diskrepanzen auftreten können, wenn die Auflösung des Ozeanmodells im Bereich von 25km oder noch weniger liegt.

Desweiteren soll getestet werden, inwiefern Zukunftsprognosen möglich sind. Hier bietet das in RACE I entwickelte Antriebskonzept eine vielversprechende Alternative. Das neue Antriebskonzept kostet ungefähr 10% mehr Rechenleistung als der konventionelle Antrieb und ist damit deutlich günstiger als Voll-gekoppelte Ozean-Atmosphärensysteme (dort ist das

Atmosphärenmodell der Hauptkostenpunkt). Als Referenz für Temperatur, Feuchte und Wind lassen sich bei Zukunftsprognosen bereits vorhandene CMIP5-Experimente nutzen.

(i) Modellweiterentwicklung: Hochaufgelöstes Atlantikmodell

Als Machbarkeitsstudie wurde eine erweiterte wirbelauflösende $1/20^\circ$ Modellkonfiguration (VIKING20x) erstellt, basierend auf dem erfolgreichen Ansatz von VIKING20 allerdings mit einer Erweiterung der $1/20^\circ$ -Nestes über den gesamten Atlantik-Sektor ($34^\circ\text{S} - 70^\circ\text{N}$; Abb. 15). Diese Konfiguration könnte eine tragende Rolle bei der Auswertung der relativen Bedeutung und möglichen Überlagerung von nord- und südhemispherischen Einflüssen auf die Erzeugung dekadischer Schwankungen und längerfristiger Trends spielen. In diesem Zusammenhang ist von großem Interesse inwieweit eine mögliche Verschiebung in den Wasserimporten entlang der Kalt- und Warmwasserpfade im Südatlantik aufgrund der anhaltenden polwärtigen Verlagerung des Westwindgürtels einen ähnlich großen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der AMOC haben könnten wie es derzeit als Folge der projizierten Abschwächung der Tiefenwasserbildung (z.B. infolge eines verstärkten Süßwasserabflusses von Grönland (Swingedouw et al. 2013³⁶) erwartet wird.

