

BMBF-Verbundvorhaben „SACUS“

Abschlussbericht der Teilprojekte am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

TP 1 Zusammenhang zwischen dem südostatlantischen Küstenauftriebsgebiet und dem äquatorialen Strömungssystem (Antragsteller: P. Brandt, T. Kanzow, M. Visbeck)

TP 4 Tropisches atlantisches Klima und Vorhersagbarkeit (Antragsteller: R.J. Greatbatch, M. Latif)

I. Kurze Darstellung zu

I.1 Aufgabenstellung

TP 1 Hauptziel des Vorhabens war ein verbessertes Verständnis der Fernwirkung des äquatorialen Atlantischen Ozeans auf Klimaschwankungen im südöstlichen tropischen und subtropischen Atlantik. In TP1 sollten die hierfür verantwortlichen Prozesse, d.h. die Wellenausbreitung und Wassermassentransport entlang des Äquators und an der Küste genauer untersucht werden. Kern des Teilprojekts war die Installation und Wartung eines Verankerungsarray bei 11°S vor der Küste Angolas. Hierbei gewonnene Transportzeitserien des Angolastroms sollten zusammen mit Transportzeitserien des Äquatorialen Unterstroms analysiert werden, um damit Studien der Signalausbreitung basierend auf Satellitendaten zu vertiefen.

TP 4 Die Hauptaufgabe in diesem Teilbereich bestand in der Verbesserung der Güte von Klimasimulation mit dem Hauptaugenmerk auf den tropischen Atlantik und seiner angrenzenden Kontinente. Mit Hilfe verschiedener Ansätze zur Fehlerkorrektur und Modellverbesserung wurden dann saisonale und dekadische Vorhersagen erzeugt und validiert.

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

TP 1 Am GEOMAR existiert eine langfristige Expertise von Feldarbeiten mit Verankerungen und Schiffsbeobachtungen im tropischen Atlantik. Das Feldprogramm umfasst ein System von Verankerungen im östlichen tropischen Atlantik (bei 11°S) sowie schiffsgestützte Messungen entlang von 6°S, 11°S und 15°S. Das Forschungsprojekt ist auch ein Bestandteil des internationalen SAMOC (South Atlantic Meridional Overturning Circulation) Programms, bei dem die Schwankungen der AMOC im Südatlantiks untersucht und deren Auswirkungen auf das Klima abgeschätzt werden sollen.

TP 4 Seit vielen Jahren wird am GEOMAR ein gekoppeltes Klimamodell erfolgreich betrieben und für eine Vielzahl von Fragen der Ozean- und Klimavariabilität eingesetzt. Die betreuende Arbeitsgruppe besitzt langjährige Erfahrungen in der Entwicklung, Durchführung und der wissenschaftlichen Analyse von Simulationen mit dem „Kiel Climate Model“ (KCM). Alle beteiligten Wissenschaftler beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Klimavariabilität und –vorhersage auf saisonalen bis multi-dekadischen Zeitskalen mit Schwerpunkt auf der Rolle des Ozeans. Für die Projektarbeiten bestand ein direkter Zugriff auf Modelldaten des „Climate Model Intercomparison Project“ Phase 5 (CMIP5) Projektes sowie auf zahlreiche Beobachtungs- und Reanalyse-Produkte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

TP 1 Die erste projektbezogene Forschungsfahrt M98 (Tab. 1) und damit einhergehende Verankerungsauslegung konnte wie geplant durchgeführt werden. Die für Ende 2014 geplante Forschungsfahrt in die SACUS-Region mit Aufnahme/Neuauslegung der Verankerungen bei 11°S konnte nicht stattfinden, was zu einer vorübergehenden Verzögerung der Arbeiten führte. Während der Folgereise M120 im Oktober 2015 konnten zwei der vier im Juli 2013 ausgelegten Verankerungen geborgen werden und damit Geschwindigkeitsdaten im Randstrombereich für die Dauer der gesamten Auslegeperiode gewonnen werden. Die so entstandene Datenlage war für das Erreichen der Projektziele ausreichend.

Eine weitere Forschungsfahrt (M100/2) diente als Ausbildungsfahrt für Studenten/Wissenschaftler aus afrikanischen Ländern sowie aus Deutschland.

Die Ergebnisse der Analyse der gewonnenen Daten sowie der historischen Daten, bzw. bereits zu Beginn des Projekts vorliegenden Verankerungsdaten entlang des Äquators gingen in einige Publikationen ein.

Tab. 1: Forschungsfahrten.

Forschungsfahrt	Schiff	Zeitraum	Ort
M 98 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	Juli 2013	Tropischer Südatlantik
M 100/2 (FL: Prof. Visbeck, GEOMAR)	Meteor	Oktober 2013	Südostatlantik, südlicher indischer Ozean
M 120 (FL: Dr. Dengler, GEOMAR)	Meteor	Oktober/November 2015	Tropischer Südatlantik, Südostatlantik
M 131 (FL: Prof. Brandt, GEOMAR)	Meteor	Oktober/November 2016 (in Vorbereitung)	Tropischer Südatlantik, Südostatlantik

TP 4 Die im Projektantrag formulierten Fragestellungen wurden erfolgreich bearbeitet. Der wesentliche Arbeitsschwerpunkt war die die Konzeption, die Durchführung und Auswertung von Simulationen mit einem gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell (CGCM). Hierfür wurden mit dem Kieler Klimamodell (KCM) verschiedene Experimente durchgeführt. Im Verlauf der Arbeiten erschien es sinnvoll, die experimentelle Strategie an die bis dahin gewonnenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen anzupassen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des KCM mit denen aus dem CMIP5 Projekt verglichen und gegenüber Beobachtungen validiert.

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

TP 1 Obwohl in den letzten Jahren ein erheblicher Wissensgewinn über die Variabilität im tropischen Atlantik und in den Küstenauftriebsgebieten zu verzeichnen ist, sind viele Fragen

weiterhin offen. Nach wie vor ungeklärt sind die relativen Anteile von lokalen und äquatorialen Antrieb für die beobachtete Variabilität im Küstenauftriebsgebiet. Modellstudien legen nahe, dass auf interannualen Zeitskalen die Fernwirkung und damit verbundene Wellenausbreitung aus der äquatorialen Region dominant ist, während Variabilität auf kürzeren Zeitskalen hauptsächlich durch lokalen Antrieb hervorgerufen wird. Beobachtungsstudien der Wellenausbreitung beschränkten sich bisher auf die Analyse von Satellitendaten. Insbesondere lagen keine Beobachtungsdaten mit direkten Strömungsmessungen im Randstrombereich vor Angola vor, welche eine Bestimmung des Angolastroms im Mittel sowie auf saisonalen Zeitskalen ermöglicht hätten. Die Daten aus dem Verankerungsarrays können nun genutzt werden, um neben der Beschreibung des Randstroms auch die Wellensignale entlang der Küste zu studieren.

TP 4 Alle aktuellen gekoppelten Klimamodelle haben erhebliche Probleme den tropischen Atlantik realistisch zu simulieren. Dabei werden vor allem die Meeresoberflächentemperaturen im östlichen äquatorialen und südöstlichen Atlantik viel zu warm dargestellt und die saisonale Ausprägung der Kaltwasserzunge stark unterschätzt. Die Fehler im mittleren Zustand sind ein wesentlicher Grund für eine viel zu schwache zwischenjährliche Variabilität in den Modellen.

Eine Vielzahl von Ansätzen haben trotz vieler Jahre an Modellentwicklung nur wenig Erfolg gebracht, die Fehler blieben im Wesentlichen bestehen. Häufig wurden modelspezifische Änderungen vorgenommen, die nicht immer auf andere Modelle übertragbar waren. Deshalb ist ein grundlegenderer Ansatz dringend von Nöten, um die Modellfehler zu verringern, den wir auch verfolgt haben. Eine alternative Möglichkeit besteht darin, Methoden der Fehlerkorrektur anzuwenden. Dies erlaubt es ebenfalls, zumindest innerhalb bestimmter Grenzen, eine Analyse der vorherrschenden Mechanismen und Prozesse und schlussendlich saisonale Vorhersagen durchzuführen. Beide Möglichkeiten wurden verfolgt.

Die im Projektantrag formulierten Fragestellungen wurden erfolgreich bearbeitet. Der wesentliche Arbeitsschwerpunkt konzentrierte sich auf die Durchführung und Auswertung von Simulationen mit einem CGCM. Hierfür wurden mit verschiedenen KCM-Versionen Experimente durchgeführt. Im Verlauf der Arbeiten erwies es sich als sinnvoll, neue Experimente zu rechnen, um den bis dahin gewonnenen Ergebnissen und Schlussfolgerungen Rechnung zu tragen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

TP 1 Enge Zusammenarbeit innerhalb des Verbunds besteht mit dem Teilprojekt zur Variabilität des polwärtigen Transports im Ostrandstrom des südöstlichen Atlantiks (TP2, Mohrholz und Schmidt). In Zusammenarbeit mit TP2 wurden auch zwei Forschungsfahrten in die SACUS-Region durchgeführt bzw. geplant (M120 und M131, siehe Tab. 1).

Die gewonnenen Zeitreihen des äquatorialen Strömungssystems sowie der östlichen Randstromzirkulation sind wesentliche Grundlage der Validierung von Ozean- und gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen. Modelle erlauben auf der anderen Seite eine Einordnung der Signale in großräumige und langfristige Ozean- und Atmosphärenvariabilität. Im Mittelpunkt der Arbeiten steht in diesem Zusammenhang ein verbessertes Verständnis für die Ursachen des SST (sea surface temperature) Bias in gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen im östlichen tropischen Atlantiks und den Küstenauftriebsgebieten und damit verbundener verbesserter Vorhersagbarkeit (TP4, Greatbatch und Latif).

Außerhalb des Verbundes besteht eine enge Zusammenarbeit mit mehreren Projekten, die sich mit der Ausbreitung von Signalen besonders entlang des Äquators aber auch entlang der östlichen und westlichen Ränder beschäftigen (SFB754, PIRATA, EU PREFACE, RACE).

Einzelne Forschungsreisen wurden gemeinsam mit BMBF RACE (M98, 2013) oder dem EU PREFACE Projekt (M120, 2015; M131, 2016) durchgeführt.

