

BMBF-Verbundvorhaben „MIKLIP“

Abschlussbericht des Teilprojekt OCEANOBS am GEOMAR

Verification of Ensembles and Initialization Fields for Decadal Climate Predictions via Ocean Observation Systems (Antragsteller: M. Visbeck, P. Brandt, J. Fischer, J. Karstensen)

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel dieses Teilprojekts war bereits im Leitantrag formuliert; darin geht es darum, ein Beobachtungs- und Diagnosesystem zu definieren, um Ozeanmodelle zu validieren. Hierzu gehören insbesondere 1) die qualitative Beurteilung von Modell-Initialisierungen sowie 2) die Analyse von Hindcast-Ensembles. Im Vordergrund steht hier die Quantifizierung von jährlichen bis dekadischen Variabilitäten durch nachhaltige Messungen der Strömungen, der T/S Eigenschaften und des Dichtefeldes z.B. im tiefen Labradorstrom; und um Tiefenwassertransporte in Wassermassenklassen als Teil der meridionalen Umwälzbewegung MOC, sowie großskaliger, beckenweiter Analysen von Wassermasseneigenschaften.

Zu dem zu nutzenden Beobachtungssystem gehört das 53° N-Observatorium am Ausgang der Labradorsee. Die Klärung der Ursachen und raum-zeitlichen Strukturen von Fluktuationen der meridionalen Umwälzbewegung (MOC) stellen wichtige Grundlagen für die Entwicklung eines Diagnose- und Beobachtungssystems klimarelevanter Schwankungen im Nordatlantik dar.

Schlüsselregionen die sich zu quantitativen Vergleichen mit einer Vielzahl von Modellläufen eignen sollen definiert werden.

Die Resultate sollen Einsicht geben in welche Art von Beobachtungssystemen an welchen Schlüsselpositionen sich eignen um die gestellten Aufgaben erfüllen. Hier wurde der Ozean insbesondere aus dem Grund gewählt, da er auf den zu untersuchenden Zeitskalen Rückkopplungen Atmosphäre-Ozean vorschreibt.

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

Am GEOMAR existiert eine langfristige Expertise von Feldarbeiten mit Verankerungen und Schiffsbeobachtungen im westlichen subpolaren Nordatlantik und insbesondere in der Labradorsee. Die Kombination wissenschaftlicher Expertise und vorhandenen ozeanischen Datenzeitreihen in Kombination mit verfügbaren globalen Datensätzen bietet eine gute Grundlage für die durchgeführten Analysen.

Wissenschaftlich ist die Fragestellung nach klimatisch relevanten Schwankungen in den Beobachtungsdaten und deren Vergleich mit den Modellen ein zentrales Thema der Klima- und Ozeanforschung.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben konnte nahezu wie geplant durchgeführt werden, Beobachtungsprogramme, Datenaufbereitung und Analysen machen gute Fortschritte auch über das Projektende hinaus. Insbesondere das Beobachtungsprogramm mit den Verankerungen war sehr erfolgreich, und es liegt ein einzigartiger Datensatz der Randstromintensität vor Labrador vor. Dieser Datensatz umfasst die gesamte Wassersäule über alle Stockwerke des Nordatlantischen Tiefenwassers, und der neben Analysen von längerfristigen Exportschwankungen auch dezidierte Vergleiche mit Modellen des Verbundes erlaubt.

Die Modellvergleiche erfolgten wie 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 subpolaren Nordatlantik (VIKING20). Die Vergleiche mit den MPI-ESM Klimamodellen mussten auf großskalige Parameter beschränkt werden, da der tiefe westliche Randstrom von der derzeitigen Modell Generation nicht repräsentiert wird. Hier wurden aber etliche neue Erkenntnisse gesammelt.

Die Ergebnisse der Beobachtungsanalysen der verarbeiteten Daten insbesondere der historischen Daten gingen in eine Vielzahl von Publikationen ein.

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

Es herrscht ein genereller Konsens, dass die Klimavorhersagen auf jährlichen bis dekadischen Zeitskalen stark durch den Ozean geprägt sind. Bei der Analyse von solchen Schwankungen ist es unabdingbar, dass die lokale Variabilität auf kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen verstanden und größenordnungsmäßig eingeschätzt werden kann, um Aussagen mit limitierten historischen Daten über langzeitige Variationen treffen zu können.

Hierzu hat sich die Verfügbarkeit von hydrographischen und Strömungsdaten im Nordatlantik seit Projektbeginn deutlich verbessert. Dazu beigetragen haben auch verschiedene internationale Projekte, allen voran das globale Argo-Float Projekt. Auch wurde seit Beginn des Programmes als wesentliche Ergänzung des Observatoriums bei 53°N , um den Tiefenhorizont des Dänemark-Straßen-Overflow-Wassers (DSOW) besser aufzulösen, dieses mit zusätzlichen Stationen bestückt. Während wesentliche Teile des Randstroms barotrop (mit nur geringen vertikalen Scherungen) sind, ist der DSOW Kern in der Labradorsee ein starkes baroklines Signal, dessen Existenz in den Modellen niedriger Auflösung nur ungenügend reflektiert wird – hier sind insbesondere Klimamodelle genannt. Dieser Datensatz ist auch ein wertvoller Bestandteil bei der Evaluierung hochauflösender Modelle, die diesen tiefen Strömungskern hinsichtlich Struktur und Zeitskalen beschreiben.

Die Detektion gradueller anthropogener Trends in den ozeanischen Beobachtungen, wie von Klimasimulationen für den 3. und 4. Sachstandsbericht des IPCC für das 21. Jahrhundert prognostiziert, stellt für lokale Beobachtungssysteme eine große Herausforderung dar. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Überlagerung langfristiger multidekadischer Variabilität durch ein breites Spektrum höher-frequenter Fluktuationen infolge lokaler Windanregung oder

interner Ozeandynamik dar; dieses Rauschen bildet z.B. ein wesentliches Charakteristikum mehrjähriger Transportzeitreihen. Dieses ist auf größeren räumlichen Skalen in Beobachtungen, dank des Argo-Projekts, jedoch eher möglich, wie auch hier in verschiedenen Publikationen gezeigt werden konnte.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Außerhalb des Verbundes sind Kooperationen mit aktuellen EU-Programmen (ASOF, MERSEA, THOR) vorhanden. Besonders THOR ist ein Abnehmer der Ergebnisse aus den hier durchgeführten Beobachtungen der Randstromintensität in der Labradorsee. Durch die thematische Einbindung hat das hier beantragte Vorhaben eine enge Beziehung zum internationalen CLIVAR Programm. Hier geht es neben den regionalen Unterschieden um komplementäre Ansätze, Randstrom-Quantifizierung im Vergleich zu beckenweiten (teuren) Beobachtungssystemen.

