

## **BMBF-Verbundprojekt SACUS I**

### **Abschlussbericht**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) Seestr. 15 18119 Rostock, Deutschland	<b>Förderkennzeichen:</b> 03G0837B
--	---------------------------------------

**Vorhabenbezeichnung:**  
SACUS - Southwest African Upwelling System and Benguela Niños  
Teilprojekt 2: Variability of poleward transports in the eastern boundary current of the Southeast Atlantic.

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.07.2013 - 30.06.2016

**Projektleiter:** Dr. Volker Mohrholz

**Berichtersteller:** Dr. Volker Mohrholz, Dr. Martin Schmidt, Dr. Tim Junker, Lydia Siegfried

## **I. Kurzdarstellung**

### **I. 1. Aufgabenstellung**

Ziel des Teilprojektes ist die Untersuchung der Variabilität der Wellenausbreitung und des damit verbundenen polwärtigen Transports von Wassermassen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet. Schwerpunkt war der Betrieb einer Verankerung auf dem namibischen Schelf sowie die Simulation der hydrographischen Prozesse im östlichen tropischen und subtropischen Atlantik mit einem regionalen Zirkulationsmodell. Die gemessenen lokalen Zeitreihen werden gemeinsam mit den Modellergebnissen analysiert um das Verständnis der Variabilität der hydrographischen Bedingungen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet zu verbessern. Die untersuchten Zeitskalen umfassen die jährliche und zwischenjährliche Variabilität in Beziehung zu den atmosphärischen Antrieben und gestatten eine Bewertung der ozeanischen Response auf Klimaveränderungen.

### **I. 2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt konnte in Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern wie geplant und ohne größere Probleme durchgeführt werden.

Die Expertise des IOW in der Vorbereitung und Durchführung von schiffsgebundenen hydrographischen Messungen sowie Langzeitbeobachtungen mit verankerten Geräten sowie die Ausstattung mit entsprechender Messtechnik waren Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der geplanten Feldmessungen. Die Feldmessungen erfolgten in enger Kooperation mit dem NatMIRC, dem Geomar (TP1) sowie in Kombination mit dem EU-Projekt PREFACE.

Die modellierende Arbeitsgruppe besitzt eine langjährige Erfahrung in der Arbeit mit hochauflösenden, regionalen Ozeanmodellen. Die numerischen Experimente für SACUS wurden aufbauend auf einem Modellsystem durchgeführt, das speziell für das Benguela-Auftriebsgebiet eingerichtet und validiert wurde.

### I. 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die in SACUS für TP2 geplanten Feldexperimente konnten wie geplant umgesetzt werden. Dazu nahmen Projektmitarbeiter an mehreren Expeditionen mit RV Meteor und dem Namibischen Forschungsschiff Mirabilis teil (Tabelle 1). Während der Expeditionen erfolgten die Wartung der Verankerungen auf dem Namibischen Schelf, sowie begleitende Messungen mit CTD und Mikrostruktursonde. Alle Forschungsfahrten beinhalteten zusätzlich eine „Capacity building“ Komponente, die der Aus- und Weiterbildung von Studenten, Technikern und Wissenschaftlern aus der Region diene.

**Tabelle 1: Forschungsfahrten**

<b>Expedition</b>	<b>Schiff</b>	<b>Zeitraum</b>	<b>Aufgabe</b>
M99	RV Meteor	31.07. – 23.08. 2013	Hydrographie
M100	RV Meteor	01.09. – 01.10. 2013	Verankerung setzen
M103	RV Meteor	21.01. – 11.02. 2014	Verankerungswartung und Hydrographie
MOM1409	RV Mirabilis	08.09. – 17.09. 2014	Verankerungswartung
MOM1501	RV Mirabilis	20.01. – 28.01. 2015	Verankerungswartung
M120	RV Meteor	16.10. – 18.11. 2015	Verankerungswartung und Hydrographie
MOM1604	RV Mirabilis	11.05. – 16.05. 2016	Verankerungswartung

Die numerischen Experimente mit einem regionalen Ozeanmodell konnten am HLRN wie geplant durchgeführt werden. Das Modellsystem wurde mit erweiterten Antriebsdaten und verbesserten Randwerten neu eingerichtet. Die Simulationen mit realistischen Atmosphären-Antrieben erbrachten mehrere in sich konsistente hydrographische Modelldatensätze, die jeweils etwa 15 Modelljahre abdecken und gemeinsam mit den Felddaten ausgewertet werden. Für die Untersuchung der Wassermassenausbreitung zwischen tropischem und subtropischem Ozean wurden numerische Tracerfreisetzungsexperimente durchgeführt. In Szenarienstudien wurden die atmosphärischen Antriebe im Bereich der Kunene-Auftriebszelle variiert.

Neben den “Capacity building” Aktivitäten auf den Seereisen beteiligten sich Projektmitarbeiter von TP 2 an der Nansen-Tutu Summer school on ocean, climate and marine ecosystems an der University of Cape Town (1. - 8.12. 2014) und am RGNO Kurs der University of Namibia in Hentjesbai (Mai 2016).

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

Aus dem Benguela-Auftriebsgebiet waren bereits zu Projektbeginn hydrographische Daten auf verschiedenen Schnitten zu unterschiedlichen Jahreszeiten sowie eine Zeitreihe hydrographischer Daten von einer Verankerung bei 23°S verfügbar. Diese zeigen die Grundzüge der Variabilität der Wassermasseneigenschaften im Benguela-Auftriebsgebiet und gestatten eine Modellvalidation. Die hydrographischen Bedingungen, insbesondere die für das Ökosystem und die Fischerei entscheidenden Sauerstoffverhältnisse, auf dem Schelf vor Namibia sind durch das Wechselspiel von tropischem SACW und subtropischem ESACW bedingt, wobei angenommen wird, das SACW vor allem mit dem polwärtigen Unterstrom und ESACW durch den Ekman-Kompensationsstrom auf den Schelf gelangt. Diese typischen Stromfelder sind in Feldmessungen nachgewiesen, für ihre Entstehung gibt es eine ausgearbeitete analytische Theorie. Die Daten reichten aber nicht aus, die Ursachen für die beobachtete große zwischenjährliche Variabilität statistisch signifikant zu verifizieren. Insbesondere ist das Studium von Wellenprozessen auf dem Schelf mit nur einer Verankerung unzureichend möglich. Auch die Ergebnisse numerischer Modelle sind mit einer großen Unsicherheit behaftet. Modelle können zwar realistische hydrographische Bedingungen vorhersagen, der Erfolg der numerischen Experimente hängt jedoch kritisch von der Wahl der atmosphärischen Antriebe ab. Dabei erhält man mit verschiedenen jeweils auch mit Messwerten generierten Reanalysedatensätzen signifikant unterschiedliche Ergebnisse. Die in SACUS (und PREFACE) sowohl an verschiedenen Positionen auf dem

Schelf als auch über einen längeren Zeitraum gewonnenen Datensätze sind die Basis für eine fundierte Untersuchung des Einflusses von Wellen im Küstenwellenleiter auf das Ökosystem im Benguela-Auftriebsgebiet. Die Messungen ermöglichen auch eine verbesserte Modellvalidation und verkleinern damit signifikant die Unsicherheiten der Ergebnisse numerischer Zirkulationsmodelle.

### **I. 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb des Projektverbundes erfolgte eine enge Zusammenarbeit insbesondere mit TP1 bei der gemeinsamen Vorbereitung und Durchführung der Forschungsfahrten M120 und M131 sowie der gemeinsamen Auswertung der gewonnenen Felddaten. Mit TP3 wurde die Reise M99 gemeinsam durchgeführt.

Außerhalb des Projektverbundes sind die Feldmessungen und Modellstudien im Rahmen von PREFACE wichtig. Hier wird die Genauigkeit eines regionalen Zirkulationsmodells des tropischen und subtropischen Atlantiks systematisch verbessert, das für die Studien der Wellenausbreitung in SACUS verwendet wird. Andererseits werden die in SACUS gewonnenen Modellergebnisse für die Diskussion der Ausbreitung planktischer Fischlarven genutzt (Paulo Coelho, INIP, Angola, Marek Ostrowski, IMR, Norwegen).

Für die Wartung der Verankerungen und die Bereitstellung von weiteren Begleitdaten war die Zusammenarbeit mit dem NatMIRC in Swakopmund, Namibia, unverzichtbar. Zudem wurden Daten von zwei weiteren Langzeitverankerungen genutzt, die im Rahmen der Projekte PREFACE und GENUS betrieben wurden.

Im Rahmen der „Capacity building“ Aktivitäten erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit der Benguela Current Commission und der University of Namibia.

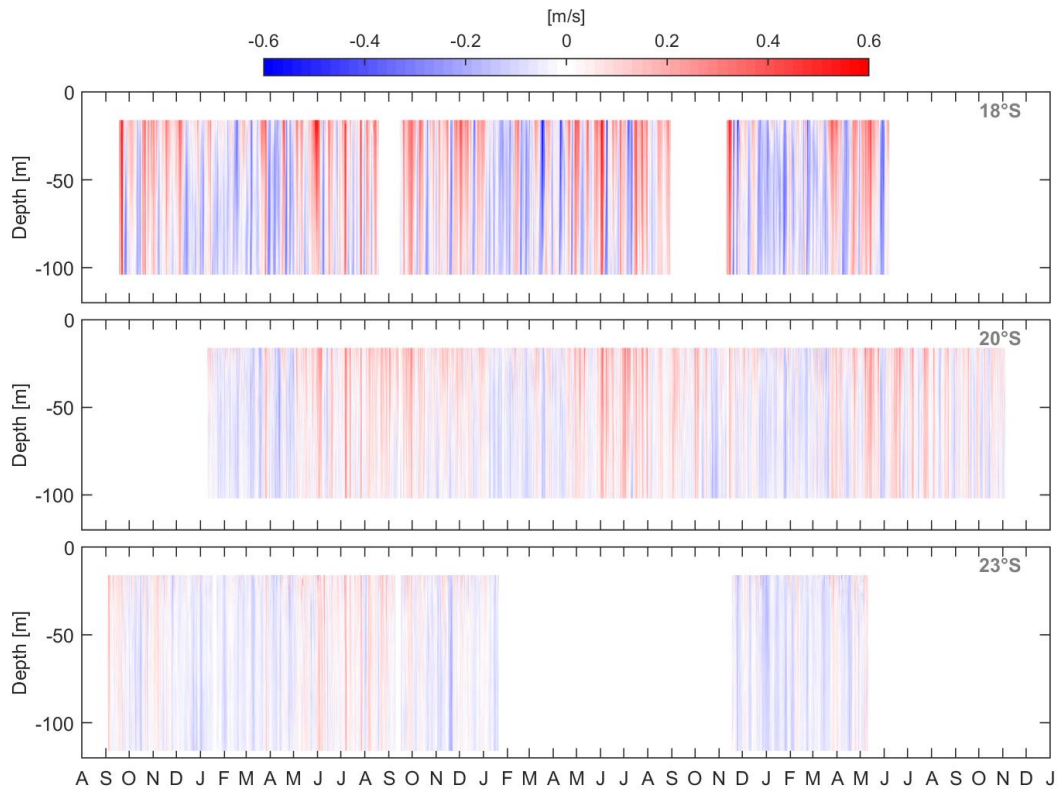
## **II. Eingehende Darstellung**

### **II. 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Im Teilprojekt 2 wurden die im Folgenden dargestellten wissenschaftlichen Themen (a bis e) bearbeitet:

#### ***a) Understand the propagation of topographically trapped waves along the northern Namibian shelf and their interaction with the local circulation.***

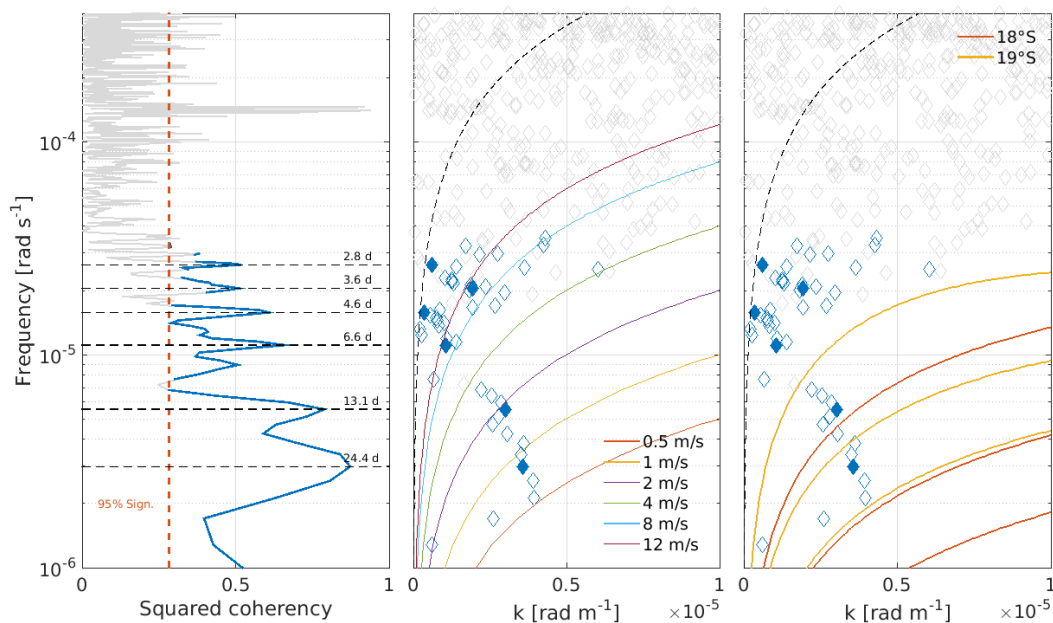
Um die polwärtige Ausbreitung von Wellen entlang der afrikanischen Westküste und die damit verbundene dynamische Verknüpfung von tropischem Atlantik und Benguela Auftriebsgebiet verstehen zu können, ist die Beobachtung der Strömung an mehreren Positionen des Afrikanischen Schelfs essentiell. Im Zuge des SACUS-Projektes konnten zeitlich hochaufgelöste Daten (1 h) der meridionalen Strömung an drei Stationen (18°S, 20°S, 23°S) entlang des namibischen Schelfs validiert, kompiliert und ausgewertet werden, siehe Abbildung 1. Erstmals überhaupt liegen damit simultane Daten an mehreren Orten entlang der süd-west Afrikanischen Küste vor. Sie werden benutzt um charakteristische Zeit- und Längenskalen der Wellenpropagation entlang der Küste abschätzen zu können. Solche Abschätzungen waren bisher nur auf der Basis vereinfachter theoretischer Modelle möglich (Hagen 1979, Lass und Mohrholz 2005). Diese Studien legen nahe, dass die minimale Periode von barotropen Schelfrandwellen bei etwa 2 Tagen zu erwarten ist.



**Abbildung 1:** Gemessene meridionale Stromkomponente an den Verankerungspositionen 18°S, 20°S und 23°S entlang des Namibischen Schelfs (August 2013 bis November 2015).

Zur Analyse der küstenparallelen Wellenausbreitung und der meridionalen Strömung wurden zunächst die Daten der drei Verankerungen auf dem Namibischen Schelf analysiert. Die Strömungsdaten an jeder der drei Stationen wurden mit Hilfe einer EOF-Analyse in unabhängige statistische Moden zerlegt (Abbildung 1). Dabei zeigt sich, dass der prozentuale Anteil der bedeutendsten statistischen Mode an der gesamten Variabilität (erklärte Varianz) an allen drei Verankerungspositionen mehr als 90 Prozent beträgt. Dieser Mode ist nahezu barotrop.

Die Amplitude der bedeutendsten statistischen Mode an den drei Stationen wurde nun für eine Kohärenzanalyse verwendet. Dabei wird die Varianz der Signale in einem spektral aufgelöst miteinander verglichen. Unsere Analyse stützt sich dabei zunächst auf den Vergleich der Signale zwischen den Positionen 18°S und 20°S, da für diese Stationen Daten mit dem längsten gemeinsamen Zeitraum zur Verfügung stehen (736 Tage).



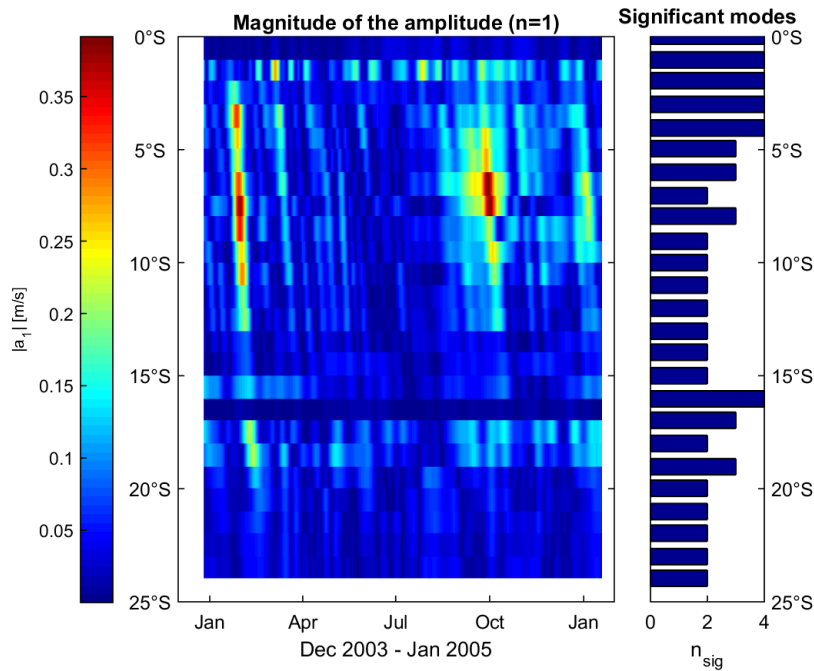
**Abbildung 2:** Kohärenzspektrum (links) ermittelt aus den zeitgleich zur Verfügung stehenden Amplituden des ersten statistischen Modes an den Positionen 18°S und 20°S und assoziierte Wellenzahlen (mitte) wie sie aus der Phasenverschiebung der Amplituden abgeleitet werden konnten. Statistisch signifikante Werte sind blau hervorgehoben. Die ermittelten Signale werden mit der Dispersionsrelation barotroper Schelfrandwellen (rechts) für die Topographie des namibischen Schelfes bei 18°S und 19°S verglichen.

Das ermittelte Kohärenzspektrum (Abbildung 2, links) zeigt eine Häufung von Spitzen mit Perioden größer als 2,8 Tagen. Die dominierenden Signale mit der höchsten Kohärenz entsprechen Perioden von etwa 13,1 d und 24,4 d.

Aus der Phasenverschiebung der Signale konnte den Frequenzen zudem eine Wellenzahl und eine Phasengeschwindigkeit zugeordnet werden. Die Phasengeschwindigkeit der propagierenden Signale wird durch das Verhältnis von Frequenz und Wellenzahl beschrieben. Linien konstanter Phasengeschwindigkeit sind in Abbildung 2 (Mitte) eingezeichnet, und der Vergleich mit den Messdaten zeigt, dass die dominierenden Signale (Periode ~13,1 d und ~24,4 d) mit Ausbreitungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 2 m/s assoziiert sind. Der Vergleich der Messdaten mit einem theoretischen Modell für barotrope Schelfrandwellen (Buchwald und Adams, 1968) in Abbildung 2 (rechts) offenbart, dass die dominierenden Signale im Spektrum (Periode ~13,1 d und ~24,4 d) mit großer Wahrscheinlichkeit der ersten und zweiten dynamischen Mode eben dieser Wellen zugerechnet werden können.

Da die Ausbreitungseigenschaften von Schelfrandwellen im Allgemeinen auch von der Dichteschichtung abhängen, ist davon auszugehen, dass sich die Propagationscharakteristiken dieser Wellen saisonal verändern. Dass sich die mittlere vertikale Struktur der Strömung entlang der Küste saisonal ändert, legen klimatologische Stromprofile nahe (Junker et al. 2017).

Der zeitliche Umfang des oben dargestellten Datensatzes liegt allerdings am unteren Ende dessen, was für eine belastbare Aussage hinsichtlich der saisonalen Variabilität notwendig wäre. Eine Verlängerung der Zeitreihen wird eine solche Analyse ermöglichen.



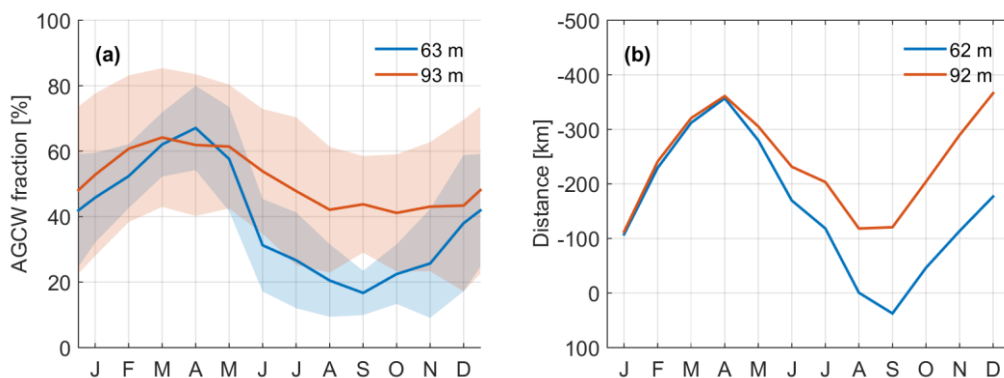
**Abbildung 3** Betrag der komplexen zeitabhängigen Amplitude der tiefpassgefilterten Horizontalkomponenten der Strömung aus dem numerischen Modell (Dezember 2003 bis Januar 2005), und Anzahl der statistisch signifikanten Moden der EOF-Analyse (rechts).

