

BMBF-Verbundprojekt WTZ südliches Afrika „SPACES – AGULHAS | Regionale und globale Bedeutung“

Gemeinsamer Schlussbericht

Teilprojekt GEOMAR Hochauflösende Ozeanmodellierung (Förderkennzeichen **03G0835A**)

Prof. Dr. Arne Biastoch
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel

Teilprojekt AWI Modell der nächsten Generation (Förderkennzeichen **03G0835B**)

Dr. Qiang Wang
Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI)
Bussestr. 24
27570 Bremerhaven

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2013 bis 30.06.2016

Berichtszeitraum: 01.07.2013 bis 30.06.2016

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des SPACES Programms (Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes) unter dem BMBF Rahmenprogramm "Research for Sustainable Development" (FONA).

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

TP GEOMAR Hauptziel des Vorhabens war die Untersuchung des Agulhasystems südlich von Afrika und seiner Bedeutung für das regionale und globale Klima auf unterschiedlichen Zeitskalen. Frühere Arbeiten haben gezeigt, dass diese Region sensitiv auf globale Klimaänderungen reagiert. In diesem Projekt wurde untersucht, wie die einzelnen ozeanischen Strömungskomponenten wechselwirken und welche Bedeutung der ozeanische Austausch zwischen indischem und atlantischem Ozean im globalen Klimasystem einnimmt. Die im Projekt geplanten Analysen wurden mit einem etablierten Ozeanmodell mit $1/10^\circ$ Gitterauflösung durchgeführt. Für regionale Fragestellungen wurde ein sehr hochauflösendes ($1/20^\circ$) Modell neu entwickelt.

TP AWI Die Hauptaufgabe des Teilprojekts war die Evaluierung des neuartigen Ozeanmodells FESOM unter Verwendung der Agulhasregion als Testproblem. Die Agulhasregion ist aufgrund ihrer Bedeutung für die globale Ozeanzirkulation und der Vielzahl von räumlichen und zeitlichen Skalen ein ideales und anspruchsvolles Testgebiet für die Anwendung von FESOM. Das Modell wurde mit einer lokal verfeinerten Gitterauflösung in der Agulhasregion konfiguriert. Die Sensitivität der Ozeandynamik in Bezug auf die lokale Gitterauflösung wurde erforscht. In diesem Projekt soll auch untersucht werden, wie die einzelnen ozeanischen Strömungskomponenten wechselwirken und welche Bedeutung der ozeanische Austausch zwischen Indischem und Atlantischem Ozean im globalen Klimasystem einnimmt.

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

TP GEOMAR Am GEOMAR wurde das im Südatlantik und westlichen Indischen Ozean hochaufgelöste Ozeanmodell INALT01 betrieben. Die Schwankungen des Agulhasstromregimes auf zwischenjährlichen bis dekadischen Zeitskalen konnten direkt aus einer Reihe von bestehenden Modellläufen untersucht werden. Die weiteren Modellarbeiten basierten ebenfalls auf dem NEMO-Code-System und waren eng verzahnt mit entsprechenden Entwicklungen auf europäischer Ebene, insbesondere im Rahmen der DRAKKAR-Kooperation (Barnier et al., 2014¹).

TP AWI Am AWI wurden numerische Simulationen mit dem globalen, auf unstrukturierten Gittern basierenden Ozeanmodell FESOM durchgeführt, mit lokaler Gitterauflösung in der Agulhasregion. Die Modellkonfiguration und das Gitterdesign basiert auf Erfahrungen der FESOM Modellentwickler. Die Werkzeuge zur Analyse der Modellergebnisse auf unstrukturierten Gittern wurden ebenfalls durch die Arbeitsgruppe am AWI bereitgestellt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

TP GEOMAR Die Modellierungsarbeiten erfolgten wie geplant auf Basis verschiedener Versionen des Agulhasmodells mit hohen ($1/10^\circ$ - $1/20^\circ$) Auflösungen (INALT01, INALT20). Diese regionalen Konfigurationen waren dabei mit Hilfe des Nesting-Ansatzes in globale

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

Modelle größerer Auflösung ($1/2^\circ$ bzw. $1/4^\circ$) eingebettet. Die Experimente wurden sowohl auf dem lokalen Vektorrechner (NEC SX-ACE) der Universität Kiel realisiert, als auch auf den Höchstleistungs-Rechnersystemen des Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN, Hannover und Berlin).

TP AWI Die Modellsimulationen wurden wie geplant auf unstrukturierten Gittern mit lokaler Gitterverfeinerung in der Agulhasregion durchgeführt. In der Schlüsselregion wurde eine Verfeinerung gewählt, welche mesoskalige Wirbel auflösen kann. Unter Verwendung der unstrukturierten Gitterfunktionalität konnten auch andere dynamisch wichtige Regionen der Weltozeane aufgelöst werden. Die Simulationen wurden auf den Hochleistungsrechnern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ, Hamburg) und am Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN, Hannover und Berlin) realisiert.

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

TP GEOMAR Die Detektion möglicher anthropogener Trends in der Atlantischen Zirkulation, wie von Klimasimulationen (z.B. im 4. Sachstandsbericht des IPCC) für das 21. Jahrhundert prognostiziert, stellt aufgrund der natürlichen Schwankungen eine große Herausforderung dar. Eine besondere Schwierigkeit ist die zu geringe Kenntnis des südlichen Einstroms (aus dem Indischen Ozean um Südafrika in den Südatlantik) in das beckenweite Strömungssystem aufgrund nur begrenzt vorhandener Beobachtungen. Einblicke in die Ursachen, Skalen und Mechanismen von Schwankungen auf Zeitskalen von Dekaden und länger stammen daher im Wesentlichen aus Modellstudien.

TP AWI Prognostizierte Klimaänderungen in Klimasimulationen beruhen auf nicht unwesentlichen Unsicherheiten, und ein großer Teil dieser Unsicherheiten basiert auf Modellungenauigkeiten. Es ist demnach von großer Bedeutung, die Genauigkeit der Modelle zu erhöhen, um Klimavariabilität und Klimaänderungen besser verstehen zu können. In den letzten Jahren wurden neuartige Ozeanmodelle entwickelt, unter anderem solche basierend auf unstrukturierten Gittern. Die Leistungsfähigkeit dieser neuartigen Modelle in Bezug auf die Simulation komplexer Ozeanströmungssysteme wie dem Agulhasstrom und seiner Wechselwirkung mit dem Südlichen und Atlantischen Ozean muss evaluiert werden, besonders im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit traditionellen Modellen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

TP GEOMAR Innerhalb von SPACES bestand eine Kooperation mit dem SACUS Verbundvorhaben, sowohl auf wissenschaftlicher Ebene (Analyse der Auftriebsregion in Zusammenarbeit mit K. Jochumsen, Uni Hamburg) als auch im Bereich Capacity Building (Beteiligung an der Ausbildungsreise Meteor M100/2). Über die gesamte Projektlaufzeit bestand ein kontinuierlicher Austausch mit südafrikanischen Partnern, darunter die gemeinsame Ausbildung des Doktoranden Neil Malan (Universität Kapstadt).

