

Abschlussbericht zu RACE Teilprojekt 3.2

Teilprojektleiter:

Dr. Uwe Mikolajewicz
MPI für Meteorologie
Bundesstraße 53
D-20146 Hamburg
uwe.mikolajewicz@mpimet.mpg.de
Tel: 040 41173 243
Fax: 040 41173 298

In Kooperation mit

Dr. Birgit Klein
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie
Bernhard-Nocht-Str. 78
D-20359 Hamburg
birgit.klein@bsh.de
Tel: 040 3190 3228
Fax: 040 3190 5000

Wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dr. Moritz Mathis (MPI)

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das wissenschaftliche Ziel dieses Teilprojekts ist die Abschätzung regionaler Klimaänderungen für den Bereich des Nordwest-Europäischen Schelfs (NWES), insbesondere der Nordsee, sowie der Verbindung dieser Klimaänderungen zu Veränderungen der regionalen Zirkulation im Nordatlantik. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf den Übergangsbereich zwischen dem Nordatlantik und der nördlichen Nordsee, in dem die für die Nordsee relevanten Austauschprozesse stattfinden. Zur Realisierung des Forschungsvorhabens werden Klimamodellsimulationen mit dem regional gekoppelten Erdsystemmodell MPIOM/HAMOCC/REMO durchgeführt, deren spezielle Gitterstruktur für eine besonders hohe räumliche Auflösung im Bereich des nordwest-europäischen Schelfs konfiguriert ist. Das Kopplungsgebiet zwischen Ozean und Atmosphäre beinhaltet neben dem NWES auch große Gebiete des Nordostatlantiks und gewährleistet dadurch die Unabhängigkeit der regionalisierten Änderungssignale gegenüber der Simulationen des globalen Klimamodells MPI-ESM.

Ergebnisse früherer Arbeiten weisen darauf hin, dass im 21. Jahrhundert aufgrund klimabedingter Veränderungen der lokalen Atlantikzirkulation mit erheblichen physikalischen und biogeochemischen Zustandsänderungen im Nordostatlantik und auf dem NWES zu rechnen ist, welche die biologische Produktion in der Nordsee negativ beeinflussen. Nährstoffreiche atlantische Wassermassen bilden die wichtigste natürliche Quelle für den Nährstoffhaushalt der Nordsee und haben dadurch große klimatische und ökologische Bedeutung für den Nord- und Ostseeraum. Die biologische Produktivität ist unter anderem entscheidend dafür, wie viel CO₂ die Nordsee aus der Atmosphäre aufzunehmen vermag und damit, wie viel CO₂ über den Prozess des "shelf pumping" längerfristig im offenen Atlantik gespeichert werden kann. Ein hohes Nährstoffinventar unterstützt die biologische Primärproduktion und wirkt sich dadurch positiv auf die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre aus. Neben Veränderungen der Ozeanzirkulation spielen dabei Veränderungen von Temperatur und Salzgehalt der oberen Wassersäule eine wichtige Rolle. Sie bestimmen die Stabilität der vertikalen Schichtung und regulieren dadurch den Nährstofftransport aus tieferen Schichten in die euphotische Zone. Verschiedene Studien haben aber stark unterschiedliche Ergebnisse insbesondere bezüglich der projizierten Salzgehalt- und Nährstoffänderungen im 21. Jahrhundert gezeigt. Unsere bisherigen Ergebnisse des Erdsystemmodells MPIOM/HAMOCC/REMO weisen darauf hin, dass ein großer Teil dieser Unsicherheiten auf die ausgeprägte multidekadische Variabilität des in den NWES einströmenden Atlantikwassers zurückzuführen ist (Bülow et al., 2014; Mathis et al., 2015).

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) ist seit seiner Gründung im Jahre 1975 auf dem Gebiet der Klimaforschung tätig und bildet heute eines der führenden Zentren für Klimamodellierung. Am MPI-M sind mehrere globale Ozeanmodelle sowie die in Deutschland fast ausschließlich betriebenen

globalen Atmosphärenmodelle der ECHAM-Familie entwickelt und zu sogenannten Erdsystemmodellen integriert worden. Sämtliche Modelle unterliegen ständiger Pflege und Weiterentwicklung in enger Zusammenarbeit mit dem Deutschen Klimarechenzentrum DKRZ. Die Arbeitsgruppe Ozeanphysik verfügt über langjährige Expertise über Kopplung, Betrieb und Auswertung von globalen als auch regionalen Ozean-Atmosphärenmodellen, einschließlich der Einbindung des Kohlenstoffkreislaufs. Die Technik der auch in RACE angewendeten Kopplung eines regionalen Atmosphärenmodells mit einem formal globalen Ozeanmodell mit erhöhter Auflösung in der zu untersuchenden Region ist am MPI-M entwickelt worden und seit mehreren Jahren im Einsatz.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprüngliche Projektablauf musste aufgrund notwendiger Entwicklungsarbeiten am Modellsystem MPIOM/HAMOCC/REMO (Mikolajewicz et al., 2005; Elizalde Arellano, 2011; Sein et al., 2015) modifiziert werden. Die Entwicklungsarbeiten umfassten die Erweiterung des Biogeochemie Modells HAMOCC um eine Sedimentresuspensionsroutine sowie die Berücksichtigung gemessener Nährstoffeinträge über europäische Festlandabflüsse. Kapazitätsengpässe des vormaligen DKRZ Supercomputers verzögerten die im Antrag geplante Simulation und Analyse hochaufgelöster RCP-Szenarien zusätzlich. Entsprechende Rückstände wurden allerdings in der aktuellen Projektphase durch die höhere Leistungsfähigkeit des neuen Supercomputers bereits weitgehend aufgeholt. Alternativ wurde eine Sensitivitätsstudie anhand von Simulationen mit geringerer räumlicher Auflösung durchgeführt und hinsichtlich der Komplexität verschiedener gängiger Regionalisierungsmethoden analysiert. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse bezüglich des Einflusses der globalen Klimasimulation auf die regionalisierten Klimaänderungssignale ist in Vorbereitung. Der im Projektplan vorgesehene hochaufgelöste ERA40/ERAInterim Referenzlauf konnte dennoch ohne Verzögerung durchgeführt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse über die natürliche interannuale Variabilität der Wassertemperatur und Zirkulation der Nordsee sind in Mathis et al. (2015) publiziert.

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

Die Erfahrungen aus dem Projekt „Nordatlantik-2“ haben gezeigt, dass klimarelevante Untersuchungen in flachen Schelfmeeren adäquat nur mit gekoppelten Regionalmodellen durchgeführt werden können. Projektionen zukünftiger klimatischer Bedingungen, die auf globalen Klimamodellen basieren, haben im Allgemeinen für flache Schelfmeere wie die Nordsee weder die notwendige räumliche Auflösung um wichtige Austauschprozesse zu simulieren noch enthalten sie wichtige Schelfmeerprozesse wie z.B. die Gezeitenmischung. Es wurde deshalb in RACE weiterhin das regional gekoppelte Erdsystemmodell MPIOM/HAMOCC/REMO angewendet, welches im Bereich des NWES eine Auflösung zw. 5-15 km im Ozean und 25 km in der Atmosphäre bereitstellt und Gezeitenströmungen berücksichtigt. Der Vorteil dieses Modellsetups gegenüber herkömmlichen regionalen Ozeanmodellen liegt in der Vermeidung von offenen Ozeanrändern und der Inkonsistenzen bei der Beschreibung entsprechender Randbedingungen. Erhebliche Teile der Modellkopplung, der Methodik zur Modellanalyse und Evaluierung sowie die notwendige Expertise wurden ebenfalls in den Vorgängerprojekten entwickelt und im MPI-M etabliert.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Verbundes

Das AP 3.2 arbeitete primär mit den Teilprojekten 1.2 und 1.3 zusammen. Mit dem AP 3.3 wurde bzgl. der Abschätzung der Variabilität Meeresspiegels im Nordatlantik zusammen gearbeitet.

Außerhalb des Verbundes (national und international)

Während der gemeinsamen Laufzeit von RACE und dem vom BMVBS geförderten Projekt *KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt* fand eine enge Kooperation statt. Des Weiteren wurden die in RACE durchgeführten Simulationen dem von der EU geförderten Verbundprojekt *PEARL - Preparing for extreme and rare events in coastal regions* für Extremwertanalysen bezüglich regionalem Meeresspiegelanstieg an europäischen Küsten zur Verfügung gestellt. Die mit Reanalysedaten angetriebenen Referenzläufe wurden im Rahmen des von der DFG

geförderten Exzellenzclusters *CliSAP - Integrated Climate System Analysis and Prediction* der Universität Hamburg evaluiert und gehen in eine Vergleichsstudie zwischen globalen und regionalen Klimaprojektionen ein.

II. Eingehende Darstellung

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

II.1.1 Simulationen und Referenzdatensätze

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der abgeschlossenen Modellläufe und jener, die zur Zeit noch gerechnet werden bzw. geplant sind. Für die Evaluierung der Historischen Läufe sowie des mit ERA40/ERAInterim Reanalysedaten angetriebenen Referenzlaufes wurden die vom European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) selbst verwendeten Satellitendaten der Meeresoberflächentemperatur (SST) herangezogen als auch die auf in-situ Daten basierenden Klimatologien von Janssen et al. (1999).

Simulation	Lauf	Simulierter Zeitraum	Status
ERA40-ERAInterim MPI-OM/HAMOCC hochaufgelöst, ungekoppelt	096	1958 – 2012	abgeschlossen
ERA40 MPIOM/HAMOCC/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	832	1958 – 2000	abgeschlossen
piControl MPIOM/HAMOCC/REMO niedrigaufgelöst, gekoppelt	125	1920 – 2100	abgeschlossen
piControl MPIOM/HAMOCC/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	130	1920 – 2100	abgeschlossen
Historisch MPIOM/HAMOCC/REMO niedrigaufgelöst, gekoppelt	124	1920 – 2005	abgeschlossen
Historisch MPIOM/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	851	1920 – 2005	abgeschlossen
Historisch MPIOM/HAMOCC/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	128	1920 – 2005	abgeschlossen
RCP4.5 MPIOM/HAMOCC/REMO niedrigaufgelöst, gekoppelt	127	2006 – 2100	abgeschlossen
RCP4.5 MPIOM/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	116	2006 – 2100	abgeschlossen
RCP4.5 MPIOM/HAMOCC/REMO hochaufgelöst, gekoppelt		2006 – 2100	geplant
RCP8.5 MPIOM/HAMOCC/REMO niedrigaufgelöst, gekoppelt	126	2006 – 2100	abgeschlossen
RCP8.5 MPIOM/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	114	2006 – 2100	abgeschlossen
RCP8.5 MPIOM/HAMOCC/REMO hochaufgelöst, gekoppelt	138	2006 – 2100	abgeschlossen

Tabelle 1: Übersicht der Modellsimulationen und zugehöriger Status

II.1.2 Auswertung

II.1.2.1 Effekt der NAO Variabilität auf die Primärproduktion im Nordostatlantik und in der nördlichen Nordsee

Die Arbeiten zu Beginn der Projektphase beinhalten hauptsächlich technische Weiterentwicklungen bzw. Verbesserungen des Modellsystems MPIOM/HAMOCC/REMO. Die Diskussion wissenschaftlicher Ergebnisse bezieht sich auf eine Analyse des Einflusses groß-skaliger atmosphärischer Klimavariabilität hinsichtlich advektivem Nährstoffeintrag aus dem Nordatlantik in die nördliche Nordsee und der damit verbundenen Intensität der biologischen Primärproduktion.

Eine wichtige Komponente für regionale Ökosystemmodellierung sind Nährstoffeinträge durch Festlandabflüsse. Vor allem in Binnenmeeren wie der Ostsee und dem Schwarzen Meer stellen sie die Hauptquelle für Nährstoffe dar und haben dadurch bedeutenden Einfluss auf das lokale marine Ökosystem. Um den Einfluss verschiedener Flüsse auf die biologische Produktion realistischer abbilden zu können, wurden gemessene Nährstoffeinträge verschiedener Flüsse der kontinentalen Nordseeküste (Pätsch und Lenhart, 2004), der Ostsee (Savchuk et al., 2012) sowie des Mittelmeeres (Ludwig et al., 2009) in das Biogeochemie Modell HAMOCC implementiert. Für die RCP Szenarienläufe werden die Konzentrationen der jüngsten Messdaten konstant gehalten werden. Der eigentliche Masseneintrag der Nährstoffe ist damit weiterhin von den variablen Abflussraten des HD Modells bestimmt.

Des Weiteren wurde eine Sedimentresuspensionsroutine für HAMOCC entwickelt. In flachen Schelfmeeren findet in Gebieten mit erheblicher Gezeitenströmung aufgrund von Erosions- und Resuspensionsprozessen kaum netto Deposition partikulären Materials in das Sediment statt, sodass remineralisiertes organisches Material überwiegend in der Wassersäule als Nährstoff für Planktonarten verfügbar bleibt. Die Berechnung des Sedimentabtrages partikulärer Bestandteile erfolgt in Abhängigkeit der lokalen bodennahen Strömungsgeschwindigkeit sowie der mittleren Sedimentdicke und -korngröße und ermöglicht dadurch eine adäquate globale Simulation von Sedimenterosion und -resuspension. In Szenarioläufen können außerdem zukünftige Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung als auch die Verfrachtung verschiedener Sedimentbestandteile untersucht werden.

In den Modellsimulationen für heutige klimatische Bedingungen sind in der nördlichen Nordsee vor allem im Mai und Juli positive Korrelationen der Primärproduktion mit dem Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO) angezeigt, entgegengesetzte Korrelationen jedoch im Nordatlantik, wo eine positive NAO-Phase die Frühjahrsblüte zu verzögern scheint (Abb. 1). Ein Einfluss der NAO auf die Intensität der Primärproduktion insgesamt konnte jedoch nicht festgestellt werden. In der nördlichen Nordsee geht eine positive NAO-Phase mit wärmeren Bedingungen im Winter und Frühling einher. Im Nordatlantik allerdings ist der Einfluss der NAO auf die Wassertemperatur begrenzt und kann somit den Einfluss auf die Planktonblüte nicht erklären. Es besteht jedoch im Frühjahr ein deutlicher Einfluss der NAO auf die Tiefe der vertikal durchmischten Deckschicht im Nordatlantik, welcher über die Windstärke und die Intensität des vertikalen Temperaturgradienten gesteuert wird (Abb. 2). Eine größere mittlere Deckschichttiefe im Mai positiver NAO-Phasen und der damit einhergehende schwächere vertikale Temperaturgradient weisen auf eine spätere Ausbildung der thermoklinen Sprungschicht hin. Die daraus resultierenden kühleren Temperaturen in den oberen Schichten stellen schließlich ungünstigere Bedingungen für die Planktonblüte dar.