Neben den Daten der Verankerungen wurden Ergebnisse eines regionalen numerischen Modells (MOM) verwendet um die Analyse der Propagation von küstengefangenen Wellen auf den Bereich vom Äquator bis 30°S auszudehnen. Entlang des Schelfs wurden Daten küstennaher Modellpunkte extrahiert, bei denen die Wassertiefe mindestens 120 m beträgt. Die Modell-Strömungsdaten wurden tiefpassgefiltert, einer EOF-Analyse unterzogen und der Betrag des ersten Modes in Abhängigkeit von der geographischen Breite dargestellt (Abbildung 3). Aus diesem Hovmöller-Plot ist die polwärtige Signalausbreitung zwischen 9°S und 20°S klar erkennbar. Dieses Signal breitet sich mit etwas mehr als einem Tag pro Breitengrad aus (ca. 1.1 m/s) und liegt damit im Bereich der in den Verankerungen beobachteten barotropen Schelfrandwellen. Auch die vertikale Struktur des ersten Modes besitzt barotropen Charakter und unterstützt diese Aussage. Diese Modellergebnisse legen eine Interaktion von tropischem und subtropischem Atlantik über die Kunene-Zelle hinaus nahe. Das gilt insbesondere für das Signal im Februar und wird auch durch die Tracerausbreitungsexperiments (Abschnitt e) unterstützt.

***b) Investigation of the variability of southward advection of SACW in dependence on remote forcing in the tropical east Atlantic.***

Im Projekt SACUS wurden alle verfügbaren Daten einer Langzeitverankerung vor Walvis Bay (23°S (LTMB)) seit 2002 kompiliert und validiert. Der entstandene, zusammenhängende Datensatz erlaubt es erstmals, einen mittleren klimatologischen Zustand von Temperatur, Salzgehalt, Strömungen und der Wassermassenverteilung auf dem namibischen Schelf abzuschätzen (Junker et al. 2017). Die saisonale Variation des Anteils von Angola Gyre Central Water (AGCW) am Zentralwassermassenvorkommen auf dem Namibischen Schelf bei 23°S ist in Abbildung 4(a) dargestellt. Das AGCW, dessen Definition auf CTD-Messungen im Angola-Wirbel basiert, stellt einen Subtyp des South Atlantic Central Water

(SACW) dar. Die Analyse der Beobachtungsdaten zeigt, dass im klimatologischen Mittel etwa 60 – 65 Prozent des Wassers auf dem namibischen Schelf im März und April aus dem Norden stammen. Dabei ist dieser ermittelte Anteil annähernd unabhängig von der Wassertiefe, was auf eine nahezu barotrope Struktur der küstenparallelen Strömung in der Sommersaison (DJF) der Südhemisphäre zurückzuführen ist. In der Wintersaison hingegen ist die Strömung in der Mitte der Wassersäule (~63 m) am stärksten. Folglich ist die saisonale Amplitude des AGCW-Anteils in dieser Tiefe größer als etwa bei 93 m Tiefe. Das Minimum im AGCW-Anteil wird etwa im September (~17-45%) erreicht, zu einem Zeitpunkt, an dem sich die küstenparallele Stromkomponente umkehrt. Dieses Resultat wird durch den Verlauf der saisonal integrierten küstenparallelen Stromkomponente in Abbildung 4(b) bekräftigt.

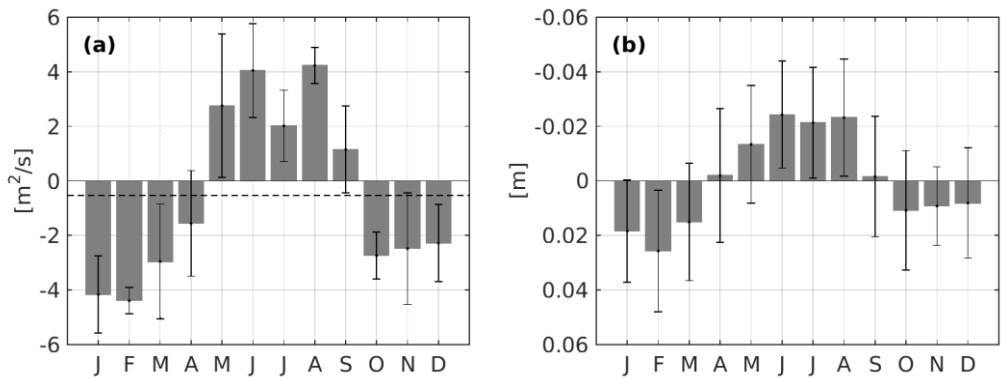


**Abbildung 4:** Saisonale Variation des Anteils von AGCW am Zentralwassermassenvorkommen (links) und der saisonal kumulierten küstenparallelen Stromkomponente (rechts) auf dem Namibischen Schelf bei 23°S in zwei verschiedenen Wassertiefen, Junker et al. 2017 .

Die saisonale Variabilität des küstenparallelen Transportes wird in Abbildung 5 mit der Variation des Wasserstandes aus Fernerkundungsdaten verglichen. Beide Signale zeigen eine komplexe saisonale Variation, die durch den Jahresgang dominiert wird. Aber auch Zyklen höherer Ordnung (halbjährlich, vierteljährlich) bestimmen den saisonalen Verlauf, wie aus der Existenz der beiden Minima (Februar, Oktober) und Maxima (Juni, August) deutlich wird.

Die zeitliche Veränderung des küstenparallelen Transports und des Wasserstands erfolgt in guter Übereinstimmung, was einen dynamischen Zusammenhang (etwa durch eine geostrophische Balance) der beiden Signale auf der saisonalen Zeitskala nahe legt.

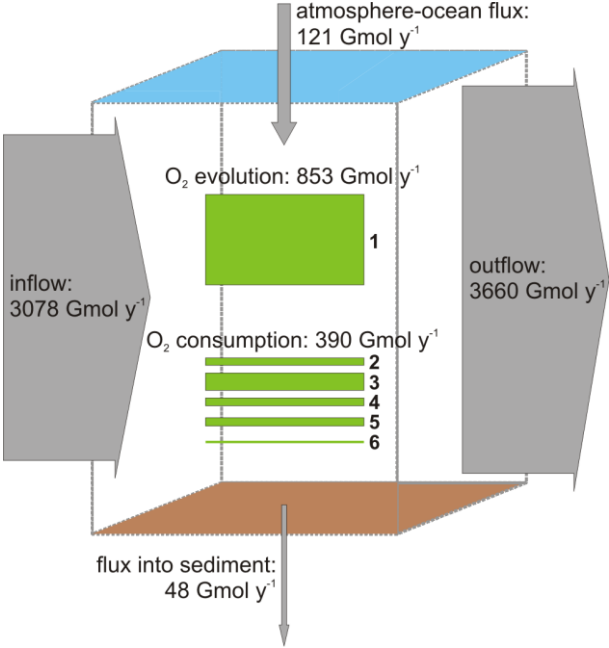
Studien zufolge, wird der Wasserstand entlang der süd-west Afrikanischen Küste im saisonalen Verlauf durch die Propagation von vier Kelvinwellen eingestellt (z.B. Ostrowski et al. 2009, Polo et al. 2008). Diese werden durch eine Veränderung im saisonalen Verlauf der zonalen Winde im westlichen tropischen Atlantik ausgelöst und propagieren anschließend entlang des äquatorialen Wellenleiters und der Afrikanischen Küste in das Auftriebsgebiet. Der Zusammenhang zwischen den Transporten entlang der Küste und dem Wasserstand zeigt auf, dass der Anteil tropischer Wassermassen auf dem namibischen Schelf zu einem großen Teil durch Prozesse erklärt werden kann, die ihren Ursprung im tropischen Atlantik haben.



**Abbildung 5:** (a) Saisonale Variation des küstenparallelen Transportes per Einheitslänge (m) auf dem Namibischen Schelf bei  $23^\circ\text{S}$ . Die gestrichelte Linie illustriert den jährlichen gemittelten Transport, welcher bei etwa  $-0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  liegt. Abbildung (b) zeigt die klimatologische Variation der Wasserstands anomalie an der Verankerungsposition abgeleitet aus Fernerkundungsdaten.

**c) Estimation of bulk oxygen consumption within the southward spreading SACW in the northern Benguela.**

In einer Modellstudie wurden die biogeochemischen und physikalischen Komponenten des Sauerstoffbudgets auf dem namibischen Schelf quantifiziert. In Abbildung 6 sind die Jahresmittelwerte für das Jahr 2006 für eine  $1^\circ \times 1^\circ$  Box vor Walvis Bay dargestellt. Der advective Sauerstofftransport dominiert deutlich über die biogeochemischen Sauerstoffraten. Allerdings wird ein deutlicher Sauerstoffüberschuss in Höhe von  $582 \text{ Gmol}/\text{Jahr}$  (Ausstrom minus Einstrom) offshore transportiert. Dieser Überschuss resultiert maßgeblich aus den biogeochemischen Prozessen in der Box. Die Primärproduktion ist der einzige Prozess, in dem Sauerstoff, hier  $853 \text{ Gmol}/\text{Jahr}$ , freigesetzt wird. Zooplanktonatmung ist mit  $163 \text{ Gmol}/\text{Jahr}$  der dominierende sauerstoffzehrende Prozess, gefolgt von der Nitrifizierung, Phytoplanktonatmung, Detritusmineralisierung und Sauerstoffzehrung im Sediment.



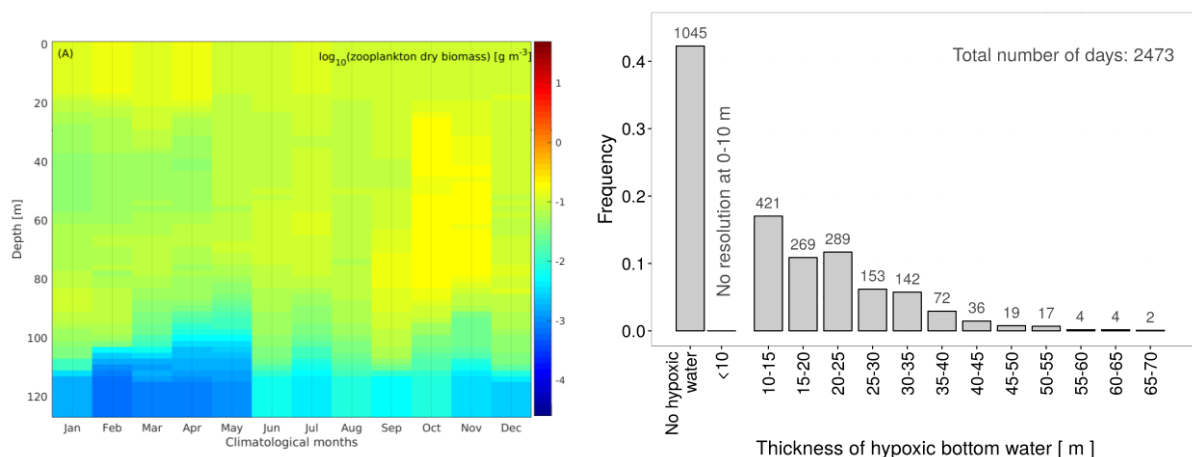
**Abbildung 6:** Mittlere physikalische und biogeochemische Sauerstoffflüsse in einer  $1^\circ \times 1^\circ$  Box auf dem namibischen Schelf vor Walvis Bay für das Jahr 2006 (aus Schmidt & Eggert 2016). Graue Pfeile:



advektiver Sauerstoffeinström und -ausström, Atmosphäre-Ozeanfluss und Ozean-Sedimentfluss, grüne Rechtecke: Sauerstofffreisetzung und Sauerstoffzehrung. (1) Primärproduktion, (2) Phytoplanktonatmung, (3) Zooplanktonatmung, (4) Detritusmineralisierung, (5) Nitrifizierung, (6) Oxidation von H<sub>2</sub>S.

