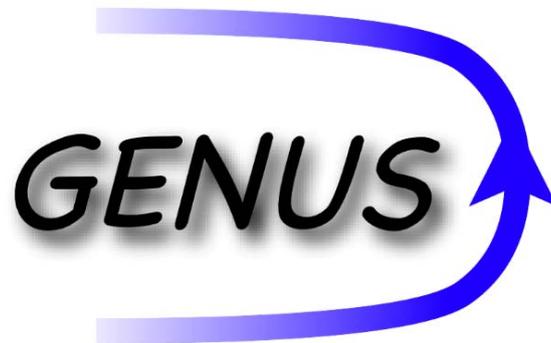


# GENUS I Abschlussbericht



*Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System*

Förderkennzeichen: 03F0497A  
Projektlaufzeit: 01.03.2009 - 30.04.2012

*Ansprechpartner/Koordinator:*

Prof. Dr. Kay-Christian Emeis

Universität Hamburg

Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit

Institut für Biogeochemie und Meereschemie

Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

Tel: 040-42838 4992

Fax: 040-42838 6347

E-Mail: [kay.emeis@zmaw.de](mailto:kay.emeis@zmaw.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Leitwort GENUS I</b>	<b>1-11</b>
<b>Schlussberichte GENUS I</b>	
<b>Teilprojekt 0 (Koordination)</b>	<b>1-8</b>
Universität Hamburg, Institut für Biogeochemie und Meereschemie	
<b>Teilprojekt 1</b>	<b>1-22</b>
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	
<b>Teilprojekt 2</b>	<b>1-25</b>
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde	
<b>Teilprojekt 3</b>	<b>1-14</b>
Universität Hamburg, Institut für Biogeochemie und Meereschemie	
<b>Teilprojekt 4</b>	<b>1-19</b>
Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie, Bremen	
<b>Teilprojekt 5</b>	<b>1-13</b>
Universität Hamburg, Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft	
<b>Teilprojekt 6</b>	<b>1-13</b>
Marine Zoologie, Universität Bremen	
<b>Teilprojekt 7</b>	<b>1-16</b>
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven	

# **Schlussbericht GENUS I**

**Leitwort**

## 1. Partnereinrichtungen

*Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-Met), Hamburg*

Teilprojekt 1

(Prof. Dr. Daniela Jacob)

Bundesstraße 53

20146 Hamburg

*Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)*

Teilprojekt 2

(Dr. Volker Mohrholz, Dr. Martin Schmidt, Dr. Norbert Wasmund, Dr. Anja Eggert)

Seestraße 15

18119 Rostock

*Universität Hamburg*

*Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit*

Institut für Biogeochemie und Meereschemie

Teilprojekt 3

(Prof. Dr. Kay-Christian Emeis, Dr. Niko Lahajnar)

Bundesstraße 55

20146 Hamburg

*Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie (ZMT) GmbH*

Teilprojekt 4

(Dr. Werner Ekau, Dr. Tim Rixen, Dr. Andreas Kunzmann)

Fahrenheitstraße 6

28359 Bremen

*Universität Hamburg*

*Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit*

Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft

Teilprojekt 5

(Prof. Dr. Christian Möllmann, Dr. Rolf Koppelman, Dr. Bettina Martin)

Große Elbstraße 133

22767 Hamburg

*Universität Bremen*

Marine Zoologie (FB 2)

Teilprojekt 6

(Prof. Dr. Wilhelm Hagen, PD Dr. Holger Auel)

Leobener Straße

28359 Bremen

*Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung*

Teilprojekt 7

(Prof. Dr. Friedrich Buchholz)

Am Handelshafen 12

27570 Bremerhaven

Beitrag zum internationalen **IMBER-Projekt**

Partner der **Benguela Current Commission** (Windhuk, Namibia)

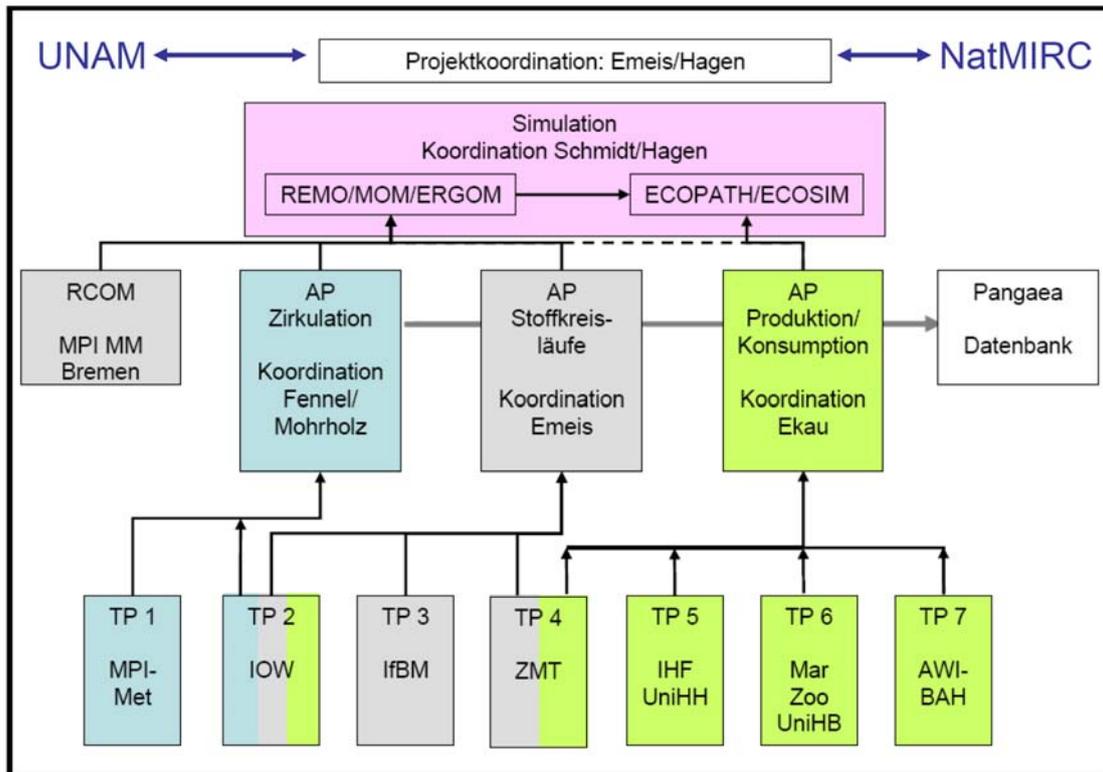


Abb. 1: GENUSteilprojekte (TP), Arbeitspakete (AP) und Modellstruktur

## 2. Zeitlicher Verlauf der Kooperation

Die wissenschaftliche Kooperation wird seit 2009 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als Verbundprojekt GENUSt (*Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System*) gefördert. Die Mitglieder des Konsortiums kooperierten bereits vor dieser Zeit im Rahmen nationaler und internationaler Projekte (z.B. JGOFS, GLOBEC, NAMIBGAS). GENUSt wurde in Vorbereitung auf das international koordinierte IMBER (*Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research*) Projekt konzipiert, und bereits im Jahr 2008 wurden zwei Pilotstudien mit den Forschungsschiffen MARIA S. MERIAN und METEOR in der Region durchgeführt, bevor das Projekt am 01.03.2009 begann. Diese Vorarbeiten haben die wissenschaftliche Grundlage für die Hypothesen des GENUSt-Projekts gelegt und die ausgezeichnete Kooperation der beteiligten Gruppen und in der Region begründet. Die erste Projektphase endete am 30.04.2012, die zweite Phase begann am 01.05.2012 und wurde vom BMBF bis zum 30.04.2015 bewilligt. Es ist Teil der „Forschungspartnerschaften für die Bewertung komplexer Prozesse im System Erde in der Region Südliches Afrika - SPACES“ im BMBF-Rahmenprogramm "Forschung für nachhaltige Entwicklung" (FONA).

## 3. Wissenschaftliche Kurzdarstellung des Kooperationsprojektes

Wie werden marine Ökosysteme auf den globalen Umweltwandel reagieren? Klimaveränderung ist ein Schlüsselphänomen des durch menschliche Aktivitäten verursachten globalen Umweltwandels. Damit verbunden sind teilweise dramatische Veränderungen der globalen und regionalen Stoffflüsse in marinen Ökosystemen, die zu gravierenden ökologischen und sozioökonomischen Konsequenzen führen. Insbesondere Küsten- und Schelfmeere spielen eine zentrale Rolle für die Speicherung von Treibhausgasen im Ozean. Sie beherbergen 25% der globalen biologischen Produktivität, stellen als reiche Fischgründe 90% der Fischereierträge - insbesondere Küstenauftriebsgebiete wie das vor Südwestafrika - und bieten andere wertvolle Ressourcen wie Diamanten, Erdöl- und Erdgasvorkommen und Phosphorite.

Das Schicksal des im Meer gespeicherten Kohlendioxids hängt entscheidend von den Nahrungsnetzstrukturen sowie vom Austausch zwischen Schelf und angrenzendem Ozean ab. Grundlegende Wechsel in der Zusammensetzung ökologischer Gemeinschaften an der Basis

der Nahrungspyramide wurden in letzter Zeit häufig beobachtet, u.a. im Küstenauftriebsgebiet vor Namibia. Die Auswirkungen dieser Regimewechsel auf die nachfolgenden Glieder der Nahrungskette einschließlich kommerziell wichtiger Fischbestände (Fischerei ist der drittgrößte Wirtschaftsfaktor Namibias) lassen sich im Küstenauftriebsgebiet vor Namibia modellhaft untersuchen, da die Kopplung zwischen klimatischen Ursachen und ökologischen Folgen dort klarer hervortreten als in anderen Regionen.

### **Wissenschaftliche Ziele von GENUS**

Im GENUS-Konsortium entwickeln Modellierer, Biogeochemiker und Ökologen gemeinsam auf der Basis umfangreicher Felddaten (Expeditionen mit verschiedenen Forschungsschiffen) und Langzeitserien ein Modellsystem, das die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Meeresumwelt im Auftriebsgebiet vor Namibia prognostizieren kann. Damit leistet das GENUS-Projekt einen wertvollen deutschen Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative (*Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research*) des *International Geosphere-Biosphere Programs* (IGBP). Wissenschaftliche Schwerpunkte von GENUS sind:

- Retrospektive Analysen der physikalischen Randbedingungen und biogeochemischen Kreisläufe im Auftriebsgebiet
- Bestimmung der Schlüsselarten und wichtigsten Stoffumsatzraten in Bezug auf physikalische, biogeochemische und biologische Prozesse
- Parametrisierung und Modellierung der Nahrungsnetz- Beziehungen, Rückkopplung von Veränderungen im Nahrungsnetz auf biogeochemische Stoffflüsse (CO<sub>2</sub>, Sauerstoff, Nährstoffe) im Auftriebsgebiet und im angrenzenden Ozean
- Modellierung der Interaktionen Schelfökosystem - Offener Ozean - Atmosphäre

### **Ausbildung/Capacity Building**

Bereits seit Beginn der wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit GENUS-Partnern aus Namibia, Südafrika und Angola Ende der 1990er Jahre waren Ausbildung, Training und *Capacity Building* integrale Bestandteile der Kooperation. Diese Kooperation war eingebettet in die regionale Entwicklungs- und Trainings- sowie Fischereimanagement-Initiative BENEFIT (*Benguela Environment and Fisheries Interaction and Training*) sowie in die trilaterale Benguela Current Commission (BCC), einem Zusammenschluss der Anrainerstaaten Südafrika, Namibia und Angola. An allen bisher acht Forschungsexpeditionen mit verschiedenen deutschen, südafrikanischen, britischen Schiffen nahmen Wissenschaftler und Studierende der Meereswissenschaften aus den drei südafrikanischen Staaten und Deutschland teil, die an Bord moderne Methoden der Meeresforschung erlernten und aktiv an den Forschungsarbeiten beteiligt waren.

Darüber hinaus bieten die deutschen GENUS-Partner in ihren internationalen, meereswissenschaftlichen Master- und Postgraduierten-Studiengängen ein vielfältiges Angebot, das auch von afrikanischen Studierenden gern angenommen wird. An das wissenschaftliche Projekt GENUS sind Diplom- und Doktorarbeiten in Namibia angegliedert, die durch deutsche und namibische Wissenschaftler betreut und durch GENUS finanziert werden. Bisher wurden fünf Doktoranden und ein Masterstudent aus Namibia gefördert und institutsübergreifend betreut. Die Förderung von zwei weiteren Masterstudenten/innen und einem Doktoranden ist in Vorbereitung, die ausgewählten Kandidaten/in haben bereits zugesagt, dass sie die GENUS-Stipendien annehmen werden.

### **Kooperation**

Das Projekt wurde wissenschaftlich und in seinen Ausbildungskomponenten in Abstimmung mit den regionalen Partnern konzipiert. Das vom BMBF finanzierte Verbundvorhaben umfasst die Forschungsarbeiten der deutschen Partner während der ersten drei Jahre sowie die Ausbildung junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an deutschen Universitäten. Auf den Expeditionen mit F/S METEOR und MARIA S. MERIAN, FRS AFRICANA UND RRS DISCOVERY nehmen regelmäßig Vertreter der regionalen Forschungsinstitute und der Universitäten teil.

Am GENUS-Projekt sind sechs Partnereinrichtungen aus den vier norddeutschen Bundesländern (Hamburg, Bremen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein) beteiligt, die interdisziplinär und institutsübergreifend die wissenschaftlichen Fragestellungen bearbeiten.

Im Rahmen des Projekts stehen vier Aufgabenbereiche im Fokus empirischer und theoretischer Untersuchungen (siehe Abbildung 1):

- Änderungen physikalischer Randbedingungen und der Reaktionen biogeochemischer Kreisläufe sollen retrospektiv in Modellen nachgebildet, modelliert und mit Daten und Archiven verglichen werden
- Physikalische, biogeochemische und biologische Schlüsselprozesse und Stoffumsatzraten werden empirisch quantifiziert und parametrisiert
- Empirische Untersuchungen münden in konzeptionelle Modelle, die Prozesse, Interaktionen und Mechanismen der Regelung trophischer Beziehungen in Schelfmeer-Ökosystemen nachbilden
- Interaktionen von Schelfmeer-Ökosystemen mit dem angrenzenden Ozean und der Atmosphäre werden quantifiziert und unter verschiedenen klimatischen Bedingungen in Modellen nachgebildet.

## **4. Kurzdarstellung der wissenschaftlich inhaltlichen und methodischen Beiträge der beteiligten Partnereinrichtungen**

### ***Teilprojekt 1 (Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg)***

Die Hauptaufgabe des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPIMet) bestand in der Analyse, Verbesserung und Bereitstellung der atmosphärischen Antriebsdaten für das Ozeanmodell MOM. Hierfür wurde das regionale Klimamodel REMO zum dynamischen Downscaling von Reanalysedaten auf eine horizontale Gitterauflösung von bis zu 25 km (0.22°) verwendet.

Die Ziele der Arbeiten am MPIMet wurden in 2 Bereiche aufgeteilt: (1) Simulation der Zeitperiode 1960 bis heute und Vergleich der REMO-Ergebnisse mit Beobachtungen, um die Güte der REMO-Ergebnisse in der Untersuchungsregion zu bestimmen sowie die Anpassung von REMO an die Modellregion je nach Ergebnisgüte; (2) die Bereitstellung hochaufgelöster atmosphärischer Antriebsdaten für 3 Zeitscheiben für die Ozeanmodellierung (Kleine Eiszeit, Mittelalterliche Wärmeperiode und 1970 bis 2008) mit Schwerpunkt in der Identifizierung möglicher Veränderungen im klimatischen Antrieb und seiner Variabilität.

### ***Teilprojekt 2 (Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde)***

Das Ökosystem des Benguela-Auftriebsgebietes reagiert direkt auf die Variabilität der fernwirkenden und lokalen physikalischen Antriebe und besitzt deshalb eine hohe Sensitivität für klimatische Veränderungen. Die Anpassung der ozeanischen Zirkulation an Änderungen im atmosphärischen Antrieb führt im Benguelasystem zu Verschiebungen in der Verteilung der Zentralwassermassen und zu Schwankungen der Auftriebsintensität. Dadurch ändern sich grundlegende hydrographischen Rahmenbedingungen für das Ökosystem. Im TP-2 werden Prozessstudien und Langzeituntersuchungen durchgeführt. Zusammen mit den Ergebnissen zu biogeochemischen Zyklen und zur Physiologie des Zooplanktons der anderen Teilprojekte wurde es damit möglich, bisher nicht berücksichtigte Prozesse in Ökosystemmodelle zu integrieren und damit deren Prognosefähigkeit zu verbessern. Das erarbeitete, mit einem 3-

dimensionalen Zirkulationsmodell gekoppelte Ökosystemmodell bildet die hydrographischen Verhältnisse, Strömungen sowie die Zyklen der Nährstoffe durch das Nahrungsnetz sowie die Variabilität der Sauerstoffkonzentration sowie das Auftreten anoxischer Verhältnisse auf dem Schelf Namibias gut ab. Durch Feldmessungen und Experimente wird die Datenbasis zu den physikochemischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet gezielt so erweitert, dass mit Hilfe numerischer Modelle Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde erstellt werden können. Sie ermöglichen Prognosen über die Reaktion von marinen Systemen auf Klimaveränderungen. Schwerpunktthemen der interdisziplinär angelegten Arbeiten der 2. Phase des Teilprojektes sind: 1) Auftriebsfilamente und die mesoskale Dynamik und ihr Einfluss auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen, 2) die Primärproduktion und Phytoplanktonsuccession in Abhängigkeit von der physikalischen Umgebung, 3) der Einfluss kleinskaliger Prozesse wie Dünung, interne Wellen und turbulente Vermischung an der Sediment-Wasser-Grenzschicht auf die Resuspension von partikulärem Material und seinem lateralen Transport sowie 4) Planktonorganismen und ihre Rückkopplungen auf den Sauerstoff- und Kohlenstoffkreislauf unter besonderer Berücksichtigung der kalzifizierenden Primärproduzenten (Coccolithophoriden) und des Makrozooplanktons. Die Arbeiten des TP-2 sind eng mit den anderen Teilprojekten des Verbundes und den regionalen Partnern verzahnt, wobei besonders die Ökosystemmodellierung als integrierende Komponente wirksam wird.

### ***Teilprojekt 3 (Universität Hamburg, Institut für Biogeochemie und Meereschemie)***

Durch den Küstenauftrieb werden das Ökosystem und die angrenzenden Ozeanregionen des Benguela-Auftriebsgebietes mit Nährstoffen versorgt; dabei entzieht die biologische Pumpe verstärkt CO<sub>2</sub> aus der näheren Umgebung des Benguela Küstenauftriebssystems. Die Herkunft der Auftriebswassermassen und die internen Stoffkreisläufe bestimmen hierbei das Sauerstoff-Gleichgewicht, das wiederum zahlreiche andere Schlüsselquellen und -senken beeinflusst. Es ist ein direkt regulierender Mechanismus für die Mineralisation von Nährstoffen und steuert den Rückfluss von Phosphat aus den Sedimenten; es ist für die den Kreislauf von fixiertem Stickstoff von Bedeutung (Nitrifizierung vs. Denitrifizierung/anaerobe Ammoniumoxidation, "Anammox"); es steuert den Abbau von organischem Material im Sediment; und es beeinflusst entscheidend die Struktur des Nahrungsnetzes auf höherer trophischer Ebene. Veränderungen in der Zusammensetzung des Quellwassers der Auftriebswassermassen werden, wie zum Teil schon nachgewiesen, die allgemeine Redox-Fähigkeit der Wassermassen in den bodennahen Schichten absenken, wobei interne Prozesse (Oxidation von im Überfluss vorhandenem reduzierten Kohlenstoff und Schwefel) eine wichtige Rolle spielen. Physikalischer Antrieb und interner biologischer und chemischer Sauerstoffbedarf regulieren somit gemeinsam die Ökosystem-Strukturen und -Funktionsweisen mittels biogeochemischer Stoffkreisläufe. Das Teilprojekt hat die Konzentration von Nährstoffen im Oberflächenwasser zeitlich und räumlich hochauflösend gemessen und dabei insbesondere den Stickstoffkreislauf verfolgt. Diese Arbeiten trugen dazu bei, die beachteten Stickstoffisotopen-Anomalien (<sup>15</sup>N and <sup>14</sup>N) in der Wassersäule, eingeschlossen der Stickstofffixierung, besser zu verstehen. Unsere neuen Messergebnisse, verbunden mit vorausgegangenen Erhebungen, weisen alle darauf hin, dass die Prozesse, die von den Sauerstoffbedingungen an der Sediment-Wasser-Grenzschicht abhängen, von entscheidender Bedeutung für die Stoffkreisläufe im Gesamtsystem sind. Die Aufklärung und Quantifizierung dieser Prozesse an der Sediment-Wasser-Grenzschicht sind ein zentrales Anliegen von GENUS.

### ***Teilprojekt 4, Biogeochemie (Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie, Bremen)***

Marine Organismen steuern durch die Photosynthese die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre sowie die Aufnahme von CO<sub>2</sub> im Ozean. Im Gegensatz zur Produktion und Einlagerung von organischem Material senkt der Niederschlag von Karbonaten und deren Konservierung in den marinen Sedimenten die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans. Der Netto-Effekt dieser entgegengesetzt wirkenden Prozesse wird als biologische Pumpe bezeichnet. Aufgabe des Teilprojektes ist es, die Funktion der biologischen Pumpe im Benguela-Auftriebsgebiet und ihre Reaktion auf sich

verändernde Umweltbedingungen wie z.B. die Verringerung der Sauerstoff- oder ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre und dem Ozean zu untersuchen. Um die Funktionsweise der biologischen Pumpe besser verstehen zu können, sollen die für die biologische Pumpe wichtigen Kohlenstoffflüsse quantifiziert werden. Dies beinhaltet die Messung des pCO<sub>2</sub> im Ozean und der Atmosphäre, die Bestimmung des Kohlenstoffexportes von der Meeresoberfläche in die Tiefsee mittels Sedimentfallen sowie die Quantifizierung der Kohlenstoffflüsse an der Sediment-Wasser-Grenzschicht. Neben der Quantifizierung und Untersuchung von Prozessen, die momentan die saisonalen und interannuellen Variationen der Kohlenstoffflüsse beeinflussen, soll auch der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich Kohlenstoffflüsse in Zukunft verändern können. Variationen in der Zusammensetzung der tieferen Wassermassen und der Auftriebsintensität können hier von zentraler Bedeutung sein. Ferner ist es wichtig, die Abhängigkeit der Kohlenstoffflüsse von der Sauerstoffkonzentration des Bodenwassers sowie die Bedeutung des bisher kaum berücksichtigten gelösten organischen Kohlenstoffs mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Das DOC könnte eine wichtige Senke für CO<sub>2</sub> sein. Eine weitere wichtige Frage ist, warum man entlang der namibischen Küste einen Streifen fast karbonatfreier Sedimente vorfindet. Es gilt zu klären, ob eventuell ein hoher pCO<sub>2</sub> im Auftriebswasser die Bildung von Karbonatschalen verhindert und/oder Karbonate in den Oberflächensedimenten gelöst werden. Die Beantwortung dieser Frage ermöglicht es vielleicht sogar, einen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Grenzwert zu bestimmen, über dem Produktion und Konservierung von Karbonaten kaum mehr möglich ist. In anbetracht der zunehmenden globalen Ozeanversauerung wäre das eine Information von weitreichender Bedeutung.