Enge Kooperationen bestanden im Rahmen der Entwicklung der Klimatologie MIMOC und Verarbeitung des globalen Beobachtungsdatensatzes, insbesondere den Argo Floats mit Gregory Johnson (NOAA-PMEL Seattle). Die wissenschaftliche Analysen zur Multidekadischen Wassermassenveränderung um die Antarktis erfolgten in Zusammenarbeit mit K. Heywood (University of East Anglia, Norwich,UK). Randstrom-Variabilitäten wurden unter anderem mit Andrew Thompson (CalTech, Pasadena, USA) analysiert.

II. Eingehende Darstellung

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

Innerhalb von Miklip OceanObs konnten wir zeigen, dass die derzeitige Generation von Klimamodellen sich noch nicht eignet um mit Zeitserienstationen wie die am Ausgang der Labradorsee im DSOW zu vergleichen. Dennoch zeigen hochauflösendere Modelle diese Strömungsbänder, was darauf hindeutet, dass zukünftige Generationen von Klimamodellen dieses auch tun werden. Aus diesem Grunde sind die Fortführung von Zeitserienstationen eine ideale Grundlage um verlässliche Daten aus Schlüsselpositionen im Ozean zum bekommen. Mit dem erfolgreichen Bergen und Wiederauslegen des 53°-Observatoriums liegen jetzt Datensätze des Strömungs- Temperatur- und Salzgehaltes von mehr als einer Dekade vor. Das Array wird weitergeführt und ist zurzeit im Wasser. Eine Übersicht die Länge der Zeitserien sieht man in Abbildung 1. Diese ist weiterhin in Betrieb und wird in Zeitabständen von 2-3 Jahren aktualisiert (Dauer der Auslegungsperioden).

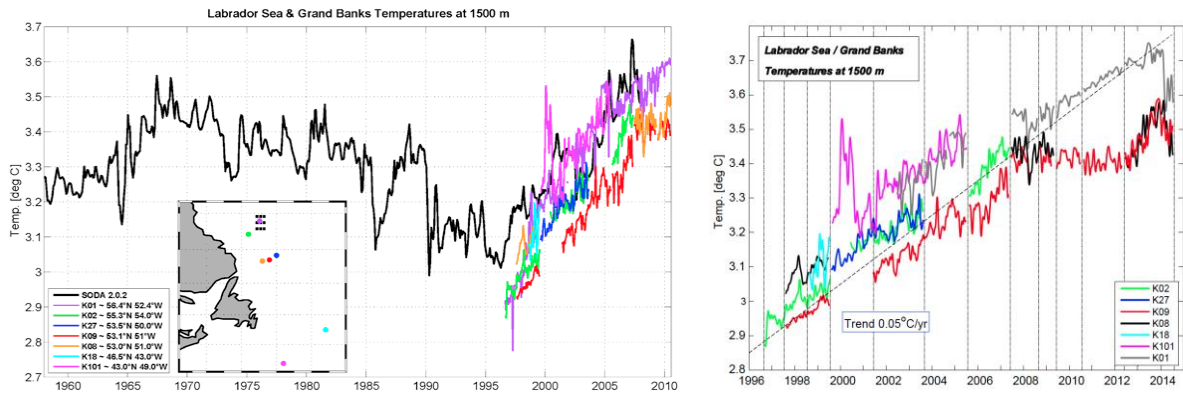


Abb. 1: Entwicklung der Temperaturverteilung im Bereich des DWBC, aus Beobachtungen und als Vergleich für die historische nicht Beobachtete Variabilität aus dem SODA Modell (linke Grafik, schwarze Linie).

Der Ausstrom aus der Labradorsee stellt einen wichtigen Brennpunkt im Gesamtsystem der Thermohalinen Zirkulation im Atlantik dar. Die seit 1997 kontinuierlich durchgeführten Messungen von Wassermassen-eigenschaften und Strömungen zeigen eine signifikante Erwärmung des Subpolarmeers in der Tiefe (0.5°C über 10 Jahre), die jedoch eher Teil multidekadischer Schwankungen und nicht Ausdruck der globalen Erwärmung sind. Unsere Messungen (Abb. 1) deuten gegenwärtig auf ein Ende des Erwärmungstrends hin. Gleichzeitig konnte in den vergangenen 13 Jahren keine eindeutige Änderung in Struktur und Stärke des Ausstroms festgestellt werden. Diese bemerkenswerte Stabilität des Ausstroms auf unterschiedlichen Zeitskalen und die angedeutete Umkehr der Tiefenerwärmung gilt es weiterhin zu beobachten und zu dokumentieren. Die Zeitserien des Strömungsfeldes liegen jetzt in aufbereiteter Form vor und stehen dem Verbund, aber auch einer wesentlich größeren Gemeinschaft (international OceanSites Initiative) zur Verfügung.

Hier steht der tiefe Kern des DWBC im Beobachtungs-Focus. Selbst hochauflösende Modelle haben je nach Formulierung der Randbedingungen und der Auflösung Probleme diesen tiefen Kern realitätsgetreu abzubilden. In den Beobachtungen am Ausgang der Labradorsee ist dieser Kern das stabilste Signal der Tiefenzirkulation (Abb. 1–4); das DSOW strömt hier als konzentriertes Band um die Labradorsee herum, um dann den tiefsten Teil des tiefen NADW in der MOC zu bilden. Der weitere Verlauf des DSOW Bandes beim Umrunden von Flemish Cap ist aber eher unklar. Weiter stromab an den Grand Banks nimmt dieses Wasser ein großes Volumen ein und beinhaltet damit trotz geringer Strömungen einen signifikanten Anteil an der MOC.