Weitere internationale Kooperationen bestanden im Rahmen des europäischen Modellierverbundes DRAKKAR mit Kollegen am LEGI, Grenoble (B. Barnier), LOCEAN, Paris (G. Madec), IFREMER (A.M. Treguier) und NOC, Southampton (A. New).

TP AWI Die Modelldaten, produziert in der ersten Phase des Projekts, werden mit Südafrikanischen Kollegen geteilt, welche die Modellergebnisse auf unstrukturierten Gittern in der neuen Projektphase analysieren möchten. Eine starke Kollaboration wurde im Rahmen des internationalen Modellvergleichsprojekts CORE2 (Coordinated Ocean-ice reference experiences, phase 2) aufgebaut, durch welches die Modellperformance in den Weltozeanen systematisch evaluiert wurde, und nötige Schritte zur Verbesserung identifiziert und ergriffen wurden.

II. Eingehende Darstellung

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

TP GEOMAR Hochauflösende Ozeanmodellierung

(a) Modellhierarchie.

Als Grundlage der Modellsimulationen und -analysen dienten Konfigurationen des Ozean/Meereis-Modells NEMO mit Gitterauflösungen von $\frac{1}{2}^\circ$ und $\frac{1}{4}^\circ$ (ORCA05 und ORCA025), die am GEOMAR routinemäßig weiterentwickelt und betrieben werden. Speziell für das Projekt werden die globalen Konfigurationen ergänzt durch regionaler Gitterverfeinerungen mit Hilfe eines ‚two-way nesting‘ im Agulhasregime mit $1/10^\circ$ und $1/20^\circ$ Auflösung (INALT01 und INALT20); letztere wurde im Projekt neu entwickelt und steht für die zweite Phase des Projektes zur Verfügung. Der atmosphärische Antrieb beruht auf den ‚bulk‘-Formulierungen der Flüsse und atmosphärischen Reanalyseprodukten des CORE-Programms, die derzeit von 1948 bis 2009 zur Verfügung stehen. Die Modelle wurden an verschiedenen nationalen Großrechner-Systemen implementiert; für die extrem aufwändigen, hochauflösenden Simulationen wurden Projektkontingente am HLRN (Berlin, Hannover) eingeworben.

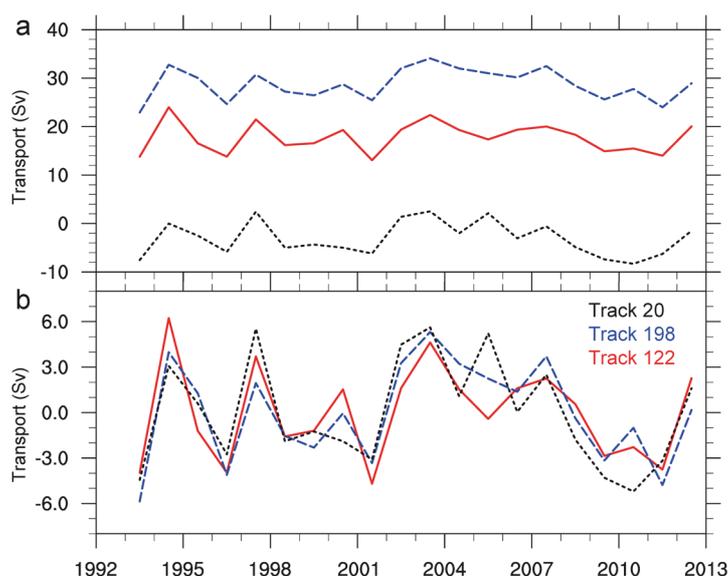


Abbildung 1: Bestimmung des Agulhas leakage aus dem INALT01 Modell mit Hilfe simulierter Satellitenbahnen als (a) absolute und (b) relative Größen. Aus Le Bars et al. (2014).

(b) Regionale Analysen der Agulhasdynamik.

Eng verbunden mit der Stärke der Atlantischen Umwälzbewegung, stellt die Bestimmung des Austausches zwischen Indischem Ozean und Atlantik, der ‚Agulhas leakage‘, eine der zentralen Größen in der Agulhasregion dar. Die Schwierigkeit in der Bestimmung liegt dabei in der Tatsache, dass die Zirkulation in der Region Teil des den Atlantik und Indischen Ozean umspannenden Supergyres ist. Im Vergleich mit Satellitendaten der vergangenen 20 Jahre wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die Agulhas leakage aus Beobachtungsdaten zu gewinnen (Le Bars et al., 2014). Die Methode wurde in INALT01 verifiziert (Abbildung 1). Dabei wurde bestätigt, dass ‚along-track‘ Satellitendaten der absoluten dynamischen Topographie dazu verwendet werden können, um mit Hilfe der Meeresoberflächenauslenkung den westwärts fließenden Agulhasstrom dynamisch vom ostwärts fließenden Agulhasrückstrom zu trennen.

Eine der zentralen Annahmen bei der Bedeutung der Agulhasregion auf langen, Paläo-Zeitskalen basiert auf Wärme und Salzänderungen, die durch Agulhasringe in den Südatlantik eingetragen werden. Diese Annahme wurde mit Hilfe einer Rekonstruktion der Dichtestruktur im Einflussbereich der Agulhasringe im Südatlantik überprüft. Parallel zur Analyse eines Sedimentkerns auf dem Walfischrücken (Scussolini et al., 2013) wurde INALT01 verwendet, den Zusammenhang zwischen Dichteviationen entlang des Walfischrückens und Passagen von Agulhasringen zu verifizieren. Die Ergebnisse zeigen starke Dichteschwankungen über dem Walfischrücken mit Periodizitäten zwischen 90.000 und 180.000 Jahren vor heute. Vor allem in der Terminierung II (der zeitliche Übergang zwischen den marinen Isotopenstadien 5 und 6) lassen sich stärkere Dichteanomalien dem erhöhten Einfluss von Agulhasringen