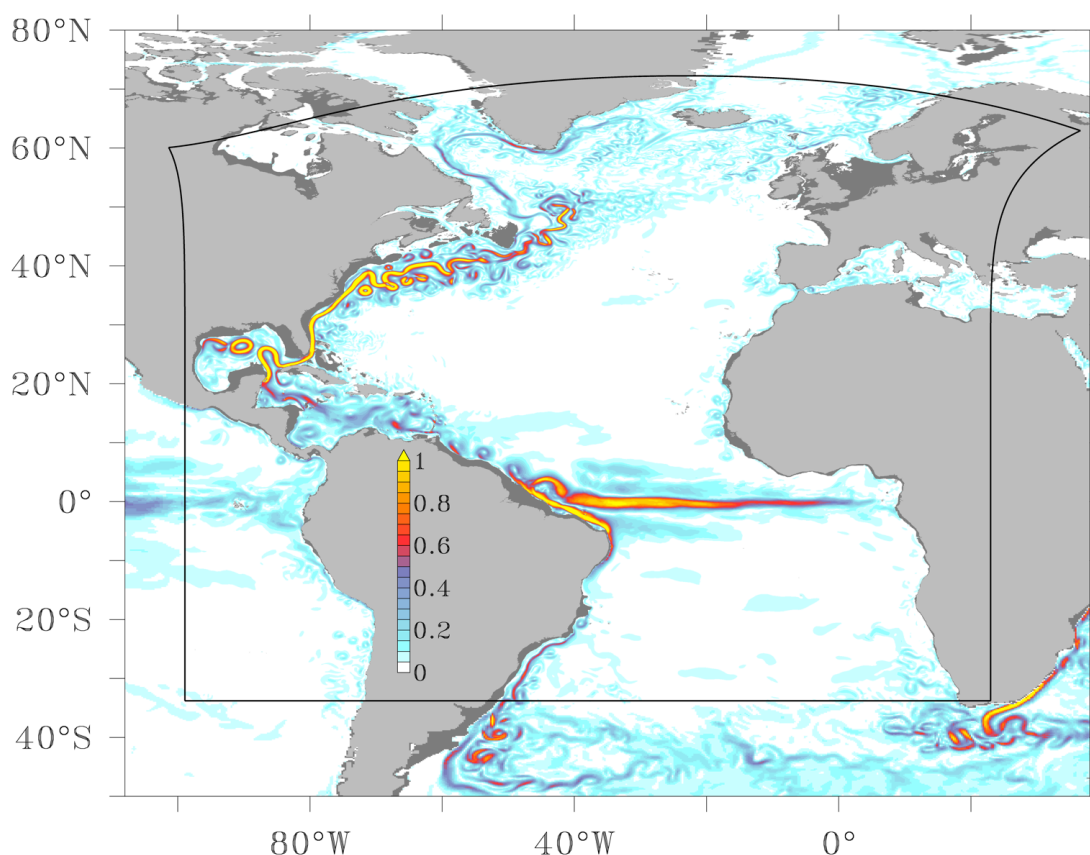


Abb. 15: Ausschnitt der Momentaufnahme (Tagesmittel) des oberflächennahen (100m) Geschwindigkeitsbetrages, während der Modellinitialisierungsphase der VIKING20x Konfiguration (dunkelgrau: Topographie in 100m; hellgrau: Topographie an der Oberfläche). Die schwarze Box markiert die erweiterte hochaufgelöste $1/20^\circ$ Nestregion der VIKING20x Konfiguration.

³⁶ Swingedouw, D., Rodehacke, C. B., Behrens, E., Menary, M., Olsen, S. M., Gao, Y., Mikolajewicz, U., Mignot, J., Biastoch, A. (2013) Decadal fingerprints of freshwater discharge around Greenland in a multi-model ensemble. *Climate Dynamics*, 41: 695-720. DOI: 10.1007/s00382-012-1479-9

Diese erweiterte Konfiguration ermöglicht eine engere Verknüpfung von Beobachtungs- und Modellprojekten für den zweiten Bewilligungszeitraum und ist von speziellem Interesse zur Auswertung und Interpretation regionaler Studien bzw. lokaler Messungen.

II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Während in den modellierenden Teilprojekten (TP 1.4 und 3.1) der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung für Personal eingesetzt wurde, ist dies bei den Projekten mit beobachtendem Schwerpunkt (TP 1.1 und 2.2) nur ein Anteil. Der zweite Anteil an den Mitteln wurde für Verbrauchsmaterial bei Verankerungen sowie für die großen Expeditionen (mit Meteor bzw. Merian) für Reisekosten und Transporte eingesetzt.

II.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Fokus der beobachtenden TPs standen die Variabilität der westlichen Randstromzirkulation in Bezug auf Transporte und Wassermasseneigenschaften. Sehr wichtig und damit notwendig und angemessen waren parallele hochauflösende Modellierung – zu gegenseitiger Unterstützung bei Validierung und Interpretation.

II.4 des Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die erzielten Ergebnisse sind wichtige Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten im BMBF Projekt RACE II und in EU-geförderten Projekten. Darüber hinaus liefern die Projektarbeiten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Signalausbreitung und 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 des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

TP 1.1 Das RACE Teilprojekt 1.1 ist ein wesentlicher Beitrag zum internationalen atlantischen Beobachtungssystem und insbesondere SAMOC Programm. Diese Arbeiten werden jetzt im Rahmen des EU AtlantOS Programms koordiniert. Sie tragen wesentlich zum Verständnis der saisonalen, zwischenjährlichen und dekadischen Variabilität im tropischen Atlantik beigetragen.