Der im SACUS-Projekt kompilierte und validierte ADCP-Datensatz der Langzeitverankerung vor Walvis Bay bei 23°S (LTMB) beinhaltet neben der Strömung (Junker et al. 2017) auch die akustische Rückstreuung. Aus den Rückstremessungen wurde der *Acoustic Backscatter Cross Section* (ABCS) berechnet, der mit der Anzahl der streuenden Partikel in der Wassersäule einer bestimmten Größe in einem linearen Zusammenhang steht. Im Fall des 300 kHz-ADCPs, der im Projekt eingesetzt wurde, sind es Partikel mit etwa 5 mm Durchmesser. Damit können ABCS-Daten genutzt werden, um die Menge von Mesozooplankton und juvenilem Makrozooplankton in der Wassersäule zu quantifizieren. Zeitlich hochaufgelöste Zooplankton-Netzfänge wurden genutzt, um die ABCS-Daten in Zooplanktonbiomasse umzurechnen. Die LTMB-Rückstremessungen decken den Zeitraum vom 10. Dezember 2002 bis zum 14. November 2015 ab, jedoch mit zum Teil größeren Datenlücken. Insgesamt wurden stündliche Daten von 2473 Tagen (ca. 81 Monate) analysiert.

Zunächst kann aus der monatlichen Klimatologie der ABCS-Daten abgeleitet werden, dass die Zooplankton-Biomasse auf dem namibischen Schelf eine saisonale Verteilung hat. In den Monaten Januar bis März, wurden unterhalb von 100 m nur sehr niedrige Biomassen von weniger als 1 mg m<sup>-3</sup> gemessen (Abbildung 7a). Das kann als direkte Konsequenz der Saisonalität des polwärtigen Unterstroms, mit einem Maximum zu Beginn eines Jahres (Müller et al. 2014), interpretiert werden.



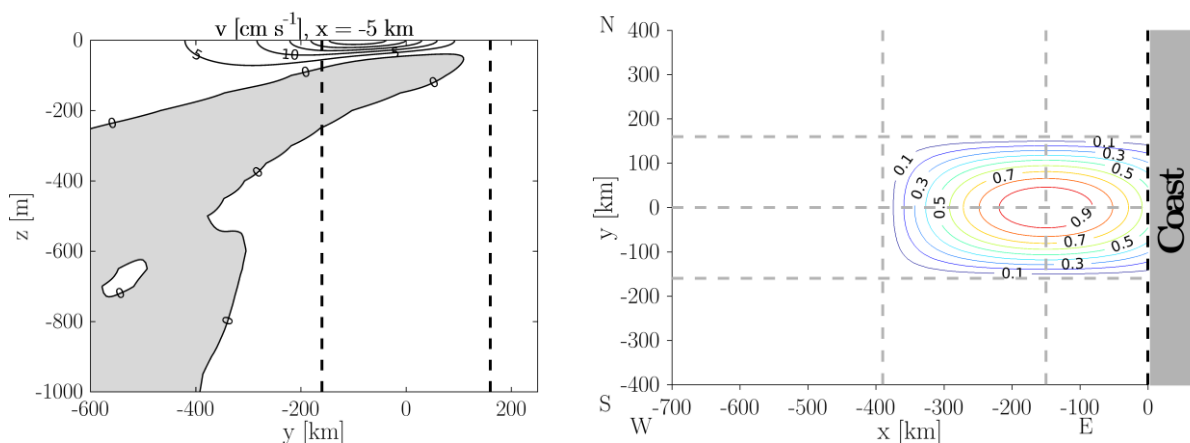
**Abbildung 7:(A)** Monatliche Klimatologie der aus der Rückstreuung abgeleiteten Zooplanktonbiomasse (B) Relative Häufigkeitsverteilung des Auftretens einer sauerstoffarmen Bodenschicht, welche über ein niedriges Zooplanktonsignal <3 mg m<sup>-3</sup> definiert wird.

Ein weiterer Schwerpunkt der Datenanalyse war das Ableiten eines Schwellenwertes der Rückstreuung bzw. der Zooplanktonbiomasse in der Wassersäule, um diesen als Proxy für sauerstoffarmes Bodenwasser (< 4 µmol l<sup>-1</sup>) auf dem namibischen Schelf zu nutzen. Sauerstoffsensoren sind teurer und anfälliger für Bewuchs und Verschmutzung als ADCPs und somit sind Langzeitdaten der Rückstreuung billiger und zuverlässiger zu erfassen als Sauerstoffkonzentrationen. Die biologische Annahme dieses Ansatzes ist, dass Zooplankton üblicherweise sauerstoffarmes Wasser meidet. Für die Analyse haben wir zwei komplementäre Datensätze der Konzentration des gelösten Sauerstoffs und der

Rückstreuung analysiert. Mit 1650 Tagen sind 35% der ABCS-Zeitreihe abgedeckt. In sauerstoffarmen Wasser ( $<4 \mu\text{mol l}^{-1}$ ) war das Zooplanktonsignal auch tatsächlich meist sehr niedrig mit Werten kleiner als  $3 \text{ mg m}^{-3}$  ( $=10^{-2.5} \text{ g m}^{-3}$ ). Da die Häufigkeitsverteilung der Messungen unterhalb dieses Schwellenwertes zeigt, dass 825 der 880 Datenpunkte (=94%) tatsächlich in sauerstoffarmen Wasser vorlagen, wurde dieser Schwellenwert für weitere Analysen genutzt, z.B. um die Dicke der sauerstoffarmen Bodenschicht zu bestimmen (Abbildung 7b). Dementsprechend war die Wassersäule an 1045 der 2473 Tage, d.h. an 42% der Tage, vollständig oxidiert. Eine dünne sauerstoffarme Bodenschicht von weniger als 25 m Dicke (1/5 der Wassertiefe) trat an 979 Tagen (40% der Fälle) auf und eine dickere Schicht von 25-40 m an 367 Tagen (15% der Fälle).

**d) Understand the flow fields in the Kunene cell in response to the wind field pattern in the northern Benguela.**

Das Strömungsfeld, insbesondere der küstenparallele Transport innerhalb der Kunene-Zelle werden zum einen durch die Fernwirkung aus dem tropischen Atlantik und zum anderen durch den lokalen Windantrieb über der Kunene-Zelle bestimmt. Die in Fennel et al. (2012) entwickelte analytische Theorie eines Küstenozeans wurde auf die Charakteristika des lokalen Windfeldes über der Kunene-Zelle angepasst und ausgewertet, um den Einfluss des lokalen Windantriebs besser zu verstehen. Im Gegensatz zur klassischen Theorie des Küstenauftriebs, bei der nur die küstenparallele Komponente des Windfeldes eine Rolle spielt, wird hier die räumliche Struktur des Windfeldes berücksichtigt. Dabei zeigt sich, dass die Entstehung von küstengefangenen Kelvinwellen durch eine meridionale Inhomogenität des Windes notwendig für die Ausbildung eines polwärtigen Unterstroms ist.



**Abbildung 8:** Rechts: Darstellung des Windantriebes in der analytischen Theorie. Links: Küstenparallele Strömung in einem Abstand von 5 km von der Küste. Die gestrichelte Linie zeigt die küstenparallele Ausbreitung des Windfeldes. Graue Bereiche zeigen den polwärtigen Unterstrom, d.h. negative Werte. In der Deckschicht ist ein äquatorwärtiger Küstenstrahlstrom ausgebildet.

Die Struktur der küstenparallelen Strömung variiert in küstenparalleler Richtung. Innerhalb des Windfeldes, dessen Maximum bei ca.  $18^{\circ}\text{S}$  liegt, bildet sich ein polwärtiger Unterstrom unterhalb des Küstenstrahlstroms. Südlich des Windfeldes liegt dieser tiefer und spreizt sich vertikal von 100 m auf mehr als 600 m auf.

Der Einfluss der Struktur des lokalen Windfeldes über der Kunene-Zelle auf die

Strömungsdynamik wird an Hand der analytischen Theorie diskutiert. Dabei wird das Integral über das Windfeld konstant gehalten. Eine Änderung des Abstandes des Windmaximums von der Küste erfordert eine Anpassung der zonalen und meridionalen Ausdehnung des (theoretischen) Windfeldes. Alle weiteren Parameter bleiben unverändert, darunter auch der Wert der maximalen Windschubspannung. Je weiter das Windmaximum von der Küste entfernt ist, desto stärker muss das Windfeld in Nord-Südrichtung gestaucht werden. Als Folge dessen erhöht sich der polwärtige Transport durch einen küstensenkrechten Schnitt an der Position des Windmaximums.

Wird nun andererseits die meridionale Ausdehnung des Windfeldes konstant belassen, müssen sowohl die maximale Windstärke als auch die zonale Windstruktur variiert werden, soll das Integral über das Windfeld weiterhin konstant bleiben. Mit zunehmender maximaler Windschubspannung und dabei abnehmender Ausdehnung des Windfeldes in Ost-West-Richtung steigt der polwärtige Transport an.