Eine enge internationale Zusammenarbeit besteht mit dem Institut für Fischereiforschung INIP, Angola (Filomena Vaz Velho, Pedro Tchicalanga, Paulo Coehlo, Marisa Macuéria), von dem regelmäßig Wissenschaftler an den Forschungsfahrten teilnehmen, weitere Datensätze zur Verfügung stellen und an der Analyse der gewonnenen Daten mitarbeiten. Zu Schulungszwecken im Bereich Datenanalyse gab es zwei mehrwöchige Aufenthalte von Wissenschaftlern vom INIP am GEOMAR, Kiel (Juli 2014, November/Dezember 2015). In diesem Zusammenhang ist auch das IMR, Norwegen (Marek Ostrowski) involviert. Gemeinsam wird an der Prozessierung und Auswertung des EAF-Nansen Datensatzes gearbeitet, welcher den Verankerungsdatensatz um weitere schiffsgebundene Messungen ergänzt.

Weitere Kooperationspartner sind:

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

Texas A&M; USA (Ping Chang) - Modelvalidierung, SST-Bias im östlichen tropischen Atlantik und in den Küstenauftriebsgebieten;

University of Miami; USA (P. Zuidema) - Modelvalidierung, SST-Bias im östlichen tropischen Atlantik und in den Küstenauftriebsgebieten.

TP 4

PREFACE

Eine enge Kooperation bestand im Rahmen des EU-Projektes PREFACE (Enhancing prediction of Tropical Atlantic climate and its impacts). Das Projekt umfasst 28 Partner aus 18 Ländern in Europa und Afrika und 3 assoziierte Partner, die mit der nachhaltigen Nutzung der marinen Ökosysteme im östlichen tropischen Atlantik befasst sind. Ziel von PREFACE ist die umfassende Bewertung des Zustands des Klimas und der Ökosysteme im Bereich des tropischen Atlantiks und die Verbesserung von Zukunftsprojektionen.

MiKlip

Das BMBF Projekt MiKlip leistet wichtige Beiträge zur Erforschung der dekadischen Vorhersagbarkeit und entwickelt ein international wettbewerbsfähiges dekadisches Klimavorhersagesystem, das schließlich an den Deutsche Wetterdienst DWD für die operationelle Nutzung übergeben werden kann. MiKlip umfasst derzeit 16 nationale Partner aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Bundesbehörden.

UK Met Office

Viele ähnliche Fragestellungen werden beim britischen Wetterdienst (UK Met Office) bearbeitet. Es gab und gibt einen regen wissenschaftlichen Austausch, um von den gegenseitigen Erfahrungen zu profitieren.

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

TP 1 Zusammenhang zwischen dem südostatlantischen Küstenauftriebsgebiet und dem äquatorialen Strömungssystem

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten innerhalb des TP1 ist die Signalausbreitung von Wellen entlang des Äquators in Richtung der SACUS Region. In Vorbereitung der Analyse der Verankerungsdaten wurde dies zunächst mit Hilfe von Satellitendaten untersucht. Es konnten kontinuierliche und wiederkehrende ost- und anschließend südwärts Propagationen mit Phasengeschwindigkeiten von 1.8-2.1 m/s bis etwa 10-15°S identifiziert werden (Abb. 1). Verstärkte Wellenaktivität findet sich von November bis Februar, aber auch interannuale Variabilität ist sichtbar, u.a. in der polwärtigen Terminierung der einzelnen Wellen.

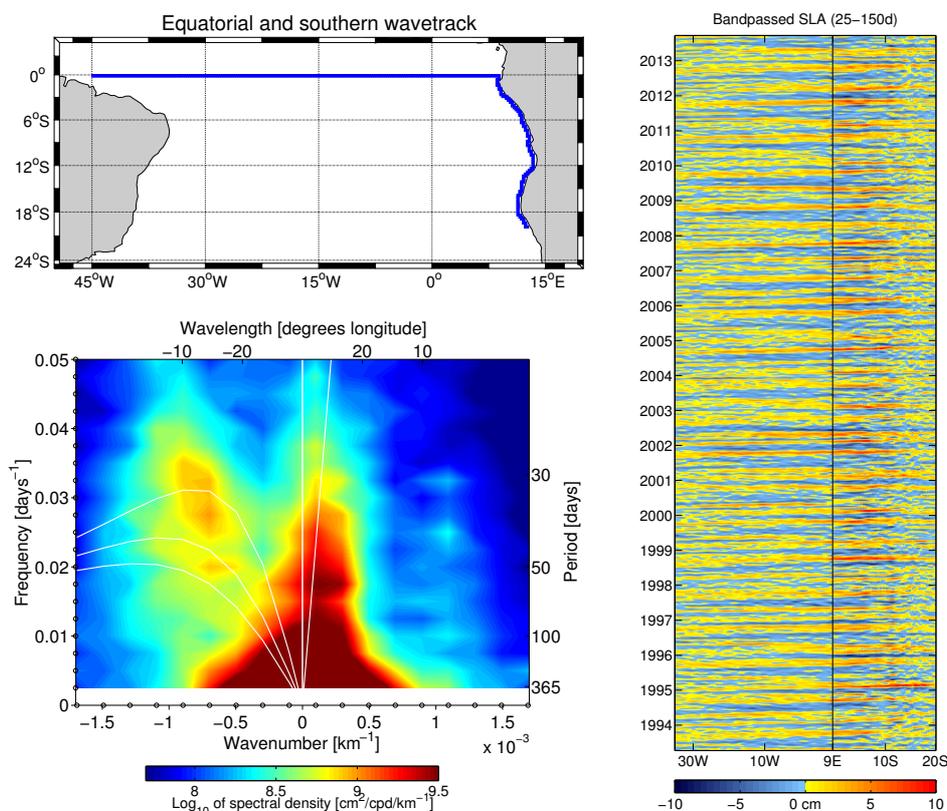


Abb. 1: Signalausbreitung aus Altimeter-Daten entlang des Äquators in Richtung der SACUS Region (oben links). Mittleres Frequenz-Wellenzahl-Spektrum (4.5°S-4.5°N) entlang des Äquators im Atlantik mit den theoretischen Dispersionskurven der Kelvinwelle und den ersten drei Meridionalmoden der Rossbywelle (unten links). Bandpassgefilterte (25-150 Tage) Zeitserie der SLA (1993-2013) (rechts).

Spektrale Peaks in den Zonal-Geschwindigkeiten am Äquator und in Meeresoberflächenanomalien im Jahres- und Halbjahresgang, sowie bei 120 Tagen werden mit sogenannten resonanten Beckenschwingungen assoziiert. In verschiedenen Arbeiten konnte die Dominanz solcher resonanter Beckenschwingungen für die Variabilität der zonalen Strömung am Äquator gezeigt werden (Matthießen et al. 2015, Brandt et al. 2016, Claus et al. 2016). Im weiteren Verlauf konzentrierten sich die Arbeiten in diesem Zusammenhang auf das Zusammenbringen der Beobachtungsdaten mit Experimenten aus einem einfachen Wellenmodell. Eine Studie konzentrierte sich dabei auf den Jahresgang des Äquatorialen Unterstroms (EUC) hinsichtlich des Transports, Kerntiefe und Kerngeschwindigkeit (Brandt et al., 2016). Es konnte gezeigt werden, dass der Jahresgang (Halbjahresgang) von der vierten

(zweiten) baroklinen Mode dominiert ist. Der Jahresgang von Unterstromtransport, Kerntiefe und maximaler Kerngeschwindigkeit kann im Wesentlichen durch die lineare Überlagerung der äquatorialen Beckenschwingungen der zweiten und vierten baroklinen Mode erklärt werden (Abb. 2).

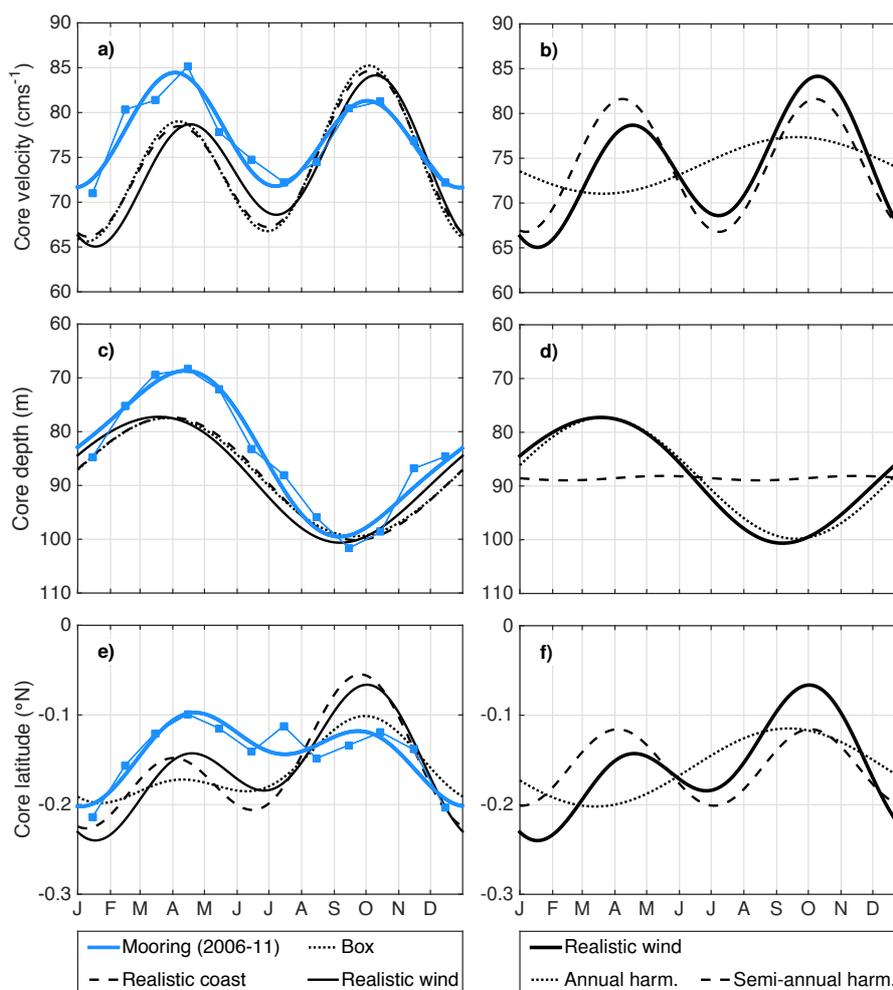


Abb. 2: Monatsmittel (blaue Quadrate, dünne blaue Linien) und Superposition von Jahres- und Halbjahresharmonischer von (a) EUC Kerngeschwindigkeit, (c) EUC Kerntiefe und (e) EUC Kernposition bei 23°W berechnet aus Beobachtungsdaten zwischen 2006 und 2011 (dicke blaue Linien), sowie aus der Rekonstruktion von drei verschiedenen Wellenmodellexperimenten unterschiedlicher Komplexität: rechteckiges Becken (schwarz gepunktet), realistische Küstenlinie (schwarz, gestrichelt) und realistischer Windantrieb (schwarz durchgezogen). In (b), (d) und (f) werden die relativen Anteile von Jahres- und Halbjahresgang für das Experiment mit realistischem Wind gezeigt.

