

**Verbundprojekt WTZ SPACES II:
CASISAC – Änderungen im Agulhasstromsystem und
Auswirkungen auf die Küsten im südlichen Afrika**

Vorhaben: Ozean- und Klimamodellierung

Schlussbericht GEOMAR

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

Förderkennzeichen **03F0796A**

Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 01.07.2018 bis 31.12.2021

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

II. Bericht

II.1 Verwendung der Zuwendung

TP 1.1 Ozeanmodellierung

Die Modellierarbeiten im TP bauten auf der im Projekt „AGULHAS“ der vorangegangenen SPACES-Phase entwickelten Modellfamilie auf. Hierbei handelt es sich um eine Reihe globaler Ozeanmodellkonfigurationen mit verfeinerter horizontaler Auflösung in der Agulhas Region um Südafrika, die sogenannte INALT-Familie (Schwarzkopf et al., 2019). Insbesondere wurde INALT20 verwendet, eine Konfiguration, bestehend aus einem globalen Ozeanmodell mit $1/4^\circ$ horizontaler Auflösung und einem darin verankerten „Nest“ mit $1/20^\circ$ Auflösung, welches den Südatlantik und westlichen Indischen Ozean abdeckt (Abbildung 1). Es wurden Hindcast-Simulationen unter Verwendung verschiedener atmosphärischer Antriebsdaten der vergangenen Dekaden (1958-2009 aus CORE; Large and Yeager (2009); 1958-2019 aus JRA55-do; Tsujino et al. (2018)) durchgeführt. Gemäß der im Verbundvorhaben vereinbarten Meilensteine wurden aus den Simulationen Ausgabedaten der vergangenen Dekaden, darunter der Meeresspiegel, an die anderen Teilprojekte übergeben (Biastoch et al., 2022).

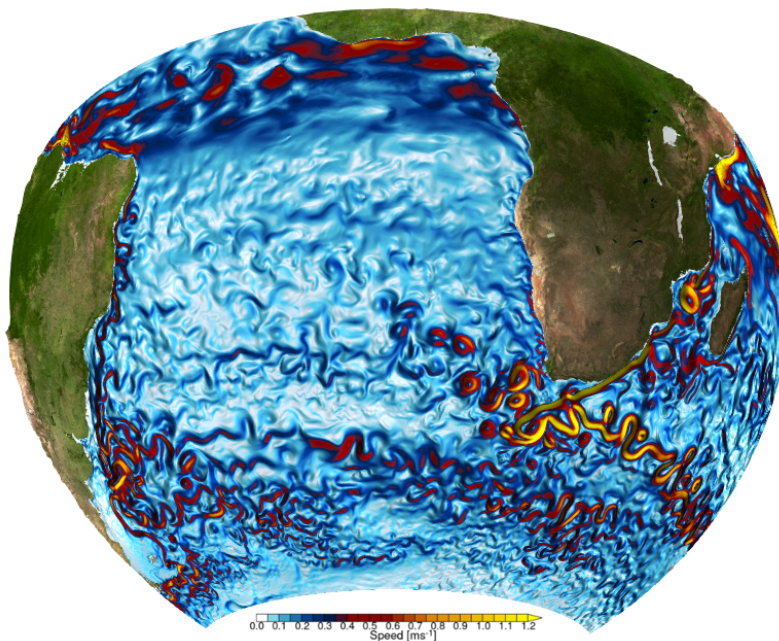


Abbildung 1 Momentaufnahme der Oberflächengeschwindigkeit [$m s^{-1}$] simuliert in der Nestregion in INALT20 (aus Schwarzkopf et al. (2019)).

Bei den Analysen der Simulation in INALT20 angetrieben mit Daten aus JRA55-do (INALT20-JRA) lag der Fokus auf einer verbesserten Quantifizierung und einem verbesserten Verständnis der interannualen bis dekadischen Variabilität der Agulhas Leakage, insbesondere in den letzten Jahrzehnten. Die Agulhas Leakage transportiert in Form von Wirbeln, Ringen und Filamenten warmes und salzhaltiges Wasser aus dem Indischen in den Atlantischen Ozean. Die Agulhas Leakage ist die wichtigste Wasserquelle für den oberen Teil der Atlantischen meridionalen Umwälzbewegung (AMOC) (Rühs et al., 2019) und die Hauptquelle der zentralen Wassermassen im Benguela-Auftriebssystem, einer wichtigen Primärproduktionsregion (Tim et al., 2018). Sie fungiert als Quelle der dekadischen AMOC-Variabilität (Biastoch et al., 2008) und spielte durch ihren Einfluss auf die AMOC eine wichtige Rolle bei Gletscherabbrüchen in der Vergangenheit (Knorr und Lohmann, 2003; Peeters et al., 2004). Eine erhöhte Agulhas Leakage

trug zur Erwärmung des tropischen Atlantiks (Lübbecke et al., 2015) und zum Anstieg des Wärmeinhalts des Atlantiks in den letzten Jahrzehnten bei (Lee et al., 2011; Biastoch et al., 2015).

Die Quantifizierung der Agulhas Leakage in Ozeanmodellen wird bevorzugt mit Hilfe sogenannter Lagrangescher Methoden vorgenommen (Abbildung 2). Dabei werden virtuelle Wasserpakete im Agulhasstrom ausgesetzt und ihre Ausbreitung in der simulierten Strömung verfolgt. Jedes Partikel repräsentiert einen Teil des Transports des Agulhasstroms zum Auslagezeitpunkt. Der kumulative Transport der Partikel, die in den Südatlantik gelangen, ergibt eine gute Abschätzung für die Stärke der Agulhas Leakage. Bisherige Studien unterschieden sich in der verwendeten Software und in den Details der Lagrangeschen Experimente. Hier wurde die Robustheit der Leakage Berechnungen systematisch getestet. Insbesondere haben wir Lagrangesche Experimente mit der etablierten Software Ariane und der neu entwickelten Software Parcels verglichen. Dabei zeigte sich, dass mittlerer Transport, Variabilität und Trend vergleichbar sind, was einen Maßstab für zukünftige Arbeiten setzt.