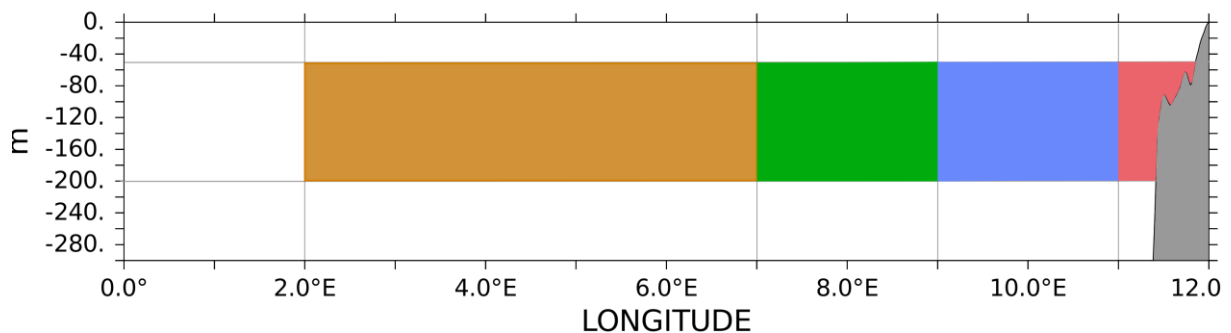
Die Strömungsdynamik in der Kunene-Zelle wird nicht nur durch das relativ ortsfeste lokale Windfeld bestimmt, sondern auch durch die geringe Schelfbreite und die Änderung in der Orientierung der Küstenlinie modifiziert. Letzteres trägt zur teilweisen Ablösung und somit zum Zusammenbruch der küstengefangenen Wellen bei. Als Konsequenz dessen findet ein westwärts gerichteter Transport hin zum offenen Ozean statt. Für den Vergleich von Ergebnissen der analytischen Theorie mit Ergebnissen realistischer Windanregung und Topographie wurden Experimente mit dem regionalen Ozeanmodell durchgeführt, bei denen die Stärke der Windschubspannung in der Kunenezelle verringert oder verstärkt wurde. Hier zeigt sich, eine negative Korrelation des Windschubs mit der polwärtigen Stromkomponente. Die sich ergebenden Tracerverteilungen auf dem namibischen Schelf verändern sich jedoch nicht monoton mit der Windstärke in der Kunene-Auftriebszelle. Die Konzentration eines Tracers mit äquatorialem Ursprung nimmt mit zunehmender Windstärke monoton ab. Ein Tracer, der im Unterstrom vor Lobito, d.h., im Küstenwellenleiter freigesetzt wird, propagiert jedoch auch bei geringer Windstärke nicht verstärkt auf den namibischen Schelf. Das zeigt, dass auch Transportwege neben dem unmittelbaren Küstenwellenleiter zum Austausch zwischen dem tropischen und subtropischen Ozean beitragen.

***e) Using mooring data and model tracer experiments to analyze the entrainment of ESACW into the Benguela upwelling area, i.e., quantify the relative importance of the Ekman compensation current and the pole-ward undercurrent.***

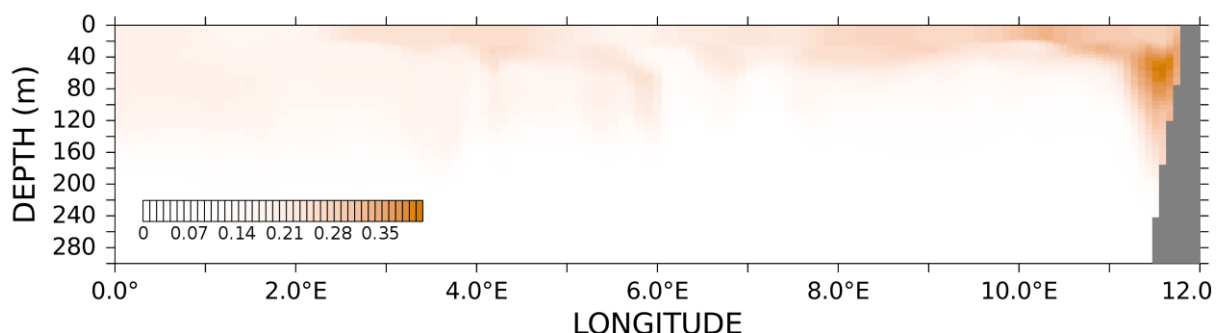
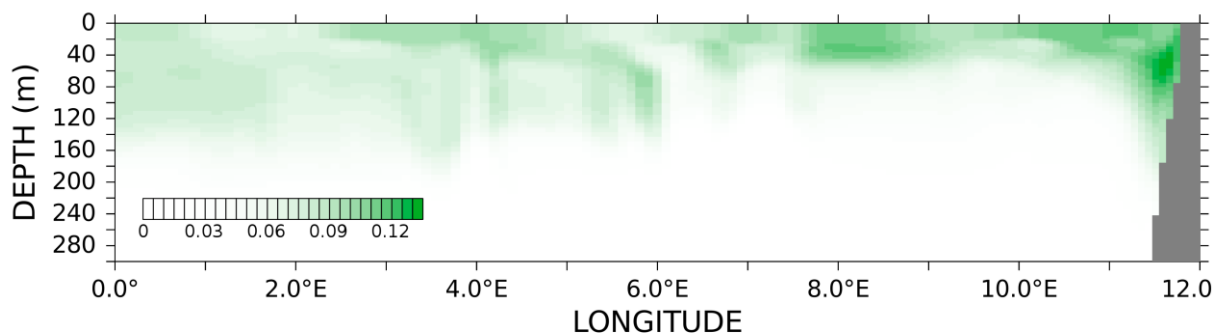
Als Ausbreitungswege des SACWs konnten zwei Pfade im Südost-Atlantik identifiziert werden. Den polwärtigen Transport von SACW innerhalb des äquatorialen und des Küsten-Wellenleiters wurde mittels Verankerungsdaten und Ergebnissen numerischer Modelle bestätigt (siehe oben). Einen zweiten wichtigen Transportweg stellen die zonalen Strombänder des äquatorialen Stromsystems im Südatlantik dar, die einen kräftigen zonalen Transport in östliche und westliche Richtung bedingen. Passive Tracer, die bei 5°S und einer Küstenentfernung von mehr als 330 km freigesetzt wurden, werden mit dem polwärtigen Unterstrom auf den namibischen Schelf transportiert und tragen zum lokalen Auftrieb maßgeblich bei. Inwiefern dieser zweite Transportweg dem SECC (South Equatorial Counter Current) oder dem SEUC (South Equatorial Undercurrent) zuzurechnen ist, muss noch abschließend geklärt werden.

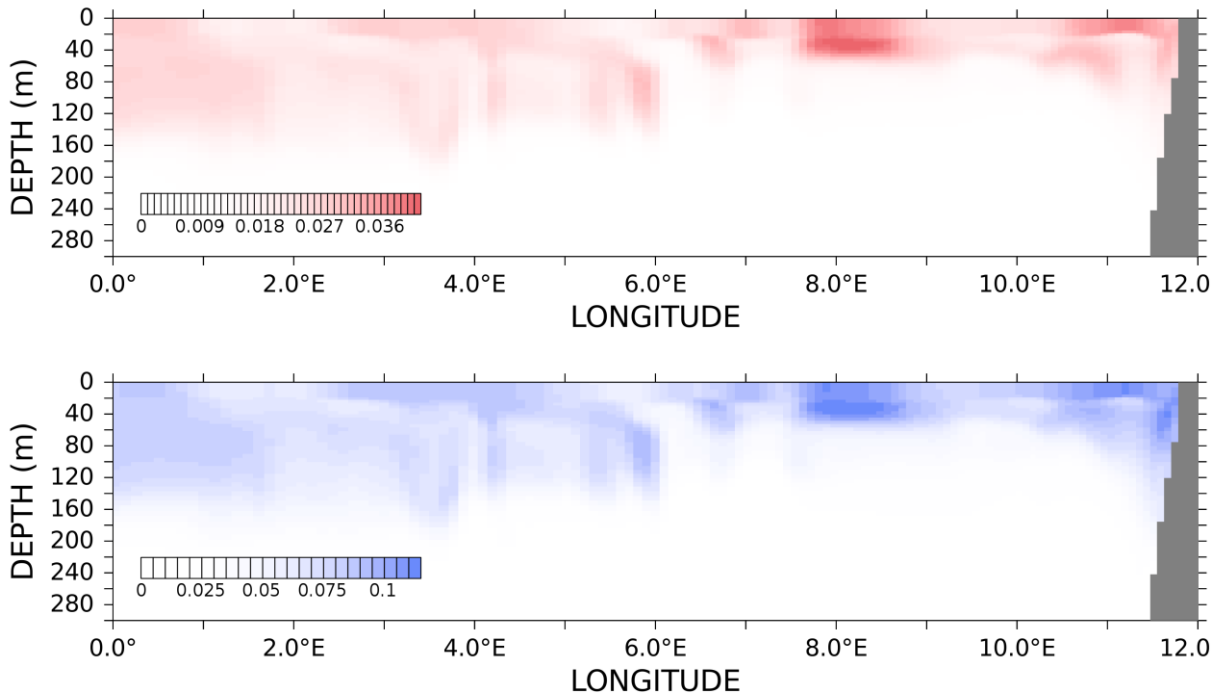
Innerhalb des Auftriebsgebietes stellt sich der polwärtige Transport nach der Passage der küstengebundenen Wellen ein. Die Doppelschelfstruktur unter der Zentral-Namibischen

Auftriebszelle (23°S) bewirkt eine Aufspaltung des polwärtigen Transportes in zwei Hauptzonen. Ein erstes Maximum des polwärtigen Transportes befindet sich direkt an der Küste. Dessen Entstehen kann durch küstengefangene Kelvinwellen erklärt werden. Ein zweites Maximum liegt über der Schelfkante. Dies entspricht der Position der maximalen Amplitude der Schelfrandwellen. Inwieweit auch eine Abstrahlung von Rossby-Wellen zur Ausbildung der Transportbänder beiträgt, ist nicht klar. Schmidt und Eggert, 2016 haben gezeigt, dass die in den Modellergebnissen beobachtete westwärtige Ausbreitung von Wirbelstrukturen mit einer Rossby-Wellendynamik verträglich ist.

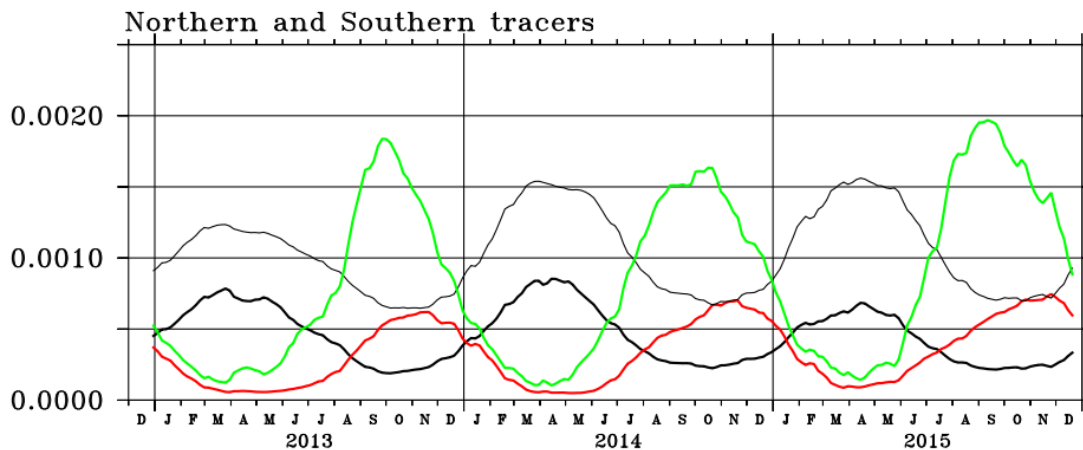


**Abbildung 9:** Quellgebiete von 4 passiven Tracern bei 5°S, deren Verteilung auf einem küstensenkrechten Schnitt bei 18°S in Abbildung 10 dargestellt ist