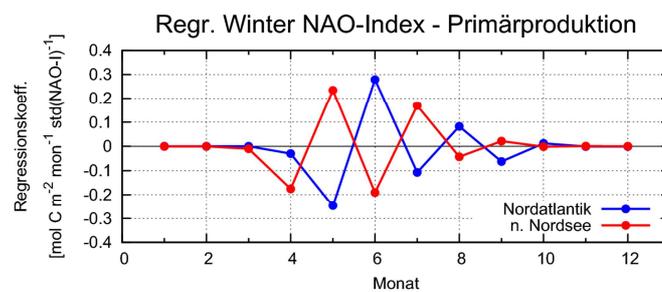


Abb. 1: Monatliche Regressionskoeffizienten zwischen Winter NAO-Index und Primärproduktion in der nördlichen Nordsee (rot) und im Nordatlantik (blau)

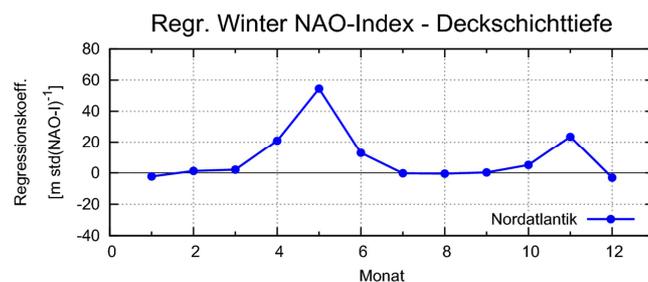


Abb. 2: Monatliche Regressionskoeffizienten zwischen Winter NAO-Index und Deckschichttiefe im Nordatlantik

II.1.2.2 Variabilitätsmoden der Wassertemperatur und der Zirkulation in der Nordsee

Nach Fertigstellung der ERA40 Referenzsimulationen stand die Vertiefung von Prozessverständnissen im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Analyse. Eine Untersuchung klimabedingter Veränderungen im NWES erfordert die Kenntnis der natürlichen interannualen bis multidekadischen Variabilität, um diese vom projizierten Klimaänderungssignal zu unterscheiden. Der dominierende Variabilitätsmodus des atmosphärischen Antriebs über der Nordsee wird durch Schwankungen in der Nordatlantischen Oszillation (NAO) angeregt. In positiven NAO-Phasen herrschen stärkere Westwinde über dem Nordatlantik, welche im Winter milde, feuchte Luft nach Nordeuropa transportieren und dadurch eine positive Lufttemperatur- und Niederschlagsanomalie über der Nordsee verursachen (Hurrell, 1995; Visbeck et al., 1998; Trigo et al., 2002). Die stärkeren Westwinde führen außerdem zu einem höheren mittleren Wasserstand in der Nordsee sowie zu einer verstärkten Zirkulation (Wakelin et al., 2003; Yan et al., 2004). Korrelationen des NAO-Index sowohl mit Volumentransporten in der Nordsee (Schrum und Siegmund, 2002; Winther und Johannessen, 2006; Hjøllø et al., 2009) als auch mit Wassertemperaturen (Becker und Pauly, 1996; Dippner, 1997; Tsimplis et al., 2006) zeigen jedoch in den Gebieten nordatlantischen Einstroms deutlich geringere Werte als in der zentralen und südöstlichen Nordsee. Darüber hinaus treten maximale Zirkulationsanomalien im Englischen Kanal und in der Südlichen Bucht bei südlichen Winden auf, im Gegensatz zu NAO-induzierten Westwinden (Prandle, 1978; Pingree und Griffith, 1980; Salomon et al., 1993). In diesen Gebieten kann daher die beobachtete Variabilität in der Zirkulation und Wassertemperatur nicht vollständig auf Schwankungen der NAO zurückgeführt werden, sondern weist auf signifikante Einflüsse anderer Variabilitätsmoden hin.

Der ungekoppelte ERA40-angetriebene Referenzlauf wurde bezüglich der räumlichen Muster der führenden saisonalen Variabilitätsmoden in der Nordsee eingehend mittels EOF Analysen untersucht. Die in Mathis et al. (2015) veröffentlichten Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der dominierende Variabilitätsmodus der Nordsee-Zirkulation mit Strömungsanomalien verbunden ist, welche eine Verstärkung der charakteristischen zyklonalen Zirkulation und des nordwestlichen Einstroms atlantischer Wassermassen in positiven NAO-Phasen beschreibt (Abb. 3, links).

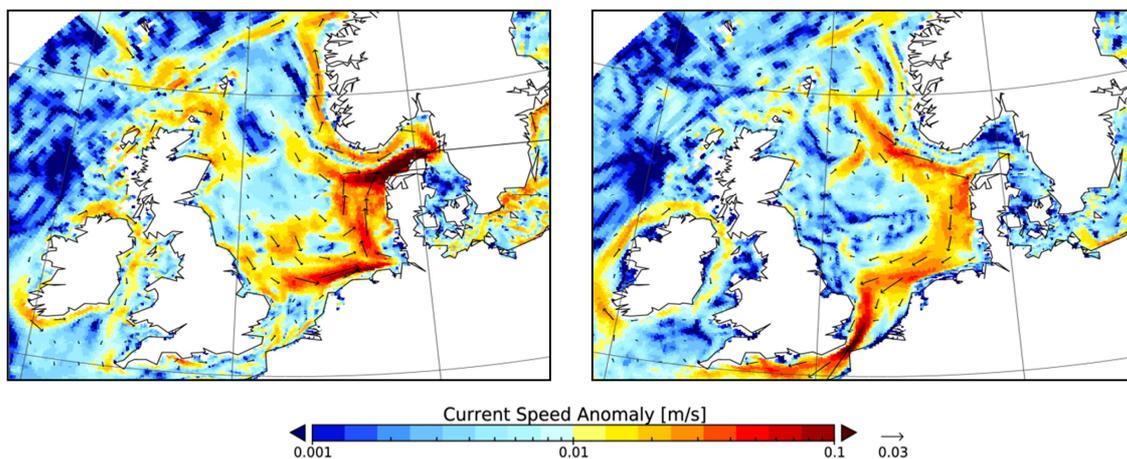


Abb. 3: Variabilität der ozeanischen Zirkulation im Winter. Links die erste EOF (44% erklärte Varianz) und rechts die zweite EOF (22% erklärte Varianz). Die Amplitude der Variabilität ist farblich unterlegt, die Richtung in den Strömungspfeilen wiedergegeben

Es zeigt sich aber noch ein zweites signifikantes Variabilitätsmuster, welches insbesondere den Einstrom durch den Englischen Kanal beeinflusst (Abb. 3, rechts). Die Regressionsanalyse des zugehörigen Windfeldes verdeutlicht, dass dieser zweite Variabilitätsmodus durch eine atmosphärische Luftdruckanomalie über den irischen und britischen Inseln gesteuert wird (Abb. 4, links). In positiven (negativen) Phasen dieses Modus ist der Einstrom verhältnismäßig warmer und salzreicher Wassermassen durch den Englischen Kanal abgeschwächt (verstärkt), bedingt durch nördliche (südliche)

Windanomalien. Die daraus resultierenden Temperatur- und Salzgehaltanomalien erklären bis zu 40% der lokalen Variabilität in der südlichen Nordsee (Abb. 4, rechts). Aus der Überlagerung der ersten beiden Variabilitätsmoden der Zirkulation ergibt sich somit eine Abschwächung der Korrelation zwischen der NAO und der integrierten Strömungsvariabilität im Englischen Kanal sowie ein weitgehend unabhängiges Strömungsverhalten in der nördlichen und südlichen Nordsee, welches auch von Hjøllø et al. (2009) diskutiert wurde und nun als Überlagerung verschiedener windinduzierter Variabilitätsmoden verstanden werden kann. Aufgrund ihrer Auswirkungen auf den hydrodynamischen und hydrographischen Zustand der Nordsee beeinflussen sie indirekt auch die Primärproduktion und den trophischen Zustand.

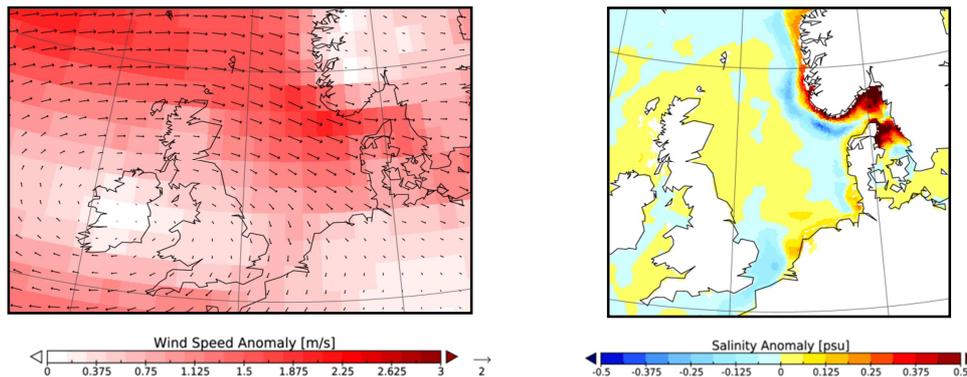


Abb. 4: Anomalien im Windfeld (links) und Salzgehalt (rechts) zugehörig zur 2. EOF der Ozeanzirkulation im Winter (siehe Abb. 3)

Ähnliche lokale Abschwächungen der Korrelation zwischen der NAO und der Wassertemperatur in den Gebieten atlantischen Einstroms können durch eine Überlagerung der dominierenden Variabilitätsmoden der Wassertemperatur erklärt werden. Die erste EOF der vertikal gemittelten Wassertemperatur im Winter beschreibt eine Temperaturanomalie in der gesamten Nordsee, welche auf die NAO-bedingten Schwankungen der Lufttemperatur zurückgeführt werden kann. Die zweite und dritte EOF hingegen reflektieren den advektiven Einfluss variabler einströmender Wassermassen aus dem Nordatlantik (Abb. 5). Die Anomalien der zweiten EOF werden dabei von einer Temperaturanomalie des einströmenden atlantischen Wassers verursacht. In positiven Phasen dieses Modus führen höhere Lufttemperaturen und niedrigere Windgeschwindigkeiten über dem östlichen Nordatlantik im vorangehenden Herbst zu einer reduzierten Durchmischungstiefe und damit zu einer Erwärmung der oberflächennahen Wassermassen, welche im Winter auf das NWES und in die Nordsee advektieren. Im Gegensatz dazu resultieren die Anomalien der dritten EOF aus der Variabilität im Volumentransport des einströmenden atlantischen Wassers. Das bipolare Muster in der Wassertemperatur entsteht dabei aus negativ korrelierten Einstromanomalien in der nördlichen Nordsee und im Englischen Kanal, welche unter anderem von den in Abb. 4 dargestellten Windanomalien angetrieben werden. Obgleich ausgeprägte Anomalien des zweiten und dritten Variabilitätsmodus nicht von Schwankungen der NAO forciert werden, treten sie häufig während ausgeprägter NAO-Phasen als überlagerte Moden auf. Der integrierte Einfluss auf die Gesamtvariabilität der Wassertemperatur führt so auf die in der Nordsee beobachtete Verminderung der Korrelation zwischen der NAO und der Wassertemperatur in den Gebieten nordatlantischen Einstroms.

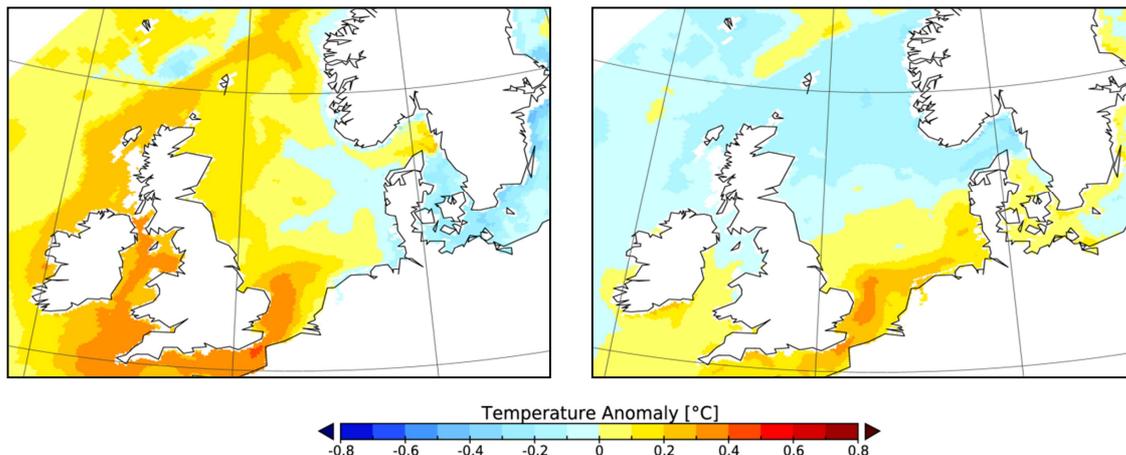


Abb. 5: Variabilität der vertikal gemittelten Wassertemperatur im Winter. Links die zweite EOF (12% erklärte Varianz) und rechts die dritte EOF (5% erklärte Varianz).

II.1.2.3 Auswirkungen der Modellkomplexität auf regionalisierte Klimaänderungssignale im NWES

Gegen Ende der Projektphase konzentrierte sich die wissenschaftliche Arbeit auf eine Sensitivitätsstudie über Auswirkungen verschiedener gängiger Regionalisierungsmethoden auf projizierte Klimaänderungssignale im Bereich des NWES. In vielen Studien regionaler Ozeanmodellierung wurde auf die Wichtigkeit hingewiesen, Austauschprozesse zwischen Ozean und Atmosphäre auch in regionalen Modellsimulationen zu koppeln (Schrum et al., 2003; Kjellström et al., 2005; Rummukainen, 2010; Tian et al, 2013; Gröger et al., 2015). Besonders für Schelf- und Randmeere ist eine hohe Sensitivität des physikalischen und biogeochemischen Zustandes bezüglich des atmosphärischen Antriebes charakteristisch. Außerdem ist vor allem in ungekoppelten Regionalisierungen ein starker Einfluss der zugrunde liegenden globalen Simulation in den Klimaänderungssignalen zu erkennen. Unterschiede zwischen gekoppelten und ungekoppelten Regionalisierungen globaler Klimamodellsimulationen konnten jedoch bisher noch nicht innerhalb eines konsistenten Modellsystems verglichen werden. Die hohe Flexibilität des regional gekoppelten Erdsystemmodells MPIOM/HAMOCC/REMO erlaubt eine solche Studie, indem für die Simulation eines Klimaszenarios verschiedene Modellkomponenten modifiziert oder ausgeschaltet werden. Die Komplexität der untersuchten Regionalisierungsmethoden reicht dabei von der vollständigen Kopplung der Interaktion zwischen Ozean und Atmosphäre bis zum ungekoppelten Regionalmodell, angetrieben durch interpolierte Daten anderer Atmosphärenmodelle bzw. ozeanischer Randwerte des ursprünglichen globalen Ozeanmodells.

Als Basis dieser Vergleichsstudie dient die mit dem globalen Erdsystemmodell MPI-ESM durchgeführte Klimaprojektion des IPCC RCP8.5 Emissionsszenarios. Die verschiedenen Regionalisierungen für den NWES sind in Tabelle 2 zusammengefasst. *Cref* stellt die mit dem regional gekoppelten Erdsystemmodell MPIOM/HAMOCC/REMO regionalisierte Referenzsimulation dar. Die Festlandabflussraten dieser Simulation wurden auch in den ungekoppelten Regionalisierungsexperimenten verwendet, welche allesamt mit derselben regionalen Gitterkonfiguration von MPIOM gerechnet wurden. In *EF* wurde MPIOM direkt mit Modelloutput der Atmosphärenkomponente von MPI-ESM angetrieben, in *EFroc* ist zusätzlich außerhalb der Nordsee/Ostsee ein starkes 3d Restoring von Wassertemperatur, Salzgehalt und Nährstoffkonzentrationen bezüglich MPI-ESM Anomalien aktiviert. In *RF* wurden atmosphärische Antriebsfelder verwendet, welche zuvor mit REMO ungekoppelt regionalisiert wurden. Analog zu *EFroc* ist in *RFroc* außerhalb der Nordsee/Ostsee ein starkes 3d Restoring bezüglich MPI-ESM Anomalien aktiviert. *EFroc* und *RFroc* imitieren somit regionale Ozeanmodelle mit vorgeschriebenen ozeanischen Randbedingungen und interpolierten bzw. regionalisierten atmosphärischen Antriebsdaten.