#### ***Teilprojekt 4, Ichthyologie (Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie, Bremen)***

Das übergeordnete Ziel der Ichthyoplanktonuntersuchungen ist das Verständnis der Dynamik in der Ichthyoplanktongemeinschaft des Benguelastrom-Ökosystems und die Abhängigkeit von kurz- und mittelzeitigen Veränderungen der Umweltbedingungen. Verschiebungen in der Phyto- und Mikrozooplanktongemeinschaft kann die Entwicklung der frühen Stadien nachdrücklich beeinträchtigen und damit zu Veränderungen des Rekrutierungserfolges und der Bestandsgröße führen. Eine Verschlechterung der Umweltbedingungen kann auch zu physiologisch schwächeren Individuen führen, was für konkurrierende Arten einen Entwicklungsvorteil bedeuten kann. Tages-Zuwachsringe in Otolithen werden als Maß für rückgerichtete Untersuchungen für die Nahrungsbedingungen der frühen Stadien herangezogen. In Kombination mit Informationen über Fettsäuren- und Lipidgehalte der Larven lassen sie Rückschlüsse über den Ernährungszustand der einzelnen Larven zu. Sauerstoffverbrauch und -toleranz der Larven werden als Maß für ihre Kondition, Energieaufnahme und Anfälligkeit gegen hypoxische Bedingungen bewertet. Es werden Felduntersuchungen an Bord von Forschungsschiffen zum Sammeln entsprechenden Materials durchgeführt. Experimentelle Arbeiten erfolgen landbasiert in den Hälterungsanlagen der Partnerinstitute vor Ort.

#### ***Teilprojekt 5 (Universität Hamburg, Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft)***

Teilprojekt 5 untersucht die horizontale und vertikale Verteilung des Meso- und Makrozooplanktons, die trophische Stellung dieser Organismen und ihren Beitrag zum Kohlenstoffkreislauf im hochproduktiven Auftriebsgebiet des Benguelastroms. Diese Basisdaten werden anderen Teilprojekten zur Verfügung gestellt und gehen in die Modelle ein. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichen das Verständnis der Rolle bestimmter Organismengruppen im Ökosystem und in den Stoffkreisläufen des namibischen Auftriebsgebietes. Das Gebiet zeichnet sich durch eine hohe Produktion, Remineralisierung und Sedimentation organischen Materials aus. Die Variabilität dieser Prozesse und die Beteiligung bestimmter Organismengruppen daran wird im weiteren Projektverlauf in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung untersucht. Zusätzlich wird die Dynamik biologischer Prozesse an Auftriebsfilamenten studiert. Über die Rolle des Mikrozooplanktons bei der Remineralisation und im Nahrungsnetz im Untersuchungsgebiet ist bisher wenig bekannt. Daher erfolgt zusätzlich

zum Mesozooplankton eine Untersuchung dieser Faunengruppe. Abgesunkenes organisches Material wird am Meeresboden von Benthosorganismen konsumiert oder von Bakterien zersetzt, wodurch anoxische Areale entstehen. Kenntnisse über das Schicksal des abgesunkenen organischen Materials, die Prozesse in der Bodengrenzschicht und im Benthos sind nötig, um den Kohlenstoffkreislauf auf dem namibischen Schelf zu budgetieren und sollen daher genauer untersucht werden.

### **Teilprojekt 6 (Universität Bremen, Marine Zoologie)**

Das Ziele von Teilprojekt 6 bestehen darin, Schlüsselarten des Zooplanktons zu identifizieren, die eine wichtige Rolle im Nahrungsnetz des nördlichen Benguela-Auftriebssystems spielen, ihren Energiebedarf anhand der Respirometrie zu bestimmen und ihre Nahrungspräferenzen und trophische Positionen mithilfe von Fettsäure-Biomarkern und stabilen Isotopenverhältnissen festzustellen. Auf der Grundlage dieser Felddaten wird ein Nahrungsnetzmodell entwickelt, wobei das Ecopath mit Ecosim-Softwarepaket (EwE) genutzt wird. Das EwE-Modell integriert alle Daten zu Energieanforderungen und trophischen Wechselwirkungen, die von den verschiedenen Teilprojekten gesammelt und gemessen wurden, die zum Arbeitspaket Produktion/Konsum beitragen. Die Daten und Ergebnisse erlauben eine großskalige Abschätzung der trophischen Interaktionen und eine Übersicht über die Energieflüsse im nördlichen Benguela-Auftriebssystem. Es wurde jedoch auch deutlich, dass detailliertere Informationen zu mesoskaligen Prozessen wie Auftriebsfilamente, Grenzschichten und Grenzbereiche (Atmosphäre-Ozean, hydrographische Fronten, obere und untere Grenze der Sauerstoffminimumzone) notwendig sind, um die Prozesse und Mechanismen vollständig zu verstehen, die die Produktivität des nördlichen Benguela-Auftriebssystems bestimmen, sowie ihre Wechselwirkungen mit dem Klimawandel. Insbesondere die Zeitskala von Sukzessionen und Alterungsprozessen in Auftriebsfahnen ist bisher nur sehr unvollkommen verstanden. Außerdem müssen physiologische Toleranzgrenzen und Adaptationen an hypoxische Bedingungen erforscht werden, um die Auswirkungen der ausgeprägten und sich ausweitenden Sauerstoff-minimumzonen (OMZ) auf die Zooplanktongemeinschaften und Räuber-Beute-Beziehungen zu bestimmen. Diese beiden Aspekte, d.h. die Sukzession in Auftriebsfahnen sowie Hypoxietoleranz/-effekte in der OMZ, bilden weitere Schwerpunkte von Teilprojekt 6. Basierend auf dem EwE-Modell wird das nördliche Benguela-Auftriebssystem außerdem mit den veröffentlichten Daten anderer Küstenauftriebssysteme in Bezug auf Ökosystemstabilität, Verwundbarkeit/Anfälligkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelt-veränderungen verglichen.

### **Teilprojekt 7 (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven)**

Euphausiiden sind eine zentrale Komponente der Zooplankton-Gemeinschaften des nördlichen Benguela-Auftriebssystems bestehend aus mindestens acht Arten, welche die Planktonbiomasse bis zu 60% dominieren können. Euphausiiden sind gute Wassermassen-Indikatoren und Kenntnisse der Horizontal- und Vertikalverteilungen werden ausgebaut. In GENUS sollen die Krillarten insbesondere dazu dienen, die Bildung und Weiterentwicklung kleinskaliger ozeanischer Strukturen, der Auftriebsfilamente, anzuzeigen. Verhaltenstudien an Grenzflächen werden dabei mit weiteren Untersuchungen der Vertikalverteilung und -wanderung verbunden. Detaillierte Studien von Wachstum, Reproduktion und Energiestoffwechsel im Zusammenhang mit der Bestimmung von Sauerstoffmangel- und Temperaturtoleranzen werden weitergeführt, besonders unter dem Aspekt, dass die jeweilige physiologische Leistung Phasen und Intensität des Auftriebs erkennen lässt. Unter Aspekten der Nahrungsnetze sind mehrere Arten omnivor, das heißt, sie spielen eine wesentliche Rolle als Planktonkonsumenten aber auch als Biomasse-Produzenten. Sie sind entscheidende Nahrungsquellen für (kommerzielle) Fischarten. Der thematische Zusammenhang des Gesamtprojekts mit Bestimmungen der Primär- und Sekundärproduktion ist optimal für eine Beurteilung der hydro-klimatischen Situation im Nahrungsnetz im Untersuchungsgebiet. Die besonders kurze Krill-Nahrungskette hat dabei Indikatorfunktion im integrativen Modellansatz.

## 5. Synergieeffekte innerhalb der Kooperation

GENUS ist ein interdisziplinär arbeitendes Projekt, an dem Physiker, Geologen, Biogeochemiker, Biologen und Modellierer beteiligt sind. Das GENUS-Konsortium vertritt alle relevanten Disziplinen und Ressourcen, die zur erfolgreichen Durchführung des Projekts nötig sind. Im Projektverlauf werden von den empirisch arbeitenden Gruppen Arbeiten auf Expeditionen durchgeführt und an Land ausgewertet, um die oben genannten Teilziele zu erreichen und eine Verfeinerung der numerischen Modelle zu ermöglichen. Diese Arbeiten speisen die drei Arbeitspakete Zirkulation, Stoffkreisläufe und Produzenten/Konsumenten (Abbildung 1), welche die Grundlagen für die Adaptation der Modellkaskade legen. Synergien zwischen empirisch und theoretisch arbeitenden Gruppen in GENUS werden in besonderem Maße durch regelmäßige Arbeitstreffen erreicht. Anlässlich dieser thematischen Arbeitstreffen zu den GENUS-Themen und speziell der Modellierung werden Arbeitsfortschritte abgefragt, die Datenerfordernisse der gekoppelten Modellierung je nach Arbeitsfortschritt definiert und das Arbeitsprogramm der nächsten Monate festgelegt. Nur durch den Zusammenschluss der verschiedenen norddeutschen Institutionen konnte das Projekt bisher so erfolgreich durchgeführt werden.

## 6. Darstellung der Nachhaltigkeit der Kooperationsbeziehungen

Komplexe Vorgänge im Meer können nur als Teil des Gesamtsystems Erde erkannt und untersucht werden – diese Einsicht prägt seit geraumer Zeit alle Kooperationen der deutschen Meeresforschung und führt zu einer Reihe fruchtbarer Projektverbünde. In ihnen sind interdisziplinäre Ansätze inzwischen die Norm. In besonderem Maße ist die Bündelung spezifischer Expertise bei der Untersuchung von Strukturen, Funktionen und Leistungen von Ökosystemen Voraussetzung für wissenschaftlichen Fortschritt über die Grenzen disziplinärer Bereiche hinaus. Jede Disziplin steuert neue Erkenntnisse bei und sorgt für Fortschritte in den Disziplinen, aber massiver Erkenntnisgewinn folgt aus dem Zusammenspiel der Disziplinen. Diese Erkenntnis lag der Konzeption des GENUS-Projekts zu Grunde. Die hier beteiligten Einrichtungen arbeiteten bereits vor dem Beginn des GENUS-Projekts in anderen Zusammenhängen und teilweise auch in der Region des Auftriebssystems des SW Afrika zusammen, und jede steuert disziplinäre Exzellenz zum Ganzen bei. Weitere Kooperationen sind auch nach dem Ende der zweiten Phase von GENUS zu erwarten, denn vom BMBF ist eine Ausweitung und Fortsetzung der SPACES-Initiative angekündigt. GENUS als bereits existierende Säule innerhalb von SPACES wird als Konsortium die Fortsetzung der Aktivitäten und die über Einzelprojekte hinaus reichende Kooperation betreiben, unter anderem in Form von regionalen Planungstreffen mit Institutionen und akademischen Vertretern des BCC (beantragt beim IB des BMBF für 2013).

Wesentliche Komponente ist der Austausch von Studenten und Doktoranden sowie die Betreuung von akademischem Nachwuchs aus der Region. Dabei werden theoretische und praktische Aktivitäten pragmatisch immer an der Partnereinrichtung durchgeführt, an der die Fragestellung entsprechende Expertise vorhanden ist. Diese Lehrkooperationen werden auch nach dem Auslaufen von GENUS fortgesetzt.

## 7. Darstellung der Kooperationsstrukturen und -maßnahmen

### 7.1. Gemeinsam genutzte Infrastruktur

Als interdisziplinär arbeitendes Projekt nutzt GENUS gemeinsame Infrastrukturen. Das beinhaltet die institutsübergreifende Beantragung und Nutzung großer Forschungsschiffe bei der Senatskommission für Ozeanographie (z.B. FS MARIA S. MERIAN und METEOR, RRS DISCOVERY im Rahmen des Barter-Verfahrens; bisher sechs bewilligte und z.T. bereits durchgeführte Reisen) und die Charter der südafrikanischen FRS AFRICANA (bisher zwei Reisen). Weiterhin werden von allen beteiligten Kooperationspartnern die erhobenen und georeferenzierten Forschungsdaten im Datenbanksystem PANGAEA archiviert. Das Institut für Ostseeforschung stellt einen FTP-Server und einen Live Access Server (LAS-Server) zum Austausch von Dateien bereit und das TP-2 veröffentlicht die Ergebnisse der numerischen Modellierung über einen LAS-Server am IOW (<http://phy-51.io-warnemuende.de/las>). Diese

umfassen zurzeit 5-Tagesmittelwerte von Modellläufen 1999-2012 von 60 hydrographische und Ökosystemvariablen sowie atmosphärische Antriebsdaten. Andere Großgeräte (wie Mehrfachschleifnetze zum Fang von Plankton, Remotely Operated Vehicles, Hälterungsanlagen usw.), die einzelnen Institutionen zugeordnet sind, werden regelmäßig gemeinsam genutzt.

## 7.2. Gemeinsame Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Im Rahmen von GENUS werden Doktoranden, Master- und Bachelorstudenten von den Partneruniversitäten und im Rahmen des *Capacity Buildings* aus Namibia ausgebildet (Tabelle 1). Die Hauptbetreuung obliegt dabei einer Universität aus dem Konsortium. Praktische Betreuung während der Probennahme oder auch Unterstützung bei den Analysen und Modellieraktivitäten erfolgt je nach Bedarf innerhalb des Gesamtprojekts. Als ein erfolgreiches Beispiel soll der Master of Science Student Richard Horaeb genannt werden, der als namibischer Stipendiat am ISATEC (International Studies in Aquatic Tropical Ecology) Studiengang am ZMT in Bremen teilgenommen hat. Seine Masterarbeit wurde von Prof. Dr. Wilhelm Hagen (Universität Bremen) und Dr. Rolf Koppelman (Universität Hamburg) betreut. Die praktischen Arbeiten erfolgten am Institut für Ostseeforschung Warnemünde (Dr. Volker Mohrholz) und an der Universität Hamburg. Direkt nach seinem Abschluss übernahm er eine Position am NatMIRC (National Marine Information and Research Centre) in Namibia.

Tabelle 1: Laufende und abgeschlossene Bachelor-, Diplom-, Master- und Promotionsverfahren im Rahmen von GENUS (seit 2009).

	B.Sc.	M.Sc.	Dipl.-Ing.	Doktoranden
TP-1				1
TP-2	1			2
TP-3	3	1		2
TP-4	1	1		2
TP-5	7	2	1	1
TP-6		3	1	2
TP-7		1		1
<i>Capacity Building</i>		1		5

## 7.3. Gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt wird auf der projekteigenen Homepage (<http://genus.zmaw.de>) vorgestellt und laufend aktualisiert. Im Rahmen einer kleinen Filmreihe werden die Aktivitäten des Projekts vorgestellt (<http://genus.mmh.de>). Die Videos sind auch auf den gängigen Internet-Videoportalen (YouTube, iTunes) zu finden. Ergebnisse der numerischen Modellierung werden über einen Live Access Server am IOW (<http://phy-51.io-warnemuende.de/las/getUI.do>) zum Abruf bereitgestellt. GENUS-Beiträge werden regelmäßig auf internationalen Fachkonferenzen vorgestellt.

## 7.4. Managementstrukturen zur Koordination der gemeinsamen Arbeit

Das Management für das Gesamtvorhaben GENUS erfolgt über das Teilprojekt 0 an der Universität Hamburg. Folgende Aufgaben werden in diesem Teilprojekt wahrgenommen:

- Überwachung der Meilensteinplanung
- Organisation und Durchführung von regelmäßig stattfindenden Projekttreffen
- Organisation und Koordination der Forschungsexpeditionen
- Überwachung der Maßnahmen im Rahmen des *Capacity Building*
- Ausrichtung gemeinsamer *Workshops* und *Summer Schools*
- Außendarstellung des Projekts in Form einer Projekt-Homepage und eines professionell erstellten Video-Podcasts

Die Kommunikation zwischen den deutschen Partnern wird im Wesentlichen durch mindestens jährlich geplante Koordinationstreffen der einzelnen Arbeitspakete an einer der Partnerinstitutionen sichergestellt. Das endgültige GENUS-Datenarchiv (GENUS I und GENUS II) wird in die Datenbank PANGAEA eingespeist.

### **7.5. Workshops, Tagungen, Summer Schools**

GENUS führt regelmäßige Projekttreffen und themenbezogene Workshops an den Standorten der Kooperationspartner durch. Außerdem berichten Vertreter des Konsortiums regelmäßig bei den Jahrestreffen der Benguela Current Commission (<http://www.benguelacc.org/index.php/en/>) in Namibia. Wissenschaftliche Ergebnisse werden auch auf internationalen Tagungen (z.B. ASLO, EGU, IMBER-IMBIZO) vorgestellt.

- 24.06.2009: GENUS Modellier-Workshop am IOW (Mohrholz, Schmidt, Eggert, Auel)  
 24.05. - 28.05.2010: Technische Schulung über Verankerungen und statistische Auswertung der Daten in Swakopmund, Namibia (Mohrholz, Eggert)  
 11.05. - 15.05.2011: GENUS/Nansclim, Ichthyoplankton-Workshop in Hentjes Bay, Namibia (Ekau)  
 17.09. - 18.09.2011: GENUS beim 8. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit (FONA): Wissenschaftsjahr 2012 - Zukunftsprojekt ERDE (Lahajnar)

Die Doktoranden des Projekts organisieren einen Themenblock bei der YOUMARES (YOUng MARine REsearchers and engineers) Konferenz der Deutschen Gesellschaft für Meeresforschung im September 2012 mit dem Titel "*Environmental changes in the pelagic: consequences and acclimatization strategies - from plankton to fish*".

Im Oktober 2011 beteiligte sich GENUS an einer Ausbildungsfahrt mit dem Forschungsschiff MARIA S. MERIAN vor der Küste Namibias, an der Studierende aus Deutschland und Namibia gemeinsam teilnahmen.

## **8. Auflistung gemeinsamer Publikationen der Partnereinrichtungen**

Die Kooperationsbeziehung läuft seit dem 01.03.2009. Nach der intensiven Feldphase bis Oktober 2011 werden zurzeit die Daten ausgewertet und zur Publikation vorbereitet. Deshalb werden nicht nur bereits publizierte Artikel aufgelistet, sondern auch solche, die eingereicht sind oder demnächst eingereicht werden.

- Auel H., Ekau W. (2009): Distribution and respiration of the high-latitude pelagic amphipod *Themisto gaudichaudi* in the Benguela Current in relation to upwelling intensity. *Progress in Oceanography* 83: 237-241.
- Auel H., Buchholz F., Koppelman R., Martin B., Mohrholz V., Müller A. (in Vorbereitung): Zooplankton and Euphausiid interaction within an upwelling filament of the Northern Benguela Upwelling System.
- Buchholz F., Eggert A., Schmidt M., Werner T. (in Vorbereitung): A model with integrated energy budgets of Daily Vertical Migration in krill species of the Northern Benguela Upwelling System.
- Ekau W., Auel H., Pörtner H.-O., Gilbert D. (2010) Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences* 7:1669-1699.
- Flohr, A., Rixen, T., van der Plas, A. (in Vorbereitung): Spatial patterns of N:P anomaly within the Benguela Upwelling System.
- Gutknecht, E., Dadou, I., Le Vu, B., Marchesiello, P., Cambon, G., Sudre, J., Garçon, V., Machu, E., Rixen, T., Kock, A., Flohr, A., Paulmier, A., Lavik G. (2011): Nitrogen transfers

- and sea-air N<sub>2</sub>O fluxes in the upwelling off Namibia within the oxygen minimum zone: a 3-D model approach. *Biogeosciences Discussions* 8, 3537-3618.
- Koppelman, R., Kullmann, B., Lahajnar, N., Martin, B., Mohrholz, V. (eingereicht): Onshore-offshore distribution of Thecosomata (Pteropoda) in the Benguela Current Upwelling Region off Namibia: species diversity and trophic position. *Hydrobiologia*.
- Martin, B., Eggert, A., Koppelman, R., Mohrholz, V., Möllmann, C. (in Vorbereitung): Zooplankton biomass distribution and onshore offshore gradients in the Namibian Upwelling area.
- Nagel, B., Emeis, K.-C., Flohr, A., Rixen, T., Schlarbaum, T., Mohrholz, V., van der Plas, A. (2012): N-Cycling and Balancing of the N-Deficit Generated in the Oxygen Minimum Zone over the Namibian Shelf – an Isotope-based Approach. (*JGR Biogeosciences*, eingereicht)
- Rixen, T., Flohr, A., van der Plas, A., Lahajnar, N., Emeis, K.-C. (in der internen Begutachtung): Spatial and temporal variations of pCO<sub>2</sub> in coastal waters off SW Africa.
- Werner T., Huenerlage K., Verheye H., Buchholz F. (im Druck): Thermal constraints on the respiration and excretion rates of krill, *Euphausia hanseni* and *Nematoscelis megalops*, in the northern Benguela upwelling system off Namibia. *African Journal of Marine Science*.

### Andere Veröffentlichungen zu GENUS

- Burd, A., Hansell, D.A., Steinberg, D.K., Anderson, T.R., Aristegui, J., Baltar, F., Beupre, S.R., Buesseler, K.O., deHairs, F., Jackson, G.A., Kadko, D.C., **Koppelman, R.**, Lampitt, R.S., Nagata, T., Reinthaler, T., Robinson, C., Robison, B.H., Tamburine, C., Tanaka, T. (2010): Assessing the apparent imbalance between geochemical and biochemical indicators of meso- and bathypelagic biological activity: What the @\$#! is wrong with present calculations of carbon budgets? *Deep-Sea Research II* 57: 1557-1571.
- 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*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2012.06.004>.
- Herzfeld, M, **Schmidt, M.**, Griffies, S., Liang, Z. (2011): Realistic test cases for limited area ocean modelling. *Ocean Modelling*, 37(1-2), doi:10.1016/j.ocemod.2010.12.008.
- Meisel, S., **Struck, U.**, **Emeis, K.-C.** (2011): Nutrient dynamics and oceanographic features in the central Namibian upwelling region as reflected in <sup>15</sup>N-signals of suspended matter and surface sediments. *Fossil Record*, 14(2): 153-169.
- Meisel, S., **Emeis, K.-C.**, **Struck, U.**, Kristen, I. (2011): Nutrient regime and upwelling in the northern Benguela since the middle Holocene in a global context – a multi-proxy approach. *Fossil Record*, 14(2): 171-193.
- Mitra, A., Jónasdóttir, S.H., Flynn, K.J., Castellani, C., Gentleman, W., Halsband, C., Licandro, P., Agersted, M.D., Calbet, A., Lindeque, P., **Koppelman, R.**, Møller, E.F., St. John, M. (submitted): Bridging the gap between marine biogeochemical and fisheries sciences; configuring the zooplankton link.
- Ohde, Th., **Mohrholz, V.** (2011): Interannual variability of Sulphur plumes off the Namibian coast. *J. Remote Sensing*, (in press).
- Robinson, C., Steinberg, D.K., **Koppelman, R.**, Robison, B.H., Anderson, T.R., Aristegui, J., Carlson, C.A., Frost, J.R., Ghiglione, J.-F., Hernandez-Leon, S., Jackson, J.A., Queguiner, B., Ragueneau, O., Rassoulzadegan, F., Tamburine, C., Tanaka, T., Wishner, K.F., Zhang, J. (2010): Mesopelagic microbial and metazoan diversity and function - a synthesis. *Deep-Sea Research II* 57: 1504-1518.

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 0 (Koordination)**

## Schlussbericht GENUS Teilprojekt 0 (Koordination)

Förderkennzeichen: 03F0497A

Projektlaufzeit: 01.03.2009 - 30.04.2012

Niko Lahajnar und Kay-Christian Emeis

Institut für Biogeochemie und Meereschemie, Universität Hamburg  
Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

### I. Kurzdarstellung

#### I.1. Aufgabenstellung

Das Teilprojekt 0 (TP-0) stellte die Gesamtkoordination für das BMBF-Verbundprojekt GENUS dar und diente als Schnittstelle für alle Teilprojekt übergreifende Aufgaben in den administrativen, logistischen und koordinativen Bereichen eines Forschungsprogramms dieser Größenordnung. Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben während der Projektphase übernommen:

(1) Interne Koordination des Projektverbunds GENUS: Dazu gehörten die Organisation und Durchführung von Projekttreffen und die Sicherstellung der Kommunikation zwischen den GENUS-Arbeitspaketen *Zirkulation*, *Stoffkreisläufe* und *Produktion/Konsumption* sowie die Organisation von Berichten und interne wie externe Evaluierungen. Des Weiteren wurde der Datenaustausch durch die Einrichtung und Pflege einer Meta-Datenbank zu den neu erzielten Ergebnissen aufgebaut und die Dateneinspeisung in die Datenbank Pangaea initiiert.

