

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Aufgabe 1

AP 1.3

Hauptziel des Vorhabens war die Quantifizierung und Vorhersage des Austausches von Wassermassen zwischen dem Europäischen Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik durch Dänemarkstraße und Färöer-Bank-Kanal und der damit verbundenen Wärmetransporte, sowie die Quantifizierung des Eintrages ambienten Wassers in die südlich der Schwellen absinkenden Overflow-Zungen mit Hilfe direkter Beobachtungen meso- und submesoskaliger Prozesse.

AP 2.3

Ziel des Projektes war es zu untersuchen, inwieweit sich die potentielle Vorhersagbarkeit der nordatlantischen Ozeanzirkulation unter Einfluss der globalen Erwärmung verändert. Die Untersuchung wurde in zwei Teile gegliedert: (i) die Untersuchung des mittleren Klimazustands und der Klimavariabilität im 20. und 21. Jahrhundert und (ii) die Untersuchung der Vorhersagbarkeit im 20. und 21. Jahrhundert.

AP 2.4

Hauptziel war es den Realismus einer aktuellen Grenzschichtparametrisierung durch Datenassimilation zu optimieren und eine Synthese hydrographischer Daten zu erstellen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Analyse der bestimmten diapyrnischen Vermischungskoeffizienten und der Bestimmung der dahinterliegenden physikalischen Mechanismen.

AP 3.3

Variabilität und Trend des Meeresspiegels im Nordatlantik für die präindustrielle Vergangenheit, die Gegenwart und Szenarien für die Zukunft sollten mithilfe eines hochauflösenden dynamischen Ozeanmodells untersucht werden. Anfangs- und Randbedingungen werden durch Ergebnisse eines Klimamodells des MPI bereitgestellt. Die Ergebnisse sollen mit denen des Klimamodells verglichen werden. Mithilfe von Linearen Inversen Modellen soll die Vorhersagbarkeit des Meeresspiegels aufgrund seiner natürlichen Variabilität untersucht werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

AP 1.3 Zur Bestimmung der Overflow-Transporte und der hydrographischen Eigenschaften der Wassermassen werden autonome verankerbare Profilstrommesser sowie Messgeräte mit Temperatur und Leitfähigkeitssensoren eingesetzt. Für kurzfristige Experimente werden vom Schiff aus gefierte Mess-Systeme als auch autonome Unterwasser Vehikel (AUV) genutzt, mit denen neben den klassischen Parametern auch Mikrostruktursonden zur Bestimmung der Dissipation betrieben werden können. Die Forschungsschiffe werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Helmholtz Gemeinschaft zur Verfügung gestellt, ebenso wie das AUV. Die anderen eingesetzten Mess-Systeme stammen aus der Grundausstattung der Universität Hamburg bzw. wurden in verschiedenen Drittmittelprojekten eingeworben.

AP 2.3 Die Modellsimulationen für das 20. Jahrhundert und die Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert (bzw. bis zum Jahr 2300) konnten aus der Suite der am MPI-M erstellten CMIP5 Experimente verwendet werden. Die neuen Ensemble-Vorhersage-Experimente für das 20. und 21. Jahrhundert wurden mit dem CMIP5-Setup des MPI-M Klimamodells erstellt. Es handelte sich dabei um das ‚low resolution‘ ECHAM6/MPI-OM LR Setup. Das Setup erfordert, dass die Rechnungen auf dem Hochleistungsrechner des DKRZ erfolgen. Da das Setup dort aber bereits implementiert war, konnte mit zwei kleinen Ensemble-Sets begonnen werden, die dann nach technischen Möglichkeiten und Ressourcenverfügbarkeit erweitert wurden.

AP 2.4 Zur Bestimmung der diapkyknischen Vermischung wird ein Synthesystem eingesetzt, bei dem durch Minimierung der Abweichungen zwischen Ozeanmodell und hydrographischer Daten Modellparameter angepasst werden. Das zum Einsatz kommende ECCO System wird seit Anfang 2000 von der Gruppe betrieben, so dass umfangreiche Erfahrungen vorhanden sind. Die Computerressourcen der Universität am Höchstleistungsrechenzentrum DKRZ sind essentiell für die Durchführung der zum Einsatz kommenden rechenintensiven Methode, die auf einem iterativen Näherungsverfahren beruht.

AP 3.3 Die hier durchgeführte wirbelauflösende Modellierung des Nordatlantiks benötigt weitgehende Erfahrung im Betrieb des Modells, dem Setup für das konkrete Experiment und der Auswertung der Modellergebnisse und, bedingt durch die hohe Auflösung des Modells, hohe Anforderungen an notwendige Rechenzeiten und Speicherkapazität gestellt. Für die Modellierung wurde deshalb, wie in AP 2.4, auf ECCO und damit die langjährigen Erfahrungen mit diesem System in unserer Gruppe zurückgegriffen und es wurden die Computerressourcen des DKRZ genutzt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

AP 1.3 Während des Projektzeitraums wurden von unserer Seite insgesamt drei projektbezogene Seereisen durchgeführt, bei denen die Transport-Verankerungs-Arrays bedient wurden. Auf weitere Fahrten der isländischen und färingischen Kollegen wurden die restlichen See-Arbeiten durchgeführt. Dabei musste an einer notwendigen Korrektur der Transportdaten gearbeitet werden, da sich herausgestellt hatte, dass ein Teil der verwendeten Strömungsmesser in Bodennähe starke Abweichungen zeigen. Dieses betrifft auch einen Teil der im Rahmen des Vermischungsexperiments ausgelegten Verankerungen, so dass hier bisher im Wesentlichen nur die hydrographischen Daten ausgewertet werden konnten. Parallel zur Bearbeitung der in-situ Daten wurden die Modellstudien und die statistische Analyse mit der autoregressiven Methode durchgeführt.

AP 2.3 Begonnen wurde mit der Analyse der Veränderungen des mittleren Klimazustands und des Jahresgangs der AMOC und des MHT. Hierzu wurden vorhandene CMIP5 Experimente in MPI-ESM herangezogen. Gleichzeitig wurde mit der Generierung der Ensemble-Vorhersage-Experimente für den heutigen und zukünftigen Klimazustand in MPI-ESM begonnen. Da hierbei das bestehende Modellsetup des MPI-ESM genutzt wurde, konnte direkt mit der Erstellung des Ensembles begonnen werden. Nach Abschluss der Analysen zum mittleren Klimazustand und des Jahresgangs wurde basierend auf den ersten Ergebnissen mit der Analyse der Vorhersagbarkeit begonnen. Für das zuerst generierte Ensemble für den heutigen Klimazustand basierend auf dem MPI-M CMIP5 Assimilationslauf konnte keine direkte Vergleichbarkeit zu dem in der Klimaprojektion generierten Ensemble sichergestellt werden. Aus diesem Grund wurde ein neues Ensemble für den heutigen Klimazustand im CMIP5 historischen Lauf erweitert mit RCP4.5 generiert. Der restliche Zeitraum wurde zur Auswertung der Vorhersagbarkeitsveränderungen genutzt.

AP 2.4 Zu Beginn des Vorhabens wurden Synthese mit der neu erstellten höheraufgelösten GECCO2 Konfiguration durchgeführt. Hierbei wurde der Parameterraum im Vergleich zu den vorangegangenen Arbeiten von Liu et al (2012) um relevante Koeffizienten der Vermischungsparametrisierung erweitert. Ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des Modells resultierte aus der Anpassung der kritischen Richardsonzahl. Im Rahmen der Auswertung der diapkyknischen Vermischung fiel eine deutliche Erhöhung der Vermischung in der äquatorialen Thermokline auf. Da erhöhte Vermischungswerte bisher nur in dem oberen Teil der Thermokline dokumentiert waren, widmete sich der Rest der Laufzeit der unabhängigen Validierung der Vermischung mit Hilfe von hochauflösenden Argo Profilen und dem Verständnis der physikalischen Prozesse.

AP 3.3 In der Anfangsphase stand die Vorbereitung der durchzuführenden Läufe des hydrodynamischen Ozeanmodells im Vordergrund. Die wesentliche Arbeit bestand dabei in der Bereitstellung der Eingangsdaten in Form von Anfangs- und Ozean-Randbedingungen, sowie der atmosphärischen Antriebsdaten. Die zu erwartende Inkonsistenz der zu verwendenden Daten des Klimamodells mit der Dynamik unseres hochauflösenden Ozeanmodells erforderte eine Korrektur

des Inputs, um Anpassungen, insbesondere in Form von Drift, während der Modellläufe zu minimieren. Dies war insbesondere angezeigt, da der durch die hohe Auflösung bedingte hohe Ressourcenbedarf pro gerechneten Modellzeitraum nur die Modellierung kurzer Zeitscheiben erlaubte. Die Auswertung der Modellergebnisse und Vergleich mit den Ergebnissen aus der Klimamodellierung erfolgte etwa ab Mitte der Projektzeit. Der Zeitraum während der Modellläufe war überwiegend dem zweiten Baustein des Arbeitspakets gewidmet: dem Aufsetzen, Trainieren und Anwenden von Linearen Inversen Modellen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

AP 1.3 Die langen Zeitserien der Transporte in der Dänemarkstraße und im Färöer-Bank-Kanal waren seit 1996 in einem Sonderforschungsbereich der DFG, in mehreren EU Projekten und auch im BMBF Projekt Nordatlantik gewonnen worden. Zirkulationsdaten aus einem numerischen Modell standen aus den Arbeiten des BMBF Projekts Nordatlantik zur Verfügung.

AP 2.3 Für den derzeitigen Jahresgang der AMOC und des MHT konnte auf verschiedene Analyse angeknüpft werden, ebenso für die zukünftige Entwicklung der AMOC/des MHT. Letztere Analyse war jedoch nur für Jahresmittel bekannt; damit konnte in die Forschungsfrage des Projektes (mögliche Änderungen des Jahresgangs) direkt eingestiegen werden. Für die Untersuchung möglicher Änderungen der Vorhersagbarkeit konnte ebenfalls an bestehende Untersuchungen zur derzeitigen Vorhersagbarkeit angeknüpft werden; für die bessere Vergleichbarkeit von derzeitigen und zukünftigen Klimavariabilität wurden jedoch neue Hindcast-Ensemble erstellt, für die auf das publizierte und in MPI-ESM implementierte Breeding-Verfahren zurückgegriffen werden konnte.

AP 2.4 Die Arbeitsgruppe zu AP 2.4 waren bereits am ersten Antragszeitraum des Nordatlantik-Projekts beteiligt, in dessen Rahmen das Synthesystem bereits auf Vermischungsparameter erweitert wurde.

AP 3.3 Für die Modellierung des Nordatlantiks wurde auf ein in unserer Gruppe vorhandenes Setup des GECCO-Modells zurückgegriffen, das im Rahmen des Nordatlantik-Projekts entwickelt wurde (Serra et al, 2010). Modellergebnisse aus einer bereits durchgeführten Integration dieses Modells konnten für die Korrektur der Eingangsdaten der in diesem Projekt durchgeführten Läufe verwendet werden. Für die Erzeugung der Linearen Inversen Modelle wurde auf die in der Literatur vorhandene Theorie (Penland 1989) zurückgegriffen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

AP 1.3, AP 2.3, AP 2.4, AP 3.3

AP 1.3 Die Arbeiten zu den Transportarrays wurden im Rahmen der EU Projekte THOR und NACLIM mit Kollegen aus Island, den Färöer Inseln und Großbritannien durchgeführt. Bei den Vermischungsstudien hatten wir eine Kooperation mit dem GEOMAR Helmholtz Zentrum für Ozeanforschung.

Im AP2.3 gab es eine intensive Zusammenarbeit mit dem MPI-M (Arbeitsgruppe von Wolfgang Mueller zu dekadischen Klimavorhersagen) und die intensive Zusammenarbeit mit Daniela Domeisen (zunächst MarexSpectron, jetzt GEOMAR) wurde auch über ihren Wechsel von Hamburg nach London und anschließend Kiel aufrecht erhalten.