TP 1.4 Das CMIP5 Projekt und die damit verbundenen Aktivitäten beinhalten eine Vielzahl von Untersuchungen, die weltweit in renommierten Fachzeitschriften veröffentlicht wurden. Seit dem Jahr 2004 gibt es direkte Messungen der AMOC bei 26,5° N. Die Länge der Zeitserie lassen inzwischen erste Vergleiche mit der Variabilität in Modellen zu. Erste Studien deuten darauf hin, dass die Variabilität der AMOC in Klimamodellen eher unterschätzt wird. Das europäische Projekt NACLIM beinhaltet ebenso einige Aspekte zur AMOC Variabilität. Alle im Projektzeitraum bekannt gewordenen Erkenntnisse anderer Gruppen wurden direkt in die Konzeption der eigenen Forschung mit einbezogen.

TP 2.2 Mehrere internationale Gruppen führen Untersuchungen im subpolaren Atlantik durch, deren Ergebnisse einen Einfluss auf das Vorhaben haben. Hier ist insbesondere die EU geförderte Initiative 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 (Thema im EU-Program AtlantOS). Die Abstimmung mit den kanadischen Kollegen erlaubte eine direkte Erweiterung

des Arrays auf den Schelf (Brad deYoung) und die Einbettung der Langzeitbeobachtungen im Zentrum der Labradorsee (jährlich; Bedford, Halifax I. Yashayaev).

TP 3.1 Die GEOMAR Modellarbeiten werden in enger Kollaboration mit der französischen Entwicklergruppe des NEMO-Modells durchgeführt. Es besteht ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit dem Ziel, neue Entwicklungen zeitnah zur Verfügung zu stellen. Wissenschaftlich findet ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit internationalen Kollegen statt, die an ähnlichen Fragestellungen forschen. Hier sind keine thematischen Überschneidungen bekannt.

II.6 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

TP 1.1

Ascani, F., Firing, E., McCreary, J. P., Brandt, P., Greatbatch, R. J. (2015) The deep equatorial ocean circulation in wind-forced numerical solutions. *Journal of Physical Oceanography*, 45: 1709–1734. DOI: 10.1175/JPO-D-14-0171.1

Brandt P., Funk, A., Tantet, A., Johns, W., Fischer, J. (2014) The Equatorial Undercurrent in the central Atlantic and its relation to tropical Atlantic variability. *Climate Dynamics*, 43: 2985-2997. DOI: 10.1007/s00382-014-2061-4

Brandt, P., Bange, H. W., Banyte, D., Dengler, M., Didwischus, S.-H., Fischer, T., Greatbatch, R. J., Hahn, J., Kanzow, T., Karstensen, J., Körtzinger, A., Krahnemann, G., Schmidtke, S., Stramma, L., Tanhua, T., Visbeck, M. (2015) On the role of circulation and mixing in the ventilation of oxygen minimum zones with a focus on the eastern tropical North Atlantic. *Biogeosciences*, 12: 489-512. DOI: 10.5194/bg-12-489-2015

Brandt, P., Claus, M., Greatbatch, R. J., Kopte, R., Toole, J. M., Johns, W. E., Böning, C. W (2016) Annual and semi-annual cycle of equatorial Atlantic circulation associated with basin mode resonance. *Journal of Physical Oceanography*, submitted.

Burmeister, K. (2015) Tropical Atlantic SST variability with focus on the extreme events in 2009. Master thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 71 pp.

Herrford, J. (2014) The pathways and watermass properties of deep and bottom waters in the western tropical Atlantic. Master thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 109 pp.

Herrford, J., Brandt, P., Zenk, W. (2016) The Pathways and Property Changes of Deep and Bottom Waters in the Western Tropical Atlantic. *Deep Sea Research*, submitted.