(2) Koordination der GENUS *Capacity Building* Aktivitäten: Schwerpunkt der Aufgaben war die Koordination des Stipendienprogramms mit initialer Kontaktherstellung zu den relevanten Stellen in Namibia (UNAM, NatMIRC), Übernahme des Vorsitzes der Auswahlkommission und die Durchführung des Stipendienprogramms mit logistischer und finanzieller Abwicklung der Stipendien.

(3) Koordination der Feldexperimente: Zentrale Aufgaben in diesem Bereich waren die Planung und Durchführung der GENUS eigenen Forschungsexpeditionen mit den internationalen Forschungsschiffen FRS Africana (2009), RRS Discovery (2010) und FS Maria S. Merian (2011) sowie deren logistische und finanzielle Abwicklung. Daneben wurden die Feldexperimente der kooperierenden Stellen im Rahmen der Stipendienprogramme in Namibia unterstützt.

(4) Projektdarstellung / *Outreach*: Zu den Aufgaben in diesem Bereich gehörten die Erstellung und Einrichtung sowie Pflege einer Internetpräsentation im Rahmen einer Projekt-Webseite, die Koordination von Berichten sowie eine moderne Öffentlichkeitsarbeit in Form einer filmischen Dokumentation der Projektarbeiten.

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

Das Teilprojekt 0 dient als Koordination des BMBF Verbundprojekts GENUS. Das Gesamtvorhaben GENUS zielt auf einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. Es soll einen Beitrag zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) leisten durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase –

und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde. Das GENUS-Projekt ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als *Endorsed Project* und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten. GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungsk Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen deutsche Wissenschaftler des ZMT, IOW und der Universität Bremen in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren. Zur Fortsetzung und Intensivierung der Zusammenarbeit fand unter der Koordination von GENUS eine enge Kooperation mit der Benguela Current Commission sowie des namibischen NATMIRC zum Aufbau meereswissenschaftlicher Expertise (*Capacity Building*) bei jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Region statt.

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

Das Projekt GENUS profitierte von den bereits zugrundeliegenden und teilweise sehr intensiven Forschungsaktivitäten im Benguela Auftriebsgebiet sowie den Zusammenarbeiten der Wissenschaftler aus den Teilprojekten mit Partnern aus der Region vor dem eigentlichen Beginn im Frühjahr 2009. So konnte beispielsweise auf die langjährige Erfahrung des Projektkoordinators Prof. K.-C. Emeis (IfBM Hamburg) zurückgegriffen werden, der bereits zahlreiche Forschungsvorhaben (u.a. NAMIBGAS) vor Namibia durchgeführt hatte (Meteor 48/2, AHAB-5, Meteor 76-2). Ebenso war Prof. W. Hagen (MarZoo Bremen) bereits Teilnehmer einer Forschungsfahrt mit dem FRS Africana im Jahre 2002.

Das Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) hat sogar bereits seit Mitte der 1990er Jahre im Rahmen verschiedener Projekte und als Kooperationspartner im BENEFIT-Programm im Benguela-Auftriebsgebiet agiert. In Kooperation mit dem NatMIRC Institut in Swakopmund, Namibia, und dem angolanischen Fischereiinstitut (INIP) wurden physikochemische Prozesse sowie Planktondynamik und -diversität auf dem südwestafrikanischen Schelf untersucht. Die in der Region häufig auftretenden Sauerstoffdefizite wurden in einem Projekt thematisiert, in dem ein Modell für die Entstehung und Ausbreitung suboxischer Bedingungen entwickelt wurde (NAMIBGAS). Die in den Projekten gewonnenen Erkenntnisse standen somit bereits für die Auswertung und Interpretation der Daten von GENUS zur Verfügung. Die Projektbeteiligten, Prof. Dr. W. Fennel (Modellierung) sowie Drs. Mohrholz (physikalische Ozeanographie), Schmidt (numerische Modellierung) und Wasmund (Phytoplankton) arbeiteten seit mehreren Jahren im Arbeitsgebiet von GENUS, haben erheblichen Anteil am Stand des Wissens in ihren Arbeitsbereichen sowie ausgezeichnete Kontakte zu den Kooperationspartnern in Namibia.

Das Zentrum für Marine Tropenökologie (ZMT) engagierte sich ebenfalls seit den frühen 1990er Jahren im Benguela-Auftriebssystem. Seit 1999 spielt das ZMT eine aktive Rolle im Forschungsprogramm BENEFIT (Benguela Environment and Fisheries Interaction and Training) durch Teilnahme an den Forschungs- und Trainingsfahrten mit FRS Africana, FS A. v. Humboldt und FRS Dr. Fridtjof Nansen.

Zusammen mit der Abteilung Marine Zoologie der Universität Bremen (MarZoo) wurde die Kooperation mit MCM (Kapstadt) 2001 durch den Beginn eines Projekts im Rahmen der deutsch-südafrikanischen wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit intensiviert. Im Mittelpunkt dieser bilateralen Kooperation standen Retentionsmechanismen des Zoo- und Ichthyoplanktons im Frontsystem. Höhepunkte dieser Zusammenarbeit waren zwei gemeinsame Expeditionen ins Auftriebsgebiet vor Namibia 2002 mit FRS Africana und 2004 mit FS A. v. Humboldt und ein intensiver Austausch von Gastwissenschaftlern zwischen den Partnerinstituten in Bremen und Kapstadt. Dr. Werner Ekau (Kordinator MSM 07; Fahrtleiter MSM 07/3) beschäftigt sich seit Beginn der 1990er Jahre mit tropischem Ichthyoplankton. Darüber hinaus verfügt das ZMT über für das geplante Projekt relevante Erfahrungen in der Erforschung biogeochemischer Stoffkreisläufe und Prozesse, vor allem zur Auswirkung von Nährstoffeinträgen auf Planktongemeinschaften, zum Materialexport in die Tiefsee und zur Analyse von Stickstoffisotopen. Dabei hat sich die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit biologischen Gruppen, u.a. dem IHF, bereits bewährt.

Auf diesen reichhaltigen Erfahrungsschatz und den vielfältigen Kontakten zu den verschiedenen Partnerorganisationen in der Region aufbauend konnte GENUS im Frühjahr 2009 ohne wirkliche Startschwierigkeiten und Anfangsverluste mit einer Auftakt-Veranstaltung beginnen. Dr. Niko Lahajnar konnte als Projektsekretär und Assistenz der Koordinatoren (Emeis / Hagen) für das Projektmanagement gewonnen werden. In seinen Aufgabenbereich fielen die Organisation und Durchführung aller nachfolgenden Projekttreffen, die einen direkten und regen Wissensaustausch zwischen den einzelnen Teilprojekten gewährleisteten. Darunter fiel auch die Strukturlegung des Datenaustauschs zu den Datenbanken PANGAEA und IMBER. GENUS wurde bereits zu Beginn der Projektphase bei der IMBER-Initiative (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) des IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) als *endorsed project* aufgenommen.

Im Bereich der *Capacity Building* Aktivitäten unterstützte GENUS fachlich, logistisch und finanziell fünf Doktoranden und einen Master-Studierenden aus der Arbeitsregion, die teilweise sowohl in ihrer Heimat als auch an deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen tätig waren. Eine zentrale Aufgabe der Koordination war die erfolgreiche Planung und Durchführung der drei großen GENUS eigenen Feldkampagnen mit den internationalen Forschungsschiffen FRS Africana (Südafrika), RRS Discovery (Großbritannien) und FS Maria S. Merian (Deutschland) in den Jahren 2009, 2010 bzw. 2011. Neben der eigentlichen Forschungsorganisation wurde eine projekteigene Internetpräsenz aufgebaut, die sowohl als Informationsplattform als auch als Außendarstellung der Projektarbeit auf reges Interesse stieß. In diesem Zusammenhang wurde eine professionelle Dokumentationsreihe als *Podcast-Serie* erstellt, die in zahlreichen Episoden die Forschungsvorhaben und -ergebnisse in den einzelnen Teilprojekten dokumentiert und die Projektarbeit nach außen hin öffnete.

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

Die eingehende Betrachtung des wissenschaftlichen und technischen Stands der Wissenschaft wird in den einzelnen (wissenschaftlichen) Teilprojekten näher erläutert. Als Prämisse für das gesamte Forschungsprojekt gilt, dass die

Klimaveränderung ein Schlüsselphänomen des durch menschliche Aktivitäten verursachten globalen Umweltwandels darstellt, mit deren Folgen und Herausforderungen Wissenschaft und Gesellschaft gegenwärtig konfrontiert werden (IPCC-Report 2007a, b). Damit verbunden sind gravierende Veränderungen der globalen und regionalen Stoffflüsse im Ozean. Das Schicksal verschiedener Stoffgruppen hängt nach dem jetzigen Stand des Wissens von vertikalen sowie lateralen Stoffflüssen organischer Materialien in marinen Ökosystemen ab. Schelfmeer- und Küstenökosysteme haben sich als besonders sensibel gegenüber Klima- und Stoffflussänderungen und zunehmender menschlicher Nutzung erwiesen. Trotz geringer räumlicher Ausdehnung spielen diese Systeme eine entscheidende Rolle in globalen Stoffkreisläufen und im Transfer und Transformation von Nährstoffen vom Land in den angrenzenden Ozean. Darüber hinaus stellen diese Hochproduktionsgebiete 90% der globalen Fischereianlandungen. Durch den globalen Klimawandel werden sich Austauschprozesse zwischen Schelf und angrenzendem Ozean, die Wassermassen-Eigenschaften und Zirkulationsmuster, die Nährstoffverhältnisse sowie die Muster der Primärproduzenten und nachfolgenden Glieder der Nahrungskette verändern. In Küstenauftriebsgebieten wie vor Südafrika treten vergleichbare Verschiebungen regelmäßig als natürliche Sukzession mit zunehmender Alterung der Auftriebsfahnen nach annualer und interannualer Änderung des Windantriebs auf. Damit können im Benguela-Auftriebssystem viele der erwarteten Anpassungen an geänderte Klimabedingungen in den physikalischen, chemischen und ökologischen Kausalketten modellhaft untersucht und die zugrunde liegenden Mechanismen aufgeklärt werden. Bakun (1990, Science 247) stellte fest, dass sich das physikalische Regime (insbesondere die Rotation der Windschubspannung) vieler Auftriebsgebiete seit 1950 intensiviert hat und postulierte, dass sich die biologische Produktivität ebenfalls erhöht hat. Unklar ist jedoch, in welchem Maße die erhöhte Primärproduktion den Weg in höhere, ökonomisch relevante trophische Ebenen findet.

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

GENUS ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) des IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungsk Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen GENUS-Wissenschaftler in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren und sind. Weiterhin gibt es enge Absprachen mit dem Projekt NASCLIM, ein von Norwegen finanziertes NORAD-Projekt. Das FONA-Rahmenprogramm (Forschung für Nachhaltige Entwicklungen) des BMBF (BMBF, 2010) identifiziert das südliche Afrika als eine Schlüsselregion im Forschungsbereich Erdsystem und Geotechnologien. Das Rahmenprogramm wird durch die SPACES-Initiative (Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes) umgesetzt, welche wissenschaftliche Aktivitäten im Spannungsfeld Land-Meer-Kopplung initiieren will und zur Ausbildung von wissenschaftlichen Kapazitäten zur nachhaltigen Entwicklung in der Region beitragen will. Als erstes Projekt unter dem SPACES Schirm hat GENUS seit 2009 die FONA-Direktiven in einem Forschungsprogramm zur Interaktion von Klima mit marinen Ökosystemen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet umgesetzt.

## II. Eingehende Darstellung

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

Die Fördermittel wurden dem Antrag entsprechend verwendet. Mithilfe der bewilligten Zuwendungen konnte ein erfolgreiches Projektmanagement aufgebaut und teilprojektübergreifende Projektarbeiten entsprechend den Aufgaben geleistet werden.

#### (1) Interne Koordination des Projektverbunds GENUS:

Organisation und Durchführung von bilateralen und trilateralen Treffen sowie Tagungen mit den einzelnen Arbeitspaketen und allgemeine Projekttreffen. Insgesamt wurden von der Koordination 16 Treffen auf nationaler wie internationaler Basis initiiert, sodass ein stetiger und zielgerichteter Wissensaustausch im Projekt gewährleistet war. Die Datensicherung auf dem IOW-Server als vorläufige Datenbank wurde im Laufe des Projekts mit Kontaktaufnahme zu Pangaea und IMBER in wissenschaftlich nutzbare Strukturen überführt. Mit Ende der Projektphase wurde eine offizielle Kooperation mit Pangaea vereinbart und ein Großteil der Datensätze der GENUS-Expeditionen 2009-2011 in Pangaea eingespeist, sodass eine langfristige Datensicherung sowie ein uneingeschränkter Datenzugang gewährleistet ist.

#### (2) Koordination der GENUS *Capacity Building* Aktivitäten:

Das Projekt GENUS unterstützte Nachwuchswissenschaftler aus der Region bei ihrer Ausbildung/Weiterbildung. Insgesamt waren/sind ein Masterstudent und fünf Promotionsstudenten in GENUS tätig, die bei der Erreichung ihrer Abschlüsse / Erweiterung ihrer akademischen Qualifikation materiell, finanziell und logistisch unterstützt wurden.

Master of Science Kurs:

Richard Horaeb, Universität Bremen / International Studies of Aquatic Tropical Ecology (ISATEC)

Ph.D.-Programm:

Chris Bartholomae, Beau Tjizoo und Nadine Moroff Kohlstädt, Universität Bremen

Annethea Muller und Chibo Chikwiliwa, Universität Rostock / Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Alle Kandidaten waren / sind intensiv im GENUS-Projekt involviert. TP-0 koordinierte in diesem Zusammenhang das Stipendienprogramm aller Nachwuchswissenschaftler und unterstützte die Feldforschung mit Ausrüstung und Kleingeräten. Die Kandidaten waren an allen drei GENUS-Expeditionen 2009-2011 beteiligt und präsentierten ihre Forschungsergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene. Neben der Darstellung der wissenschaftlichen Ergebnisse wurde von den Nachwuchswissenschaftlern das Projekt GENUS aus der Sicht der Stipendiaten öffentlichkeitswirksam auf dem 2nd BCC Annual Science Forum, 11.-13.10.2010, in Swakopmund (Namibia) vorgestellt. Mit der BCC (Benguela Current Commission) und der Projektleitung wurde auch ein „Memorandum of Understanding“ zur gegenseitigen Unterstützung von wissenschaftlicher Forschung im Arbeitsgebiet abgeschlossen.

Neben der direkten Unterstützung der Stipendiaten wurden von GENUS folgende Veranstaltungen zum Kapazitätsaufbau in der Region durchgeführt:

- 2009: Wissenschaftlicher Daten- und Modellierworkshop, IOW
- 2010: Zooplankton Workshop, Universität Bremen
- 2010: Verankerungsworkshop, Swakopmund (Namibia)
- 2011: Workshop Biogeochemie und Stoffflüsse, IOW
- 2011: Ichthyoplankton Workshop, Hentjes Bay (Namibia)

### (3) Koordination der Feldexperimente:

Im GENUS-Projekt wurden drei Schiffsexpeditionen im Benguela-Auftriebsgebiet vor Namibia durchgeführt:

FRS Africana, AF-258, 01.12. - 18.12.2009, Fahrtleitung: Dr. W. Ekau

RRS Discovery, D-356, 09.09. - 13.10.2010, Fahrtleitung: Prof. Dr. F. Buchholz

FS Maria S. Merian, MSM 17/3, 30.01. - 07.03.2011, Fahrtleitung: Dr. N. Lahajnar

Zu den gemeinsamen GENUS-Expeditionen kommen noch einzelne Feldkampagnen der Teilprojekte, die zum Teil auch von TP-0 unterstützt wurden. Die Ergebnisse werden in den einzelnen Teilprojekten diskutiert. TP-0 übernahm die Gesamtkoordination aller Expeditionen und sorgte für konzertierte Abläufe zwischen den Teilprojekten bezüglich Planung und Organisation, Durchführung und Abwicklung. Weiterhin diente TP-0 als Ansprechpartner für die jeweilige Schiffsführung, die Hafenbehörden, Agenturen in Deutschland, Großbritannien, Namibia und Südafrika. Dazu gehörten insbesondere die Abstimmung mit den Schiffsagenturen vor Ort (Personal und Transport), die logistische Planung und Durchführung der Containertransporte in Deutschland und in den Auslauf-/Einlaufhäfen im Arbeitsgebiet (Containertransport, Luftfracht, Zoll, Gefahrgut, Probenrücktransport Kühlfracht) und schiffsspezifische Planungen im Vorfeld der eigentlichen Expedition, insbesondere auch aufgrund der besonderen Gegebenheiten auf nicht-deutschen Forschungsschiffen. Hierfür wurden sowohl zahlreiche Planungstreffen als auch Inspektionsreisen durchgeführt.

### (4) Projektdarstellung / Outreach:

Mit Beginn des Projektes wurde von TP-0 eine projekteigene Internetpräsenz geschaffen und über den Projektzeitraum hinaus weiterentwickelt. Die Webseite <http://genus.zmaw.de> dient als Aushängeschild und Außendarstellung für das Gesamtprojekt. Sie skizziert die Kernfragen und Forschungsziele von GENUS und informiert über die jeweiligen Aktivitäten. Über die GENUS-Seite werden auch der Live Access Server (LAS) für die Modellierung und der ftp-Server am IOW für den internen Datenaustausch erreicht. Karten, Poster und Phytoplanktongalerien fanden großen Anklang insbesondere auch bei interessierten Wissenschaftlern außerhalb des Projekts.

Ein Höhepunkt der multimedialen Außendarstellung war und ist die Erstellung einer Podcast-Serie über die Forschungsaktivitäten in den Teilprojekten. In Absprache mit dem Projektträger wurde dazu eine Kooperation zwischen TP-0 und dem Multimedia-Kontor Hamburg, einem Zusammenschluss aller Hamburger Hochschulen, eingegangen, um eine moderne Dokumentationsreihe auf professioneller Basis zu

erstellen und um eine möglichst große Zielgruppe zu erreichen. Auf allen drei GENUS Schiffsexpeditionen sowie teilweise in den Forschungslabors in Namibia und Deutschland wurde ein längerer Podcast über das Gesamtprojekt und die Kernaspekte der Forschung im Benguela-Auftriebsgebiet erstellt sowie eine Reihe von kürzeren Episoden in den Teilprojekten und deren tatsächlichen Forschungsaktivitäten gedreht. Die Podcast-Serie ist auf den Plattformen Youtube, iTunes, Multimedia-Kontor Hamburg und auf der GENUS-Webseite abrufbar:

TP-0:	GENUS Trailer
Alle TP:	GENUS Pilotepisode (Einführung, Überblick, Ziele)
TP-2:	Ozeanographie
TP-2:	Phytoplankton
TP-3:	Stickstoffkreislauf
TP-4:	Kohlenstoffkreislauf
TP-4:	Ichthyoplankton
TP-5:	Meso- und Makrozooplankton
TP-6:	Copepoden und Dekapoden
TP-7:	Krill

Diese Art der Außendarstellung erfreute sich einer großen Beliebtheit. Weit über 20.000 Abrufe sind ein Indiz dafür, dass mit dieser Form der Dokumentation ein großer Kreis an Wissenschaftlern und Forschungsinteressierte erreicht werden konnte.

Neben der multimedialen Außendarstellung wurde GENUS auch in die internationale IMBER-Initiative (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) des IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) als *endorsed project* aufgenommen. GENUS unterhält enge Verbindungen zu den regionalen Forschungsstrukturen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training), BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem), BCC (Benguela Current Commission) und NASCLIM. GENUS wurde im September 2011 auf dem FONA-Kongress (Forschung für Nachhaltige Entwicklungen) des BMBF durch TP-0 repräsentiert. Der Projektkoordinator Kay Emeis wurde 2011 als Mitglied in das „LOICZ-IMBER Continental Margins Task Team“ berufen.

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

Wichtigste Position im Finanzplan waren die Personalkosten (TV-L E13, Dr. Lahajnar), Charterkosten FRS Africana 2009, Kapazitätsaufbau / Stipendienprogramm und zentrale Abwicklung Transport/Logistik der drei GENUS-Expeditionen. Alle Positionen wurden entsprechend der Bewilligung verwendet.

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

Alle Arbeiten waren von zentraler Bedeutung für die Steuerung und teilprojektübergreifende Koordination des Verbundprojekts. Alle Arbeiten erscheinen notwendig, um die übergeordneten Projektziele zu erreichen.

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

Teilprojekt-0 hatte keine wissenschaftlichen Aufgaben im engeren Sinn, sondern diente zum großen Teil zur Koordinierung der Wissenschaft und Forschung, der Feldarbeiten und des Kapazitätsaufbaus in der Region. Indirekt lieferte TP-0 somit einen Beitrag zu den übergeordneten Fragestellungen der Forschungsprogramme wie IMBER, LOICZ, FONA oder SPACES. GENUS war und ist eng mit seinen Teilprojekten und der BCC oder NANSCLIM verwoben; die Projektergebnisse und das Wissen aus dem Kapazitätsaufbau mit den Stipendiaten fließen direkt und indirekt in die entsprechenden regionalen Organisationen und Behörden ein.

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

Es sind keine Arbeiten oder Ergebnisse bekannt, die mit dem Projekt GENUS konkurrieren oder die einen entscheidenden Einfluss auf die Durchführbarkeit der Projektarbeit gehabt haben.

#### **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

GENUS-Webseite:

<http://genus.zmaw.de>

GENUS-Poster:

<http://genus.zmaw.de/Poster-GENUS-Project.1574.0.html>

GENUS-Podcasts:

<http://genus.zmaw.de/Movies-GENUS-Podcast.1924.0.html>

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 1**

## Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPIMet)

<b>Teilprojektleiter:</b> Prof. Dr. Daniela Jacob, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	<b>Förderkennzeichen:</b> 03F0497A
<b>Kurztitel:</b> GENUS	<b>Projektdauer:</b> 01.03.2009 – 30.04.2012

### Anlage 2 zum Schlussbericht

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im einzelnen mit einer Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Hauptaufgabe des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPIMet) bestand in der Analyse, Verbesserung und Bereitstellung der atmosphärischen Antriebsdaten für das Ozeanmodell MOM. Hierfür wurde das regionale Klimamodel REMO zum dynamischen Downscaling von Reanalysedaten auf eine horizontale Gitterauflösung von bis zu 25 km (0.22°) verwendet.

Die Ziele der Arbeiten am MPIMet wurden im Projektantrag in 2 Bereiche aufgeteilt:

#### Task I:

- Simulation der Zeitperiode 1960 bis heute und Vergleich der REMO-Ergebnisse mit Beobachtungen, um die Güte der REMO-Ergebnisse in der Untersuchungsregion zu bestimmen
- Anpassung von REMO an die Modellregion je nach Ergebnissgüte

#### Task II:

- Bereitstellung hochaufgelöster atmosphärischer Antriebsdaten für 3 Zeitscheiben für die Ozeanmodellierung (Kleine Eiszeit, Mittelalterliche Wärmeperiode und 1970 bis 2008)
- Identifizierung möglicher Veränderungen im klimatischen Antrieb und seiner Variabilität.

#### Geleistete Arbeit am MPIMet:

##### Task I:

- Festlegung der Modellgebiete
- Erstellung von zwei regionalen Klimasimulationen auf unterschiedlichen Modellgebieten und Auflösungen
- Validierung der Klimasimulationen mit Beobachtungsdaten
- Aufbereitung der Daten für das Ozeanmodell MOM und Auslieferung an den Projektpartner TP2
- Organisation eines Treffens zur Nutzung von REMO-Daten für den Projektpartner TP2

##### Task II:

- Sensitivitätsstudien zum Einfluss des Ozeans auf die Atmosphäre

## Task I:

### 1. Festlegung der Modellgebiete

Nach einer gründlichen Analyse der vorherrschenden Zirkulationsmuster in der Region SW-Afrika, wurden zwei Modellgebiete in Absprache mit den Projektpartnern (TP2) des Leibniz Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) festgelegt, für die Simulationen mit dem regionalen Klimamodell REMO erstellt wurden. Es handelt sich dabei um ein großes Modellgebiet, welches den gesamten Südatlantischen Ozean zwischen Südamerika und Afrika umfasst, auf welchem eine Modellsimulation mit einer horizontalen Gitterauflösung von  $0.44^\circ$  (ca.  $50 \times 50$  km Gitterlänge) gerechnet wurde (Abbildung 1, links), sowie ein kleineres Modellgebiet, auf welchem das Benguela-Auftriebsgebiet in einer feineren Modellauflösung von  $0.22^\circ$  (ca.  $25 \times 25$  km Gitterlänge) simuliert wurde (Abbildung 1, rechts).