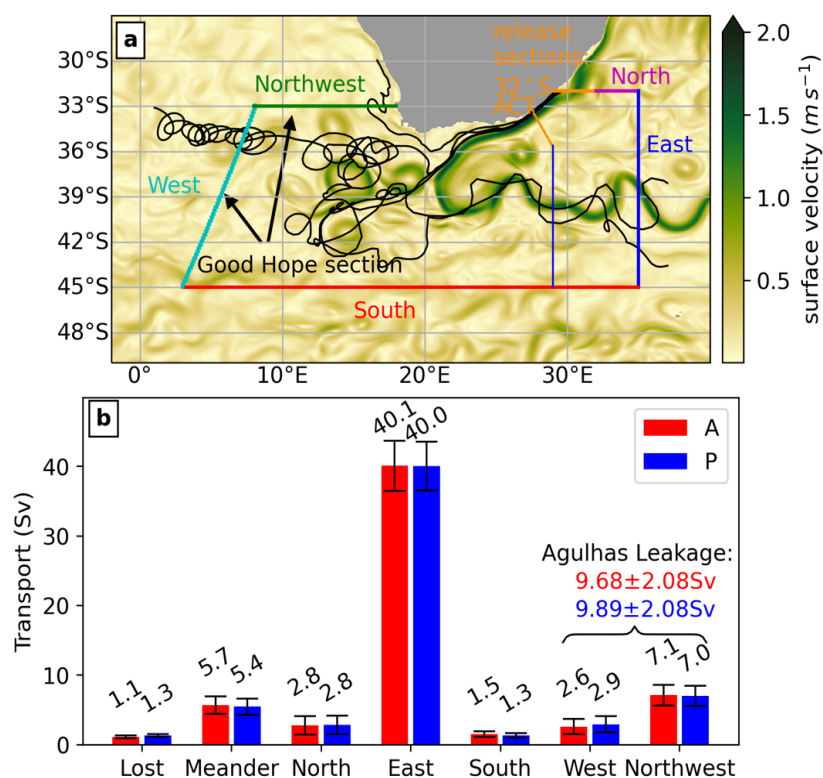


Abbildung 2 Konzeption und Robustheit Lagrangescher Experimente zur Bestimmung von Agulhas Leakage: (a) Momentaufnahme der in INALT20-JRA simulierten Oberflächengeschwindigkeit, Auslage- (orange Linien) und Kontrollschnitte (andersfarbige Linien) und beispielhafte Trajektorien (schwarze Linien); (b) Mittlerer Transport zwischen 1958 und 2014 über alle in (a) definierten Kontrollschnitte, in rot für das Experiment mit Ariane und in blau für das Experiment mit Parcels;. Agulhas Leakage ist die Summe der Transporte über die beiden Schnitte „West“ und „Northwest“, die eine Approximation der „Good Hope Linie“ darstellen (aus Schmidt et al. (2021)).

Um die zeitliche Entwicklung der Agulhas Leakage in den letzten Jahrzehnten besser zu verstehen, wurden (i) Zeitreihen aus INALT20-JRA mit entsprechenden Zeitreihen aus einer früheren Simulation in INALT20 unter Verwendung der Vorgängerversion des atmosphärischen Antriebs (INALT20-CORE) und mit einer Rekonstruktion aus der beobachteten Variabilität der Meeresoberflächentemperatur verglichen und (ii) mögliche Zusammenhänge mit regionalen Änderungen der ozeanischen und atmosphärischen Zirkulation untersucht. Diese Analysen

bestätigen noch einmal, dass unterschiedliche Modellsimulationen und Rekonstruktionen neben einem unterschiedlichen Mittelwert auch eine unterschiedliche zeitliche Entwicklung der Agulhas Leakage in den letzten Jahrzehnten abbilden (Abbildung 3). Alle Zeitserien zeigen einen Anstieg in Agulhas Leakage zwischen Beginn der 1960er und Mitte der 1980er. Jedoch setzt sich dieser Anstieg in INALT20-CORE in den 1990ern verstärkt fort, während INALT20-JRA und die Rekonstruktionen keinen eindeutigen Trend mehr aufweisen. Dies lässt vermuten, dass INALT20-CORE und eventuell Modellläufe unter CORE Antrieb im Allgemeinen, einen zu starken Anstieg in Agulhas Leakage in den letzten Jahrzehnten des Simulationszeitraumes simulieren. Vorangegangene Studien legen nahe, dass die unterschiedliche zeitliche Entwicklung der Agulhas Leakage auf eine unterschiedliche Repräsentation des Windfeldes in den verschiedenen Antriebsdatensätzen zurückzuführen sein könnte. Diese Analysen zeigen, dass ein solcher Zusammenhang nicht trivial und nicht durch einfache integrative Kenngrößen wie dem vorgeschlagenen „Southern Annular Mode“ Index (SAM) abbildbar ist (dieser ist ein Maß für die Stärke der Westwinde und zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Simulationen, Abbildung 3).

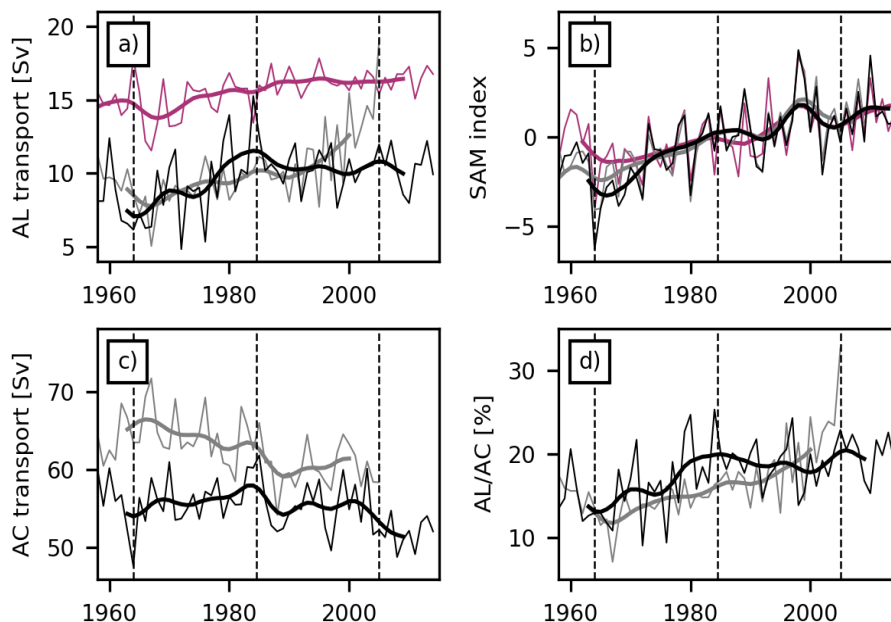


Abbildung 3 Zeitliche Entwicklung der Stärke verschiedener Strömungskomponenten in der Agulhasregion und des südhemisphärischen Windfeldes in INALT20-JRA (schwarz), INALT20-CORE (grau) und Rekonstruktionen aus Beobachtungsdaten (pink): (a) Agulhas Leakage (AL), (b) „Southern Annular Mode“ (SAM) Index, (c) Agulhasstrom (AC), (d) Verhältnis AL/AC.

Der Einfluss von Wirbeln und Strömungen, die weitaus kleiner sind als die mesoskaligen Agulhasringe, auf die Zirkulation in der Agulhas Region war vor dem Vorhaben noch wenig erforscht. Diese kleinräumigen Strömungen, die sogenannte Submesoskala, werden besonders in der Wirbelstärke sichtbar (Abbildung 4). Um den Einfluss der Submesoskala zu untersuchen, wurde die NEMO-Modellkonfiguration INALT60 entwickelt (Schwarzkopf et al. 2019, Schubert et al., 2019). In INALT60 ist die Agulhasregion mit $1/60^\circ$ (<2 km) horizontaler Gitterweite aufgelöst. Die Konfiguration besteht aus einem globalen Ozeanmodell mit $1/4^\circ$ Auflösung, in das sogenannte „Nester“ eingebettet sind. Hierbei entsteht in zwei Schritten zunächst eine Verfeinerung auf $1/20^\circ$ für die größere Agulhasregion die den östlichen Atlantik und westlichen Indik einschließt und in einem zweiten Schritt eine Verfeinerung auf $1/60^\circ$ in

einer kleinen Region um das südliche Afrika von 0° bis 40°E und 44°S bis 26°S . Damit wird die Submesoskala innerhalb der Agulhas Region aufgelöst und es kann deren Einfluss auf Regionen auch außerhalb des hochaufgelösten Gebietes untersucht werden.

