

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des BANINO Projektes war es, die Variabilität in der Auftriebsregion vor der südafrikanischen Küste besser zu verstehen, und die dafür relevanten Prozesse zu identifizieren, mit dem übergeordneten Ziel, die Vorhersagbarkeit von sogenannten Benguela Ninos, Warmwasserereignissen mit großen sozio-ökonomischen Folgen zu verbessern. Das TP3 war in dem einen Arbeitspaket dazu ausgelegt, die detaillierte Beschreibung des hydrographischen Ist-Zustandes und ihre saisonale sowie zwischenjährige Variabilität im verfügbaren Beobachtungszeitraum der Satelliten- und in situ Daten zu liefern. Die Auswertung und Analyse bestehender Satellitendaten in Verbindung mit in situ Daten und modellgestützter Simulationen diente der Untersuchung interannualer Variationen in der Untersuchungsregion. Hierzu werden verschiedene Fernerkundungsdatensätze gemeinsam ausgewertet, einschließlich Oberflächentemperatur (SST), Meeresoberflächenauslenkung (SSH), Chlorophyll und erstmals auch der Oberflächensalzgehalt (SSS), der eine genauere Kartierung der Kongoausstromfahne ermöglichte. Die Beobachtungsergebnisse stellten die Grundlage für die Validierung des hochauflösenden Ozeanzirkulationsmodells dar, dessen Analyse zum besseren Verständnis des Küstenauftriebs und des Austauschs von aufsteigendem, relativ kühlem Wasser mit dem offenen, oligotrophen Ozean verwendet wird. Weiterhin wurden in Klimamodell-Simulationen die Sensitivität der Ozean-Atmosphären-Wechselwirkungen auf Änderungen des mittleren Zustands des Südatlantiks, einschliesslich der Auftriebsregionen, untersucht.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Studie nutzte im Wesentlichen bereits existierende Satellitendatensätze und wertete diese neuartig gemeinsam mit Modellsimulationen aus. Hier sind besonders die Satelliten SMOS, Aquarius und SMAP zu nennen, die mit vorher nicht verfügbarer zeitlicher und räumlicher Auflösung Daten des Oberflächensalzgehaltes lieferten, die den Ausstrom des Kongowassers charakterisieren, der wiederum die Hydrographie der Küstenregion beeinflusst. Weiterhin werden seit kurzem bestehende Modelldaten innovativ genutzt werden, um die Dynamik der Hydrographie in der Küstenregion und ihre mögliche Prognose zu untersuchen. Beobachtungen wurden mit hochauflösenden Klimasimulationen verglichen, um Modellbiase zu identifizieren. Im Anschluss wurde untersucht inwieweit ein verbessertes SST Feld in dem Modell zu Änderungen besonders der Atmosphäre über Afrika führt und evt dort die Vorhersagbarkeit verbessert. Letzterer Teil verwendete die existierenden GECCO-3 Reanalysen ebenso wie bestehende Max-Planck Modell Ergebnisse.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Durch die gemeinsame Analyse von in situ Daten und den Oberflächenkarten wurde ein genaueres Verständnis vom mittleren Zustand des Auftriebsphänomens und dessen zwischenjährlicher bis dekadischer Variabilität geben. Daten verschiedener Quellen wurden synthetisiert, um die Prozesse zu verstehen, die im Austausch zwischen den Randregionen des südöstlichen Atlantischen Ozeans und dem offenen Atlantik eine Rolle spielen. Im Arbeitspaket 1 (WP1) werden hierzu Satellitendaten wie Meeresoberflächenauslenkung, Temperatur, Salzgehalt und Chlorophyll genutzt, um Karten der Oberflächencharakteristika und ihrer Korrelation untereinander zu erstellen. Ein Ziel hierbei war die Berechnung einer Salzgehaltsklimatologie sowie die Quantifizierung der zeitlichen Veränderung des SSS zu erstellen. Durch die Einbeziehung von in situ Daten wurde eine Darstellung des Ist-Zustandes und der Variabilität der Schichtung geliefert. Die Korrelation mit Daten der Meeresoberflächenauslenkung, Temperatur und Chlorophyll wurde genutzt, um einen Index für die Stärke des Auftriebs vor der südafrikanischen Küste zu erstellen.

Die Kombination mit Modelldaten einer hochauflösenden Simulation des Ozeans wurde genutzt werden, um die Prozesse zu identifizieren, die die Schichtung in der Küstenregion und damit die Vorbedingungen für den küstennahen Auftrieb bestimmen. Weiterhin wurde das hochauflösende Modell dazu beitragen, den Austausch zwischen dem Schelfmeer und dem offenen Ozean besser zu verstehen und zu quantifizieren. Im Vergleich mit in situ Daten wurde geprüft, inwieweit die Modellphysik realistisch ist, um die kartierte hydrographische Variabilität zu erklären.

Im WP2 wurden die Auswirkungen des detaillierten hydrographischen Zustandes des südöstlichen tropischen Atlantiks und der Variabilität der Benguela Niño Ereignisse auf die Vorhersagbarkeit von Klimavariationen über dem Afrikanischem Kontinent mittels eines Klimamodells untersucht. Das Verständnis dieser Vorhersagbarkeit ist essenziell für die Küstenregion Südafrikas in allen sozio-ökonomischen Aspekten. Dabei wurde auch der Einfluss der Auftriebsregion auf Klimasimulationen im Allgemeinen untersucht – regional und global - um zu verstehen, mit welchem Realitätsgrad Auftriebsregionen in Klimamodellen existieren müssen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Analysen des TP3 knüpften an die Arbeiten der Kieler Gruppe an.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im **TP 3** gab es eine intensive Zusammenarbeit der Kieler Beobachtungsgruppe (P. Brandt).

II. Eingehende Darstellung

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

Der Oberflächensalzgehalt (SSS) lag zu Anfang des Projektes aus einer Re-Prozessierung der SMOS Satellitendaten bis 2018 vor, die noch erhebliche Datenunsicherheit nahe der Küste aufwiesen. Parallel standen die Satellitendaten der Missionen Aquarius (2011 -2015) und SMAP (2015 bis heute) zur Verfügung, die zur Vervollständigung genutzt wurden. Der Oberflächensalzgehalt ist inzwischen als „essential climate variable“ (ECV) von der ESA CCI (Climate Change Initiative) deklariert. Das entsprechende ESA CCI+SSS Datenprodukt wurde September 2020 veröffentlicht, aber schon seit Ende 2019 für die Analysen verwendet. Dieses Produkt besteht aus einem mit den unterschiedlichen Fehlern gewichteten Mittel der einzelnen Satellitenfelder von SMOS, Aquarius und SMAP. Dieser Datensatz deckt die Periode von 2010 bis September 2020 ab. Eine Validation der satellitengestützten Daten mit in situ Daten nahe der Küste zeigten eine gute Übereinstimmung. Bestehende Unterschiede zwischen den in situ und satellitengestützten Daten können auf vertikal unterschiedliche Salzgehalte und auf horizontal unterschiedlich erfasste Salzgehalte zurückgeführt werden. Die Unterschiede im Messsystem sind dabei die Hauptursachen. Die Validierung der satellitengestützten Salzgehalte sowie deren jährliche und zwischenjährliche Variabilität mit in situ Daten wurde auch in Bezug auf Modellsimulationen und Reanalysen ausgeweitet. Die Ergebnisse sind in einer Studie veröffentlicht (Stammer et al., 2021).

Hier werden die zwischenjährlich unterschiedlichen Zustände der Oberflächenparameter kurz zusammengefasst: Neben niedrigen Salzgehalten an der Meeresoberfläche ist der Flussausstrom des Kongo auch durch gelöstes organisches Material (CDOM) sowie Trübung durch Sedimente und Schwebstoffe (suspended matter) charakterisiert. Die Identifizierung von Süßwasserfahnen basiert auf den optischen Eigenschaften der obersten Wassersäule. Die Messung per Satellit ist jedoch stark durch Wolkenbedeckung erschwert oder durch andere optische Wirkstoffe kontaminiert, die im ähnlichen Wellenbereich absorbieren, wie z. B. der Chlorophyll-a-Konzentration, die aus Auftriebsprozessen an der Küste resultiert (z.B. Hopkins et al., 2013). Für den Kongoflussausstrom überlagern sich die möglichen optischen Eigenschaften, sodass der Chlorophyll-a Gehalt (Chl-a) insbesondere nahe der Küste nur mit großen Unsicherheiten angegeben werden kann. Daher wird darauf verzichtet, die Absolutwerte des Chl-a in der Charakterisierung der Flusswasserfahne zu nutzen, da Angaben über die Jahresamplitude oder zwischenjährliche Schwankungen, i.e. Anomalien, sehr unsicher sind. Qualitativ kann jedoch die Chl-a Angabe genutzt werden, um die Anwesenheit des Flusswassers anzuzeigen. Hier wird die Nettoprimärproduktionsrate (NPP) genutzt, die für den Auftrieb relevante Größe. Es sind frei verfügbare Daten (<http://sites.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>). Die NPP basiert auf dem Eppley Vertically Generalized Production Model und nutzt vor allem MODIS Chlorophyll Daten aber auch die SST, die für die Photosynthese verfügbare Strahlung von Seawifs und Tiefenabschätzungen der euphotischen Zone (Behrenfeld and Falkowski, 1997).

Die unterschiedliche Verteilung der Flusswasserfahne ist in Abbildung 1 durch den geringen SSS und die erhöhten NPP Werte für die ersten Monate im Jahr gezeigt. Der SSS in 2010 ist noch durch die Messungenauigkeit des SMOS Satelliten in den ersten Monaten verunreinigt, was selbst bei der neuesten Re-Prozessierung nicht komplett verbessert werden konnte, die eindeutig geringen Salzgehalte werden allerdings durch hohe NPP Werte bestätigt, sodass hier eine Ausbreitung der Flusswasserfahne bis 2°E zu sehen ist. Für die unterlegten SST Anomalien konnte keine Korrelation mit dem geringen SSS oder dem erhöhten NPP nachgewiesen werden. Da die negative SST Anomalie nur einmal (in 2012) und positive Anomalien (in 2011, 2016 und 2019/2020) in unterschiedlicher Form und Phase auftraten, ist bei dem dafür zu kurzen Zeitintervall keine Zuordnung festzustellen. Diese Ergebnisse der zwischenjährlichen Unterschiede in der Ausbreitung des Flusswassers sowie die Beeinflussung der Schichtung sind als Publikation veröffentlicht (Martins and Stammer, 2022). Physikalische Gründe für das Auftreten einer warmen Anomalie in 2019, und ob das Flusswasser einen Einfluss darauf hatte, ist in einer Studie mit den Kieler Kollegen veröffentlicht (Kuongue et al., 2021). Die südwärtige Ausbreitung des geringen SSS entlang der Küste (Abb. 1) scheint mit dem Auftreten der oberflächennahen Küstenströmung in Zusammenhang zu stehen, dessen Variabilität durch die Küstenwellen bestimmt wird (Martins and Stammer, 2022).