Interpretiert man alle Transportschätzungen des westlichen Subpolaren Nordatlantik, dann wird schnell klar, dass vor dem Hintergrund großer Zirkulations-Fluktuationen auf kurzen Zeitskalen es sehr schwierig ist, zu signifikanten Aussagen bezüglich kleiner langfristiger Trends zu gelangen (Abb. 2). Diese hochfrequenten (Intrasaisonalen) Schwankungen sind Thema einer Arbeit im Rahmen des international im EU Program THOR gewesen (siehe Fischer et al. 2013) .

Zunächst einmal gibt es durch die Advektion von warmem, salzreichem Wasser in die Konvektionsregionen (zentrale Labradorsee) und bei Ausbleibender Tiefen-Konvektion eine Langfristige Erwärmung seit Mitte der 90er Jahre (Abb. 1). Dies ist aber kein Trend, sondern Teil einer multidekadischen Schwankung. Dies erkennt man in Verbindung mit Hindcast Studien durch assimilierende Modelle aber auch in Hindcast Studien mit hochauflösenden Ozeanmodellen (hier VIKING 20).

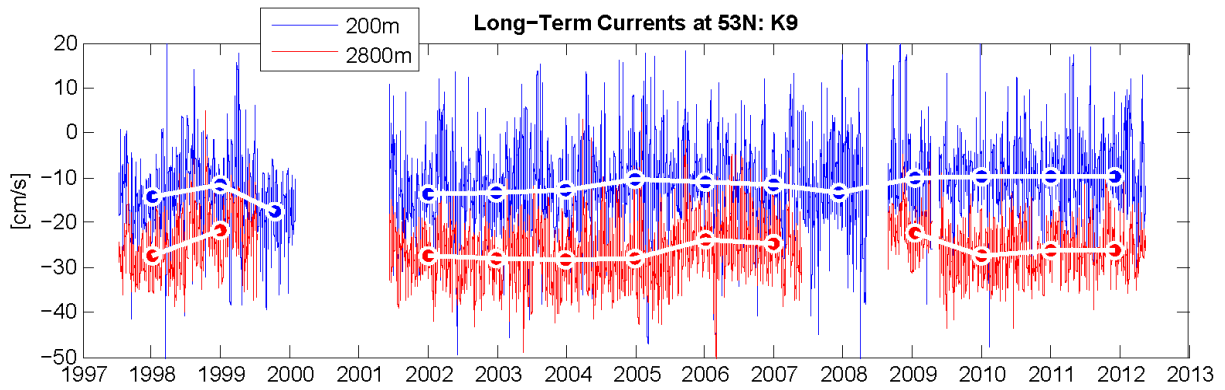


Abb. 2: Zeitserien (hochaufgelöst und Jahresmittel) der Strömungen an der zentralen Station (K9) des 53°N-Observatoriums. In Blau die oberflächennahen Strömungen und in Rot die wesentlich stärkeren Strömungen im tiefen DSOW-Kern des Randstroms.

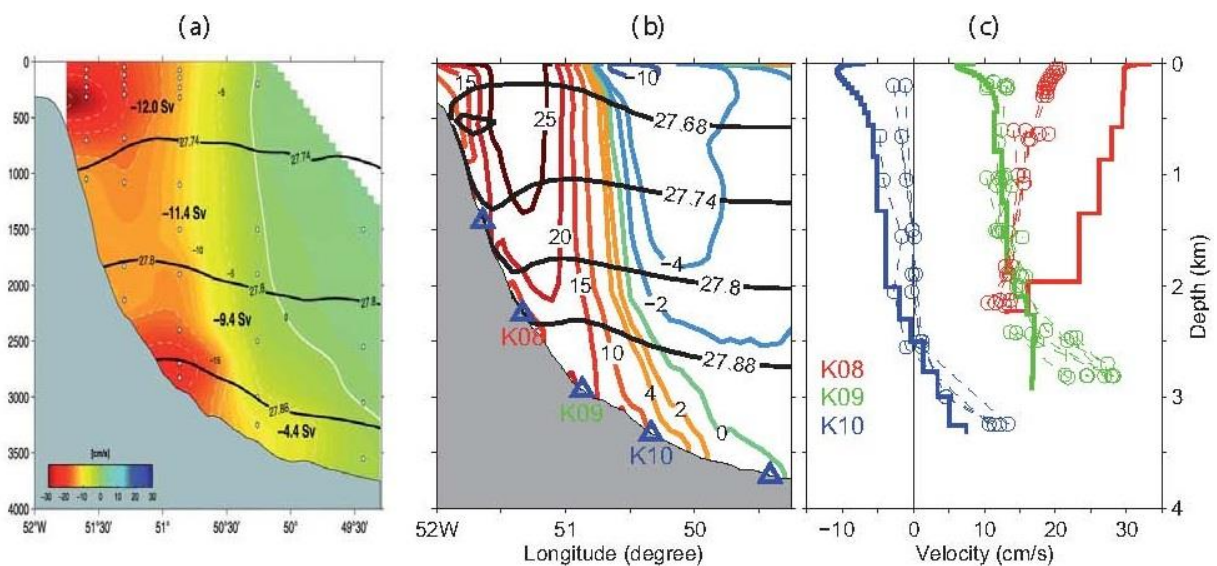


Abb. 3: aus Xu et al., 2013: Vergleich der HYCOM Strömungen bei 53°N mit denen aus den beobachteten Zeitserien des 53°N Observatoriums. Insbesondere ist das hochauflösende Modell in der Lage einen tiefen Stromkern am Boden zu erzeugen.

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

Abb. 4: Mittlere Meridionalgeschwindigkeiten im westlichen Randstrom bei 53°N in der regionalen hochauflösenden 1/20°-Simulation VIKING20 (links) und aus Beobachtungen (rechts). In der rechten Grafik sind die Positionen der Langzeitbeobachtungen markiert.

Der subpolare Nordatlantik stellte einen Schwerpunkt der Analysen dar. Aufgrund der besonderen Bedeutung der mesoskaligen Variabilität und dem nicht vorhanden sein des Tiefen Strömungskerns in Klimamodellen wurden Hochauflösende Regionale Modelle zum Vergleich genutzt. Hier sei z.B. eine Arbeit, die unter der Federführung von Xiaobiao Xu (Xu et al., 2013, s. Abb.3) vom Stennis Space Center vorgenommen wurde, und in der unsere Beobachtungen zum Vergleich mit dem HYCOM Modell herangezogen wurden.