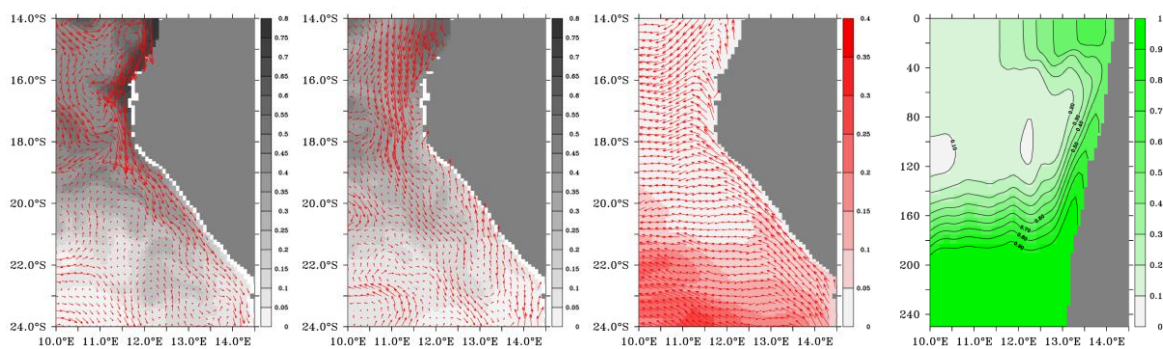
**Abbildung 10:** Die Abb. a) - d) zeigen den Querschnitt bei 18°S (innerhalb der Kunene Zelle). Die Farbschattierungen repräsentieren die Konzentration von drei passiven Tracern, die aus einer Tiefe zwischen 50 und 200 m stammen und ihr Quellgebiet bei 5°S haben. Die Tracer werden b) zwischen 11°E und der Küste, c) zwischen 9°E und 11°E und d) zwischen 2°E und 7°E freigesetzt.



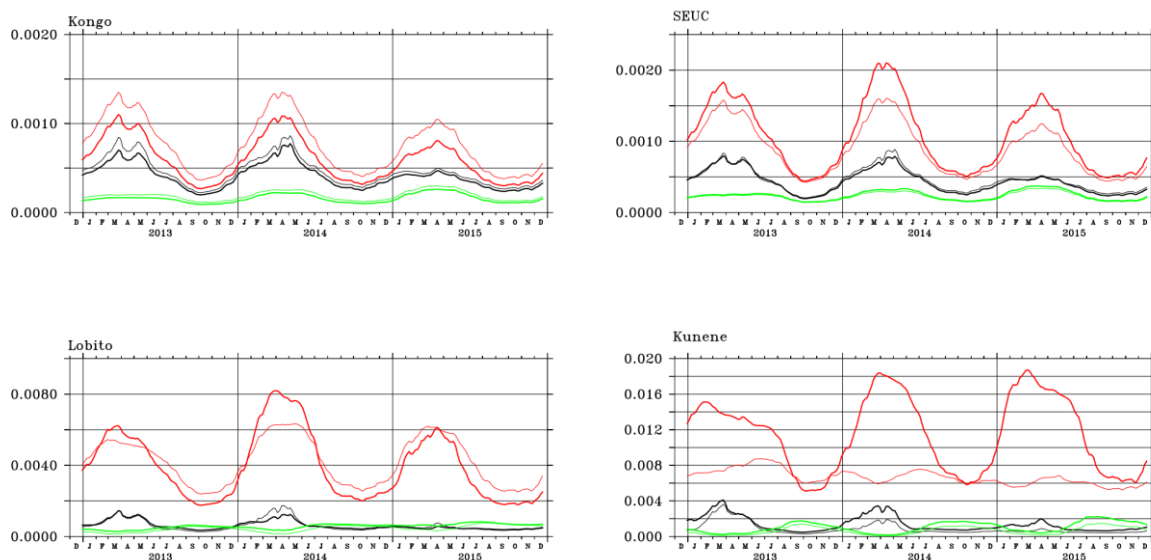
**Abbildung 11:** Menge passiver Tracer auf dem nördlichen Schelf (Wassertiefe < 200m) zwischen 20°S und 22°S. Um die Tracermengen zu vergleichen, sind sie mit der Gesamttracermenge im Modellgebiet normiert. Gebiet der Tracerfreisetzung: schwarz, dick: äquatorialer Unterstrom, schwarz dünn: Angolawirbel 200m-400m Wassertiefe, rot: Kapregion 0-150m Wassertiefe, grün: BUS zwischen 20°S und 24°S, 200m-400m Wassertiefe.

Abbildung 11 zeigt die saisonale Veränderung der Menge verschiedener Tracer auf dem Schelf Namibias polwärts der Kunenezelle zwischen 20°S und 22°S. Die Menge des äquatorialen Tracers bzw. des Tracers aus dem Angolawirbel ist maximal im April und minimal im Oktober. Die Menge des Tracers aus der Kapregion ändert sich gegenphasig. Diese Modellergebnisse entsprechen den Mooringdaten aus Abb. 5. Abb. 12 zeigt die typischen Stromfelder, die diese Tracervariabilität bedingen. Der äquatoriale Tracer wird im

Wesentlichen mit dem polwärtigen Unterstrom zwischen November und Februar auf den Schelf transportiert und bei abgeschwächtem Unterstrom bzw. tief eindringendem Küstenstrahlstrom äquatorwärts und ozeanwärts vom Schelf herunter transportiert. Die hohe Konzentration des äquatorialen Tracers in der Kunenezelle für Jan.-Feb. (Abb. 12a) kann mit dem Maximum des polwärtigen Transports im Februar (Abb. 3) assoziiert werden. Die Variabilität des Tracers aus der Kapregion hängt wesentlich mit dem Austausch zwischen Küste und offenem Ozean durch filamentartige Strukturen zusammen. Dadurch gelangt der Tracer in den Küstenstrahlstrom und wird äquatorwärts transportiert. Abb. 12c zeigt Auftrieb als einen weiteren Mechanismus der Variabilität der Wassermassenverteilung auf dem Schelf. Die auftreibende Wassermasse ist kein ESACW aus der Kapregion sondern tritt als eine Mischwassermasse, die sowohl Anteile von SACW, aber auch Wasser tropischen Ursprungs beinhaltet, vor dem Wasser aus der Kapregion auf dem Schelf in Erscheinung.



**Abbildung 12:** Ausbreitungsmechanismen der passiven Tracer auf dem nördlichen Schelf Namibias. a) Transport der äquatorialen Tracers Jan.-Feb. 2014 in 50m Tiefe mit dem verstärkten polwärtigen Unterstrom. b) Verdrängung des äquatorialen tracers bei schwachem Unterstrom bzw, tiefen Eindringen des äquatorwärtigen Küstenstrahlstroms Sep.-Okt. 2014. c) Äquatorwärtige Advektion des am Kap freigesetzten Tracers mit dem Küstenstrahlstrom Sep.-Okt. 2014 und der Oberfläche. Der Tracer breitet sich mit dem Benguelastrom in 50m-100m Tiefe aus, wird durch tief Vermischungsereignisse in die Deckschicht eingetragen und gelangt mit dem zur Küste hin orientierten Filamentanteilen in den Küstenstrahlstrom. d) Auftrieb eines Tracers aus dem Quellwasser des Küstenauftriebs unterhalb 200m Wassertiefe Sep.-Okt. 2014 bei 22°S.

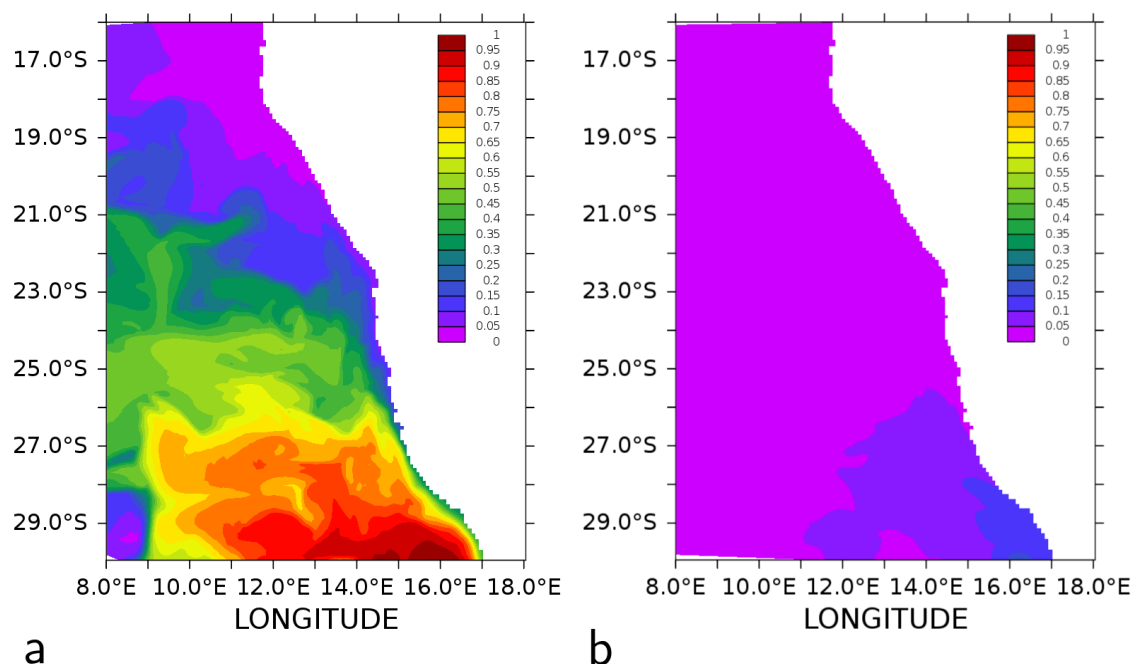


**Abbildung 13:** Variabilität der passiven Tracer auf dem nördlichen Schelf Namibias (Wassertiefe < 200m) zwischen 20°S und 22°S aus verschiedenen tropischen Quellregionen. Um die Tracermengen

zu vergleichen, sind sie mit der Gesamttracermenge im Modellgebiet normiert. Fett: Quelle in Küstennähe, dünn: Quelle im offenen Ozean, schwarz: Quelle an der Oberfläche, rot: Quelle in 50m-200m Wassertiefe, grün: Quelle im Zentralwasser. Die Quellgebiete sind aus der Abbildung zu entnehmen.

Abbildung 13 zeigt, inwieweit Tracer aus tropischen Quellregionen in das nördliche BUS eingetragen werden. Dabei tragen Tracer aus Quellregionen zwischen 50m und 200m Wassertiefe am meisten bei, da sie einfach in zonalen Transportbändern in das polwärtige Transportband im Küstenwellenleiter gelangen, Oberflächentracer dagegen werden mit dem Ekmantransport vorzugsweise nordwestwärts transportiert, während Tracer aus dem Zentralwasser zwar zu einem geringen Teil in das Auftriebsgebiet gelangen und dort mit dem Auftrieb (siehe den Zeitversatz insbesondere in Abb. 13d) auf den Schelf gelangen.