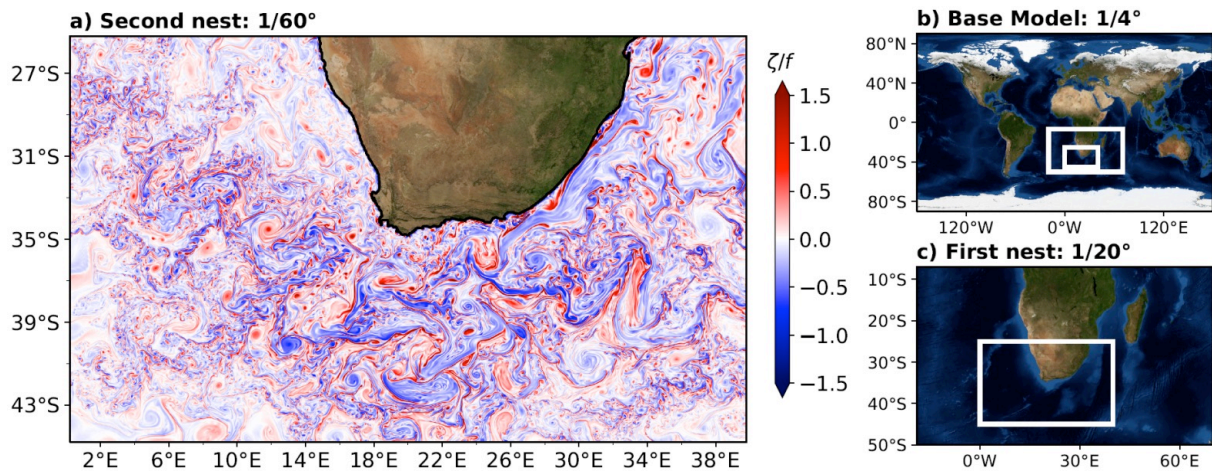


Abbildung 4 Momentaufnahme der normierten relativen Wirbelstärke (a) in der hochauflösenden ($1/60^\circ$) Region von INALT60. INALT60 besteht aus einem $1/4^\circ$ Basismodell, einer ersten Gitterverfeinerung auf $1/20^\circ$ (b) und einer zweiten Gitterverfeinerung auf $1/60^\circ$ (c).

Die simulierte Turbulenz in INALT60 stimmt auf allen Skalen (von der Submesoskala bis zur Mesoskala) sehr gut mit Satellitenbeobachtungen überein (Schubert et al., 2019). Der Vergleich mit parallelen Modellexperimenten, die die Submesoskala nicht oder nur zum kleinen Teil auflösen zeigt, dass die mesoskaligen Wirbel, insbesondere im Agulhasringpfad, zu schwach sind, wenn die Submesoskala im Modell nicht repräsentiert ist. Eine Untersuchung des Transfers kinetischer Energie zwischen der Submesoskala und der Mesoskala in INALT60 konnte zwei Wege aufzeigen, wie die Submesoskala die Mesoskala verstärkt. Zum einen absorbieren mesoskalige Wirbel im Frühjahr oder Sommer (abhängig von der Region) submesoskalige Wirbel, die hauptsächlich im Winter als Folge von Deckschichtinstabilitäten entstehen (Schubert et al., 2020). Dies trägt zum Jahresgang der Mesoskala, der ein Maximum im Sommer aufweist, bei. Zu dem konnte gezeigt werden, dass submesoskalige Prozesse zur Entstehung von mesoskaligen Zyklonen am Nordrand des Agulhasstroms beitragen (Schubert et al., 2021). Diese propagieren in den offenen Ozean des Kapbeckens, wo sie mit Agulhasringen interagieren, die essentiell sind für den Transport von Wasser aus dem Indischen Ozean in den Atlantik (die „Agulhas Leakage“). Es wird angenommen, dass diese Interaktionen Einfluss auf die Agulhas Leakage und damit auf das Klima haben. Weiter sind die Zyklonen am Nordrand des Agulhasstroms wichtig für den Austausch zwischen der Schelfregion und dem offenen Ozean.

TP 1.2 Klimamodellierung

In einem zweiten Arbeitspaket wurde der Einfluss von vergangenen und zukünftigen Änderungen in Treibhausgasen und stratosphärischem Ozon auf das Agulhasstromsystem untersucht. Besondere Aufmerksamkeit wurde darauf gelegt, wie sich die Agulhas Leakage in Zukunft entwickeln wird. Durch ihre Auswirkungen auf die thermohalinen Eigenschaften des Atlantiks und auf der AMOC sind die Schwankungen der Agulhas Leakage nicht nur für die Zirkulation im Atlantik, sondern auch für das Klima von Bedeutung, und künftige Veränderungen der Leakage könnten weitreichende und komplexe Folgen haben. Daher ist es wichtig zu

verstehen, wie sich die Agulhas Leakage in Zukunft verändern könnte und welches die treibenden Faktoren für diese Veränderungen sind.

Die Untersuchung der Auswirkungen von Treibhausgasen und Ozonveränderungen auf das Agulhasstromsystem erforderte Simulationen mit einem gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Meereis-Modell. Ein solches Klimamodell, FOCl ("Flexible Ocean and Climate Infrastructure"), welches am GEOMAR entwickelt wurde (Matthes et al., 2020), wurde für diese Studie eingesetzt. INALT10X, eine Konfiguration mit global $1/2^\circ$ horizontaler Auflösung und einem $1/10^\circ$ Nest in der Agulhasregion (Schwarzkopf et al. 2019) wurde als Ozeankomponente in FOCl integriert, so dass die für das Agulhasstromsystem charakteristischen mesoskaligen Merkmale durch das gekoppelte Modell aufgelöst werden. Zusätzlich beinhaltet FOCl ein Modul zur interaktiven Berechnung der Ozonchemie. Dadurch wird sichergestellt, dass die Rückkopplungen zwischen Ozon, Temperatur und Dynamik im Modell simuliert werden und das Ozonfeld mit der modellierten Dynamik konsistent ist. Aufgrund dieser besonderen Eigenschaften kann FOCl nicht nur zur Untersuchung der Auswirkungen erhöhter Treibhausgase, sondern auch der Auswirkungen von Veränderungen des stratosphärischen Ozons auf das Agulhasstromsystem verwendet werden.

Um die Auswirkungen der Veränderungen von Ozon und Treibhausgasen zu trennen, wurden drei Ensembles von drei Simulationen mit FOCl für die zweite Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts und anschließend für das einundzwanzigste Jahrhundert durchgeführt. In den ersten beiden Ensembles wurden entweder die Treibhausgase oder die ozonabbauenden Stoffe auf ihren Wert zu Beginn der Simulationen festgelegt, so dass die simulierten dynamischen Veränderungen nur von einem einzigen Faktor beeinflusst wurden. Im dritten Ensemble variierten sowohl die Treibhausgase als auch die ozonabbauenden Stoffe, um die kombinierte Wirkung von Änderungen der Treibhausgase und des stratosphärischen Ozons zu quantifizieren. Die Randbedingungen und die Höhe der Meeresoberfläche aus den dritten Ensembles wurden TP 2 bzw. TP 3 gemäß den Meilensteinen 7 und 14 zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden einige dieser Simulationen im Rahmen des SPACES II BANINO-Projekts verwendet.