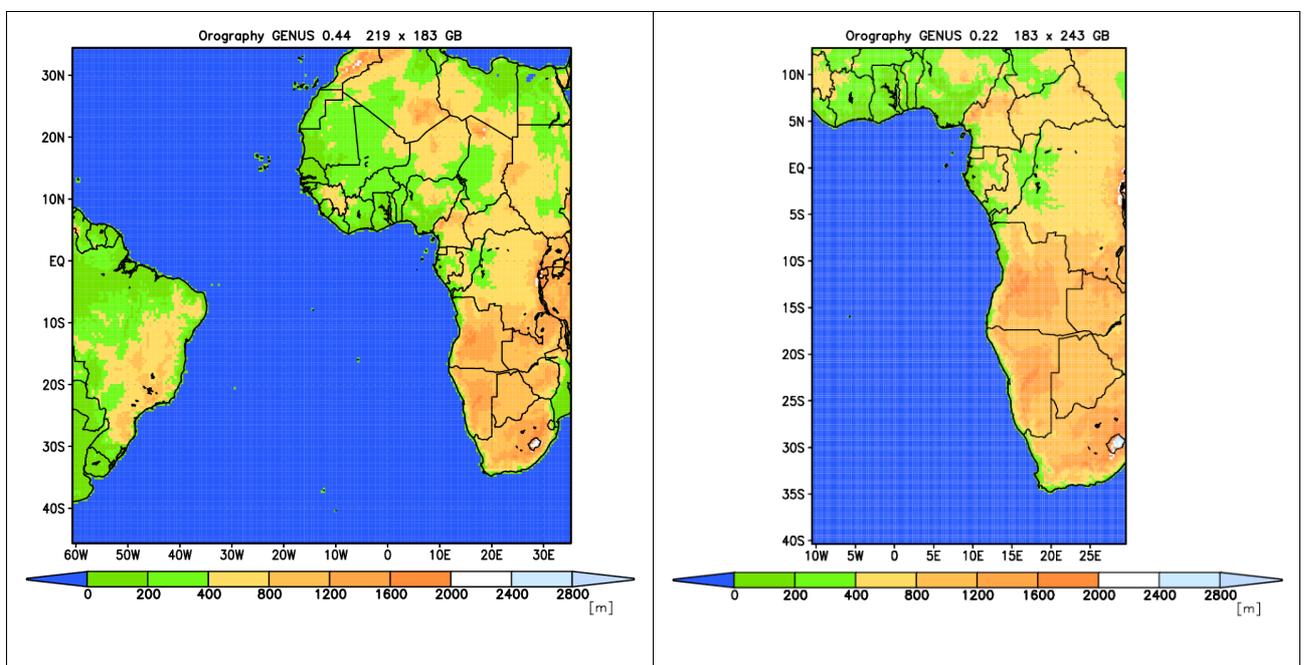
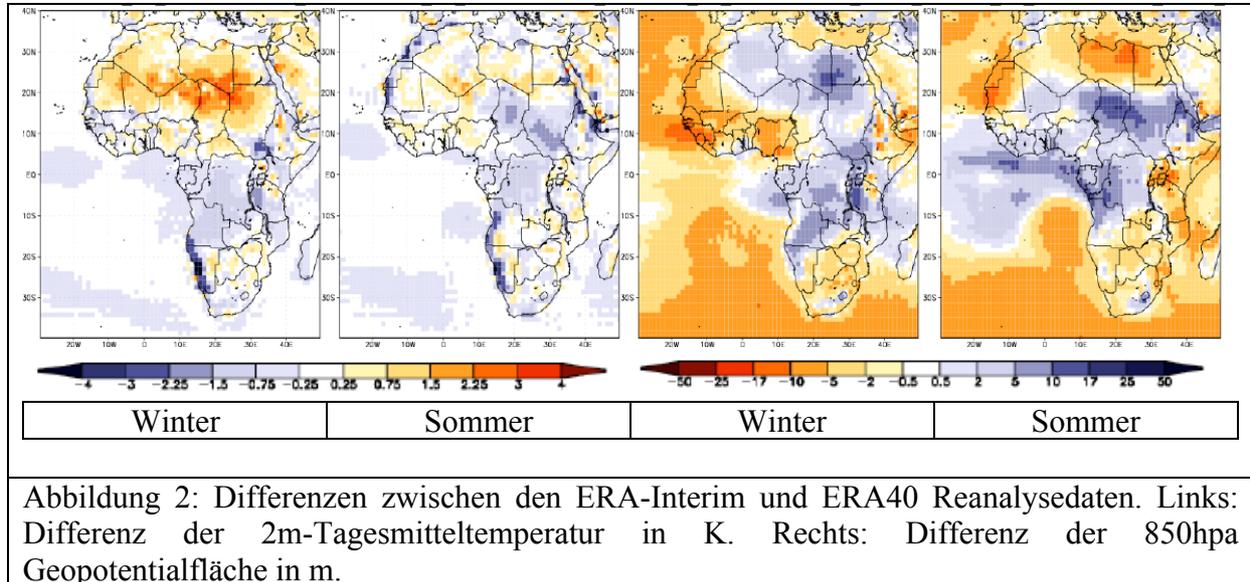


Abbildung 1: Orographie des REMO Modells (0.44 links, 0.22 rechts) für die GENUS-Simulationen

### 2. Erstellung von zwei regionalen Klimasimulationen auf unterschiedlichen Modellgebieten und Auflösungen

Aufgrund des immer noch sehr hohen Unterschiedes in der Auflösung zwischen den globalen Antriebsdaten und der höher aufgelösten REMO-Simulation wurde die Simulation auf dem kleineren Modellgebiet im sogenannten Doppelnestungsverfahren berechnet. Dazu wurden die Ergebnisdaten der  $0.44^\circ$  REMO Simulation als Eingangsdaten für die  $0.22^\circ$  REMO Simulation verwendet. Abweichend vom Leitanspruch wurde mit den Projektpartnern vereinbart, die hindcast Simulationen nicht mit ERA-40 Reanalysedaten anzutreiben, sondern mit ERA-Interim Reanalysedaten. Eine Analyse der beiden Datensätze hat ergeben, dass wesentliche Unterschiede in den ERA-Interim und ERA-40 Daten auftreten (Abbildung 2). ERA-Interim ist die aktuellste Reanalyse des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) und besitzt zum einen eine höhere horizontale Auflösung als die ERA-40 Daten die bessere Ergebnisse beim Downscaling verspricht. Zum anderen bietet ERA-Interim die Möglichkeit auch die Zeitspanne zwischen 2002 und 2008 zu modellieren,

die nicht von der ERA-40 Reanalyse abgedeckt wird. In diesem Zeitraum hatten jedoch viele der Schiffsmessungen stattgefunden, die speziell im TP2 zur Validierung herangezogen werden. Die Nutzung von ERA-Interim hatte zur Folge, dass die Simulationszeit erst 1989 beginnen konnte, da vor 1989, zum Zeitpunkt des Projektbeginns, keine Antriebsdaten zur Verfügung standen.



### 3. Validierung der REMO hindcast Simulation

#### Begründung der Notwendigkeit:

Bevor die REMO-Daten als Antriebsdatensatz für Ozeanmodelle genutzt werden können, muss sichergestellt werden, dass die Modellsimulationen in der Region westliches und südliches Afrika im Wesentlichen nicht von den Beobachtungen abweichen. Die vom MPIMet erstellten Simulationen stehen am Anfang einer Modellkette, auf der ein großer Teil der im GENUS-Projekt erstellten Arbeiten aufbaut. Fehler in der Modellsimulation wirken sich dementsprechend auf alle weiteren Ergebnisse aus.

Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse der Validierung der hochaufgelösten REMO Simulation kurz zusammengefasst werden. Die Validierung ist Teil des Projektantrages und wurde im Rahmen einer Diplomarbeit veröffentlicht. Eine weitere Veröffentlichung in einem Bericht des Climate Service Centers (CSC) ist geplant. Die 0.22° REMO hindcast Simulation wird im weiteren Verlauf als "Validierungslauf" oder mit der Abkürzung "VAL" gekennzeichnet.

Ein besonderer Fokus wurde auf die Meeresoberflächentemperatur (Abschnitt 3b) und die Simulation des Windfeldes (Task I: (3c)) gelegt, da diese Felder von besonderer Bedeutung für die Ozean- Atmosphären Wechselwirkungen sind.

### 3a. 2m-Temperatur

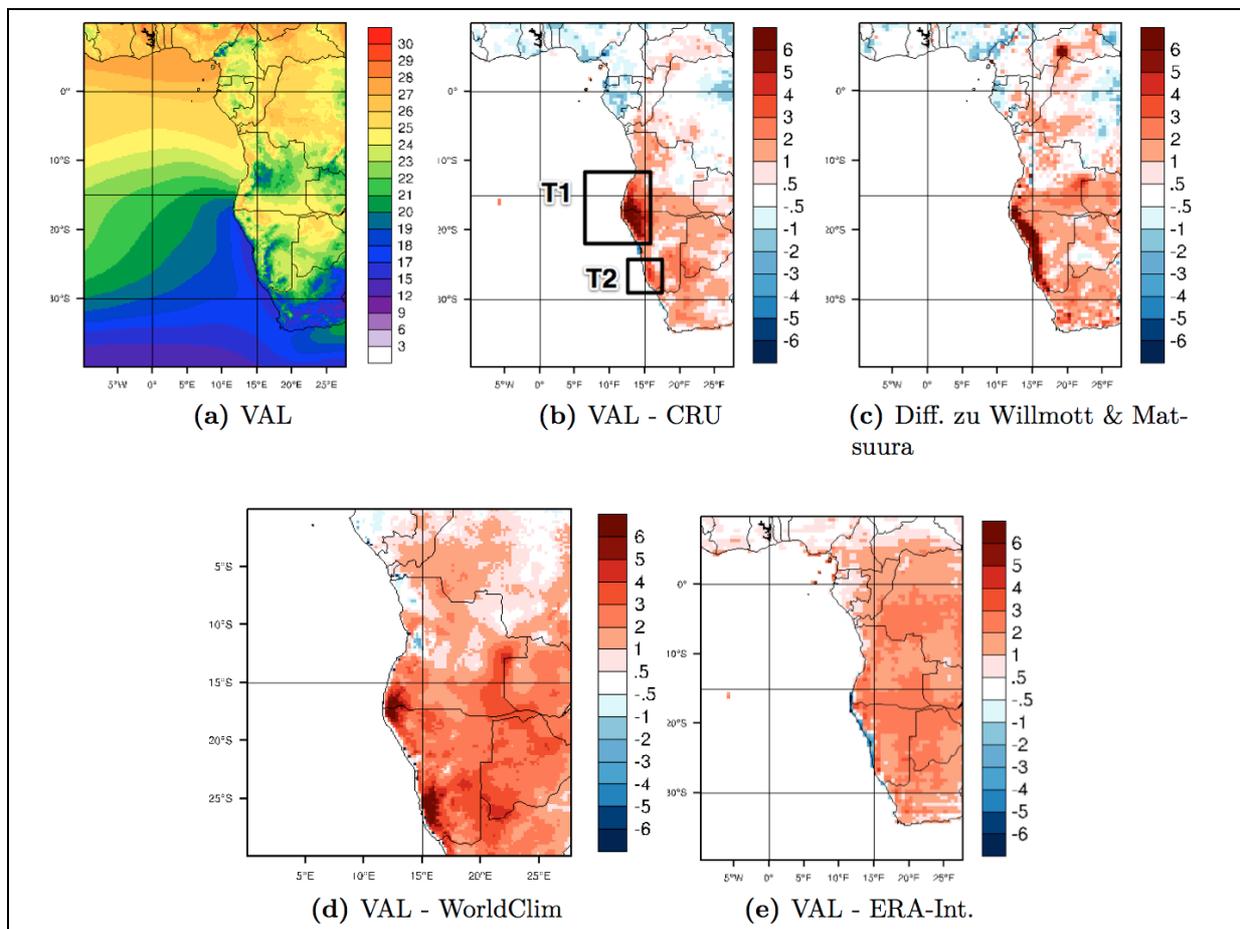


Abbildung 3: (a) 2m-Tagesmitteltemperatur des Validierungslaufs in (°C). (b bis e) Differenzen der 2m-Tagesmitteltemperatur in (K): Zwischen dem Validierungslauf und den CRU-Daten (b), den Daten von Willmott & Matsuura (c), den WorldClim-Daten (d) sowie den ERA-Interim- Reanalysedaten (e). Jahresmittel 1989-2002.

In Abbildung 3 wird der oben beschriebene Validierungslauf mit den Temperaturbeobachtungen von CRU (Abbildung 3 (b)), Willmott & Matsuura (Abbildung 3 (c)), WorldClim (Abbildung 2 (d)) und dem Reanalysedaten ERA-Interim (Abbildung 2 (e)) verglichen. Hierbei zeichnen sich die in der Abbildung 3 (b) dargestellten Regionen T1 und T2 deutlich durch einen hohen Temperaturbias ab. Die Temperaturunterschiede in den Gebieten T1 und T2 sind in allen Vergleichen zu den Beobachtungen sichtbar, weisen jedoch Unterschiede in der Stärke und Ausbreitung der Abweichungen auf. So sind in den Differenzen der modellierten Temperaturdaten zu den Willmott & Matsuura-Daten (Abbildung 3 (c)) geringere Temperaturabweichungen im nördlichen Teil der Region T1 zu sehen. In einem Vergleich des Validierungslaufes mit den ERA-Interim-Reanalysen (Abbildung 3 (e)) können die hohen Abweichungen an den Küsten der Auf Quellregionen nicht in dem Ausmaß beobachtet werden. Neben dem sehr großen Bias an den Küsten, zeigen alle vorgenommenen Vergleiche zum Validierungslauf, dass ein großer Teil des südafrikanischen Kontinents mit bis zu +4 K zu hohen 2m-Tagesmitteltemperaturen simuliert wird. Die Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturdifferenzen zwischen dem Validierungslauf und den CRU-Daten sind in Abbildung 4 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der hohe Temperaturbias des Validierungslaufs an der Küste von Namibia und Angola

im Wesentlichen durch eine Überschätzung der Tagesmaximumtemperatur hervorgerufen wird. Der Temperaturbias auf dem restlichen südafrikanischen Kontinent ist insbesondere in der Tagesminimumtemperatur zu finden und deutet auf eine zu geringe nächtliche Abkühlung der unteren Luftschichten hin.

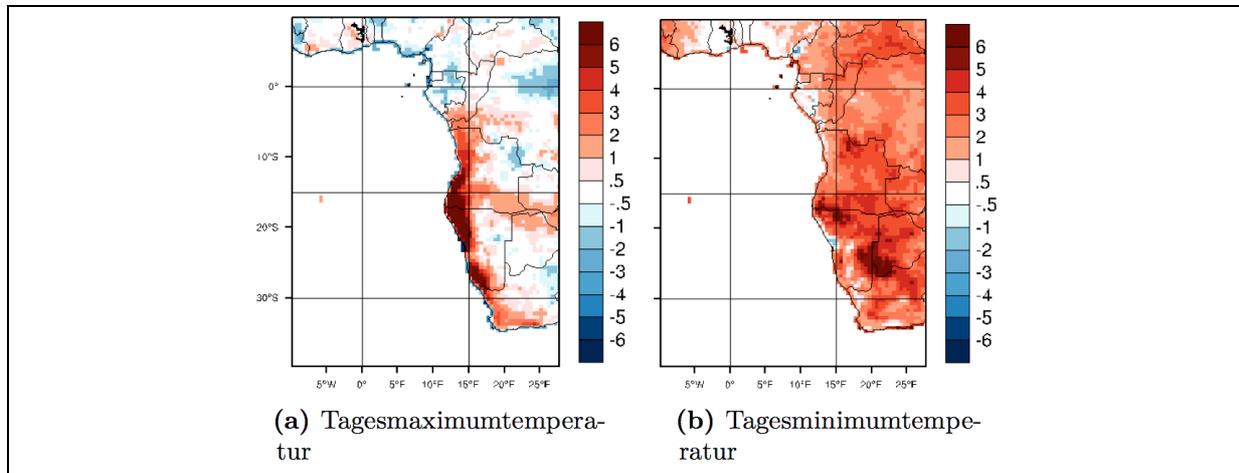


Abbildung 4: Differenzen der Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperatur in (K) zwischen REMO und CRU. Jahresmittel 1989-2002.

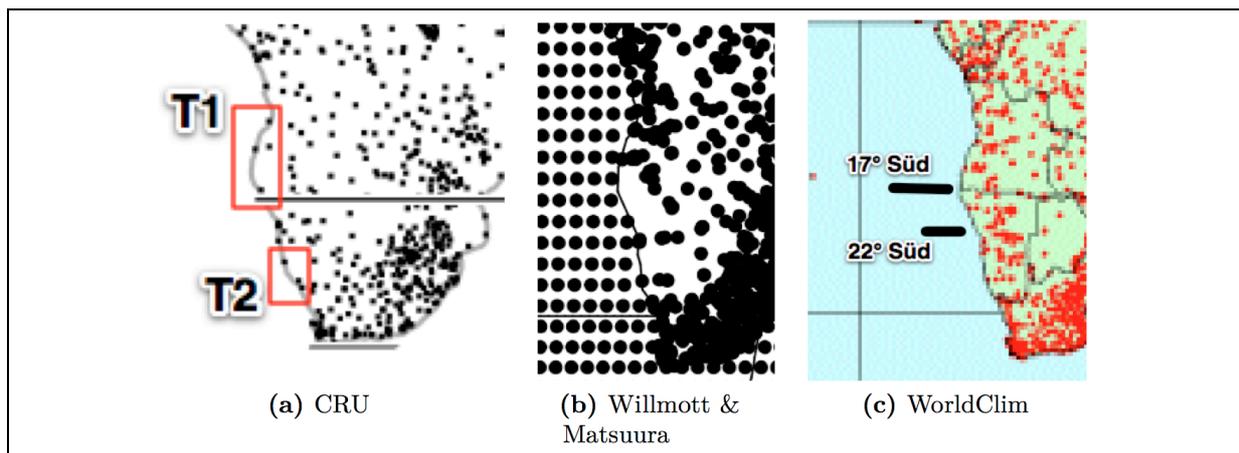
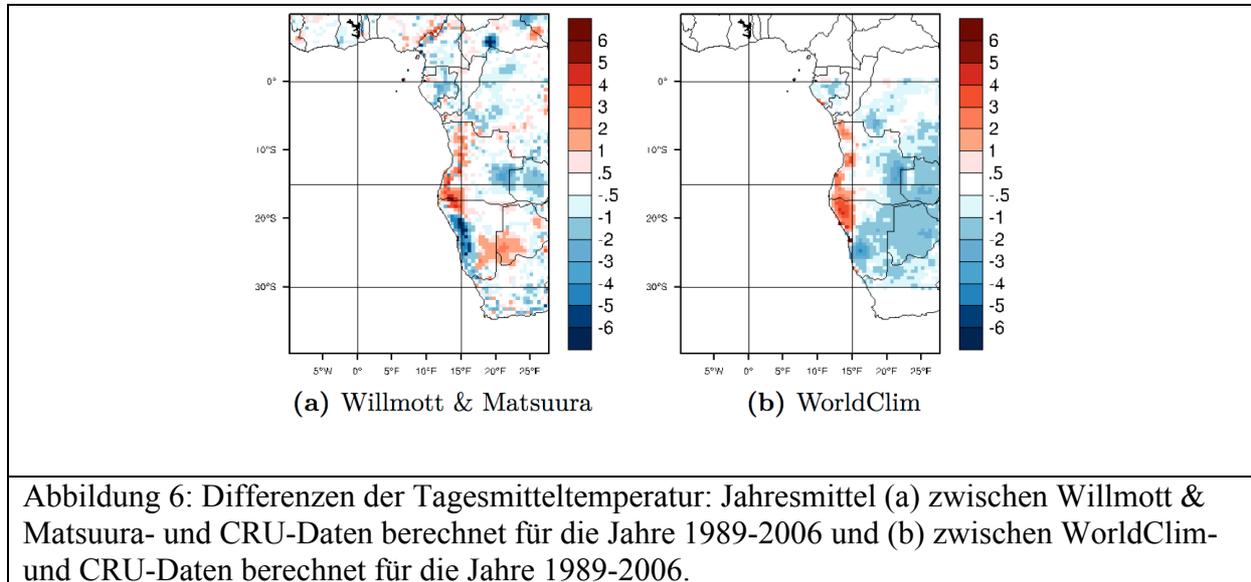


Abbildung 5: Messstationsübersicht der Beobachtungsdatensätze.

Ein Vergleich der Messstationen der verwendeten Beobachtungsdatensätze zeigt, dass die Messnetzdichte in den betroffenen Regionen besonders gering ist (Abbildung 5). Dies hat zur Folge, dass hohe horizontale Temperaturgradienten, die nicht ausschließlich aufgrund von Höhendifferenzen auftreten, nicht gut in den verwendeten interpolierten Beobachtungen repräsentiert werden. Auftriebsregionen sind jedoch für eine starke Temperaturabnahme vom Land in Richtung Küste bekannt. Der hierdurch verursachte Fehler in den Beobachtungen scheint einen wesentlichen Teil der Differenzen zwischen dem Modell und den interpolierten Beobachtungen in den Regionen T1 und T2 zu erklären.

Ein Vergleich der Beobachtungsdatensätze unter Berücksichtigung der Lage der verwendeten Messstationen macht dies deutlich. Insbesondere in der Region T1 weichen die Beobachtungen um bis zu + 4 K voneinander ab, was in etwa der Hälfte der Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Beobachtungen entspricht (Abbildung 6). Im nördlichen Bereich der Region T1 scheinen die Willmott & Matsuura- und WorldClim-Daten mindestens eine Messstation mehr zu verwenden und beide Datensätze zeigen hier höhere Temperaturen an als die CRU-Daten. Im südlichen Teil von T1 ist nur in den WorldClim-Daten eine Station abseits der Küste vorhanden. Auch hier sind die Temperaturen in den

WorldClim-Daten höher angegeben als bei den CRU- und Willmott & Matsuura-Daten. In dem Bereich zwischen den beiden Regionen T1 und T2, in denen nur die Willmott & Matsuura-Daten größere Differenzen zum Validierungslauf zeigen, ist zu erkennen, dass die Willmott & Matsuura-Daten die geringste Stationsanzahl aufweist. In der Region T2 scheint in allen Datensätzen die Anzahl der Stationen zwischen der Küste und der Randstufe nicht auszureichen.



Weitere Gründe für die Abweichung können zum einen eine schlechte Repräsentation der küstennahen Aufquellgebiete sein, auf die in Task II (a) genauer eingegangen wird. Zum anderen hat ein Vergleich der Temperatur-, Bewölkungs- und Niederschlagsabweichungen zwischen den CRU-Daten und dem Validierungslauf gezeigt, dass es einen zeitlichen wie auch räumlichen Zusammenhang zwischen einer unterrepräsentierten Bewölkung und der Tagesmaximumtemperatur gibt.