Um die zeitlichen Skalen des Wassermassentransportes im Südostatlantik abschätzen zu können, wurde die Ausbreitung von zwei passiven Tracern, die SACW und ESACW repräsentieren, untersucht. Die Spanne zwischen dem ersten Modellzeitschritt und dem Zeitpunkt, zu dem die Tracerkonzentration über dem namibischen Schelf mindestens in einer Gitterzelle mehr als 1% beträgt, wurde dazu als Indikator herangezogen. Bis etwa 1% des Wassers in der Zentralen Namibischen Auftriebszelle (etwa 23°S) aus dem Gebiet vor dem Kap der guten Hoffnung (16°E, 34°S) stammen, vergehen etwa 10 Monate. Im Vergleich dazu benötigt das SACW aus dem Äquatorialen Unterstrom (9°W, 2°N bis 2°S) ca. 1,5 Jahre um die gleiche Konzentration im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet bei (14°E, 18°S) zu erreichen.



**Abbildung 14:** Passive Tracer (ESACW), die nahe dem Kap der guten Hoffnung freigelassen werden. Gezeigt ist das zeitliche und räumliche Maximum der Konzentration für den Zeitraum Okt bis Dez 2015 der oberen 500 m. Der passive Tracer stammt aus einer Tiefe von a) 0 bis 200m und b) 200 bis 400 m.

Das Quellgebiet des ESACWs im Kapbecken stellt eine Übergangszone zwischen dem Zentralwasser des Atlantiks und dem des Indiks dar. Die hydrographischen Charakteristika des ESACWs hängen unter anderem von der Tiefe ab, in der die Wassermassen aus

Atlantik und Indik gemischt werden. Deshalb ist neben den Ausbreitungszeiten und -pfade auch die Kenntnis der Ursprungstiefe des ESACWs für das Verständnis des Benguela-Auftriebsgebietes notwendig.

Im regionalen Ozeanmodell wurden zwei passive Tracer zur Markierung des ESACW eingesetzt. Das Tracerquellgebiet liegt zwischen 16°E und 17,9°E sowie zwischen 33,4°S und 34°S. Die Tracer wurden in zwei übereinander liegenden Tiefenhorizonten von 0 – 200 m und von 200 – 400 m freigesetzt. Durch den Benguelastrom wird ein Großteil beider Tracer in nordwestliche Richtung verdriftet (Abbildung 14). Der passive Tracer aus den oberen 200 m trägt den Hauptanteil dieser beiden Tracer im Auftriebsgebiet bei, wohingegen die Konzentration des ESACW aus 200 bis 400 m während der gesamten Modelllaufzeit unter 5% beträgt.

### **Zitierte Literatur:**

*Buchwald, V. T., & Adams, J. K. (1968). The Propagation of Continental Shelf Waves. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 305(1481), 235–250. <http://doi.org/10.1098/rspa.1968.0115>*

*Fennel, W., Junker, T., Schmidt, M., & Mohrholz, V. (2012). Response of the Benguela upwelling systems to spatial variations in the wind stress. Continental Shelf Research, 45, 65–77, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2012.06.004>*

*Hagen, E. (1979). Zur Dynamik charakteristischer Variationen mit barotropem Charakter in mesoskalen ozeanologischen Feldverteilungen küstennaher Auftriebsgebiete. Geodätische Und Geophysikalische Veröffentlichungen, 29(4).*

*Lass, H.-U., & Mohrholz, V. (2005). On the fluctuations and vertical structure of the shelf circulation off Walvis Bay, Namibia. Continental Shelf Research, 25(12–13), 1473–1497. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2005.04.012>*

*Ostrowski, M., da Silva, J. C. B., & Bazik-Sangolay, B. (2009). The response of sound scatterers to El Nino- and La Nina-like oceanographic regimes in the southeastern Atlantic. ICES Journal of Marine Science, 66(6), 1063–1072. <http://doi.org/10.1093/icesjms/fsp102>*

*Polo, I., Lazar, A., Rodriguez-Fonseca, B., & Arnault, S. (2008). Oceanic Kelvin waves and tropical Atlantic intraseasonal variability: 1. Kelvin wave characterization. Journal of Geophysical Research, 113(C7), C07009. <http://doi.org/10.1029/2007JC004495>*

## **II. 2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigsten Positionen (Personal und Reisekosten) wurden entsprechend der Bewilligung verwendet.

<b>Position</b>		<b>Ausgaben</b>
012	Personal	128 053,46 €
043	Verbrauchsmaterial	6 480,03 €
043	Transport	9 740,75 €
046	Reisen (Inland)	1 714,43 €



046	Reisen (Ausland)	36 504,57 €
	Gesamt	182 493,24 €

### **II. 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die von uns im Rahmen des Teilprojektes durchgeführten Forschungsarbeiten waren in vollem Umfang notwendig und angemessen, um die im Antrag dargestellten Ziele des Forschungsvorhabens zu erreichen.

### **II. 4. Voraussichtliche Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die gewonnenen Felddaten, das eingerichtete und validierte Modell sowie die numerischen Ergebnisse sind Voraussetzung für das bereits geförderte BMBF-Projekt SACUS-II. Sie liefern einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Dynamik des Benguela Auftriebsgebiets und haben die Arbeit im EU-Projekt PREFACE befruchtet. Zusammen mit dem im Projekt GENUS entwickelten Ökosystemmodell ist das SACUS-Modellsystem Grundlage für beantragte Projekte zur Bearbeitung anderer wissenschaftlicher Fragestellungen zur Dynamik von Ökosystemen im tropischen und subtropischen Atlantik.

Eine wirtschaftliche Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse ist nicht gegeben, da die Projektarbeit einen Beitrag zur Grundlagenforschung darstellt. Die langjährige Forschungskoooperation mit den namibischen Partnern wurde im Projekt erfolgreich fortgesetzt und ausgebaut. Die Universität Namibia konnte als Kooperationspartner gewonnen werden, so dass sich neue Ansätze in der wissenschaftlichen Zusammenarbeit und dem Ausbau von Kapazitäten (z.B. RGNO) in Namibia ergeben haben.

### **II. 5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Rahmen der Projektdurchführung wurden laufende Literaturrecherchen zum Untersuchungsthema durchgeführt. Es wurden keine Ergebnisse in der neueren Literatur gefunden, die die Durchführung des Vorhabens wesentlich beeinflusst oder Änderungen des Arbeitsplans notwendig gemacht hätten.

### **II. 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen im Berichtszeitraum**

#### **Erfolgte Veröffentlichungen:**

Junker, T., Schmidt, M., & Mohrholz, V. (2015). The relation of wind stress curl and meridional transport in the Benguela upwelling system. *Journal of Marine Systems*, 143, 1–6. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.10.006>

Junker, T., Mohrholz, V., Siegfried, L., & van der Plas, A. K. (2017). Seasonal to interannual variability of water mass fraction and currents on the Namibian shelf. *Journal of Marine Systems*, 165, 36–46. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.09.003>

#### **Geplante Veröffentlichungen:**

Junker, T., Siegfried, L., Mohrholz, V., & van der Plas, A. (2017b). Continental shelf wave propagation along the south-west African coast. to be submitted.

#### **Tagungsbeiträge, Präsentationen:**

Junker, T., Mohrholz, V., & Schmidt, M. (2014). Meridional transport along the southwest African coast and its relation to the wind stress curl. IMBER Open Science Conference -- Bergen, Norwegen.

Siegfried, L., Mohrholz, V., Heene, T., van der Plas, A. (2014) 12-year time series of a hydrographic mooring on the Namibian shelf. Benguela Current Commission Symposium – Swakopmund, Namibia (Poster).

Siegfried, L., Mohrholz, V., Heene, T., van der Plas, A. (2014) 12-year time series of a hydrographic mooring on the Namibian shelf. University of Cape Town, Südafrika.

Schmidt M, Eggert A, Mohrholz V: Dynamics of the Northern Benguela upwelling system seen in a coupled 3-dimensional numerical circulation model. IMBER Open Science Conference -- Bergen, Norwegen.

Siegfried, L., Junker, T., Mohrholz, V., Schmidt, M. (2015) Propagation of coastally trapped waves in the Northern Benguela studied with hydrographic moorings and a regional circulation model. EGU – Wien, Österreich.

Schmidt, M., Junker, T., Siegfried, L., Mohrholz, V., Muller, A. A., & van der Plas, A. (2015). The relation of SST-bias and water mass distribution seen in a regional numerical ocean model of the Benguela system. PIRATA-PREFACE-CLIVAR Tropical Atlantic Variability Conference 2015 -- Cape Town, Südafrika.

Junker, T., Mohrholz, V., Siegfried, L., & van der Plas, A. K. (2016). Seasonal to interannual variability of water mass fraction and currents on the Namibian shelf. Ocean Sciences Meeting 2016 -- New Orleans, Louisiana, USA.

Schmidt, M., Eggert, A. (2016) Modelling Ecosystem Dynamics of the Oxygen Minimum Zones in the Angola Gyre and the Northern Benguela Upwelling System. Ocean Sciences Meeting 2016 -- New Orleans, Louisiana, USA.

Junker, T., Mohrholz, V., Siegfried, L., Schmidt, M., & van der Plas, A. (2016). Wave propagation characteristics along the south-west African shelf as revealed by mooring observations. CLIVAR - PIRATA - PREFACE Meeting 2016 - Paris, Frankreich.

Mohrholz, V., Lange, T., Heene, T., Louw, D., & van der Plas, A. (2016). TKE dissipation and turbulent mixing in the Northern Benguela. CLIVAR - PIRATA - PREFACE Meeting 2016 - Paris, Frankreich.

Siegfried, L., Schmidt, M. (2016) Origin of upwelled water in the Benguela system: source region, upwelling depth and propagation pathways. CLIVAR - PIRATA - PREFACE Meeting 2016 - Paris, Frankreich.

### **Datensicherung:**

Die hydrographischen Daten der METEOR-Fahrten und der Langzeitverankerung bei 18°S sind in der IOW Datenbank gesichert und werden sukzessive in die Pangaea Datenbank überführt.

Die auf den Fahrten mit dem namibischen Forschungsschiff MIRABILIS erhobenen Daten sind in der, für das südliche Afrika zuständigen, regionalen Datenbank SADCO eingepflegt. Aus rechtlichen Gründen ist eine Veröffentlichung der Daten in Pangaea nicht möglich. Im Rahmen des MOU mit Namibia stehen die Daten jedoch für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung.

Zuwendungsempfänger: <b>Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde</b>	Förderkennzeichen: 03G0837B
Vorhabenbezeichnung: SACUS - Southwest African Upwelling System and Benguela Niños Teilprojekt 2: Variability of poleward transports in the eastern boundary current of the Southeast Atlantic.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2013 – 30.06.2016	

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

SACUS ist ein Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders zu den Themen „Forschung für Nachhaltigkeit: System Erde – Klimafaktor Meer“ und „System Erde: Meeres- und Polarforschung für Klima und Umwelt“. Im Rahmen des Projektes wurden mögliche Folgen des Klimawandels auf die Interaktion zwischen tropischen Atlantik und dem nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet untersucht und das Verständnis der Rolle der Ostrandstromsysteme im Klimasystem der Erde verbessert. Das Vorhaben ist Bestandteil des SPACES (Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes) Programmes des BMBF.