Im Oktober 2015 wurden die Geschwindigkeitsdaten aus dem Verankerungsarray bei 11°S vor Angola gewonnen, welche eine Beschreibung des Angolastroms erlauben. Im Gegensatz zu den aus historischen Daten gezogenen Schlussfolgerungen, zeigen die Daten keinen stetigen südwardigen Strom, vielmehr sind die Zeitserien von wechselnden, mehrere Monate andauernden Perioden südwardiger und nordwardiger Strömung dominiert, sowie von hochfrequenten Geschwindigkeitspulsen (Kopte et al., 2016). Im Mittel ergibt sich eine schwache südwardige Strömung bis in etwa 200 m Tiefe mit einem mittleren Geschwindigkeitsmaximum von 5-8 cm/s in etwa 50 m Tiefe (Abb. 3).

Mit Hilfe der Verankerungszeitserien sowie Variabilitätsmustern, welche aus 13 Schiffsschnitten zwischen 11°S und 12°S errechnet wurden, war es außerdem möglich eine Transportzeitserie für den Angolastrom zu erstellen. Im Mittel findet sich ein schwacher südwardiger Transport von 0.32 ± 0.046 Sv. Neben starker intrasaisonaler Variabilität zeigt sich ein ausgeprägter Halbjahresgang, der gut mit den Durchlaufzeiten der Halbjahres-Küstenrandwelle übereinstimmt (Abb. 4b).

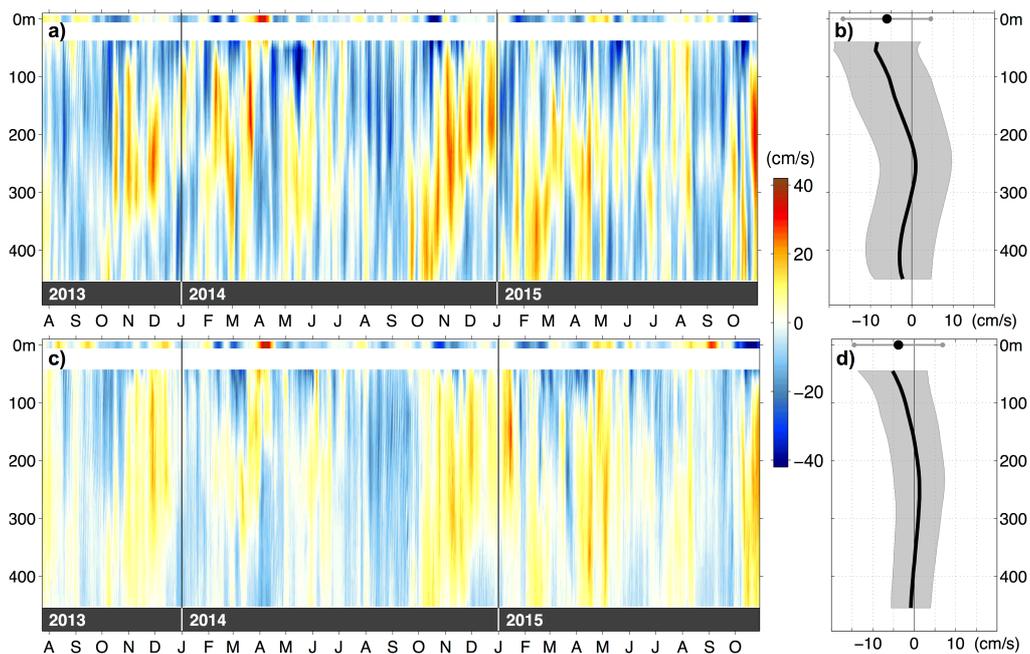


Abb. 3: Küstenparallele Strömungen (-34°) in cm/s bei 11°S vor Angola gemessen von (a) einem ADCP verankert auf der 500 m-Isobathe und (b) einem ADCP verankert auf der 1200 m-Isobathe im Zeitraum von Juli 2013 bis Oktober 2015. Oberflächenwerte repräsentieren küstenparallele geostrophische Geschwindigkeiten abgeleitet aus Satellitenmessungen von AVISO.

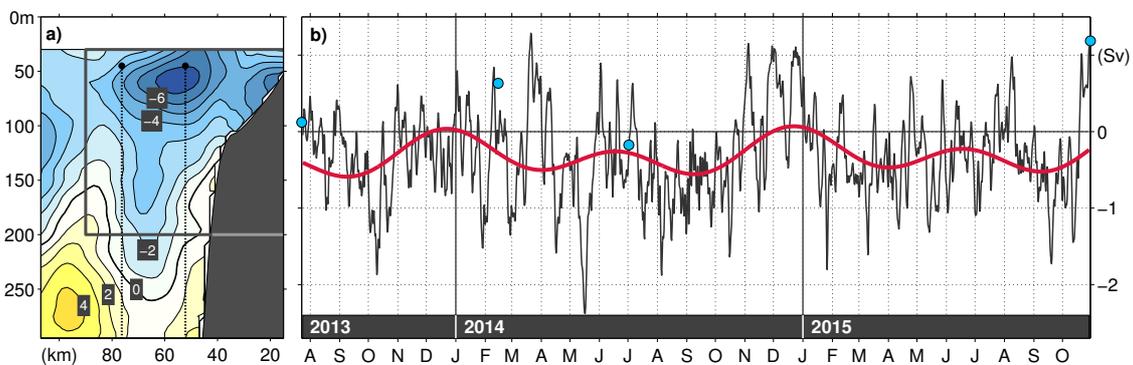


Abb. 4: (a) Mittleres Feld der küstenparallelen Strömung (cm/s) basierend auf der Rekonstruktion des Geschwindigkeitsfeldes mit Hilfe von Verankerungszeitserien und Variabilitätsmustern aus Schiffsschnitten. (b) Angolastrom Transportzeitserie (schwarze Linie) berechnet durch Integration innerhalb der grauen Box in (a). Rote Linie zeigt die Überlagerung von Jahres- und Halbjahres-harmonischer, blaue Punkte zeigen Transporte aus Schiffsschnitten während der Auslegeperiode.

Auch in den Strömungszeitserien vor Angola finden sich spektrale Peaks im Jahres- und Halbjahresgang sowie bei 120 Tagen. Dies könnte u.a. mit einem Einfluss der äquatorialen Beckenschwingungen durch Küstenrandwellen auf den Jahresgang des Randstroms vor Angola nahelegen. Wellenmodellexperimente zeigen in der Tat, dass wichtige Aspekte des beobachteten Jahresgangs des Angolastroms bereits mit den Beckenschwingungen weniger barokliner Moden hinreichend gut erklärt werden können. Diese Ergebnisse werden im Moment zur Veröffentlichung vorbereitet.

Innerhalb von TP1 spielt die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus und die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Kapazitäten in den westafrikanischen Staaten eine zentrale Rolle. Während zweier mehrwöchiger Besuche angolischer Wissenschaftler am GEOMAR wurde mit der Analyse von Strömungs- und Hydrographie-Daten aus dem EAF-Nansen Programm begonnen und ein Abschluss der Datenprozessierung erreicht. Zentrale Ergebnisse dieses Datensatzes werden im Moment zur Veröffentlichung vorbereitet. Die Analyse von 8818 CTD Profilen, welche zwischen 1995 und 2015 entlang des angolischen Schelfs und Kontinentalabhangs gemessen wurden, zeigt eine langfristige Erwärmung der Dichteschicht innerhalb der oberen Sprungschicht ($26 \text{ kg m}^{-3} \leq \sigma_\theta \leq 26.5 \text{ kg m}^{-3}$) von 0.19°C pro Dekade (Abb. 5). Zwischenjährliche Schwankungen bewegen sich im Bereich von $\pm 0.6^\circ\text{C}$ und können mehrere Jahre vorherrschen. Ein Vergleich mit zwischenjährlichen Schwankungen der Meeresoberflächentemperatur deutet darauf hin, dass Wärmeeanomalien innerhalb der Sprungschicht dem Auftreten von Benguela Niños/Niñas vorangehen.

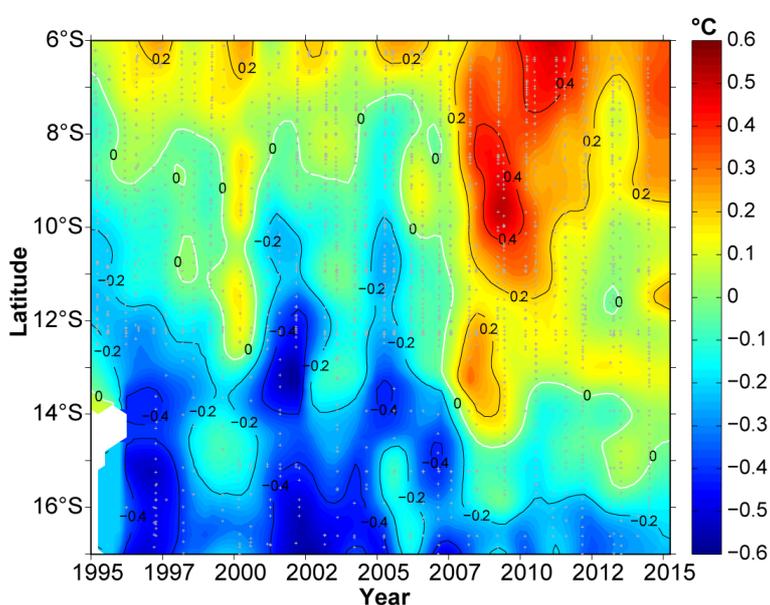


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung von Temperaturanomalien entlang der angolischen Küste innerhalb der Dichteschicht ($26 \text{ kg m}^{-3} \leq \sigma_\theta \leq 26.5 \text{ kg m}^{-3}$). Die Position individueller CTD Stationen wird durch graue Punkte markiert.

TP 4 Tropisches atlantisches Klima und Vorhersagbarkeit

Es wurden verschiedene Ansätze einer Fehlerkorrektur bezüglich systematischer Modellfehler im tropischen Atlantik im Kieler Klima Modell (KCM) durchgeführt. Grundlegende Strukturen im mittleren Zustand, wie die der Meeresoberflächentemperatur (SST) und zonaler Winde entlang des Äquators, sind nur sehr schlecht in aktuellen gekoppelten Klimamodellen repräsentiert.