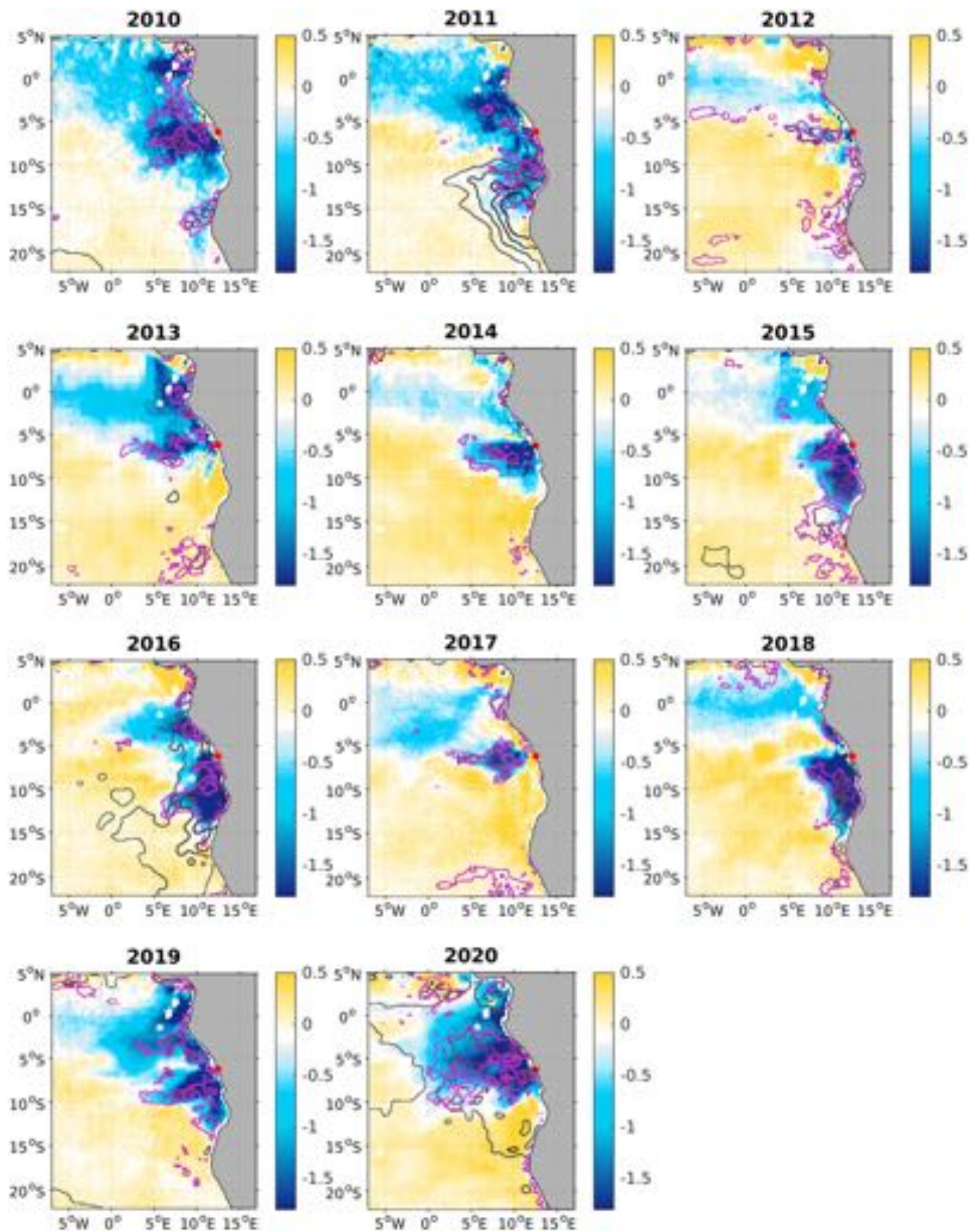


Abbildung 1: Verschiedene Oberflächenparameter gemittelt für die ersten Monate (JFM) des angegebenen Jahres: Die farbliche Schattierung zeigt die Abweichung der CCI+SSS Werte vom Langzeit-Mittel an (d.h. blau sind die negativen Salzgehaltsanomalien in den Anfangsmonaten des jeweiligen Jahres), pinkfarbene Konturen zeigen die Anomalie des NPP, und graue Konturen geben (nur) die positiven SST Anomalien an (zur Küste hin ansteigende Kontourwerte von 1.0, 1.5 und 2.0 °C).

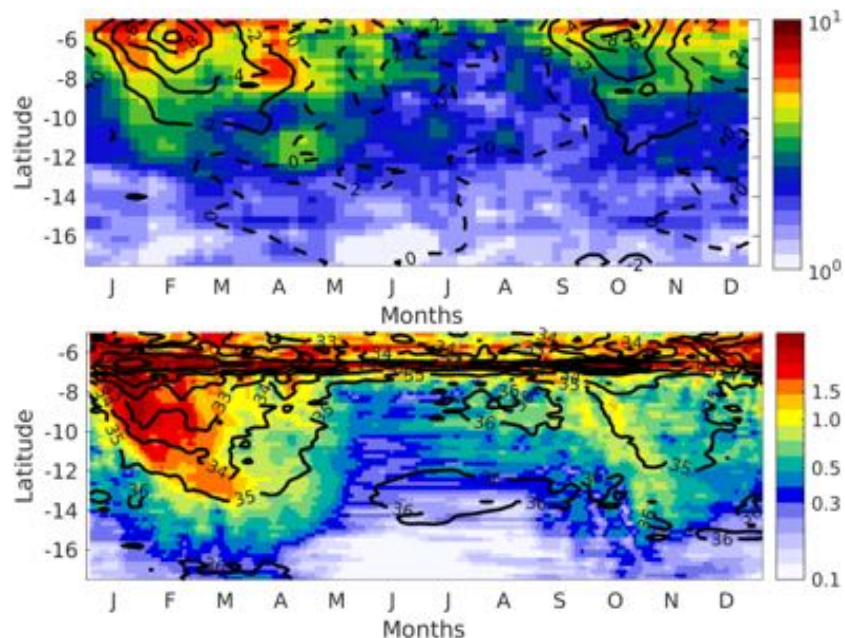


Abbildung 2: (a) Monatlich gemittelte, südwärtige, als schwarze durchgezogene und nordwärtige Geschwindigkeiten V (Oscardaten) als durchgezogene Konturen in cm/s innerhalb einer 100 km breiten Zone vor der afrikanischen Küste sowie die Variabilität $STD(V)$ als Farbe hinterlegt, wobei die Farbe in [0 bis 10] cm/s angegeben ist. (b) Monatlich gemittelter SSS (schwarze Konturen) innerhalb einer 100 km breiten Zone vor der afrikanischen Küste sowie die Variabilität $STD(SSS)$ als Farbe hinterlegt, wobei die Farbpalette logarithmisch ist.

Um den Einfluss des geringen Salzgehalts auf die Schichtung und Stabilität der Wassersäule zu bestimmen, wurden sämtliche in der Region zu findenden *in-situ* Profile auf Qualität geprüft und die Existenz und Dicke der Barrier Layer (BL) sowie das Stabilitätsprofil berechnet. Zusammenfassend ist zwar das sporadische Auftreten einer solchen Schicht gefunden worden, sie ist aber zeitlich nicht mit dem Vorhandensein der Frischwasserfahne des Kongoflussausstroms festzuschreiben. Auch die Stabilität der Schichtung ist durch den geringen Salzgehalt stärker, allerdings nicht besonders stark in der Phase größten Frischwasserausstroms. Entlang der Küste ist die Stabilität der Schichtung N^2 relevant für das Auftreten und die Stärke von internen Wellen, daher wurde dieses mit den *in situ* Profilen u.a. aus den Nansen Expeditionen berechnet. Abbildung 3 zeigt den mittleren Schnitt in einem Band entlang der Küste. Das mittlere N^2 Profil im Monat August, in dem Auftrieb und salzreiches Wasser vorherrschend sind, zeigt höhere Werte als im Monat März, in dem das salzarme Wasser nach Süden advehiert wird. Ein Vergleich mit Profilen, an dem der Salzgehalt konstant gehalten wurde, zeigt eine insgesamt geringere Stabilität. Mit vermehrtem Flussausstrom im März und damit einer salzarmen oberflächennahen Schicht zeigt der mittlere Schnitt höhere Stabilitätswerte in geringerer Tiefe nahe der Kongo Mündung, aber die Existenz der Flusswasserfahne hat augenscheinlich keine Relevanz für die Schichtung südlich von $8^\circ S$, im Gegenteil, zwischen $10^\circ S$ und $15^\circ S$ ist die Schichtung sogar stärker im August als im Februar. Eine Erklärung dafür ist die Advektion von Zentralwasser mit höherem Salzgehalt in der Tiefe der Sprungschicht.

Das hochauflösende Zirkulationsmodell (MITgcm) simuliert sowohl den mittleren Salzgehalt wie auch die Salzgehaltsvariabilität und damit die Beeinflussung der Hydrographie nur im verminderten Maß. Der SSS Bias der hochauflösenden Modellsimulation (4 km) weist einen zu geringen Salzgehalt südlich des Äquators auf (mit bis zu -1), während der SSS vor der Kongomündung sowie in der Bucht von Guinea zu hoch ist (bis zu +2, Abb. 4 links). Die Amplitude des Jahresgangs in einer Region vor der angolanschen Küste ($8^\circ E$ bis zur Küste, $10^\circ S$ bis $20^\circ S$) beträgt etwa 0.3 im Vergleich zu 1.8 in den Beobachtungen. Somit spielt die Auswirkung der SSS Variabilität auf die Hydrographie im Modell nur eine untergeordnete Rolle.