### 3b. Meeresoberflächentemperatur (SST)

Für eine erfolgreiche Verwendung der mit REMO erstellten Klimasimulationen als Eingangsdaten für Ozeanmodelle ist es wichtig, dass sowohl die Zirkulation als auch die Wärme Flüsse über dem Ozean möglichst realistisch sind. Ein bestimmender Einflussfaktor für diese Parameter ist die SST. Da dem Regionalmodell REMO kein Ozeanmodell zur Verfügung steht, welches die SST errechnen kann, wird diese dem Modell vorgegeben. Für den Validierungslauf wird als SST-Antrieb der ERA-Interim-Reanalyselauf genutzt. Die Meeresoberflächentemperatur wird in ERA-Interim nicht errechnet, sondern aus Satellitendaten gewonnen und auf das Modellgitter interpoliert (Dee et al. [2011]). Der Reanalyselauf, und damit die dem Modell zugrunde liegende SST, hat im Verhältnis zum Regionalmodell eine geringere horizontale Auflösung von  $0.75^\circ$ . Dies gibt Anlass zur Frage, ob die Aufquellgebiete in den ERA-Interim-Daten hinreichend dargestellt sind. Um herauszufinden, wie gut die Aufquellgebiete repräsentiert werden, wurde für das GENUS Projekt ein Vergleich zwischen den ERA-Interim SST-Daten und einem hoch aufgelösten SST-Datensatz durchgeführt. Genutzt wurden hierfür die NOAA-Pathfinder-Daten mit einer horizontalen Auflösung von 4 km (Kilpatrick et al. [2001]). Durch die Sicherstellung einer gewissen Datenqualität kommt es zu sehr vielen nicht vorhandenen Werten im täglichen Datensatz. Aus diesem Grund wurde sich bei der Auswertung auf die Nutzung von Monatsmitteln beschränkt. Diese wurden für das Jahr 1990 auf eine horizontale Auflösung

von 25 km gebracht (entspricht  $0.22^\circ$ ). Trotz der Verwendung von Monatsmitteln kommt es an einigen Stellen zu Fehlwerten, die horizontal interpoliert werden müssten. Abbildung 7 zeigt für jede verwendete Gitterbox die Anzahl der Monate, in der eine Interpolation vorgenommen wurde.

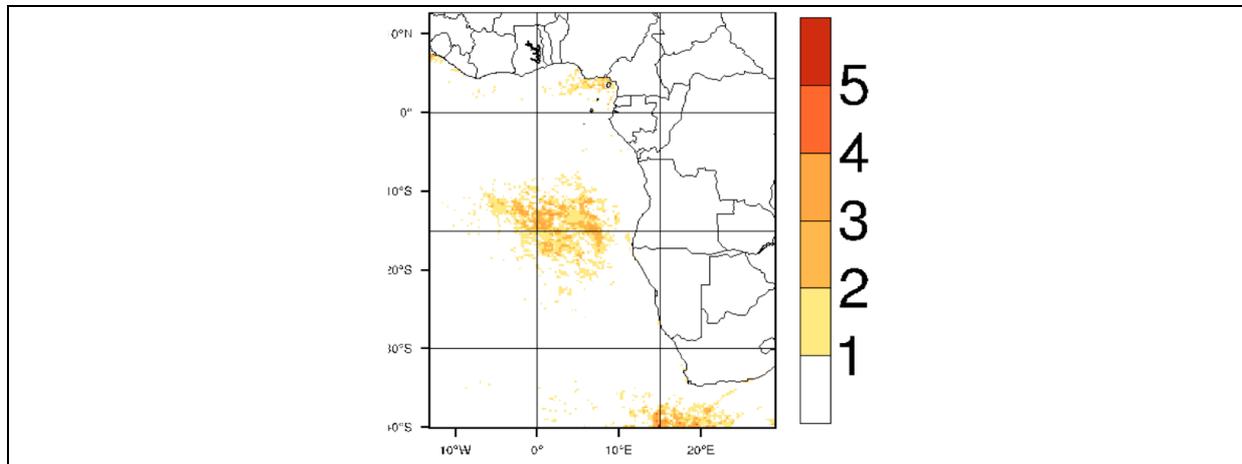


Abbildung 7: Anzahl fehlender Monatsmittelwerte in jeder Gitterbox für das Jahr 1990.

Der Vergleich der NOAA-Daten mit der ERA-Interim-SST (Abbildung 8) zeigt, dass der hohe Meeresoberflächentemperaturgradient der Küstenrandströme durch die hohe Auflösung in den NOAA-Daten besser dargestellt ist. So sind die Hauptauf Quellgebiete des Benguelastroms in den Differenzenplots über das ganze Jahr hinweg gut zu erkennen (Abbildung 8 (rechts)). Der NOAA-Datensatz zeigt teilweise über  $-1.5$  K niedrigere Temperaturen an. Aber auch die SST in der Nähe der Warmwasserströme weist wesentlich höhere Temperaturgradienten auf. Insbesondere im Sommer (Abbildung 8 (a)) und im Herbst (Abbildung 8 (b)) geben die NOAA-Daten über  $+1.5$  K höhere Temperaturen im Bereich des Angolastroms an. Die geringeren Abweichungen vor Südafrika im Winter (Abbildung 8 (c)) lassen sich durch die nordwärtige Verlagerung der Angola-Benguela-Front erklären, die zu niedrigeren Oberflächentemperaturen in der Region führt. Der Agulhasstrom wird hingegen das ganze Jahr hindurch in den Satellitendaten wärmer wiedergegeben. Die maximale Abweichung findet auch hier in der Zeit des geringsten Auftriebs (DJF) statt und erreicht Werte von bis zu  $+2$  K. Aber nicht nur bei den kleinräumigen Gebieten der Randströme unterscheiden sich die beiden Datensätze. Auch der Golf von Guinea wird im NOAA-Datensatz um ca.  $1$  K niedriger angegeben, während in der Region südlich von Namibia die Meeresoberflächentemperaturen tendenziell höher beobachtet werden. Diese großflächigen Abweichungen können nicht über das Auflösungsproblem erklärt werden und weisen auf ein weiteres Defizit in den Datensätzen hin.

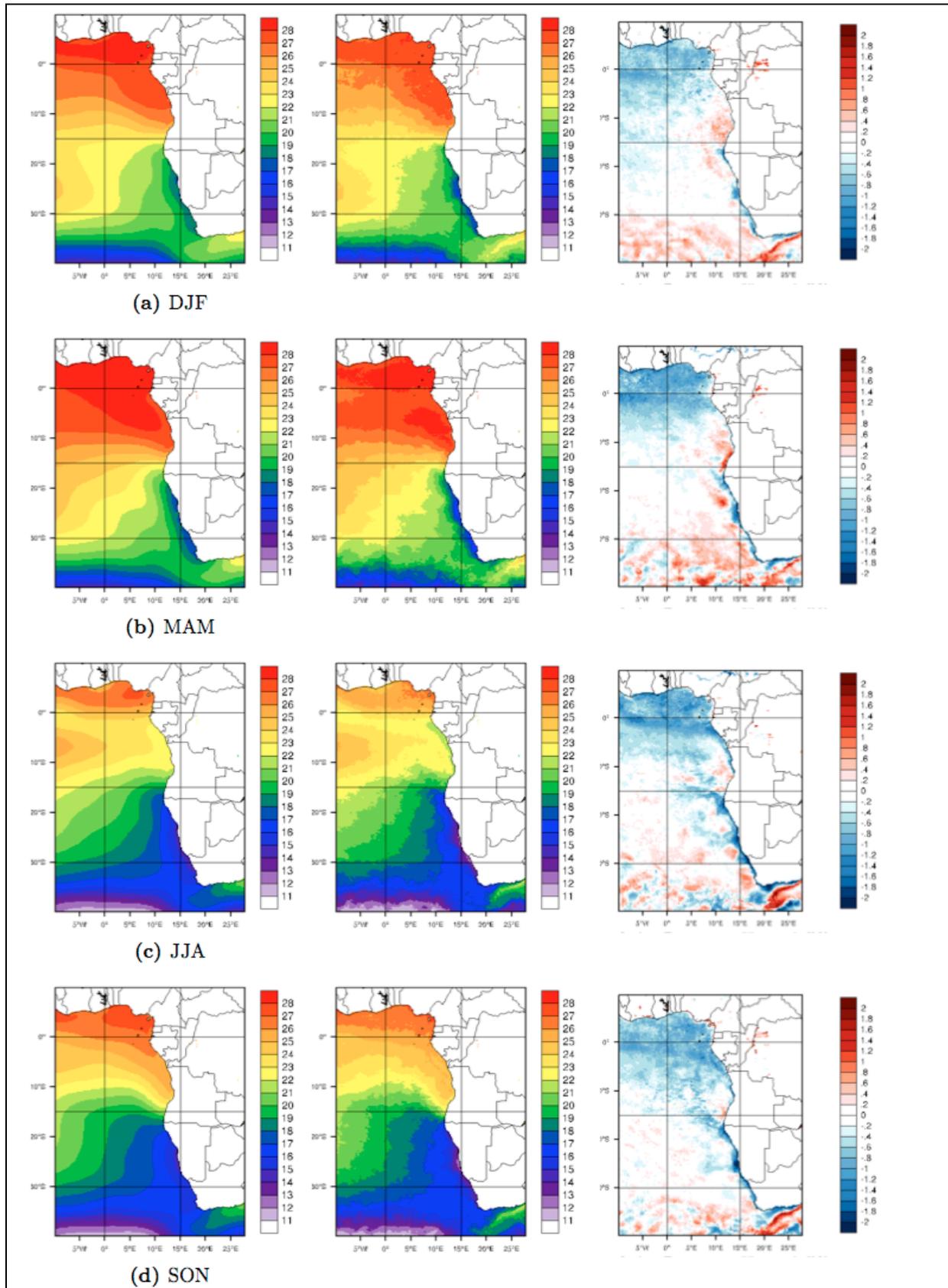


Abbildung 8: Meeresoberflächentemperaturen in (K). Links: Validierungslauf. Mitte: NOAA- Pathfinder bearbeitet. Rechts: Differenz zwischen NOAA-Pathfinder und dem Validierungslauf. Für das Jahr 1990.

### 3c. Niederschlag

Der Niederschlag wird in REMO in den meisten Regionen des südlichen Afrikas recht gut simuliert. Hänslér [2011] konnte zeigen, dass REMO in manchen Regionen die Niederschläge aufgrund der hohen horizontalen Auflösung deutlich besser darstellt als in den ERA-Interim Daten. Dies betrifft insbesondere die Regionen, in denen die orografischen Hebungsprozesse von großer Bedeutung sind.

Vergleiche mit den Beobachtungsdaten von GPCC und CRU zeigen ein sehr konstantes Muster. Hiernach simuliert REMO an der Küste von Namibia und Nordangola zu wenig Niederschlag und in der Sommerniederschlagsregion im Osten von Südafrika zu viel (Abbildung 9). Dies ist konform mit den Wolkenbeobachtungen. Hier muss erwähnt werden, dass 20 bis 60 % weniger Niederschlag an der Küste Namibias, bei einem Niederschlag von unter 5 mm/Monat, leicht zu erreichen ist. Für Gegenden mit einem mittleren Niederschlag von unter 1 mm/Monat wurden die Abweichung in Abbildung 9 auf Null gesetzt.

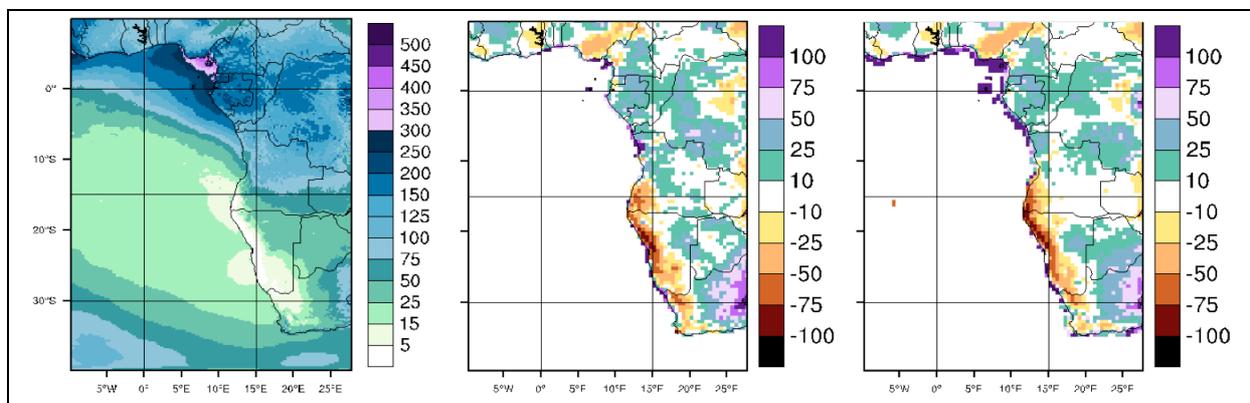


Abbildung 9: Jahresmittel der Niederschläge (mm/Monat) über die Jahre 1989 bis 2006. Links: Validierungslauf. Mitte: Differenz zwischen dem Validierungslauf und den GPCC-Daten in Prozent. Rechts: Differenz zwischen dem Validierungslauf und den CRU-Daten in Prozent.

### 3d. Das 10m-Windfeld und der Bodenluftdruck

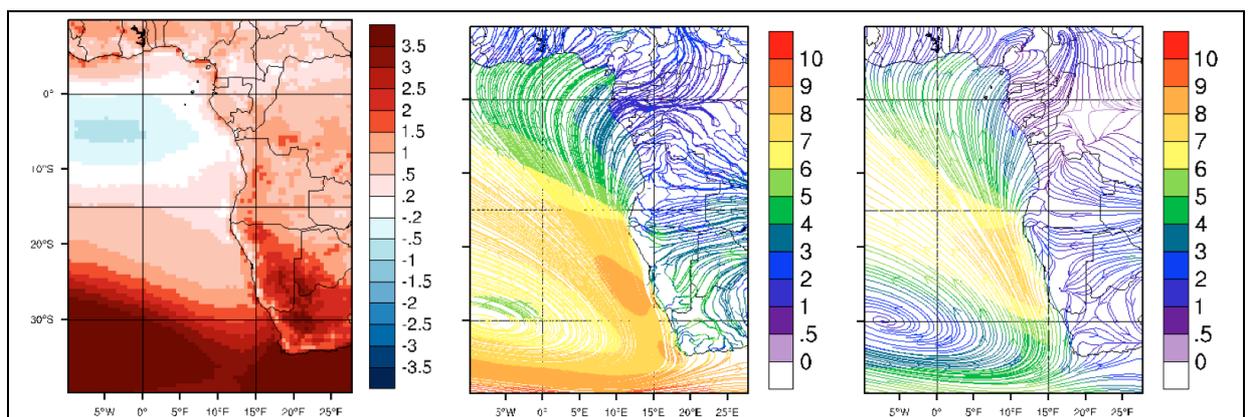


Abbildung 10: Links: Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen dem Validierungslauf und den ERA-Interim-Daten. Mitte: Stromlinien des Validierungslaufs. Rechts: Stromlinien von ERA-Interim. Windgeschwindigkeit farblich angegeben in (m/s). Mittel über die Jahre 2000 bis 2008.

Das 10m-Windfeld des Validierungslaufs wird mit den QuickSCAT-Daten (Ebuchi et al. [2002]) und den ERA-Interim-Reanalysedaten verglichen (Dee et al. [2011]). Anhand der

Stromlinien vom Validierungslauf und den ERA-Interim-Daten ist zu erkennen, dass REMO die Zirkulation im Wesentlichen gut simuliert (Abbildung 10 (mitte und rechts)). Die Differenz der Windgeschwindigkeiten zwischen dem Validierungslauf und den ERA-Interim-Daten zeigt, dass die Windgeschwindigkeiten bis ca. 10° Süd in REMO höher simuliert werden und über dem Golf von Guinea nördlich dieses Breitengrades zu niedrig angegeben werden.

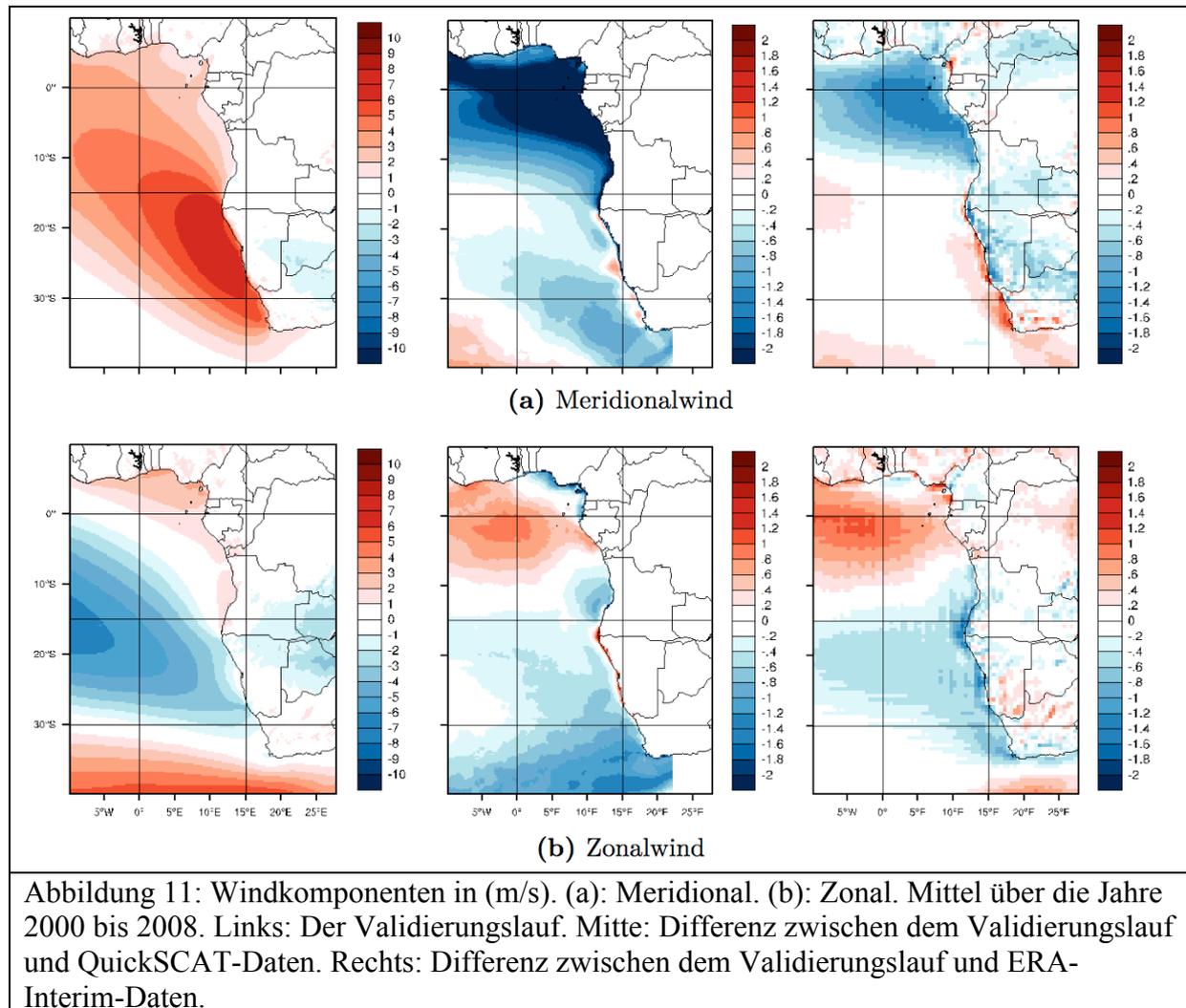


Abbildung 11 zeigt die Differenzen der meridionalen (oben) und zonalen (unten) Windkomponenten zwischen dem Validierungslauf und QuickSCAT-Daten (Mitte) und ERA-Interim-Daten (rechts). Bei einem Vergleich der Differenzen zwischen dem Validierungslauf und den QuickSCAT-Daten und den Differenzen zwischen dem Validierungslauf und den ERA-Interim-Daten fällt ein sehr ähnliches Muster auf. Beide Vergleiche weisen darauf hin, dass REMO den Windvektor im Atlantik außerhalb der Küstenregion falsch darstellt. Die zonale Komponente wird dadurch zu hoch und die meridionale Komponente zu gering ausgegeben. Über der Aufquellregion vor Namibia simuliert REMO die zonale Komponente in beiden Vergleichen mit zu hohen Windgeschwindigkeiten. Das Windfeld von ERA-Interim wird jedoch über dem Meer regelmäßig mit QuickSCAT-Daten abgeglichen (Dee et al. [2011]), ist also nicht unabhängig von den QuickSCAT-Daten. Dennoch sind die Abweichungen zwischen dem Validierungslauf und den ERA-Interim-Daten nur etwa halb so groß wie zwischen dem Validierungslauf und den QuickSCAT-Daten und auch ihre Ausdehnung ist geringer. Laut des Validierungsberichtes der QuickSCAT-Daten von Ebuchi et al. [2002] hat der Satellit insbesondere bei geringen Windgeschwindigkeiten Probleme bei

der Bestimmung des Windvektors. In Regionen in denen ERA-Interim-Daten und QuickSCAT-Daten deutliche Abweichungen zeigen und die Windgeschwindigkeiten sehr klein angegeben werden, ist es schwer zu sagen, wie verlässlich die QuickSCAT-Daten sind. Eine dieser Regionen liegt vor der Küste Angolas. Bei der Kopplung mit einem Ozeanmodell sind gerade in dieser Region genaue Aussagen über die Windgeschwindigkeiten, insbesondere die meridionalen Komponente, relevant. Studien vom IOW haben ergeben, dass eine korrekte Simulation des Windfeldes in der Küstenregion um 17° Süd im besonderen Maße ausschlaggebend für die Simulation der Aufquellgebiete vor der Küste Namibias ist. Während im Vergleich zu ERA-Interim-Daten nur zwischen Dezember und Februar geringere meridionale Windgeschwindigkeiten an der Küste vor Angola auftreten, wird diese im Vergleich zu den QuickSCAT-Daten auch im Frühling und Herbst noch unterrepräsentiert. Im Winter, in dem die Angola-Benguela-Front weit nach Norden gewandert ist und sich die Windgeschwindigkeiten in der Gegend erhöhen, zeigt der Validierungslauf im Bereich der Front sogar eine höhere meridionale Windgeschwindigkeit als die ERA-Interim-Daten.

Um die Unterschiede im Windfeld zwischen ERA-Interim-Daten und dem Validierungslauf erklären zu können, wurde zusätzlich das Bodendruckfeld überprüft (Abbildung 12). Der Vergleich zeigt, dass die südatlantische Antizyklone im Validierungslauf schwächer ausgeprägt ist und der Bodenluftdruck an der gesamten Westküste Afrikas niedriger angegeben wird. Dies könnte dazu führen, dass in der REMO-Simulation die Isobaren zwischen 10° bis 30° Süd zonal verlaufen was eine ebenfalls zonale Ausrichtung der Stromlinien zur Folge haben könnte. Es ist zu beachten, dass der 10m-Wind, bedingt durch Reibungseffekte, eine Rechtsablenkung gegenüber den Isobaren erfährt.

Die in Task I (3b) angegebene zu niedrige Meeresoberflächentemperatur begünstigt Absinkbewegungen und sorgt so für höheren Luftdruck. Wie stark eine veränderte SST die Zirkulation beeinflusst wurde in einer Sensitivitätsstudie genauer analysiert (Task II: (1)).

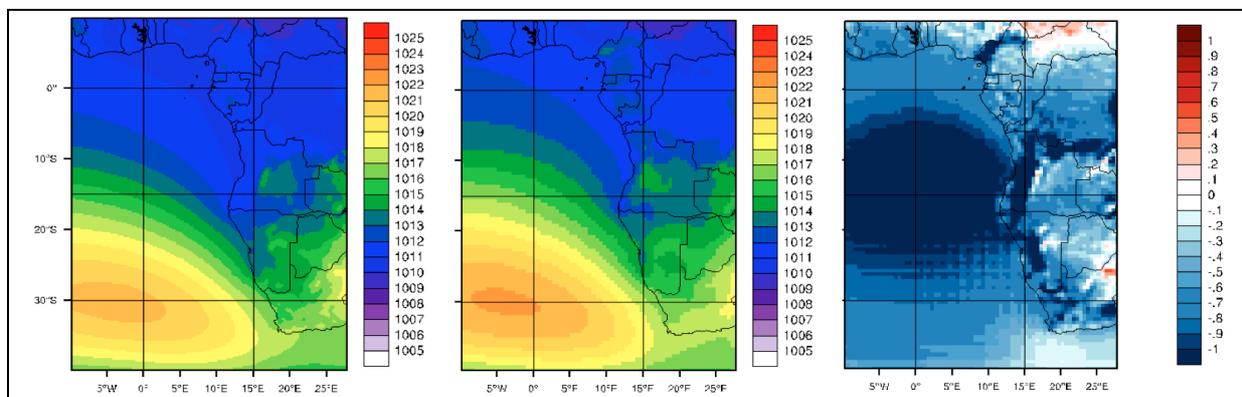


Abbildung 12: Luftdruck in (hPa). Mittel über die Jahre 2000 bis 2008. Links: Validierungslauf, Mitte: ERA-Interim, Rechts: Differenz zwischen dem Validierungslauf und ERA-Interim-Daten.