Ein einfaches globales „Ozeanrestoring“ für Temperatur und Salzgehalt unterhalb von 100 m und 200 m, erzielte keine Effekte, wodurch der in dieser Region erheblich größere Einfluss von systematischen Fehlern in der Atmosphärenkomponente hervorgehoben wird. Eine bessere Verteilung des Niederschlags über den angrenzenden Kontinenten, vor allem aber die korrekte Lage der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) nördlich des Äquators im borealen Sommer ist entscheidend für eine realistische Simulation des tropischen Atlantiks. Umfangreiche Tests verschiedener Niederschlagsparametrisierungen sowohl im gekoppelten

Modell (KCM) als auch mit der Atmosphärenkomponente ECHAM5 unter Vorgabe beobachteter SSTs blieben ebenso erfolglos.

In einem weiteren Experimentaufbau wurde im KCM die Ozeankomponente mit beobachteten Windstressdaten angetrieben und wahlweise eine Flusskorrektur angewendet. Bei eingeschalteter Flusskorrektur ergeben sich wesentliche Verbesserungen im tropischen Atlantik, insbesondere im Hinblick auf die Variabilität und Vorhersagbarkeit der Meeresoberflächentemperatur (Abb. 6, Ding et al. 2015).

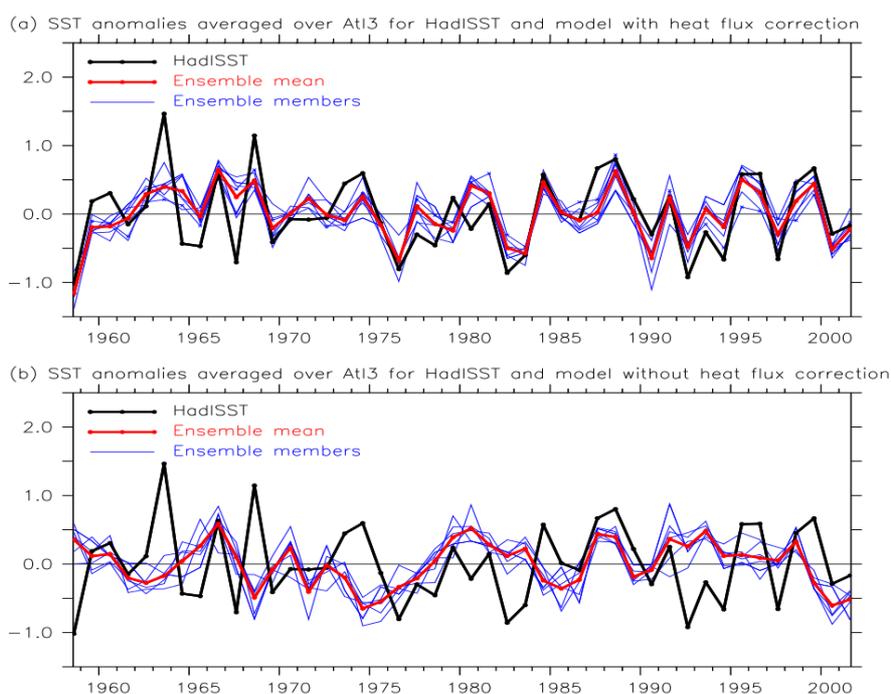


Abb. 6: SST Anomalien in der ATL3 Region (20°W-0°W, 3°S-3°N) im borealen Sommer für Beobachtungen (schwarz) und Modell (rot + blau) mit Flusskorrektur (a) und ohne Flusskorrektur (b).

Als entscheidend hat sich die Modellauflösung der Atmosphärenkomponente im gekoppelten Modell herausgestellt. Um das zu zeigen, wurde das KCM mit verschiedenen horizontalen Auflösungen zwischen 2.8° und 0.45° in der Atmosphäre, jedoch einem unveränderten relativ grob aufgelöstem Ozeanmodell, gerechnet. Zusätzlich wurde die vertikale Auflösung von 31 auf 62 Level verdoppelt, wobei der oberste Level gleich blieb. Dabei zeigte sich, dass bei hoher horizontaler und vertikaler Auflösung systematische Fehler im Modell erheblich reduziert sind. Weiterhin zeigte sich, dass die vertikale der erhöhten horizontalen Auflösung stets angepasst werden muss (Harlass et al. 2015 und 2016).

Der SST Fehler im östlichen und südöstlichen Tropischen Atlantik verringert sich bei erhöhter horizontaler Auflösung nur leicht und kann erst bei zusätzlich erhöhter vertikaler Auflösung deutlich reduziert werden (Abb. 7). Dadurch ist der zonale Temperaturgradient am Äquator nicht mehr umgekehrt im Vergleich zu den Beobachtungen, wie es bei niedriger Auflösung und in den allermeisten gekoppelten Modellen der Fall ist. Ferner verringern sich bei höherer vertikaler Atmosphärenauflösung auch die äquatorialen Temperaturfehler unterhalb der Meeresoberfläche durch eine erhöhte Windschubspannung und eine daraus resultierende größere (niedrigere) Thermoklinentiefe im Westen (Osten).

Über dem westlichen äquatorialen Atlantik erstreckt sich ein zu schwacher, teils in die falsche Richtung wehender, Ostwind von der Oberfläche bis in eine Höhe von ca. 600 hPa, der bereits in den Atmosphärenmodellen vorhanden ist, in denen ein SST Fehler per Definition

nicht existiert, da die SST aus Beobachtungen vorgegeben wird. Mehr vertikale Level führen zu einer Umverteilung des Niederschlags im westlichen Atlantik, einer nordwärts Verlagerung konvektiver Aktivität sowie verstärkter vertikaler Durchmischung, die dann zusammen den Eintrag von zonalem Impuls beeinflussen und auf den zonalen Druckgradienten wirken.

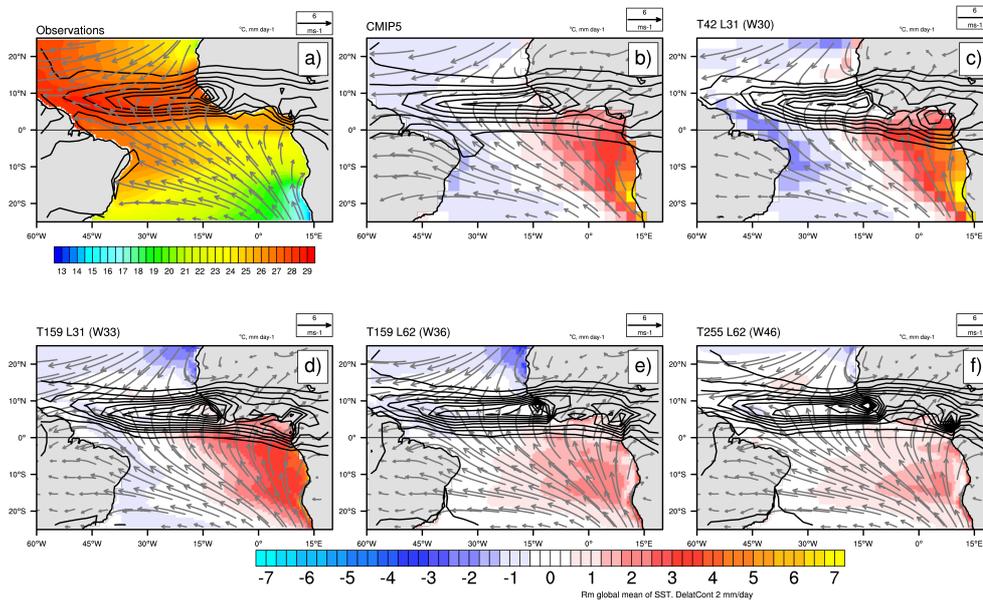


Abb. 7: Fehler der Meeresoberflächentemperatur ($^{\circ}\text{C}$, Schattierung), mittlerer Niederschlag (mm/Tag, Konturlinien) und 10m Wind (m/s, Vektoren) im Nordsommer (Juli-August-September) im Kieler Klima Modell (KCM) gegenüber Satellitenbeobachtungen. (a) Beobachtungen, (b) Ensemble Mittel der Modelle im 5. IPCC Bericht, (c) niedrigste horiz. Auflösung 2.8° , (d) hohe horiz. Auflösung 0.75° , (e) wie d + erhöhte vert. Auflösung, (f) höchste horiz. 0.4° + hohe vert. Auflösung.

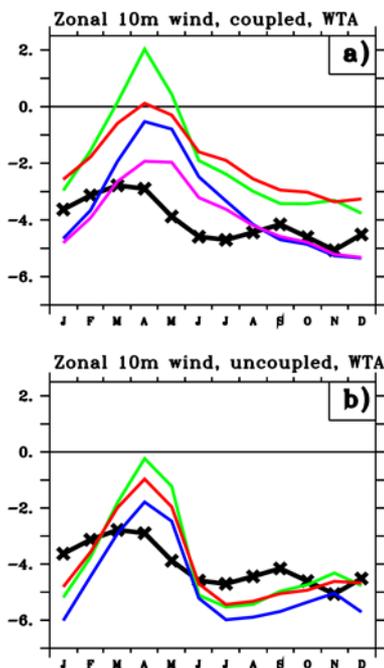


Abb. 8: Jahresgang des zonalen Windes im westlichen äquatorialen Atlantik für gekoppelte (a) und ungekoppelte (b) Modellläufe. Legende in Abb. 10.

In der Folge verschwindet der Windfehler fast vollständig (Abb. 8). Äquatoriale Wellen, angetrieben durch den Windfehler, verschwinden mit einer höher aufgelösten Atmosphäre und beenden eine verfälschte Temperaturverteilung der oberen Ozeanschichten am Äquator und entlang der afrikanischen Küste. Zusammen mit einer verbesserten Struktur der

küstennahen meridionalen Ozeanströmungen im Benguela-Auftriebsgebiet, hervorgerufen durch eine genauere Darstellung des Küstenverlaufs und damit des Windschubs und der Winddrehung bei höheren Atmosphärenauflösung, wird der große Temperaturfehler dort stark herabgesetzt (Abb. 7).

Eine wesentliche Verbesserung erfährt ebenso das afrikanische Monsunsystem über Nordafrika (Abb. 9) sowie dessen saisonale Vorhersagbarkeit. Diese Ergebnisse werden zurzeit in einer weiteren Publikation zusammengefasst (Steinig et al. 2017, in Bearbeitung).