Die Modellsimulationen geben auch den saisonalen Auftrieb vor der südafrikanischen Küste, südlich von $17^\circ S$ in etwas abgeschwächter Form im Vergleich zu SST Daten aus den Satellitenbeobachtungen wieder. Dazu ist als Auftriebsindex der mittlere zonale Temperaturgradient auf 500 km von der Küste in Abbildung 5 gezeigt. Auch die Variabilität des Auftriebs ist geringer als in Beobachtungen. Die geographische Breite des Auftriebs wird von beiden Modellversionen gut wiedergegeben, allerdings ist der Jahresgang im Modell zu schwach. Vor Angola ($5^\circ S$ bis $17^\circ S$) zeigen die Satellitendaten einen halbjährli-

chen Zyklus, mit einem stärkeren Auftrieb im August und einer Phase schwächeren Auftriebs im Dezember, was nur von der Modellversion mit 4 km Auflösung in einem ähnlichen, aber kleineren Breitenbereich (zwischen 5°S und 8°S) wiedergeben wird. Insgesamt ist der Küstenauftrieb zu schwach und in der 8 km Version kaum vorhanden. Demgegenüber sind die Phasen des „downwelling“ entlang der afrikanischen Küste nördlich der ABF und am Äquator im Oktober insgesamt zu stark. Die Standardabweichungen des Temperaturgradienten sind insgesamt geringer als in den Beobachtungen, nur das 4 km auflösende Modell reicht an die Variabilität in den Beobachtungen heran, allerdings nur südlich von 15°S.

Die zwischenjährlichen Schwankungen des zonalen Temperaturgradienten vor der südafrikanischen Küste sind in Abbildung 6 dargestellt. Es ist die Periode der Modelldaten der hochauflösenden Version gezeigt (2003 bis 2011), in der leider keine nennenswerten warmen Anomalien im Auftrieb auftraten. Etwas schwächerer Auftrieb wird im Jahr 2007 angezeigt, was die 4 km Version ebenfalls simuliert. Allerdings spiegelt sich die warme Anomalie in 2011 (Abbildung 7) nicht als schwächerer Auftrieb bzw. als erhöhter Temperaturgradient wider. Dazu war die Anomalie räumlich zu groß (größer als 500 km).

Die mit der jeweiligen SST Variabilität standardisierte Anomalie der SST wiederum zeigt einen ähnlichen Verlauf der zwischenjährlichen Anomalien der SST in der o.g. Region vor der afrikanischen Küste. In Abbildung 7 sind die zwischenjährlichen SST Anomalien des 8 km Modells für verschiedene Breitenbereiche im Vergleich zur SST aus den Satellitendaten gezeigt, jeweils versetzt um 2°C. Auch die standardisierten Anomalien des MITgcm mit 4 km Auflösung geben den Verlauf der SST Anomalien aus den Satelliten gut wieder, sie sind hier nicht mit eingezeichnet, da das hochauflösende Modell nur für die Jahre 2003 bis 2011 vorlag, in der keine nennenswerte warme Anomalie auftrat. Insgesamt scheint das MITgcm den Verlauf der SST Anomalien gut zu simulieren, allerdings ohne Einfluss auf den Auftrieb zu haben.

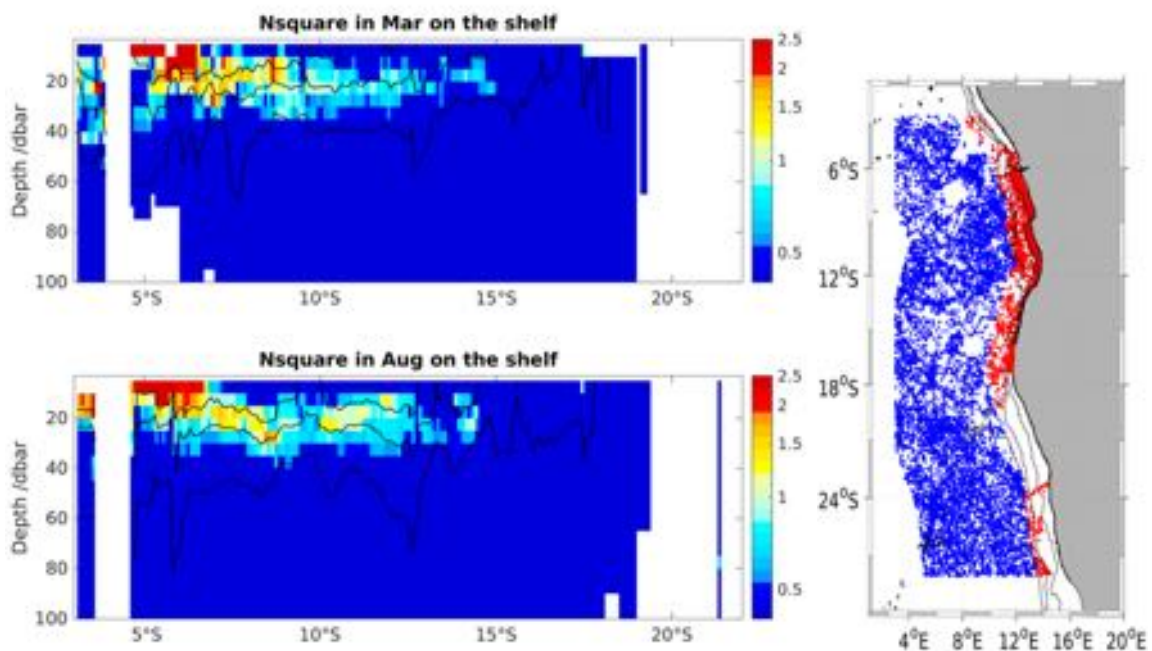


Abbildung 3: Mittlere Schichtung (N^2) entlang der afrikanischen Küste, für die Monate März (oben) und August (unten) in den Jahren 1995 bis 2014. Die Positionen der verfügbaren CTD- und Argo Profile von 1995 bis 2020 sind im Abstand von 200 km in rot (shelf region) und 2000 km von der Küste in blau rechts auf der Karte dargestellt.

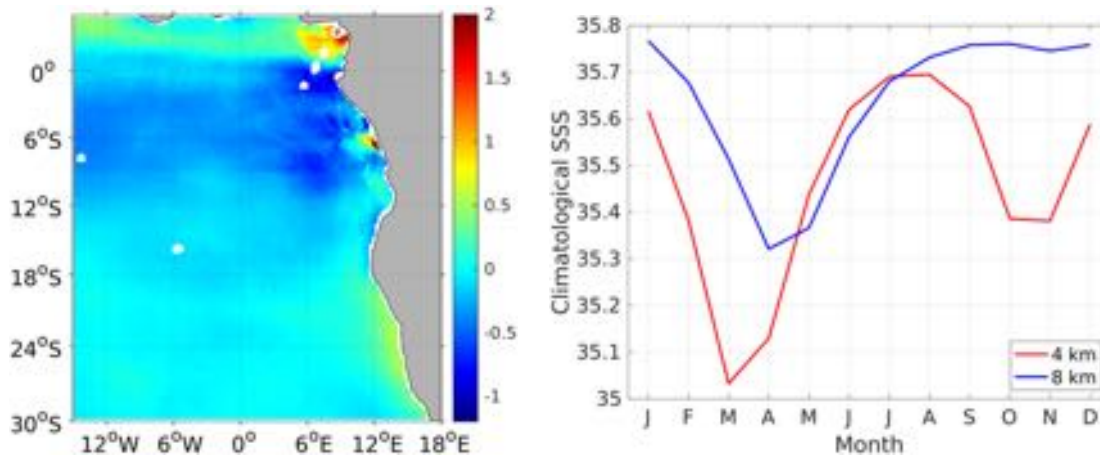


Abbildung 4: Links: Mittlere Abweichung des obersten Salzgehalts aus dem hochauflösenden Modell (MITgcm 4km) gegenüber den Satellitendaten (ESA CCI+SSS). Rechts: Mittlerer Jahresgang des SSS vor der angolanischen Küste aus dem MITgcm mit 8 km und mit 4 km Auslösung.

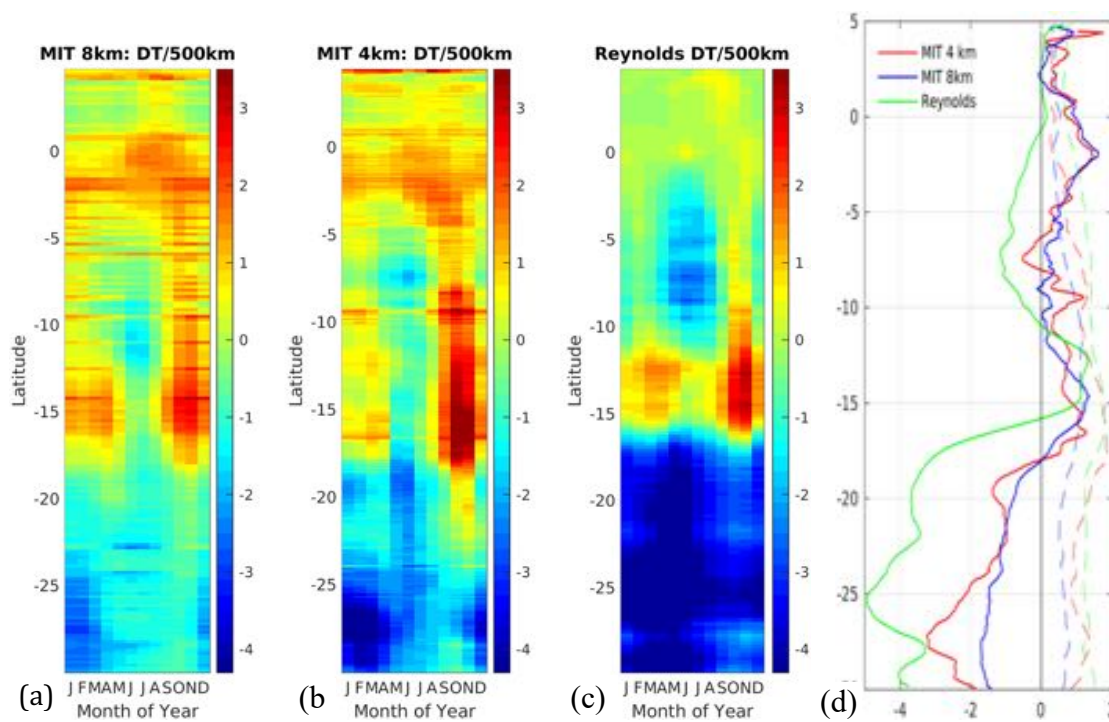


Abbildung 5: Auftriebsstärke vor der afrikanischen Küste im mittleren Jahresgang: Maß ist der zonale Temperaturgradient zwischen der Küste und in 500 km Abstand (DT/500 km) im hochauflösenden Modell (MITgcm) in 8 km Auflösung (a), 4 km Auflösung (b), und im OISST Reynolds Datensatz (c). Mittlerer Temperaturgradienten sind als durchgezogene, und Variabilität (Standardabweichungen) als gestrichelte Linien dargestellt und farblich in der Legende gekennzeichnet (d).