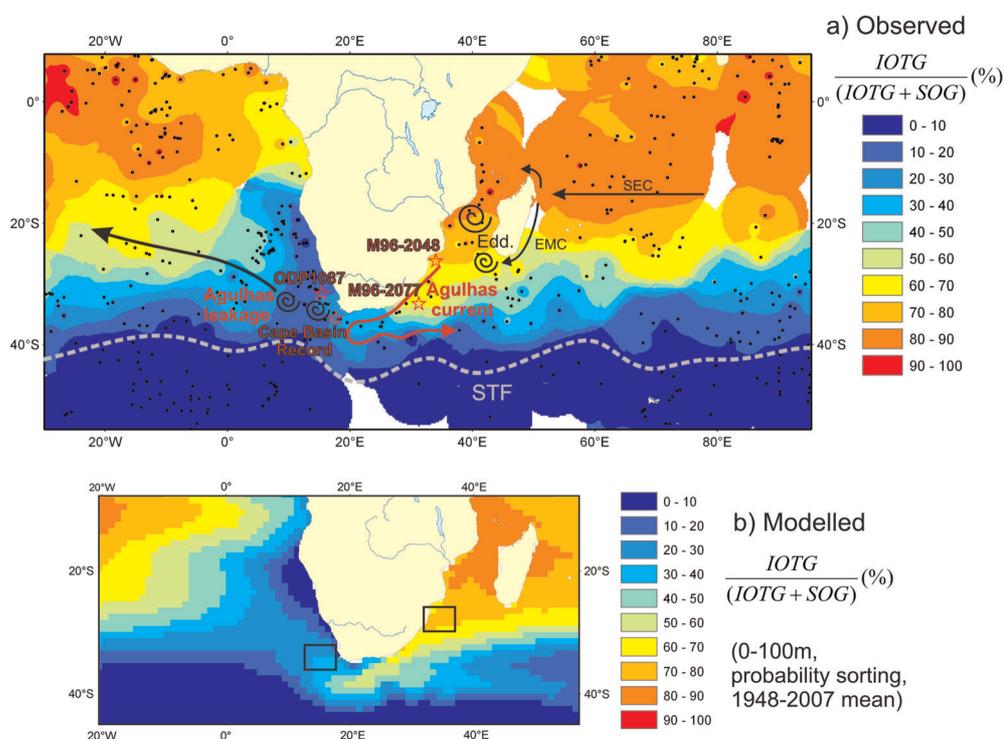


Abbildung 2: Verhältnis von tropischen (IOTG) und subpolaren (SOG) Foraminiferen (als Indikator für den Einstrom von Indischem Ozeanwasser auf den Atlantik) in Beobachtungen und Modell

zuordnen, die entsprechende Anomalie in den Südatlantik eintragen.

Analysen auf Paläo-Zeitskalen basieren auf Sedimentbohrkernen im Südatlantik und südwestlichen Indischen Ozean, bei denen z.B. die zeitliche und räumliche Verteilung von Foraminiferen Auskunft über den Anteil von Indischem Ozeanwasser im Atlantik geben soll. Wegen der limitierten Beobachtungsdichte ist allein die Referenzierung des heutigen Zustandes schwierig. Mit Hilfe von Modelldaten aus dem INALT01-Modell wurden Ausbreitungswege verschiedener Foraminiferen Spezies untersucht (Caley et al., 2014). Dabei zeigte sich, dass das simulierte Ausbreitungsmuster gut mit dem Muster von Sedimentkernen und in situ Messungen übereinstimmt (Abbildung 2). Vor allem das Verhältnis von Foraminiferen tropischen und subpolaren Ursprungs korreliert gut mit dem aus dem Modell analysierten Agulhas Leakage.

Van Sebille et al. (2015) beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit Temperaturanalysen von Sedimentkernen Punktmessungen darstellen. Mit Hilfe einer Reihe von Modellen, darunter das hochauflösende Agulhasmodell INALT01 konnte gezeigt werden, dass Ozeanströmungen die planktischen Formaminiferen weiträumig verdriften. Die späteren Temperatur-Rekonstruktionen von Sedimentkernen zeigen somit einen großflächigen Footprint. Die Arbeit ist wichtig für die Interpretation von Proxysignalen

(c) Globale Bedeutung der Agulhasregion.

Biastoch et al. (2015) verwendeten eine Reihe von hochauflösenden Ozean- und Klimamodellen (darunter INALT01), um ein die aus Ozeanbeobachtungen schwierig zu bestimmende Agulhas leakage über den Gradienten der Meeresoberflächentemperatur (sea

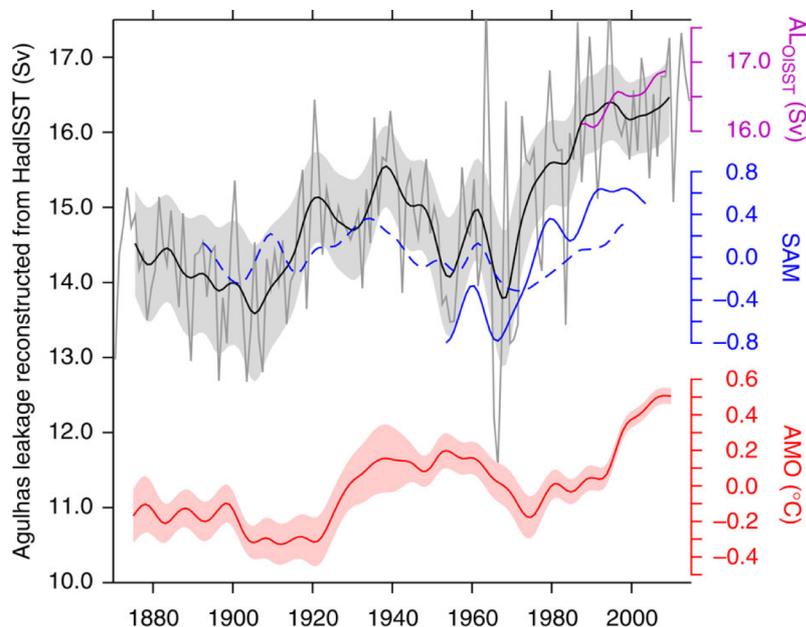


Abbildung 3: Historische Zeitserie der Agulhas leakage. Jährliche (grau) und dekadisch gefilterte (schwarz) Werte der Agulhas leakage, die mit Hilfe von INALT01 aus HadISST und aus OISST (lila) berechnet wurden; dekadisch gefilterte Southern Annual Mode (SAM) Indizes aus Reanalyse (blau durchgezogen) und aus historischen Daten (blau gestrichelt), Agulhas leakage und Atlantischer Meridionaler Oszillationsindex (AMO, rot) sind lag-korreliert mit 15 Jahren Verschiebung.

surface temperature, SST) zwischen Atlantik und Indischem Ozean abzubilden. Mit Hilfe einer statistischen Relation konnte eine 145-Jahre lange Zeitreihe aus historischen SST-Daten berechnet werden (Abbildung 3). Dabei bestätigte sich, dass Agulhas leakage auf dekadischer Zeitskala eng mit den südhemisphärischen Westwinden korreliert ist. Mit entsprechender Verzögerung manifestieren sich multi-dekadische Änderungen im Agulhas leakage im Wärmeinhalt des Nordatlantiks. Somit wurde zum ersten Mal eine direkte Verbindung zwischen dem Einstrom in den Atlantik südlich von Afrika und der Atlantischen Umwälzbewegung (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) hergestellt.