II. Eingehende Darstellung

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

Zu Aufgabe AP 1.3

Berechnung der Overflow-Transporte mit Hilfe verankerter Profilsstrome

Ein Teil der für die Overflow-Transportmessungen in der Dänemarkstraße gewonnenen Strömungsprofile, die mit den seit etwa 10 Jahren verwendeten 75 kHz akustischen Doppler-Profilstrome (Long Ranger ADCPs) gewonnen wurden, weisen erhebliche Messfehler im bodennahen Bereich auf. Hintergrund ist neben einer geringen Dichte an reflektierenden Partikeln der harte, felsige Untergrund, der Energie aus den Nebenkeulen der akustischen Signale

reflektiert, wenn sich die Verankerung in einer starken Strömung zur Seite neigt. Die Reflexion vom Boden stammt von einer unbewegten Quelle, weist daher also keine Doppler-Verschiebung auf und stört die Geschwindigkeitsmessung hin zu niedrigen Werten. Diese Störung kann die Messungen bis zu einer Höhe von 150 m oberhalb des Gerätes beeinflussen.

Mit Hilfe von Vergleichsmessungen mit Strömungsmessern, die in festen Landern eingesetzt wurden, konnte ein Modell entwickelt werden, das die verfälschten Bodenwerte auf Zeitskalen oberhalb von einigen Tagen korrigiert.



Abb.1.3.1: Einer der im Projekt neu angeschafften Verankerungsrahmen für ein 75 kHz Long Ranger ADCP, der auf der Reise P471-2 ausgelegt wurde. Die Konstruktion verhindert, dass die Nebenkeulen des akustischen Signals während der Messung den Boden erreichen und die Strömungsgeschwindigkeiten verfälschen. Außerdem schützt der Rahmen vor Eisdrift und Fischerei.

Die Obergrenze der Overflow-Schicht wurde für die Transportberechnungen bislang aus der Tiefe der maximalen Strömungsscherung abgeschätzt, da diese annähernd der Grenzschichttiefe entspricht. Im Sommer 2014 wurden verankerte Bodenecholote (PIES) geborgen, deren Messungen der Laufzeit eines akustischen Signals Rückschlüsse über die hydrographische Struktur der darüber liegenden Wassersäule erlauben. Die drei Jahre umfassende Zeitreihe hat gezeigt, dass die bisherige Methode mit Hilfe der Strömungsscherung im Mittel einen sehr geringen Fehler erzeugt (0.03 Sv). Betrachtet man aber einzelne Tage, kann die verbesserte Transportberechnung mit Hilfe der Bodenecholote um bis zu 3 Sv von der Scherungsmethode abweichen.

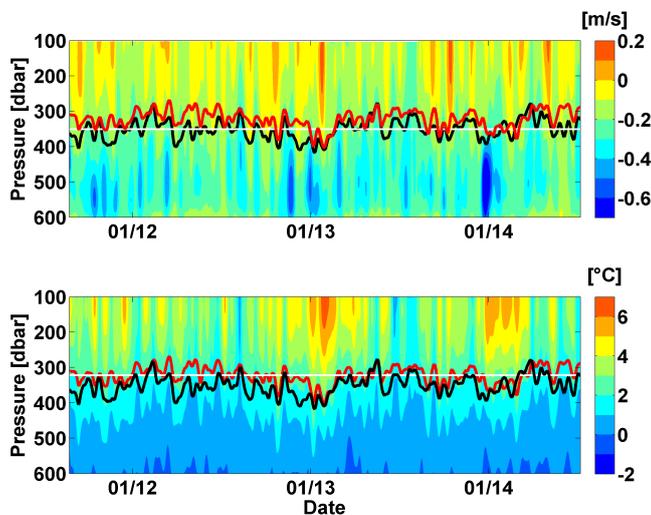


Abb.1.3.2: Hovmöller Plots der mit einem ADCP gemessenen Geschwindigkeiten (oben) und Temperaturprofile aus einer PIES Analyse bei Verankerung DS1 im tiefen Graben der Dänemarkstraße. Rote Kurve: Tiefe der 27.8 Isopykne; schwarz: Tiefe der maximalen Scherung.

In die Transportabschätzungen gingen bislang die Messdaten aus einem oder zwei verankerten Strömungsmessern ein. Die gemessenen Geschwindigkeiten werden über eine Fläche interpoliert und über die Tiefe integriert, wobei die etablierte Methode seit Jahren nicht verändert wurde, obwohl sie einige bekannte Unsicherheiten enthält. Um diese Methode zu verbessern, haben wir im Sommer 2014 ein erweitertes Verankerungsarray bestehend aus 5 Verankerungen ausgelegt, um die räumlichen Kohärenzen der Strömung zu erfassen und die Fehler der Interpolation zu minimieren. Mit den Daten aus den 5 Verankerungen haben wir eine neue Korrelation zwischen Gesamttransport und der Strömung an den Zentralstationen ermittelt. Damit lassen sich auch rückwirkend die jetzt 20 Jahre lange Zeitserie korrigieren.

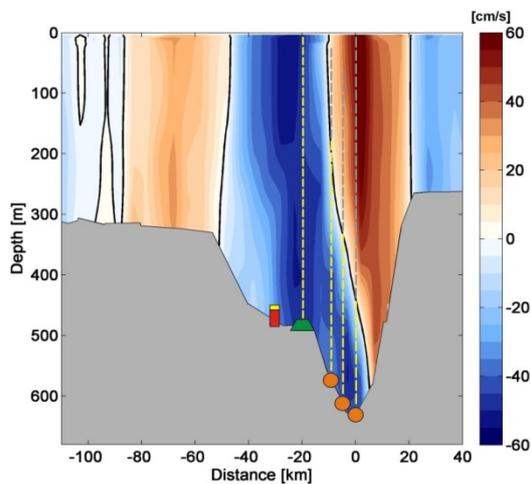


Abb.1.3.3: Strömungsgeschwindigkeit aus LADCP Messungen (cm/s, in Richtung der Passage gedreht) in der Dänemarkstraße im August 2015. Die starke südwärtsige Strömung des Overflow-Wassers an der tiefsten Stelle der Passage und am Hang in Richtung Grönland ist gut zu erkennen. Die Markierungen unten am Bild zeigen das ausgelegte erweiterte Verankerungsarray.

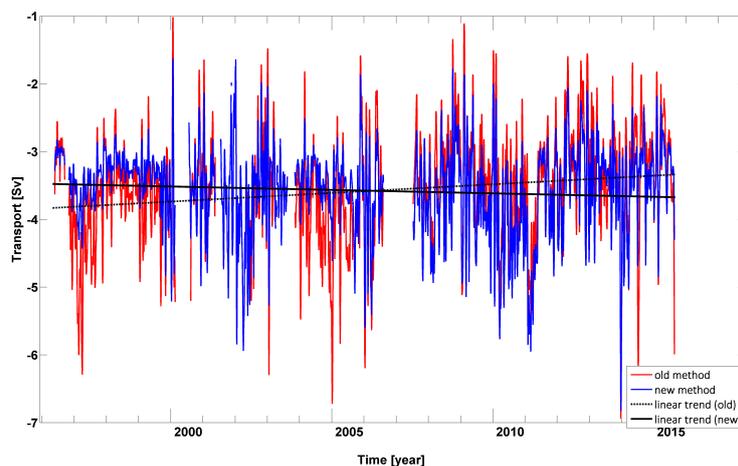


Abb.1.3.4 Zeitreihen der Overflow-Transporte in der Dänemarkstraße (schwarz), abgeschätzt von einem oder zwei an den Zentralpositionen verankerten Profilströmungsmessern. Die rote Zeitreihe zeigt die mit der alten Methode bestimmten Transporte, die blaue die Transporte, die mit den neuen Korrelationen bestimmt wurden. Bei dieser ist der früher abgeschätzte Trend mit einer Abnahme von 0.3 Sv in 10 Jahren nicht mehr zu erkennen.

Overflow-Transporte auf saisonalen und interannualen Zeitskalen

Die an den seit 1996 besetzten Zentralpositionen in der Dänemarkstraße und im Färöer-Bank-Kanal seit 1996 durchgeführten Strömungsmessungen mit Verankerungen wurden im Berichtszeitraum erfolgreich fortgesetzt. Die neuen Daten bestätigen die Ergebnisse von Jochumsen et al. (2012) für den Jahresgang, dessen Bedeutung in der Dänemarkstraße sehr gering ist (etwa 5% der Varianz). Im Färöer-Bank Kanal hingegen variiert die Overflow-Stärke saisonal, wobei der Jahresgang selbst auch unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Bisher waren spektrale Analysen der Overflow-Zeitreihen dadurch erschwert, dass immer wieder Verankerungsverluste auftraten und daher besonders die Zeitreihe aus der Dänemarkstraße von Lücken durchsetzt war. In dem Projekt wurde nun eine statistische Technik (Singular Spectral Analysis – SSA) eingesetzt, mit deren Hilfe die Lücken in den Zeitreihen auf eine im spektralen Bereich konsistente Weise gefüllt werden konnten. Für die Overflow-Transporte konnte so die spektrale Energie im interannualen Bereich ermittelt werden, die bei Perioden zwischen 3 und 5 Jahren und bei etwa 10 Jahren signifikante Maxima zeigt. Erste Analysen deuten darauf hin, dass die Ursachen für diese Perioden bei Schwankungen im atmosphärischen Forcing liegen. Die 10-Jahres Periode konnte auch in weiteren beobachteten und modellierten Zeitreihen gefunden werden, z.B. in der Labradorsee (Zusammenarbeit mit TP 2.2). Um die multi-dekadische Variabilität genauer zu untersuchen sind längere Zeitreihen vonnöten. Die 3-5 Jahres Variabilität hingegen kann mit den oben erwähnten statistischen Methoden vorhergesagt werden (s. unten).

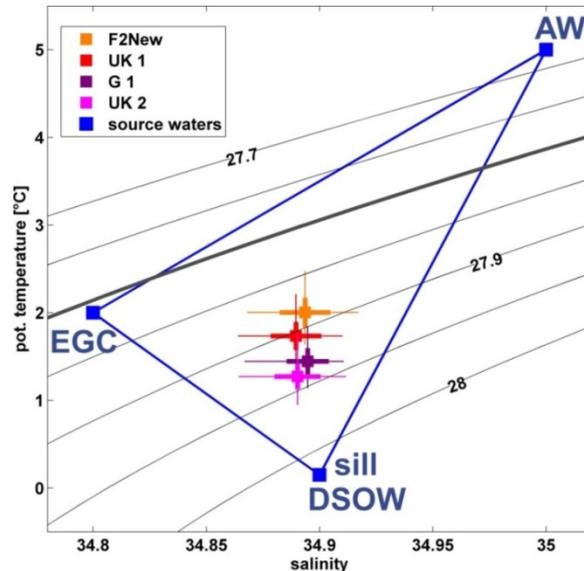
Vermischung und Entrainment

Südlich des Grönland-Schottland Rückens verändern sich die hydrographischen Eigenschaften der absinkenden Overflow-Zungen durch Vermischungsprozesse. So sind die Anomalien, die in den Overflow-Schichten des tiefen westlichen Randstroms gemessen werden, nicht allein durch Produktionsschwankungen des Europäischen Nordmeers zu erklären, sondern mindestens ebenso sehr verursacht durch die eingemischten Wassermassen. In einer Studie zur Veränderung der Wassermassen in der Overflow-Zunge südlich der Schwelle der

Dänemarkstraße konnten Jochumsen et al. (2015) zeigen, dass hauptsächlich zwei Wassermassen zur Vermischung beitragen: warmes, salzreiches Atlantisches Wasser und salzarmes Wasser aus dem Ostgrönlandstrom. Eine Mischung aus diesen zwei Umgebungswassern mit dem aus dem Nordmeer ausströmenden Overflow-Wasser (DSOW) ergibt die im tiefen Randstrom gemessenen hydrographischen Eigenschaften (hier betrachtet für ein Verankerungsarray etwa 500 km stromabwärts der Dänemarkstraße bei Angmagssalik). Die Modifikation von DSOW ist besonders stark in den ersten 200 km südlich der Schwelle, wo Stirring durch meso-skalige Wirbel sowie turbulente diapycnische Vermischung an der Oberkante der Zunge die entscheidenden Rollen spielen (Voet und Quadfasel, 2010; Paka et al., 2013; Zhurbas et al., 2015). Der Eintrag von Salzanomalien durch die Vermischungsprozesse ist in diesem Gebiet prägnant; die haline Variabilität von DSOW wird zwischen der Schwelle der Dänemarkstraße und der Position bei Angmagssalik stark verändert, so dass gemessene Zeitreihen unkorreliert sind. Auch die spektralen Eigenschaften der Overflowströmungen ändern sich auf dieser Wegstrecke der Strömung hin zu Energie auf längeren Zeitskalen (Fischer et al., 2014).