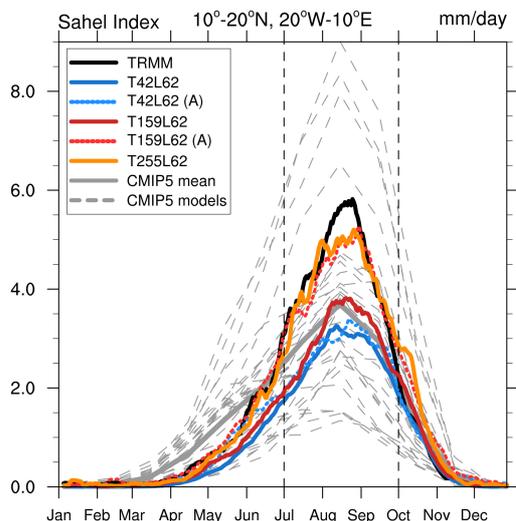


Abb. 9: Jahrgang des Sahel Index (10°N - 20°N , 20°W - 10°E), gestrichelte (durchgezogene) Linien repräsentieren ungekoppelte (gekoppelte) Modellläufe.

Die realistischere Simulation des oberen Ozeans zusammen mit genügend starken Winden, aufgrund der jetzt richtigen nördlichen Lage des maximalen Niederschlags, die im späten Frühling und Sommer über den östlichen Äquator wehen, erlauben die Ausbildung der jahreszeitlichen Kaltwasserzunge. Die charakteristische zeitliche Beschränkung maximaler SST-Variabilität in der Region (Abb. 10) und das Bjerknes-Feedback können nur aufgelöst werden, wenn die vertikale Atmosphärenauflösung zusammen mit der horizontalen genügend hoch ist. Der Jahrgang der SST-Variabilität wird durch die Wechselwirkung zwischen windgetriebener Änderung der Thermoklinenneigung und der Temperatur im oberen Ozean hervorgerufen.

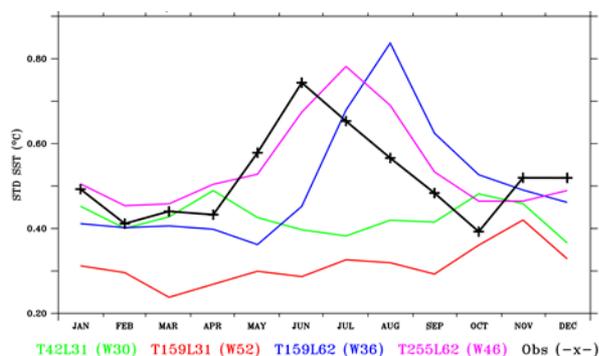


Abb. 10: Jahrgang der Standard Abweichung der Meeresoberflächentemperatur ($^{\circ}\text{C}$) in der ATL3 Region (3°S - 3°N , 20°W - 0°W). Schwarz: Beobachtungen, grün: niedrigste horiz. Auflösung 2.8° , rot: hohe horiz. Auflösung 0.75° , blau: wie rot + erhöhte vert. Auflösung, pink: höchste horiz. 0.4° + hohe vert. Auflösung.

Eine einfache Möglichkeit, den positiven SST-Fehler im gekoppelten Modell zu beheben und die simulierte SST der beobachteten Klimatologie anzunähern, stellt eine Korrektur der von der Ozeankomponente wahrgenommenen Oberflächenwärmeflüsse dar. Es wurden Vergleiche zwischen einer so korrigierten Version (FLX) und einer unkorrigierten Version (STD) des KCM angestellt. STD und FLX wurden mithilfe der MODINI-Technik initialisiert, um kontrollierte Anfangsbedingungen für den Vergleich mit Beobachtungen und für jahreszeitliche

Vorhersagerechnungen zu erreichen. Erste Ergebnisse dieser Experimente wurden in Ding et al. (2015) publiziert. Sie zeigen, dass die beobachtete SST-Variabilität von FLX deutlich besser wiedergegeben wird als von STD. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass FLX etwa 50% der beobachteten Variabilität wiedergibt, die den Atlantischen Niños zugeschrieben wird. Ferner wurde gezeigt, dass ein Großteil der SST-Variabilität durch die Ozeandynamik im Ostteil des tropischen Atlantik erklärt werden kann. In den Beobachtungen sind etwa 50-60% und im Modell FLX sind etwa 50-70% der Variabilität durch diese Prozesse bestimmt. Dies deutet auch darauf hin, dass FLX für jahreszeitliche Vorhersagen in der Region genutzt werden könnte. Diese Fragestellung wurde bearbeitet, indem historische jahreszeitliche Vorhersagerechnungen mit MODINI-initialisierten STD- und FLX-Experimenten durchgeführt wurden (Dippe et al., 2016b). Diese Vorhersagerechnungen wurden jeweils am 1. Februar, 1. Mai, 1. August und 1. November der Jahre 1981 bis 2012 gestartet. Es zeigte sich, dass FLX in der Tat bessere Ergebnisse erzielt als STD. Es zeigte sich aber auch, dass die Vorhersagekraft einer Persistenzannahme (Hier: Persistenz der SST-Anomalien von einem zum nächsten Monat) noch immer schwer zu übertreffen ist. Die schlechtesten Ergebnisse erzielten die am 1. Februar gestarteten Simulationen, die die Persistenz nicht übertrafen. Die besten Ergebnisse wurden mit Initialisierungen am 1. August erzielt, wo konsistent bessere Vorhersagen erzielt wurden als durch Persistenz. Simulationen, die am 1. Mai initialisiert wurden, zeigten, dass sich erst im Verlauf der Simulation eine Vorhersagequalität entwickelt. Dies deutet darauf hin, dass es schon in den Anfangsbedingungen Vorhersagepotential gibt. Die im Mai gestarteten Simulationen sind insofern problematisch, als dass die MODINI-Initialisierung Schwierigkeiten hat, die beobachtete SST-Variabilität in diesem Monat zu reproduzieren. Dennoch konnte gezeigt werden, dass SST-Korrekturen während der Simulation zu einer konsistent besseren Vorhersage führen können als sie durch Persistenz erreicht wird. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass die Produktion hochwertiger jahreszeitlicher Vorhersagen im tropischen Atlantik eine schwierige Aufgabe bleibt, deren Lösung von weiteren Modellverbesserungen abhängt.

Es wurde außerdem untersucht, ob der äquatoriale SST-Fehler die Möglichkeit behindert, mit einem gekoppelten globalen Klimamodell realistische dynamische SST-Variabilität zu produzieren. Zu diesem Zweck wurde die SST-Variabilität (siehe Abbildung 11) in zwei MODINI-initialisierten FLX- und STD-Experimenten in eine dynamische und eine stochastische Komponente aufgeteilt (Dippe et al., 2016a). Der dynamische Teil ist der, der als prinzipiell vorhersagbar angesehen wird, während der stochastische durch atmosphärisches Rauschen bestimmt ist und damit nicht vorhergesagt werden kann. Um die Simulationen mit Beobachtungen zu vergleichen, werden empirische lineare Modelle der SST mit den zwei Prediktoren Meeresoberflächenhöhe und zonaler oberflächennaher Wind untersucht. Es zeigt sich, dass die dynamische SST-Varianz einen ausgeprägten Jahresgang aufweist (Abbildung 12). Diese Varianz ist während der aktiven Phase des Atlantischen Niño im Nordhemisphärensommer am größten. Sie erreicht in dieser Zeit etwa das Vier- bis Siebenfache der stochastischen SST-Varianz. Dies deutet darauf hin, dass der Atlantische Niño ein dynamisches Phänomen und damit möglicherweise vorhersagbar ist. Im gekoppelten Modell unterdrückt der SST-Bias die Variabilitätsspitze in der dynamischen SST und verschiebt diese fälschlicherweise in den Nordhemisphärenwinter. Die Reduktion der Fehler in der FLX-Version des Modells verbessert die Darstellung der jahreszeitlich auftretenden Kaltwasserzunge und verstärkt die dynamische SST-Variabilität, indem sie für Ausgangsbedingungen sorgt, die das Wirken von Schlüsselprozessen im tropischen Ozean-Atmosphären-System erst ermöglichen. Die hier diskutierten Ergebnisse stehen im Kontrast zu denen von Nmamchi et al. (2015), die behaupten, dass nahezu die gesamte mit dem Atlantischen Niño verbundene SST-Variabilität stochastischer Natur sei. Der Hauptgrund für

diese Diskrepanz liegt in dem Umstand, dass Nnamchi et al. (2015) ihre Untersuchungen auf CMIP5-Modelle stützen, die durchweg ausgeprägte SST-Fehler zeigen.

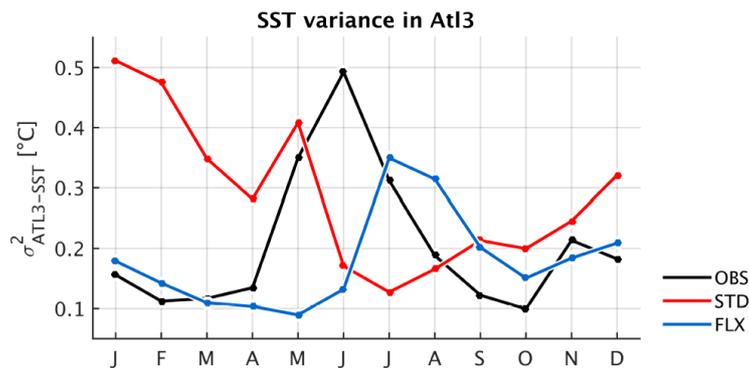


Abb. 11: Jahrgang der Standard Abweichung der Meeresoberflächentemperatur (°C) in der ATL3 Region (3°S-3°N, 20°W-0°W) für ERA-Interim Reanalyse (schwarz), MODINI Läufe STD (rot) und FLX (blau).