In einer weiteren Studie wurde die Verbindung zwischen Transport im Nordbrasilstrom und AMOC hergestellt (Rühs et al., 2015). Mit Hilfe einer Serie von GEOMAR-Modellen (darunter ORCA025 und INALT01) wurde gezeigt, dass der Nordbrasilstrom auf multidekadischen Zeitskalen durch die großskaligen, dichtegetriebenen Signale beeinflusst ist. Auf kürzeren, zwischenjährlichen Zeitskalen wird diese Relation aber von Windeffekten maskiert.

Lübbecke et al. (2015) beschäftigten sich mit der Erwärmung des oberen tropischen Atlantiks, die nicht durch lokale Einflussfaktoren (wie z.B. Änderungen der Windfelder) erklärt werden kann. INALT01, mit entsprechend simulierter Verstärkung des Agulhas leakage (Durgadoo et al., 2013) zeigt ähnliche Erwärmungstrends im tropischen Atlantik (Abbildung 4). Mit Hilfe von Lagrangeschen Analysen und vorhanden Sensitivitätsrechnungen von INALT01 konnte die Erwärmung auf die Agulhasregion zurückgeführt werden. Sie lässt sich somit (zum großen Teil) als Folge des zugenommenen Einflusses aus dem Indischen Ozean über die Agulhasregion erklären.

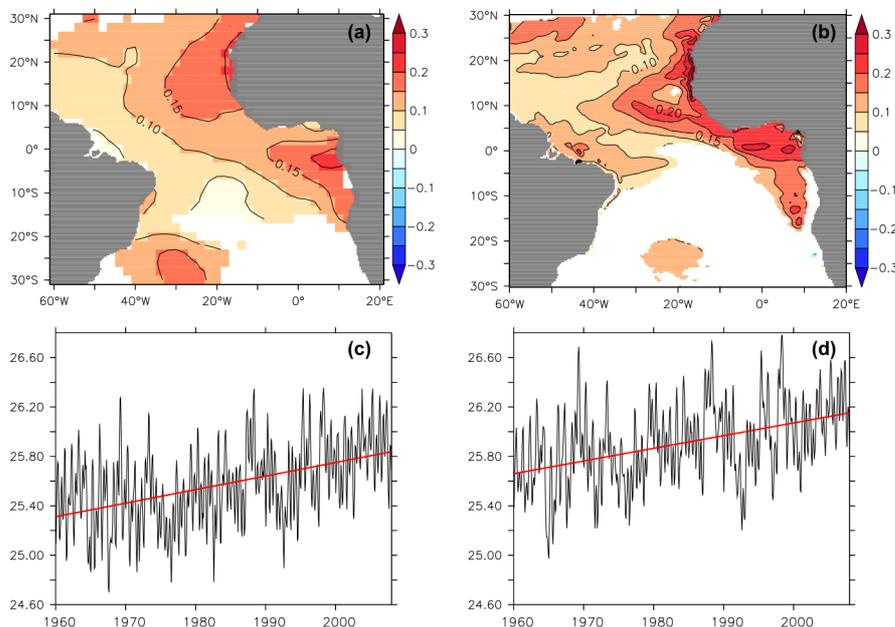


Abbildung 4: Trends in der Meeresoberflächentemperatur (SST) in (a) Beobachtungsdaten und (b) INALT01 Modell zwischen 1960 und 2006 in °C pro Dekade. Gezeigt sind auch die Flächenmittel zwischen 20°S-30°N und 60°W-15°E in (c) Beobachtungen und (d) Modell.

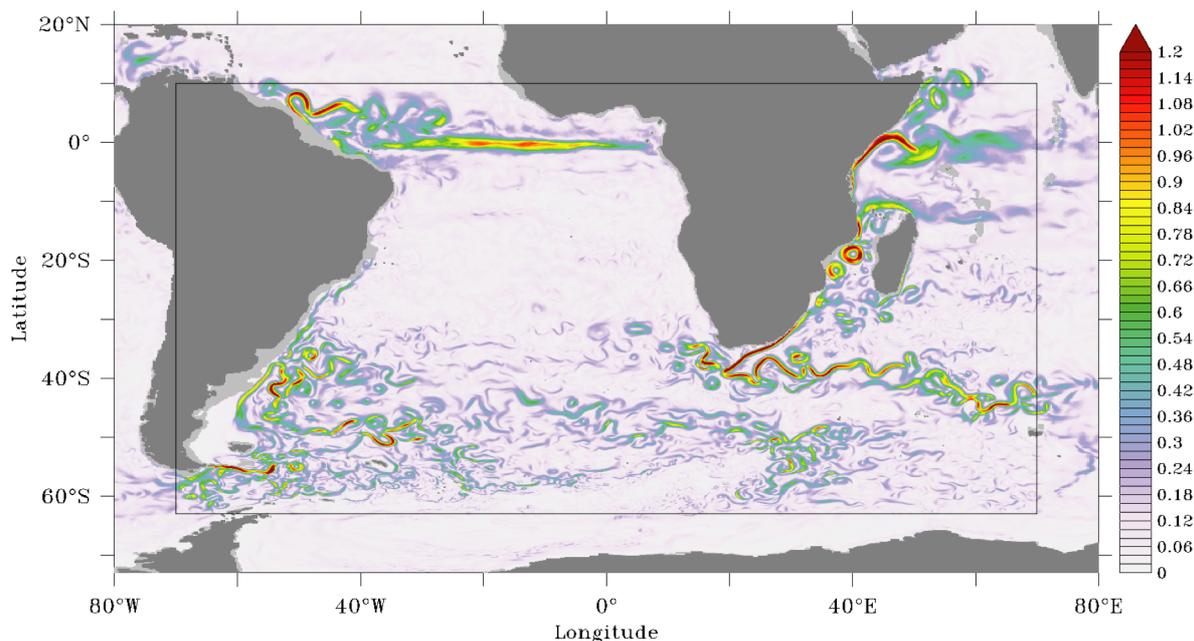


Abbildung 5: Momentaufnahme der Oberflächengeschwindigkeiten in INALT20, bestehend aus einem $1/4^\circ$ Basismodell und einem $1/20^\circ$ Nest.

(d) Modellweiterentwicklung INALT20

INALT01 besteht aus einem globalem Basismodell mit $1/2^\circ$ Auflösung und einem genesteten Gitter mit $1/10^\circ$ Auflösung im Südatlantik und westlichen Indischen Ozean und steht für die oben beschriebenen Analysen weiterhin zur Verfügung. Zur Ausdehnung der hochauflösenden Region bei gleichzeitiger Erhöhung der Auflösung wurde die Konfiguration INALT20 entwickelt. In dieser ist die Auflösung des Basismodells auf $1/4^\circ$ erhöht, die des Nestes auf $1/20^\circ$. Zur notwendigen Verbesserung der Zirkulation im entsprechenden Sektor des Südozeans (Durgadoo et al., 2013) wurde die Nestregion nach Süden ausgedehnt (Abbildung 5). Die neue Konfiguration ist am Norddeutschen Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN) aufgesetzt und integriert. Sie steht für Analysen in der zweiten Phase des Projektes zur Verfügung. Sie bildet auch die Basis für gegenwärtige und zukünftige Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in Südafrika.