Abb.1.3.5: Mischungsdreieck der Wassermassen, die zu den hydrographischen Eigenschaften der Overflow-Schicht am Verankerungsarray bei Angmagssalik (F2New, UK1, G1, UK2) beitragen. Das Dreieck umspannt den Bereich, in dem die Mischprodukte der drei Quellwasser (blaue Punkte) liegen müssen. AW: Atlantisches Wasser; EGC: Wasser im Ostgrönlandstrom; sill DSOW: Dänemarkstraßen-Overflow-Wasser an der Schwelle der Dänemarkstraße.

Bild aus Jochumsen et al. (2015).



In einem dezidierten Vermischungsexperiment etwa 150 km stromabwärts der Dänemarkstraße wurden im Spätsommer 2012 über einen Zeitraum von zwei Monaten zehn vertikal und horizontal hochauflösende Strömungsmesser und Hydrographie-Verankerungen ausgelegt. Weiterhin wurden am Anfang und Ende der Periode von zwei Schiffen aus hydrographische und Mikrostrukturmessungen durchgeführt. Weitere Turbulenzmessungen stammen von einem autonomen Unterwasser Vehikel (Schaffer et al., 2016). Mit Hilfe dieser kleinräumigen Messungen im tiefen Overflow konnte die Rolle mesoskaliger Wirbel für die horizontale und vertikale Einmischung von Umgebungswasser nachgewiesen werden. Ein weiterer Prozess zur Erzeugung von Vermischung ist die Wechselwirkung der mittleren Strömungen mit kleinräumigen Anomalien der Bodentopographie.

Abschätzung der Vorhersagbarkeit des Overflows mit Hilfe statistischer Methoden.

Um aus den langen Zeitserien der Overflowtransporte Vorhersagen zu erhalten, wurde Singular Spectrum Analysis (SSA) Methoden eingesetzt. Mit SSA wird einer Zeitreihe in zeitliche EOFs zerlegt, so dass harmonische oder quasi-harmonische Komponenten des Signals von langfristigen Trends getrennt werden. Mit der Annahme, dass diese EOFs auch für die künftige Evolution der Zeitreihen gilt, kann man die entsprechenden PCs mit Hilfe ARMA Modellen vorhersagen. Der Vorteil in dieser Zerlegung ist, dass die Vorhersagen der periodischen Einzelkomponenten robuster sind als die Vorhersage derer Summe. Die Varianz der Vorhersage ist weniger gedämpft, und sie wird auf längere Zeitskalen nicht unbedingt vom linearen Trend dominiert, da es nicht angenommen wird, dass einen solchen Trend überhaupt gibt.

Die Vorhersagen in Abb. 1.3.6 sind noch nicht endgültig, da die verwendeten Zeitreihe für die Dänemarkstraße noch nicht mit der oben beschriebenen neuen Methode korrigiert wurde, und deren Analyse noch nicht wiederholt werden könnte. Für die Fluktuationen sind aber keine große Änderungen zu erwarten. Die interannuellen Schwankungen der Overflows in DS und FBC haben Zeitskalen zwischen 2 und 4 Jahren, und sind in Antiphase bis 2005; die bleiben dann in Phase bis zu Ende der Beobachtungen, ein Verhältnis dass die statistischen Vorhersagen weiter projizieren. Am Ausgang der Labradorsee (LNADW) ist dagegen die dominante Zeitskala deutlich länger, um die 9 Jahre. Der Vorhersage-Skill für den DSO ist

weniger als 2 Jahre, für FBC und LNADW von etwa 4 Jahre. Der reduzierte Skill für den DSO ist vermutlich durch den Regimewechsel um 2005 begründet.

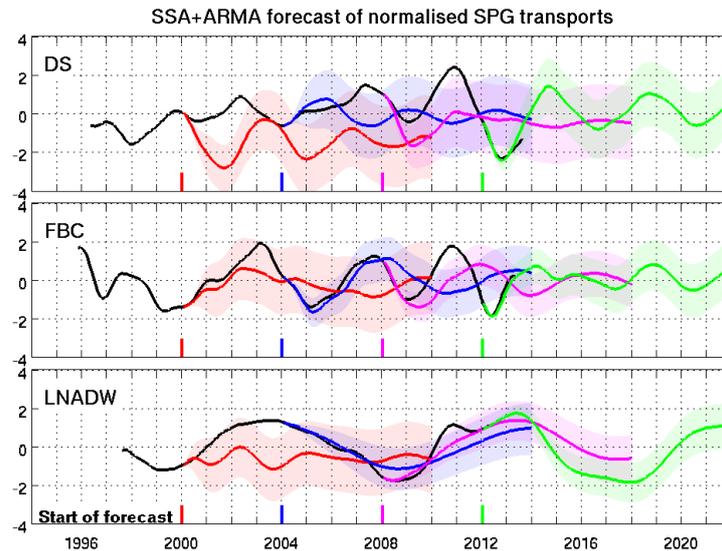


Abb. 1.3.6: SSA Rekonstruktion der tiefen Transporte (schwarz) in der Dänemarkstraße (DS), Färöer-Bank-Kanal (FBC) und am Ausgang der Labradorsee bei 53 N (LNADW), sowie deren Vorhersagen, von unterschiedlichen Startzeiten gerechnet (2000, rot; 2004, blau; 2008, magenta; 2012, grün)

Zu Aufgabe AP 2.3

(i) Untersuchung des mittleren Klimazustands und der Klimavariabilität im 20. und 21. Jahrhundert, und (ii) die Untersuchung der Vorhersagbarkeit im 20. und 21. Jahrhundert

(i) Änderungen im Jahresgang der Atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation und des meridionalen Wärmetransports

AP 2.3 ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil wurden Änderungen des mittleren Klimazustands und der Klimavariabilität in Klimaprojektionen untersucht. Die Analyse der CMIP5 Experimente zeigt eine mittlere Änderung des Klimazustandes in den Klimaprojektionen, besonders im RCP8.5 Szenario. Wir finden eine starke Erwärmung der Oberflächentemperatur, insbesondere auf der Nordhemisphäre im Szenario RCP4.5 und RCP8.5, zusammen mit einer Verschiebung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) hin zu überwiegend positiven NAO-Zuständen. Im stärksten Szenario RCP8.5 zeigt die atmosphärische Zirkulation eine nordwärtige Verschiebung des Windfeldes um etwa fünf Grad bis ins 23. Jahrhundert, die zu einer nordwärtigen Verschiebung der atlantischen Ozeanzirkulation führt. Die Abnahme der Tiefenwasserbildung und des zonalen Dichtegradienten im RCP8.5 Szenario führt zu einer Abnahme von 30-50% der AMOC und des meridionalen Wärmetransports zum Ende des 23. Jahrhunderts (Abb.1a-b). Ähnliche, jedoch weniger stark ausgeprägte Veränderungen der AMOC und des meridionalen Wärmetransportes lassen sich auch im RCP4.5 finden.

Gleichzeitig mit der Abnahme der meridionalen Zirkulation und des meridionalen Wärmetransports, weisen die CMIP5 Experimente Veränderungen des mittleren Jahresganges der AMOC (nicht gezeigt) und des meridionalen Wärmetransportes für die ferne Zukunft im RCP8.5 Szenario (2200-2300) auf (Abb.1c-d). Die Zerlegung der AMOC in geostrophischen und Ekman Transport zeigt, dass zeitliche Verschiebungen des AMOC-Jahresganges aus Verschiebungen im Ekman und geostrophischen Transport resultieren, mit Verschiebungen sowohl der jeweiligen saisonalen Minima und Maxima als auch der Minima und Maxima der AMOC von 1-4 Monaten. In ähnlicher Weise zeigt der MHT Jahresgangsänderungen. Die Zerlegung des MHT in Overturning- und Gyre-Komponente zeigt, dass die Overturning-Komponente Jahresgangsänderungen im tropischen und subtropischen Nordatlantik dominiert, während die Gyre-Komponente zu Jahresgangsänderungen im subpolaren Nordatlantik führt.

Änderungen im Jahresgang der AMOC (Abb.2a-c) und des MHT (Abb.2d-f) mit zeitlichen Verschiebungen und Änderungen in der Jahreszeitenamplitude ergeben sich auch für die nahe Zukunft im 21. Jahrhundert in RCP4.5 und RCP8.5 (Abb.2), jedoch in abgeschwächter Form im Vergleich zum 23. Jahrhundert. Es zeigen sich besonders im subtropischen Nordatlantik zwischen 20°N und 30°N sowie im subpolaren Nordatlantik um 50°N die stärksten Änderungen im Jahresgang.

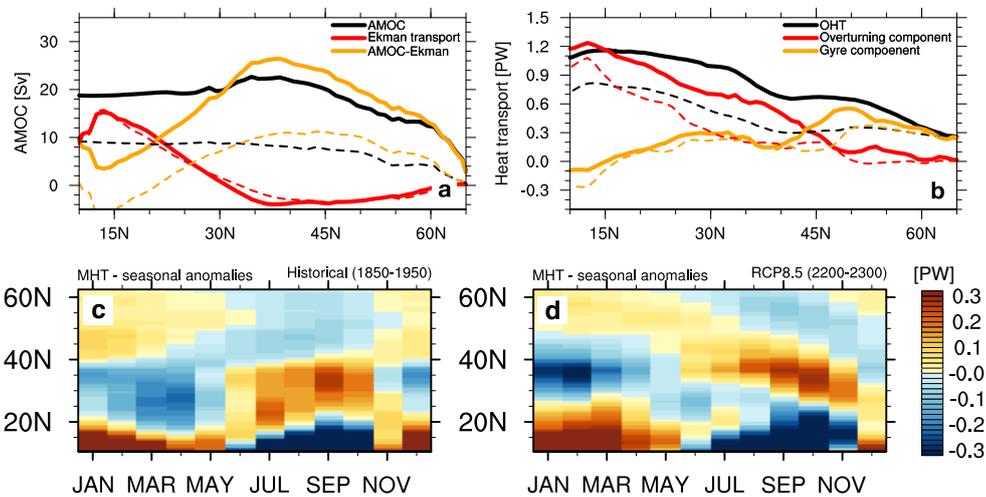


Abb. 2.3.1: (a&b): Abschwächung der AMOC (links, in Sv) und des meridionalen Wärmetransportes (rechts, in PW) vom Zeitraum 1850-1950 (durchgezogene Linie) zum Zeitraum 2200-2300 (gestrichelte Linie) im RCP8.5 Szenario. Die AMOC (schwarz) ist zerlegt in Ekman Transport (rot) und geostrophischen Transport (AMOC-Ekman, gelb). Der meridionale Wärmetransport (schwarz) ist zerlegt in Overturning-Komponente (rot) und Gyre-Komponente (gelb). (c&d): Jahresgang des meridionalen Wärmetransportes (in PW) in der historischen Simulation (1850-1950, c) und in RCP8.5 (2200-2300, d). c&d zeigen Anomalien des Jahresgangs relativ zum zeitlichen Mittelwert an jeder Breite.