Simulation	Skalierung	Wechselwirkung Ozean-Atmos.	Atmosphärischer Antrieb	3d Restoring
MPI-ESM	global	gekoppelt	ECHAM6	nein
<i>Cref</i>	regional	gekoppelt	REMO	nein
<i>EF</i>	regional	ungekoppelt	ECHAM6	nein
<i>EFroc</i>	regional	ungekoppelt	ECHAM6	ja
<i>RF</i>	regional	ungekoppelt	REMO (Reg.)	nein
<i>RFroc</i>	regional	ungekoppelt	REMO (Reg.)	ja

Tabelle 2: Übersicht der Modellsimulationen. REMO (Reg.) steht für eine ungekoppelte Regionalisierung von ECHAM6

Die regionalisierten Klimaänderungssignale für jährlich gemittelte SST sowie die ursprüngliche globale MPI-ESM Klimaprojektion sind in Abb. 6 dargestellt. In der gesamten Nordsee und Ostsee ist das SST Änderungssignal generell stärker in der gekoppelten Regionalisierung *Cref* als in MPI-ESM. Der stärkere Erwärmungstrend in *Cref* kann auf Veränderungen des Nordatlantikstroms zurückgeführt werden, welche durch die höhere Auflösung der MPIOM Gitterkonfiguration im Nordatlantik eine andere Charakteristik aufweist als in MPI-ESM. Die heutige Lage und nordöstliche Strömungsrichtung des Nordatlantikstroms sind in *Cref* realistisch dargestellt, während in MPI-ESM die zonale Strömungskomponente überschätzt ist und eine östlichere Lage des Nordatlantikstroms mit sich bringt – eine bekannte Problematik in globalen Zirkulationsmodellen (z. B. Molinari et al., 2008; Keeley et al., 2012; Flato et al., 2013). Für das RCP8.5 Szenario jedoch berechnen die Simulationen MPI-ESM und *Cref* eine zukünftige Verstärkung und ostwärtige Erweiterung nordatlantischer Tiefdruckgebiete. Durch die stärkeren Westwinde werden in MPI-ESM salzärmere subpolare Wassermassen in den Nordostatlantik advektiert, welche zu einer Intensivierung der vertikalen Schichtung führen. In *Cref* hingegen erfährt der Nordatlantikstrom eine ostwärtige Verlagerung, wodurch mehr Wärme in den Nordostatlantik und den NWES transportiert wird und das Klimaänderungssignal der SST gegenüber MPI-ESM verstärkt.

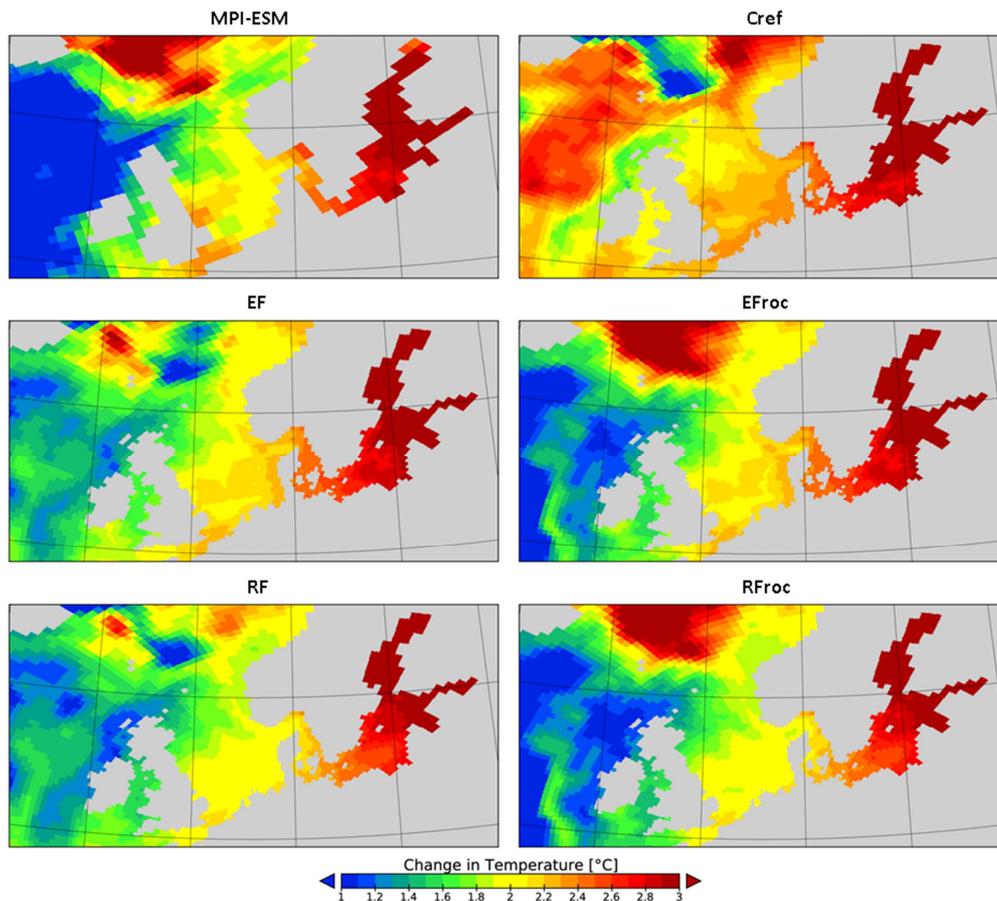


Abb. 6: Klimaänderungssignal jährlich gemittelter SST (RCP8.5 2071-2100 minus Historisch 1971-2000) für MPI-ESM sowie für gekoppelte und ungekoppelte Regionalisierungen, zusammengefasst in Tabelle 2

Abb. 6 zeigt, dass zwar die räumliche Verteilung der projizierten SST Änderungen in den ungekoppelten Regionalisierungen *EF*, *EFroc*, *RF* und *RFroc* durch die höhere Gitterauflösung detaillierter dargestellt werden kann, die groß-skalige Struktur und im Besonderen das Ausmaß der Änderungen jedoch weitgehend die zugrunde liegende globale Simulation reproduzieren. In *EF* und *EFroc* werden die von MPI-ESM projizierten Änderungen der Wärmeflüsse an der Meeresoberfläche über den atmosphärischen Antrieb an die Regionalisierungen übertragen, und in *RF* und *RFroc* erfolgt der Einfluss der globalen Simulation über die in der atmosphärischen Regionalisierung eingehende MPI-ESM SST. Die Verwendung ozeanischer Randbedingungen in *EFroc* und *RFroc* vermag die durch den atmosphärischen Antrieb geprägten Resultate von *EF* und *RF* kaum zu beeinflussen. Die Experimente verdeutlichen, dass ungekoppelte Regionalisierungen keine unabhängigen SST Klimaänderungssignale im NWES simulieren können, selbst dann nicht, wenn das Modellgebiet weit über die herkömmlichen Grenzen hinaus vergrößert wird. Eine Sensitivität der SST bezüglich der Regionalisierungsmethode wurde für vergangene und heutige Zustände der Nordsee auch von Schrum et al. (2003), Gröger et al. (2015) und Wang et al. (2015) herausgestellt sowie für zukünftige Zustände der Ostsee von Kjellström et al. (2005).

Projizierte Änderungen des jährlich gemittelten Oberflächensalzgehalts (SSS) sind in Abb. 7 veranschaulicht. Die unterschiedlichen Änderungen des Nordatlantikstroms und des Subpolarwirbels induzieren einen stärkeren Abfall des Salzgehalts im Nordostatlantik in MPI-ESM als in *Cref*. Der Salzgehalt der Nordsee ist hauptsächlich bestimmt durch einströmende salzreiche Wassermassen aus dem Atlantik und Frischwassereinträge über Festlandabflüsse in die Nord- und Ostsee. Der Abfall des Salzgehalts im Nordostatlantik wird in den NWES advektiert und verursacht daher ein stärkeres Änderungssignal in MPI-ESM als in *Cref* vor allem in der nördlichen Nordsee und im Englischen Kanal.

Die Änderungen im Nordostatlantik resultieren jedoch überwiegend aus der Gitterauflösung, im Gegensatz zu Austauschprozessen zwischen Ozean und Atmosphäre, sodass bereits die ungekoppelten Regionalisierungen *EF* und *RF* ähnliche Änderungssignale wie *Cref* liefern. Große Abweichungen zu *Cref* sind allerdings in *EFroc* und *RFroc* angezeigt, da der starke Abfall des Salzgehalts in MPI-ESM über das 3d Restoring importiert wird. Entlang der kontinentalen Küste und in der Ostsee dominieren in allen Regionalisierungen die ansteigenden Festlandabflüsse, welche aus einer Intensivierung des hydrologischen Kreislaufes und den damit einhergehenden höheren Niederschlägen folgen.

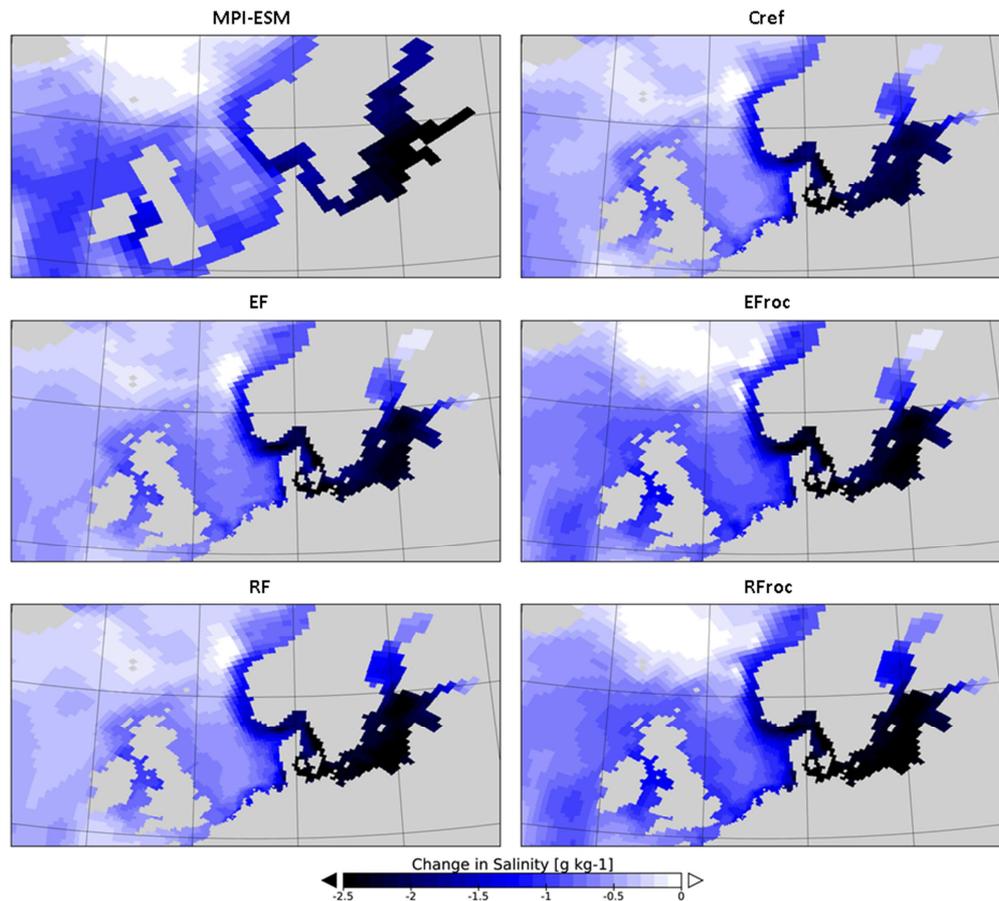


Abb. 7: Klimaänderungssignal jährlich gemittelter SSS (RCP8.5 2071-2100 minus Historisch 1971-2000) für MPI-ESM sowie für gekoppelte und ungekoppelte Regionalisierungen, zusammengefasst in Tabelle 2

Die Abhängigkeit regionalisierter Zustandsänderungen von der Regionalisierungsmethode spiegelt sich auch in der Verstärkung der saisonalen Sprungschicht in der zentralen und nördlichen Nordsee wider, welche in den ungekoppelten Simulationen schwächer ausfällt als in *Cref*. Auch Änderungen in der Nordseezirkulation und die damit verbundenen Einströme nordatlantischer Wassermassen zeigen je nach Regionalisierungsmethode unterschiedliche Ergebnisse. Die erwähnten Änderungen im Nordostatlantik haben neben entsprechender Änderungen von Salzgehalt und Temperatur außerdem eine Abnahme der Nährstoffkonzentrationen in der oberen Wassersäule zur Folge und resultieren in einer Reduktion der biologischen Primärproduktion in der Nordsee. Zusätzliche Einflussgrößen für die Änderung der Primärproduktion sind Wassertemperatur, vertikale Schichtung und vorherrschende Lichtverhältnisse, wodurch auch die Abschwächung der Schelf-Kohlenstoffpumpe eine Abhängigkeit von der Regionalisierungsmethode aufweist (Tabelle 3). Für die in dieser Studie untersuchten Parameter zeigt sich sogar eine größere Abhängigkeit des Klimaänderungssignals von der Regionalisierungsmethode als von der Qualität der Simulation heutiger physikalischer und biogeochemischer Zustände des NWES.

Simulation	Änderung der
------------	--------------

	CO ₂ Aufnahme
MPI-ESM	-0.48 (-19%)
<i>Cref</i>	-0.22 (-16%)
<i>EF</i>	-0.28 (-22%)
<i>EFroc</i>	-0.30 (-21%)
<i>RF</i>	-0.20 (-16%)
<i>RFroc</i>	-0.23 (-18%)

Tabelle 3: Klimaänderungssignal jährlicher netto CO₂ Aufnahme der Nordsee für MPI-ESM sowie für gekoppelte und ungekoppelte Regionalisierungen, zusammengefasst in Tabelle 2. Werte sind in mol m⁻² 100 yr⁻¹ gegeben

Eine eingehendere Analyse der Ergebnisse dieser Studie wird zur Zeit für den Artikel „Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change in the Northwest European Shelf?“ von M. Mathis, A. Elizalde und U. Mikolajewicz vorbereitet. Darin wird zusätzlich der Einfluss von klimatologischen Festlandabflüssen sowie von verschiedenen Interpolationstechniken in der Aufbereitung atmosphärischer Antriebsdaten auf die regionalisierten Klimaänderungssignale untersucht.

II.1.2.3 Aussichten für RACE II

Wie in Abschnitt I.3 erläutert, konnten die Verzögerungen in den hochaufgelösten gekoppelten Simulationen bereits weitgehend aufgeholt werden. In Abb. 8 sind aus diesen Simulationen zeitliche Entwicklungen der Nordsee SST und SSS für den vorindustriellen Kontrolllauf, den Historischen Lauf sowie für die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5 bis zum Jahr 2100 dargestellt. Besonders im Salzgehalt der Nordsee ist die starke natürliche Variabilität im Vergleich zum Klimaänderungssignal angezeigt. Der für die zweite Projektphase geplante Ensemble-Ansatz über mehrere Modellrealisationen ermöglicht eine eingehende Analyse der natürlichen Variabilität und gibt damit Aufschluss über Unsicherheiten in den projizierten Klimaänderungssignalen.