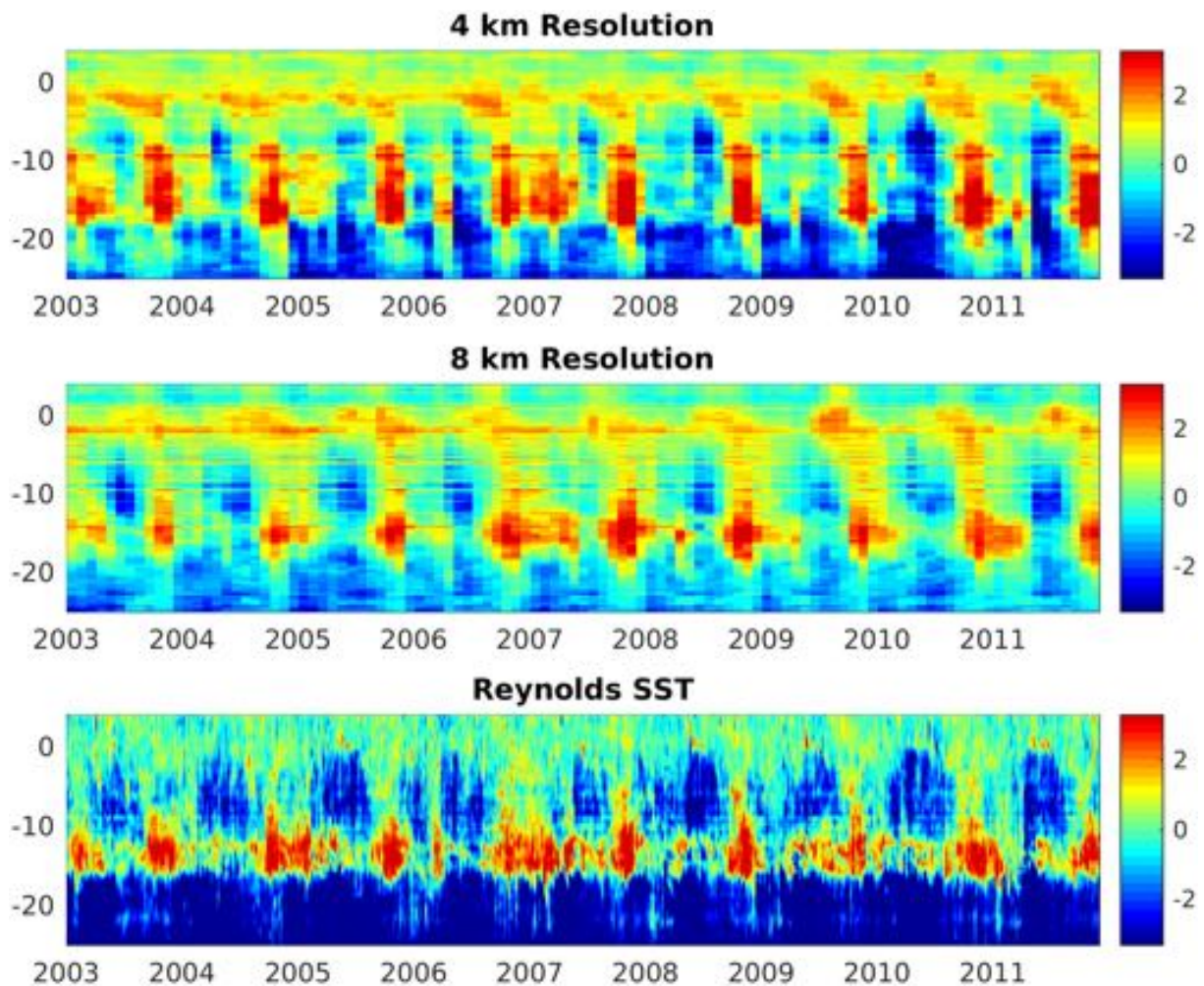


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf des zonalen Temperaturgradienten über 500 km vor der südafrikanischen Küste im MITgcm mit 4 km (oben) und 8 km (Mitte) Auflösung sowie aus Satellitendaten (unten) über die Periode der Verfügbarkeit der hochauflösenden Modelldaten 2003 bis 2011. Die Farbskala zeigt Temperaturabweichungen in °C an.

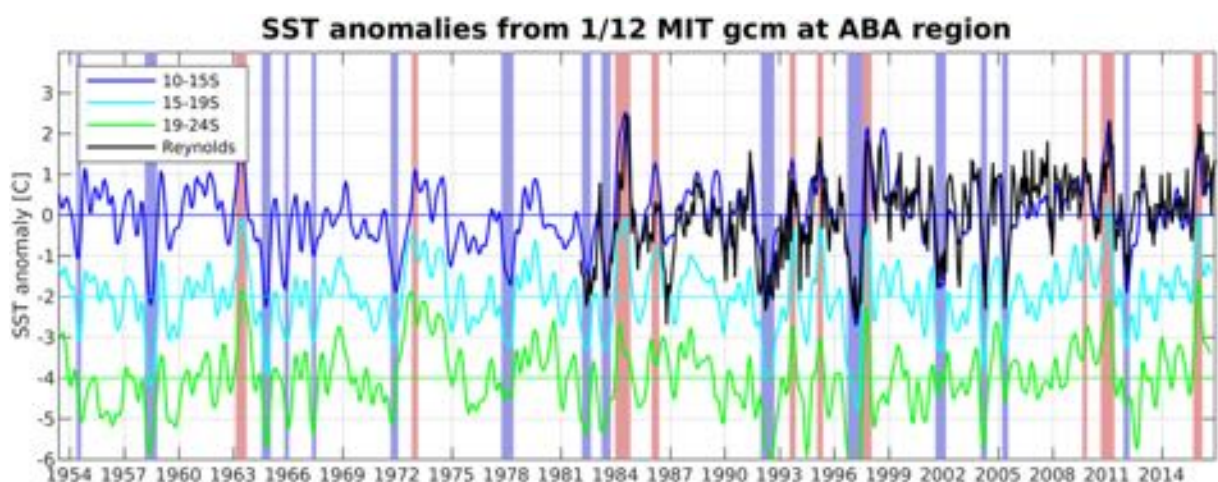


Abbildung 7: Mit der Standardabweichung standardisierte SST Anomalien in 3 verschiedenen Breitenbereichen vor der südafrikanischen Küste aus dem langjährigen MITgcm im Vergleich zu den SST Anomalien aus den Satellitendaten.

WP2:

Bisher haben alle Klimamodelle Schwierigkeiten, Auftriebsregionen und deren Variationen richtig aufzulösen. Um die Sensitivität der Vorhersagefähigkeit eines Klimamodells auf interannueller bis dekadischer Zeitskala auf Details bzw die Realität des SST-Musters im Modell hin zu untersuchen, wurde in einem zweiten Work Package das in WP 1 analysierte SST-Muster dazu verwendet, das gekoppelte MPI/OM-Klimamodell in seiner Fähigkeit verbessert beobachtete Variationen zu simulieren. Hierzu wurde eine bestehende Version des MPI/OM-Klimamodells, wie es in dem Deutschen MiKLIP Projekt zur dekadischen Vorhersage (Marotzke et al., 2016) bereits in der Arbeitsgruppe verwendet wurde, so modifiziert, dass beobachtete SST Felder so vorgeschrieben werden, dass das Modell dynamisch frei darauf reagieren kann. Auf diese Weise lässt sich der Einfluss der SST in der Benguela-Auftriebsregion auf Klimasimulationen, z. B. über Afrika, quantifizieren.

Das verwendete Modell basierte auf der MPI-ESM Version 1.2. Simulationen werden mit hoher räumlicher Auflösung gerechnet. Die atmosphärische Komponente von MPI-ESM ist ECHAM6.3 (Stevens et al., 2013), war mit einer Auflösung von 100 km konfiguriert. Die ozeanische Komponente MPI/OM (Junghaus et al., 2013) war mit 40 km horizontal und mit 40 Schichten in der Vertikalen konfiguriert, wobei 20 Schichten auf die oberen 700 m entfallen, implementiert. Die durchgeführten Experimente werden es ermöglichen, die potenziellen Auswirkungen dieser Merkmale auf Klimamodellsimulationen und Vorhersagen zu quantifizieren. Unsere Studien erlaubten auch, Rückkopplungsmechanismen besser zu verstehen, die sich aus Änderungen von Eigenschaften in den Auftriebsregionen ergeben, wie z. B. Änderungen des SST-Musters und ihrer Amplituden. Potenziell konnten diese Veränderungen Küstenjets sowohl in der Atmosphäre als auch im Meer verändern. Die durchgeführten Modell-Läufe gaben Aufschluss darüber, in welche Richtung diese Veränderungen zu erwarten sind und wie die Vorhersagbarkeit in der Auftriebsregion und über dem afrikanischen Kontinent beeinflusst werden könnte.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft mittlere Zustandsabweichungen des AGCM-Laufs (links) und Unterschiede zwischen AGCM-Lauf und MPI-ESM-HR (Mitte) und MPI-ESM-XR (rechts). Hierbei sind in der erste Reihe gezeigt: Lufttemperatur (Schattierung, in C), Niederschlag (Konturlinien, in 1 mm/Tag-Schritten, +/- in Rot/Blau), und Wind (Pfeile, in m/s). In der zweite Reihe sind dargestellt: Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmefluss (Konturlinien in 10 W/m²-Schritten, +/- in rot/blau), horizontaler Feuchtigkeitsfluss (Pfeile, in kg/ms). Die dritte Reihe zeigt schliesslich: thermodynamische und dynamische (vierte Reihe) Komponente der Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung) und horizontaler Feuchtigkeitsfluss (Pfeile). Biases sind klar zu erkennen, denen Einfluss auf Vorhersagbarkeit untersucht werden sollen.