Frühere Studien haben gezeigt, dass Veränderungen der Agulhas Leakage auf Zeitskalen von mehr als ein paar Jahren durch Schwankungen der Westwinde in der südlichen Hemisphäre verursacht werden (Rouault et al., 2009; Durgadoo et al., 2013). Die Westwinde reagieren ihrerseits auf Veränderungen der Treibhausgas- und Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre. Um zu verstehen, wie sich die Agulhas Leakage in Zukunft verändern wird, muss man entsprechend wissen, wie die atmosphärische Zirkulation in der südlichen Hemisphäre durch Treibhausgas- und Ozonänderungen beeinflusst wird.

In einer ersten Veröffentlichung im Rahmen von TP1.2 (Ivanciu et al. 2021) wurden die Beiträge der zunehmenden Treibhausgase und der Bildung des Ozonlochs zu den Veränderungen der Zirkulation auf der südlichen Hemisphäre in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts untersucht und die Gesamtveränderungen anhand von Beobachtungen validiert. Das Ozonloch entsteht jedes Frühjahr in der Stratosphäre über der Antarktis als Folge der anthropogenen Emission von ozonabbauenden Substanzen. Der verringerte Ozongehalt kühlt die Stratosphäre über der Antarktis ab, da weniger kurzwellige Strahlung absorbiert wird. Dies führt zu einem stärkeren meridionalen Temperaturgradienten, der in der Stratosphäre zu stärkeren und anhaltenden Westwinden (Polarwirbel) führt. Die veränderten Winde beeinflussen die Ausbreitung der planetaren Wellenaktivität in der Stratosphäre und damit die stratosphärische Residualzirkulation, die verstärkt wird und mehr Ozon in die Polarregion transportiert. Die

Verstärkung der Westwinde erstreckt sich im Süd-Sommer von der Stratosphäre bis zur Erdoberfläche, wo sie sich in Form eines höheren SAM bemerkbar macht (Abbildung 5). Gleichzeitig werden die troposphärischen Westwinde und der SAM auch durch den Anstieg der Treibhausgase beeinflusst. Treibhausgase wirken in der Troposphäre erwärmend, in der Stratosphäre dagegen kühlend. Da der Übergang zwischen Troposphäre und Stratosphäre in den Tropen in größerer Höhe liegt, verändert der Anstieg der Treibhausgase den meridionalen Temperaturgradienten in diesen Höhen und führt auch zu einer Verstärkung der Westwinde. Allerdings war dieser Effekt in der Vergangenheit gering, und der größte Teil des positiven Trends in der Stärke der Westwinde und des SAM ist auf die Bildung des Ozonlochs zurückzuführen (Abbildung 5). Diese simulierten Änderungen stimmen mit den Änderungen überein, die aus Beobachtungen und der ERA5 Reanalyse abgeleitet wurden, sowie mit den Ergebnissen früherer Studien. Dies zeigt, dass FOCL die Klimavariabilität der letzten Jahrzehnte gut simuliert und gibt Vertrauen in die Vorhersagen für das einundzwanzigste Jahrhundert, die mit diesem Modell gemacht werden.

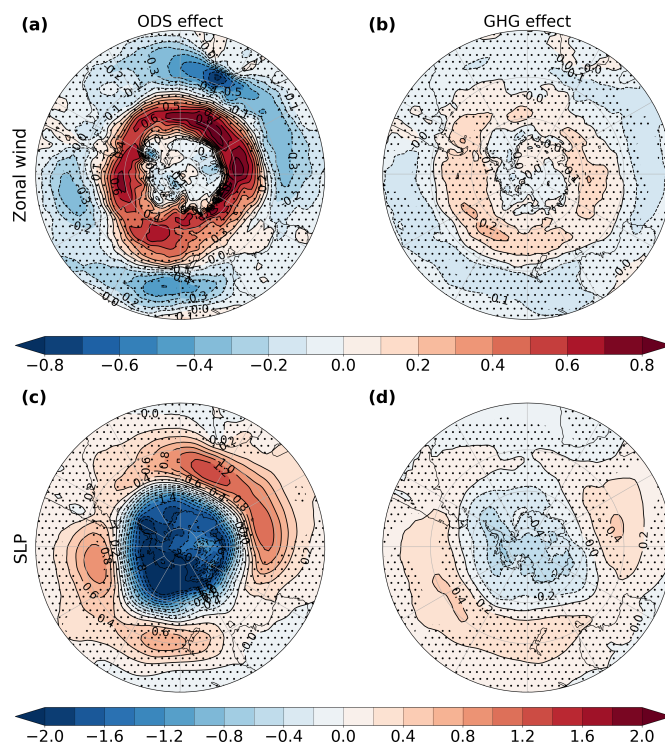


Abbildung 5 Änderungen des zonalen Oberflächenwinds [$m s^{-1}$] ((a) und (b)) und des Luftdrucks auf Meereshöhe [hPa] ((c) und (d)) in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts aufgrund der Bildung des Ozonlochs ((a) und (c)) und aufgrund der Zunahme der Treibhausgase ((b) und (d)). Die Punktierung verdeckt Werte, die auf dem 95%-Konfidenzintervall nicht signifikant sind. Übernommen aus Ivanciu et al. (2021).

Die ozonabbauenden Stoffe werden im Rahmen des Montrealer Protokolls und seiner Änderungen und Anpassungen schrittweise aus dem Verkehr gezogen. Folglich wird sich das Ozonloch voraussichtlich in den 2050er Jahren erholen (Amos et al., 2020), was erhebliche Auswirkungen auf das Klimasystem haben wird. Gleichzeitig nehmen die Treibhausgasemissionen weiter zu, und ihre Auswirkungen werden sich in Zukunft noch verstärken. Die zweite Veröffentlichung aus TP1.2 (Ivanciu et al. 2022a) untersuchte die künftigen Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf das Agulhasstromsystem im einundzwanzigsten Jahrhundert als Reaktion auf die Erholung des Ozons und den weiteren Anstieg der Treibhausgase. Für die Treibhausgase wurde das Szenario SSP-585 mit hohen Emissionen gewählt. Die Erholung des

Ozons führt zu einer Erwärmung der Stratosphäre und kehrt die Auswirkungen des Ozonabbaus um (blaue Kreise in Abbildung 6). Am wichtigsten für das Agulhasstromsystem ist, dass die Westwinde der südlichen Hemisphäre schwächer werden und sich in Richtung Äquator verlagern (Abbildung 6 b, c), während sich der SAM in Richtung seiner negativen Phase verschiebt (Abbildung 6 a). Infolgedessen nimmt die Agulhas Leakage ab (Abbildung 6 f), während sich der Agulhasstrom verstärkt (Abbildung 6g), und zwar als Reaktion auf lokale Windänderungen (Abbildung 6 h). Diese Veränderungen stehen im Gegensatz zu denen, die durch den Anstieg der Treibhausgase verursacht werden (orangefarbene Kreise in Abbildung 6). Die Westwinde verstärken sich und verlagern sich in Richtung der Pole, der SAM zeigt einen positiven Trend, die Agulhas Leakage nimmt als Reaktion darauf zu und der Agulhasstrom schwächt sich ab. Die Veränderungen, die laut SSP-585 auf die Zunahme der Treibhausgase zurückzuführen sind, sind viel stärker als die Veränderungen, die auf die Erholung des Ozons zurückzuführen sind. Wenn also beide Faktoren berücksichtigt werden (schwarze Kreise in Abbildung 6), wird das Vorzeichen der Gesamtveränderungen von den erhöhten Treibhausgasen bestimmt. Dennoch ist es wichtig zu beachten, dass die Ozonerholung einen Teil der Auswirkungen der Treibhausgase auf die Westwinde und das Agulhasstromsystem abschwächt.