Auch wurde von uns ein regionales Modell mit 1/20° Auflösung (VIKING20) genutzt (Abb. 4). Dieses ist in das globale 1/4° Modell (ORCA025) eingebettet, welches aktiv mit dem hochauflösenden Nest gekoppelt ist, Randbedingungen liefert aber auch den Effekt von Wirbeln bzw. einer verbesserten Zirkulation über die Grenzen des hochauflösenden Modelles hinaus transportiert. Das Nest erstreckt sich von ~32°N bis nördlich der Framstraße und bedeckt somit einen Großteil des Nordatlantiks. Neben einer Verbesserung der Golfstromablösung und dem weiteren Verlauf des Nordatlantischen Stroms ('Northwest Corner') kam es zu einer Verbesserung der Konvektion bzw. Bildung von Tiefenwasser in der Labrador See und dem Europäischen Nordmeer gegenüber nicht-wirbelauflösenden Modellen, sowie Verbesserung der Überströmung des Grönland-Island-Schottlandrückens, der eine wichtige Komponente des tiefen Astes der MOC darstellt. Im direkten Vergleich mit den Beobachtungen ergab sich in hochauflösenden Modellen eine deutlich verbesserte Repräsentierung des westlichen Randstromsystems bei 53°N (Abb. 1,3+4) im Vergleich zu grob aufgelösten Klimamodellen, wie z.B. das MPI-ESM.

Um größere Vergleiche zu ermöglichen wurde die Klimatologie MIMOC genutzt, welche die globalen Ozeane mit Fokus auf den Zustand der letzte Dekade abbildet. Dieses bietet sich in sofern an, da das letzte Jahrzehnt durch Argo besser beobachtet wurde als je zuvor. Dieses gilt jedoch nur für die oberen 2000m, da es nur wenige Floats gibt die größere Tiefen erreichen. Dieser Datensatz wurde international veröffentlicht, ist frei zugänglich und wird viel genutzt.

Ein Vergleich mit dem MPI-ESM zeigte hier die Unterschiedlichen zustände des Ozeans im Nordatlantik (Abb.5–6) Die Lage des Nordatlantik-Stroms ist in den Modellen deutlich zonaler, welches Auswirkungen auf die Wassermassen des Subpolarwirbel hat. Dieses wiederum schlägt sich nieder in einer Tiefenwasserbildung von unterschiedlicher Zusammensetzung als von den Beobachtungen zu erwarten wäre (Abb. 6). Ein generell zu salziges Nordatlantisches Tiefenwasser (NADW) ist die Folge.

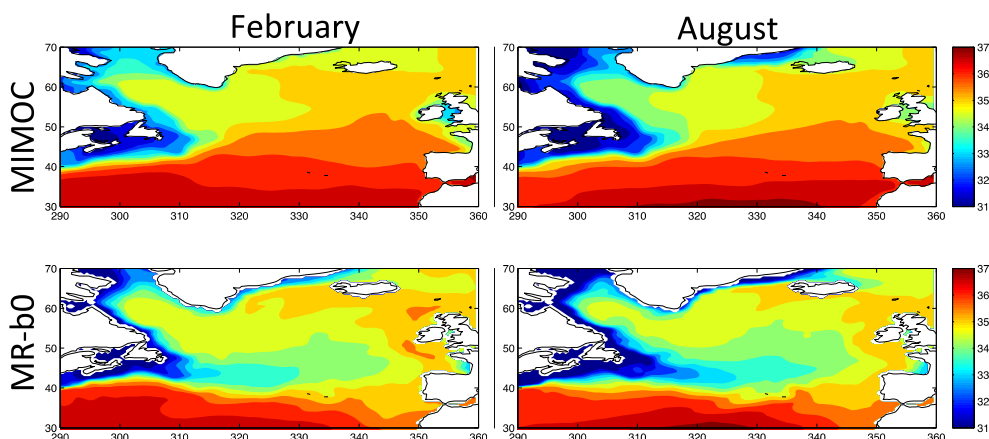


Abb. 5: Mittlere Salzgehalte der Deckschicht im Winter (links) und Sommer (rechts) aus Beobachtungen (oben) und im MPI-ESM MR (unten). Deutlich ist die unterschiedliche Lage des Nordatlantik Stroms im Modell im Vergleich zu den Beobachtungen (Übergang vom salzigen Subtropen Wasser zum Subpolaren Oberflächenwasser)

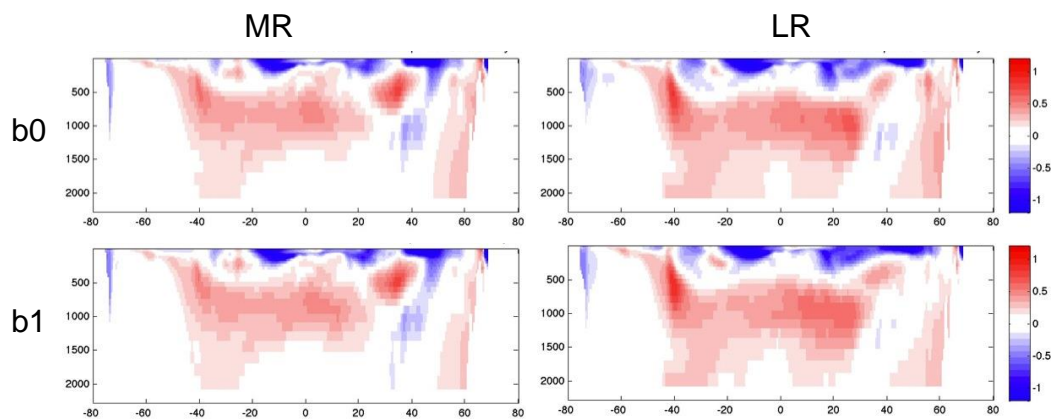


Abb. 6: Salzgehaltsunterschiede zwischen Modell (historical b0/b1 – MR/LR) und dem klimatologischen Ozean Zustand (MIMOC) entlang des Schnittes 25°W 0-2000m im Atlantischen Ozean. Blau markiert Modellsalzgehalte geringer als in den Beobachtungen, rot höhere. Die Atlantischen Oberflächenwasser sind in den Modellläufen generell zu salzarm, während das Nordatlantische Tiefenwasser auf seinem Ausbreitungspfad nach Süden in allen Modellkonfigurationen zu hohe Salzgehalte vorweist.