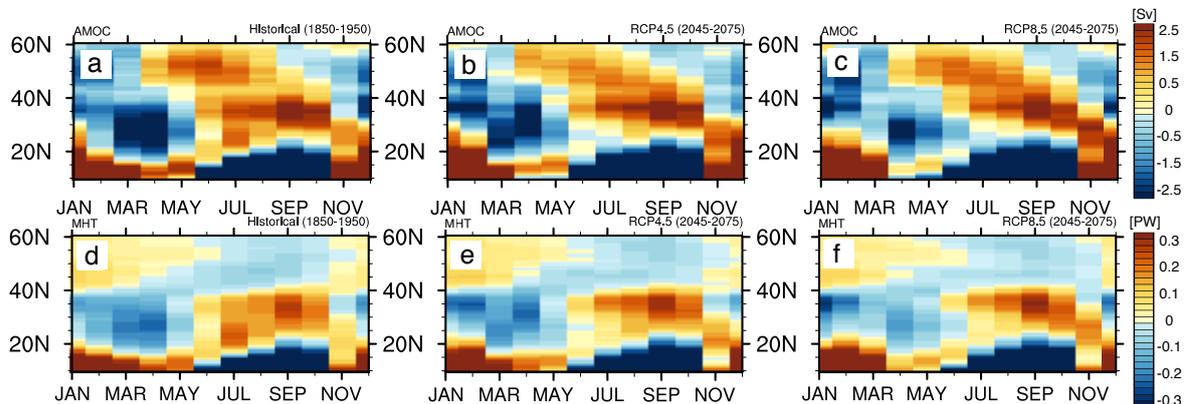


Abb. 2.3.2: Jahresgang der Atlantischen meridionalen Umwälzzirkulation (AMOC, in Sv) und des meridionalen Wärmetransportes (MHT, in PW) in der historischen Simulation (1850-1950, a&c) und in RCP8.5 (2200-2300, b&d). Gezeigt sind Anomalien des Jahresgangs relativ zum zeitlichen Mittelwert an jeder Breite.

(ii) Änderungen der Vorhersagbarkeit der AMOC und des MHT im 21. Jahrhundert

Im zweiten Teil wurden Veränderungen der potentiellen Vorhersagbarkeit der AMOC und des MHT unter Einfluss der globalen Erwärmung auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen untersucht. Dazu wurden zwei Ensemble-Vorhersage-Experimente mit 20 Startjahren und 10 Ensemble-Mitgliedern pro Startjahr in MPI-ESM erstellt. Für den derzeitigen Klimazustand wurde der CMIP5 historische Lauf, der mit dem RCP4.5 Szenario erweitert wurde (HIST_{ens}) herangezogen, für einen zukünftigen Klimazustand das RCP4.5 Szenario (RCP_{ens}). HIST_{ens} umfasst den Zeitraum 1995-2023, RCP_{ens} den Zeitraum 2045-2073. Veränderungen der Vorhersagbarkeit wurden mit Hilfe des Anomalie-Korrelationskoeffizienten (Abb. 3-4), des Root-Mean-Square-Errors (RMSE, nicht gezeigt), der Reliability (nicht gezeigt) und des Brier Skill Scores (BSS) der Hindcasts für

Anomaly correlation coefficient AMOC

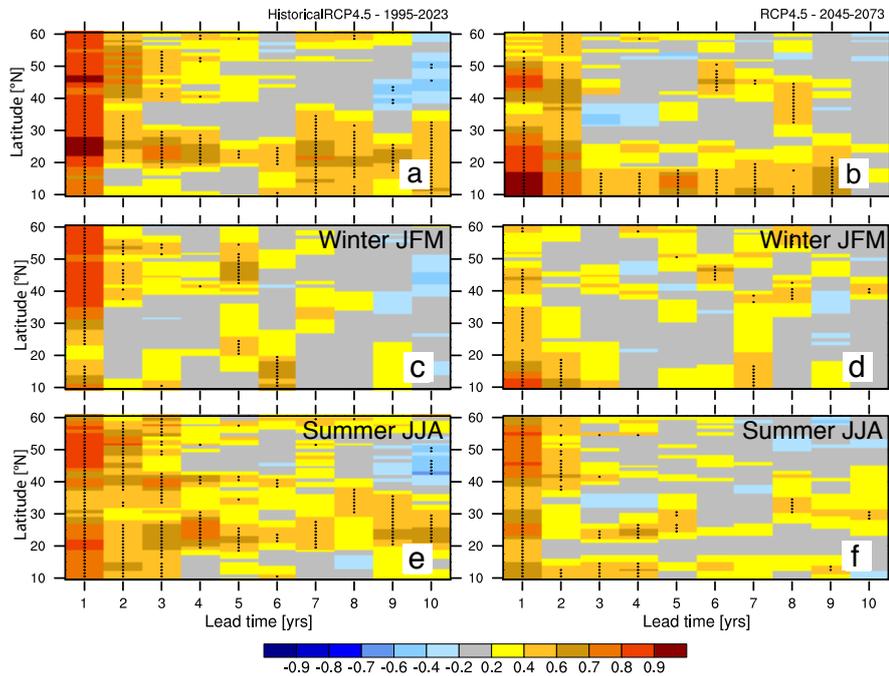


Abb. 2.3.3: Anomalie-Korrelationskoeffizient der AMOC im Nordatlantik (10°N - 60°N) für Leadjahre 1-10 für den gegenwärtigen Klimazustand im historischen Ensemble-Vorhersageexperiment (1995-2023, **a,c,e**) und für den zukünftigen Klimazustand in RCP4.5 (2045-2073, **b,d,f**). Anomalie-Korrelationen für Jahresmittelwerte (**a-b**), Wintermittelwerte (JFM, **c-d**) und Sommermittelwerte (JJA, **e-f**). Signifikante Korrelationen sind gepunktet markiert.

Anomaly correlation coefficient MHT

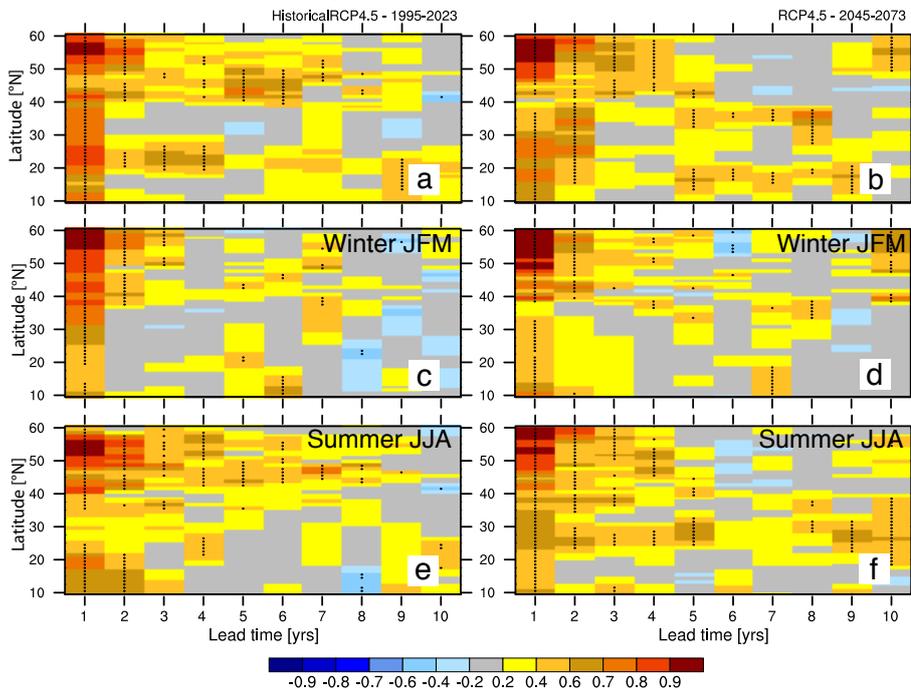


Abb. 2.3.4: Anomalie-Korrelationskoeffizient des MHT im Nordatlantik (10°N - 60°N) für Leadjahre 1-10 für den gegenwärtigen Klimazustand im historischen Ensemble-Vorhersageexperiment (1995-2023, **a,c,e**) und für den zukünftigen Klimazustand in RCP4.5 (2045-2073, **b,d,f**). Anomalie-Korrelationen für Jahresmittelwerte (**a-b**), Wintermittelwerte (JFM, **c-d**) und Sommermittelwerte (JJA, **e-f**). Signifikante Korrelationen sind gepunktet markiert.

Jahresmittel (Abb. 3a-b, 4a-b) und saisonale Mittel (Abb. 3c-f, 4c-f) untersucht.

Die Analyse der Ensemble-Vorhersage-Experimente hat gezeigt, dass die potentielle Vorhersagbarkeit der AMOC und des MHT sich besonders an Breitengraden mit großen Änderungen im Jahresgang ändert. Die AMOC weist in HIST_{ens} eine längere Vorhersagbarkeitszeit im subtropischen Nordatlantik als im subpolaren Nordatlantik auf (Abb. 3). Dies ist bedingt durch die Vorhersagbarkeit des geostrophischen Transportes und der Vorhersagbarkeit von Sommermitteln. Vom derzeitigen Klimazustand in HIST_{ens} zum zukünftigen Klimazustand in RCP_{ens} verringert sich

der Anomalie-Korrelationskoeffizient (Abb. 3) und gleichzeitig die Reliability der AMOC im subtropischen und subpolaren Nordatlantik. Die verringerte Vorhersagbarkeit in RCP_{ens} resultiert hauptsächlich aus der verringerten Vorhersagbarkeit der Sommermittelwerte im subtropischen Nordatlantik (Abb.3e-f). Im MHT zeigt der subpolare Nordatlantik für den derzeitigen Klimazustand in HIST_{ens} längere Vorhersagbarkeit im Vergleich zum subtropischen Nordatlantik. Von HIST_{ens} hinzu RCP_{ens} verringert sich der Anomalie-Korrelationskoeffizient im subtropischen Nordatlantik und erhöht sich im subpolaren Nordatlantik. Außerdem zeigt der MHT in RCP_{ens} längere Vorhersagezeiten im subpolaren Nordatlantik im Vergleich zu HIST_{ens} (Abb. 4). Die Reliability und der BSS sind im subtropischen und subpolaren Nordatlantik von HIST_{ens} zu RCP_{ens} verringert. Sommer- und Wintermittel zeigen jedoch eine gewisse Reliability der Vorhersagen im SPG. Die generelle Verringerung der Vorhersagbarkeit des MHT resultiert aus Änderungen in allen Jahreszeiten.