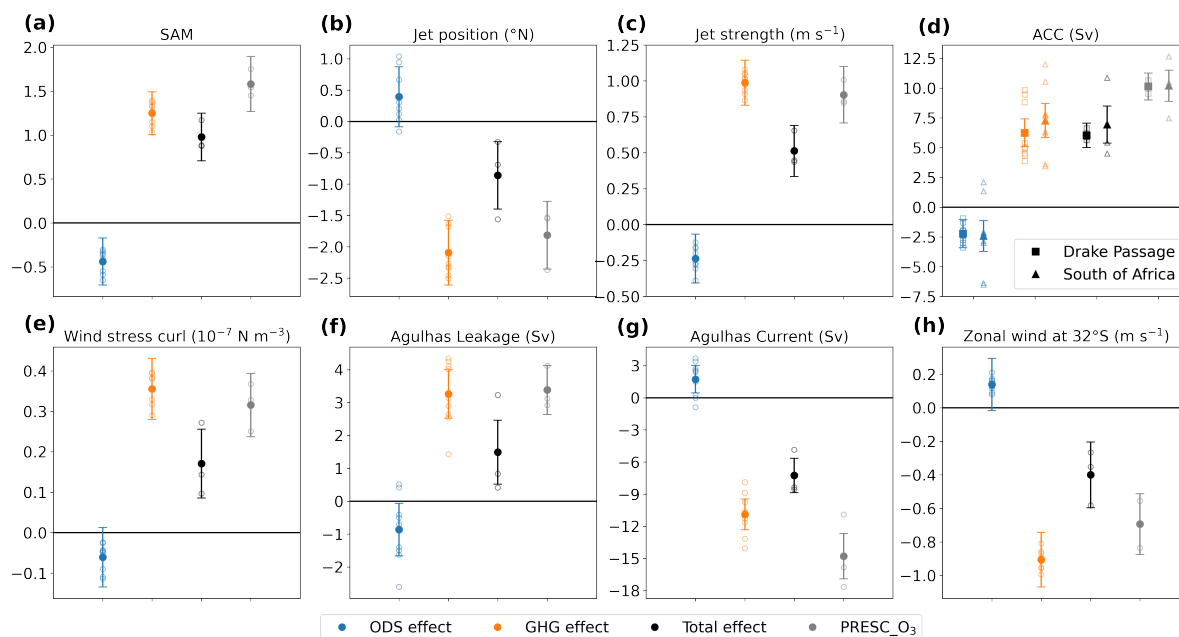


Abbildung 6 Veränderungen im einundzwanzigsten Jahrhundert aufgrund der Erholung des Ozons (blau), der Zunahme der Treibhausgase (orange) und beider Faktoren, wenn Ozon interaktiv berechnet wird (schwarz) und unter vorgeschriebenem CMIP6-Ozonfeld (grau). (a) SAM, (b) Position des westlichen Oberflächenjets [$^{\circ}$ Breitengrad, positiv nach Norden], (c) Stärke des westlichen Oberflächenjets gemittelt zwischen 45°S und 60°S [m s^{-1}], (d) ACC-Transport [Sv], (e) Rotation der Windschubspannung, gemittelt zwischen 40°S und 55°S und 30°E und 120°E [10^{-7}N m^{-3}], (f) Agulhas Leakage Transport [Sv], (g) Agulhasstrom Transport [Sv] und (h) der zonaler Wind bei 32°S , gemittelt zwischen 30°E und 120°E [m s^{-1}]. Gefüllte Symbole zeigen die Veränderung im Ensemble-Mittelwert und offene Symbole die Veränderung in den einzelnen Simulationen. Die Fehlerbalken geben das 95%-Konfidenzintervall auf der Grundlage eines zweiseitigen t-Tests an. Übernommen aus Ivanciu et al. (2022a).

Die Zunahme der Agulhas Leakage im einundzwanzigsten Jahrhundert steht in Zusammenhang mit Veränderungen der Temperatur und des Salzgehalts. Perioden mit hohem Agulhas Leakage sind durch positive Temperatur- und Salzgehaltsanomalien gekennzeichnet, die sich vom Kapbecken nach Nordwesten in den Südatlantik erstrecken. Diese Anomalien

reichen bis in 1000 m Tiefe (Abbildung 7 b, c) und bleiben, im Falle der Salzgehaltsanomalien, noch 5 Jahre später bestehen, nachdem sie in den zentralen Südatlantik gewandert sind (Abbildung 7 e). Die Zunahme der Agulhas Leakage im einundzwanzigsten Jahrhundert wird daher zur Erwärmung und Zunahme des Salzgehaltes im Atlantik beitragen.