(e) Deutsch-Südafrikanischer Austausch.

Das Projekt beinhaltete eine Komponente zum deutsch-südafrikanischen Austausch. Neil Malan, Doktorand an der Universität Kapstadt, war im Zeitraum im Rahmen zweier SPACES DAAD-Stipendien am GEOMAR und hat eine wissenschaftliche Analyse der regionalen Zirkulation in INALT01 durchgeführt. Ziel war die Analyse und ein Modell-Datenvergleich von Interaktionen zwischen Agulhasstrom und lokaler Zirkulationsvariabilität auf dem Schelf (Abbildung 6). Diese Analyse wurde Südafrika fortgesetzt und wird zur Dissertation von Herrn Malan sowie einem Manuskript in der Fachliteratur führen.

Im Oktober 2013 wurden im Rahmen der METEOR M100/2 Ausbildungsreise von Walvis Bay (Namibia) nach Port Louis (Mauritius) Studenten aus dem südlichen Afrika (Namibia, Südafrika, Madagaskar) unterrichtet. A. Biastoch und J. Durgadoo gaben Kurse zur Zirkulation

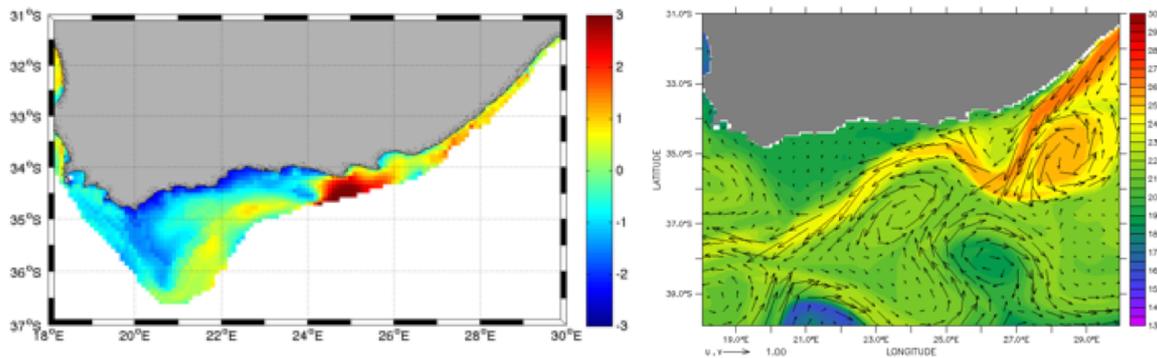


Abbildung 6: Auswirkungen eines Agulhas Mäanders auf den afrikanischen Schelf. Temperatur und Oberflächenströmungen.

in der Agulhasregion und zur numerischen Modellierung. Modelldaten von INALT01 wurden den Studierenden zur Verfügung gestellt.

Gegen Ende der Projektphase von AGULHAS entstand eine Zusammenarbeit mit Dr. Marjolaine Krug (Universität Kapstadt), Dr. Juliet Hermes und Dr. Charine Collins (beide SAEON). Ziel der gemeinsamen Aktivitäten ist die Analyse von submesoskaliger Variabilität im Bereich des Agulhasstroms. Zu diesem Zweck wurden Modelldatendaten von INALT20 bereitgestellt, die mit südafrikanischen Glider-Beobachtungsdaten verglichen werden sollen. Ein erster Besuch fand noch in der ersten Phase statt; die Fortführung dieser Aktivitäten wird in der zweiten Phase von AGULHAS stattfinden.

TP AWI Modell der nächsten Generation

(a) Modellhierarchie.

In diesem Projekt wurde das auf unstrukturierten Gittern basierende Ozeanmodell FESOM für Simulationen der letzten 60 Jahre verwendet. Das Modell erlaubt variable horizontale Gitterauflösung, wobei das Meereismodul des Modells dasselbe unstrukturierte Gitter benutzt wie das Ozeanmodul (Wang et al., 2014, Danilov et al., 2015, Wang et al., 2016). Ein neues Gitter wurde speziell für dieses Projekt entwickelt (Abbildung 7). Die horizontale Auflösung beträgt 8 km in der Agulhasregion, vergleichbar zur INALT01 Konfiguration. Das Gitter ist außerdem in dynamisch wichtigen Strömungsgebieten verfeinert, wie etwa dem Golfstrom, Kuroshio, Indonesischen Durchstrom und Antarktischen Zirkumpolarstrom. In anderen Gebieten der Weltozeane bleibt die Auflösung relative grob (ca. 50-70 km). Insgesamt hat die Modellkonfiguration etwa 800.000 horizontale Gitterpunkte und 45 vertikale Schichten (ca. 28 Mio Gitterpunkte), und ist somit kleiner als INALT01 (ca. 60 Mio Gitterpunkte).

Der atmosphärische Antrieb beruht auf den ‚bulk‘-Formulierungen der Flüsse und atmosphärischen Reanalyseprodukten des CORE-Programms, die derzeit von 1948 bis 2009 zur Verfügung stehen. Die Modellsimulationen wurden auf verschiedenen Supercomputern des DKRZ (Hamburg) und HLRN (Berlin, Hannover) durchgeführt