Andere Schlüsselregionen werden hingegen deutlich besser in den Modellen repräsentiert. So schneiden die MPI-ESM Modelle bei der Repräsentation der globalen Oberflächen Deckschicht deutlich besser ab. Die Deckschicht welche die Verbindung zwischen Ozean und Atmosphäre darstellt und hiermit sämtliche Feedback-Zyklen steuert ist global dank des Argo-Projekts gut zu aus den Beobachtungen zu quantifizieren. Im Vergleich zu den Modellen sind hier nur noch bei der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik im Winter der Nord-Hemisphäre, sowie im Bereich des antarktischen Zirkumpolar Stroms (ACC) im Winter der Süd-Hemisphäre größere Diskrepanzen zu erkennen (Abb. 7). Das in diesen Bereichen gebildete Tiefenwasser hat Umwälz-Zyklen in der Größenordnung von einigen Jahrzehnten.

Eine unserer Beobachtungsanalysen von Wassermassen der Antarktis, veröffentlicht in Science, zeigt eine deutliche Erwärmung des Zirkumpolaren Tiefenwassers, sowie deren Aufstieg in der Wassersäule. Dieses hat potentiell große Auswirkungen auf das Abschmelzen des antarktischen Eisschelfs mit globalen Konsequenzen. Hier ist vor allem der lokale Atmosphärische Antrieb die Ursache für Variationen (Abb. 8)

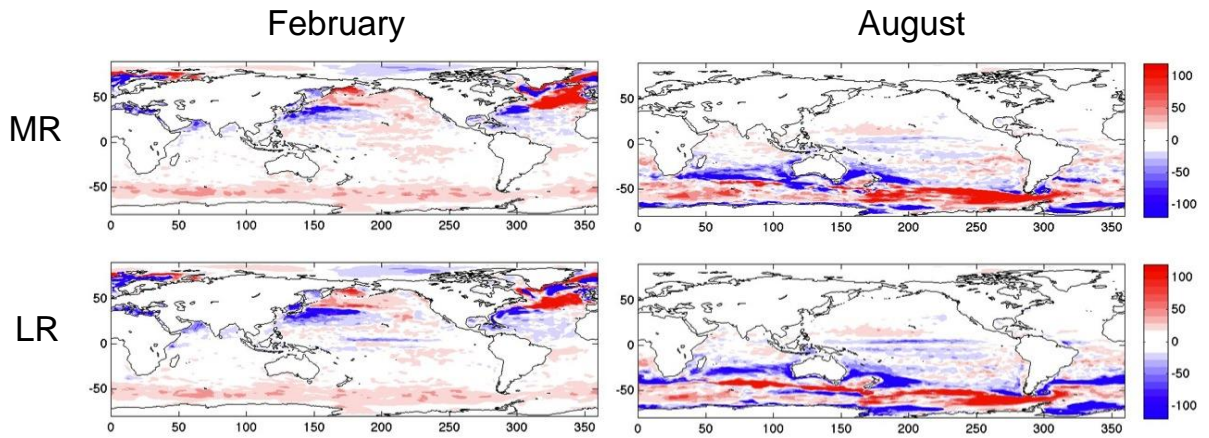


Abb. 7: Deckschicht tiefen Unterschiede zwischen Modell (historical b_0 – MR/LR summer/winter) und Beobachtungen (MIMOC). Blau sind Bereiche mit deutlich tieferen Deckschichten als beobachtet markiert, rot die Bereiche, in denen die Deckschichten im Modell zu flach ausfallen.

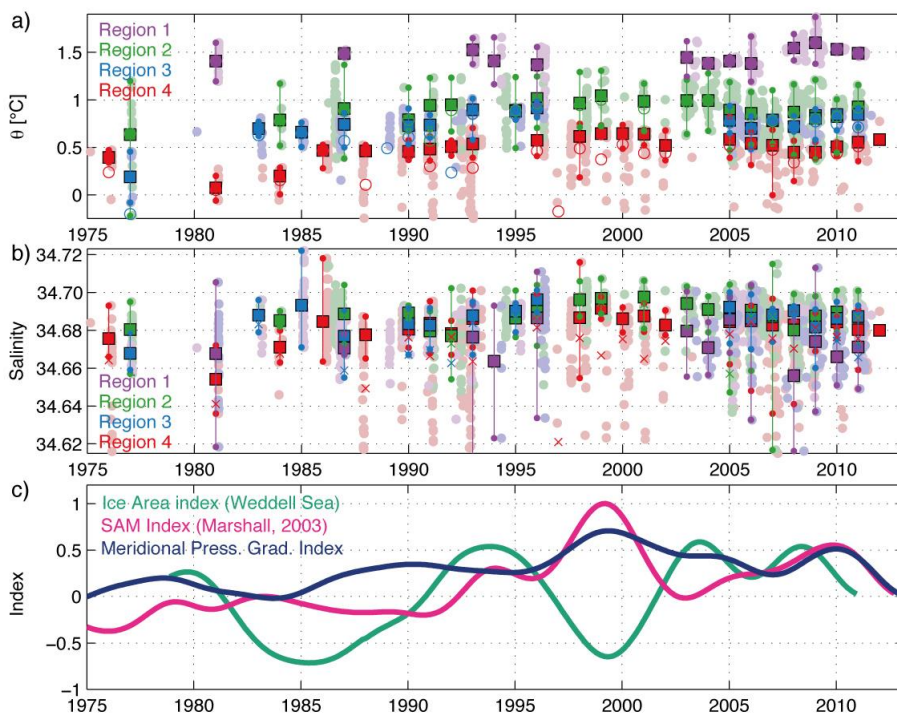


Abb. 8: Temperatur, a), und Salzgehalte, b), von vier Antarktischen Regionen im Wedell Meer in den letzten Jahrzehnten. c) Seeeis und Druckgradienten in der Region, geglättet mit einem 3-jahres Filter.

Hier zeigen die Modelle, dass Schlüsselmechanismen gut wiedergegeben werden, wenn auch der mittlere Zustand deutlich anders ist in den Modellen dargestellt ist. Dieses wird vor allem Anhand des Antarktischen Schelf Stroms (Antarctic Shelf Front, oder Antarctic Shelf Front Current, ASFC) deutlich (Abb. 9).