Hummels R., Dengler, M., Brandt, P., Schlundt, M. (2014) Diapycnal heat flux and mixed layer heat budget within the Atlantic Cold Tongue. *Climate Dynamics*, 43 (11): 3179-3199. DOI: 10.1007/s00382-014-2339-6

Hummels, R., Brandt, P., Dengler, M., Fischer, J., Araujo, M., Veleda, D., Durgadoo, J. V. (2015) Interannual to decadal changes in the western boundary circulation in the Atlantic at 11°S. *Geophysical Research Letters*, 42: 7615-7622. DOI: 10.1002/2015GL065254

Johns, W. E., Brandt, P., Boulès, B., Tantet, A., Papapostolou, A., Houk, A. (2014) Zonal structure and seasonal variability of the Atlantic Equatorial Undercurrent. *Climate Dynamics*, 43: 3047-3069. DOI: 10.1007/s00382-014-2136-2

Milinski, S. (2015) Tropical Atlantic biases in the MPI-Earth system model at different resolutions. Master thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 31 pp.

Perez, R. C., Hormann, V., Lumpkin, R., Brandt, P., Johns, W. E., Hernandez, F., Schmid, C., Boulès, B. (2014). Mean meridional currents in the central and eastern equatorial Atlantic. *Climate Dynamics*, 43: 2943-2962. DOI: 10.1007/s00382-013-1968-5

Schlundt, M. (2014) Mixed layer heat and salinity variability in the equatorial Atlantic. Ph.D. thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 108 pp.

Schlundt, M., Brandt, P., Dengler, M., Hummels, R., Fischer, T., Bumke, K., Krahnemann, G., Karstensen, J. (2014) Mixed layer heat and salinity budgets during the onset of the 2011 Atlantic cold tongue. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 119: 7882-7910, DOI: 10.1002/2014JC010021

TP 1.4

Ba, J., Keenlyside, N. S., Latif, M., Park, W., Ding, H., Lohmann, K., Mignot, J., Menary, M., Otterå, O.H., Wouters, B., Salas y Melia, D., Oka, A., Bellucci, A., Volodin, E. (2014) A multi-model comparison for Atlantic multidecadal variability. *Climate Dynamics*, 43: 2333-2348. DOI: 10.1007/s00382-014-2056-1

Bayr, T., Dommenges, D., Martin, T., Power, S. B. (2014) The eastward shift of the Walker Circulation in response to global warming and its relationship to ENSO variability. *Climate Dynamics*, 43: 2747-2763. DOI: 10.1007/s00382-014-2091-y

Bordbar, M. H., Martin, T., Latif, M., Park, W. (2015) Effects of long-term variability on projections of twenty-first century dynamic sea level. *Nature Climate Change*, 5(4): 343-347. DOI: 10.1038/nclimate2569

Ding, H., Keenlyside, N. S., Latif, M., Wahl, S., Park, W. (2015) The Impact of Mean State Errors on Equatorial Atlantic Interannual Variability in a Climate Model. *Journal of Geophysical Research*, 120: 1133–1151. DOI: 10.1002/2014JC010384

Gulev, S. K., Latif, M., Keenlyside, N. S., Park, W., Koltermann, K. P. (2013) North Atlantic Ocean Control on Surface Heat Flux at Multidecadal Timescales. *Nature*, 499: 464-467, DOI: 10.1038/nature12268

Klöwer, M., Latif, M., Ding, H., Greatbatch, R., Park, W. (2014) Atlantic Meridional Overturning Circulation and Prediction of North Atlantic Sea Surface Temperature. *Earth and Planetary Science Letters*, 406: 1-6. DOI: 10.1016/j.epsl.2014.09.001

Latif, M., Martin, T., Park, W. (2013) Southern Ocean Sector Centennial Climate Variability and Recent Decadal Trends. *Journal of Climate*, 26: 7767 – 7782. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00281.1

Latif, M., Semenov, V. A., Park, W. (2015) Super El Niños in Response to Global Warming in a Climate Model. *Climatic Change*, 4: 489-500. DOI: 10.1007/s10584-015-1439-6