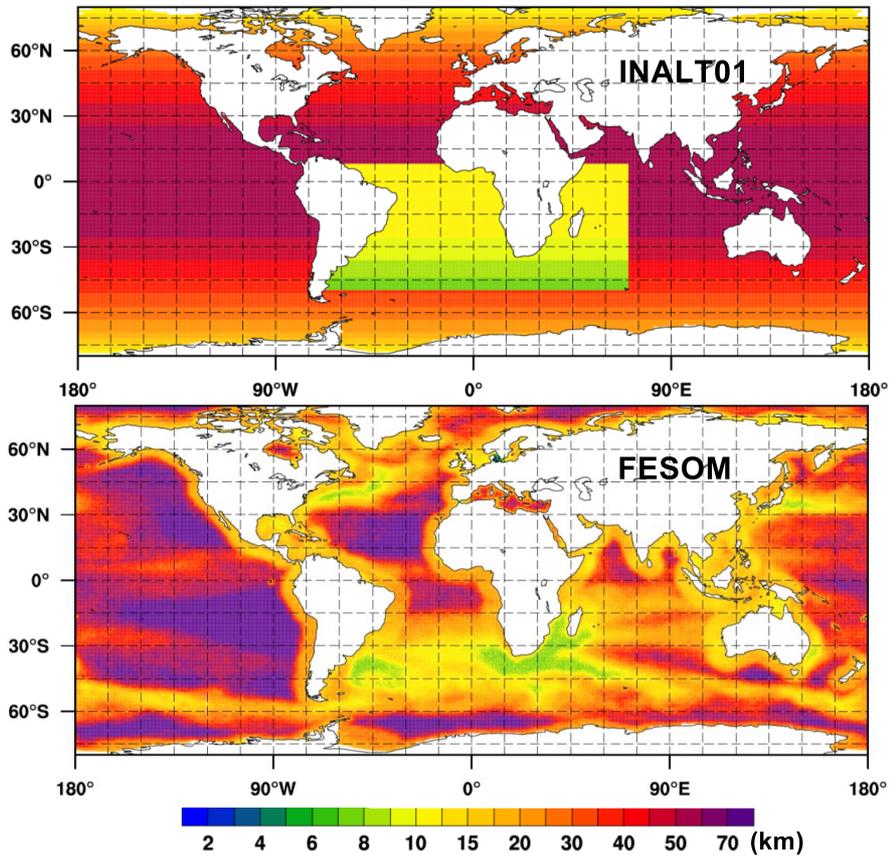


Abbildung 7 Gitterauflösung in km in den Modellen INALT01 (oben) und FESOM (unten).

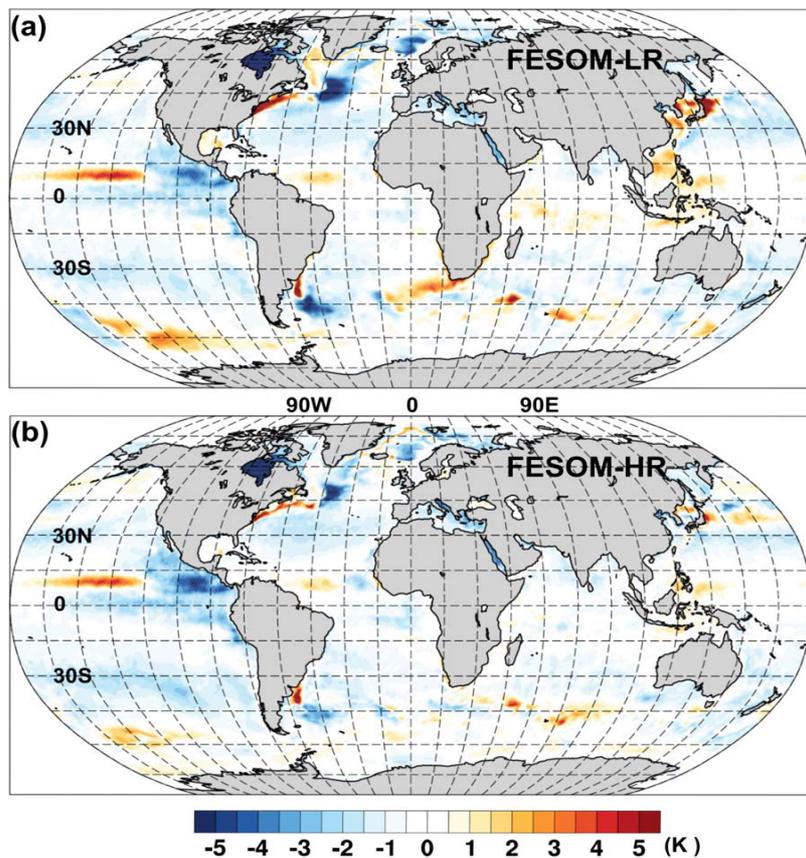


Abbildung 8 Differenz zwischen simulierter Temperatur gemittelt über die oberen 100 m und Klimatologie in FESOM-Simulationen mit (a) globaler grober Gitterauflösung und (b) lokaler Gitterverfeinerung.

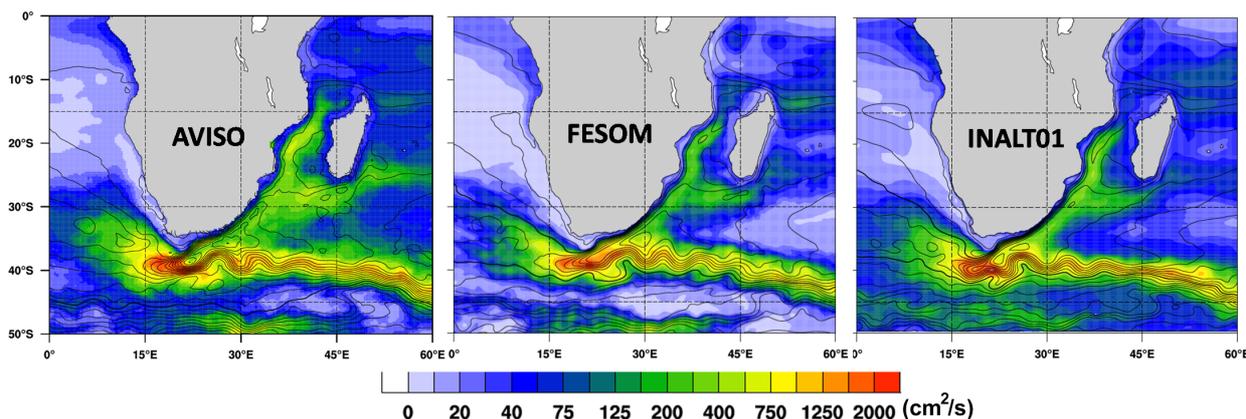


Abbildung 9 Varianz (Farbe in cm^2/s) und Mittelwerte (Konturlinien) der Meeresoberflächenauslenkung in FESOM und INALT01 im Vergleich mit Satellitendaten (AVISO).

(b) Design der variablen Modellauflösung.

Obwohl sich Ozeanmodelle basierend auf unstrukturierten Gittern in den letzten Jahren stark entwickelt und verbessert haben, bleibt es doch eine wissenschaftliche Fragestellung wie diese variable Gitterauflösung in globalen Ozeansimulationen eingesetzt wird. Wenn unstrukturierte Gitter verfeinert werden um lokal Wirbel aufzulösen, stellt sich die praktische Frage wie und wo genau verfeinert wird. Lokale Verfeinerung führt gegebenenfalls nicht zum Ziel, da die Wirbeldynamik, insbesondere die Fähigkeit der Wirbel, potenzielle Energie freizusetzen, auch von der Dynamik in den stromaufwärts gelegenen und gröber aufgelösten Gebieten abhängt (Danilov und Wang, 2015). Ozeangitter müssen also derart verfeinert werden, dass die variable Auflösung die Simulationsergebnisse verbessert bei gleichzeitigen möglichst geringen Rechenkosten.