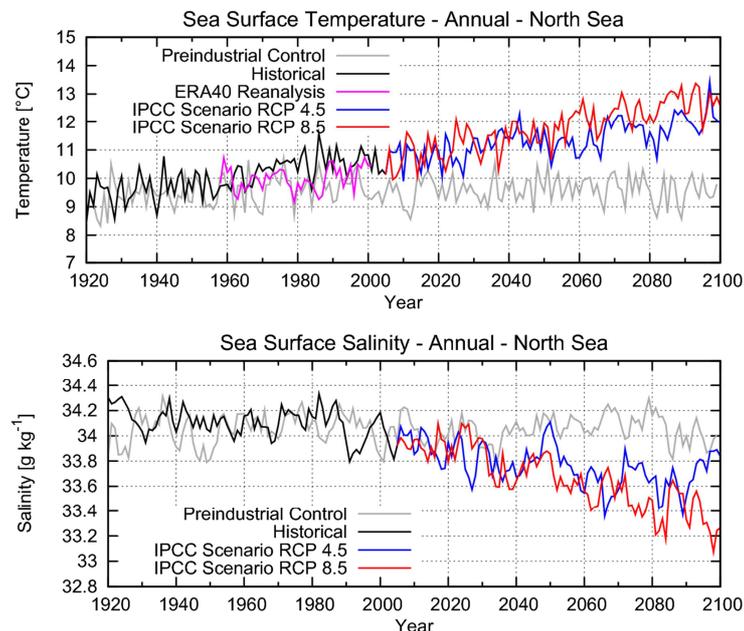


Abb. 8: Zeitreihen jährlich gemittelter SST (oben) und SSS (unten) aus den hochaufgelösten gekoppelten Simulationen für den vorindustriellen Kontrolllauf, den Historischen Lauf sowie für die beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. Darüber hinaus sind SST Satellitendaten der für die ERA40 Reanalyse Modellläufe verwendeten Eingangsdaten dargestellt

Literatur

- Becker G. A. and M. Pauly, 1996. Sea surface temperature changes in the North Sea and their causes, *ICES Journal of Marine Science* 53, 887-898.
- Bülow K., C. Dieterich, A. Elizalde, M. Gröger, H. Heinrich, S. Hüttl-Kabus, B. Klein, B. Mayer, H. E. M. Meier, U. Mikolajewicz, N. Narayan, T. Pohlmann, G. Rosenhagen, S. Schimanke, D. Sein, and J. Su, 2014. Comparison of three regional coupled ocean atmosphere models for the North Sea under today's and future climate conditions, *KLIWAS Schriftenreihe*, KLIWAS-27/2014, doi: 10.5675/Kliwas_27/2014.
- Dippner J. W. (1997), SST Anomalies in the North Sea in Relation to the North Atlantic Oscillation and the Influence on the Theoretical Spawning Time of Fish, *Dt. Hydrogr. Z.* 49 (2/3), 267-275.
- Elizalde Arellano A., 2011. The water cycle in the Mediterranean region and the impacts of climate change. Reports on Earth System Science (PhD thesis), Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 128 pp.
- Flato G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S. C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason, and M. Rummukainen, 2013. Evaluation of Climate Models. In: Stocker T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. XiaV. , Bex, and P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 741–866.
- Gröger M., C. Dieterich, M. Meier, and S. Schimanke, 2015. Thermal air-sea coupling in hindcast simulations for the North Sea and Baltic Sea on the NW European shelf . *Tellus A* 67, 22 pp.
- Hjøllo S. S., M. D. Skogen, and E. Svendsen, 2009. Exploring currents and heat within the North Sea using a numerical model, *J. Marine Systems* 78 (1), 180-192.
- Hurrell J. W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation, *Science* 269, 676-679.
- Janssen F., C. Schrum, and J. O. Backhaus, 1999. A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. *Dt. Hydrogr. Z.* 51 (9), 5-245.
- Keeley S. P. E., R. T. Sutton, and L. C. Shaffrey, 2012. The impact of North Atlantic sea surface temperature errors on the simulation of North Atlantic European region climate. *Q. J. R. Meteorological Society* 138 (668), 1774–1783.
- Kjellström E., R. Döscher, and H. E. M. Meier, 2005. Atmospheric response to different sea surface temperatures in the Baltic Sea: coupled versus uncoupled regional climate model experiments. *Hydrology Research* 36 (4-5), 397-409.
- Ludwig W., E. Dumont, M. Meybeck, and S. Heussner, 2009. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades?, *Progress in Oceanography*, 80, 199-217.
- Mathis M., A. Elizalde, U. Mikolajewicz, and T. Pohlmann, 2015. Variability patterns of the general circulation and sea water temperature in the North Sea. *Progress in Oceanography* 135, 91-112.
- Molinari R. L., Z. Garraffo, and D. Snowden, 2008. Differences between observed and a coupled simulation of North Atlantic sea surface currents and temperature. *Journal of Geophysical Research* 113 (C9), 15 pp.
- Pätsch J. and H. Lenhart, 2004. Daily loads of nutrients, total alkalinity, dissolved inorganic carbon and dissolved organic carbon of the European continental rivers for the Years 1977-2002, *Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung*, ZMK Nr. 48, 159 pp.
- Pingree R. D. and D. K. Griffith, 1980. Currents driven by a steady uniform wind stress on the shelf seas around the British Isles, *Oceanologica Acta* 3, 227-236.
- Prandle D., 1978. Residual flows and elevations in the southern North Sea, *Proc. R. Soc. Lond. A.* 359, 189-228.
- Rummukainen M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1 (1), 82–96.
- Salomon J. C., M. Breton, and P. Guegueniat, 1993. Computed residual flow through the Dover Strait, *Oceanologica Acta* 16, 449-455.
- Savchuk O. P., B. G. Gustafsson, M. R. Medina, A. V. Sokolov, and F. V. Wulff, 2012. External nutrient loads to the Baltic Sea 1970-2006, *Baltic Nest Institute, Stockholm, Technical Report No. 5*, 22 pp.

Schrum C. and F. Siegismund, 2002. Modellkonfiguration des Nordsee/Ostseemodells: 40-Jahres NCEP Integration, Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Ozeanographie 44, 178 pp.

Schrum C., U. Huebner, D. Jacob, and R. Podzun, 2003. A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and the Baltic Sea, *Climate Dynamics*, 21 (2), 131-151.

Sein, D., U. Mikolajewicz, M. Gröger, I. Fast, I. Cabos, J. Pinto, S. Hagemann, T. Semmler, A. Izquierdo, and D. Jacob, 2015. Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM. Part I: Description and validation. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 7, 268-304.

Tian T., F. Boberg, O. Christensen, J. Christensen, J. She, and T. Vihma, 2013. Resolved complex coastlines and land-sea contrasts in a high-resolution regional climate model: a comparative study using prescribed and modelled SSTs. *Tellus A* 65, 19 pp.

Trigo R. M., T. J. Osborn, and J. M. Corte-Real, 2002. The North Atlantic Oscillation influence on Europe: climate impacts and associated physical mechanisms, *Climate Research* 20, 9-17.

Tsimplis M. N., A. G. P. Shaw, R. A. Flather, and D. K. Woolf, 2006. The influence of the North Atlantic Oscillation on the sea-level around the northern European coasts reconsidered: the thermosteric effects, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364 (1841), 845-856.

Visbeck M., H. Cullen, G. Krahnmann, and N. Naik, 1998. An ocean model's response to North Atlantic Oscillation-like wind forcing, *Geophys. Res. Lett.* 25 (24), 4521-4524.

Wakelin S. L., P. L. Woodworth, R. A. Flather, and J. A. Williams, 2003. Sea-level dependence on the NAO over the NW European Continental Shelf, *Geophysical Research Letters* 30 (7), doi:10.1029/2003GL017041.

Wang S., C. Dieterich, R. Döscher, A. Höglund, R. Hordoir, H. E. M. Meier, P. Samuelsson, and S. Schimanke, 2015. Development and evaluation of a new regional coupled atmosphere-ocean model in the North Sea and Baltic Sea. *Tellus A* 67, 20 pp.

Winther N. G. and J. A. Johannessen, 2006. North Sea circulation: Atlantic inflow and its destination, *J. Geophys. Res.* 111, C12018, 12 pp.

Yan Z., M. N. Tsimplis, and D. Woolf, 2004. Analysis of the relationship between the North Atlantic oscillation and sea-level changes in northwest Europe, *International Journal of Climatology* 24 (6), 743-758.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren in vollem Umfang notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Die neu erworbenen Erkenntnisse über die natürliche Variabilität des physikalischen und biogeochemischen Zustandes des NWES als auch über den Einfluss einer globalen Klimasimulation in verschiedenen Regionalisierungsmethoden stellen eine wichtige Referenz dar für die Validierung numerischer Modellsimulationen und ihrer Reaktion auf atmosphärische Schwankungen. Die in den demnächst erscheinenden NOSCCA (North Sea region climate change assessment) Bericht eingegangenen Klimaprojektionen basieren weitgehend auf ungekoppelten regionalen Simulationen für die Nordsee. Die Ergebnisse unserer Sensitivitätsstudie zeigen jedoch einerseits, dass ein Prozessverständnis von Veränderungen im Klimasystem nur anhand gekoppelter Regionalisierungen entwickelt werden kann, andererseits aber, dass Projektionen ausgewählter Größen, wie z. B. der Salzgehalt, durchaus auch mit ungekoppelten Modellen adäquat regionalisierbar sind. Dabei ist im Besonderen darauf zu achten, dass Ozeandaten der globalen Simulation, welche an offenen lateralen Rändern eines regionalen Modellgebietes vorgeschrieben werden, zu erheblichen Verfälschungen des Klimaänderungssignals führen können. Die Erkenntnisse aus dieser Studie bilden damit einen wertvollen Leitfaden für das Verständnis regionaler Klimaprojektionen.

Darüber hinaus wurden die Outputdaten der räumlich hoch-aufgelösten regionalen Modellläufe der Referenz- und Szenariosimulationen unter anderem in dem vom BMVBS finanzierten Programm KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) analysiert und stehen neben RACE weiterhin auch anderen Forschungsprojekten zur Verfügung, insbesondere dem von der EU geförderten Verbundprojekt PEARL (Preparing for extreme and rare events in coastal regions). Vor allem die einstündigen Outputdaten der Meeresspiegelauslenkung dienen für Extremwertanalysen von lokalen Hochwasserereignissen bzw. ihrer Veränderung im Zuge eines potentiellen globalen Klimawandels. Die geplanten Ensembleläufe sind auch erforderlich, um dafür eine ausreichende statistische Basis zu gewährleisten.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes erfolgte die gegenseitige Information über Fortschritte der einzelnen AP auf den jährlich abgehaltenen Statusseminaren und bei regelmäßigen Treffen der Kooperationspartner. Wissenschaftliche Fortschritte außerhalb des Verbundes wurden durch laufende Sichtung neuer Veröffentlichungen verfolgt bzw. auf Workshops und Meetings diskutiert und in der eigenen Forschungstätigkeit berücksichtigt. Es wurden keine Fortschritte an anderer Stelle bekannt, die das eigene Arbeitsprogramm nennenswert beeinflusst haben oder gar die angestrebten eigenen Ergebnisse vorweggenommen hätten.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

II.6.1 Poster, Vorträge auf nationalen und internationalen Tagungen und Workshops

Mikolajewicz, U., M. Mathis, A. Elizalde: Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change for the North Sea? Workshop on joint regional climate system modelling for the European sea regions, Italien, Rom, 2015 (Vortrag)

Mathis, M., J. Su, T. Pohlmann: Downscaling global climate projections for the 21st century. Symposium on recent and expected climate change along the Chinese coastal zones, China, Qingdao, 2015 (Vortrag)

Markovic, M., B. Klein, **U. Mikolajewicz** and **M. Mathis:** Natural modes of variability in the A1B scenario: Atmospheric forcing anomalies associated with NAO, EGU, Wien, 2015 (Poster)

Mathis, M., J. Su, T. Pohlmann: Experiences from regional climate projections of the 21st century for the North Sea. 12th Polish-German Seminar, Polen, Sopot, 2014 (Vortrag)

Elizalde, A., **M. Mathis, U. Mikolajewicz:** A new regional climate system model setup for the EuroCORDEX domain. 3rd Lund regional-scale climate modelling workshop, Schweden, Lund, 2014 (Poster)

Markovic, M., B. Klein, S. Hüttl-Kabus, **U. Mikolajewicz, D. Sein** and M. Gröger: The Influence of the North Atlantic Oscillation on the North Sea and the Baltic Sea, EGU, Wien, 2013 (Poster)

II.6.2 Veröffentlichungen

Mathis, M., A. Elizalde, U. Mikolajewicz und T. Pohlmann, 2015: Variability patterns of the general circulation and sea water temperature in the North Sea. Progress in Oceanography 135, 91-112

Mathis, M., A. Elizalde, U. Mikolajewicz: Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change for the North Sea? In Vorbereitung

Pätsch, J., C. Dieterich, U. Gräwe, M. Gröger, **M. Mathis, H. Kapitza, M. Bersch, A. Moll, T. Pohlmann, J. Su, H.T.M. Ho Hagemann, A. Schulz, A. Elizalde, C. Eden:** Global and regional model evaluation of hydrodynamic aspects in the North Sea relevant for ecosystem modeling. In Vorbereitung

III. Erfolgskontrollbericht

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

AP. 3.2 konzentrierte sich auf die Wechselwirkungen zwischen dem Nordatlantik und der Nordsee, sowie auf die Übertragung klimabedingter Änderungssignale zwischen den beiden Meeresgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. Es hat damit im Bereich Meeresforschung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele im aktuellen BMBF-Förderschwerpunkt „System Erde“ geleistet.

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

Der Fokus der wissenschaftlichen Auswertung in AP 3.2 lag in der Abschätzung klimabedingter Änderungen auf dem NWES, im Besonderen in der Nordsee, und der Untersuchung der Kopplungsmechanismen zwischen globalen Modellsimulationen und hochauflösenden Regionalisierungen für das Gebiet des NWES. Durch die Anwendung des regional gekoppelten Erdsystemmodells MPIOM/HAMOCC/REMO in unterschiedlichen Konfigurationen und räumlichen Auflösungen konnten wesentliche Erkenntnisse über die Variabilität des nordatlantischen Klimasystems und ihre Auswirkungen auf den NWES gewonnen werden. Die Identifizierung führender Variabilitätsmoden in der Nordsee erklärt bereits bekannte Korrelationsmuster zwischen der Wassertemperatur bzw. der Zirkulation mit der NAO und schließt damit eine Wissenslücke in der regionalen Klimaforschung. Anhand der durchgeführten Sensitivitätsstudie konnten in der regionalen Ozeanmodellierung erstmals Einflüsse des projizierten Klimaänderungssignals einer globalen Modellsimulation auf gängige gekoppelte und ungekoppelte Regionalisierungsmethoden konsistent untersucht werden. Die Erkenntnisse und Erfahrungen daraus betonen die Wichtigkeit gekoppelter Modellsimulationen für regionale Zukunftsprojektionen und leisten damit einen weiteren Beitrag zur gegenwärtigen Entwicklung im Wissenschaftsbereich regionaler Klimaforschung.