Zu Aufgabe AP 2.4:

Bestimmung von Parametern des Grenzschichtmodells durch Assimilation von Ozeandaten

Zu Anfang des Projekts wurden noch die Resultate der letzten Phase des Nordatlantik Projekts ausgewertet. Die dort durchgeführte Bestimmung des Schichtdickenadvektionsparameters stellt wissenschaftlich noch Neuland da. Zwar wurden von Eden et al (2007) bereits Verteilungen aus hochauflösenden Modellläufen bestimmt, jedoch blieb der physikalische Mechanismus noch weitestgehend im Dunkeln. Im Rahmen der Auswertung der Muster wurde ein Zusammenhang mit der Topographie offenkundig. Eine Parametrisierung analog des Holloway (1987) beschriebenen Neptun Effekts erklärt in den hohen Breiten einen Großteil der räumlichen Variationen (Liu et al. 2014). Anders als die Maximum-Entropielösung von Holloway wirkt die Schichtdickenadvektion nicht auf die Impuls- sondern in den Tracergleichungen und führt dort zur Anhebung der Isopyknen über unterseeischen Kuppen. Der Effekt wird als Interaktion zwischen mesoskaligen Wirbeln und Topographie beschrieben. Damit eine solche zustande kommen kann sind jedoch tiefreichende Wirbel notwendig. Diese sind in relativ barotrope Regionen präsent, weshalb der Effekt auf die höheren Breiten beschränkt bleibt. Die Wirkungsweise der Parameterisierung sowie die Interaktion zwischen Wirbel und Topographie wurde unabhängig in idealisierten grobauflösenden bzw. hochauflösenden Simulationen bestätigt.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde die höheraufgelöste GECCO2 Version der Ozeansyntheseumgebung um die Bestimmung der Parameter des KPP-Grenzschichtmodells erweitert. Diese waren im Einzelnen die kritische und bulk Richardsonzahl, bzw. Parameter, die das Profil der Vermischung in der Grenzschicht sowie im Inneren unterhalb der Grenzschicht durch das Brechen interner Wellen und Doppeldiffusion bestimmen. Insgesamt schätzten wir mit 12 anderen Parametern, die in Liu et al (2012) beschrieben sind, 17 Parameter. Als wichtigster Parameter tritt die kritische Richardsonzahl sowie der Koeffizient der Vermischung im Inneren in Erscheinung, andere Parameter haben sich nur um wenige Prozent verändert

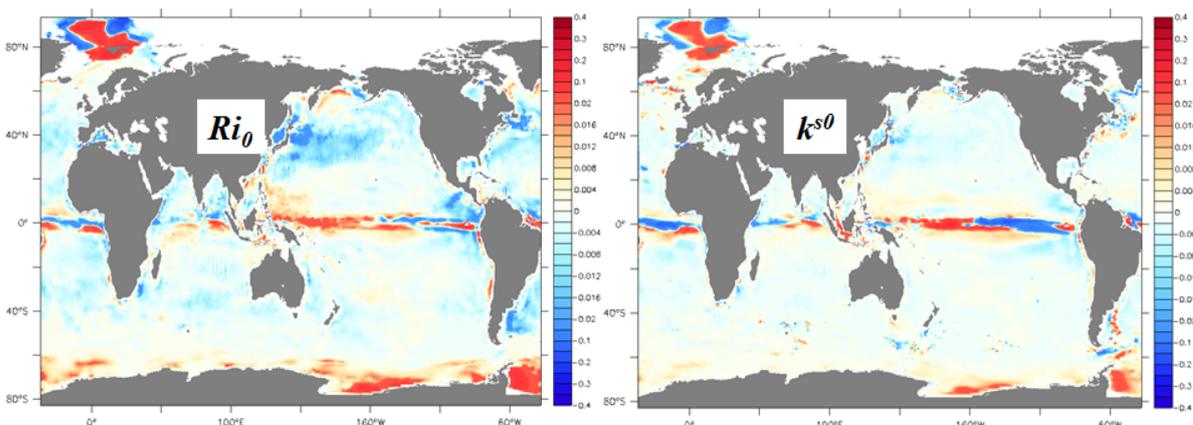


Abb. 2.4.1 Verhältnis der Parameteränderungen der vier Parameter zu ihren entsprechenden Hintergrundwerten.

Größere -Werte deuten auf höhere Vermischung in Regionen mit Scherungsinstabilität hin, während größere +Werte eine Verringerung der Instabilität bei gleichzeitig erhöhter Vermischung hindeuten.

Bei der Analyse der durch die Synthese bestimmten diapiknischen Vermischungskorrekturen fielen insbesondere erhöhte Werte in der äquatorialen Thermokline auf. Zur Untersuchung der physikalischen Ursachen wurde ein Large Eddy Simulation (LES) Modell verwendet, das von Moeng (1984) entwickelt und von Sullivan et al. (1996) verfeinert worden ist. Das Modell wurde mit horizontal homogen geschichteter Scherströmung entsprechend den Beobachtungen initialisiert.

Die LES produziert erfolgreich eine 20 m dicke Schicht (zwischen 80 und 100 m) mit verstärkter Turbulenz und hohen Dissipationsraten über dem Kern des Äquatorialen Unterstroms, die fast nicht durch die Flüsse der obere Schicht beeinflusst sind und fast unverändert in 110 m Tiefe während des simulierten 3-Tages-Simulationszeitraum bleiben. Diese Schicht ist der beobachteten upper core layer (UCL) vergleichbar, sie ist aber viel dünner als die Beobachtungen. Das LES-Modell kann die beobachtete Instabilität in der Auftriebsübergangsschicht somit erfolgreich produzieren, und erreicht in der UCL-Schicht den Beobachtungen vergleichbare Dissipationsraten, Diffusivitäten, Schichtungen und Scherungen. Die Instabilität, die im LES-Modell gefunden wurde, ist nicht vom Kelvin-Helmholtz Typ, weil die Richardson-Zahl anfangs weit über 0,25 liegt. Vielmehr ist ein asymmetrische Holmboe Instabilität wahrscheinlich. Jedoch stellte sich im Verlauf weiterer Analysen heraus, dass die Ergebnisse sensitiv gegenüber den Antriebstermen des LES-Modells sind, die als idealisiert und vermutlich nicht realistisch für die äquatoriale Thermokline angenommen waren. Hier sind in Zukunft neue Simulationen geplant.

Zur Analyse der erhöhten Vermischung wurden des Weiteren hochaufgelöste Argo Profile und Messungen der Tropical-Ozean und Atmosphäre (TAO) Verankerungen analysiert. Hierbei identifizieren wir eine große Anzahl Vermischungsereignisse bis in die untere Hälfte der Thermokline und der unteren Flanke des äquatorialen Unterstroms (EUC), insbesondere im Zeitraum Sommer bis Winter (Liu et al 2016). Diese tiefgreifenden Vermischungsereignisse treten häufiger und tiefer in Zeiten mit tropischen Instabilität Wellen (TIWs) als während solcher ohne auf. Auf Basis der Geschwindigkeitsmessungen der TAO Verankerungen wurden instabile Moden der Taylor–Goldstein Gleichung bestimmt, deren Verteilung und Häufigkeit die an Hand von Inversionen in den Profilen beobachteten Ereignissen entspricht. Es zeigte sich, dass die Vermischungsereignisse durch niedrigere Richardson Zahlen verursacht werden, für die Scherung der TIWs und des EUC wichtig sind.

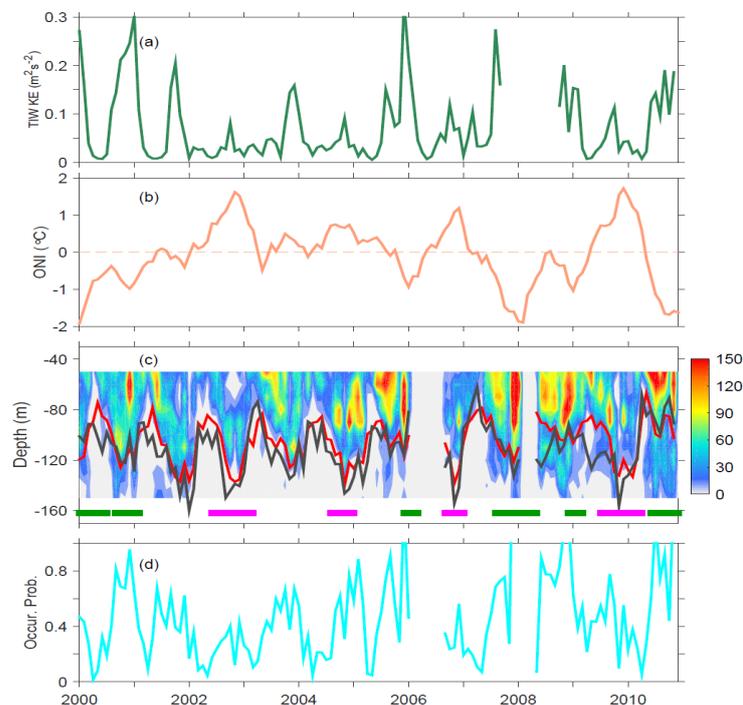


Abb. 2.4.2 Beziehung zwischen Instabilitäten, TIWs und großskaliger Prozesse. a, Monatliche TIW KE. b, Oceanische Niño Index (ONI), die Niño 3.4 (5 ° S-5 ° N, 170 bis 120 ° W) SST-Anomalie (1981-2010 bedeuten entfernt), berechnet aus Wasseroberflächentemperatur (OISST). Die gestrichelte Linie zeigt die Null. c, monatliche Anzahl instabiler Moden in 10-m Bins. Die unten liegenden grünen und lilafarbenen Balken bezeichnen Perioden von La Niña und El Niño Bedingungen, definiert durch $ONI \leq -0,5 \text{ ° C}$ und $\geq 0,5 \text{ ° C}$. Die rote Kurve zeigt die durchschnittliche Tiefe des EUC-Kerns, und die schwarze Kurve zeigt die durchschnittliche Tiefe des Thermoklinenzentrums. d, Monatliche Auftretswahrscheinlichkeit von instabilen Moden, definiert als das Verhältnis der Zählungen kritischer Werte zwischen -50 und -150 m eines Monats über die Anzahl der Profile des Monats.

Literaturangaben

- Eden, C., Greatbatch, R. J., & Willebrand, J. (2007). A diagnosis of thickness fluxes in an eddy-resolving model. *Journal of physical oceanography*, 37(3), 727-742.
- Liu, C., Köhl, A., & Stammer, D. (2014). Interpreting layer thickness advection in terms of eddy-topography interaction. *Ocean Modelling*, 81, 65-77.
- Liu, C., Köhl, A., Liu, Z., Wang, F., & Stammer, D. (2016). Deep-reaching thermocline mixing in the equatorial pacific cold tongue. *Nature Communications*, 7.

Moeng, Chin-Hoh. "A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence." *Journal of the Atmospheric Sciences* 41.13 (1984): 2052-2062.

Sullivan, Peter P., James C. McWilliams, and Chin-Hoh Moeng. "A grid nesting method for large-eddy simulation of planetary boundary-layer flows." *Boundary-Layer Meteorology* 80.1-2 (1996): 167-202.

Zu Aufgabe AP 3.3: Analyse und Vorhersagbarkeit von regionalen Meeresspiegelschwankungen mit linearen, inversen Modellen

Regionale Änderungen des Meeresspiegels in Klimaszenarien

Dieser Baustein im AP 3.3 diente der Analyse der regionalen Änderungen des Meeresspiegels auf dekadischer Zeitskala sowie der zugrunde liegenden Prozesse, wie sie im Zusammenhang mit dem Treibhausgasantrieb zu erwarten sind. Dazu wurden regionale Modell-Läufe der hochauflösenden Atlantik-Arktis-Konfigurationen, die im Nordatlantik Projekt entwickelt wurden (Serra et al., 2010), mit den Oberflächenflüssen der CMIP-5 Treibhaussszenarien angetrieben. Im Vordergrund standen stattfindende und zu erwartende Änderungen im Vergleich zur Vergangenheit. Neben langfristigen Änderungen des mittleren Zustandes, wurden Veränderungen der statistischen Eigenschaften der Meeresspiegelschwankungen, insbesondere Veränderungen in der Variabilität, analysiert.