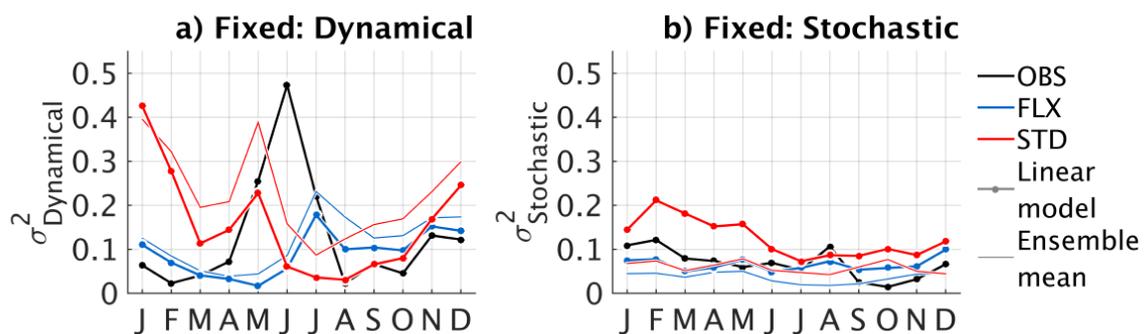


Abb 12.: Zerlegung der SST Variabilität aus Abb. 11 in den dynamischen und den stochastischen Teil. Legende wie Abb. 11. Die dünnen Linien zeigen die Zerlegung, wenn die dynamische (a) bzw. stochastische (b) Variabilität die Variabilität des Ensemblemittels darstellt.

II.2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Während im modellierenden Teilprojekt TP4 der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung für Personal eingesetzt wurde, ist dies beim Projekt mit beobachtenden Schwerpunkt TP1 nur ein Anteil. Ein zweiter Anteil an den Mitteln in TP1 wurde für Verbrauchsmaterial bei Verankerungen sowie für die großen Expeditionen mit FS Meteor für Reisekosten und Transporte eingesetzt. Ein dritter Anteil in TP1 wurde in Capacity Building Maßnahmen investiert. Dies geschah in Form einer Sommerschule in Kapstadt im Dezember 2014, der Teilnahme westafrikanischer Kollegen und Studenten an den Forschungsfahrten, sowie durch zwei mehrwöchige Besuche westafrikanischer Kollegen am GEOMAR.

II.3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Fokus des beobachtenden TPs stand die Variabilität der östlichen Randstromzirkulation in Bezug auf Transporte und Wellensignale. Sehr wichtig und damit notwendig und angemessen waren parallele Prozessstudien mittels einfacher Wellenmodelle sowie hochauflösende Modellierung – zu gegenseitiger Unterstützung bei Validierung und Interpretation.

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

Die erzielten Ergebnisse sind wichtige Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten im BMBF Projekt SACUS II und in EU-geförderten Projekten. Darüber hinaus liefern die Projektarbeiten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der tropischen Klimavariabilität und deren Vorhersagbarkeit. Während die Beobachtungsdaten über einen längeren Zeitraum (bis dekadisch) eine Validierung der Modelle auf diesen Zeitskalen ermöglichen, sind die Modelle unabdingbar zur Interpretation lokaler Messungen in Bezug auf die großskaligen und langfristigen Prozesse. Ein wesentlicher Beitrag wurde zur Entwicklung von Kapazitäten in Angola geleistet. Diese Arbeiten haben zu einer deutlichen Verbesserung der Kooperation auch im Hinblick auf zukünftige Projekte geführt.

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

TP 1 Das SACUS TP1 ist ein wesentlicher Beitrag zum internationalen atlantischen Beobachtungssystem und insbesondere SAMOC Programm. Diese Arbeiten werden jetzt im Rahmen des EU AtlantOS Programms koordiniert. Sie tragen wesentlich zum Verständnis der saisonalen und zwischenjährlichen Variabilität im tropischen Atlantik bei.

TP 4

Das SACUS TP4 ist ein wichtiger Beitrag zur Modellierung des Klimasystems im tropischen Atlantik. Die Verringerung der Fehler im gekoppelten Modell allein durch die Erhöhung der Auflösung der Atmosphärenkomponente kann als Durchbruch angesehen werden und hat großes Aufsehen in der internationalen Gemeinschaft der Klimaforscher hervorgerufen, zuletzt auf einer Konferenz in Paris Ende 2016.

Das zur Zeit am erfolgreichsten operierenden saisonale Vorhersagemodell wird vom UK Met Office betrieben, in dem sehr genau auf die Initialisierung im äquatorialen Bereich geachtet wird. Unsere relativ simple Methode der Initialisierung von MODINI mit beobachteten Windstressdaten ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer getrennten Initialisierung von Atmosphäre und Ozean. Es besteht bereits eine Zusammenarbeit mit dem UK Met Office und Teile deren Vorhersagesystems, die bezüglich der Vorhersagbarkeit im tropischen Atlantik ausgebaut werden soll.

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

TP 1

Publikationen

- Brandt, P., M. Claus, R. J. Greatbatch, R. Kopte, J. M. Toole, W. E. Johns, and C. W. Böning, Annual and semi-annual cycle of equatorial Atlantic circulation associated with basin mode resonance, *J. Phys. Oceanogr.*, 46, 3011–3029, doi: 10.1175/JPO-D-15-0248.1, 2016.
- Boomers, J., Hydrographische Variabilität im Auftriebsgebiet vor Angola, Bachelorarbeit, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Kiel, Germany, 33 pp, 2016.
- Burmeister, K., P. Brandt, J. F. Lübbecke, Revisiting the cause of the eastern equatorial Atlantic cold event in 2009, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 4777–4789, doi:10.1002/2016JC011719, 2016.
- Burmeister, K., Tropical Atlantic SST variability with focus on the extreme events in 2009. Master thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 71 pp, 2015.
- Claus, M., R. J. Greatbatch, P. Brandt and J. M. Toole, Forcing of the Atlantic equatorial deep jets derived from observations, *J. Phys. Oceanogr.*, 46, 3549-3562, doi: 10.1175/JPO-D-16-0140.1, 2016.
- Kopte, R., P. Brandt, M. Dengler, P.C.M. Tchipalanga, M. Macuéria, M. Ostrowski, The Angola Current – flow and hydrographic characteristics as observed at 11°S, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2016, minor revision, revised.
- Lüdke, J., Seasonal Mixed Layer Heat and Salinity Budget in the South Eastern Tropical Atlantic Ocean, Master thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 101 pp, 2016.
- Matthießen, J.-D., R. J. Greatbatch, P. Brandt, S.-H. Didwischus, and M. Claus, Upward influence of the equatorial deep jets on the North Equatorial Countercurrent, *Ocean Dynamics*, 65, 1095–1102, doi:10.1007/s10236-015-0855-5, 2015.
- Schlundt, M., P. Brandt, M. Dengler, R. Hummels, T. Fischer, K. Bumke, G. Krahnemann, and J. Karstensen, Mixed layer heat and salinity budgets during the onset of the 2011 Atlantic cold tongue, *J. Geophys. Res.*, 119, 7882-7910, doi:10.1002/2014JC010021, 2014.
- Zuidema, P., P. Chang, B. Medeiros, B. Kirtman, R. Mechoso, E. Schneider, T. Toniazzo, I. Richter, J. Small, K. Bellomo, P. Brandt, S. de Szoeki, T. Farrar, E. Jung, S. Kato, M. Li, C. Patricola, Z. Wang, R. Wood, and Z. Xu, Challenges and prospects for reducing coupled climate model SST biases in the eastern tropical Atlantic and Pacific Oceans: The US CLIVAR Eastern Tropical Oceans Synthesis Working Group, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-15-00274.1, 2016, in press.

Präsentationen

- Brandt, P., M. Claus, R. J. Greatbatch, R. Kopte, J. M. Toole, W. E. Johns, and C. W. Böning, Annual and semi-annual cycle of equatorial Atlantic circulation associated with basin mode resonance, General Assembly 2016, Vienna, Austria, 18 Apr. 2016.
- Brandt, P., Studies on tropical Atlantic circulation, climate and biogeochemistry, Universität Hamburg, Hamburg, 5 February, 2016.
- Brandt, P., M. Claus, R. J. Greatbatch, R. Kopte, J. M. Toole, W. E. Johns, Annual and semi-annual variations of equatorial Atlantic circulation associated with basin mode resonance, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, Cape Town, South Africa, 25 August, 2015.
- Brandt, P., Equatorial circulation and its relation to tropical Atlantic variability, Fritz Schott memorial lecture series (invited), RSMAS, Miami, USA, 4 Mar., 2015.
- Brandt, P., Tropical Atlantic circulation and variability: equatorial dynamics and ventilation physics, Oceanography Seminar, Texas A&M University, College Station, USA, 2 Mar., 2015.
- Brandt, P., A. Funk, A. Tantet, W. E. Johns, J. Fischer, The Equatorial Undercurrent in the central Atlantic and its relation to tropical Atlantic variability, General Assembly of PREFACE „Enhancing Prediction of Tropical Atlantic Climate and its Impacts“, Casablanca, Morocco, 29 Oct. 2014.
- Brandt, P., A. Funk, A. Tantet, W. E. Johns, J. Fischer, The Equatorial Undercurrent in the central Atlantic and its relation to tropical Atlantic variability, Atmosphere and Ocean Dynamics: A Scientific Workshop to Celebrate Professor Dr. Richard Greatbatch's 60th Birthday, Liverpool, UK, 11 Apr. 2014.
- Brandt, P., A. Funk, A. Tantet, W. E. Johns, J. Fischer, Equatorial circulation and tropical Atlantic variability during the Tropical Atlantic Climate Experiment, 2014 Ocean Sciences Meeting, Honolulu, USA, 26 Feb. 2014.
- Brandt, P., Physical and biogeochemical observations during recent cruises in the tropical Atlantic, Seminar at the Depts. of Marine Sciences, Oceanography, and Maritime Systems Engineering, Texas A&M University, Galveston, USA, 27 Feb., 2015.
- Brandt, P., Equatorial Atlantic circulation and tropical climate variability, Seminar at the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, China, 2 Sep. 2013.
- Brandt, P., Enhancing prediction of tropical Atlantic climate and its impact, Seminar at the Ministry of Fisheries & Marine Resources, Subdivision Environment, Swakopmund, Namibia, 29 Jul. 2013.
- Claus, M., R.J. Greatbatch, P. Brandt, J.-D. Matthießen, P. Tuchen, Dynamics of the equatorial deep jets, National Oceanography Centre, Liverpool, UK, 7/10/2016
- Claus, M., R.J. Greatbatch, P. Brandt, J.-D. Matthießen, P. Tuchen, Dynamics of the equatorial deep jets, UK Met Office, Exeter, UK, 11/10/2016
- Kopte, R., P. Brandt, M. Dengler, M. Claus, R. J. Greatbatch, The Angola Current and its seasonal variability as observed at 11°S, EGU General Assembly 2016, 18.04.2016, Vienna, Austria.
- Kopte, R., P. Brandt, M. Dengler, Equatorial Kelvin waves and related oceanic variability in the Atlantic, PREFACE General Assembly 2014, 30.10.2014, Casablanca, Morocco.
- Rath, W., M. Dengler, P. Brandt, S. Schmidtke, M. Schlundt, R. Kopte, M. Ostrowski, A. van der Plas, T. Junker, V. Mohrholz, A. Sarre, P. Tchikalanga, B. Sangolay, Mixed-layer

heat budget of the northeastern tropical Atlantic from the new PREFACE climatology., PIRATA/PREFACE/CLIVAR – TAV Meeting, 26 August 2015, Cape Town, South Africa.