Abbildung 9 zeigt den mittleren Jahrgang (gemittelt von 1980-2014) der AGCM-Unterschiede zu MPI-ESM-HR (links) und MPI-ESM-XR (rechts) gemittelt entlang Breitengraden zwischen 40°W und 40°O. Zu sehen sind in der erste Reihe: Lufttemperatur (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, Schritte von 1 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Die zweite Reihe zeigt: Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmefluss (Höhenlinien in 10 W/m²-Schritten, +/- in rot/blau), horizontaler Feuchtigkeitsfluss (Pfeile, in kg/ms).

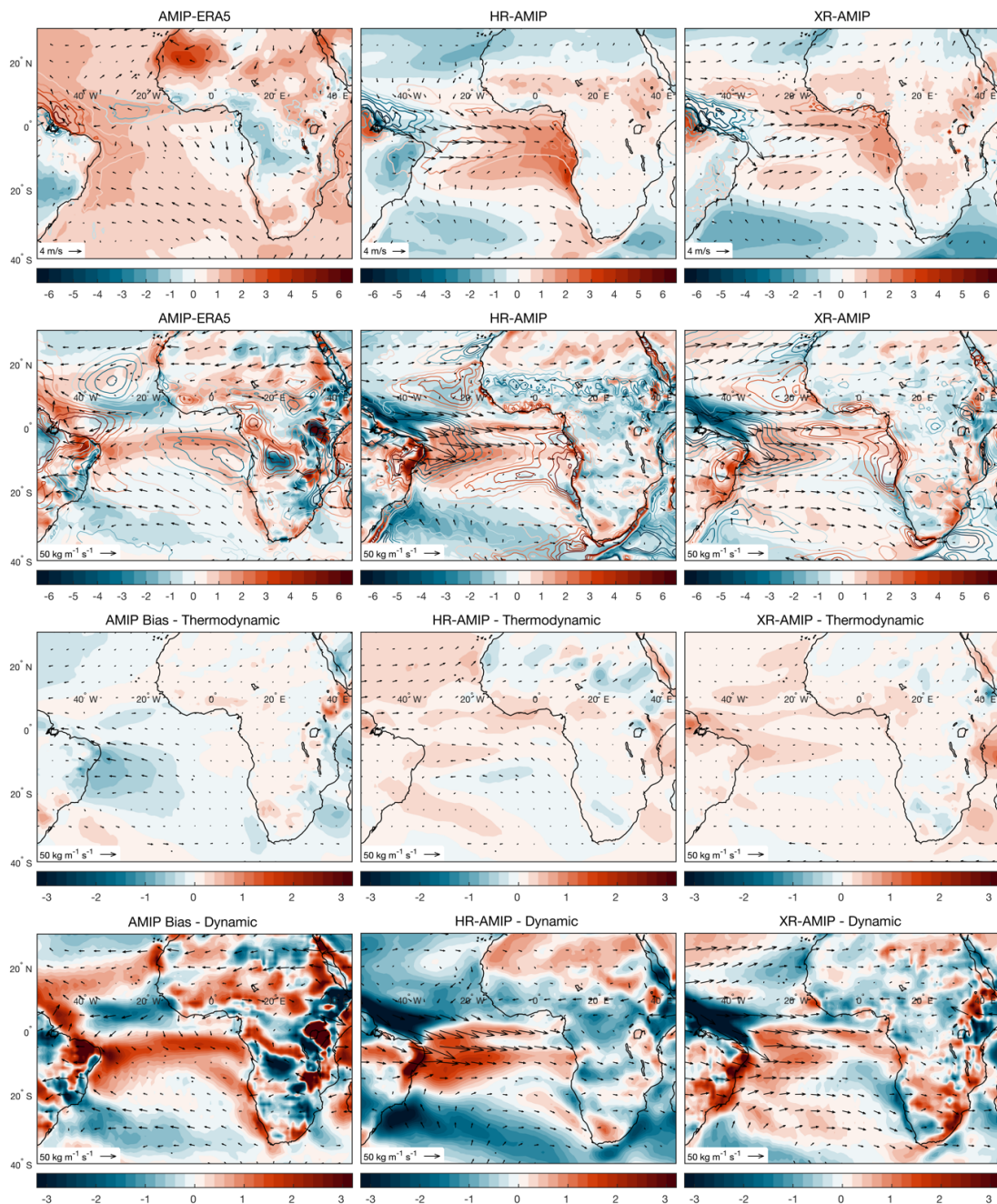


Abbildung 8: Mittlere Zustandsabweichungen des AGCM-Laufs (links) und Unterschiede zwischen AGCM-Lauf und MPI-ESM-HR (Mitte) und MPI-ESM-XR (rechts). Erste Reihe: Lufttemperatur (Schattierung, in C), Niederschlag (Konturlinien, in 1 mm/Tag-Schritten, +/- in Rot/Blau), Wind (Pfeile, in m/s). Zweite Reihe: Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmestrom (Höhenlinien in 10 W/m²-Schritten, +/- in rot/blau), horizontaler Feuchtigkeitsstrom (Pfeile, in kg/ms). Dritte Reihe: thermodynamische und dynamische (vierte Reihe) Komponente der Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung) und horizontaler Feuchtigkeitsfluss (Pfeilreihen).

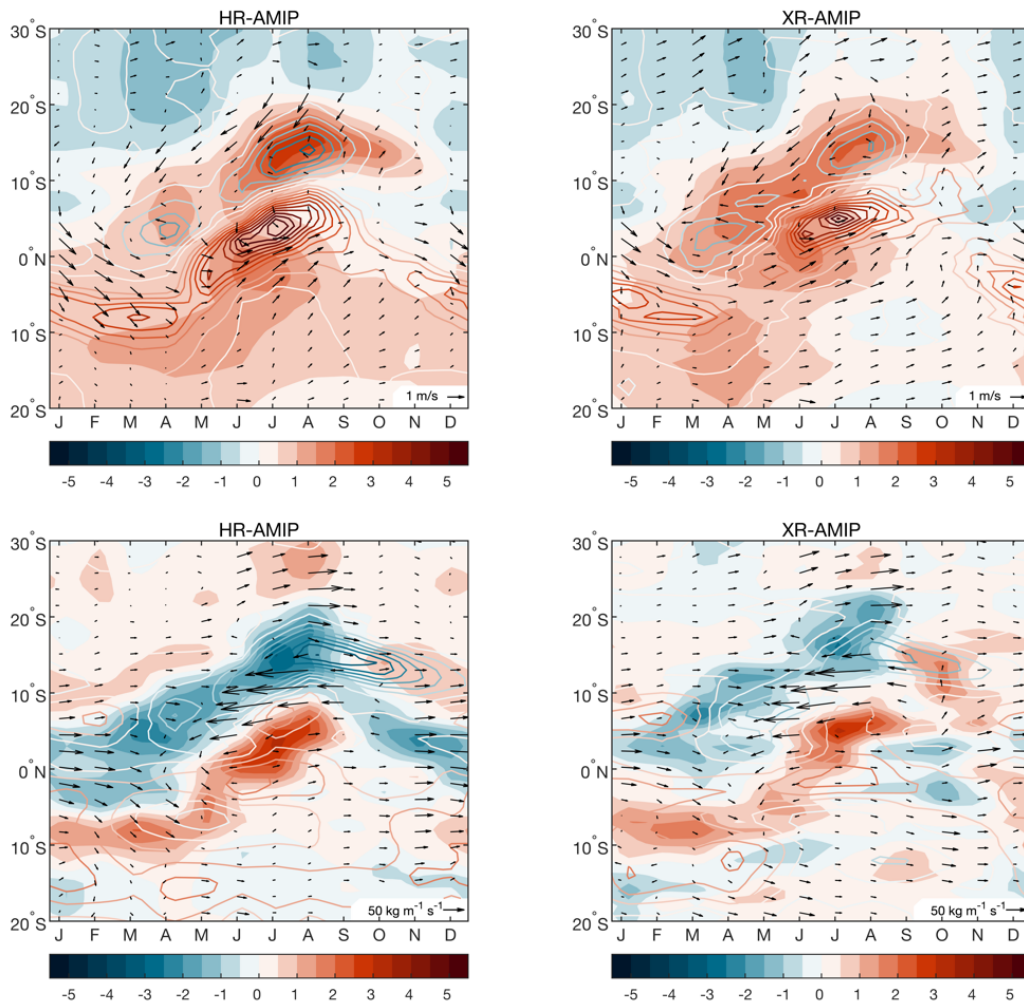


Abbildung 9: Jährlicher Zyklus (gemittelt von 1980-2014) der AGCM-Unterschiede zu MPI-ESM-HR (links) und MPI-ESM-XR (rechts) gemittelt entlang Breitengraden zwischen 40°W und 40°O. Erste Reihe: Lufttemperatur (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, Schritte von 1 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Zweite Reihe: Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmestrom (Höhenlinien in 10 W/m²-Schritten, +/- in rot/blau), horizontaler Feuchtigkeitsstrom (Pfeile, in kg/ms).

Die im gekoppelten Erdsystemmodell MPI-ESM 1.2-HR zu warm dargestellten Meeresoberflächentemperaturen entlang der westafrikanischen Küste (SST Bias) zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Vorgänger Modell MPI-ESM 1-MR mit geringerer horizontaler Auflösung der Atmosphäre. Besonders im Bereich des Benguela Auftriebsgebiets weichen die Oberflächen-temperaturen sehr viel weniger stark von denen des OISST Produkts (aus Infrarot- und Mikrowellen Satelliten Messungen) ab. Saisonal betrachtet ist der Fehler am größten im späten Herbst und frühen Winter der Südhemisphäre, wenn der Auftrieb in den betroffenen Gebieten am stärksten sein sollte. Die höhere Auflösung der neueren Modellversion lässt eine genauere Darstellung der küstennahen Winde zu, die weit genug von der Küste entfernt sind, um durch Ekman Pumping generierten Auftrieb abzubilden. Dies geht mit der Reduktion des SST Bias in der betreffenden Region einher. Der negative Bias des meridionalen Windes im östlichen Äquatorbereich und vor der Küste von Angola bleibt bestehen. Vor der Küste von Angola, wo Upwelling hauptsächlich durch küstenparallelen Wind näher an der Küste und Küsten-Kelvinwellen generiert wird, bleibt die Darstellung im Modell ungenügend und entsprechend der SST Bias bestehen. Der negative Bias des zonalen Windes im westlichen Äquatorbereich steht im Zusammenhang mit zu hohem Niederschlag südlich des Äquators und der saisonalen und räumlichen Verschiebung der äquatorialen Kaltzunge nach Westen, wodurch der SST Bias im äquatorialen Ostatlantik wiederum verstärkt wird. Ein Modelllauf mit beobachteten Meeresoberflächentemperaturen soll darüber Aufschluss geben, wie stark der SST Bias die Vorhersage von klimarelevanten Größen beeinflusst.