Aus ökonomischen Gründen konnte allerdings nicht der gesamte Zeitraum (prä-industriell bis 2100) gerechnet werden. Stattdessen wurden 3 Zeitscheiben integriert, jeweils eine Dekade lang, im Abstand von 100 Jahren (1890-1899, 1990-1999, 2090-2099). Für den Antrieb, die Anfangsbedingungen und die ozeanischen Randbedingungen wurde auf Ergebnisse der historischen CMIP-5 (1890-1899, 1990-1999) Simulation sowie den RCP 4.5 und 8.5 Projektion (2090-2099) des MPI zurückgegriffen. Dabei ist allerdings die unterschiedliche Modellphysik und -auflösung des Erdsystemmodells und des höher auflösenden Nordatlantik-Modells zu berücksichtigen, um Anpassungsverhalten während der Modell-Läufe zu vermeiden. Da die spätere Analyse der Modellergebnisse sich auf zeitliche Veränderungen des Ozeanzustandes, aber nicht auf den klimatologischen, mittleren Zustand stützt, wurden Anomalien der CMIP-5 Simulationen relativ zum Referenzzeitraum (1960-1999) verwendet und auf mittlere Zustände des Nordatlantik-Modells addiert. Dieses Verfahren wurde sowohl für die ozeanischen Randbedingungen als auch die Anfangsbedingungen verwendet.

Erste Ergebnisse der mit diesen Rand- und Anfangsbedingungen durchgeführten Läufe zeigten allerdings, dass auch die atmosphärische Forcierung eine Biaskorrektur und damit verbundene Trends im Ozeanzustand erzeugen, die schwer von Veränderungen durch natürliche Schwankungen oder anthropogene Einflüsse zu trennen sind. Deshalb wurden diese Läufe, mit einer Bias-Korrektur auch für die atmosphärischen Randbedingungen, wiederholt.

Die Zeitscheibe mit den Projektionen in die Zukunft (2090-2099) wurde sowohl mit dem RCP 4.5 als auch mit dem RCP 8.5-Szenario angetrieben, so dass insgesamt vier Modellintegrationen gerechnet wurden.

Der erhöhte zeitliche Aufwand bei der Vorbereitung und Durchführung der Modellintegrationen hatte keine Auswirkung auf die Erfüllung der Ziele für AP 3.3. Allerdings ließ sich trotz der Anpassung der Antriebe, Rand- und Anfangsbedingungen von der Physik des MPI-Modells auf die Physik des MITgcm-Nordatlantikmodells ein Anpassverhalten/Adaption über die zehnjährige Integrationszeit nicht vermeiden. Dieses Verhalten hätte sich durch eine Integration über den gesamten analysierten Zeitraum (präindustriell bis 2100) und Vorschalten einer Adaptionszeit von einigen Dekaden vermeiden lassen, ließ sich aber aufgrund begrenzter Ressourcen (insbesondere verfügbare CPU-Zeit) nicht realisieren. Diese Beschränkung ist mit der Neuanschaffung der Großrechneranlage für das DKRZ in 2015 weggefallen. In der Fortsetzung von RACE ist die Integration über den ganzen Zeitraum (1850-2100) vorgesehen.

Zur Analyse der Zeitscheiben wurde zunächst der mittlere zeitliche Verlauf, wie er sich in den historischen Läufen und der Projektion RCP 4.5 ergab, als allgemeines Anpassungsverhalten, abgezogen. Die zeitlichen Verläufe des Meeresspiegels in unserem hochauflösenden Nordatlantik-Modell, nach Abzug des Anpassungsverhaltens, wurden dazu verwendet, den Trend und die interannuale Variabilität der Projektionen (RCP 4.5 und RCP 8.5) mit den historischen Zeitscheiben und den Verläufen aus dem Klimamodell zu vergleichen.

Die Trends (Abbildung 3.3.1) sind aus den Differenzen der zeitlich gemittelten Meereshöhen in den verschiedenen Zeitscheiben gerechnet. Die Trends aus dem Vergleich des heutigen Zustandes (1990-1999) mit der präindustriellen Vergangenheit (1890-1899; Abbildung 3.3.1, oben) sind generell gering in beiden Modellen und stimmen in den Vorzeichen generell überein. Der Vergleich der RCP 4.5-Projektion mit der Gegenwart (Abbildung 3.3.1, Mitte) zeigt regional überwiegend Übereinkunft von Klimamodell und hochaufgelöstem Nordatlantik-Modell. Die Trends des Nordatlantik-Modells sind allerdings räumlich stärker fokussiert mit etwas höheren absoluten Werten in den lokalen Maxima/ Minima. Für die RCP 8.5-Projektionen (Abbildung 3.3.1, unten) ergeben sich im Vergleich zur RCP 4.5-Projektion eine Verstärkung der Trends sowohl im Klimamodell als auch im Nordatlantikmodell.

Die interannuale Variabilität der Meeresspiegelschwankungen wurde zunächst, als Referenz, für die Zeitscheiben 1890-1899 und 1990-1999 für beide Modelle berechnet. Wie erwartet, weist das hochaufgelöste Nordatlantik-Modell eine höhere Variabilität und mehr strukturellen Details im Verlauf des Golf- und Nordatlantischen Stroms auf.

Es ist zu beachten, dass Veränderungen der Variabilität in den Projektionen, relativ zur Referenz, nur auf den kurzen Zeitskalen untersucht werden kann, die durch die Länge der Zeitscheiben (10 Jahre) vorgegeben ist, obwohl Schwankungen auf längeren Zeitskalen jenseits der Dekade aus der Klimamodellierung und Analyse langer gemessener Zeitreihen bekannt sind (Latif und Keenlyside, 2011). Auch konnte nicht untersucht werden, inwiefern die gefundenen Änderungen in der Variabilität für einen längeren Zeitraum in der Zukunft gültig sind. Eine zusammenhängende Integration des Nordatlantikmodells, die alle hier untersuchten Zeitscheiben umfasst und eine umfassendere Untersuchung der Statistik von Meeresspiegeländerungen erlaubt, ist in der Fortsetzung von RACE vorgesehen.

Für die RCP 4.5-Projektion ähneln sich die Veränderungen in der interannualen Variabilität für die beiden Modelle nördlich von etwa 20°N, mit reduzierten Werten nördlich von 50°N und wenig Veränderungen weiter südlich. Südlich von 20°N sind die Ergebnisse der Modelle uneinheitlich.

Für die RCP 8.5-Projektion ergibt sich ein unterschiedliches Verhalten der beiden Modelle. Während das Klimamodell nur moderate Trends für den gesamten Nordatlantik aufweist, findet das hochaufgelöste Modell, abgesehen von den Subtropen, überwiegend deutlich erhöhte Variabilität für den gesamten Nordatlantik. Insbesondere fällt die besonders erhöhte Variabilität auf dem Nordwesteuropäischen Schelf auf, die zum Teil mehr als 5 fache der Variabilität im Referenz-Zeitraum beträgt. Eine weitere Analyse ermittelte einen starken Trend als Grund für die erhöhte Variabilität. Eine nähere Untersuchung der zugrunde liegenden Prozesse ist notwendig. Auch hier wird die in RACE-2 vorgesehene zusammenhängende Integration des Nordatlantik-Modells über alle hier untersuchten Zeitscheiben hilfreich sein.

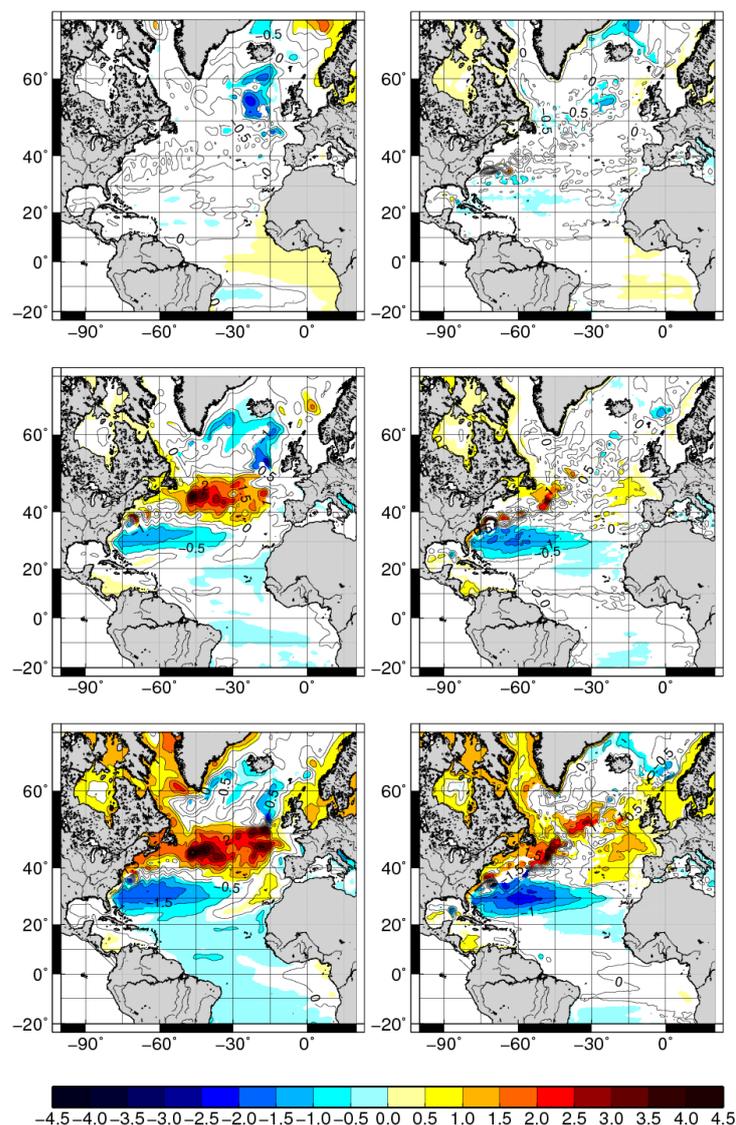


Abb. 3.3.1. Meeresspiegel-Trends [mm/yr] des Klimamodells des MPI (MPI-ESM, links) und dem Nordatlantik-Modell (rechts) für die Zeiträume 1890er-1990er (oben) und 1990er-2090er (Mitte: RCP 4.5, unten: RCP 8.5). Die Trends sind aus den Differenzen der zeitlichen Mittelwerte

innerhalb der drei modellierten Zeitscheiben geschätzt. Signifikante Trends (95% Konfidenzniveau) sind farbig dargestellt.

Vorhersagbarkeit regionaler Änderungen des Meeresspiegels durch lineare inverse Modelle

Im zweiten Baustein innerhalb von AP 3.3 sollte das Potenzial für die Vorhersagbarkeit regionaler Änderungen des Meeresspiegels durch lineare inverse Modelle (LIMs) untersucht werden.

Die von uns entwickelten LIMs basieren auf den von Penland (1989) erarbeiteten theoretischen Grundlagen. Dabei werden die zeitlichen Veränderungen eines Zustandes im LIM durch die Summe zweier Effekte beschrieben. Der erste wird durch die Anwendung eines linearen Operators auf den Zustand beschrieben, der zweite durch weißes Rauschen. Der lineare Operator und die Statistischen Eigenschaften des Rauschens lassen sich durch Kovarianz- und Lag-Kovarianz des Zustandes bestimmen. Damit alle natürlichen Schwankungen des Zustands beschrieben werden können, sollte der Zustand idealerweise für mehrere Zyklen auch der langperiodischen Schwankungen bekannt sein, weshalb die Anwendung gemessener Daten für das Trainieren des linearen Modells meist nicht ausreicht.

Stattdessen trainierten wir unsere LIMs deshalb mit Ergebnissen des CMIP-5 Referenzlaufs des MPI. Der 1000-jährige Simulationszeitraum ermöglicht, auch langperiodische natürliche Schwankungen des Meeresspiegels zu trainieren, um sie von langfristigen Trends unterscheiden zu können. Die ersten 500 Jahre des Laufs wurden als Trainingszeitraum zur Bestimmung der Muster und des Dämpfungs- und Schwingungsverhaltens der Moden verwendet, während die letzten 500 Jahre der Initialisierung und Validation des LIM dienen.