Tchupalanga, P., M. Macuéria, B. Sangolay, M. Dengler, M. Ostrowski, R. Kopte, P. Brandt, Boundary circulation and water mass variability off Angola, PIRATA/PREFACE/CLIVAR – TAV Meeting, 26. August, 2015, Cape Town, South Africa

Tchupalanga, P., M. Macuéria, M. Dengler, M. Ostrowski, R. Kopte, P. Brandt, Seasonal and interannual variability of the eastern boundary circulation and hydrography off Angola, EGU General Assembly, 25 April 2016, Vienna, Austria.

Poster

Rath, W., M. Dengler J. Lüdke, S. Schmidtke, M. Schlundt, P. Brandt, Seasonal cycle of the mixed-layer heat and freshwater budget in the eastern tropical Atlantic, EGU General Assembly, 25 April 2016, Vienna, Austria.

Kopte, R., P. Brandt, R. J. Greatbatch, M. Claus, Intraseasonal variability in the tropical Atlantic: Observations vs. reduced gravity simulations, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, 24.08.2015, Cape Town, South Africa.

TP 4

Publikationen

Ding, H., R. J. Greatbatch, M. Latif, W. Park, The impact of sea surface temperature bias on equatorial Atlantic interannual variability in partially coupled model experiments, *Geophysical Research Letters*, 42, 5540-5546, doi:10.1002/2015GL064799, 2015.

Ding, H., N. S. Keenlyside, M. Latif, W. Park, S. Wahl, The Impact of Mean State Errors on Equatorial Atlantic Interannual Variability in a Climate Model, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 120 (2), 1133-1151, doi:10.1002/2014JC010384, 2015.

Dippe, T., R.J. Greatbatch and H. Ding, 2016a: On the relationship between Atlantic Nino variability and ocean dynamics, *Climate Dynamics* (in Begutachtung).

Dippe, T., R.J. Greatbatch and H. Ding, 2016b: Seasonal Predictions of Equatorial Atlantic SST in a low-resolution CGCM with surface heat flux correction, *Geophys. Res. Lett.* (in Begutachtung).

Harlass, J., Tropical Atlantic bis dependence on atmospheric resolution, PhD Thesis, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 111 pp, 2016.

Harlass, J., M. Latif, W. Park, Improving Climate Model Simulation of Tropical Atlantic Sea Surface Temperature: The Importance of Enhanced Vertical Atmosphere Model Resolution, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2015GL063310, 2015.

Harlass, J., M. Latif, W. Park, Alleviating Tropical Atlantic Sector Biases in the Kiel Climate Model by Enhancing Horizontal and Vertical Atmosphere Model Resolution: Climatology and Interannual Variability, *Climate Dynamics* (in Begutachtung).

Latif, M., V. A. Semenov, W. Park, Super El Niños in response to global warming in a climate model, *Climatic Change*, 132 (4), 489-500, doi:10.1007/s10584-015-1439-6, 2015.

Steinig S., M. Latif, J. Harlass, W. Park Influence of tropical model biases on Sahel Rainfall in the Kiel Climate Model, *Climate Dynamics*, 2017 (in Bearbeitung).

Zhu, X., R. J. Greatbatch, and M. Claus, Interannual variability of tropical Pacific sea level from 1993 to 2014, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, doi:10.1002/2016JC012347, 2016.

Präsentationen

Dippe, T. and R. J. Greatbatch, Seasonal predictions of equatorial Atlantic SST in a low-resolution CGCM with surface Heat Flux Correction, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, November 2016, Paris, France.

Harlass, J., M. Latif, H. Ding, W. Park, Controls of Mean State and Impact of reducing SST bias on the the skill of hindcasts in the Equatorial Atlantic, General Assembly of PREFACE „Enhancing Prediction of Tropical Atlantic Climate and its Impacts“, Casablanca, Morocco, 29 Oct. 2014.

Harlass, J., M. Latif, W. Park, Enhanced vertical atmosphere resolution improves climate model simulation of tropical Atlantic SST and interannual variability, General Assembly 2016, Vienna, Austria, 16 Apr. 2015.

Latif M., H. Ding, R. J. Greatbatch, W. Park, Impact of sea surface temperature bias on equatorial Atlantic interannual variability in partially coupled model experiments, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, 24.08.2015, Cape Town, South Africa.

Poster

Dippe, T. and R. J. Greatbatch, Seasonal predictions of equatorial Atlantic SST in a low-resolution CGCM with surface Heat Flux Correction, EGU General Assembly, April 2016, Vienna, Austria.

Dippe, T. and R. J. Greatbatch, Reducing the SST Bias to improve the Representation of Atlantic Niño Variability and Dynamics, CLIVAR Open Science Conference, September 2016, Qingdao, China.

Dippe, T. and R. J. Greatbatch, Reducing the SST Bias to improve the Representation of Atlantic Niño Variability and Dynamics, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, November 2016, Paris, France.

Harlass, J., M. Latif, W. Park, Enhanced vertical atmosphere resolution improves climate model simulation of tropical Atlantic SST and variability, PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference, 24.08.2015, Cape Town, South Africa.

III. Erfolgskontrollbericht (nicht veröffentlicht)

III.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen (z.B. des Förderprogramms, ggf. unter Angabe des Schwerpunkts) soweit dies möglich ist

TP 1 Im Meeresforschungsprogramm des BMBF wird aufgezeigt, dass die Rolle des Ozeans als Teil des Klimasystems von großer Bedeutung ist und noch erhebliche Forschung erfordert. Beobachtungen der Tropischen Atlantischen Klimavariabilität sind ein Schwerpunkt der ozeanischen Komponente des Klimasystems. Damit leistet das TP1 einen wesentlichen Beitrag zu den Förderzielen des BMBF.

TP 4 In SACUS konnten wir zeigen, dass die Vorhersage im tropischen Atlantik auf saisonalen Zeitskalen möglich ist, jedoch nur wenn der SST Fehler genügend stark reduziert ist. Das Initialisierungsschema MODINI wurde ursprünglich im BMBF Projekt MiKlip für dekadische Klima Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes entwickelt. Es ist jedoch besonders für Initialisierung in tropischen Regionen geeignet. Des Weiteren konnte ein

wesentlicher Fortschritt in der Entwicklung gekoppelter Klimamodelle über speziell die vertikale Auflösung der Atmosphäre erreicht werden.

III.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

TP 1 Das TP1 ist ein Beobachtungsprogramm, das eng mit der Modellierung verknüpft ist. Es dient dem besseren Verständnis der Tropisch Atlantischen Klimavariabilität (TAV). Die jetzt vorliegenden Verankerungszeitserien, Wärme- und Frischwasserbudgets sind optimal zur Verifizierung von Modellsimulationen geeignet und unterstützen damit Aussagen über die Klimavariabilität und deren Vorhersagbarkeit, die aus den verschiedenen Modellsimulationen gewonnen wurden.

TP 4 Während unsere Modellsimulationen wenig Vorhersagbarkeit über die normale Vorhersagezeit hinaus besitzen, stellt die MODINI Methode einen erfolgreichen und simplen ersten Ansatz für saisonale Vorhersagen der Tropen dar. Die MODINI Initialisierungsmethode erlaubte es uns den Einfluss systematischer Modellfehler, wie den SST Fehler, auf die Vorhersagegüte zu untersuchen. Außerdem scheint die KCM Version mit hoher horizontaler und vertikaler Auflösung in der Atmosphärenkomponente geeignet zu sein, die saisonalen Vorhersagen im tropischen Atlantik und auf den angrenzenden Landregionen entscheidend zu verbessern.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des ZE brauchen nicht offenbart zu werden):

- Erfindungen/Schutzrechtanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten,
- Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale / wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt),
- Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u. a. einzubeziehen,
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.

TP 1 In TP1 wurde die Rolle des tropischen Ozeans für die Klimaschwankungen im atlantischen Raum quantifiziert. Diese Klimaschwankungen haben extreme sozio-ökonomische Auswirkungen insbesondere wegen ihres Einflusses auf marine Ökosysteme, Fischerei, Wasserressourcen, Landwirtschaft und Epidemien. Durch die Gewinnung verschiedener Datensätze und deren Verknüpfung mit Klimavorhersage- und Reanalysemodellen trägt dieses Vorhaben zur Einschätzung der Bedeutung der verschiedenen Datensätze für eine mögliche Klimavorhersage bei.

Ein wichtiger Aspekt innerhalb von TP1 ist der Ausbau der Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus den südwestafrikanischen Staaten sowie die Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Kapazitäten in den Partnerinstituten. Diese Vorhaben wurden durch mehrere Initiativen vorangetrieben. Zum Einen waren auf den großen Forschungsreisen in die SACUS Region jeweils Wissenschaftler der afrikanischen Partnerinstitute an Bord. Auf M98 nahmen neben drei Wissenschaftlern vom INIP, Angola auch zwei PhD Studenten aus Benin teil. Auch auf M120 unterstützten zwei Kollegen aus Angola die Arbeiten. Weiterhin diente die Reise M100/2 im Oktober/November 2013 dazu, den Austausch zwischen Studierenden aus Deutschland und der südafrikanischen Region zu vertiefen. An dieser Forschungsfahrt nahmen 9 Studenten aus Afrika teil. Vom 1. bis 8. Dezember 2014 wurde im südafrikanischen Kapstadt die Nansen-Tutu Sommerschule mit dem Titel „Ocean, Climate and Marine Ecosystem: A focus on the Agulhas Current, the Benguela Upwelling System and the tropical Atlantic“ abgehalten. Als Gastgeber fungierte das Nansen Tutu Center for Marine Environmental Research, neben SACUS traten EU-PREFACE, CLIVAR, die Nansen Scientific Society und das Nansen Tutu Center als Gastgeber auf. 32 Studenten aus Afrika und Europa hörten eine Reihe Vorlesungen von insgesamt 25 afrikanischen und europäischen Dozenten zu vielfältigen Fragestellungen welche u.a. den tropischen Atlantik, die Auftriebsregion des Benguela- und die Agulhas-Strömung betrafen. In nachmittäglichen Workshops wurden In-situ und Satellitendaten, sowie Modell- und Klimatologieprodukte analysiert und diskutiert. Die Sommerschule war insgesamt sehr erfolgreich und hilft die Beziehungen zwischen deutschen und afrikanischen Nachwuchswissenschaftlern und Wissenschaftlern nachhaltig zu verbessern (Abb. 13).