Martin, T., Park, W., Latif, M. (2015) Southern Ocean Forcing of the North Atlantic at Multi-centennial Timescales in the Kiel Climate Model. *Deep-Sea Research II - Topical Studies In Oceanography*, 114: 39-48. DOI: 10.1016/j.dsr2.2014.01.018

Park, T., Park, W., Latif, M. (2016) Correcting North Atlantic Sea Surface Salinity Biases in the Kiel Climate Model: Influences on Ocean Circulation and Atlantic Multidecadal Variability. *Climate Dynamics*, 1-18. DOI: 10.1007/s00382-016-2982-1

Reintges, A. (2014) The Response of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to heat flux forcing in the Kiel Climate Model. Master Thesis, CAU Kiel.

Reintges, A., Martin, T., Latif, M., Keenlyside, N. S. (2015) Uncertainty in 21st Century Projections of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in CMIP3 and CMIP5 models. *Climate Dynamics*, in revision.

Reintges, A., Latif, M., Park, W. (2015) Sub-decadal North Atlantic Oscillation Variability in Observations and the Kiel Climate Model. *Climate Dynamics*, in revision.

Semenov, V. A., Latif, M. (2015) Nonlinear Atmospheric Circulation Response to Multi-year Arctic Sea Ice Concentration Changes in 1966-2012. *Environmental Research Letters*, 10: 054020. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054020.

Semenov, V. A., Martin, T., Behrens, L. K., Latif, M. (2015) Arctic Sea Ice Area in CMIP3 and CMIP5 Climate Model Ensembles – Variability and Change. *The Cryosphere Discussions*, 9: 1077-1131. DOI: 10.5194/tcd-9-1077-2015.

Tuchen, F. P. (2013) Einfluss des Windschubes auf die Atlantische Umwälzbewegung. Bachelorarbeit, CAU Kiel.

Weiter, A. (2014) Langfristige Beobachtungen Lang-periodischer Schwankungen im Oberflächen Klima seit 1900. Bachelorarbeit, CAU Kiel.

Wiese, H. (2015) Einfluss der Sonnenstrahlung auf den Meeresspiegel im Kieler Klima Modell. Bachelorarbeit, CAU Kiel.

Wu, Y., Latif, M., Park, W. (2016) Multiyear Predictability of Northern Hemisphere Surface Air Temperature in the Kiel Climate Model. *Climate Dynamics*, 1-12, DOI: 10.1007/s00382-015-2871-z.

TP 2.2

Fischer, J., Karstensen, J., Zantopp, R., Visbeck, M., Biastoch, A., Behrens, E., Böning, C., Quadfasel, D., Jochumsen, K., Valdimarson, H., Jónsson, S., Bacon, S., Holliday, P., Dye, S., Rhein, M., Mertens, C. (2015) Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic. *Progress In Oceanography*, 132: 233-249. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.002

Fischer, J., Visbeck, M., Zantopp, R. J., 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., 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

Handmann, P., Fischer, J., Visbeck, M., Biastoch, A. (2016) Decadal NADW Transport Variability in the Subpolar North Atlantic at 53°N in Model - Data Comparison. In Vorbereitung.

Cunningham, S., Baringer, M., Johns, W., Toole, J., Østerhus, S., Fischer, J., Piola, A., McDonagh, E., Lozier, S., Send, U., Kanzow, T., Marotzke, J., Rhein, M., Garzoli, S., Rintoul, S., Sloyan, B., Speich, S., Talley, L., Baehr, J., Meinen, C., Treguier, A.-M., Lherminier, P. (2010) The present and future system for measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation and heat transport. *OceanObs'09 Conference, Community White Paper*.

Send, U., Davis, R., Fischer, J., Imawaki, S., Kessler, W., Meinen, C., Owens, B., Roemmich, D., Rossby, T., Rudnick, D., Toole, J., Wijffels, S., Beal, L. (2010) A global boundary current circulation observing network. *OceanObs'09 Conference, Community White Paper*.