Der ASFC ist in den Beobachtungen als Temperaturminimum an der Schelfkante zu erkennen. Er formt sich in der Ross-See und strömt östlich entlang des antarktischen Schelfs bis zur Antarktischen Halbinsel am Ausgang des Weddellmeeres. Dabei schirmt er das flache

Schelf vom warmem Zirkumpolaren Tiefenwasser ab und hat somit eine Schlüsselstellung im Erhalt des westlichen antarktischen Eisschelfs. Es wird zurzeit davon ausgegangen, dass dieser Strom vor allem durch die polaren östlichen Winde initiiert wird und dann durch die ozeanischen Gradienten sich verstärkt.

Trotz des fehlenden ASFC sind die Temperaturen auf dem antarktischen Schelf in den Modellen ähnlich wie in den Beobachtungen wiedergegeben (Abb. 10). Die Bellinghausen und Amundsen See haben erhöhte Temperaturen und zeigen seit Jahren ein verstärktes Abbrechen und Abrutschen des Eisschelfs. Dieses zeigen auch die Klimamodelle. Erstaunlicherweise zeigen hier gerade die höher aufgelösten Modellläufe eine zu kalte Küste, welche so nicht beobachtet werden konnte. Dieses führt bei der temperaturbedingten Abschmelze zu unterschiedlichen Frischwassereinträgen in die Deckschicht des antarktischen Ozeans und hat dort Einfluss unter anderem auf die Seeeisbildung.

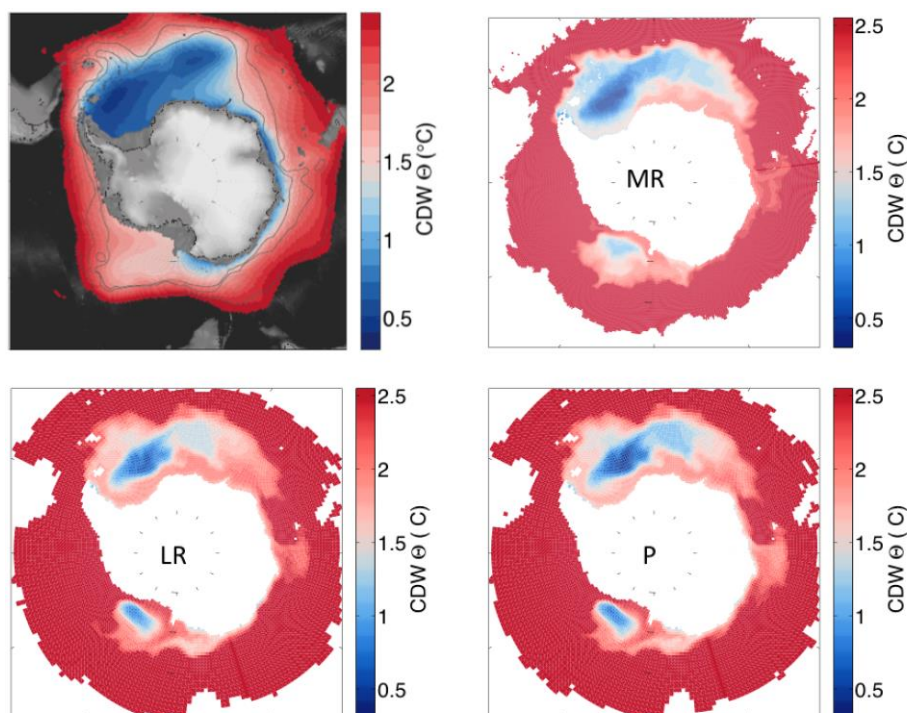


Abb. 9: Temperatur Maximum des Zirkumpolaren Tiefenwassers aus Beobachtungen (A), sowie in den Modellläufen des MPI-ESM MR (B), LR (C) P (D). Während der Weddellsee Wirbel in den Modellen dargestellt wird, fehlt der Antarktische Schelf Strom (ASFC), welcher in den Beobachtungen als Temperatur Minimum um die Antarktis drum herum zu erkennen ist.

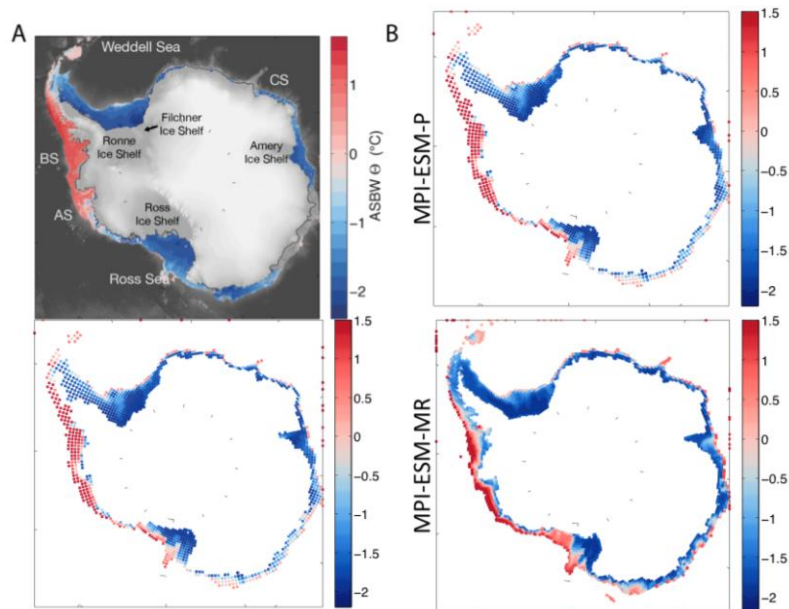


Abb. 10: Bodentemperaturen auf dem Antarktischen Schelf in Beobachtungen A, sowie in den MPI-ESM Modellen B-D. Schelftemperaturen um die Antarktis herum werden von den MPI-ESM Modellen im generellen gut repräsentiert. Nur sehr Küstennahe Bereiche, welche mit dem Eisschelf in Kontakt kommen weisen zu geringe Temperaturen auf.