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 entstanden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Die erzielten Ergebnisse liegen im Bereich der Grundlagenforschung und sind nicht direkt wirtschaftlich verwertbar. Allerdings ist der subpolare Nordatlantik eine Schlüsselregion für die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und für das Klima in Europa von großer Bedeutung. Eine Fortführung der hochauflösenden Modellsimulationen leistet daher einen Beitrag zu einem Frühwarnsystem bezüglich klimabedingter Veränderungen im Atlantischen Ozean und in der Nordsee und kann als Diskussions- und Entscheidungsgrundlage klimapolitischer Anpassungsmaßnahmen verwendet werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden in international begutachteten Fachzeitschriften publiziert und tragen so zum wissenschaftlichen Fortschritt bei. Sie liefern ferner einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die Ergebnisse, die während RACE gewonnen wurden, sind Basis des Nachfolgeprojekts RACE-2, welches einen Fokus auf die Wechselwirkung zwischen Nordostatlantik und Nordsee legt. Die Ergebnisse aus RACE sind auch ein wichtiger Beitrag zu den Arbeiten des Expertennetzwerks des BMVI, das sich mit den klimabedingten Auswirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur und den Küstenschutz beschäftigt.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

n/a

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Präsentationen im Rahmen von wissenschaftlichen Kongressen und Fachzeitschriften sind bereits während der Projektlaufzeit genutzt worden und weiterhin in Arbeit.

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde im Wesentlichen eingehalten. Geringfügige Abweichungen sind in Abschnitt I.3 erläutert.

Abschlussbericht zu RACE Teilprojekt 3.4

Teilprojektleiter:

Dr. Johann Jungclaus
Prof. Dr. Jochem Marotzke
Max Planck Institut für Meteorologie
Bundesstrasse 53
20146 Hamburg
johann.jungclaus@mpimet.mpg.de
Tel.: 040 41173109

Wissenschaftlicher Mitarbeiterin: Dr. Daniela Matei (MPI-M)

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das wissenschaftlichen Ziel dieses Teilprojektes ist es, interannuale bis dekadische Variabilität und Vorhersagbarkeit der atlantischen Zirkulation und der von ihr beeinflussten Regionen (Europa, Europäisches Nordmeer) in einem gekoppelten Modell mit bisher nicht erreichter Auflösung im Ozean zu untersuchen. Sensitivitätsstudien und Analysen bestehender Simulationen (Hindcasts und Vorhersagen) sollen die Rolle der Darstellung von Prozessen im Ozean und bei der Ozean-Atmosphäre Wechselwirkung beleuchten. Die Projektplanung sieht vor, Ozeanmodellversionen mit wirbel-erlaubenden (eddy-permitting) und wirbel-auflösenden (eddy-resolving) Rechengittern zu verwenden. Im Projekt wird untersucht, inwieweit eine bessere Darstellung der Ozeandynamik sowie von Wirbeln und Fronten zu einer Verbesserung der Vorhersagequalität für die nächste Dekade führt.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt baut auf den Erfahrungen des Nordatlantik Projektes auf. Hier wurde das Vorhersagesystem (in geringerer Auflösung) sowie Verfahren zur Initialisierung des Ozeans (Matei et al., 2012a) entwickelt und eine der weltweit ersten Publikationen zur Kombinierten Vorhersage/Hindcast erstellt (Pohlmann et al., 2009). Das Max Planck Institut für Meteorologie ist eines der weltweit führenden Institute der Klimaforschung und erstellte im Rahmen des Coupled Model Intercomparison Projects – Phase 5 (CMIP5) umfangreiche Nachhersagen und Vorhersagen. Die Antragsteller haben jahrelange Erfahrung in der Modellierung und sind an internationalen Projekten zur Vorhersage (EU THOR, EU COMBINE, EU NAACLIM). J. Marotzke ist Gesamtleiter des BMBF Programms Mittelfristige Klimaprognosen (MiKlip).

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bezüglich der vorgesehenen Arbeiten mit dem hochauflösenden gekoppelten Modell sind Verzögerungen wegen der verspäteten Inbetriebnahme des HLRE-3 Rechnersystems am DKRZ entstanden. Während wir bei Antragstellung von Mitte 2014 ausgegangen waren, erfolgte die Bereitstellung für die Nutzer erst im Sommer/Herbst 2015. Die vorgesehenen Arbeiten mit dem wirbelauflösenden Modell mussten deswegen in die zweite Phase von RACE verschoben werden. In der ersten Phase konzentrieren wir uns daher auf die Untersuchung von zwischenjährlicher und zwischendekadischer Variabilität und Vorhersagbarkeit im nordatlantischen und europäischen Sektor. Dazu verwenden wir Modellsimulationen, die im Rahmen des BMBF Projektes MiKlip bzw. des internationalen Modellvergleichsprojektes CMIP5

am MPI-M durchgeführt worden sind. Die Untersuchungen zur Modellauflösung im Ozeanmodell beschränken sich auf den Vergleich von nicht-wirbelauflösenden mit wirbelerlaubenden Modellversionen. Fokus der Analysen sind die Abhängigkeit der Vorhersagegüte in der nordatlantischen Region sowie die Qualität der simulierten Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen von der Modellauflösung. Weiterhin untersuchen wir die Potentiale einer zeitlichen Erweiterung des Vorhersagepotentials durch neue 20-Jahre Vorhersageexperimente.

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

Die Erfahrungen aus dem Projekt "Nordatlantik-2" und aus anderen Pilotstudien (Bellucci, A. et al., 2014; Doblas-Reyes F.J., et al., 2013; Meehl et al., 2014) zeigen dass die Vorhersagefähigkeiten von Klimamodellen durch Modellfehler und die geringe Auflösung der Modelle eingeschränkt ist. Für die europäische Region ganz wesentlich ist dabei die unzureichende Darstellung des Nordatlantischen Stromes. Die daraus resultierenden Fehler in der Ozean-Atmosphäre Wechselwirkung führen dazu, dass die Wärmeflüsse z.T. ein umgekehrtes Vorzeichen haben, als von Beobachtungen bekannt ist. Damit ergeben sich unmittelbare Auswirkungen auf die Sturmsugbahnen und auf den Wärmetransfer vom Ozean auf den Kontinent (Keeley et al., 2012). In letzter Zeit ist gezeigt worden, dass ein ausgeprägter Mehrwert für die Vorhersagbarkeit im nordatlantischen/europäischen Raum erzielt werden kann wenn gekoppelte Modelle mit deutlich erhöhter Auflösung eingesetzt werden. Allerdings lag in den bisherigen Studien der Fokus auf der Erhöhung der horizontalen Auflösung in der atmosphärischen Komponente des Klimamodells und auf der saisonalen und zwischenjährlichen Zeitskala, so dass die Bedeutung der Modellauflösung für den dekadischen Zeithorizont unerforscht blieb. Die übergroße Mehrheit der im CMIP5 Prozess durchgeführten Vorhersageexperimente verwendete nicht einmal wirbelerlaubende Ozeangitter. Es besteht daher Anlass zur Vermutung, dass entscheidende Mechanismen im Nordatlantischen Ozean und Klimasystem von einer wirbelauflösenden Darstellung profitieren würden und damit ein bisher unausgeschöpftes Potential zur Verbesserung der Vorhersagegüte besteht. Es sollte deshalb in RACE die Variabilität und Vorhersagbarkeit von atlantischen und europäischen Klimavariationen mit einem gekoppelten Modell untersucht werden, das, besonders in der Ozeankomponente, wesentlich feinere Gitterauflösung bietet als vorhandene Vorhersagesysteme. Die angestrebte Modellkonfiguration besteht aus dem ECHAM6 Atmosphärenmodell und einem Ozeanmodell, das auf der STORM Version des MPI-OM aufbaut und mit einer Auflösung von 0.1° (MPI-OM TP6M) (von Storch et al., 2012) ausgestattet ist. Die Arbeiten zur Vorhersagbarkeit im hochaufgelösten Modell beschränken sich auf die ersten Dekaden des 21. Jahrhunderts, so dass wir Datensynthesen zur Initialisierung des Ozeanmodells verwenden, die von der wesentlich verbesserten Abdeckung des Ozeans mit autonomen Beobachtungssystemen profitieren. Die Verwendung eines wirbelauflösenden Ozeanmodells erlaubt es, nicht nur großskalige Phänomene wie die beckenweite Temperatur oder die Umwälzelle zu betrachten, sondern auch regionale und kleinskalige Prozesse zu berücksichtigen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Verbundes

Mit dem AP 3.3 arbeiteten wir bzgl. der Abschätzung des Potenziales für die Vorhersagbarkeit regionaler Änderungen des Meeresspiegels im Nordatlantik zusammen.

Außerhalb des Verbundes (national und international)

Die Arbeiten im RACE Projekt konnten von den Simulationen und einzelnen Analysearbeiten profitieren, die im Rahmen des BMBF Projektes MiKlip durchgeführt wurden. Der Schwerpunkt von RACE liegt dabei auf der Untersuchung von ozeanischen Phänomenen. Während der gemeinsamen Laufzeit von RACE und dem von der EU geförderten Verbundprojekt NACLIM - North Atlantic Climate fand eine enge Kooperation statt. Hier untersuchten wir gemeinsam die polwärtige Ausbreitung und das Vorhersagepotential von Temperaturanomalien im Europäischen Nordmeer und in die Barents See.

II. Eingehende Darstellung

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

II.1.1 Untersuchung zur Rolle der Gitterauflösung im Ozeanmodell in wirbelerlaubenden und groben Modelligittern

In der ersten Phase von RACE konzentrierten wir uns auf die Analyse von vorhandenen Simulationen (CMIP5 Simulationen für das präindustrielle und historische (1850-2005) Klima sowie retrospektive Vorhersagen aus den CMIP5 und MiKlip Archiven). In vergleichenden Analysen von Experimenten mit grobauflösenden (MPI-ESM-LR, ca. 1.5°) und wirbelerlaubenden (MPI-ESM-MR, 0.4°) Ozeangittern untersuchten wir, ob eine deutliche Erhöhung der Auflösung zu Verbesserungen in der Darstellung der Ozeandynamik, der Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen und in Vorhersagequalität und Vorhersagehorizont führt. Wir konnten feststellen, dass das wirbelerlaubende MPI-ESM-MR auf den relevanten Zeitskalen erhöhte Energieniveaus im ozeanischen Massen- und Wärmetransport aufweist. Dies führt insbesondere im Subpolarwirbel des Nordatlantiks zu einem stärkeren Einfluss des Ozeans auf die Atmosphäre und damit zu einem verstärkt ozeanisch-getriebenen Anteil an den Fluktuationen des Klimas (Niesel and Matei, Manuskript in Vorbereitung). Im Vergleich zu den niedriger aufgelösten Modellvarianten (MPI-ESM-LR und der Vorgängerversion MPI-AR4) zeigt das wirbelerlaubende Modell (rote Kurve in Abb. 1) einen stärkeren Einfluß der Ozeanvariabilität auf die Atmosphäre im Bjerknes-schen Sinne.

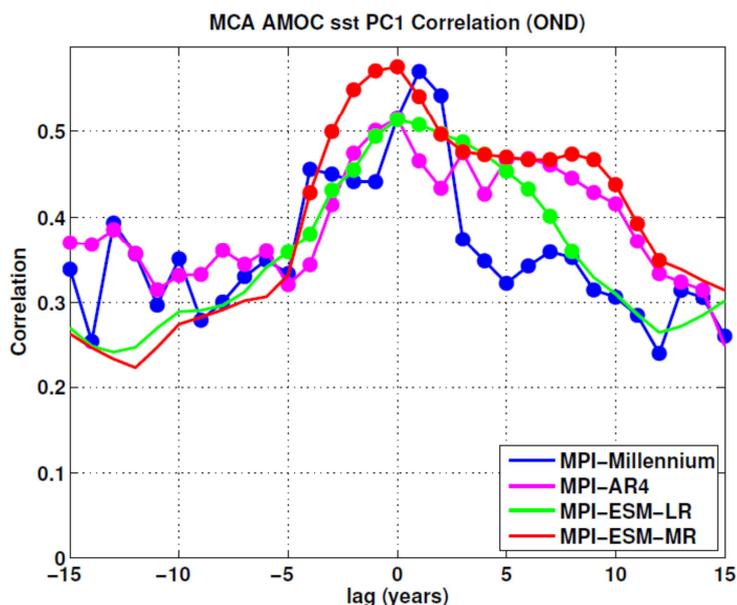


Abb. 1: Korrelationskoeffizient zwischen der dominierenden Prinzipalkomponente der AMOC und der Meeresoberflächentemperatur als Funktion der zeitlichen Verschiebung zwischen beiden Größen. Negative „lags“ zeigen an, dass die Atmosphäre zeitlich führt; bei positiven „lags“ führt der Ozean. Ausgefüllte Punkte zeigen Bereiche an, die statistisch signifikant sind (5%) (Bachelorarbeit J. Niesel).

Des Weiteren untersuchten wir die Auflösungsabhängigkeit in retrospektiven Vorhersagen, die sich durch den Initialisierungsdatensatz im Ozean unterscheiden. Dabei verwenden wir bereits vorhandene Modellsimulationen aus dem Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) und dem BMBF Projekt MiKlip (Müller et al., 2012), um die Bedeutung der Auflösung und der Anfangsbedingungen für die Vorhersagbarkeit auf der Zeitskala von Jahren bis zu einem Jahrzehnt zu bestimmen. Die Anfangsbedingungen stammen dabei entweder aus Ozeanmodellsimulationen mit atmosphärischen Antrieb aus Reanalysen der letzten Jahrzehnte oder aus einem mittels Datenassimilation (3DVAR) gewonnenen Ozeansyntheseprodukt (ORA-S4). Die Analysen bestätigen Befunde, die mit dem Vorgängermodell ECHAM5/MPIOM (Matei et al., 2012a) gewonnen wurden und zeigen eindeutige Verbesserungen in der Vorhersagegüte für die Oberflächentemperaturen über dem Nordatlantik und dem nord-westeuropäischen Festland als Folge der Initialisierung des Ozeans. Diese Verbesserung erweist sich als robust über verschiedene Modellversionen, aber auch hinsichtlich verschiedener Initialisierungs- und Bewertungsverfahren. Unabhängig von der Initialisierungsmethode fanden wir in den Simulationen, die einen wirbelerlaubenden Ozean verwenden, eine deutliche Verringerung des Vorhersagefehlers im subpolaren Nordatlantik, in der Norwegen- und Grönlandsee, im Nordpazifik, im Südlichen Ozean, sowie für Oberflächentemperaturen in tropischen Regionen. Die höhere Auflösung im Ozeanmodell führt zudem zu einer verbesserten Vorhersagegüte in wichtigen integralen Größen wie der Atlantischen Umwälzkulation sowie dem Überströmen von Tiefenwasser über den Grönland-Schottland Rücken.