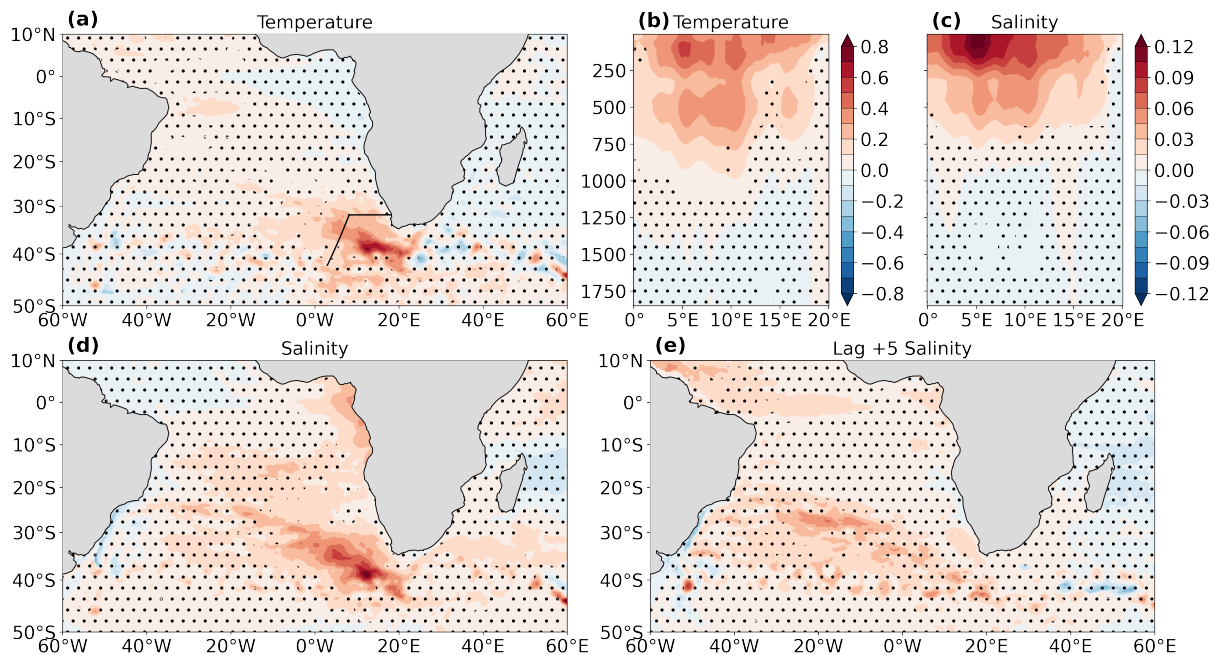


Abbildung 7 Zusammengesetzte Anomalien der potenziellen Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] (a) und (b) und des Salzgehalts (c) - (e) für Perioden mit hoher Agulhas Leakage, (a) - (d) zeigen instantane Felder, (e) mit einer zeitlichen Verschiebung von +5 Jahren. Die Anomalien sind in den Feldern (a), (d) und (e) über die oberen 1000 m des Ozeans und in den Feldern (b) und (c) zwischen 0° und 20°E bei 35°S gemittelt. Die Felder wurden tiefpassgefiltert, um nur Schwankungen mit einer Periode von mehr als 5 Jahren zu erhalten; der lineare Trend wurde entfernt. Die Punktierung maskiert Anomalien, die sich nach der Monte-Carlo-Methode nicht signifikant vom zeitlichen Mittelwert unterscheiden. Die Linie in Feld (a) markiert den Good Hope Schnitt, der für die Berechnung der Agulhas Leakage verwendet wurde. Übernommen aus Ivanciu et al. (2022a).

Das warme Wasser des Agulhasstroms ist eine Feuchtigkeitsquelle für die Region des südlichen Afrikas (Rouault et al., 2000). Feuchte Luft, die von oberhalb des Agulhasstroms stammt, wird durch südliche und südöstliche Winde auf das Festland transportiert (Pfeile in Abbildung 8). Dies kann geschehen, wenn sich das südatlantische Hochdruckgebiet über Südafrika ostwärts ausbreitet (Konturen in Abbildung 8). Ein solches Ereignis wird als „Ridging Highs“ bezeichnet und ist mit Niederschlägen über den südlichen und östlichen Teilen Südafrikas verbunden (violette Schattierung in Abbildung 8). In der dritten Publikation, die aus TP 1.2 resultiert (Ivanciu et al., 2022b, in Begutachtung), untersuchten wir den Zusammenhang zwischen Ridging Highs und brechenden Rossby-Wellen und die Auswirkungen, die zukünftige Veränderungen von Ridging Highs auf die Niederschläge über Südafrika haben werden. Diese Veröffentlichung ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit mit Dr. Thando Ndarana von der Universität Pretoria. Es wurde festgestellt, dass das Brechen von Rossby-Wellen, dargestellt durch die rote, irreversibel deformierte potentielle Vorticity-Kontur in Abbildung 8, in 44% der Fälle mit Ridging Highs einhergeht und zu mehr Niederschlag über den südlichen und östlichen Teilen Südafrikas führt, verglichen mit den Fällen, in denen Ridging Highs ohne das Brechen von Rossby-Wellen auftreten. Darüber hinaus vermittelt die Brechung von Rossby-Wellen die Wirkung zunehmender Treibhausgase auf Ridging Highs. Ridging Highs ohne brechende Rossby-Wellen zeigen wenig Veränderung im einundzwanzigsten Jahrhundert, während diejenigen, die mit brechenden Rossby-Wellen auftreten, in Zukunft mehr Niederschlag über

dem südlichen und weniger Niederschlag über dem nordöstlichen Südafrika bringen. Diese Ergebnisse sind im Hinblick auf den von TP 2 berichteten Trend zur Austrocknung Südafrikas in der Zukunft von Bedeutung.

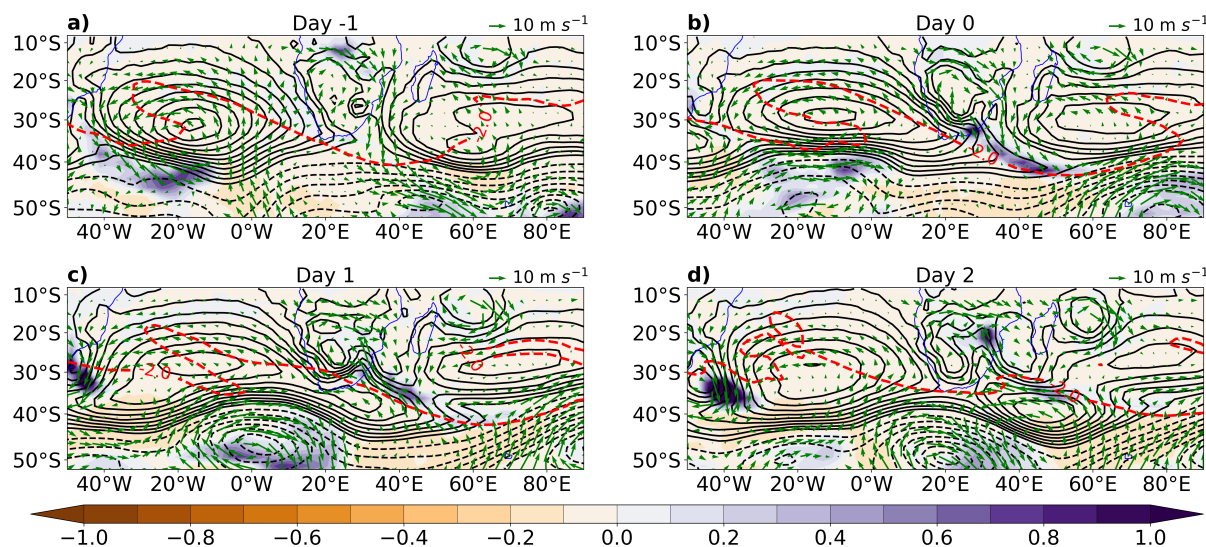


Abbildung 8 Entwicklung eines Ridging High, begleitet von brechenden Rossby-Wellen. Die schwarzen Konturen zeigen den Luftdruck auf Meereshöhe, alle 2 hPa ab 1010 hPa (durchgezogen) und alle 5 hPa darunter (gestrichelt), die Farbschattierung zeigt die Niederschlagsanomalien [mm Tag^{-1}], die Pfeile zeigen die Windanomalien bei 850 hPa [m s^{-1}] und die rote gestrichelte Kontur zeigt -2 PVU auf der isentropen Oberfläche bei 350 K, was das Brechen der Rossby-Wellen illustriert. Die Entwicklung des Ereignisses ist von Tag -1 (a) bis Tag $+2$ (d) dargestellt. Übernommen aus Ivanciu et al. (2022b).