Im oberen Teil zeigt Abbildung 10 den mittleren Zustand [1999-2009] der meridionalen Windspannung im westlichen Südatlantik in ERA-5, MPI-ESM-HR, MPI-ESM-XR und MPI-ESM-ER (von links nach rechts) in N/m². Unten: Entsprechende Ekman-Auftriebsgeschwindigkeit in cm/Tag. Abbildung 11 zeigt den mittlere Auftriebsindizes [1999-2009]: Coastal SST Gradient entlang der äquatorialen Atlantik- und Südatlantik-Ostgrenze (oben), Ekman Pumping (Mitte) und Longshore Ekman Transport (unten) entlang der Atlantik-Ostgrenze.

Gezeigt in Abbildung 12 sind Komposit aus kalten SST-Anomalien [1982-2014] während der Auftriebs-saison im Juli/August entlang der Küste Angolas (7-16°S). Erste Reihe: Anomalien während der vorausgehenden Downwelling-Saison im März/April SST (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, in Schritten von 0,2 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Zweite Reihe: wie erste Reihe, jedoch für Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung in mm/Tag), latenter Wärmestrom (Höhenlinien, in Schritten von 20 W/m², +/- in rot/blau) und horizontaler Feuchtigkeitsstrom (Pfeile, in kg/ms). Dritte und vierte Reihe wie erste und zweite Reihe, jedoch für Anomalien während der entsprechenden Auftriebssaison im Juli/August. Abbildung 13: Wie in Abbildung 3.10, aber für warme SST-Anomalien während der Auftriebssaison im Juli/August.

Schlisslich zeigt Abbildung 14 eine Zusammensetzung von Benguela-Niño-Ereignissen für Daten von OISST/ERA-5 (links), AGCM (Mitte) und MPI-ESM-HR GECCO3-Lauf (rechts). Oben: Anomalien (ge-mittelt von Februar bis September) von SST (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, in Schrit-ten von 0,2 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Unten: konvergierende Feuchtigkeit (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmestrom (Höhenlinien, in Schritten von 10 W/m², +/- in rot/blau) und horizontaler Feuchtigkeitsstrom (Pfeile, in kg/ms). Beachten Sie die unterschiedlichen Skalen für die Feuchtigkeitsfluss-Referenzpfeile.

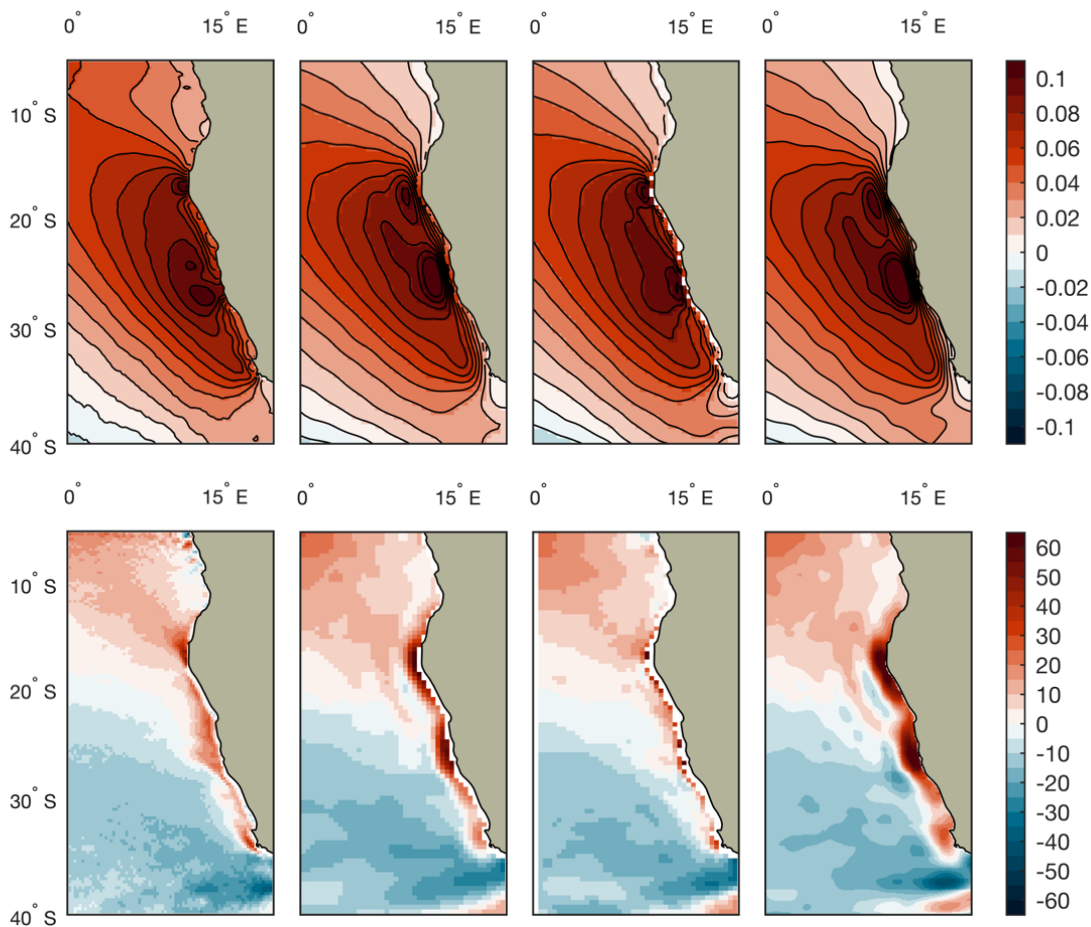


Abbildung 10: Oben: Mittlerer Zustand [1999-2009] der meridionalen Windspannung im westlichen Südatlantik in ERA-5, MPI-ESM-HR, MPI-ESM-XR und MPI-ESM-ER (von links nach rechts) in N/m². Unten: Entsprechende Ek-man-Auftriebsgeschwindigkeit in cm/Tag

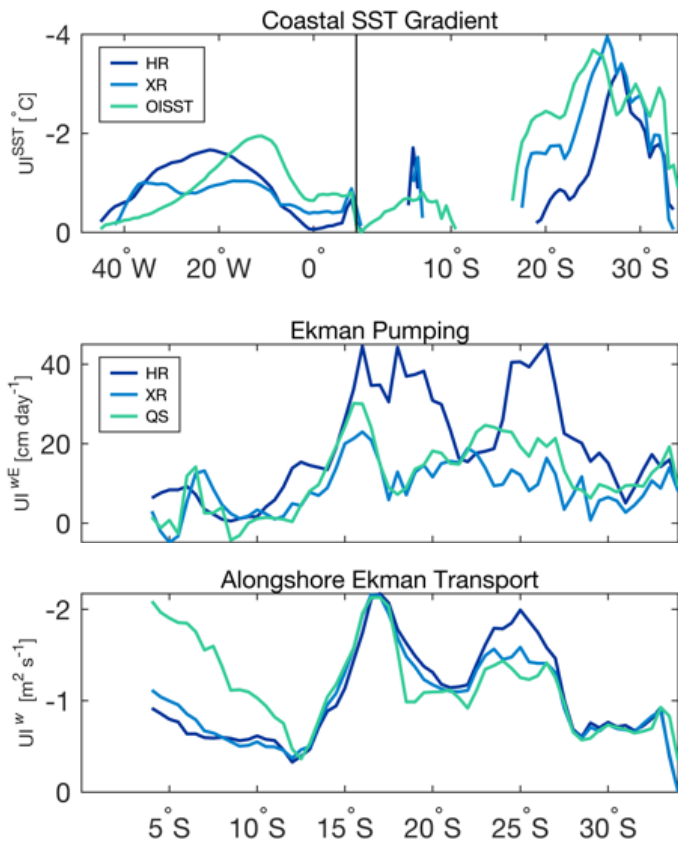


Abbildung 11: Mittlere Auftriebsindizes [1999-2009]: Coastal SST Gradient entlang der äquatorialen Atlantik- und Südatlantik-Ostgrenze (oben), Ekman Pumping (Mitte) und Longshore Ekman Transport (unten) entlang der Atlantik-Ostgrenze.