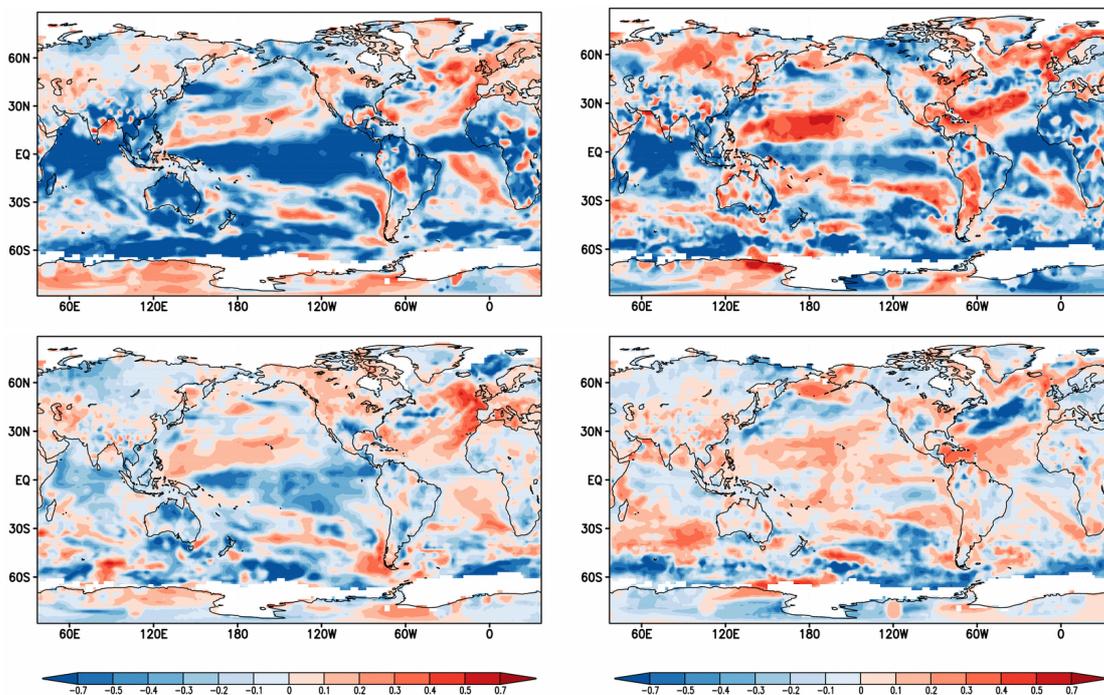


Abb. 2: Veränderung des Vorhersagefehlers aus retrospektiven Vorhersagen mit dem Vorhersagesystem im Vergleich zu nicht-initialisierten Experimenten. Rote Farbschattierungen bedeuten Verbesserungen, blaue Verschlechterungen gegenüber dem nicht-initialisierten System für den Vorhersagezeitraum von 2-5 Jahren. Vorhersageexperimente mit dem CMIP5 System (Oben) und dem MiKliP Baseline 1 System (Unten) für unterschiedliche Gitterauflösungen im Modell: MPI-ESM-LR (links) und MPI-ESM-MR (rechts). (Matei et al., 2016b)

II.1.2 Studien zu Mechanismen der Vorhersagbarkeit im Nordatlantik

In einer Studie (Lohmann und Matei, 2016) untersuchen wir die Rolle der Ozeandynamik für die Vorhersagbarkeit von klimatisch wichtigen Größen im subpolaren Nordatlantik, die weitreichende Auswirkungen nicht nur auf das Klima sondern auch auf wirtschaftliche und gesellschaftliche Mechanismen haben (Park, Bader, und Matei, 2015). Wir konzentrieren uns dabei auf die Vorhersagbarkeit der Stärke des Subpolarwirbels (SPG) im Nordatlantik, der einen kontrollierenden Einfluss auf den meridionalen Wärmetransport im Ozean und auf Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen hat. Generell diagnostizieren wir, dass sowohl das Flächenmittel als auch die Maximalstärke bis zu zwei Jahre vorhersagbar sind. Darüber hinaus finden wir, dass der Verlauf der starken Variation der 1990er Jahre von allen retrospektiven Ensemblevorhersagen reproduziert wird, die wir in den Jahren 1993 bis 1998 starten.

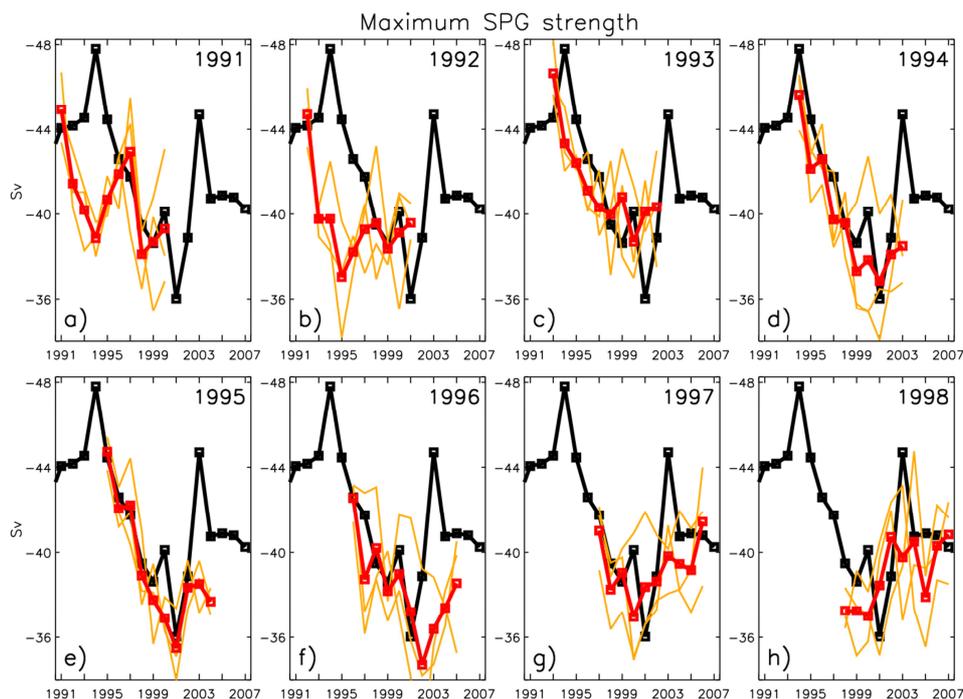


Abb. 3: Stärke (jährliche Mittel) des Subpolarwirbels (SPG) für die Assimilationslauf (schwarze Linie) und die individuellen Ensemblemitglieder (orange Linien) sowie das Ensemblemittel (rote Linie) für Anfangsjahre 1990 (a) bis 1998 (h). Die Stärke ist definiert als das räumliche Minimum der barotropen Stromfunktion im subpolaren Nordatlantik. Die Ausrichtung der y-Achse ist

umgekehrt zur sonst üblichen Darstellung, da das Vorzeichen des zyklonalen Wirbels negativ ist. (Lohmann und Matei, 2016)

In Kooperation mit dem EU Projekt NAACLIM haben wir die Vorhersagbarkeit der SSTs im Europäischen Nordmeer und in der Barents See untersucht (Langehaug, Matei, Eldevik, Lohmann, Gao 2016). Dies sind Schlüsselregionen für den Austausch zwischen Atlantik und Arktis. Mit Schwerpunkt auf die atlantisch-beeinflusste Domäne dieser Regionen analysieren wir retrospektive Vorhersagen von mehreren Modellen aus dem CMIP5 Archiv. Von den untersuchten Modellen zeigt nur MPI-ESM-LR signifikante Verbesserungen der Vorhersagegüte in initialisierten Simulationen. Wir finden Vorhersageverbesserungen sowohl für den Horizont von ein bis drei Jahren, als auch für die zweite Pentade. Die Vorhersagegüte ist besser als die durch Persistenz zu erwartende, woraus wir schließen, dass die Ozeandynamik, vor allem im subpolaren Atlantik, auch hier eine wichtige Rolle spielt: Die beste Vorhersagegüte finden wir dort, wo SST Anomalien mit dem Atlantikwasser advehiert werden. Eine weitere Verfeinerung des Modells durch bessere Gitterauflösung könnte zu einer weiteren Steigerung des Vorhersagepotentials führen.

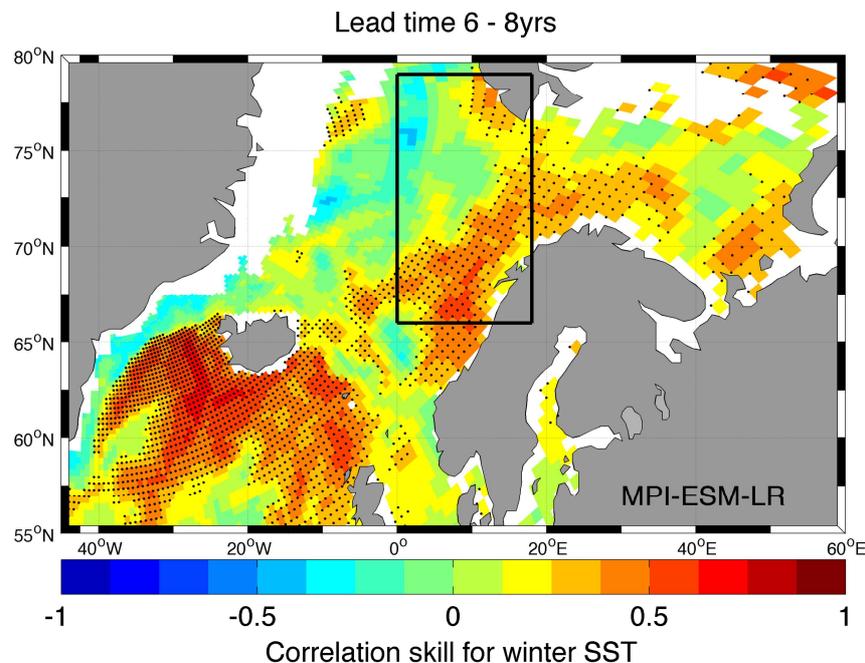


Abb. 4: Vorhersagegüte der winterlichen SST in MPI-ESM-LR: Korrelationskoeffizienten zwischen retrospektiver Vorhersage und den Beobachtungsdaten (HadISST) für den Vorhersagezeitraum von 6 bis 8 Jahren. Gepunktete Regionen erfüllen das 5% Signifikanzkriterium. In weiß gefüllten Regionen sind keine HadISST-Daten vorhanden oder die Gebiete sind vollständig eisbedeckt (Langehaug, Matei, Eldevik, Lohmann, Gao, 2016).

II.1.3 Verlängerung des Vorhersagehorizontes in die zweite Dekade

Obwohl Anzeichen aus Untersuchungen zur potentiellen Vorhersagbarkeit auf Zeithorizonte von Dekaden schließen lassen, beschränkten sich Studien zur mittelfristigen Vorhersage in der Regel auf einen Vorhersagezeitraum bis zu zehn Jahren. In RACE-I untersuchten wir, ob sich das Fenster der Vorhersagen für bestimmte Variablen in die zweite Dekade ausdehnen lässt. Wir benutzen dafür das MPI-ESM in seiner CMIP5 Konfiguration für dekadische Vorhersagen und initialisierten mit Daten aus einem angetriebenen MPIOM Ozeanmodelllauf (Matei et al., 2012 a,b) für die Jahre 1948-2012. Wir konzentrieren uns dabei auf den Nordatlantik, wo wir robuste Verbesserungen der Vorhersagegüte und wichtige Implikationen für das europäische Klima erwarten können. Tatsächlich finden wir, dass die aus potentiellen Vorhersagbarkeitsstudien bekannten Vorhersageverbesserungen über die gesamten 20 Jahre signifikant bleiben (Matei et al., 2016a). Dies gilt für den Bereich des Subpolarwirbels, dem östlichen subtropischen Atlantik und dem westlichen Mittelmeerraum, wobei die besten Vorhersagegüten für Sommer und Herbst erreicht werden. Wir diagnostizieren die Vorhersagbarkeit nicht nur für die SST sondern auch für Wärmeinhaltsänderungen im oberen Ozean und Salzgehaltsänderungen.

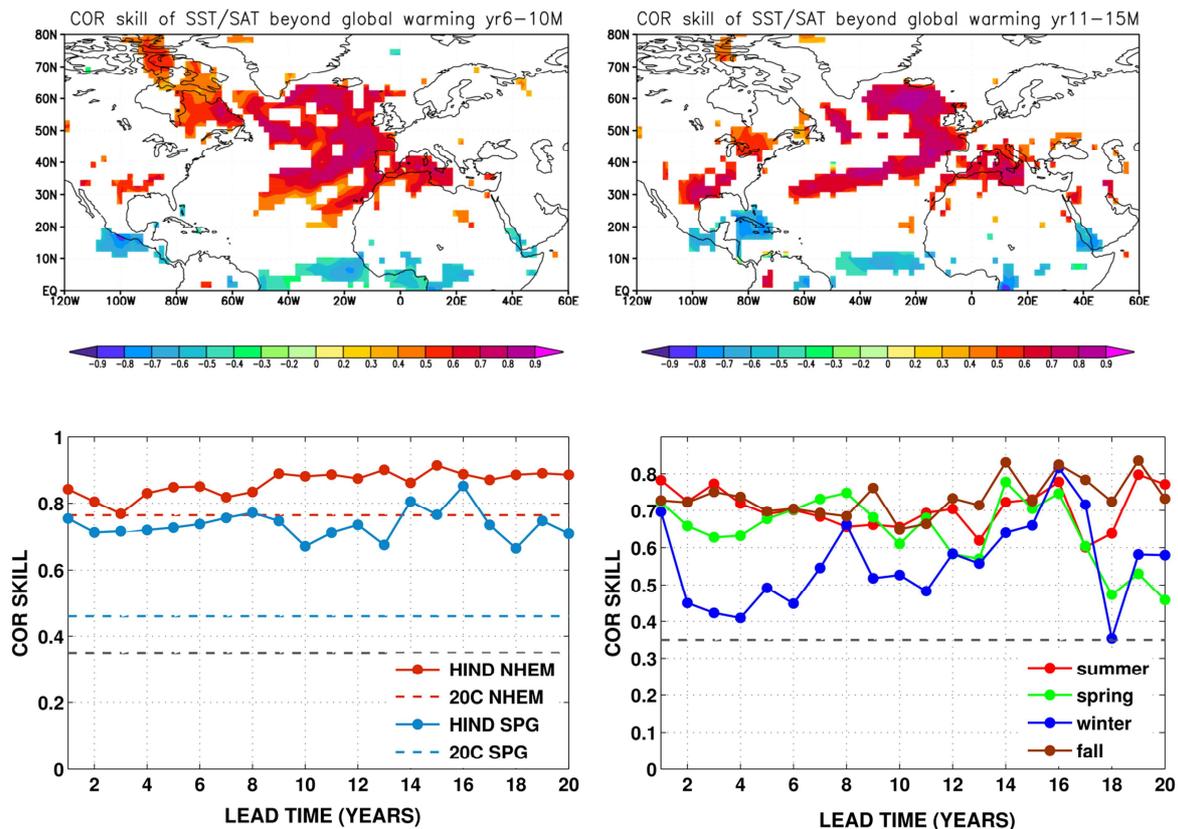


Abb. 5 obere Reihe: Vorhersagbarkeit der SST über den globalen Erwärmungstrend hinaus. Anomaliekorrelationskoeffizient zwischen zeitlichen Veränderungen der SST in Beobachtungen (HadISST) und den retrospektiven Vorhersagen (Hindcasts) für eine Vorhersagezeit von 6-10

(links) und 11-15 (rechts) Jahren. Nur signifikante Korrelationen (5%-level) sind dargestellt. **Untere Reihe, links:** Anomaliekorrelationskoeffizient zwischen retrospektiven Vorhersagen und Beobachtungen für die Stärke des SPG (blau) bzw. der über die Nordhemisphäre gemittelten SST (rot). Die gestrichelten roten und blauen Linien bezeichnen die entsprechenden Korrelationen für die nicht-initialisierten Simulationen zum Vergleich. **Untere Reihe, rechts:** Saisonal aufgelöste Korrelationskoeffizienten für die SST im Subpolarwirbel. Die gestrichelten grauen Linien bezeichnen die 5% Signifikanzgrenze. (Matei et al., 2016a)

Unsere Studie steht im Einklang mit neueren Beobachtungsergebnissen, die zeigen, dass der integrierte Effekt der Nordatlantischen Oszillation im Ozean für Vorhersagemöglichkeiten der AMV von bis zu 10-15 Jahren führt (Li et al., 2013). Nach unserer dekadische Vorhersage ist eine substantielle Abkühlung im Bereich des Subpolarwirbels über die nächsten Jahre zu erwarten (Matei et al., 2016a), die durch eine Verminderung der ozeanischen Wärmetransportkonvergenz im Subpolarwirbel verursacht wird. Ein solcher kühlerer SPG Bereich könnte deutliche klimatische Auswirkungen auf den nordatlantisch/europäischen Sektor haben (Knight et al., 2005). So könnte der Trend zu häufigeren tropischen Wirbelstürmen wieder abnehmen oder es könnte über Europa feuchtere und wärmere Sommer vorherrschen. Abrupte Übergänge wie derjenige zu einer persistent negativen AMV Phase sind allerdings nach unserer Ensemblevorhersage über die nächsten 20 Jahre nicht zu erwarten. Diese vielversprechenden Ergebnisse und die substantielle Kapazitätserweiterung im Deutschen Klimarechenzentrum durch die Installation des HLRE-III im Sommer 2015 stellen eine ideale Grundlage dar, in der zweiten Phase von RACE ein Vorhersagesystem mit bisher nicht realisierbarer Auflösung im Ozean zu erstellen und einzusetzen.