Referenzen

- Amos, M., Young, P. J., Hosking, J. S., Lamarque, J.-F., Abraham, N. L., Akiyoshi, H., Archibald, A. T., Bekki, S., Deushi, M., Jöckel, P., Kinnison, D., Kirner, O., Kunze, M., Marchand, M., Plummer, D. A., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tilmes, S., and Yamashita, Y., 2020. Projecting ozone hole recovery using an ensemble of chemistry–climate models weighted by model performance and independence, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 9961–9977, <https://doi.org/10.5194/acp-20-9961-2020>
- Biastoch, A., Böning, C. W., and Lutjeharms, J. R. E., 2008. Agulhas Leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation, *Nature*, 456, 489–492, <https://doi.org/10.1038/nature07426>
- Biastoch, A., Durgadoo, J. V., Morrison, A. K., van Sebille, E., Weijer, W., and Griffies, S. M., 2015. Atlantic multi-decadal oscillation covaries with Agulhas Leakage, *Nature Communications*, 6, 10 082, <https://doi.org/10.1038/ncomms10082>
- Biastoch, A., Rühls, S., Ivanciu, I., Schwarzkopf, F.U., Veitch, J., Reason, C., Zorita, E., Tim, N., Hünicke, B., Vafeidis, A., Santamaria-Aguilar, S., Kupfer, S., Soltau, F., 2022. The Agulhas Current System as an important driver, in: von Maltitz, G. (Ed.), *Sustainability of Southern African Ecosystems under Global Change: Science for Management and Policy Interventions*. Springer.
- Durgadoo, J. V., Loveday, B. 1160 R., Reason, C. J. C., Penven, P., and Biastoch, A., 2013. Agulhas Leakage Predominantly Responds to the Southern Hemisphere Westerlies, *Journal of Physical Oceanography*, 43, 2113–2131, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-047.1>

- Ivanciu, I., Matthes, K., Wahl, S., Harlaß, J., and Biastoch, A., 2021. Effects of prescribed CMIP6 ozone on simulating the Southern Hemisphere atmospheric circulation response to ozone depletion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 5777–5806, <https://doi.org/10.5194/acp-21-5777-2021>
- Ivanciu, I., Matthes, K., Biastoch, A., Wahl, S., & Harlaß, J., 2022a. Twenty-first century Southern Hemisphere impacts of ozone recovery and climate change from the stratosphere to the ocean. *Weather and Climate Dynamics*, 3 (1), 396 139–171. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-139-2022>
- Ivanciu, I., Ndarana, T., Matthes, K., Wahl, S., 2022b, under review. On the ridging of the South Atlantic Anticyclone over South Africa: the impact of Rossby wave breaking and of climate change, *Geophysical Research Letters*.
- Lee, S.-K., Park, W., van Sebille, E., Baringer, 1235 M. O., Wang, C., Enfield, D. B., Yeager, S. G., and Kirtman, B. P., 2011. What caused the significant increase in Atlantic Ocean heat content since the mid-20th century?, *Geophysical Research Letters*, 38, L17 607, <https://doi.org/10.1029/2011GL048856>
- Knorr, G. and Lohmann, G., 2003. Southern Ocean origin for the resumption of Atlantic thermohaline circulation during deglaciation, *Nature*, 424, 532–536, <https://doi.org/10.1038/nature01855>
- Large, W.G., Yeager, S., 2009. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Clim. Dyn.* 33, 341–364.
- Lübbecke, J. F., Durgadoo, J. V., and Biastoch, A., 2015. Contribution of Increased Agulhas Leakage to Tropical Atlantic Warming, *Journal of Climate*, 28, 9697 – 9706, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0258.1>
- Matthes, K., Biastoch, A., Wahl, S., Harlaß, J., Martin, T., Brücher, T., Drews, A., Ehlert, D., Getzlaff, K., Krüger, F., Rath, W., Scheinert, M., U. Schwarzkopf, F., Bayr, T., Schmidt, H., Park, W., 2020. The Flexible Ocean and Climate Infrastructure version 1 (FOCI1): Mean state and variability. *Geosci. Model Dev.* 13, 2533–2568. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2533-2020>
- Peeters, F. J. C., Acheson, R., Brummer, G.-J. A., de Ruijter, W. P. M., Schneider, R. R., Ganssen, G. M., Ufkes, E., and Kroon, D., 2004. Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods, *Nature*, 430, 661–665, <https://doi.org/10.1038/nature02785>
- Rühs, S., Schwarzkopf, F. U., Speich, S., and Biastoch, A., 2019. Cold vs. warm water route – sources for the upper limb of the Atlantic Meridional Overturning Circulation revisited in a high-resolution ocean model, *Ocean Science*, 15, 489–512, <https://doi.org/10.5194/os-15-489-2019>
- Rouault, M., Lee-Thorp, A. M., & Lutjeharms, J. R. E., 2000. The Atmospheric Boundary Layer above the Agulhas Current during Alongcurrent Winds. *Journal of Physical Oceanography*, 30 (1), 40 - 50, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<0040:TABLAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<0040:TABLAT>2.0.CO;2)
- Rouault, M., Penven, P., and Pohl, B., 2009. Warming in the Agulhas Current system since the 1980's, *Geophysical Research Letters*, 36, L12 602, <https://doi.org/10.1029/2009GL037987>
- Schubert, R., Gula, J., Biastoch, A., 2021. Submesoscale flows impact Agulhas Leakage in ocean simulations. *Commun. Earth Environ.* 2, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00271-y>
- Schubert, R., Gula, J., Greatbatch, R.J., Baschek, B., Biastoch, A., 2020. The Submesoscale Kinetic Energy Cascade: Mesoscale Absorption of Submesoscale Mixed Layer Eddies and Frontal Downscale Fluxes. *J. Phys. Oceanogr.* 50, 2573–2589. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0311.1>
- Schubert, R., Schwarzkopf, F.U., Baschek, B., Biastoch, A., 2019. Submesoscale Impacts on

Mesoscale Agulhas Dynamics. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11, 2745–2767.
<https://doi.org/10.1029/2019MS001724>

Schwarzkopf, F.U., Biastoch, A., Böning, C.W., Chanut, J., Durgadoo, J. V, Getzlaff, K., Harlaß, J., Rieck, J.K., Roth, C., Scheinert, M.M., Schubert, R., 2019. The INALT family - a set of high-resolution nests for the Agulhas Current system within global NEMO ocean/sea-ice configurations. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 1–44.
<https://doi.org/10.5194/gmd-2018-312>

Tim, N., Zorita, E., Schwarzkopf, F. U., Rühs, S., Emeis, K.-C., and Biastoch, A., 2018: The Impact of Agulhas Leakage on the Central Water Masses in the Benguela Upwelling System From A High-Resolution Ocean Simulation, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 9416–9428, <https://doi.org/10.1029/2018JC014218>