Schott, F. A., Stramma, L., Giese, B.S., Zantopp, R. (2009) Labrador Sea convection and subpolar North Atlantic Deep Water export in the SODA assimilation model. *Deep Sea Research Part I*, 56: 926-938. DOI: 10.1016/j.dsr.2009.01.001

Xu, X., Hurlburt, H. E., Schmitz, W. J., Jr., Zantopp, R., Fischer, J., Hogan, P. J. (2013) On the currents and transports connected with the atlantic meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118: 502-516. DOI: 10.1002/jgrc.20065

Zantopp, R., Fischer, J., Visbeck, M., Karstensen, J. (2016) 17-year long water mass transports by the DWBC at the Exit of the Labrador Sea. In Vorbereitung.

TP 3.1

Behrens, E., Biastoch, A., & Böning, C. W. (2013) Spurious AMOC trends in global ocean sea-ice models related to subarctic freshwater forcing. *Ocean Modelling*, 69: 39–49. DOI: 10.1016/j.ocemod.2013.05.004

Böning, C. W., E. Behrens, A. Biastoch, K. Getzlaff und J. Bamber (2016) Emerging impact of Greenland meltwater on deepwater formation in the North Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, in press.

Fischer, J., Karstensen, J., Zantopp, R., Visbeck, M., Biastoch, A., Behrens, E., ... Mertens, C. (2015) Intra-seasonal variability of the DWBC in the western subpolar North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 132: 233–249. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.04.002

Hummels, R., Brandt, P., Dengler, M., Fischer, J., Araujo, M., Veleda, D., Durgadoo, J. V. (2015) Interannual to decadal changes in the western boundary circulation in the Atlantic at 11 degrees S. *Geophysical Research Letters*, 42(18): 7615–7622. DOI: 10.1002/2015GL065254

Mertens, C., Rhein, M., Walter, M., Böning, C. W., Behrens, E., Kieke, D., ... Stöber, U. (2014) Circulation and transports in the Newfoundland Basin, western subpolar North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6): 3114–3127. DOI:10.1002/jgrc.20224

Rieck, J. K., Böning, C. W., Greatbatch, R. J., Scheinert, M. (2015). Seasonal variability of eddy kinetic energy in a global high-resolution ocean model. *Geophysical Research Letters*, 42: 9379-9386. DOI:10.1002/2015GL066152

Steinle, L., Graves, C. a., Treude, T., Ferré, B., Biastoch, A., Busmann, I., Berndt, C., Krastel, S., James, R.H., Behrens, E., Böning, C.W., Greinert, J., Sapart, C.-J., Scheinert, M., Sommer, S., Lehmann, M.F., Niemann, H. (2015) Water column methanotrophy controlled by a rapid oceanographic switch. *Nature Geoscience*, 8: 378. DOI: 10.1038/ngeo2420