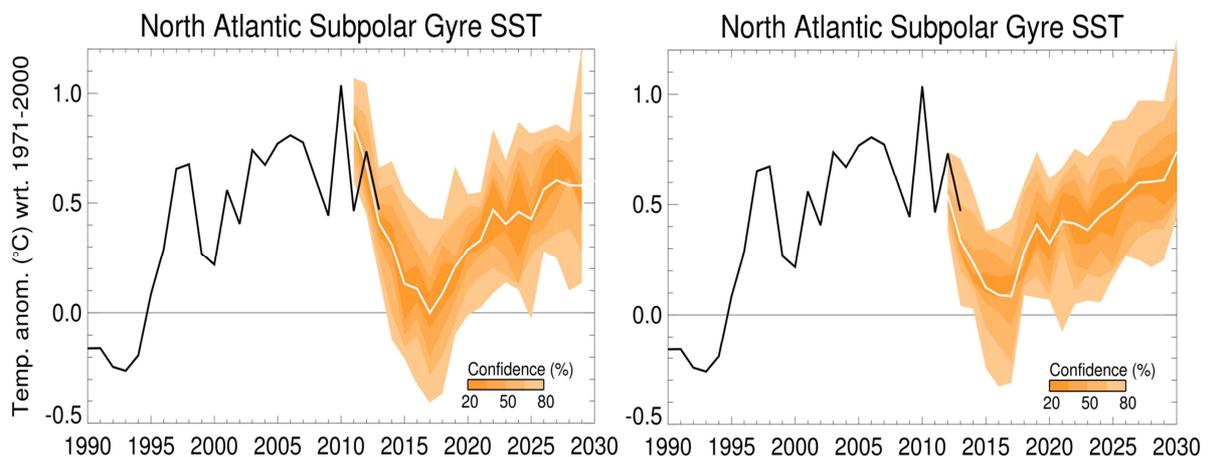


Abb. 6: Anomalievorhersage für die Oberflächentemperatur der Region des Subpolarwirbels (im Nordatlantik) für die (links) am 1. Januar 2011 und (rechts) am 1. Januar 2012 initialisierte Vorhersage. Im schattierten Bereich zeigt die weiße Linie das Ensemblemittel und Orange den Konfidenzbereich der Vorhersage. Zum Vergleich sind auch Beobachtungen aus dem HadISST-Datensatz (schwarz) dargestellt. (Matei et al., 2016a)

II.1.4 Wird es in Zukunft Dürre im Sahel geben? Der Unterschied zwischen außertropischer und tropischer Ozeanerwärmung ist entscheidend.

Die Unterschiede in den Zukunftsprojektionen für den Sahelniederschlag beschäftigt die Wissenschaft, weil der Sahel und ihre Gesellschaft besonders anfällig für klimatische Änderungen sind. In unserer Studie (Park, Bader, Matei, 2015, Nature Communications) zeigen wir zum ersten Mal, dass die zukünftige differentielle Ozeanerwärmung in der Nordhemisphäre der entscheidende Faktor ist, um die Widersprüchlichkeiten des zukünftigen Sahelniederschlags aufzulösen.

Die beobachtete Niederschlagsvariabilität im Sahel, die semiaride Übergangszone südlich der Sahara, zeigt starke dekadische Schwankungen. Auf die regenreichen 1950iger Jahre folgten lang andauernde Dürren in den 1970iger und 1980iger Jahren mit verheerenden Umwelt- und sozioökonomischen Auswirkungen. Sowohl in Beobachtungen als auch in Klimamodellsimulationen wurden diese starken dekadischen Niederschlagsschwankungen im Wesentlichen durch eine bestimmte Verteilung der Meeresoberflächentemperatur verursacht. Diese Beziehung zwischen Meeresoberflächentemperaturen und Sahelniederschlagstrend gilt jedoch nur für den Beobachtungszeitraum und ist nicht anwendbar in den Zukunftsprojektionen. Die verschiedenen Projektionen zeigen erhebliche Unterschiede im zukünftigen Sahelniederschlag von Dürre bis deutliche Regenzunahme. Unsere Studie analysierte eine Vielzahl der neuesten Klimasimulationen und führte Sensitivitätsexperimente mit einem atmosphärischen Klimamodell durch, das durch verschiedene ozeanische Erwärmungsmuster angetrieben wurde. Im Gegensatz zum Beobachtungszeitraum, in dem die niederfrequente Sahelniederschlagsvariabilität hauptsächlich durch tropische Meeresoberflächentemperaturen verursacht wurde, zeigen wir, dass der simulierte zukünftige Sahelniederschlagstrend wesentlich von der Stärke der außertropischen Erwärmung abhängt. Das heißt, die außertropische Ozeanerwärmung erzeugt zusätzlichen Niederschlag im Sahel, wohingegen die tropische Erwärmung zu einer Niederschlagsreduktion führt (Abbildung 1). Dieser konkurrierende Einfluss von außertropischer und tropischer Erwärmung ist der Schlüssel, um die Unsicherheit im zukünftigen Sahel Niederschlag zu verstehen. Daher ist für eine zuverlässige Projektion des Sahelniederschlags das Bestimmen der wahrscheinlichsten zukünftigen differentiellen Ozeanerwärmung in der Nordhemisphäre notwendig.

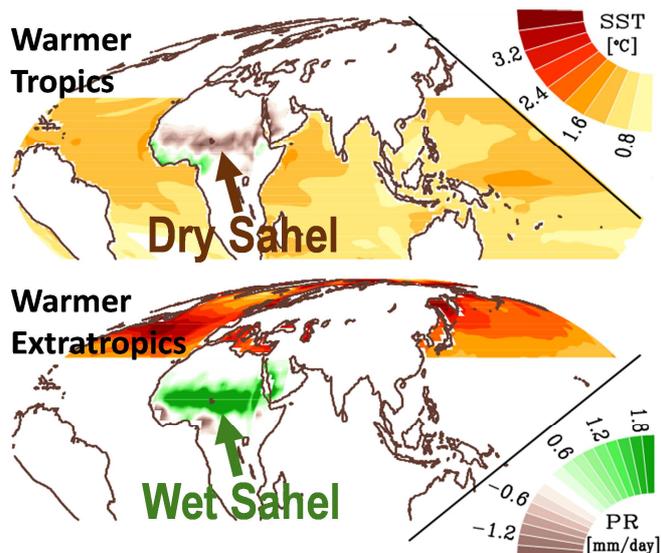


Abbildung 1. Konkurrierender Einfluss von tropischer und außertropischer Ozeanerwärmung auf die zukünftige Niederschlagsentwicklung im Sahel. Skizze des Zusammenhangs zwischen tropischer/außertropischer Ozeanerwärmung (SST) und Niederschlagsänderung (PR) im Sahel. (courtesy J.-Y. Park)

Literatur

- Bellucci, A. et al., 2014: An assessment of a multi-model ensemble of decadal climate predictions. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-014-2164-y.
- Doblas-Reyes F. J., Andreu-Burillo I., Chikamoto Y., García-Serrano J., Guemas V., Kimoto M., Mochizuki T., Rodrigues L. R. L. and van Oldenborgh G. J., 2013, Initialized near-term regional climate change prediction. *Nature Communications*, 4, 1715, doi:10.1038/ncomms2704.
- Keeley, S.P.E., R.T. Sutton, and L. Shaffrey, 2012: The impact of North Atlantic sea surface temperature errors on the simulation of North Atlantic European region climate. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 138, 1774-1783, doi:10.1002/qj.1912.
- Kirtman, B., et al., 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 953–1028, doi:10.1017/CBO9781107415324.023.
- Knight, J., R. Allan, C. Folland, M. Vellinga, and M. Mann, 2005: A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi: 10.41039/2005GL024233.
- H. R. Langehaug, D. Matei, T. Eldevik, K. Lohmann, Y. Gao, 2016: Poleward propagation of ocean temperature anomalies as a source for the Nordic Seas inter-annual predictability. *Climate Dynamics*, (published online), doi:10.1007/s00382-016-3118-3.

- Li, J., C. Sun, and F.-F. Jin, 2013: NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5497–5502, doi:10.1002/2013GL057877.
- Lohmann, K. and D. Matei, 2016: Predictability of subpolar gyre strength with focus on the mid-1990s. (to be submitted to *Climate Dynamics*)
- Matei, D., J. Baehr, J. H. Jungclaus, H. Haak, W.A. Müller, W., and J. Marotzke, 2012a: Multiyear prediction of monthly mean Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5°N. *Science*, 335(6064), 76-79.
- Matei, D., H. Pohlmann, J. Jungclaus, W. Müller, H. Haak, and J. Marotzke, 2012b: Two tales of initializing decadal climate predictions experiments with the ECHAM5/MPI-OM model. *J. Climate*, 25, 8502-8523, doi:10.1175/JCLI-D-11-00633.1.
- Matei D. et al., 2016a: Skillful North Atlantic predictability extends beyond decadal time scale (in Vorbereitung).
- Meehl et al., 2014: Decadal climate prediction: An update from the trenches. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 243-267, doi:10.1175/BAMS-D-12-00241.1.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.P. Xie, and R.J.Small, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, 452, 206-209.
- Müller, W. A., J. Baehr, H. Haak, J. H. Jungclaus, J. Kröger, D. Matei, D. Notz, H. Pohlmann, J. S. vonStorch, and J. Marotzke, 2012: Forecast skill of multi-year seasonal means in the decadal prediction system of the Max Planck Institute for Meteorology., *Geophys. Res. Lett.*, 39, L22707, doi:10.1029/2012GL053326
- Niesel J. and D. Matei: Atmospheric response to the natural variability of the Atlantic meridional overturning circulation in a suite of MPI-M coupled model simulations (in Vorbereitung).
- Park, J.-Y, Bader, J., and Matei, D., 2015: Northern-hemispheric differential warming is the key to understanding the discrepancies in the projected Sahel rainfall. *Nature Communications*, 5:5985, doi: 10.1038/ncomms6985.
- Pohlmann, H., J.H. Jungclaus, A. Köhl, D. Stammer, and J. Marotzke, 2009: Initializing Decadal Climate Predictions with the GECCO Oceanic Synthesis: Effects on the North Atlantic. *J. Climate*, 22, 3926-3938.
- Scaife, A. A., et al., 2011: Improved Atlantic blocking in a climate model. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23703, doi:10.1029/2011GL049573.
- Scaife, A. A., et al., 2014: Skillful long-range prediction of European and North American winters. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2514–1519, doi: 10.1002/2014GL059637.
- Stockdale, T. N., F. Molteni, and L. Ferranti, 2015: Atmospheric initial conditions and the predictability of the Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2014GL062681.
- von Storch, J.-S., et al., 2012: An estimate of the Lorenz energy cycle for the world ocean based on the 1/10 ° STORM/NCEP simulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 2185-2205.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren in vollem Umfang notwendig und den Zielen des Forschungsvorhabens angemessen.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Im Teilprojekt 3.4 wurden wichtige und nachhaltige Ergebnisse zur mittelfristigen Klimavorhersage erzielt. Diese Ergebnisse bildeten einen Teil des Fundamentes für das BMBF Forschungsprogramm „Mittelfristige Klimaprognose“ (MiKlip) und für weitere Studien im Rahmen des BMBF Ozeanforschungsprogramms „Regional Atlantic“ (RACE II).

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen während des Vorhabens

Innerhalb des Verbundes erfolgte die gegenseitige Information über Fortschritte der einzelnen AP auf den jährlich abgehaltenen Statusseminaren und bei regelmäßigen Treffen der Kooperationspartner. Wissenschaftliche Fortschritte außerhalb des Verbundes wurden durch laufende Sichtung neuer Veröffentlichungen verfolgt bzw. auf Workshops und Meetings diskutiert und in der eigenen Forschungstätigkeit berücksichtigt. Es wurden keine Fortschritte an anderer Stelle bekannt, die das eigene Arbeitsprogramm nennenswert beeinflusst haben oder gar die angestrebten eigenen Ergebnisse vorweggenommen hätten. In letzter Zeit ist gezeigt worden, dass ein ausgeprägter Mehrwert für die Vorhersagbarkeit im nordatlantischen/europäischen Raum erzielt werden kann (Scaife et al., 2014; Stockdale et al. 2015), wenn gekoppelte Modelle mit deutlich erhöhter Auflösung eingesetzt werden. Allerdings lag in den bisherigen Studien der Fokus auf der Erhöhung der horizontalen Auflösung in der atmosphärischen Komponente des Klimamodells, während die Ozeanauflösung wirbelerlaubend blieb (Scaife et al., 2011). Weiterhin untersuchten die vorliegenden Studien Variabilität und Vorhersagbarkeit auf saisonaler und zwischenjährlicher Zeitskala (Nordatlantische Oszillation und Saisonale Vorhersagen) so dass die Bedeutung der Modellauflösung für den dekadischen Zeithorizont unerforscht blieb.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

D. Matei et al., 2016a: Skillful North Atlantic predictability extends beyond decadal time scale. (in preparation for Nat. Geo)

D. Matei et al., 2016b: Multiyear predictions of the North Atlantic climate variability- the impact of increased ocean model resolution. (in preparation for Climate Dynamics)

Niesel J. and **D. Matei**: Atmospheric response to the natural variability of the Atlantic meridional overturning circulation in a suite of MPI-M coupled model simulations. (in preparation)

K. Lohmann and **D. Matei**, 2016: Predictability of North Atlantic subpolar gyre strength including the mid-1990s weakening. (to be submitted to Climate Dynamics)

J.-Y. Park, J. Bader, **D. Matei**, 2015: Anthropogenic Mediterranean warming essential driver for present and future Sahel rainfall. In press *Nature Climate Change*.

G. Rädel, T. Mauritsen, B. Stevens, D. Dommenges, **D. Matei**, K. Bellomo, A. Clement, 2016: Amplification of El Niño by cloud longwave coupling to atmospheric circulation. *Nature Geoscience*, 9, 106–110.