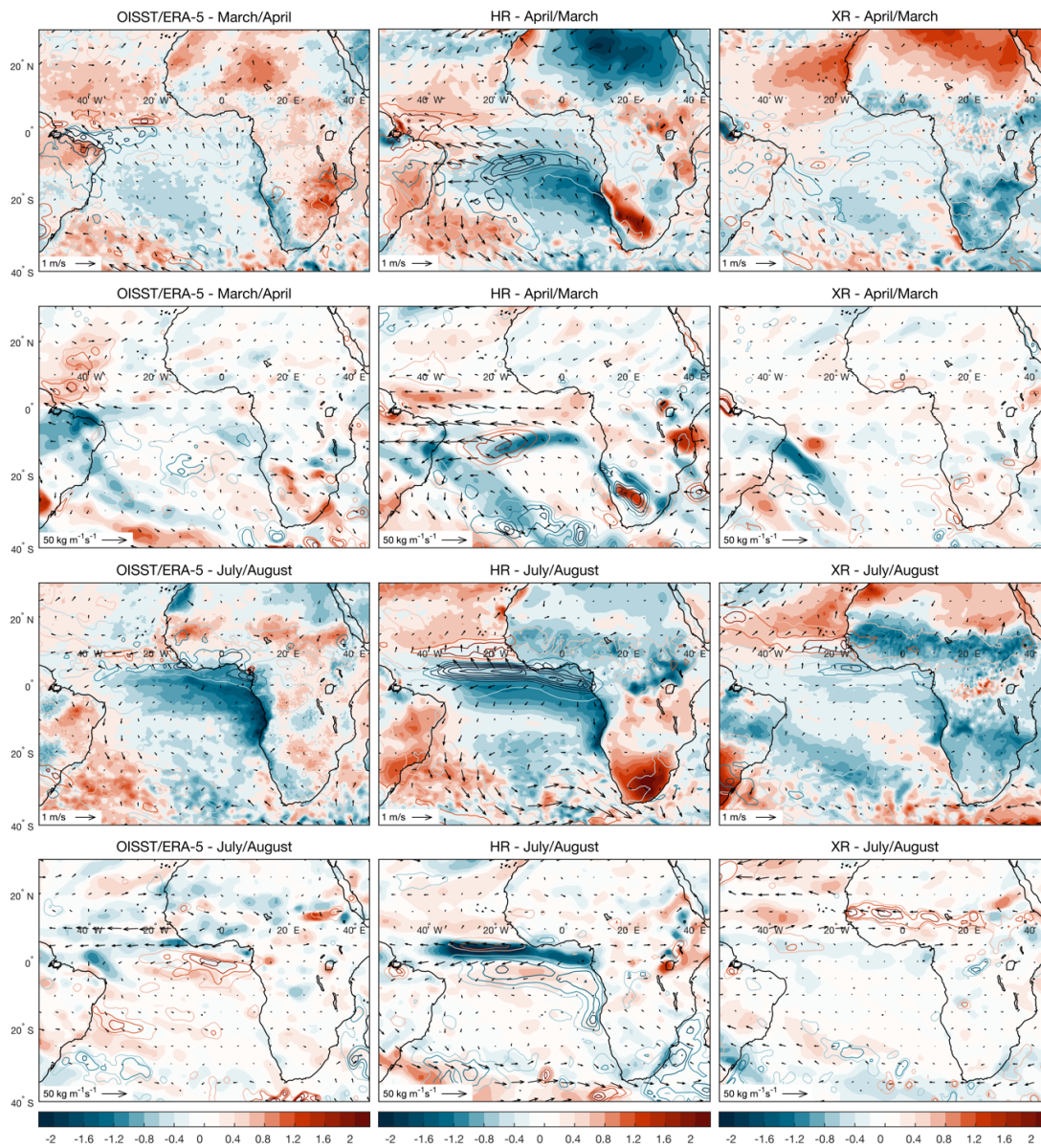


Abbildung 12: Komposit aus kalten SST-Anomalien [1982-2014] während der Auftriebssaison im Juli/August entlang der Küste Angolas (7-16°S). Erste Reihe: Anomalien während der vorausgehenden Downwelling-Saison im März/April SST (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, in Schritten von 0,2 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Zweite Reihe: wie erste Reihe, jedoch für Feuchtigkeitskonvergenz (Schattierung in mm/Tag), latenter Wärmefluss (Höhenlinien, in Schritten von 20 W/m², +/- in rot/blau) und horizontaler Feuchtigkeitsfluss (Pfeile, in kg/ms). Dritte und vierte Reihe wie erste und zweite Reihe, jedoch für Anomalien während der entsprechenden Auftriebssaison im Juli/August.

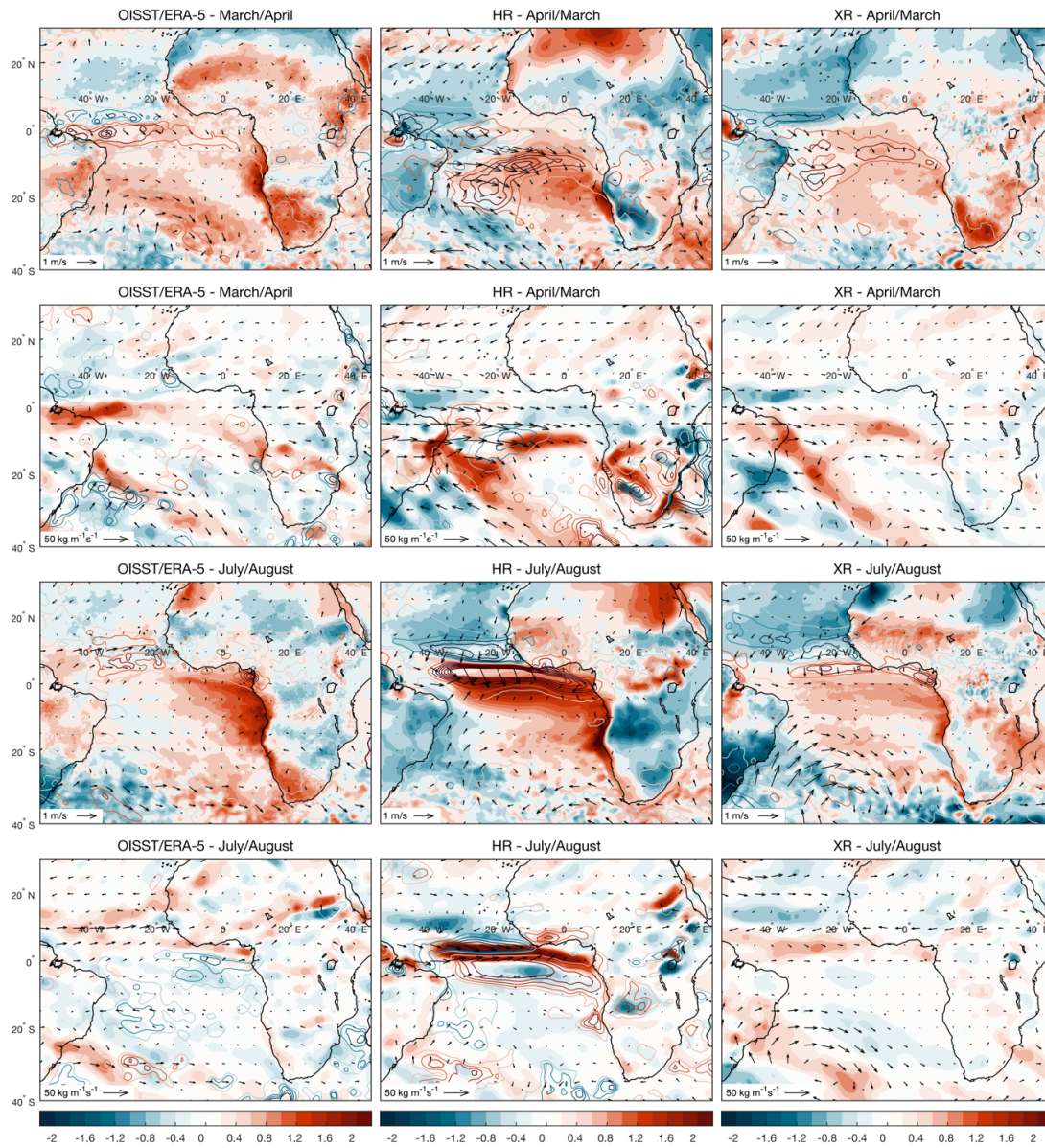


Abbildung 13: Wie in Abbildung 3.10, aber für warme SST-Anomalien während der Auftriebssaison im Juli/August.

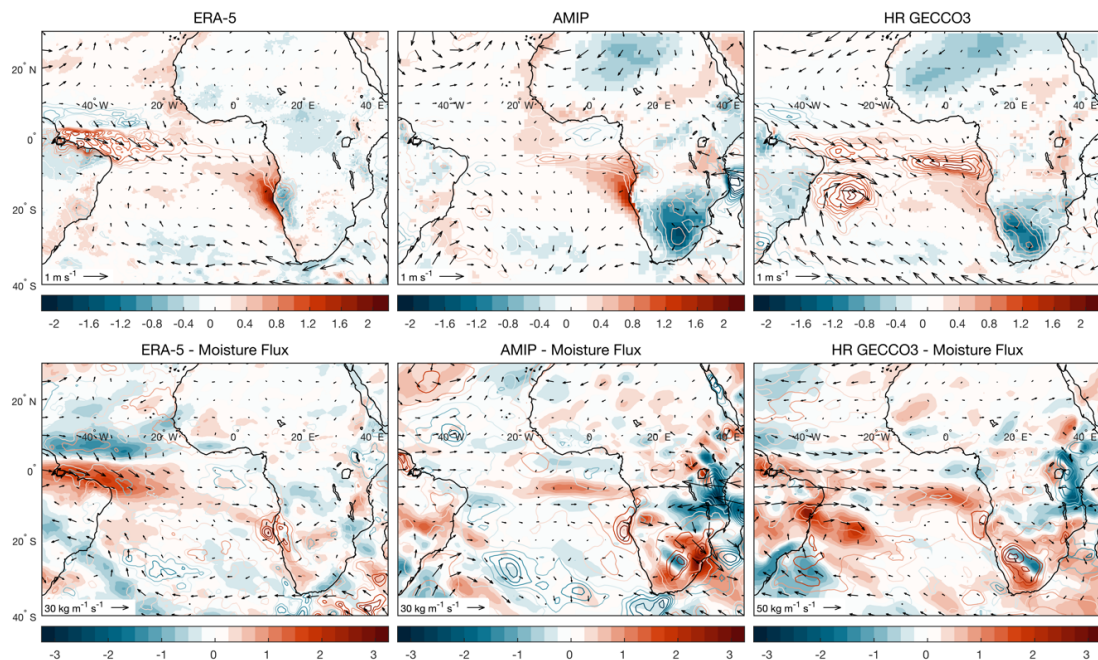


Abbildung 14: Zusammensetzung von Benguela-Niño-Ereignissen für Daten von OISST/ERA-5 (links), AGCM (Mitte) und MPI-ESM-HR GECCO3-Lauf (rechts). Oben: Anomalien (gemittelt von Februar bis September) von SST (Schattierung, in °C), Niederschlag (Höhenlinien, in Schritten von 0,2 mm/Tag, +/- in Rot/Blau) und Wind (Pfeile, in m/s). Unten: konvergierende Feuchtigkeit (Schattierung, in mm/Tag), latenter Wärmestrom (Höhenlinien, in Schritten von 10 W/m², +/- in rot/blau) und horizontaler Feuchtigkeitsstrom (Pfeile, in kg/ms). Beachten Sie die unterschiedlichen Skalen für die Feuchtigkeitsfluss-Referenzpfeile.