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel RACE - Vorhaben: Beobachtungen, Simulation und Synthese (multi-) dekadischer Schwankungen der Atlantikzirkulation AP 1.1 Die Rolle des tropischen Atlantiks für Klimaschwankungen im atlantischen Raum AP 1.4 Mechanismen für Zirkulationsschwankungen im Nordatlantik in gekoppelten Ozean-Atmosphäre Modellen AP 2.2 Die veränderliche Ozeanzirkulation am Westrand des subpolaren Nordatlantiks AP 3.1 Veränderungen der atlantischen Zirkulationssysteme in hochauflösenden Ozeanmodellen: Ursachen und regionale Auswirkungen		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Biastoch, Arne Böning, Claus Brandt, Peter Dengler, Marcus Fischer, Jürgen Karstensen, Johannes Latif, Mojib Visbeck, Martin		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) 03F0651B
		11. Seitenzahl 32
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben 65
		14. Tabellen 1
		15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Ziel des Verbundvorhabens war es, (multi-) dekadische Schwankungen der Atlantikzirkulation als Teil des globalen Wandels zu beobachten und zu simulieren und ihre regionalen Auswirkungen auf gesellschaftlich relevante Prozesse, wie Klimawandel, Meeresspiegel und Ökosystem im Atlantischen Raum zu erfassen. Die vier Teilprojekte des GEOMAR haben zentrale Komponenten des Vorhabens bearbeitet durch: -- Beobachtungen der Randstromzirkulation und ihrer Änderungen am Westrand des tropischen Südatlantiks im Warmwasserpfad der MOC (TP A1.1) -- Beobachtung von langfristigen Exportschwankungen am Ausgang der Labradorsee (TP A2.2) mittels Verankerungen und Schiffsmessungen am Ursprung des Kaltwasserzweiges der MOC. -- Ozeanmodellierung zur Bedeutung nord- und südhemisphärischer Erzeugungsmechanismen dekadischer Zirkulationsschwankungen und ihrer regionalen Auswirkungen auf Meeresströmungen, Meeresspiegel und marine Umweltbedingungen (TP A3.1). -- Gekoppelte Modellierung zu Untersuchungen dekadischer Schwankungen der Atlantischen Umwälzbewegung (TP A1.4), mit dem Ziel die Rolle des Antriebs (Wind, Thermohalin) regional und überregional zu verstehen. Die Kieler Beobachtungen, sowie unsere Modellsysteme und Modellstudien sind wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen, regionalen Ozean - Klima – Analysesystems.		
19. Schlagwörter Ozeanzirkulation, MOC, Klimawandel, dekadische Variabilität, Atlantik, 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 RACE - Regional Atlantic Circulation and Global Change WP 1.1 Role of the tropical Atlantic for climate variations in the Atlantic area WP 1.4 Mechanisms of Circulation Variations in the North Atlantic in Coupled Ocean-Atmosphere Models WP 2.2 Ocean circulation variability at the western boundary of the subpolar North Atlantic WP 3.1 Changes of Atlantic circulation systems in high-resolution ocean models: Causes and regional effects		
4. author(s) (family name, first name(s)) Biastoch, Arne Böning, Claus Brandt, Peter Dengler, Marcus Fischer, Jürgen Karstensen, Johannes Latif, Mojib Visbeck, Martin	5. end of project 31.12.2015	6. publication date
	7. form of publication Final Report	
	8. performing organization(s) (name, address) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. originator's report no.	10. reference no. 03F0651B
	11. no. of pages 32	
	13. no. of references 65	14. no. of tables 1
15. no. of figures 15		
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract 8. Abstract The aim of the joint project was to observe and simulate the (multi-) decadal variability of the Atlantic circulation as part of global change, and to assess its regional impact on socially relevant processes, such as climate change, sea level and ecosystem in the Atlantic sector. The four sub-projects at GEOMAR have contributed to the central components of the project through: -- observations of the boundary current circulation and its changes at the western boundary of the tropical South Atlantic along the warm water path of the MOC (WP A1.1); -- observations of long-term export fluctuations at the exit of the Labrador Sea by means of moored and shipboard measurements at the origin of the cold branch of the MOC (WP A2. 2); -- ocean modeling on the northern and southern hemispheric origins for decadal circulation fluctuations and their impact on regional ocean currents, sea level and marine environmental conditions (WP A3.1); -- coupled modeling to investigate decadal fluctuations in the Atlantic overturning circulation, with the aim of understanding the role of regional and large-scale driving forces (wind, thermohaline) (WP A1.4). The Kiel observations, as well as our modeling systems and studies, are an important component of a sustainable, regional analysis system for ocean and climate.		
19. keywords Ocean circulation, MOC, climate change, decadal variability, Atlantic, Labrador Sea		
20. publisher	21. price	