Während der Projektphase wurde eine Methode entwickelt, um globale Gitter mit variabler Auflösung zu erstellen. Hierbei wird die Variabilität der beobachteten Meeresoberflächenauslenkung (SSH) als Verfeinerungskriterium benutzt (Sein et al., 2016). Die Gitterverfeinerung variiert linear entsprechend der beobachteten SSH Variabilität, und ist auch auf die stromabwärts gelegenen westlichen Randströme angewendet (das in diesem Projekt verwendete Gitter ist in Abbildung 7 gezeigt). Verglichen mit einer Simulation auf einem globalen Gitter ohne lokale Verfeinerung verbessert sich die simulierte SSH Variabilität signifikant und stimmt besser mit Beobachtungen überein. Außerdem führt die lokale Gitterverfeinerung zu einem geringeren Bias in simulierter Ozeantemperatur in vielen der dynamisch wichtigen Gebiete (Abbildung 8), was auf eine signifikante Verbesserung der Modellperformance hinweist.

(c) Vergleich mit INALT20.

Obwohl die gesamte Anzahl der Gitterknoten in FESOM kleiner ist als die in INALT01, führt die lokale Gitterverfeinerung zu einer guten Darstellung der Varianz der Meeresspiegelauslenkung in FESOM im Vergleich zur Satellitenbeobachtung (AVISO) und der INALT01-Simulation (Abbildung 9). Dies zeigt dass die mesoskalige Variabilität entlang der Hauptströme in der Agulhasregion gut repräsentiert ist und die Darstellung der grundsätzlichen Dynamik von Agulhasstrom, Retrofektion und Ringbildung realistisch ist. Demzufolge ist der Ansatz, das Gitter lokal entsprechend der Variabilität der Meeresspiegelauslenkung zu verfeinern, erfolgreich. Die Tiefenausprägung der westlichen Randstromtransporte (Agulhasstrom, Mozambiquekanal und Ostmadagaskarstrom) stimmt

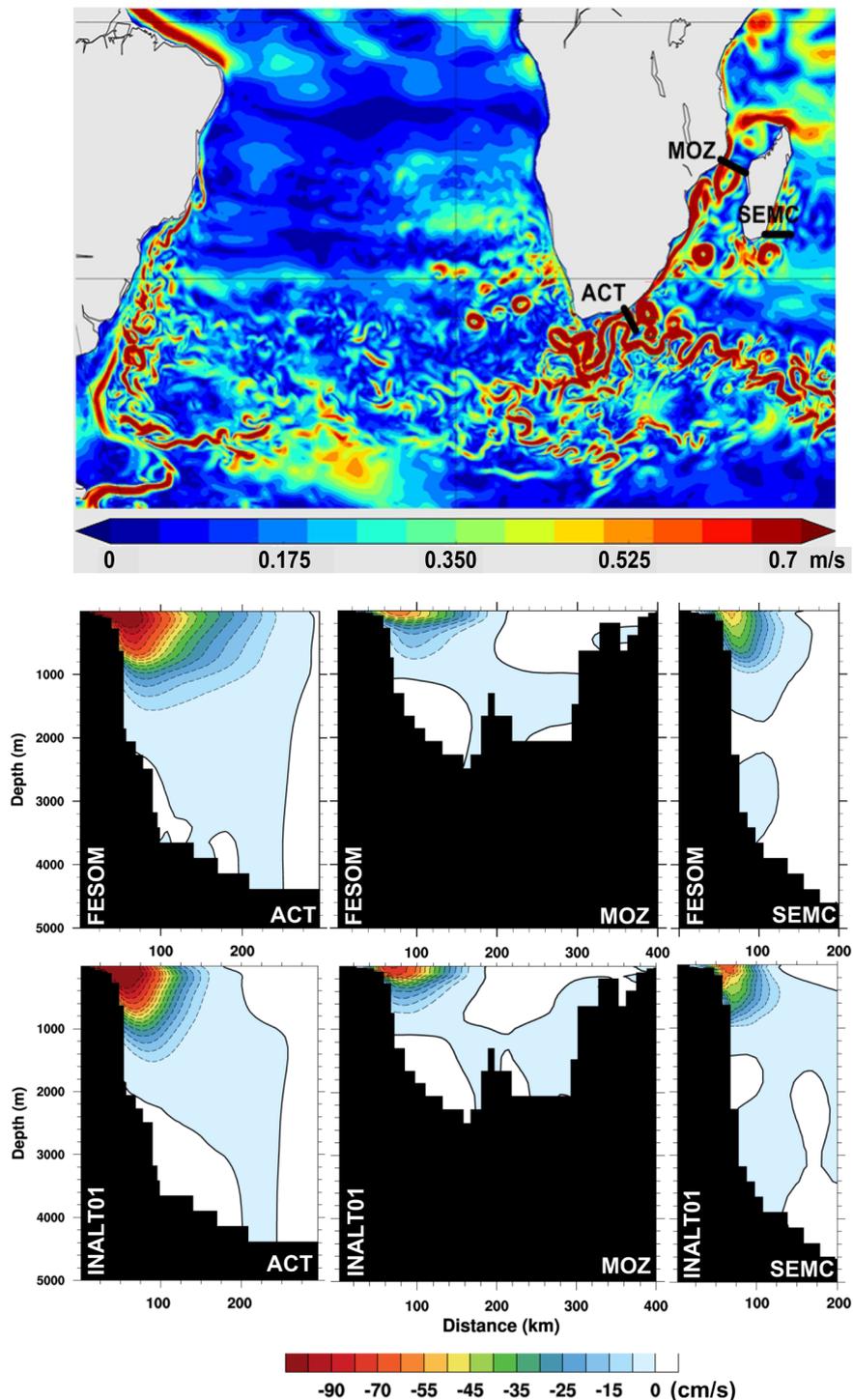


Abbildung 10 Momentaufnahme der Geschwindigkeit in 50 m Tiefe (cm/s) in FESOM und Schnitte über den Agulhasstrom (ACT), den Mozambiquekanal (MOZ) und Ostmadagaskarstrom (SEMC) in FESOM und INALT01

auch mit dem bereits gut verifizierten INALT01-Modell überein (Abbildung 10). Im Vergleich mit Ergebnissen größerer FESOM-Konfigurationen erhält man eine signifikante Verbesserung der Wärme und Massentransporte vom Indischen in den Atlantischen Ozean. Eine Studie mit detaillierter Analyse und Vergleich der FESOM- und INALT01-Simulationen wird vorbereitet.

(d) Modellweiterentwicklung.