In TP2 wurden Feldmessungen und Modellrechnungen durchgeführt, die zum besseren Verständnis der Rolle des Küstenwellenleiters für die Konnektivität im Südostatlantik beitragen. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen Aussagen über die Reaktion von Ostrand-Auftriebsgebieten auf mögliche Klimaveränderungen.
- 2. wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen**

Das Vorhaben ist Teil der Grundlagenforschung zur Variabilität der Zirkulation im Südostatlantik. Insbesondere die Langzeitmessungen haben die Datengrundlage im Untersuchungsgebiet wesentlich erweitert und tragen gemeinsam mit der Modellbildung zum Verständnis der physikalischen Zusammenhänge im Küstenauftriebsgebiet vor Südwestafrika und der Wechselwirkung zwischen tropischen und subtropischen Ozean bei. Mit Hilfe der Verankerungen war es erstmal möglich die Signalausbreitung im Küstenwellenleiter des Benguela-Auftriebsgebietes in einem breiten zeitlichen Spektrum zu beobachten.

Für den erfolgreichen Betrieb der Verankerungen war die enge Zusammenarbeit mit dem NatMIRC in Swakopmund entscheidend. Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Felddaten wurden zeitnah den regionalen Kooperationspartnern zur Verfügung gestellt und ergänzen deren lokale Monitoringprogramme.
- 3. Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des Zuwendungsempfängers brauchen nicht offenbart zu werden):**

  - 3.1 *Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten*

Es sind keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen für das TP2 am IOW geplant.
  - 3.2 *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),*

Direkte wirtschaftliche Erfolge sind nach Projektende nicht zu erwarten. Die gewonnenen Daten leisten indirekt einen Beitrag zum Fischereimanagement in der Region. Sie erweitern die Datenbasis der regionalen Monitoringprogramme und werden durch die lokalen Behörden u.a. für die Erstellung von Empfehlungen für Fangmengen, sowie für Zwecke der Umweltüberwachung genutzt.

Das im Rahmen des Projektes weiterentwickelte Ökosystemmodell ist die Basis der weiterführenden Modelluntersuchungen im Folgeprojekt SACUS II. Es ermöglicht daneben Untersuchungen z.B. zur Sedimentdynamik, die z.B. für den geplanten Phosphatabbau auf dem Namibischen Schelf von Bedeutung sind. In Zukunft könnte durch Integration eines Fischmoduls auch die Wechselwirkung von physikalischen Prozessen mit Fischpopulationen untersucht werden.

*3.3 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,*

Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Daten wurden validiert und in der IOW Datenbank gesichert. Durch die Namibischen Projektpartner werden die Daten in regionale Datenbanken (SADCO) eingepflegt und stehen damit der regionalen wissenschaftlichen Community zur weiteren Nutzung langfristig über das Projektende hinaus zur Verfügung. Die enge Kooperation mit den Regionalen Partnern leistete einen wichtigen Beitrag zum „Capacity building“ und zur Vertiefung wissenschaftlicher Expertise an den Partnerinstituten der Region bei. Die im Rahmen der Mirabilis Expeditionen geleistete technische Unterstützung erhöht die Nutzbarkeit des Schiffes für die Regionalen Partner.

*3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse*

Mit den eingesetzten Verankerungen ist es erstmals gelungen eine Beobachtungsplattform auf den gesamten nördlichen Benguela auszudehnen. Das System ist Teil eines Netzwerks im äquatorialen und südöstlichen Atlantik, das es erlaubt anhand von Messdaten neue Erkenntnisse über die beckenweite Dynamik und Variabilität des Südatlantiks zu gewinnen. Ein dauerhafter Betrieb einzelner Verankerungen an Schlüsselpositionen des Ökosystems könnte entscheidend zum Verständnis der Variabilität des Benguela-Systems beitragen, und wird auch von den regionalen Partnern als sinnvoll angesehen. Jedoch sind hier noch nicht die technischen Kapazitäten vorhanden um die Stationen mit eigenen Mitteln auch nach Projektende fortzuführen.

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse bilden die Basis für das Nachfolgeprojekt SACUS II, mit dem das Verständnis der regionalen Klimavariabilität weiter verbessert werden soll. Sowohl die numerischen Modellergebnisse als auch das validierte Modellsystem stehen der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung. Die erfolgreiche Simulation des Benguela-Auftriebssystems kann zur Entwicklung eines modellbasierten kurzfristigen Vorhersagesystems der hydrographischen Verhältnisse im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet beitragen. Mit den im Projekt gewonnenen Erfahrungen kann das vorhandene regionale Monitoringprogramm optimiert werden.

**4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Das Projekt konnte insgesamt sehr erfolgreich durchgeführt werden. Die Analyse der gewonnenen Messdaten und Modellergebnisse ist weit fortgeschritten. Es gab keine Arbeiten die nicht zum Projektergebnis beigetragen haben.

**5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen**

**(Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt),**

Die erreichten Ergebnisse wurden und werden in der Folgezeit in „peer reviewed“ Fachzeitschriften veröffentlicht und auf Fachkonferenzen insbesondere in Namibia und Südafrika präsentiert.

**6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.**

Die ursprüngliche Ausgaben und Zeitplanung wurde im Wesentlichen eingehalten. Entsprechend der aktuellen Erfordernisse wurden die Ausgaben der Reise- und Expeditionskosten sowie die Beschaffung von Verbrauchsmaterialien angepasst.

**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
#1	Klimatologie der Strömung, Temperatur und des Salzgehaltes an der Verankerungsposition 23°S auf dem Namibischen Schelf: Verwertung für klimatologische Untersuchungen und Modellvalidierung	Veröffentlicht in Junker et al., 2017. Weitere Analysen der Zeitreihe fließen in SACUS II ein
#2	Zeitreihenmessungen an der SACUS Verankerung bei 18°S.	Die Daten sind in der IOW Datenbank gesichert und werden in der Pangaea Datenbank veröffentlicht. Erweiterung in SACUS II geplant
#3	Modellrechnungen mit dem Ökosystemmodell für das Benguela Auftriebsgebiet mit und ohne passiven Tracern.	Die Auswertung für SACUS I Fragestellungen ist abgeschlossen. Die Modelldaten stehen auf dem Thredd Server des IOW zur Verfügung. Die Ergebnisse fließen direkt in die geplanten Arbeiten von SACUS II ein

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>
3. Titel <b>SACUS - Southwest African Upwelling System and Benguela Niños Teilprojekt 2: Variability of poleward transports in the eastern boundary current of the Southeast Atlantic.</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Mohrholz, Volker; Schmidt, Martin; Junker, Tim; Siegfried, Lydia</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>30.06.2016</b>
	6. Veröffentlichungsdatum <b>09.01.2017</b>
	7. Form der Publikation <b>Interner Bericht</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde Seestraße 15 18119 Rostock-Warnemünde</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen <b>03G0837B</b>
	11. Seitenzahl <b>18</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	13. Literaturangaben <b>6</b>
	14. Tabellen <b>2</b>
	15. Abbildungen <b>14</b>
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>Projekträger Jülich, Geschäftsbereich Meeresforschung, Geowissenschaften, Schiffs- und Meeres-technik (MGS), Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock, 09.01.2017</b>	
18. Kurzfassung Das Projekt untersucht die Veränderlichkeit der physikalischen Transportprozesse, die die Wassermassendynamik und damit die Ökosystemdynamik auf dem Schelf Namibias bedingen. Ein Schwerpunkt ist dabei der durch die Ostrandströme vermittelte Wassermassenaustausch zwischen dem tropischen und dem subtropischen Ozean. Der Export von suboxischem und nährstoffreichem Südatlantischen Zentralwasser (SACW) in den Angolastrom und das Benguelasystem ist ein Schlüsselprozess für das Benguela-Ökosystem, weil SACW eine Quellwassermasse des Benguela-Auftriebs darstellt. Die Variabilität der Ostrandströme als Resultat einer Fernwirkung aus dem Äquatorgebiet und ihre Modifikation durch die lokalen Winde wurde sowohl durch Feldmessungen mit Verankerungen vor der Küste Angolas und Namibias in Kombination mit Fernerkundungsdaten als auch theoretisch mit analytischen und numerischen Modellen untersucht. Der zeitabhängige polwärts gerichtete Transport von SACW mit dem Angolastrom durch die Angola-Benguela-Frontenzone (ABFZ) wurde an verschiedenen Orten auf dem namibischen Schelf gemessen. Ausbreitungswege und Transformation von Wassermassen werden mit numerischen Experimenten mit passiven Tracern mit einem regionalen Zirkulationsmodell untersucht.	
19. Schlagwörter Küstenauftrieb, Benguela, Kelvinwellen, Sauerstoffminimum-Zone, Ökosystemmodell	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) <b>Final report</b>
3. title <b>SACUS - Southwest African Upwelling System and Benguela Niños Teilprojekt 2: Variability of poleward transports in the eastern boundary current of the Southeast Atlantic.</b>	
4. author(s) (family name, first name(s)) <b>Mohrholz, Volker; Schmidt, Martin; Junker, Tim; Siegfried, Lydia</b>	5. end of project <b>30.06.2016</b>
	6. publication date <b>09.01.2017</b>
	7. form of publication <b>Internal report</b>
8. performing organization(s) (name, address) <b>Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde Seestraße 15 18119 Rostock-Warnemünde</b>	9. originator's report no. -
	10. reference no. <b>03G0837B</b>
	11. no. of pages <b>18</b>
12. sponsoring agency (name, address) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>	13. no. of references <b>6</b>
	14. no. of tables <b>2</b>
	15. no. of figures <b>14</b>
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) <b>Projektträger Jülich, Geschäftsbereich Meeresforschung, Geowissenschaften, Schiffs- und Meeres-technik (MGS), Forschungszentrum Jülich GmbH, Schweriner Str. 44, 18069 Rostock, 09.01.2017</b>	
18. abstract The project investigates the variability of physical transport processes determining water mass dynamics and thus the ecosystem dynamics on the Namibian shelf. The focus is on the water mass exchange between the tropics and the subtropics conveyed by the eastern boundary currents. The export of suboxic and nutrient rich South Atlantic Central Water (SACW) into the Angola Current and the Benguela System is a key process force Benguela ecosystem, since SACW is a source water mass for Benguela upwelling. The variability of the Eastern Boundary Currents as remotely forced from the equatorial area but modified by local winds was investigated with field measurements with moorings off Angola and Namibia in combination with remote sensing data and theoretically with analytical and numerical models. Time series of the pole-ward transport of SACW through the Angola-Benguela Frontal Zone was measured at different locations on the Namibian shelf. Pathways and transformation of water masses are investigated by numerical tracer release experiments with a regional circulation model.	
19. keywords Coastal upwelling, Benguela, Kelvin waves, Oxygen minimum zone, Ecosystem model	
20. publisher	21. price