#### 4. Aufbereitung der Daten für das Ozeanmodell MOM und Auslieferung an den Projektpartner TP2

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Parameter, die für den Projektpartner TP2 berechnet bzw. als Zeitreihe dem Modelloutput entnommen und in das NetCDF Format konvertiert wurden. Zusätzlich zur Auslieferung der Daten an den Projektpartner TP2 wurden mehrere Treffen organisiert, in denen die Nutzung von REMO Daten als Antriebsdatensatz für Ozeanmodelle diskutiert wurde.

Tabelle 1: Übersicht über die an TP2 gelieferten Parameter

Parameter	Auflösung	Format	Zeitspanne	Übergabetermin an TP2
Koordinaten	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
10 m Windgeschwindigkeiten	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
maximale Windböen	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Luftdruck auf Meeresspiegel umgerechnet	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
2 m spezifische Feuchte	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
2 m Lufttemperatur	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Land-Seemaske	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
kurzwellige Einstrahlung am Boden	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
langwellige Einstrahlung	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Niederschlagssumme	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Windstress	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
latenter Wärmefluss	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Verdunstung	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
sensibler Wärmefluss	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
langwelliges Strahlungsbudget	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
kurzwelliges Strahlungsbudget	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Bewölkung	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010
Albedo	0.44° / 0.22°	NetCDF	1989-2008	Quartal III 2010

## **Task II:**

In Absprache mit dem Projektkoordinator und den Partnern des Leibniz Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) wurde beschlossen, dass der Fokus auf der besseren Analyse der lokalen Ozean-Atmosphären Rückkopplungsmechanismen im Modell liegen sollte. Da das MPI zudem entgegen der vor Projektbeginn getroffenen Absprachen die Ozeanranddaten für die zwei Perioden in der Vergangenheit nicht in der benötigten zeitlichen Auflösung bereitstellen konnte, wurden die ursprünglich im Antrag vorgesehenen Simulationen der kleinen Eiszeit und der Mittelalterlichen Wärmeperiode nicht gerechnet. Stattdessen konnten mehrere Sensitivitätsstudien durchgeführt werden, mit denen zum einen versucht wurde die Güte der REMO Simulation in SW-Afrika zu verbessern. Zum anderen wurden die hierfür erstellten Klimasimulationen genutzt um den Einfluss des Ozeans auf die Atmosphäre zu erforschen. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudien sind in Task II zusammengefasst.

### **1. Sensitivitätsstudie: Änderung der SST**

#### **Begründung der Notwendigkeit:**

Mit der hier durchgeführten Sensitivitätsstudie soll zum einen überprüft werden ob und in welchem Ausmaß die Güte der REMO Simulationen im SW-Afrika durch eine dem Modell vorgeschriebene hochaufgelöste Meeresoberflächentemperatur (SST) verbessert werden kann. Zum anderen bietet diese Studie die Möglichkeit, den Effekt der Randströmungen vor der Westküste Südafrikas auf die mit REMO erstellten Klimasimulationen einschätzen zu können.

#### **Vorgehen:**

Um den Effekt der räumlich besser aufgelösten Aufquellgebiete auf die atmosphärische Zirkulation sowie die küstennahe Lufttemperatur zu untersuchen, wurde das Jahr 1990 mit einer an den Satellitendatensatz angepassten SST erneut berechnet. Hierfür wurde ein neuer SST-Datensatz aufbereitet, der auf den NOAA-Pathfinder Satellitendaten basiert (Eggert [2011]). Alle weiteren Randwerte, sowie die Anfangswerte sind mit dem Validierungslauf identisch. Wie beim Validierungslauf (Task I: (3)) beträgt die horizontale Auflösung der für diese Untersuchung angefertigten Simulation  $0.22^\circ$ . Die Simulation mit der NOAA-Pathfinder-SST wird im weiteren Verlauf als "REMO NOAA-SST" bezeichnet. Die Ergebnisse dieser Studie wurden in einer Diplomarbeit veröffentlicht.

#### **1a. Temperatur**

Eine SST-Abnahme in den Auftriebsgebieten führt zu einer Temperaturabnahme nur entlang der schmalen Küstenstreifen an der Westküste Südafrikas. Der Grund dafür ist die ablandige Grundströmung und die dicht hinter der Küste beginnende Hochebene, welche durch die niedrige Grenzschicht für die kühlen Meeresluftmassen eine Barriere darstellt. In diesem ca. 50 bis 100 km breiten Küstenstreifen von Namibia und Angola, kann die Tagesmitteltemperaturdifferenz zwischen dem REMO-Lauf mit NOAA-SST und dem Validierungslauf bis zu  $-0.8$  K betragen (Abbildung 13 (links)). Es wird deutlich, dass eine bessere Repräsentation der SST zwar geringfügig dazu beitragen kann, die Temperaturen direkt an der Küste zu senken, um hier besser den Beobachtungen zu entsprechen. Die Abkühlung reicht aber bei Weitem nicht aus, um die Differenzen zwischen den REMO-Läufen und den Beobachtungen zu erklären.

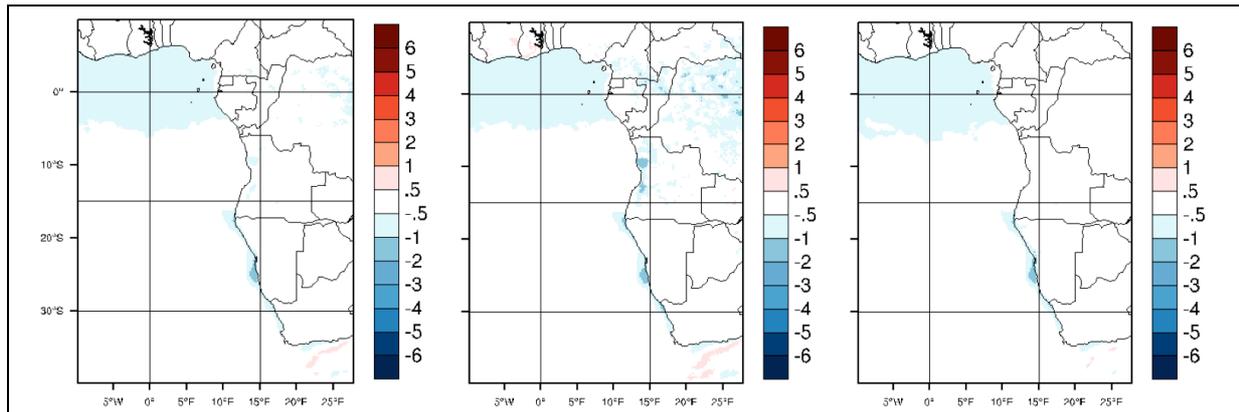


Abbildung 13: Differenzen der (von links nach rechts) Tagesmittel-, Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperatur zwischen REMO mit NOAA-SST und dem Validierungslauf für das Jahr 1990 in (K).

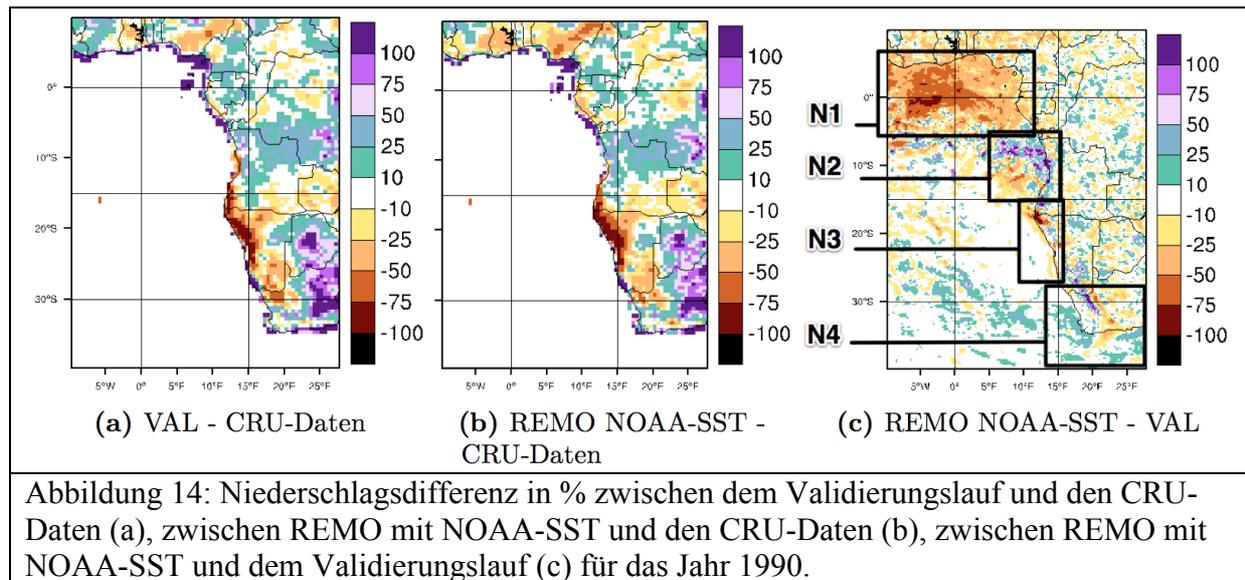
## 2a. Niederschlag

Die Niederschlagsverteilung im südlichen Afrika kann durch die Nutzung der NOAA-SST als Antrieb für eine REMO-Simulationen nicht wesentlich verbessert werden. Dies zeigt sowohl ein Vergleich der Differenzen zwischen dem Validierungslauf und den CRU-Beobachtungen (Abbildung 14 (a)) als auch der Differenzen zwischen dem REMO NOAA-SST-Lauf und den CRU-Beobachtungsdaten (Abbildung 14 (b)). In vier Regionen (Abbildung 14 (c)), N1 bis N4) kommt es jedoch zu deutlichen Abweichungen zwischen dem Validierungslauf und dem REMO-Lauf mit NOAA-SST, die im Folgenden beschrieben werden.

Die auffälligste Abweichung ist eine deutliche Niederschlagsabnahme im tropischen Atlantik (N1). Durch die niedrigere SST im Golf von Guinea kommt es zu einer geringeren Verdunstung, was über der Region zu einer großflächigen Abnahme des Niederschlags führt. Diese Abnahme kann aufgrund fehlender Beobachtungen über dem Meer nicht interpretiert werden. An den Küsten scheint die Simulation des Niederschlags jedoch von dieser Abnahme zu profitieren, da die Beobachtungen hier deutlich geringere Niederschläge angeben ((Abbildung 14 (a)).

In Region (N3) ist ebenfalls eine Abnahme des Niederschlags insbesondere über der Namibauftriebszelle zu erkennen, während sich über dem Angolastrom (N2) die jährlichen Niederschläge um bis zu 100 % verstärken. Hierbei wird zum einen deutlich, dass die SST sehr wichtig für die Niederschlagsverteilung über dem Ozean ist, zum anderen zeigt sich, dass in Südwestafrika SST-Änderungen im Südatlantik nur in den Küstengebieten den Niederschlag über Land beeinflussen.

Durch die Verwendung der NOAA-SST in diesem Sensitivitätsexperiment treten im südöstlichen Atlantik, im Durchschnitt höhere Meeresoberflächentemperaturen auf als im Validierungslauf (N4). Die Niederschlagsabnahme im Osten Südafrikas wie sie bei Reason [1998] auftritt, kann jedoch nicht simuliert werden, da sich die SST-Änderungen zuerst auf das Südindikhoch, das nicht in der modellierten Region liegt, auswirken.



### 3a. 10m-Windfeld und Bodenluftdruck

Wie bei der Validierung der hindcast Simulationen (Abschnitt 1.1) gezeigt wurde, hat REMO leichte Defizite in der Simulation der oberflächennahen atmosphärische Zirkulation im südlichen Afrika. Durch die geänderte SST kommt es auch zu Veränderungen im 10m-Windfeld. Diese Änderungen sind zum einen aufgrund des leicht veränderten Bodendruckfeldes und zum anderen der unterschiedlichen Stabilität in der Luftschichtung und der damit verbundenen vertikalen Durchmischung zu erklären. Zum besseren Vergleich werden die Unterschiede zwischen dem Validierungslauf und ERA-Interim-Daten für das Jahr 1990 ebenfalls mit angegeben.

Die geringeren Meeresoberflächentemperaturen am Golf von Guinea und den Auftriebsregionen vor Namibia und Angola führen zu verstärkten Absinkbewegungen über diesen Gebieten, sodass der Bodenluftdruck über den kälteren Oberflächen steigt (Abbildung 15 (c)). Wie die Abbildungen 15 (a) und (b) zeigen, führen die Druckänderungen südlich des Äquators zu einer Annäherung der Werte an die Bodendruckfelder von ERA-Interim. Nördlich des Äquators kommt es über dem Land jedoch zu größeren Abweichungen zwischen dem REMO-Lauf mit NOAA-SST und den ERA-Interim-Daten als es bei dem Validierungslauf der Fall ist.

Es zeigt sich, dass im Bereich der südatlantischen Antizyklone kaum Veränderungen auftreten. Die Lage der Isobaren verändert sich nur sehr geringfügig. Dies könnte der Grund dafür sein, dass die Windvektoren ihre zu hohe meridionale Komponente beibehalten. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Antizyklone aufgrund ihrer Lage von den Randwerten des nicht geänderten Antriebslaufs beeinflusst wird.

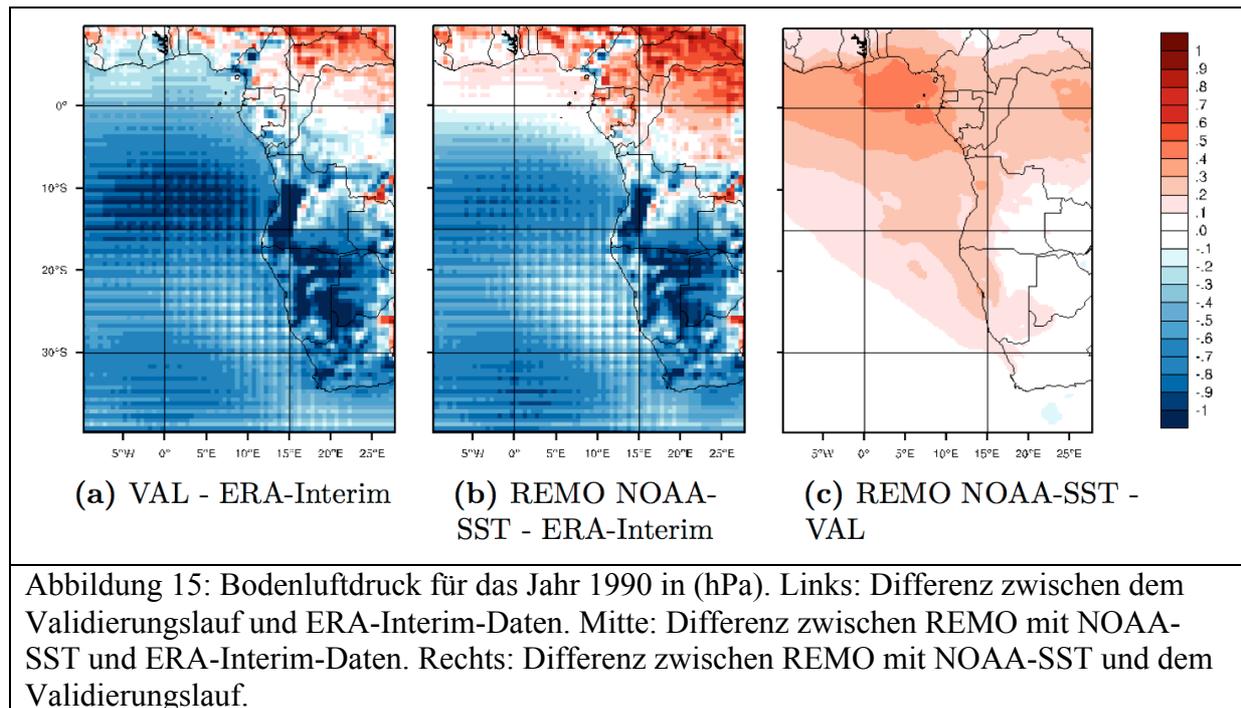


Abbildung 15: Bodenluftdruck für das Jahr 1990 in (hPa). Links: Differenz zwischen dem Validierungslauf und ERA-Interim-Daten. Mitte: Differenz zwischen REMO mit NOAA-SST und ERA-Interim-Daten. Rechts: Differenz zwischen REMO mit NOAA-SST und dem Validierungslauf.

Aufgrund des höher simulierten Bodenluftdrucks an den Küsten des Golfs von Guinea, erhöhen sich dort die Druckgegensätze zwischen Land und Meer. Dies führt in diesem Bereich zu stärkeren meridionalen Windgeschwindigkeiten in der REMO Simulation mit NOAA-SST (Abbildung 16 (c)). Über dem Golf variiert das Ausmaß des Gebietes mit der erhöhten meridionalen Windgeschwindigkeit zwischen Sommer und Winter. Im Südwinter reicht es nur etwa bis 5° Süd und dehnt sich im Südsommer bis ca. 10° Süd aus. Der Vergleich zwischen Validierungslauf und Reanalysedaten von ERA-Interim (Abbildung 16 (a)) zeigt, dass REMO die meridionale Windgeschwindigkeit im Golf von Guinea deutlich unterschätzt (Vergleiche von ERA-Interim-Daten mit Beobachtungsdaten in Abschnitt 1.1). Eine Nutzung der NOAA-SST als Antrieb für REMO Simulationen kann im Golf von Guinea dazu beitragen, dass das Bodendruckfeld und die Windgeschwindigkeiten direkt vor der Küste besser mit den Reanalysen übereinstimmen, im restlichen Teil des Golfs kommt es jedoch zu größeren Abweichungen im Windfeld.

Während sich die Lage der Isobaren im Südatlantik in den REMO-Läufen mit der NOAA-SST nicht wesentlich vom Validierungslauf unterscheidet, führt die SST-Änderung jedoch zu deutlichen Veränderungen im simulierten Windfeld. Diese werden im Folgenden beschrieben: Die in der NOAA-SST geringer angegebenen Meeresoberflächentemperaturen über dem Golf von Guinea und den Aufquellgebieten vor Angola und Namibia (Abschnitt 1.1.2) führt über diesen Regionen zu einer stabiler geschichteten unteren Atmosphäre und einen geringeren Energiefluss vom Meer auf die Atmosphäre. Die stabilere Schichtung sorgt für eine geringer vertikale Durchmischung und führt zu einem niedrigeren Impulsaustausch mit den höheren Schichten. Die beiden Effekte haben zur Folge, dass die Windgeschwindigkeiten abnehmen. In der Passatwindregion ist hierbei insbesondere die Meridional Komponente betroffen. Für die Küste Namibias bedeutet eine im REMO NOAA-SST-Lauf niedriger angenommenen SST also eine verminderte meridionale Windgeschwindigkeit. Es ist zu erkennen, dass die größten Unterschiede zwischen dem Lauf mit NOAA-SST und dem Validierungslauf über den Upwellingregionen liegen (Abbildung 16 (c)), in denen im Vergleich zu QuickSCAT-Daten und ERA-Interim-Daten zu hohe Windgeschwindigkeiten simuliert werden. Die Simulation der Windgeschwindigkeit in REMO wird in dieser Gegend mit der höher aufgelösten NOAA-SST verbessert.

Über den Warmwasserströmungen (Angola- und Agulhasstrom), die in der NOAA-SST mit höheren Temperaturen angegeben werden, ist ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten. Im Bereich des Angolastroms kommt es im Südsommer zu höheren Meridionalwindgeschwindigkeiten. Mit Ausnahme der Monate Juni bis August wird die SST dieser Strömung in den ERA-Interim-Daten zu niedrig dargestellt und es gelangt weniger Energie in die untere Atmosphäre. Das Gleiche gilt für den Agulhasstrom an der Südspitze Afrikas. Hier erhöht sich allerdings die zonale Komponente (Abbildung 17 (c)). Die Strömung liegt unter der Westwinddrift. Es wird also hauptsächlich ein zonaler Impuls durch die höhere vertikale Durchmischung nach unten transportiert. Anhand der küstennahen Warm- und Kaltwasserströmungen kann vermutet werden, dass das 10m-Windfeld von REMO in der entsprechenden Küstenregion sensitiv auf die Meeresoberflächentemperatur reagiert. Aufgrund der Datenlage von nur einem Jahr ist dies jedoch schwer zu beurteilen. Zusätzlich zeigen Modellstudien im Rahmen des GENUS-Projekts am Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), dass Änderungen in den bodennahen atmosphärischen Zirkulationsbedingungen insbesondere an der Küste vor Südafrika einen starken Einfluss auf die simulierte Upwelling-Aktivität haben. Ein veränderter Auftrieb bedeutet in der Praxis aber wiederum veränderte SST-Bedingungen und damit Rückkopplungen auf die atmosphärische Zirkulation. Diese Rückkopplungen können aber nur im vollgekoppelten Atmosphären-Ozeanmodell vollständig erfasst werden. Bei Modellstudien ohne Kopplung von Atmosphäre und Ozean kann es hingegen zu einem Abdriften des Ozeans kommen, da die ausgleichende Wirkung eines intensivierten Upwellings auf die Atmosphäre nicht erfasst werden kann.