FESOM wurde mit dem Atmosphärenmodell ECHAM6 gekoppelt, und das neue gekoppelte Klimamodell wurde in einer grob-aufgelösten Modellversion validiert (Sidorenko et al., 2015). Dieses gekoppelte Modell wird in der zweiten Phase des Projekts verwendet (Agulhas II), um atmosphärische Feedbacks und mögliche Änderungen des Agulhasystems unter Klimaänderungen zu untersuchen. Genau wie in der ersten Projektphase wird die lokale Gitterverfeinerung im Ozeanmodell auch auf andere Schlüsselregionen der Weltozeane ausgeweitet. Einige Experimente zum Tuning des gekoppelten Modells wurden durchgeführt, und zu Beginn der zweiten Projektphase wird das Modell validiert.

II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In beiden Teilprojekten (GEOMAR und AWI) wurde der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung für Personal eingesetzt. GEOMAR hat auch Reisen und Aufenthalte für südafrikanische Gäste finanziert.

II.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Hochauflösende Ozeanmodelle stellen die Basis für die Untersuchung der Abhängigkeiten und Variabilität der beckenweiten Zirkulation. Die hier gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Einbettung (naturgemäß) limitierter Beobachtungsdaten und eine gemeinsame Interpretation. Dieses findet innerhalb von SPACES (etwa zusammen mit SACUS) als auch im nationalen und internationalen Kontext statt.

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

Die Projektarbeiten liefern einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Austausches südlich von Afrika und damit den Einstrom in das Golfstromregime weiter nördlich. Die gewonnenen Ergebnisse zur Variabilität haben eine unmittelbare Bedeutung für das Verständnis der beckenweiten Ozeanzirkulation und der Klimavariabilität im Atlantischen Sektor. Der Vergleich beider Modellsysteme, NEMO und FESOM, liefert einen Beitrag zur Diskussion zukünftiger Modellkonzepte in der Ozean- und Klimamodellierung.

II.5 des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

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

TP AWI Die FESOM-Modellstudie wurde in enger Zusammenarbeit mit anderen Modellentwicklern am AWI durchgeführt. Es besteht ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit dem Ziel, neue Entwicklungen zeitnah zur Verfügung zu stellen. Wissenschaftlich findet ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit internationalen Kollegen statt, die an ähnlichen Fragestellungen forschen. Hier sind keine thematischen Überschneidungen bekannt.

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

TP GEOMAR

Biastoch, A., J. V. Durgadoo, A. K. Morrison, E. van Sebille, W. Weijer, and S. M. Griffies, 2015: Atlantic Multi-decadal Oscillation covaries with Agulhas leakage, *Nature Commun.*, **6**:10082, doi: 10.1038/ncomms10082.

Caley, T., F. Peeters, A. Biastoch, L. Rossignol, E. van Sebille, J. Durgadoo, B. Malaizé, J. Giraudeau, K. Arthur, and R. Zahn, 2014: Quantitative estimate of the Agulhas paleo-leakage, *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1238-1246, doi: 10.1002/2014GL059278.

Durgadoo, J. V., B. R. Loveday, C. J.C. Reason, P. Penven, and A. Biastoch, 2013: Agulhas leakage predominantly responds to the Southern Hemisphere westerlies, *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 2113-2131, doi: 10.1175/JPO-D-13-047.1.

Le Bars D., J. V. Durgadoo, H.A. Dijkstra, A. Biastoch, and W.P.M. de Ruijter, 2014: An observed time-series of Agulhas leakage, *Ocean Science*, **10**, 601-609, doi: 10.5194/os-10-601-2014.

Loveday, B. R., J. V. Durgadoo, C. J. C. Reason, A. Biastoch, and P. Penven, 2014: Decoupling the Agulhas Current and Agulhas Leakage, *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1776-1797, doi: 10.1175/JPO-D-13-093.1.

Lübbecke, J. F., J. V. Durgadoo, and A. Biastoch, 2015: Contribution of increased Agulhas leakage to tropical Atlantic warming, *J. Clim.*, **28**, 9697-9706, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0258.1.

Rühs, S., J. V. Durgadoo, E. Behrens, and A. Biastoch, 2013: Advective timescales and pathways of Agulhas leakage, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3997-4000, doi: 10.1002/grl.50782.

Rühs, S., K. Getzlaff, J. V. Durgadoo, A. Biastoch, and C. W. Böning, 2015: On the suitability of North Brazil Current transport estimates for monitoring basin-scale AMOC changes, *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 8072-8080, doi:10.1002/2015GL065695.

Scussolini, P., E. van Sebille, and J. V. Durgadoo, 2013: Paleo Agulhas rings enter the subtropical gyre during the penultimate deglaciation. *Clim. Past*, **9**, 2631–2639, doi:10.5194/cp-9-2631-2013.

Van Sebille, E., P. Scussolini, J. V. Durgadoo, F. Peeters, A. Biastoch, W. Weijer, C. Turney, C. Paris, and R. Zahn, 2015: Ocean currents generate large footprints in marine palaeoclimate proxies, *Nat. Commun.*, **6**:6521, doi: 10.1038/ncomms7521.

TP AWI

Danilov, S. and Wang, Q. (2015) Resolving eddies by local mesh refinement, *Ocean Modelling*, 93, 75-83 . doi:10.1016/j.ocemod.2015.07.006

Danilov, S. , Wang, Q. , Timmermann, R. , Iakovlev, N. , Sidorenko, D. , Kimmritz, M. , Jung, T. and Schröter, J. (2015) Finite-Element Sea Ice Model (FESIM), version 2, *Geosci. Model Dev.*, 8 , 1747-1761. doi:10.5194/gmd-8-1747-2015

Sein, D. V. , Danilov, S. , Biastoch, A. , Durgadoo, J. V. , Sidorenko, D. , Harig, S. and Wang, Q. (2016) Designing variable ocean model resolution based on the observed ocean variability, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 904-916. doi:10.1002/2016MS000650

Sidorenko, D. , Rackow, T. , Jung, T. , Semmler, T. , Barbi, D. , Danilov, S. , Dethloff, K. , Dorn, W. , Fieg, K. , Gößling, H. F. , Handorf, D. , Harig, S. , Hiller, W. , Juricke, S. , Losch, M., Schröter, J. , Sein, D. and Wang, Q. (2015) Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6-FESOM. Part I: model formulation and mean climate, *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-014-2290-6

Wang, Q. , Danilov, S. , Jung, T. , Kaleschke, L. and Wernecke, A. (2016) Sea ice leads in the Arctic Ocean: Model assessment, interannual variability and trends, *Geophysical Research Letters*, 43, 7019-7027. doi:10.1002/2016GL068696

Wang, Q. , Danilov, S. , Sidorenko, D. , Timmermann, R. , Wekerle, C. , Wang, X. , Jung, T. and Schröter, J. (2014) The Finite Element Sea Ice-Ocean Model (FESOM) v.1.4: formulation of an ocean general circulation model , *Geoscientific Model Development*, 7, 663-693. doi:10.5194/gmd-7-663-2014