Tsujino, H., Urakawa, S., Nakano, H., Small, R.J., Kim, W.M., Yeager, S.G., Danabasoglu, G., Suzuki, T., Bamber, J.L., Bentsen, M., Böning, C.W., Bozec, A., Chassignet, E.P., Curchitser, E., Boeira Dias, F., Durack, P.J., Griffies, S.M., Harada, Y., Ilicak, M., Josey, S.A., Kobayashi, C., Kobayashi, S., Komuro, Y., Large, W.G., Le Sommer, J., Marsland, S.J., Masina, S., Scheinert, M., Tomita, H., Valdivieso, M., Yamazaki, D., 2018. JRA-55 based surface dataset for driving ocean–sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Model.* 130, 79–139. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.002>

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In allen Teilprojekten wurde der wesentliche Bestandteil der finanziellen Förderung für Personal eingesetzt. Die durchgeführten Reisen fanden zur internen Abstimmung innerhalb des Verbundes und zur Vorstellung der Ergebnisse auf internationalen Konferenzen (in Präsenz und Online) statt. Aufgrund der Corona-Pandemie ab 2020 fanden keine Reisen zur Abstimmung mit den südafrikanischen Partnern statt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Hochauflösende Ozean- und Klimamodelle bilden die Basis für die Untersuchung der Abhängigkeiten und Variabilität der beckenweiten Zirkulation. Vor allem die hier simulierten ozeanischen Skalen stellen einen wichtigen Fortschritt gegenüber den gröber aufgelösten Klimamodellen, etwa im Rahmen des CMIP6, dar. Die hier gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Einbettung limitierter Beobachtungen und eine gemeinsame Interpretation. Dies fand innerhalb von SPACES (etwa zusammen mit BANINO) als auch im nationalen und internationalen Kontext statt.

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

Die Projektarbeiten liefern einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Austausches südlich von Afrika und deren Rolle für die klimatisch relevante großskalige Zirkulation im Atlantik. Die gewonnenen Ergebnisse zur Variabilität haben eine unmittelbare Bedeutung für das Verständnis der Rolle der Ozeanströmungen für die Klimavariabilität im Atlantischen Sektor. Die hier entwickelten und verwendeten hochauflösenden Modelle stellen eine wichtige Brücke zwischen der Klimamodellierung und der Impactmodellierung an den Küsten dar.

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

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

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 NKBF

Arbeiten im Reviewprozeß

Rühs, S., C. Schmidt, F. U. Schwarzkopf, T. G. Schulzki, R. Schubert, and A. Biastoch, 2022: Robust estimates for the Decadal Evolution of Agulhas Leakage from the 1960s to the 2010s, under review for *Nat. Commun. Earth Environ.*

Ivanciu, I., Ndarana, T., Matthes, K. and S. Wahl, 2022. On the ridging of the South Atlantic Anticyclone over South Africa: the impact of Rossby wave breaking and of climate change, under review for *Geophys. Res. Lett.*

Veröffentlichte Arbeiten (in zeitlicher Reihenfolge)

Zinke, J., S. Rühls, M. Pfeiffer, T. Watanabe, S. Grab, D. Garbe-Schönberg, and A. Biastoch, 2021: 334-year coral record of surface temperature and salinity variability in the greater Agulhas Current region, *Clim. Past*, im Druck.

Biastoch, A., Rühls, S., Ivanciu, I., Schwarzkopf, F.U., Veitch, J., Reason, C., Zorita, E., Tim, N., Hünicke, B., Vafeidis, A., Santamaria-Aguilar, S., Kupfer, S., Soltau, F., 2022. The Agulhas Current System as an important driver, in: von Maltitz, G. (Ed.), *Sustainability of Southern African Ecosystems under Global Change: Science for Management and Policy Interventions*. Springer, im Druck.

Ivanciu, I., K. Matthes, A. Biastoch, S. Wahl, and J. Harlaß, 2022: Twenty-first century Southern Hemisphere impacts of ozone recovery and climate change from the stratosphere to the ocean, *Weather and Clim. Dyn.*, **3**, 139–171, <https://doi.org/10.5194/wcd-3-139-2022>.

Schubert, R., A. Gula, and A. Biastoch, 2021: Submesoscale Impacts on Agulhas Leakage and Agulhas Cyclone Formation, *Nat. Commun. Earth Environ.*, **2**, 197, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00271-y>.

Biastoch, A., F. U. Schwarzkopf, K. Getzlaff, S. Rühls, T. Martin, M. Scheinert, T. Schulzki, P. Handmann, R. Hummels, and C. W. Böning, 2021, Regional Imprints of Changes in the Atlantic Meridional Overturning Circulation in the Eddy-rich Ocean Model VIKING20X, *Ocean. Sci.*, **17**, 1177–1211, <https://doi.org/10.5194/os-17-1177-2021>.

Schmidt, C., F. U. Schwarzkopf, S. Rühls, and A. Biastoch, 2021: Characteristics and robustness of Agulhas Leakage estimates: an inter-comparison study of Lagrangian methods, *Ocean Sci.*, **17**, 1067–1080, <https://doi.org/10.5194/os-17-1067-2021>.

Ivanciu, I., K. Matthes, S. Wahl, J. Harlaß, and A. Biastoch, 2021: Effects of prescribing the CMIP6 ozone on simulating the Southern Hemisphere atmospheric circulation response to ozone depletion, *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 5777–5806, <https://doi.org/10.5194/acp-21-5777-2021>.

Schubert, R., J. Gula, R. G. Greatbatch, B. Baschek, and A. Biastoch, 2020: The Submesoscale Kinetic Energy Cascade: Mesoscale Absorption of Submesoscale Mixed-Layer Eddies and Frontal Downscale Fluxes, *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 2573–2589, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0311.1>.

Tim, N., E. Zorita, K.-C. Emeis, F. U. Schwarzkopf, A. Biastoch, and B. Hünicke, 2019: Analysis of the position and strength of westerlies and trades with implications for Agulhas Leakage and South Benguela upwelling, *Earth Syst. Dynam.*, **10**, 847–858, <https://doi.org/10.5194/esd-10-847-2019>.

Schubert, R., F. U. Schwarzkopf, B. Baschek, and A. Biastoch, 2019: Submesoscale impacts on mesoscale Agulhas dynamics, *JAMES*, **11**, 2745-2767, <https://doi.org/10.1029/2019MS001724>.

Bower, A., S. Lozier, A. Biastoch, K. Drouen, N. Foukal, H. Furey, M. Lankhorst, S. Rühs, and S. Zou, 2019: Lagrangian Views of the Pathways of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, *J. Geophys. Res.*, **124**, 5313-5335, <https://doi.org/10.1029/2019JC015014>.

Schwarzkopf, F. U., A. Biastoch, C. W. Böning, J. Chanut, J. V. Durgadoo, K. Getzlaff, J. Harlaß, J. K. Rieck, C. Roth, M. M. Scheinert, and R. Schubert, 2019: The INALT family - a set of high-resolution nests for the Agulhas Current system within global NEMO ocean/sea-ice configurations, *Geosci. Model. Dev.*, **12**, 3329-3355, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1-2019>.

Wagner, P., S. Rühs, F. U. Schwarzkopf, I. M. Koszalka, and A. Biastoch, 2019: Can Lagrangian tracking simulate tracer spreading in a high-resolution Ocean General Circulation Model?, *J. Phys. Oceanogr.*, **49**, 1141-1157, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0152.1>.