Zwei verschiedene Konfigurationen des LIM wurden untersucht. Die Basis-Konfiguration verwendet lediglich den Meeresspiegel des Nordatlantiks selbst als einzige Zustandsgröße des LIM. Die erweiterte Version enthält zusätzlich die zonal gemittelten Salzgehalte und Temperaturen des Nordatlantiks im Zustandsvektor, um die vertikale Verteilung von Dichteanomalien als Auslöser für zukünftige Schwankungen des Meeresspiegels zu berücksichtigen.

Die Analyse der LIMs ergab eine verbesserte Vorhersage gegenüber Persistenz für Zeiträume bis zu etwa 30 Jahren. Die beste Vorhersagbarkeit findet sich generell für die Region zwischen 50°N und 60°N. Abbildung 3.3.2 zeigt beispielhaft Ergebnisse für die Region des Subpolarwirbels. Der zeitliche Verlauf der Vorhersagen des LIMs wird im wesentlichen durch die Dämpfung der Moden bestimmt, da die Abklingzeiten der Moden im allgemeinen sehr viel kürzer ist als die Schwingungsdauern. Während bis zu einem Zeitraum von etwa 5 Jahren nach Initialisierung beide Konfigurationen des LIMs ähnliche Performance aufweisen, ergeben sich für längere Zeiträume höhere Skills und Korrelationen für das erweiterte LIM.

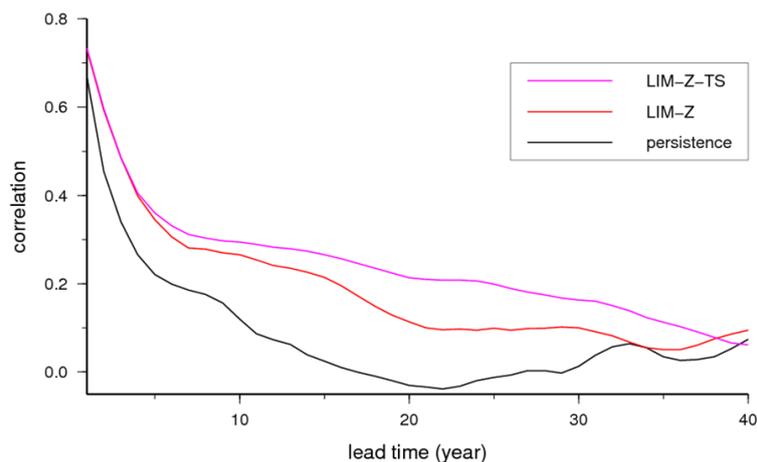


Abb. 3.3.2. Korrelation der Vorhersage des Wasserstandes des Basis-LIMs (LIM-Z, rot), des erweiterten LIMs (LIM-Z-ST, magenta) und unter Annahme von Persistenz (schwarz) mit der ‚Wahrheit‘ des Klimamodells. Der Mittelwert über die Region des Nordatlantischen Subpolarwirbels (48°N-60°N, 60°W-15°W) ist gezeigt.

Literaturangaben

Latif, M., and N.S. Keenlyside (2011), A perspective on decadal climate variability and predictability, *Deep-Sea Research II*, 58, 1880-1894.

Penland, C. (1989), Random Forcing and Forecasting Using Principal Oscillation Pattern Analysis, *Monthly Weather Review*, 117, 2165-2185.

Serra, N., R. H. Käse, A. Köhl, D. Stammer, and D. Quadfasel (2010), On the low-frequency phase relation between the Denmark Strait and the Faroe-Bank Cannel overflows, *Tellus*, 62A, 530-550, doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00445.x.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Position	Ausgaben
0812	797.794,00 €
0822	62.220,00 €
0831	0,00 €
0843	134.000,00 €
0846	90.515,00 €
0850	40.000,00 €
Gesamt	1.124.529,00 €

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Die geleisteten Arbeiten waren im Rahmen des Antrags notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Als ein Beitrag zur Grundlagenforschung hat das Projekt keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten und es haben sich auch keine unerwartet eröffnen. Jedoch ergaben sich weitere Fragen, insbesondere im Bezug auf die physikalischen Prozesse.

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

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.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Dana Mastropole, Robert S. Pickart, Hedinn Vaslimarsson, Kjetil Vage, **Kerstin Jochumsen, Detlef**

Quadfasel, Gerd Krahnemann, Bert Rudels and James Girton Hydrographic structure of Overflow Water Passing Through Denmark Strait in preparation

Domeisen, D.I.V., Müller, W.A. & **Baehr, J.** (2016). Projected changes in the seasonal cycle of the Atlantic meridional heat transport in MPI-ESM. Earth Syst. Dynam. Discuss., doi:10.5194/esd-2016-25.

Fischer, M., Domeisen, D.I.V., Müller, W.A. & Baehr, J. (2016). Potential changes in the predictability of the Atlantic meridional heat transport under global warming. In preparation

Fischer, J., J. Karstensen, R. Zantopp, M. Visbeck, A. Biastoch, E. Behrens, C. Böning, **D. Quadfasel, K. Jochumsen**, H. Valdimarsson, S. Jónsson, S. Bacon, N. P. Holliday, S. Dye, M. Rhein and C. Mertens (2014): Intra-seasonal variability of the Deep Western Boundary Current in the western subpolar North Atlantic. *Progress in Oceanography*, in press, doi: 10.1016/j.pocean.2014.04.002.

Jochumsen, K., M. Köllner, **D. Quadfasel**, S. Dye, B. Rudels and H. Valdimarsson (2015): On the origin and propagation of Denmark Strait Overflow Water Anomalies in the Irminger Basin. *J. Geophys. Res.*, 120, doi: 10.1002/2014JC010397.

Jochumsen, K., S.M. Schnurr, und D. Quadfasel (2016) Bottom temperature and salinity distribution and its variability around Iceland. *Deep-Sea Res. I*, 111, 79-90,

Köhl, A. (2014). Detecting processes contributing to interannual halosteric and thermosteric sea level variability. *Journal of Climate*, 27(6), 2417-2426.

Köhl, A., & **Serra**, N. (2014). Causes of decadal changes of the freshwater content in the Arctic Ocean. *Journal of Climate*, 27(9), 3461-3475.

Köhl, A. (2015). Evaluation of the GECCO2 ocean synthesis: transports of volume, heat and freshwater in the Atlantic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(686), 166-181.

Köhl, A. (2015). Influence of assimilating transports and in situ data from the Rapid-MOCHA array into the GECCO2 ocean synthesis. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 72, 38-51.

- Liu, C., Köhl, A., & Stammer, D. (2014). Interpreting layer thickness advection in terms of eddy-topography interaction. *Ocean Modelling*, 81, 65-77.
- Liu, C., Köhl, A., Liu, Z., Wang, F., & Stammer, D. (2016). Deep-reaching thermocline mixing in the equatorial Pacific cold tongue. *Nature Communications*, 7, 11576, doi:10.1038/ncomms11576.
- Liu, C., Köhl, A. (2016) Enhanced Diapycnal Mixing in N2-maximum Layers by Tropical Instability Waves, in preparation
- Paka V., V Zhurbas, B. Rudels, D. Quadfasel, A. Korzh and D. Delisi (2013) Microstructure measurements and estimates of entrainment in the Denmark Strait overflow plume. *Ocean Sci.* 9: 1003 – 1014.
- Schaffer, J., T. Kanzow, K. Jochumsen, K. Lackschewitz, S. Tppenhauer, V.M. Zhurbas, und D. Quadfasel (2016) Enhanced turbulence driven by mesoscale motifs and flow-topography interaction in the Denmark Strait Overflow plume. *J. Geophys. Res.* (in revision).
- Schmidt, C., J. Baehr: Further influence of the eastern boundary on the seasonal variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26N, in preparation.
- Wilken-Jon von Appen, Inga M Koszalka, Robert S Pickart, Thomas WN Haine, Dana Mastropole, Marcello G Magaldi, Héðinn Valdimarsson, James Girton, Kerstin Jochumsen, Gerd Krahnmann: The East Greenland Spill Jet as an important component of the Atlantic meridional overturning circulation 2014 ,Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 92, 75-84
- Zhurbas, V., B. Rudels, V. Paka and D. Quadfasel (2015) Estimates of entrainment in the Denmark Strait overflow plume from CTD/IADCP data. Submitted to *Boreal Environment Research*.

Manuskripte in Vorbereitung

Käse, R. H., and N. Nunes: Spectral decomposition of deep flow variability at the Greenland-Iceland-Scotland Ridge and the Labrador Sea Western Boundary. *Manuscript in preparation*.

III. Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen soweit dies möglich ist

Die beteiligten Projekte dienen dem Verständnis von bereits stattfindenden oder sich anbahnenden Änderungen im Nordatlantik welche wichtig für das Klima in Nordeuropa und dessen möglicher Vorhersagbarkeit sind. Sie führen darüber hinaus zu Verbesserungen von Ozeanmodellen und zum physikalischen Verständnis der Prozesse, die in der äquatorialen Thermokline zu erhöhter Vermischung führen.

III.2 Wissenschaftlicher Erfolg, Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Mit Hilfe einer kleinräumigen Studie im tiefen Ausstrom der Dänemarkstraße konnte die Rolle mesoskaliger Wirbel für die horizontale und vertikale Einmischung von Umgebungswasser nachgewiesen werden. Ein weiterer Prozess zur Erzeugung von Vermischung ist die Wechselwirkung der mittleren Strömungen mit kleinräumigen Anomalien der Bodentopographie.

Es wurde eine verstärkte Vermischung in der äquatorialen Thermokline gefunden. Diese Verstärkung ergab sich zunächst aus der Optimierung von Vermischungsparametern im Rahmen der Ozeansynthese, sie wurde danach auch in Argo Beobachtungen als Inversionen belegt und deren Abhängigkeit von der Erhöhung der Scherung durch Tropische Instabilitätswellen konnte mit Hilfe linearer Instabilitätsanalysen bestätigt werden.

Als ein weiteres wesentliches Ergebnis wurde gefunden, dass sich die ohnehin breitenabhängige Vorhersagbarkeit der Wärme- und Volumentransport im Nordatlantik unter dem Einfluss von globaler Erwärmung meridional verschieben kann. In unseren Modellsimulationen resultiert dies aus einer zeitliche Verschiebung der Vorhersagbarkeit, die besonders an den Breiten stark ausgeprägt ist, wo sich der mittlere Jahresgang der Wärme- und Volumentransport verschiebt.

Ergebnisse zeigen auch, dass die interannuale Variabilität des Meeresspiegels in hochauflösenden Läufen generell höher ist als im Klimamodell. Die Trends aus den Szenarien des Klimamodells werden auf langen Skalen im Wesentlichen bestätigt, aber mit einer stärkeren regionalen Ausprägung im hochauflösenden Modell. Gute potentielle Vorhersagbarkeit des Meeresspiegels auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen mithilfe von LIMs ist generell für die Region 50°N - 60°N des Nordatlantiks gegeben, insbesondere im Bereich des Subpolarwirbels, dem Rockall-Trog und der Nordsee.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans Erfindungen/Schutzrechtanmeldungen etc.:

Dies ist ein Projekt der Grundlagenforschung. Patente und dergleichen waren daher nicht zu erwarten und sind auch nicht als Nebenergebnis abgefallen.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Die erzielten Ergebnisse liegen im Bereich der Grundlagenforschung und sind direkt nicht wirtschaftlich verwertbar. Allerdings werden die gewonnenen Erkenntnisse helfen, Klimamodelle sowie dekadische Vorhersagen zu verbessern.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

(a) Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden und werden in international begutachteten Zeitschriften publiziert. Sie stehen dann der Allgemeinheit zur Verfügung und andere Wissenschaftler können darauf aufbauen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die Fortführung des BMBF Verbundvorhaben RACEII fußt wesentlich auf den Ergebnissen, die in den APs 2.4 und 3.3 gewonnen wurden. Insbesondere ist eine Anwendung der bestimmten Vermischungsparameter in gekoppelten Klimamodellen vorgesehen. Die Untersuchung der physikalischen Prozess die wesentlich die Vermischung in der Thermokline bestimmen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Die Arbeiten des AP 2.3, dass die Vorhersagbarkeit über Dekaden nicht nur Schwanken kann, sondern direkt aus Veränderungen im Jahresgang resultieren kann, dienen in RACE II als Grundlage für die Untersuchung der Abhängigkeit der saisonalen Vorhersagbarkeit vom Zustand des Nordatlantiks.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Simulationen mit dem LES Modell sind wg. Der Unsicherheit des Antriebs nur mit Einschränkungen zu verwenden, jedoch ist geplant, den großskaligen Antrieb des Modells auf Basis wirbelauflösender Modellergebnisse neu zu formulieren.