Abb. 13: Gruppenfoto aller Teilnehmer und Dozenten der Nansen-Tutu Sommerschule in Kapstadt, Südafrika im Dezember 2014.

Die Zusammenarbeit mit dem Partnerinstitut INIP in Angola konnte durch zwei mehrwöchige Aufenthalte von angolischen Kollegen am GEOMAR intensiviert und verbessert werden. Im August 2014 besuchten Pedro Tchivalanga und Marisa Macuéria vom INIP in Luanda, Angola das GEOMAR. Das erklärte Ziel des vier Wochen dauernden Aufenthalts, gemeinsam mit der

Analyse von schiffsbasierten ADCP-Daten des Forschungsschiffs EAF Nansen zu beginnen und die Gastwissenschaftler so perspektivisch in die Lage zu versetzen, die Analysen später auch selbst durchzuführen, wurde erreicht. Ferner wurde begonnen, zusammen mit den Gästen aus hydrographischen Messungen der EAF-Nansen-Fahrten in angolanischen Gewässern die Deckschichttiefe und der Wärmeinhalt der Deckschicht zu diagnostizieren. Während des Folgebesuchs von Pedro Tchivalanga, Marisa Macuéria und Paulo Coelho im November/Dezember 2015 wurden die 2014 in die Wege geleiteten Arbeiten ausgebaut und vertieft. Die Analyse des EAF-Nansen Datensatzes leistete wertvolle Unterstützung für eine erste gemeinsame Publikation (*Kopte et al., 2016*, in Begutachtung), weitere Publikationen sind in Vorbereitung.

TP 4

Die durchgeführten Arbeiten erlauben es, neue inter- und transdisziplinäre wissenschaftliche Fragestellungen zu bearbeiten, insbesondere was die marinen Ökosysteme in der Auftriebsregion vor Afrika betrifft. Hierzu zählen vor allem die Verfügbarkeit von Nährstoffen und der Fischfang. Die Modellverbesserungen werden außerdem die saisonalen bis dekadischen Vorhersagen in der Region entscheidend verbessern. Dies ermöglicht eine bessere Vorsorge für das Auftreten von Klimaextremen, etwa einer Dürre in der Sahelzone, wie auch bessere Projektionen des Klimas der Zukunft als Folge des anthropogenen Klimawandels. Die verbesserten kurz- und langfristigen Prognosen wären auch von ökonomischem Vorteil, da sich rechtzeitig Maßnahmen einleiten ließen.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die Arbeiten waren insgesamt sehr erfolgreich, und sind sowohl was die Beobachtungen, die Interpretationen, und auch weiterführende Analysen im Verbund mit Modellen anbelangt, weit fortgeschritten. Damit sind hier alle Arbeiten im Soll, und es gibt keine Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben. Im Zuge dieser Arbeiten haben sich interessante neue Ansätze ergeben, die weiterführend bearbeitet werden sollen.

III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z. B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)

Die Ergebnisse der Projektarbeiten werden in ‚peer reviewed‘ Fachzeitschriften veröffentlicht und sind auf internationalen Tagungen vorgestellt und diskutiert worden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse unterschiedlichen Nutzerkreisen innerhalb des Verbundes aber auch darüber hinaus einem größeren nationalen/internationalen Nutzerkreis präsentiert worden (in Form von Veröffentlichungen und Vorträgen). Um eine möglichst breite Nutzung zu gewährleisten, wurden und werden die Daten in der Pangaea Datenbank archiviert und damit frei zugänglich gemacht. Gerade die Modellergebnisse erlauben durch Animationen der Ergebnisse der hochauflösenden Modellierung Eingang in die vielfältigen Aktivitäten im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit.

III.6 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Der Zeit- und Finanzierungsplan konnte in seinen wesentlichen Teilen mit nur leichten Verschiebungen eingehalten werden. Die Methodik wurde den aktuellen Erfordernissen angepasst. Das gilt sowohl für Beschaffung von Verbrauchsmaterialien, Reise- und Expeditionskosten, als auch für die Personalmittel. Auch konnten die vorher definierten Meilensteine im erwarteten Umfang erreicht werden. Ausgaben wurden eingehalten. Verschiebung der Reisekosten gemäß Bedarf.

Verwertungsplan mit Zeithorizont

Zum Verwertungsplan gemäß Nr.9.2 NKBF98, die dem Zuwendungsbescheid zugrunde liegen, ist zur Ausübungs- und Verwertungspflicht eine Liste der Verwertungsmöglichkeiten mit zeitlichem Horizont dem Schlussbericht in folgender Form beizufügen:

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
TP 1 #1	Transportzeitreihe des Angolastroms bei 11°S: Verwertung für Modellvalidierung	Veröffentlicht in Kopte et al. 2016, weitere Analysen der verlängerten Zeitserie geplant und fließen direkt in SACUS II ein
TP 1 #2	Erstellung gemeinsames Datenbank von SACUS Daten und Daten der angolanischen Projektpartner in Bezug auf östliche Randstromvariabilität	Daten aus dem Bereich 10°S-12°S veröffentlicht in Pangaea Datenbank, Erweiterung geplant in SACUS II
TP 4 #1	KCM Modellrechnung mit MODINI Initialisierung	Die eigentliche Auswertung ist abgeschlossen, die Daten stehen aber für weitere Vergleiche mit zukünftigen Modellexperimenten zur Verfügung. Die Ergebnisse fließen direkt in die geplanten Untersuchungen in SACUS II ein.
TP 4 #2	KCM Modellrechnung mit unterschiedlicher horizontaler und vertikaler Modellauflösung	Die eigentliche Auswertung ist abgeschlossen, die Daten stehen aber für weitere Vergleiche mit zukünftigen Modellexperimenten zur Verfügung. Die Ergebnisse fließen direkt in die geplanten Untersuchungen in SACUS II ein.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel SACUS: Südwestafrikanisches Küstenauftriebssystem und Benguela Niños TP 1 Zusammenhang zwischen dem südostatlantischen Küstenauftriebsgebiet und dem äquatorialen Strömungssystem TP 4 Tropisches atlantisches Klima und Vorhersagbarkeit		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Torsten Kanzow Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Richard Greatbatch Prof. Dr. Mojib Latif	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2016	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.12.2016	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen *) 03G0837A	
	11. Seitenzahl 26	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	für	12. Literaturangaben 47
		14. Tabellen 1
		15. Abbildungen 13
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Das Verbundprojekt konzentrierte sich auf das Küstenauftriebsgebiet vor Südwestafrika, auf die lokal durch den Wind angetriebene Auftriebsvariabilität sowie den Einfluss von Wellenpropagation und Wassermassenausbreitung aus der äquatorialen Region, auf seine Reaktion auf den globalen Klimawandel und seinen Einfluss auf das regionale Klima. Diese Arbeiten zielten auf die physikalischen Mechanismen der regionalen Klimavariabilität und des Klimawandels mit ihrer großen Bedeutung für Biogeochemie des Ozeans, Sauerstoffarmut und marine Ökosysteme. Die Arbeitsgruppe des GEOMAR hat wesentlich zum ersten und vierten Teilprojekt des Vorhabens beigetragen. Im ersten Teilprojekt wurden physikalische und biogeochemische Beobachtungen im östlichen tropischen Südatlantik mit Hilfe von Verankerungen und Schiffsexpeditionen durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden zusammen mit Daten unserer angolanischen Projektpartner, Satelliten- und Reanalysedaten in Bezug auf die Rolle des Ozeans für tropische atlantische Klimavariabilität ausgewertet. Innerhalb des Projekts konnte erstmals die Stärke und die Variabilität des Angolastroms mit Hilfe von kontinuierlichen Verankerungsmessungen bestimmt werden. Im vierten Teilprojekt wurden gekoppelte Klimamodelle verbessert und deren Vorhersagemöglichkeiten getestet. Es konnte dabei ein Durchbruch bei der Reduzierung der Modellfehler erzielt werden.		
19. Schlagwörter Ozeanzirkulation, Küstenauftriebsgebiete, Östlicher tropischer Südatlantik, Klima		
20. Verlag	21. Preis	

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

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title SACUS: Southwest African Coastal Upwelling System and Benguela Niños TP 1 Connectivity of the southeast Atlantic coastal upwelling system to the equatorial current system TP 4 Tropical Atlantic climate and predictability		
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Peter Brandt Prof. Dr. Torsten Kanzow Prof. Dr. Martin Visbeck Prof. Dr. Richard Greatbatch Prof. Dr. Mojib Latif	5. end of project 2016/06/30	
	6. publication date 2016/12/31	
	7. form of publication Final Report	
8. performing organization(s) (name, address) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Düsternbrooker Weg 20 24105 Kiel	9. originator's report no.	
	10. reference no. 03G0837A	
	11. no. of pages 26	
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. no. of references 47	
	14. no. of tables 1	
	15. no. of figures 13	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The co-operative project concentrated on the coastal upwelling system off Southwest Africa, on the local variability of wind-forced upwelling as well as on the influence of wave propagation and water mass transport from the equatorial region, on its response to climate change, and its impact on rainfall of the region. It will address physical mechanisms of regional climate variability with profound impact on ocean biogeochemistry, hypoxia and marine ecosystems. We used dedicated observing systems, experiments at sea as well as various modeling approaches in order to study intraseasonal to long term changes of the southwest African coastal upwelling system and the overlying atmosphere to finally improve climate prediction for southern Africa. The working group at GEOMAR contributed significantly to subprojects 1 and 4 of the project. In the first subproject (TP 1) physical and biogeochemical observations in the eastern tropical South Atlantic were carried out from moorings and research vessels. The acquired data was analyzed together with historical and new data from our Angolan partners, with satellite and reanalysis data to understand the role of the ocean for tropical Atlantic climate variability. Within the project, for the first time, the strength and variability of the Angola current was determined with continuous moored observations. In the fourth subproject (TP 4) couple climate models were improved using different techniques and their predictive capabilities were tested. Great success was achieved in reducing long-standing tropical model biases.		
19. keywords Ocean circulation, coastal upwelling systems, Eastern Tropical South Atlantic, Climate		
20. publisher	21. price	