Literaturangaben

Behrenfeld, MJ, PG Falkowski,: [Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration](#), *Limnology and Oceanography*, **1997**, 42: 1-20

Meike Sena Martins and Detlef Stammer, 2022: Interannual Variability of the Congo River Plume-Induced Sea Surface Salinity, *Remote Sensing* 14, no. 4: 1013. <https://doi.org/10.3390/rs14041013>

D. Stammer, M. Sena Martins, J. Köhler, A. Köhl, 2021: How well do we know ocean salinity and its changes?, *Progress in Oceanography*, 190, 2021, 102478, doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102478

[Rodrigue Anicet Imbol Koungue](#), [P. Brandt](#), [J. Lübbecke](#), [A. Prigent](#), [M. Sena Martins](#), [R.R. Rodrigues](#), 2021: The 2019 Benguela Niño. *Front. Mar. Sci.*, 2021, 8, 800103, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.800103>

Lübbecke, Joke F., Peter Brandt, Marcus Dengler, Robert Kopte, Jan Lüdke, Ingo Richter, Meike Sena Martins, and Pedro C. M. Tchipalanga, 2019: Causes and evolution of the southeastern tropical Atlantic warm event in early 2016. *Climate Dynamics*, 53 (1-2). 261-274. DOI [10.1007/s00382-018-4582-8](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4582-8).

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Position	Ausgaben
0812	446.668,00 €
0822	0,00 €
0835	0,00 €
0843	0,00 €
0846	32,00 €
0850	0,00 €
Gesamt	467.700,00 €

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

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

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

Als ein Beitrag zur Grundlagenforschung hat das Projekt keine unmittelbaren wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten und es haben sich auch keine unerwartet eröffnen. Jedoch können sich im Nachgang Anwendungen hinsichtlich Vorhersagbarkeit, besonders des Klimas über Afrika, ergeben.

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

Innerhalb des Verbundes bestand ein reger Austausch über die Fortschritte der einzelnen TP, sowohl bei den entsprechend anberaumten Treffen als auch zwischenzeitlich bei Bedarf. Außerhalb des Verbundes wurden die üblichen Informationsquellen der aktuellen Literatur sowie wissenschaftlicher Tagungen genutzt. Es sind keine Fortschritte bekannt geworden, die eine Änderung des Arbeitsplans notwendig gemacht hätten.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Meike Sena Martins and Detlef Stammer, 2022: Interannual Variability of the Congo River Plume-Induced Sea Surface Salinity, *Remote Sensing* 14, no. 4: 1013. <https://doi.org/10.3390/rs14041013>

D. Stammer, M. Sena Martins, J. Köhler, A. Köhl, 2021: How well do we know ocean salinity and its changes?, *Progress in Oceanography*, 190, 2021, 102478, doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102478

[Rodrique Anicet Imbol Koungue](#), [P. Brandt](#), [J. Lübbecke](#), [A. Prigent](#), [M. Sena Martins](#), [R.R. Rodrigues](#), 2021: The 2019 Benguela Niño. *Front. Mar. Sci.*, 2021, 8, 800103, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.800103>

Lübbecke, Joke F., Peter Brandt, Marcus Dengler, Robert Kopte, Jan Lüdke, Ingo Richter, Meike Sena Martins, and Pedro C. M. Tchipalanga, 2019: *Causes and evolution of the southeastern tropical Atlantic warm event in early 2016*. *Climate Dynamics*, 53 (1-2). 261-274. DOI [10.1007/s00382-018-4582-8](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4582-8).

Manuskripte in Vorbereitung

Leverenz, F., 2022: Dependency of Climate Predictions on SST Patterns in the Benguela Upwelling Region. PhD Thesis.

III. Erfolgskontrollbericht

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

Die beteiligten Projekte dienen dem Verständnis von bereits stattfindenden oder sich anbahnenden Änderungen in der Benguela Auftriebsregion welche wichtig für das Klima über Afrika und dessen möglicher Vorhersagbarkeit sind. Sie führen darüber hinaus zu Verbesserungen von Ozeanmodellen und zum physikalischen Verständnis der Prozesse, die in der Auftriebsregion vorherrschen.

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

Die Beobachtungsergebnisse stellen die Grundlage für die Validierung des hochauflösenden Ozeanzirkulationsmodells dar, dessen Analyse zum besseren Verständnis des Küstenauftriebs und des Austauschs von aufsteigendem, relativ kühlem Wasser mit dem offenen, oligotrophen Ozean verwendet wird.

Insgesamt wird die hydrographische Variabilität in der Modellsimulation unterschätzt. Die Beobachtungen zeigen, dass die zwischenjährlichen Variationen so groß wie die saisonalen Variationen sind, wobei das Modell zum einen die Gesamtvariabilität unterschätzt, wie auch das Maß der zwischenjährlichen Variationen im Vergleich zu den saisonalen stark unterschätzt.

Verbesserte SST Felder können zu erheblichen Änderungen in der Simulation und von Vorhersagen über Afrika führen. Die Ursachen für die SST Biases in Klimamodellen müssen allerdings noch gefunden werden.

III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen/Schutzrechtanmeldungen etc.:

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

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

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

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

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

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Unsere Analyse können zum besseren Verständnis und der Vorhersage des Küstenauftriebs und des Austauschs von aufsteigendem, relativ kühlem Wasser mit dem offenen, oligotrophen Ozean verwendet werden.

Durch eine Verbesserung der SST Felder in Klimamodellen können Verbesserungen in den Vorhersagen über Afrika erzielt werden.

III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

III.5 Präsentationsmöglichkeiten

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

III.6 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Der Finanzierungs- und Zeitplan wurde eingehalten.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht der Universität Hamburg: TP3: Fernerkundung und Modellierung des südöstlichen Atlantischen Ozeans (Remote-sensing and ocean modeling of the Southeast Atlantic) Laufzeit: 1. 7. 2018 – 31. 12. 2021	

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Detlef Stammer,	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation

8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20148 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03F0795C
	11a. Seitenzahl Bericht
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 14

16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger PTJ, 25. 8. 2022

18. Kurzfassung

Ziel des BANINO Projektes war es, die Variabilität in der Auftriebsregion vor der südafrikanischen Küste besser zu verstehen, und die dafür relevanten Prozesse zu identifizieren. Das übergeordnete Ziel war dabei, die Vorhersagbarkeit von sogenannten Benguela Ninos, Warmwasserereignissen mit großen sozio-ökonomischen Folgen zu verbessern. Das TP3 war dabei speziell in einem seiner zwei Arbeitspakete dazu ausgelegt, die detaillierte Beschreibung des hydrographischen Ist-Zustandes und seine saisonale sowie zwischenjährige Variabilität im verfügbaren Beobachtungszeitraum anhand von Satelliten- und in situ Daten zu liefern. Die Auswertung und Analyse bestehender Satellitendaten untersuchte dabei in Verbindung mit in situ Daten und modellgestützter Simulationen die inter-annualen Variationen in der Untersuchungsregion. Hierzu wurden verschiedene Fernerkundungsdatensätze gemeinsam ausgewertet, einschließlich Oberflächen-temperatur (SST), Meeresoberflächenauslenkung (SSH), Chlorophyll und erstmals auch der Oberflächensalzgehalt (SSS), der eine genauere Kartierung der Kongoausstromfahne ermöglicht. Die Beobachtungsergebnisse stellten die Grundlage für die Validierung des hochauflösenden Ozeanzirkulationsmodells dar, dessen Analyse zum besseren Verständnis des Küstenauftriebs und des Austauschs von aufsteigendem, relativ kühlem Wasser mit dem offenen, oligotrophen Ozean verwendet wurde. In seinem zweiten Arbeitspaket benutzte TP3 die Beobachtungsergebnisse als Grundlage für die Validierung von gekoppelten Klimamodellen. Diese Modelle wurden desweiteren in Klimamodell-Simulationen verwendet, um die Sensitivität der Ozean-Atmosphären-Wechselwirkungen und damit der Vorhersagbarkeit der Atmosphäre über Afrika auf Änderungen des mittleren Zustands des Südatlantiks einschließlich der Auftriebsregionen zu verstehen.

19. Schlagwörter

Auftriebsregionen, Wechselwirkung Süd-Atlantik, hydrodynamische Modellierung, Randwertbestimmung, Hindcast-Lauf, Validation, Vorhersagbarkeit. Afrika.

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final report of the University of Hamburg: TP3: Fernerkundung und Modellierung des südöstlichen Atlantischen Ozeans (Remote-sensing and ocean modeling of the Southeast Atlantic)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Detlef Stammer,	5. end of project 31.12.2021
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Universität Hamburg Edmund-Siemers-Allee 1 20148 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0795C
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	11a. no. of pages Report
	11b. no. of pages Publikation
	12. no. of references 6
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 14
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger PTJ, 25. 8. 2022	

18. Abstract

The aim of the BANINO project was to better understand the variability in the upwelling region off the South African coast and to identify the relevant processes. The overall goal was to improve the predictability of so-called Benguela Ninos, warm water events with major socio-economic consequences. In one of its two work packages, TP3 was specifically intended to provide a detailed description of the current hydrographic condition and its seasonal and inter-annual variability in the available observation period using satellite and in situ data. The evaluation and analysis of existing satellite data examined the inter-annual variations in the study region in connection with in situ data and model-based simulations. For this purpose, joint remote sensing datasets were evaluated, including surface temperature (SST), sea surface displacement (SSH), chlorophyll and, for the first time, surface salinity (SSS), which enables specific mapping of the Congo outflow plume. The observational results provide the basis for validation of the high-resolution ocean circulation model, the analysis of which was used to better understand coastal upwelling and the exchange of rising, relatively cool water with the open, oligotrophic ocean. In its second work package, TP3 used the observation results as a basis for validating coupled climate models. These models were further used in climate model simulations to understand the sensitivity of ocean-atmosphere interactions and thus atmospheric predictability over Africa to changes in the mean state of the South Atlantic including upwelling regions.

19. Keywords

Upwelling regions, South-Atlantic interaction, hydrodynamic modeling, boundary value determination, hindcast run, validation, predictability, Africa, Remote-sensing, ocean modeling of the Southeast Atlantic

20. Publisher

21. Price