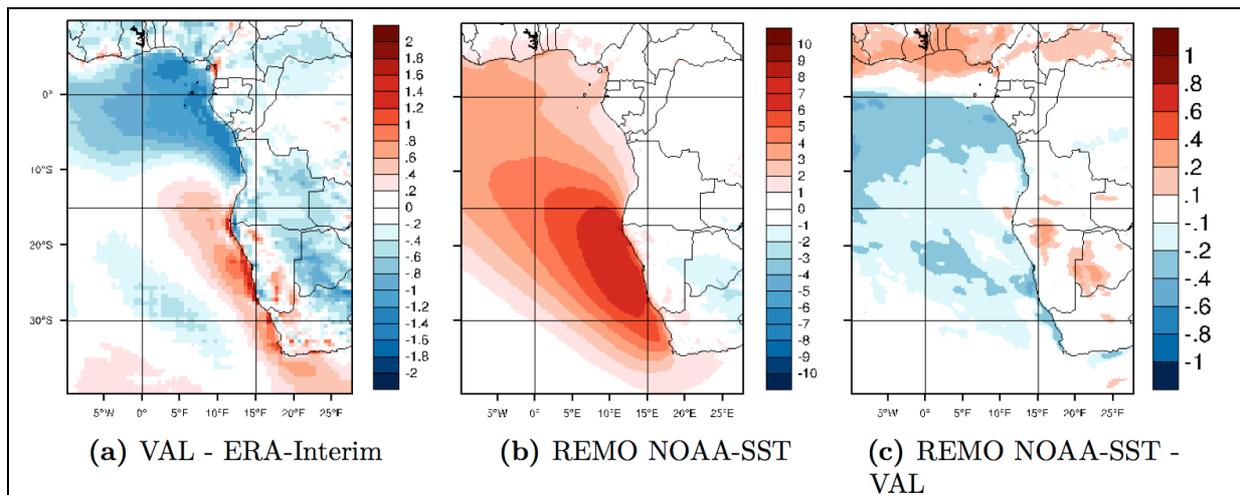
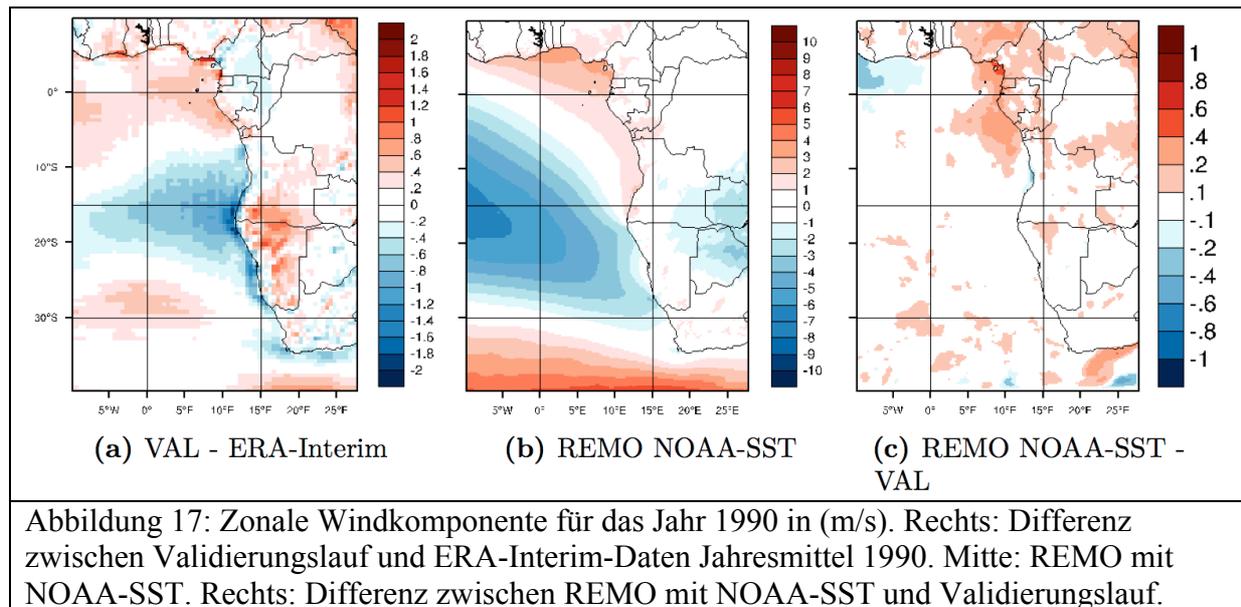


Abbildung 16: Meridionale Windkomponente für das Jahr 1990 in (m/s). Links: Differenz zwischen Validierungslauf und ERA-Interim-Daten Jahresmittel 1990. Mitte: REMO mit NOAA-SST. Rechts: Differenz zwischen REMO mit NOAA-SST und Validierungslauf.



## b. Sensitivitätsstudie: Änderung der Charnock-Konstante

### Begründung der Notwendigkeit:

Wie die Validierung der hindcast Simulationen gezeigt hat, wird die 10m-Windgeschwindigkeit in REMO im Vergleich zum antreibenden Modell ERA-Interim deutlich überschätzt (Abbildung 10).

Ein möglicher Grund hierfür könnte eine zu klein gewählte Charnock-Konstante sein. Mit dieser Konstante soll die durchschnittliche Wellenhöhe parametrisiert werden. Damit wirkt sich die Charnock-Konstante auf die Rauigkeitslänge über See aus. Um den Einfluss dieser Modellkonstante auf das simulierte Windfeld einschätzen zu können, wurde eine weitere Sensitivitätsstudie unternommen. Dieser REMO-Lauf wird im Folgenden als REMO-CHAR bezeichnet.

In der Prandtlschicht beeinflusst die Rauigkeitslänge das simulierte vertikale Windprofil und damit implizit die vertikalen Eddy Flüsse von Wärme, Momentum und Wasserdampf. Eine genaue Beschreibung der Parametrisierung von vertikalen Eddy Flüssen in REMO ist zu finden in Louis [1979].

In REMO wurde die Parametrisierung der Rauigkeitslänge ( $z_0$ ) aus der ECAHM4 Modellphysik übernommen (Roeckner et al. [1996]). Über offenen Wasserflächen wird diese nach Charnock [1955] folgendermaßen berechnet:

$$z_0 = \frac{\alpha_0 u_*^2}{g}$$

$z_0$  : Rauigkeitslänge

$u_*$  : Schubspannungsgeschwindigkeit

$\alpha_0$  : Charnock-Konstante

$g$  : Gravitationskonstante

Die Rauigkeitslänge ist also abhängig von der Schubspannungsgeschwindigkeit, der Gravitationskonstante und der Wahl einer dimensionslosen Kennzahl, der Charnock-Konstante. In der Literatur werden für diese Konstante Werte zwischen 0.008 (Kraus [1972]) und 0.06 (Smith [1980]) angegeben. ECHAM4 verwendet den Wert 0.032. Für die im GENUS-Projekt angefertigten hindcast Simulationen wurde  $\alpha_0$  auf den Wert 0.0123 gesetzt.

Um den Effekt der Charnock-Konstante auf das 10m-Windfeld in der für das GENUS-Projekt simulierten Region einschätzen zu können, wurden die Monate April bis August des Jahres 1990 mit  $\alpha_0 = 0.032$  erneut gerechnet. Wie erwartet war, führte ein höherer Wert für  $\alpha_0$  zu einer Abnahme der Windgeschwindigkeit über dem SW-Atlantik (Abbildung 18). Die Differenz zwischen dem REMO-CHAR und dem Validierungslauf ist jedoch wesentlich geringer als die beobachteten Abweichungen zwischen dem Validierungslauf und der ERA-Interim-Daten. Über den Landflächen sind so gut wie keine Änderungen aufgetreten. Die Sensitivitätsstudie zeigt, dass eine Erhöhung der Charnock-Konstante dazu beitragen kann, die Simulation an die antreibende Reanalyse anzugleichen. Die Verbesserungen in der Simulationsgüte sind jedoch zu gering, um die in Abbildung 10 gezeigten Abweichungen erklären zu können.

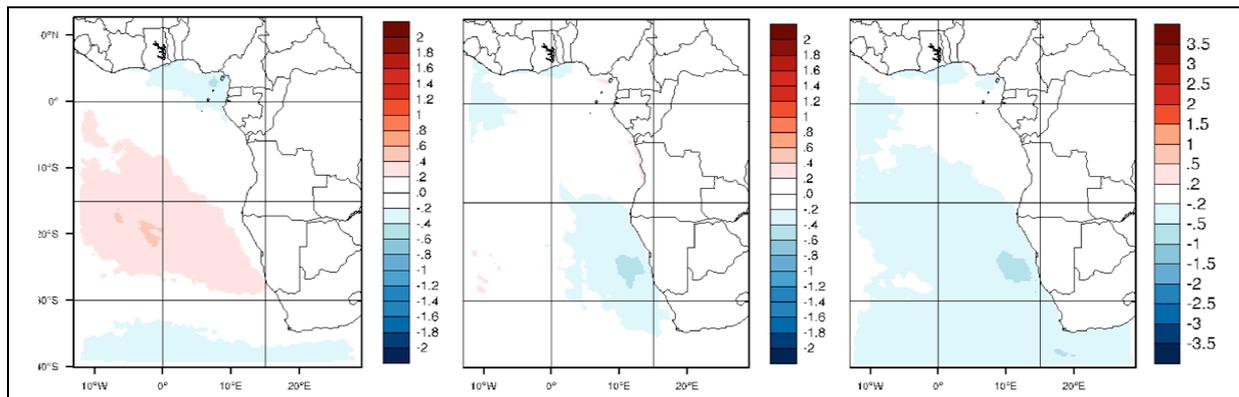


Abbildung 18: Differenzen der (von links nach rechts) meridionalen-, zonalen- und absoluten Windgeschwindigkeit zwischen REMO-CHAR und dem Validierungslauf, für die Monate April bis August des Jahres 1990 in (m/s).

## Fazit aus Task II;

Mit der Durchführung der Sensitivitätsstudien wurde gezeigt, dass die Nutzung eines höher aufgelösten SST-Datensatz, der die Randströmungen besser erfasst, positive Auswirkung auf die Simulation des 10m-Windfeldes hat. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine Änderung, der dem REMO Modell vorgegebene Charnock-Konstante vom Wert 0.0123 auf 0.032 ebenfalls das simulierte 10m-Windfeld verbessern kann.

Daraus ergibt sich für Folgestudien, dass es in der Region unerlässlich ist Rückkoppelungsprozesse zwischen Atmosphäre und Ozean im Modell in einer hohen räumlichen Auflösung zu berücksichtigen. Daher sollte für zukünftige Klimasimulationen immer eine Kopplung von einem regionalen Klimamodell und einem regionalen Ozeanmodell angestrebt werden.

## 2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es wurden nur Gelder für Personalmittel und Reisemittel beantragt.

Die Personalmittel wurden durch einen Postdoc, der sowohl die Simulationen erstellt hat als auch einen Teil der Validierung durchgeführt hat und einem Diplomanten, der die Sensitivitätsstudien durchgeführt hat, fast aufgebraucht. 7000 € sind noch vorhanden. Von den Reisekostenmitteln ist noch ein Betrag von 5000 € vorhanden.

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

Die Hauptaufgaben des MPIMet bestanden in der Analyse, Verbesserung und Bereitstellung der atmosphärischen Antriebsdaten für das Ozeanmodell MOM. Hierfür wurde das regionale Klimamodell REMO zum dynamischen Downscaling der Reanalysedaten ERA-Interim auf 25 km (0.22°) verwendet.

Der Einsatz eines Regionalmodelles hat im Wesentlichen folgende Vorteile: Erstens bieten Regionalmodelle die Möglichkeit die Simulation auf Zeiträume auszuweiten, in denen keine Beobachtungen vorliegen. Durch die Verwendung von globalen Klimamodellen für die lateralen Randbedingungen ist es möglich, mit demselben Klimamodell sowohl weit zurückreichende Ereignisse zu simulieren, als auch Zukunftsszenarien zu erstellen. Zweitens zeigen im Rahmen des GENUS-Projektes durchgeführte Studien, dass Ozeanmodelle für eine korrekte Modellierung von Auftriebsregionen eine hohe Auflösung des atmosphärischen Antriebs insbesondere im Windfeld benötigen. Die zum Beginn des Projektes vorhandenen Reanalysedaten haben nur eine horizontale Auflösung von 0.75°. Auch die Verwendung von interpolierten Stationsmessungen oder Satellitendaten ist nur bedingt möglich da diese nicht für alle benötigten Variablen auf einer ausreichenden Auflösung und in einer adäquaten Zeitspanne vorhanden sind. Drittens profitieren regionale Klimamodelle von ihrer hohen Auflösung und der hierdurch realistischeren Repräsentation der Orografie, der Verteilung der Bodentypen und Vegetationstypen, welche maßgeblich die Oberflächeneigenschaften über dem Land beeinflussen. Hierdurch wird es möglich kleinräumige Phänomene zu erfassen und so, die in dieser Gegend stark variierenden Landschaften und Klimaregionen zu simulieren. So konnte Hänslers [2011] zeigen, dass das regionale Klimamodell „REMO“ in der Lage ist, nicht nur das großräumige Klima im südwestlichen Afrika zu simulieren, sondern auch lokale Phänomene wie die Zirkulation in der Namib-Wüste, die vollständig von der regionalen Zirkulation entkoppelt ist, darzustellen. Aber auch über den Ozeanen ist eine Verfeinerung der Modellrechnungen durch eine hoch aufgelöste, dem Modell vorgegebene Meeresoberflächentemperatur zu erreichen.

Die Verwendung eines numerischen Modells als atmosphärischen Antrieb von MOM führt jedoch zu neuen Unsicherheiten. Um die Güte der Modellsimulationen quantifizieren zu können, ist es besonders wichtig, die Modellläufe mit möglichst vielen Beobachtungen zu vergleichen und das Regionalmodell gegebenenfalls an das Modellgebiet anzupassen.

Mit den im GENUS-Projekt durchgeführten Sensitivitätsstudien sollte zum einen überprüft werden ob und in welchem Ausmaß die Güte der REMO Simulationen im SW-Afrika durch eine dem Modell vorgeschriebene hochaufgelöste Meeresoberflächentemperatur (SST) verbessert werden kann. Zum anderen bieten diese Studien die Möglichkeit, den Effekt der Randströmungen vor der Westküste Südafrikas auf die mit REMO erstellten Klimasimulationen einschätzen zu können.

### **4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Räumlich hochaufgelöste Klimasimulationen bilden wichtige Entscheidungsgrundlagen sowohl unter politischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die Verwendung dieser Daten ist daher in unterschiedlichsten Bereichen möglich und auch wahrscheinlich. Die in diesem Projekt erlangten Erkenntnisse über die Rückkopplungseffekte zwischen Atmosphäre und Ozean in Auftriebsregionen können helfen bei der Entwicklung von vollgekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen.

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

Im Rahmen des "COordinated Regional climate Downscaling EXperiment" (WCRP-CORDEX), das gegen Ende des GENUS-Projektes angelaufen ist, wird ein Multi-Model Ensemble von transienten Klimasimulationen für das südliche Afrika auf einer räumlichen Auflösung von 50 km erstellt. Diese können verwendet werden, um die Robustheit der in GENUS durchgeführten Klimasimulationen zu ermitteln, wobei hierbei allerdings die geringere horizontale Auflösung der CORDEX-Simulationen berücksichtigt werden muss.

## **Literatur:**

Charnock H. 1955. Wind stress over a water surface. *Quart J Roy Meteorol Soc* 81:639–640

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, a. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. a., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, a. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, a. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kå llberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, a. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., & Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597.

Ebuchi, N., Graber, H. C., & J., Michael C. 2002. Evaluation of Wind Vectors Observed by QuikSCAT/SeaWinds Using Ocean Buoy Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12), 2049–2062.

Eggert, B. 2011. Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften in REMO auf die Simulation der unteren Atmosphäre. Diplomarbeit, UNI-Hamburg.

Hänsler, A. 2011. Impact of Climate Change on the Coastal Climate of South-Western Africa. Ph.D. thesis, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg. MPIM Report 93.

Jacob, D. A note to the simulation of the Annual and Interannual Variability of the Water Budget over the Baltic Sea Drainage Basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 77, No. 1-4, 61-74 (2001)

Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., de Castro, M., Déque, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sánchez, E., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., van Ulden A. and van den Hurk, B. An intercomparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change*, Vol. 81. doi: 10.1007/s10584-006-9213-4 (2007)

Kilpatrick, K. a., Podestá, G. P., & Evans, R. 2001. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *Journal of Geophysical Research*, 106(C5), 9179–9197.

Kraus EB. 1972. Atmosphere-Ocean interaction. Oxford University Press, London, 275 pp

Louis, J.-F. 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteor.*, 17, 187-202.

Reason, CJC. 1998. Warm and cold events in the southeast Atlantic/southwest Indian Ocean region and potential impacts on circulation and rainfall over southern Africa. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 65, 49–65.

Roeckner, E., et al. 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Tech. Rep. 28, Max-Planck-Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.

Smith SD. 1980. Wind stress and heat flux over the ocean in the Gale force winds. *J Phys Oceanogr* 10:709–726

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 2**

# Abschlußbericht GENUS1 - TP2 (IOW)

Zuwendungsempfänger  
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde

Förderkennzeichen  
03F0497A,

Ausführende Stelle:  
Sektion Physikalische Ozeanographie und Messtechnik  
TP Koordinator: Prof. Dr. Wolfgang Fennel, Dr. V. Mohrholz

---

Vorhabenbezeichnung  
Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System (GENUS):  
TP2: Modellierung und Beobachtung von hydrographischen und biogeochemischen  
Schlüsselprozessen im Benguela-Auftriebsgebiet

---

Laufzeit des Vorhabens  
01.05.2009 – 30.04.2012

---

## I.1. Aufgabenstellung

Das Teilprojekt 2 trägt zur Gesamtzielstellung von GENUS, die Beziehungen zwischen Klimawandel, biogeochemischen Zyklen von Nährstoffen und klimarelevanten Gasen und Ökosystemstrukturen zu klären und modellierbar zu machen, bei. Die durchgeführten Arbeiten sollen folgende Schlüsselfragen beantworten:

- Wie hängen Fluktuationen der Ostrandströme und des Auftriebs mit den atmosphärischen Antrieben zusammen?
- Wie beeinflussen Veränderungen in der Dynamik des Ostrandstromes die Sauerstoffdynamik des Benguela-Auftriebsgebietes und welche Folgen sind für die Nährstoffdynamik und die unteren trophischen Stufen des Ökosystems zu beobachten?
- Welches sind die quantitativen Bilanzen der Stoffflüsse zwischen dem Benguela-Auftriebsgebiet und dem angrenzenden südlichen Atlantik?
- Welche Prozesse führen zur Ausbildung der durchmischten Bodenschicht? Wie hängen vertikale Stoffflüsse in der Bodengrenzschicht auf dem Schelf mit turbulenten Austauschprozessen zusammen?

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

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

Das Vorhaben wurde wie geplant umgesetzt.

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

### ***Dynamik und physikalische Austauschprozesse im Ostrandstrom***

Das Benguela-System gehört zu den vier großen Ostrand-Auftriebsgebieten und ist durch hohe Primärproduktionsraten und Sauerstoffarmut unterhalb der Thermokline

gekennzeichnet. Die Sauerstoff- und Nährstoffversorgung des Benguela-Auftriebsgebietes wird durch die Advektion und Mischung zweier unterschiedlicher Zentralwassermassen bestimmt. Sauerstoffarmes SACW (South Atlantic Central Water) tropischen Ursprungs und ESACW (South Atlantic Central Water) aus dem südlichen Benguela vermischen sich im Gebiet des nördlichen Benguela, das sich von der Kunenemündung an der Grenze zu Angola bis zur Lüderitz-Auftriebszelle erstreckt. Das Mischungsverhältnis beider Wassermassen bestimmt den Sauerstoff- und Nährstoffgehalt des auf den namibischen Schelf transportierten Wassers. Saisonale und zwischenjährliche Unterschiede in der Wassermassenverteilung und der Auftriebsdynamik verursachen eine hohe zeitliche Variabilität in der Belüftung des namibischen Schelf, die sich direkt auf die Produktivität der höheren trophischen Ebenen des Nahrungsnetzes auswirkt. Biogeochemische Prozesse im Sediment und der Wassersäule zehren permanent Sauerstoff auf dem Schelf und können lokal zu anoxischen Verhältnissen unterhalb der Thermokline führen. Durch die direkte Kopplung der Auftriebsdynamik an die atmosphärischen Antriebe wird angenommen, dass Auftriebsökosysteme schnell auf Klimaänderungen reagieren.

### **Phytoplankton, Primärproduktion und Stickstofffixierung**

Über die Artenzusammensetzung des Phytoplanktons im Auftriebsgebiet ist relativ wenig publiziert. Armstrong et al. (1987), Walker & Peterson (1991) sowie Pitcher et al. (1998) geben allgemeine Darstellungen zum Phytoplankton des südlichen Benguela-Auftriebsgebietes ohne Präsentation konkreter Daten. Lediglich Pitcher et al. (1991) machten detailliertere Aussagen zur Phytoplanktongemeinschaft. Es ist bekannt, dass sich in frischem Auftriebswasser eine Kieselalgenblüte, meist von großen *Coscinodiscus* spp. bildet. Mit der Alterung des Wassers entwickeln sich photoautotrophe Flagellaten. Die Verteilung der Chlorophyll-Konzentration in südafrikanischen und namibischen Gewässern wurde auch von Brown et al. (1991) und Silulwane et al. (2001) untersucht. Von Schmidt et al. (2000) liegt ein Datenreport mit Fluoreszenzverteilungen und Häufigkeitsverteilungen von Phytoplanktongruppen für das Gebiet des Angola-Wirbels und bis etwa 20°S vor. Untersuchungen zur Primärproduktion vor der Küste von Nord-Namibia wurden von Estrada and Marrasé (1987), Brown et al. (1991) und Wasmund et al. (2005) durchgeführt. Für die Cape Frio-Auftriebszelle ermittelten Wasmund et al. (2005) eine Jahres-Nettoproduktion von 84 Mio t Kohlenstoff.

Die Stickstofffixierung durch diazotrophe Prokaryoten ist eine der Hauptquellen von gebundenem Stickstoff (N) im Ozean und somit eine wesentliche Komponente des marinen Stickstoffzyklus. Capone et al. (2005) fanden an vielen Stationen des Nordatlantik tiefenintegrierte Stickstofffixierungsraten, die die Größe des diapyknischen vertikalen Stickstoffflusses überstiegen. Sie schätzten den Eintrag von "neuem" Stickstoff durch das Cyanobakterium *Trichodesmium* in den tropischen Nordatlantik auf mindestens  $1,6 \cdot 10^{12}$  mol N (= 22,4 Tg N). *Trichodesmium*-Blüten im südöstlichen Atlantik treten hingegen nicht auf (Carpenter und Capone 1992, Westberry und Siegel 2006), obwohl die Nährstoffbedingungen das Wachstum von diazotrophen Cyanobakterien fördern. Wenn das Auftriebswasser aus Sauerstoffminimumzonen stammt, kann der Anteil an gelöstem anorganischen Stickstoff unter dem Redfield N:P-Verhältnis liegen, so dass das Wachstum von nicht-diazotrophen Phytoplankton stickstofflimitiert sein kann. Das N:P-Verhältnis beträgt 10-12 im frisch aufgetriebenen und gealterten Küstenwasser des Benguela-Gebietes und dem Wasser der Angola-Benguela-Front (Wasmund et al., 2005). Deutlich erniedrigte N:P-Verhältnisse zeigten sich in den oberen 10 m des „*South Atlantic Surface Water*“ (N:P = 5,2) und im „*Subtropical Surface Water*“ (N:P = 1,3). Insbesondere in letzterem, subtropischen Wasserkörper nördlich der Angola-Benguela-Front sollten Stickstofffixierer aufgrund der hohen Wassertemperaturen gute Wachstumsbedingungen finden. Die Frage, ob und in welcher Größenordnung Stickstofffixierung im Untersuchungsgebiet vorkommt, war eine der wichtigen Fragen des Projekts. Pitcher et al. (1991,1998) sowie Wasmund et al. (2005) fanden jedoch keine größeren Vorkommen von *Trichodesmium* im Benguela-Auftriebsgebiet. Nachdem Zehr et al. (2001) einzellige diazotrophe Cyanobakterien im

subtropischen Pazifik gefunden hatte, müssen auch coccale Cyanobakterien als Stickstofffixierer im Untersuchungsgebiet berücksichtigt werden.

### **Entwicklung des gekoppelten biogeochemischen Ökosystemmodells**

Das für GENUS implementierte gekoppelte Zirkulations- und Ökosystemmodell führt zwei Entwicklungslinien zusammen:

- das moderne, für massiv-parallele Rechnungen geeignete Zirkulationsmodell *mom4p1* (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ). Neue numerische Methoden zum Lösen der hydrodynamischen Gleichungen sowie die verbesserten Methoden zum parallelen Rechnen ermöglichen die Nutzung moderner Hochleistungsrechner.

- das Ökosystemmodell ERGOM (IOW) mit den speziell für das Projekt NAMIBGAS implementierten Werkzeugen zur Beschreibung der Sauerstoff- und Schwefeldynamik im anoxischen und zeitweise sulfidischen Wasser des Benguela-Auftriebsgebietes.

Bei der Einrichtung des Modells, insbesondere der Wahl des Modellgebietes und der atmosphärischen Antriebe waren die vorhandenen Kenntnisse über die spezifischen hydrographischen Bedingungen vor Namibia sowie deren Bedingtheit durch lokale Windfeldstrukturen und Ankopplung an das äquatoriale Stromsystem über die afrikanischen Ostrandströme von großer Bedeutung.

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

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

Die Zuwendungen wurden wie geplant verwendet.

### **II.2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,**

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

### **II.4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,**

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

### **II.6. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Die Ergebnisse des Projektes wurden in Vorträgen und Postern auf internationalen Konferenzen vorgestellt.

Eggert, A., Mohrholz, V., Schmidt, M., 2012. The spatio-temporal dynamics of the nitrogen flux on the northern Benguela hypoxic shelf: a model view. Posterpräsentation, ASLO, Salt Lake City, 20.-24. Februar 2012.

Junker, T., Fennel, W., 2012. Wind curl driven upwelling, the example of the Benguela system. Posterpräsentation, ASLO, Salt Lake City, 20.-24. Februar 2012.