Eine andere globale integrative Betrachtungsweise ist möglich über eine zeitliche Analyse des gelösten Sauerstoffs im Ozean. Derzeitige globale Analysen zum Sauerstoff Budget der Ozeane, welches eine integrale Größe für die Summe der globalen Umwälzirkulationen sind, zeigen eine Abnahme in der Größenordnung von 2% in fünf Jahrzehnten. Ein Vergleich mit Klimamodellen zeigt hier große Variationen zwischen den verschiedenen Ansätzen der Modellierung. Weitere Analysen hier zu sind derzeit im Gange.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung wurde für Personal eingesetzt. Der zweite Anteil an den Mitteln wurde für Reisekosten und Tagungskosten eingesetzt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Fokus des TP standen Fragestellungen nach der Eignung und Möglichkeit des Vergleiches von Beobachtungen, insbesondere Zeitserien, und Modellen, im lokalen und großskaligen Bereich. Im Rahmen des Projektes wurden nahezu alle weltweit verfügbaren hydrographischen Daten in Hinblick auf diese Fragestellung genutzt. Eine vergleichbare Studie mit ähnlichem Ausmaß liegt bisher aus keiner anderen Arbeitsgruppe vor. Sehr wichtig, und damit notwendig und angemessen, waren die Entwicklungen von Algorithmen die diese Datenmengen bearbeiten und gegitterte Produkte, Klimatologien erstellen. Die Hochkarätigen Veröffentlichungen die daraus folgten geben dem Recht.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Die erzielten Ergebnisse sind wichtige Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten. Darüber hinaus liefern die Projektarbeiten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Ozeans im 21. Jahrhundert und erlauben damit erstmals die quantitative Analyse von historischen Daten der letzten Jahrhunderte. Während die Beobachtungsdaten über einen längeren Zeitraum (bis multi-dekadisch) erst jetzt eine Validierung der Modelle auf diesen Zeitskalen ermöglichen, zeigen auch gerade die klimatologischen Felder, welche Bereiche noch größere Probleme in Modellen verursachen.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Viele internationale Gruppen führen Beobachtungs-Programme durch, deren Ergebnisse und vor allem Daten einen Einfluss auf das Vorhaben haben. Hier sind insbesondere die EU geförderten Initiativen THOR und NACLIM zu nennen, die von den überströmten Schwellen (Dänemarkstraße, Island-Schottland Rücken) bis zum Einstrom in die Labradorsee die Tiefenwasserausbreitung beobachten. Dies muss man als ein gesamtes Beobachtungssystem des subpolaren Nordatlantiks betrachten. Weiter sind die Aktivitäten des Bedford Institutes in Halifax zu nennen (I. Yashayaev) deren Langzeitbeobachtungen durch das Zentrum der Labradorsee (jährlich) eine wichtige Ergänzung zu den Beobachtungen in Nordatlantik sind. Auch zukünftige Projekte in den USA (US-AMOC) im subpolaren Bereich werden komplementäre Erkenntnisse und Datensätze bringen. Des weiteren soll hier nochmal die Wichtigkeit des internationalen Argo Projekts herausgestellt werden. Die im Argo Projekt verfügbaren globalen Daten haben sich seit Beginn des Projektes mehr als Verdoppelt und liefern Verlässlich in Echtzeit einen Überblick über den derzeitigen Zustand des Ozeans.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Handmann, P., Fischer, J., Visbeck, M., Patara, L. and Biastoch, A. (in preparation) *North Atlantic Deep Western Boundary Current Dynamics as Simulated by the VIKING20 Model Compared with Labrador Sea Observations*

Heywood, K. J., Schmidtko, S., Heuze, C., Kaiser, J., Jickels, T., Queste, B., Stevens, D., Wadley, M., Thompson, A., Fielding, S., Guihen, D., Creed, E., Ridley, J., Smith, W.. Ocean processes at the Antarctic continental slope. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **372**, 20130047–20130047 (2014).

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

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

Schmidtko, S., G. C. Johnson, and J. M. Lyman, 2013: MIMOC: A global monthly isopycnal upper-ocean climatology with mixed layers. *J. Geophys. Res. Oceans*, **118**, 1658–1672, doi:10.1002/jgrc.20122.

Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F., & Aoki, S. (2014). Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346(6214), 1227–1231. <http://doi.org/10.1126/science.1256117>

Schmidtko, S., Stramma, L., Visbeck, M. (submitted). Decades of Oxygen decline. *Nature*.

Schmidtko, S., Heywood, K., Thompson, A. (in preparation). The Weddell Sea and its forcings from observations and models.

Stramma, L., Oschlies, A. & Schmidtko, S. Mismatch between observed and modeled trends in dissolved upper-ocean oxygen over the last 50 yr. *Biogeosciences* **9**, 4045–4057 (2012).

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

III. Erfolgskontrollbericht

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

Im Meeresforschungsprogramm des BMBF wird deutlich gemacht, dass die Rolle des Ozeans als Teil des Klimasystems von großer Bedeutung ist und noch erhebliche Forschung erfordert. Globale Beobachtungen welche als vergleichbarer Datensatz für Vergleichsstudien mit Modellen, oder zur Prozessanalyse, zur Verfügung gestellt wurden, sind ein unverzichtbarer Bestandteil für die Verifizierung und Validierung von Forschung in der ozeanischen Komponente des Klimasystems. Damit leistet OceanObs einen wesentlichen Beitrag zu den Förderzielen des BMBF.