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Waren von der Art des Vorhabens her nicht vorgesehen; somit sind hierzu auch keine Angaben möglich.

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde eingehalten.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht der Universität Hamburg: <ul style="list-style-type: none">• AP 1.3: D. Quadfasel, K. Jochumsen: Variabilität des Wärmetransportes über den Grönland-Schottland-Rücken und ihr Einfluss auf das europäische Klima• AP 2.3: J. Baehr: Untersuchung von Veränderungen der dekadischen Vorhersagbarkeit der ozeanischen Zirkulation in Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert• AP 2.4: A. Köhl, D. Stammer: Bestimmung von Vermischungsprozessen in der ozeanischen Grenzschicht durch Assimilation hochaufgelöster hydrographischer Daten in ein Zirkulationsmodell mit Grenzschichtparametrisierung• AP 3.3: D. Stammer, A. Köhl: Analysen und Vorhersagen von regionalen Meeresspiegeländerungen• Koordination	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Detlef Stammer, Dr. Armin Köhl, Dr. Frank Siegismund Prof. Dr. Detlef Quadfasel, Kerstin Jochumsen Prof. Dr. Johanna Baehr	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20148 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03F0651 A
	11a. Seitenzahl Bericht
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 14
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger PTJ, 30. 6. 2016	

18. Kurzfassung

TP 1.3: Hauptziel des Vorhabens war die Quantifizierung und Vorhersage des Austausches von Wassermassen zwischen dem Europäischen Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik durch Dänemarkstraße und Färöer-Bank-Kanal und der damit verbundenen Wärmetransporte. Die Strömungsmessungen in den tiefen Passagen des Grönland-Schottland-Rückens wurden weitergeführt, so dass jetzt Zeitserien der Transporte von 20 Jahren Länge vorliegen. Mit Hilfe einer kleinräumigen Studie im tiefen Ausstrom der Dänemarkstraße konnte die Rolle mesoskaliger Wirbel für die horizontale und vertikale Einmischung von Umgebungswasser nachgewiesen werden. Ein weiterer Prozess zur Erzeugung von Vermischung ist die Wechselwirkung der mittleren Strömungen mit kleinräumigen Anomalien der Bodentopographie.

TP 2.3: Ziel des Teilprojektes war es zu untersuchen, inwieweit sich die potentielle Vorhersagbarkeit der nordatlantischen Ozeanzirkulation unter Einfluss der globalen Erwärmung verändert. Die Untersuchung wurde in zwei Teile gegliedert: (i) die Untersuchung des mittleren Klimazustands und der Klimavariabilität im 20. und 21. Jahrhundert, und (ii) die Untersuchung der Vorhersagbarkeit im 20. und 21. Jahrhundert. Die Arbeiten haben gezeigt dass in der ozeanischen Zirkulation die Änderungen des Jahresgangs auf Änderungen im Jahresgang der zonalen Dichtedifferenzen im subtropischen und subpolaren Wirbel zurückgeführt werden können. Die stärksten Änderungen der Vorhersagbarkeit treten insbesondere an Breitengraden mit potenziellen Änderungen im Jahresgang auf.

TP 2.4: Als zentrales Teilprojekt wurde im Rahmen von TP 2.4 eine globale Synthese der Zirkulation erstellt, deren Innovation im Vergleich zu vorangegangenen Produkten die Bestimmung und Optimierung von Vermischungsparametern miteinschließt. Insbesondere wurden Parameter des Grenzschichtmodells bestimmt, womit dieses Modell verbessert werden konnte. Die Analyse der Synthese fokussierte sich auf den äquatorialen Bereich in dem erhöhte Vermischungswerte in der Thermoklinen gefunden wurden. Die Analyse überspannte methodisch verschiedene Bereiche von der Inversen Modellierung die zusammen ein konsistentes Bild ergaben, in dem die Tropischen Instabilitätswellen einen maßgeblichen Beitrag zur Vermischung im unteren Teil der äquatorialen Thermoklinen beitragen.

TP 3.3: Veränderungen im Meeresspiegels, insbesondere der gegenwärtige und zukünftige Trend für verschiedene Klimaszenarien sowie seine natürliche Variabilität und das damit verbundene Potential zur Vorhersage auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen wurden im AP 3.3 untersucht. Ergebnisse zeigen, dass die interannuale Variabilität des Meeresspiegels in hochauflösenden Läufen generell höher ist als im Klimamodell. Die Trends aus den Szenarien des Klimamodells werden auf langen Skalen im wesentlichen bestätigt, aber mit einer stärkeren regionalen Ausprägung im hochauflösenden Modell. Gute potentielle Vorhersagbarkeit des Meeresspiegels auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen mithilfe von LIMs ist generell für die Region 50°N - 60°N des Nordatlantiks gegeben, insbesondere im Bereich des Subpolarwirbels, dem Rockall-Trog und der Nordsee.

Koordination: Aufgabe der Koordination war es alle mit dem Verbundprojekt verbundenen Aufgaben zu erledigen. Hierzu gehörte auch Öffentlichkeitsarbeit, die Organisation von Statusseminaren und die Vernetzung der Arbeiten innerhalb des Verbundprojektes.

19. Schlagwörter

Nordatlantik Synthese, Wechselwirkung subpolarer-subtropischer Atlantik, hydrodynamische Modellierung, Randwertbestimmung, Hindcast-Lauf, Validation, Meeresspiegel, Lineare Inverse Modelle, Vorhersagbarkeit, natürliche Variabilität, Overflows, meso- und submesoskalige Vermischung, Austausch über den Grönland-Schottland Rücken.

20. Verlag

21. Preis

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: <ul style="list-style-type: none"> • AP 1.3: D. Quadfasel, K. Jochumsen: Variabilität des Wärmetransportes über den Grönland-Schottland-Rücken und ihr Einfluss auf das europäische Klima • AP 2.3: J. Baehr: Untersuchung von Veränderungen der dekadischen Vorhersagbarkeit der ozeanischen Zirkulation in Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert • AP 2.4: A. Köhl, D. Stammer: Bestimmung von Vermischungsprozessen in der ozeanischen Grenzschicht durch Assimilation hochaufgelöster hydrographischer Daten in ein Zirkulationsmodell mit Grenzschichtparametrisierung • AP 3.3: D. Stammer, A. Köhl: Analysen und Vorhersagen von regionalen Meeresspiegeländerungen • Koordination 	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Detlef Stammer, Dr. Armin Köhl, Dr. Frank Siegismund Prof. Dr. Detlef Quadfasel, Kerstin Jochumsen Prof. Dr. Johanna Baehr	5. end of project 31.12.2015
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20148 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0651 A
	11a. no. of pages Report
	11b. no. of pages Publikation
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references 6
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 7
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projektträger PTJ	
18. abstract <p>TP 1.3: Hauptziel des Vorhabens war die Quantifizierung und Vorhersage des Austausches von Wassermassen zwischen dem Europäischen Nordmeer und dem subpolaren Nordatlantik durch Dänemarkstraße und Färöer-Bank-Kanal und der damit verbundenen Wärmetransporte. Die Strömungsmessungen in den tiefen Passagen des Grönland-Schottland-Rückens wurden weitergeführt, so dass jetzt Zeitserien der Transporte von 20 Jahren Länge vorliegen. Mit Hilfe einer kleinräumigen Studie im tiefen Ausstrom der Dänemarkstraße konnte die Rolle mesoskaliger Wirbel für die horizontale und vertikale Einmischung von Umgebungswasser nachgewiesen werden. Ein weiterer Prozess zur Erzeugung von Vermischung ist die Wechselwirkung der mittleren Strömungen mit kleinräumigen Anomalien der Bodentopographie.</p> <p>TP 2.3: Ziel des Teilprojektes war es zu untersuchen, inwieweit sich die potentielle Vorhersagbarkeit der nordatlantischen Ozeanzirkulation unter Einfluss der globalen Erwärmung verändert. Die Untersuchung wurde in zwei Teile gegliedert: (i) die Untersuchung des mittleren Klimazustands und der Klimavariabilität im 20. und 21. Jahrhundert, und (ii) die Untersuchung der Vorhersagbarkeit im 20. und 21. Jahrhundert. Die Arbeiten haben gezeigt dass in der ozeanischen Zirkulation die Änderungen des Jahresgangs auf Änderungen im Jahresgang der zonalen Dichtedifferenzen im subtropischen und subpolaren Wirbel zurückgeführt werden können. Die stärksten Änderungen der Vorhersagbarkeit treten insbesondere an Breitengraden mit potenziellen Änderungen im Jahresgang auf.</p> <p>TP 2.4: Als zentrales Teilprojekt wurde im Rahmen von TP 2.4 eine globale Synthese der Zirkulation erstellt, deren Innovation im Vergleich zu vorangegangenen Produkten die Bestimmung und Optimierung von Vermischungsparametern miteinschließt. Insbesondere wurden Parameter des Grenzschichtmodells bestimmt, womit dieses Modell verbessert werden konnte. Die Analyse der Synthese fokussierte sich auf den äquatorialen Bereich in dem erhöhte Vermischungswerte in der Thermoklinen gefunden wurden. Die Analyse überspannte methodisch verschiedene Bereiche von der Inversen Modellierung die zusammen ein konsistentes Bild ergaben, in dem die Tropischen Instabilitätswellen einen maßgeblichen Beitrag zur Vermischung im unteren Teil der äquatorialen Thermoklinen beitragen.</p> <p>TP 3.3: Veränderungen im Meeresspiegels, insbesondere der gegenwärtige und zukünftige Trend für verschiedene Klimaszenarien sowie seine natürliche Variabilität und das damit verbundene Potential zur Vorhersage auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen wurden im AP 3.3 untersucht. Ergebnisse zeigen, dass die interannuale Variabilität des Meeresspiegels in hochauflösenden Läufen generell höher ist als im Klimamodell. Die Trends aus den Szenarien des Klimamodells werden auf langen Skalen im wesentlichen bestätigt, aber mit einer stärkeren regionalen Ausprägung im hochauflösenden Modell. Gute potentielle Vorhersagbarkeit des Meeresspiegels auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen mithilfe von LIMs ist generell für die Region 50°N - 60°N des Nordatlantiks gegeben, insbesondere im Bereich des Subpolarwirbels, dem Rockall-Trog und der Nordsee.</p>	

Koordination: Aufgabe der Koordination war es alle mit dem Verbundprojekt verbundenen Aufgaben zu erledigen. Hierzu gehörte auch Öffentlichkeitsarbeit, die Organisation von Statusseminaren und die Vernetzung der Arbeiten innerhalb des Verbundprojektes.

19. keywords

Ocean syntheses, Interaction subpolar-subtropical Atlantic, hydrodynamic modeling, setting boundary values, hindcast run, validation, equatorial mixing, Linear Inverse Model, sea level, predictability, natural variability, Overflows, meso- and submesoscale mixing, exchange across the Greenland-Scotland Ridge.

20. publisher

21. price