T. Jung, F. Doblas-Reyes, H. Goessling, V. Guemas C. Bitz, C. Buontempo, R. Caballero, E. Jakobson, J. Jungclaus, M. Karcher, T. Koenig, **D. Matei**, J. Overland, T. Spengler, S. Yang, 2015: Polar-lower latitude linkages and their role in weather and climate prediction. *Bull. Amer.*

Meteor. Soc, 96, 197-200. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00121.1>.

H. R. Langehaug, **D. Matei**, T. Eldevik, K. Lohmann, Y. Gao, 2016: On model differences and skill in predicting sea surface temperature in the Nordic and Barents Seas. *Climate Dynamics*, (), 1-21, doi:10.1007/s00382-016-3118-3.

H. Hátún, K. Lohmann, **D. Matei**, J. Jungclaus, S. Pacariz, M. Bersch, A. Gislason, J. Ólafsson and P.C. Reid, 2016: Labrador Sea convection blows life to the northeastern Atlantic. Revised for *Progress in Oceanography*.

V. Müller, H. Pohlmann, **D. Matei**, J. Marotke, W. Müller, J. Baehr, 2016: Forecast skill for the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5°N within two MPI-ESM decadal climate prediction systems. Revised for *Climate Dynamics*.

J.-Y. Park, J. Bader, **D. Matei**, 2015: Northern-hemispheric differential warming is the key to understanding the discrepancies in projected Sahel rainfall. *Nature Communications*, 5-5985, doi: 10.1038/ncomms6985.

T. Jung, F. Doblas-Reyes, H. Goessling, V. Guemas C. Bitz, C. Buontempo, R. Caballero, E. Jakobson, J. Jungclaus, M. Karcher, T. Koenigk, **D. Matei**, J. Overland, T. Spengler, S. Yang, 2015: Polar-lower latitude linkages and their role in weather and climate prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 96, 197-200. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00121.1>.

Lohmann, K., J. Mignot, H.R. Langehaug, J.H. Jungclaus, **D. Matei**, O.H. Otterå, Y.Q. Gao, T.L. Mjell, U.S. Ninnemann and H.F. Kleiven, 2015: Using simulations of the last millennium to understand climate variability seen in paleo-observations: Similar variation of Iceland-Scotland overflow strength and Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate of the Past*, 11, 203-216.

W. A. Müller, **D. Matei**, M. Bersch, J. Jungclaus, H. Haak, K. Lohmann, G.P. Compo, D. Sardeshmukh, J. Marotzke, 2014: A twentieth-century reanalysis forced ocean model to reconstruct the North Atlantic climate variation during the 1920s. *Climate Dynamics*, 44, 1935-1955.

Lohmann, K., J. Jungclaus, **D. Matei**, J. Mignot, M. Menary, H. Langehaug, J. Ba, Y. Gao, O. H. Otterå, W. Park, S. Lorenz, 2014: The role of subpolar deep water formation and Nordic Seas overflows in simulated multidecadal variability of the Atlantic meridional overturning circulation. *Ocean Science*, 10, 227-241.

S. Tietsche, J. J. Day, V. Guemas, W. J. Hurlin, S. Keeley, **D. Matei**, R. Msadek, M. Collins and E. Hawkins, 2014: Seasonal to interannual Arctic sea ice predictability in current global climate models. *Geophys. Res. Lett.* 41, 1035–1043 doi: 10.1002/2013GL058755.

Bellucci, A., R. Haarsma, S. Gualdi, P. Athanasiadis, M. Caian, C. Cassou, E. Fernandez, A. Germe, J. Jungclaus, J. Kröger, **D. Matei**, W. Müller, H. Pohlmann, D. Salas y Melia, E. Sanchez, D. Smith, L. Terray, K. Wyser, and S. Yang, 2014: An assessment of a multi-model ensemble of decadal climate predictions. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-014-2164-y.

Pascolini-Campbell, M., D. Zanchettin, O. Bothe, C. Timmreck, **D. Matei**, J. Jungclaus, H.-F. Graf, 2014: Toward a record of Central Pacific El Niño events since 1880. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-014-1114-2.

Pohlmann, H., W. A. Müller, K. Kulkarni, M. Kameswarrao, **D. Matei**, F. S. E. Vamborg, C. Kadow, S. Illing, J. Marotzke, 2013: Improved forecast skill in the tropics in the new MiKlip decadal climate predictions. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 5798-5802. doi:10.1002/2013GL058051.

III. Erfolgskontrollbericht

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

Ziel des Gesamtverbundes ist es, zu einem verbesserten Verständnis der Rolle regionaler ozeanischer Zirkulationsänderungen für das Klima in Europa und der hohen nördlichen Breiten zu gelangen. Das HiPRED Teilprojekt trägt zu einem besseren Verständnis der Mechanismen bei und hat als Ziel hoch aufgelöste Simulationen für den Nordatlantik und seine Nebenmeere über den Zeitraum des 20. Jh. sowie Vorhersagen für die ersten Dekaden des 21. Jh um regionalen Details der Zirkulation und des Austauschs mit den Randmeeren ohne eines zusätzlichen Regionalmodell zu ermöglichen. Es hat damit im Bereich Meeresforschung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele im aktuellen BMBF-Förderschwerpunkt „System Erde“ geleistet.

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

Der Fokus der wissenschaftlichen Auswertung in AP 3.4 lag in der Untersuchung der Rolle der horizontalen Ozeanauflösung auf Simulation der nordatlantischen Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit in den vorhandenen Dekadenvorhersagen mit einem grob-auflösenden (MPI-ESM-LR, CMIP5) bzw. wirbel-erlaubenden (MPI-ESM-MR, MiKlip) Modellgitter. Wir konnten feststellen, dass das wirbelerlaubende simulationen auf den relevanten Zeitskalen erhöhte Energieniveaus im ozeanischen Massen- und Wärmetransport aufweist. Dies führt insbesondere im Subpolarwirbel des Nordatlantiks zu einem stärkeren Einfluss des Ozeans auf die Atmosphäre und damit zu einem verstärkt ozeanisch-getriebenen Anteil an den Fluktuationen des Klimas. Unabhängig von der Initialisierungsmethode fanden wir in den Simulationen, die einen wirbelerlaubenden Ozean verwenden, eine deutliche Verringerung des Vorhersagefehlers im subpolaren Nordatlantik, in der Norwegen- und Grönlandsee, im Nordpazifik, im Südlichen Ozean, sowie für Oberflächentemperaturen in tropischen Regionen. Weitere Untersuchungen zur potentiellen Vorhersagbarkeit auf Zeithorizonte von Dekaden haben gezeigt dass durch Initialisierung des Ozeans die Vorhersagbarkeitsgüte über die gesamte 20 Jahre signifikant bleibt, insbesondere im subpolaren Nordatlantik. Nach unserer dekadische Vorhersage ist eine substantielle Abkühlung im Bereich des Subpolarwirbels über die nächsten Jahre zu erwarten, die durch eine Verminderung der ozeanischen Wärmetransportkonvergenz im Subpolarwirbel verursacht wird. Ein solcher kühlerer SPG Bereich könnte deutliche klimatische Auswirkungen auf den nordatlantisch/europäischen Sektor haben.

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 entstanden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Die erzielten Ergebnisse liegen im Bereich der Grundlagenforschung und sind nicht direkt wirtschaftlich verwertbar. Allerdings ist der subpolare Nordatlantik eine Schlüsselregion für die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre und für das Klima in Europa von großer Bedeutung. Eine Fortführung der hochauflösenden Modellsimulationen leistet daher einen Beitrag zu einem Frühwarnsystem bezüglich klimabedingter Veränderungen im Atlantischen

Ozean und in der Nordsee und kann als Diskussions- und Entscheidungsgrundlage klimapolitischer Anpassungsmaßnahmen verwendet werden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden in international begutachteten Fachzeitschriften publiziert und tragen so zum wissenschaftlichen Fortschritt bei. Sie liefern einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel für die nächsten 10 bis 30 Jahre. Die hier gewonnenen Erkenntnisse zur Vorhersagbarkeit im Nordatlantik sind auch relevant für die Fischereiwirtschaft. Hier arbeiten wir eng zusammen mit dem EU Projekt NACLIM (North Atlantic Climate FP7 Collaborative Project) und bereiten die erste Pilotstudie zur Vorhersagbarkeit von Aspekten des Ökosystems im Nordatlantik vor.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Unsere Ergebnisse zeigen, dass weitere Gitterverfeinerung in den Komponenten Atmosphäre und Ozean sowie eine Verbesserung des mittleren Zustands der Simulationen im subpolaren Nordatlantik zielführend für weitere Verbesserungen in der Vorhersagekapazität sind und daher in einer zweiten Projektphase weiter verfolgt werden sollten. Die Ergebnisse aus RACE sind auch ein wichtiger Beitrag zu den Arbeiten des JPI Belmont InterDec Verbundprojektes, das sich mit den Ursachen von dekadischer Klimavariabilität in verschiedenen Regionen der nördlichen Hemisphäre und deren Verbindungen sowie das daraus resultierende Vorhersagepotential für extreme Wetterbedingungen auf dem Eurasischen Kontinent.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

n/a

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

Präsentationen im Rahmen von wissenschaftlichen Kongressen und Fachzeitschriften sind bereits während der Projektlaufzeit genutzt worden und weiterhin in Arbeit.

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde im Wesentlichen eingehalten.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Projekt: <i>Regional Atlantic Circulation and global change</i> (RACE) AP 3.2: Klimaänderungen auf dem NW Europäischen Schelf AP 3.4: Hochaufgelöste initialisierte dekadische Vorhersagen atlantischer und europäischer Klimavariationen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Birgit Klein Dr. Moritz Mathis Dr. Johann Jungclaus Prof. Dr. Jochem Marotzke Dr. Daniela Matei	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31. 12. 2015
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstr. 53 20146 Hamburg Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Bernhard-Nocht-Str. 78 D-20359 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03F0651 E
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung AP 3.2: Zur Untersuchung regionaler Klimaänderungen im Bereich des nordwesteuropäischen Schelfs (NWES) sowie ihrer Verbindung zu Veränderungen der Ozeanzirkulation im Nordatlantik wurden globale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert mit einem regional gekoppelten Erdsystemmodell regionalisiert. Aus den Ergebnissen dieser Modellsimulationen konnten natürliche Variabilitätsmoden der Nordsee-Wassertemperatur und -Zirkulation identifiziert werden, die nicht auf Schwankungen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) zurückführbar sind und dadurch lokale Abschwächungen des NAO-Einflusses in den Einstromgebieten atlantischer Wassermassen erklären. Darüber hinaus wurde anhand einer Sensitivitätsstudie die starke Abhängigkeit regionalisierter Klimaänderungssignale von verschiedenen Regionalisierungsmethoden nachgewiesen. Die Anwendung einer groß-räumigen Kopplung von Ozean und Atmosphäre hat sich dabei für die Entwicklung eines unabhängigen Änderungssignals als entscheidend herausgestellt. Allgemeine Unsicherheiten in projizierten Salzgehalt- und Nährstoffänderungen konnten auf die ausgeprägte multidekadische Variabilität des in den NWES einströmenden Atlantikwassers zurückgeführt werden und verdeutlichen damit die Notwendigkeit von Ensemble-Simulationen für eine robuste Abschätzung regionaler Klimaänderungssignale. AP 3.4: Ziel des Teilprojektes war es, zu einem Vorhersagesystem mit hoher Auflösung im Ozean beizutragen. Der Fokus lag in der Untersuchung der Rolle der horizontalen Ozeanauflösung auf Simulation der nordatlantischen Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit in den vorhandenen Dekadenvorhersagen mit einem grob-auflösenden (MPI-ESM-LR, CMIP5) bzw. wirbelerlaubenden (MPI-ESM-MR, MiKlip) Modellgitter. Wir konnten feststellen, dass das wirbelerlaubende Simulationen auf den relevanten Zeitskalen erhöhte Energieniveaus im ozeanischen Massen- und Wärmetransport aufweist. Dies führt insbesondere im Subpolarwirbel des Nordatlantiks zu einem stärkeren Einfluss des Ozeans auf die Atmosphäre und damit zu einem verstärkt ozeanisch-getriebenen Anteil an den Fluktuationen des Klimas. Unabhängig von der Initialisierungsmethode fanden wir in den Simulationen, die einen wirbelerlaubenden Ozean verwenden, eine deutliche Verringerung des Vorhersagefehlers im subpolaren Nordatlantik, in der Norwegen- und Grönlandsee, im Nordpazifik, im Südlichen Ozean, sowie für Oberflächentemperaturen in tropischen Regionen. Weitere Untersuchungen zur potentiellen Vorhersagbarkeit auf Zeithorizonte von Dekaden haben gezeigt dass durch Initialisierung des Ozeans die Vorhersagbarkeitsgüte über die gesamte 20 Jahre signifikant bleibt, insbesondere im subpolaren Nordatlantik.	

19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Projekt: <i>Regional Atlantic Circulation and global change</i> (RACE) AP 3.2: Klimaänderungen auf dem NW Europäischen Schelf AP 3.4: Hochaufgelöste initialisierte dekadische Vorhersagen atlantischer und europäischer Klimavariationen	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Uwe Mikolajewicz Dr. Birgit Klein Dr. Moritz Mathis Dr. Johann Jungclaus Prof. Dr. Jochem Marotzke Dr. Daniela Matei	5. end of project 31. 12. 2015
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Max-Planck-Institut für Meteorologie Bundesstr. 53 20146 Hamburg Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Bernhard-Nocht-Str. 78 D-20359 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0651 E
	11. no. of pages
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract AP 3.2: To investigate regional climate change in the Northwest European Shelf (NWES) as well as its connection to changes in the North Atlantic circulation, global climate projections for the 21 st century have been dynamically downscaled with a regionally coupled ocean-atmosphere earth system model. From the model results, leading modes of natural variability in North Sea temperature and circulation have been identified, which are not ascribable to variations in the North Atlantic Oscillation (NAO) and thus explain local weakenings of NAO impacts in the regions of Atlantic inflow. Moreover, a sensitivity study has provided evidence for the strong dependency of downscaled climate change signals in the NWES on the choice of the downscaling strategy. The incorporation of a large-scale coupling area between the ocean and atmosphere revealed to be crucial for the development of independent change signals. General uncertainties of projected changes in salinity and nutrient concentrations have been attributed to a pronounced multidecadal variability in the Atlantic water masses flowing into the NWES, highlighting the need for ensemble simulations to infer robust regional climate change signals. AP 3.4: This Work Package aims at building a decadal forecast system with high resolution in the ocean model and to investigate the benefits of such configurations for predictions in the North Atlantic and European region. In the first phase of RACE the variability and predictability mechanisms of North Atlantic/European interannual-to-decadal climate variations have been investigated in coupled model simulations from both BMBF MiKlip project and CMIP5 multi-model ensembles with a focus on the impact of various oceanic resolutions. An eddy-permitting resolution enhances the realism of modelled ocean-atmospheric interactions and achieved predictive skill over the North Atlantic and the Nordic Sea regions. Additionally, this WP showed through an unique sets of multidecadal initialised hindcasts simulations over the second half of the 20th century that skilful predictions can be achieved up to 20yrs in advance over the North Atlantic Subpolar Gyre, Western Mediterranean and season-dependent over certain parts of European continent. A ensemble of initialised forecasts suggest a substantial cooling signal during the next years over the extratropical North Atlantic with potential far reaching consequences for the climate of surrounding continents.	
19. keywords	
20. publisher	21. price