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

Die jetzt vorliegenden Klimatologien und Zeitserien und damit globalen Wärme- und Frischwasser- und Sauerstoffbudgets sind optimal zur Verifizierung von Modellsimulationen geeignet und unterstützen damit Aussagen über die Klimavariabilität und deren Vorhersagbarkeit, die aus den verschiedenen Modellsimulationen gewonnen wurden. Auch erlauben die Felder die bessere Interpretation von historischen Daten, da diese jetzt im Kontext der lokalen und temporalen Variabilität qualitativ besser untersucht werden können. Dieses führte zu einigen hochkarätigen Publikationen. Zusätzlich, mit den verankerten Stationen in der Labradorsee, konnten Langzeitserien der Intensität des Tiefen Randstromsystems am Ausgang der Labradorsee beobachtet werden. Die jetzt vorliegenden Zeitserien und Messungen sind ein einzigartiges Archiv der Tiefenzirkulation und ihrer vertikalen Struktur auf Zeitskalen von Tagen bis hin zu mehr als einer Dekade. Integrale Größen, wie die Randstromvarianz oder Energie, wie Randstromtransporte sind optimal zu Verifizierung von hochauflösenden Modellen. Solche Vergleiche sind in vollem Gange und können auf die nächste Generation von Klimamodellen ausgeweitet werden, soweit diese dann den Randstrom darstellen.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die Klimatologien, Zeitserie, globalen Wärme- und Frischwasser- und Sauerstoffbudgets sind optimal zur Verifizierung von derzeitigen und zukünftigen Modellsimulationen geeignet und unterstützen damit Aussagen über die Klimavariabilität und deren Vorhersagbarkeit. Die Felder erlauben die bessere Interpretation von historischen Daten, da diese jetzt im Kontext der lokalen und temporalen Variabilität qualitativ genauer analysiert werden können. Die Messungen sind ein einzigartiges Archiv des ozeanischen Zustandes im 21. Jahrhundert und sowie für die Variabilität in Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoff auf Zeiträumen von mehr als einer Dekade. Solche Arbeiten werden derzeit weiter vorangetrieben und sind im Begriff veröffentlicht zu werden. Auch können die Ergebnisse auf die nächste Generation von Klimamodellen ausgeweitet werden. Das Vorhaben konnte wichtige Beiträge zum Verständnis der ozeanischen Variabilität der letzten Jahrzehnte liefern. Speziell die Rolle der relativen Erwärmung um die Antarktis, von Änderungen der Tiefenwasserbildung, vom globalen Sauerstoffbudget, sowie der ozeanischen Tiefenwasser Variabilität.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Arbeiten waren insgesamt sehr erfolgreich, und sind sowohl was die Beobachtungen, die Interpretationen, und auch weiterführende Analysen anbelangt, weit fortgeschritten. Analysen die sich dem Vergleich Beobachtung-Modell entzogen wurden weiterentwickelt und auf größere Gebiete ausgedehnt. Damit sind hier alle Arbeiten im Soll, und es gibt keine Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben. Im Zuge dieser Arbeiten haben sich interessante neue Ansätze ergeben, die weiterführend bearbeitet werden sollen.

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Die Ergebnisse der Projektarbeiten werden in *„peer reviewed“* Fachzeitschriften veröffentlicht und sind auf internationalen Tagungen vorgestellt und diskutiert worden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse unterschiedlichen Nutzerkreisen innerhalb des Verbundes aber auch darüber hinaus einem größeren nationalen/internationalen Nutzerkreis präsentiert worden (in Form von Veröffentlichungen und Vorträgen). Um eine möglichst breite Nutzung zu gewährleisten, werden die Daten national und international (NOAA-MIMOC Server) archiviert und auf entsprechenden Web-Seiten, zugänglich gemacht. Gerade die Klimatologie MIMOC erlaubt durch Animation der Ergebnisse Eingang in die vielfältigen Aktivitäten im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit – z.B. zurzeit von der Muthesius Kunsthochschule zu Kiel genutzt.

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Zeit- und Finanzierungsplan konnte in seinen wesentlichen Teilen mit nur leichten Verschiebungen eingehalten werden. Die Methodik wurde den aktuellen Erfordernissen angepasst. Auch konnten die vorher definierten Meilensteine im erwarteten Umfang erreicht werden.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verification of Ensembles and Initialization Fields for Decadal Climate Predictions via Ocean Observation System (OceanObs)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Peter Brandt Dr. Jürgen Fischer Dr. Johannes Karstensen Dr. Sunke Schmidtko	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2016
	6. Veröffentlichungsdatum 07.12.2016
	7. Form der Publikation Schlussbericht
	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	10. Förderkennzeichen *) 01LP1114A
	11. Seitenzahl 13
	12. Literaturangaben 10
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen -
	15. Abbildungen 10
	16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Die durchgeführten Modell-Beobachtungs Vergleiche haben früh gezeigt, dass ein Vergleich vor allem im Größeren nötig ist, da Klimamodelle noch relativ stark von den Beobachtungen, die sich mit Verankerungen gewinnen lassen, z.B. in Randstromregionen abweichen. Dadurch wurde der Fokus leicht angepasst und es wurden Datensätze erstellt, die sich für einen Vergleich eignen. Die erstellten Datensätze und gegitterten Klimatologien sind die derzeit akkurateste öffentlich verfügbare Repräsentation aus Beobachtungsdaten der Ozeane des 21. Jahrhunderts. Die Klimatologie MIMOC in Verbindung mit der Entwicklung von modernen Algorithmen zur Bearbeitung von Beobachtungsdaten hat zu etlichen hochkarätigen Veröffentlichungen geführt. Weitere Arbeiten zu ozeanischem Sauerstoff und CMIP 5 Modellen werden die zukünftige schnelle Validierung von Modell Ensembles im Biogeochemischen Bereich ermöglichen und werden zurzeit als neues Initialisierungsfeld für verschiedene Modelle genutzt.	
19. Schlagwörter Ozeanzirkulation, ozeanische Variabilität, Klima, Labradorsee	
20. Verlag	21. Preis

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

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Verification of Ensembles and Initialization Fields for Decadal Climate Predictions via Ocean Observation System (OceanObs)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Peter Brandt Dr. Jürgen Fischer Dr. Johannes Karstensen Dr. Sunke Schmidtke	5. end of project 31.03.2016	
	6. publication date 07.12.2016	
	7. form of publication Final Report	
8. performing organization(s) (name, address) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	9. originator's report no.	
	10. reference no. 01LP1114A	
	11. no. of pages 13	
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references 10	
	14. no. of tables -	
	15. no. of figures 10	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The model-observation comparisons early showed that a qualitative and larger approach at key locations was necessary. Partly opposing the initial idea, thus the effort was focused on constructing data products that fulfill the necessary key elements. The constructed database and gridded products and some selected key time series are the best oceanic representation of the last decade currently available. This database in conjunction with the developed sophisticated mapping method has been reviewed thoroughly during the process of publication of results in several high profile journals. Furthermore works on oceanic oxygen and CMIP 5 modelled oxygen will allow rapid assessment of biogeochemical ensembles and even are used as new initial model fields.		
19. keywords Ocean Circulation, oceanic variability, Climate, Labrador Sea		
20. publisher	21. price	