- Mohrholz, V., Heene, T., 2012. Action of nonlinear internal waves at the Namibian shelf. Posterpräsentation, ASLO, Salt Lake City, 20.-24. Februar 2012.
- Muller, A.A., Mohrholz, V., Schmidt, M., 2012. Quantifying the offshore transport associated with a northern Benguela upwelling filament during October 2010. Posterpräsentation, ASLO, Salt Lake City, 20.-24. Februar 2012.
- Schmidt, M., Mohrholz, V., Eggert, A., 2012. Physical and biological controls of nutrient and oxygen cycling in the South-African eastern boundary currents. Posterpräsentation, ASLO, Salt Lake City 19.-24. Februar 2012.
- Schmidt, M., 2012. Modelling the nutrient and oxygen cycles on the Namibia shelf. Vortrag, Kolloquium am Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, 28. Februar 2012.
- Schmidt, M., Mohrholz, V., Eggert, A., Muller, A.A., 2011. Deoxygenation and environmental conditions in the Benguela upwelling area – observations and modeling. Vortrag, EUR-OCEANS Conference, Toulouse, Frankreich, 24.-26. Oktober 2011.
- Mohrholz, V., Schmidt, M., Muller, A.A., Eggert, A., 2012. Circulation on the Namibian shelf. Vortrag, BCC Annual Science Forum, Swakopmund, 19. Oktober 2011.
- Eggert, A., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2011. Zooplankton dynamics on the northern Benguela suboxic shelf. Poster, Advances in Marine Ecosystem Modelling Research Symposium, Plymouth, 27.-30. Juni 2011.
- Mohrholz, V., Heene, T., 2011. Observations of nonlinear internal waves at the Namibian shelf. Posterpräsentation, SAMSS, Grayhamstown, 4.-7. April 2011.
- Muller, A.A., Mohrholz, V., Schmidt, M., 2011. Mesoscale structure and dynamics of a northern Benguela upwelling filament during October 2010. Vortrag, SAMSS/ECSA, Grahamstown, South Africa, 3.-7. April 2011.
- Eggert, A., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2010. Bulk zooplankton dynamics in the coastal upwelling area on the northern Benguela suboxic shelf. Vortrag, 2nd Annual Science Forum of the Benguela Current Commission Workshop, Benguela Current Commission, Swakopmund, Namibia, 11.-14. Oktober 2010.
- Schmidt, M., 2010. Some aspects of biogeochemical modelling of the Benguela Upwelling Ecosystem. Vortrag, 2nd Annual Science Forum of the Benguela Current Commission Workshop, Benguela Current Commission, Swakopmund, Namibia, 11.-14. Oktober 2010.

Gegenwärtig erfolgt die Erstellung von Manuskripten für die Publikation der Ergebnisse des Projektes in der wissenschaftlichen Fachpresse:

- Fennel, W., Junker, T., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2011. Response of the Benguela Upwelling Systems to spatial variations in the wind stress, ICES CM 2011/E: 04, available online: <http://www.ices.dk/products/CMdocs/CM-2011/E/E0411.pdf>
- Fennel, W., Junker, T., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2012. Response of the Benguela Upwelling Systems to spatial variations in the wind stress, CSR (submitted).
- Herzfeld, M., M. Schmidt, S.M. Griffies, Z. Liang, 2011. Realistic test cases for limited area ocean modeling. *Ocean Modelling*, 37, Issues 1–2, 2011, page 1–34.
- Eggert, A., Huggett, J., Da Silva, A., Krainer, A., Heene, T., Mohrholz, V. Bulk zooplankton dynamics at the northern Benguela suboxic shelf. Manuskript.
- Muller, A.A., Mohrholz, V., and Schmidt, M., Quantifying the offshore transport associated with a northern Benguela upwelling filament during October 2010. Manuskript.
- Mohrholz, V., and Heene, T. Action of nonlinear internal waves at the Namibian shelf. Manuskript.

Schmidt, M., Eggert, A., Buchholz, F., Auel, H., T. Werner. The role of zooplankton vertical migration for the regulation of oxygen conditions in oceanic oxygen minimum zones – a model view.

Schmidt, M., Eggert, A., Mohrholz, V., Müller A., On the strength of upwelling in response to local wind fields in the Northern Benguela upwelling system.

### **III.1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen,**

*z.B. des Förderprogramms - (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts) - soweit dies möglich ist*

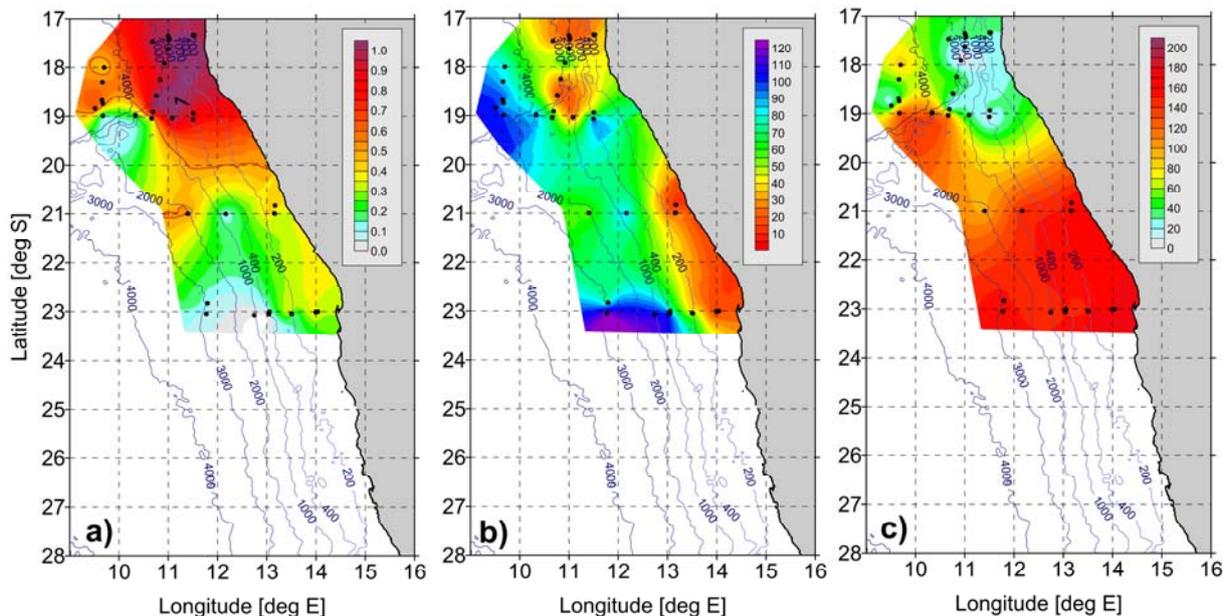
### **III.2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen**

#### ***Dynamik und physikalische Austauschprozesse im Ostrandstrom***

Das nördliche Benguela Auftriebsgebiet wird sowohl durch fernwirkende Prozesse aus dem tropischen Atlantik als auch durch die lokale Wirkung des Passatwind-Systems angetrieben (vgl. Lass and Mohrholz, 2008). Beide Antriebskomponenten weisen eine starke saisonale und zwischenjährliche Variabilität auf, die die hydrographischen Verhältnisse auf dem Namibischen Schelf entscheidend beeinflussen. Neben der Intensität des Passatwindes wirkt sich vor allem die räumliche Struktur des Windfeldes auf die Stärke und die Art des Auftriebs nährstoffreichen Wassers aus. Die Stabilisierung der atmosphärischen Grenzschicht über dem Kaltwassergürtel an der Küste, sowie die Wirkung der angrenzenden Landmasse führen zu einer Schwächung des Passatwindes in Richtung Küste. Dieser küstensenkrechte Gradient der Stärke des küstenparallelen Winds erzeugt Auftrieb über dem Schelf. Die Wirkung der Struktur des Windfeldes auf die Art und Verteilung des Auftriebs wurde von Fennel et al. (2011, 2012) mit Hilfe eines analytischen Modells untersucht. Das Modell erklärt die grundlegenden Eigenschaften des polwärtigen Unterstromes und des Küstenstromes in Abhängigkeit von der räumlichen Struktur des Windfeldes. Es zeigt die entscheidende Rolle der Kelvinwellen für die Ausbildung der beobachteten Struktur des polwärtigen Unterstromes. Die Abschwächung des Windfeldes nördlich der Kunene-Mündung verursacht ein seewärts gerichtetes Stromband das die Ablösung des Angolastromes von der Küste an der ABFZ erklärt. In Abhängigkeit vom Windfeld wirkt die Kuneneregion damit als „Ventil“ für den polwärtigen Unterstrom und den Transport von SACW in den nördlichen Benguela.

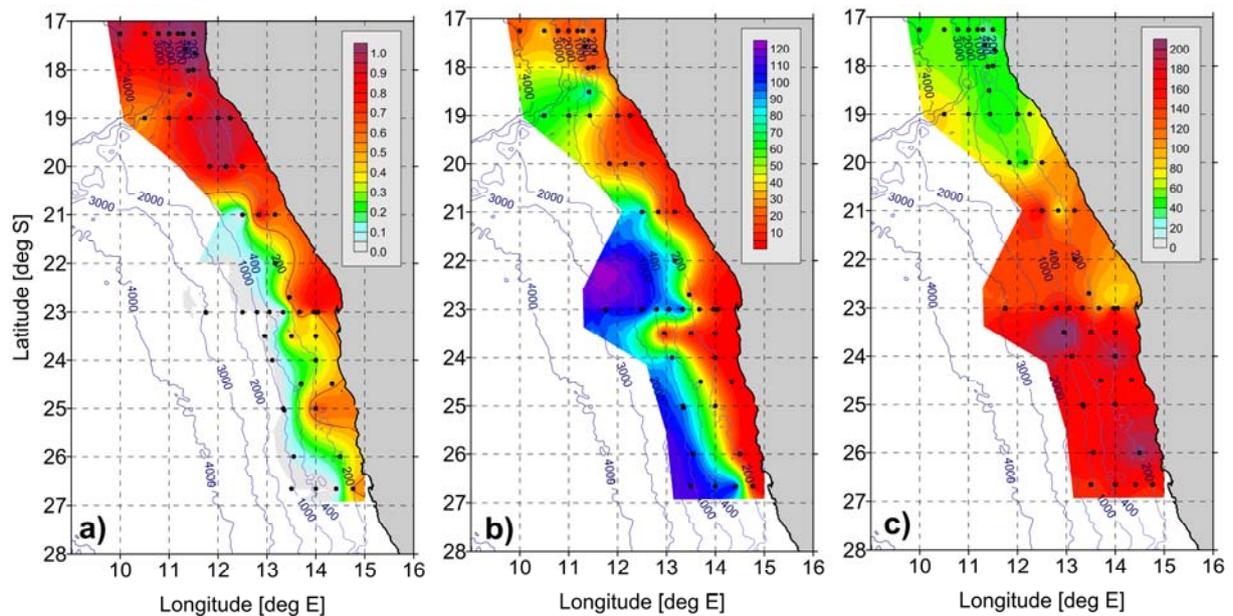
Während der GENUS Expeditionen wurde die saisonale Verteilung der Zentralwassermassen und der Sauerstoffverhältnisse auf dem Namibischen Schelf untersucht. Im Südsommer wurde ein küstennaher polwärtiger Transport von SACW bis Lüderitz beobachtet, während gleichzeitig ESACW entlang der Schelfkante mit dem Benguela-Strom nordwärts transportiert wird. Das Gebiet zwischen Kunene-Mündung und Lüderitz-Auftriebszelle stellt die Übergangszone zwischen beiden Wassermassen dar. Ihre Vermischung wird durch die Querkirkulation, die mesoskale Dynamik und die Filamentbildung bestimmt. Die Advektion der beiden Zentralwassermassen und deren Mischungsverhältnis kontrolliert in hohem Maße die Sauerstoffversorgung des nördlichen Benguela. Hohe SACW-Anteile führen zu hypoxischen bis anoxischen Bedingungen auf dem Schelf, wohingegen hohe ESACW Anteile die Belüftung des Schelfes stark erhöhen. Die Wassermassenverteilung zeigt im nördlichen Benguela ein ausgeprägtes saisonales Signal und ist das Ergebnis der über mehrere Monate integrierten Advektion. Für das Ende der Auftriebssaison zeigt Abbildung 1 beispielhaft die typischen Verteilungsmuster von SACW-Anteil, gemessener Sauerstoffkonzentration und der „Adapted Apparent Oxygen Utilisation“ (AAOU). Anders als die übliche AOU „Apparent Oxygen Utilisation“ stellt die AAOU die Differenz der gemessenen Sauerstoffkonzentration zur der theoretischen Sauerstoffkonzentration dar, die sich aus der Mischung der beiden Quellwassermassen SACW und ESACW ergibt. Die AAOU ist damit ein Maß für die integrierte Sauerstoffzehrung

im Zentralwasser seit dem Verlassen der Quellregion. Am Ende der Auftriebssaison ist das ESACW auf dem Namibischen Schelf die dominierende Wassermasse. Das SACW ist bis zur Kunenezelle nach Norden zurückgedrängt. Dadurch ist der Schelf relativ gut mit Sauerstoff versorgt, auch wenn im zentralen Teil vor Walvis Bay, lokale Zehrungsprozesse für geringe Sauerstoffkonzentrationen sorgen. Die AAOU ist im gesamten Gebiet relativ hoch. Nur im SACW in der Nähe der ABFZ zeigt das dort vorhandene SACW eine geringe AAOU. Das deutet auf ein geringes Alter dieser Wassermasse hin.



**Abbildung 1:** Räumliche Verteilungsmuster von SACW Anteil (a), gemessener Sauerstoffkonzentration [ $\mu\text{mol l}^{-1}$ ] (b) und der AAOU am Ende der Auftriebssaison im nördlichen Benguela in 100m Tiefe. Daten der Discovery Expedition 356, Sept./Okt. 2010.

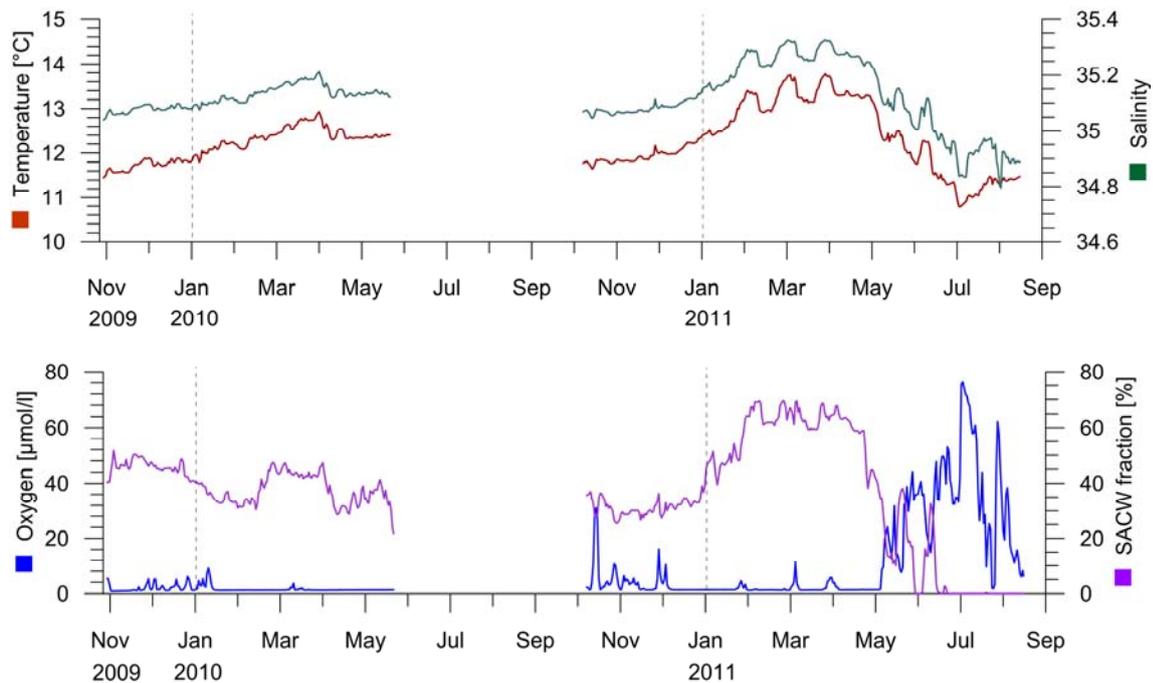
Abbildung 2 zeigt die hydrographischen Verhältnisse im darauf folgenden Sommer. Das SACW hat sich mit dem polwärtigen Unterstrom auf dem Schelf bis weit nach Süden ausgebreitet und mit seiner Spitze die Lüderitz-Auftriebszelle erreicht. An der Schelfkante und weiter westlich ist weiterhin ESACW die dominierende Wassermasse. Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen spiegeln die Wassermassenverteilung wieder. Der gesamte Schelfbereich zwischen Lüderitz und der Kunene-Auftriebszelle ist durch suboxische bis anoxische Bedingungen geprägt. An der Schelfkante wird der Zentralwasserbereich durch das ESACW gut belüftet. Die AAOU zeigt das polwärtige Vordringen des noch relativ jungen SACW auf dem Schelf. Verglichen mit den September-Werten ist die AAOU im SACW jedoch angestiegen. Eine Quantifizierung der Wassermassentransporte ist wegen der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität nur mit hydrodynamischen Modellen möglich. Die Lüderitz-Auftriebszelle und die Kunene-Auftriebszelle sind im oberen Zentralwasser von 0 bis 200 m Tiefe hydrographische Barrieren, die die Übergangszone zwischen SACW und ESACW meridional begrenzen.



**Abbildung 2:** Räumliche Verteilungsmuster von SACW Anteil (a), gemessener Sauerstoffkonzentration [ $\mu\text{mol l}^{-1}$ ] (b) und der AOU im Südsommer im nördlichen Benguela in 100 m Tiefe. Daten der Merian Expedition 17/3, Jan./Feb. 2011.

Die zeitliche Entwicklung der Wassermassenanteile wurde auf dem Schelf vor Walvis Bay mit Hilfe einer Verankerung beobachtet. Ziel war es dabei die kurzzeitigen und saisonalen Fluktuationen in den hydrographischen Eigenschaften im Zentrum des Sauerstoffminimumgebietes auf dem Namibischen Schelf zu erfassen. Abbildung 3 zeigt die Zeitreihen der Tagesmittelwerte der wichtigsten Parameter in der bodennahen Schicht. Temperatur und Salzgehalt erreichen hier ihr saisonales Maximum zum Ende des Sommers (März-April), wenn der polwärtige SACW-Transport endet. Zu dieser Zeit ist vor Walvis Bay auch der SACW Anteil am höchsten. Ab Mai nehmen Temperatur, Salzgehalt und SACW Anteil kontinuierlich ab und erreichen im Juli bis September minimale Werte. Der SACW Anteil ist negativ mit der Sauerstoffkonzentration im bodennahen Wasserkörper korreliert. Ab SACW Anteilen von 30 bis 50% übersteigt die lokale Zehrung die laterale Belüftung und führt zu anoxischen Verhältnissen an der Verankerungsposition. Dem saisonalen Signal sind Fluktuationen von mehreren Tagen bis drei Wochen Dauer überlagert, die durch die Variabilität des atmosphärischen Antriebs verursacht werden.

Durch einen Schaden an der Verankerung weisen die Zeitserien eine Lücke von mehreren Monaten auf, trotzdem ist klar zu erkennen, dass zwischen den beiden beobachteten Jahren deutliche Unterschiede bestehen, die auf interannuelle Variabilität zurückzuführen sind. Als Ursache sind zwischenjährliche Unterschiede im meridionalen Transport der beiden Zentralwassermassen zu sehen, die sowohl durch lokale als auch durch fernwirkende Prozesse beeinflusst werden.



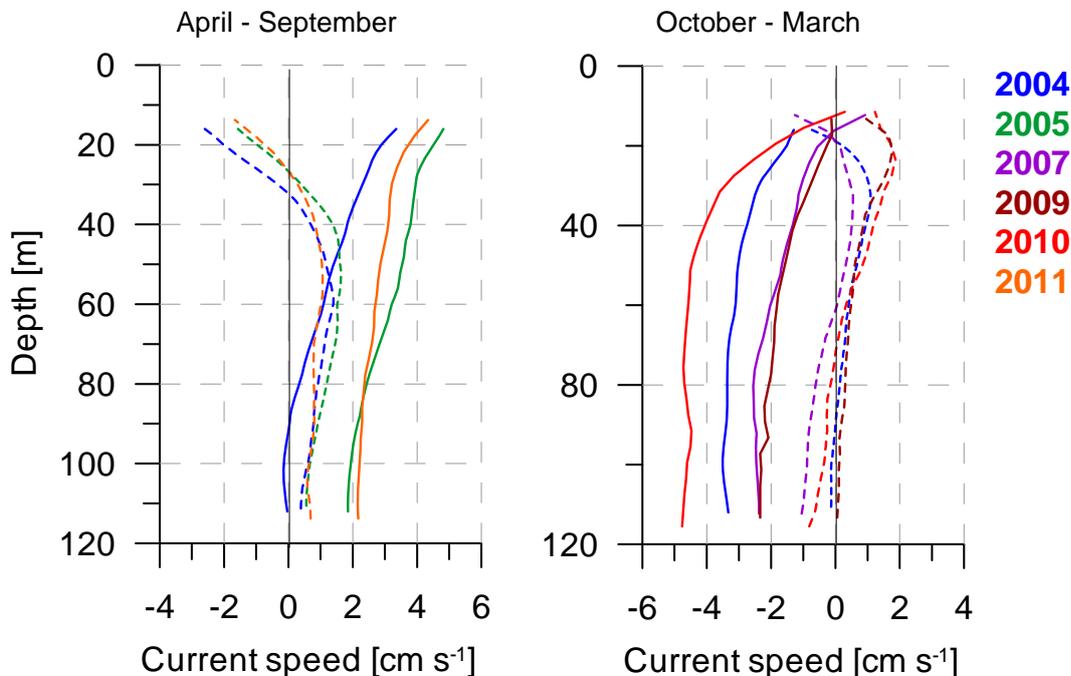
**Abbildung 3:** Zeitreihe der Temperatur und des Salzgehaltes an der Verankerung 20 n.m. vor Walvis Bay (oben). Zeitreihe der Sauerstoffkonzentration und des SACW-Anteils am Zentralwasser (unten). Die Daten wurden in 120 m Wassertiefe ca. 10 m über dem Boden gemessen.

Die saisonale und zwischenjährliche Variabilität im Strömungsfeld verdeutlicht Abbildung 4. Die Querkirkulation zeigt den typischen Ekman-Offshore Transport in der Deckschicht. Dieser wird unterhalb der Deckschicht durch einen auf die Küste gerichteten Transport kompensiert (Ekman-Kompensationsstrom), dessen Intensität mit der Tiefe abnimmt. In der bodennahen Schicht werden im Mittel nur noch geringe küstensenkrechte Strömungsgeschwindigkeiten beobachtet. Die Tiefe der Deckschicht variiert saisonal zwischen 20 m im Sommer und 30-35 m in der Auftriebssaison. Auch die Tiefenlage des Kerns des Ekman-Kompensationsstromes ändert sich saisonal zwischen 30 m im Sommer und 50-60 m in der Auftriebssaison. Im Sommer reicht der Kompensationsstrom nur bis ca. 60 m Tiefe. Darunter wird keine oder nur eine schwache seewärts gerichtete mittlere Strömung beobachtet. Damit ist die tiefere Wasserschicht bis zum Boden von einer Belüftung mit sauerstoffreichen ESACW durch die Querkirkulation abgeschnitten. Die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers erfolgt im Sommer nur durch den polwärtigen Transport von SACW, dessen Sauerstoffgehalt jedoch sehr gering ist. Die im Sommer erhöhte Zehrung führt schnell zu anoxischen Verhältnissen auf dem Schelf. Im Gegensatz dazu erfasst der Ekman-Kompensationsstrom in der Auftriebssaison die gesamte Wassersäule unterhalb der Deckschicht bis zum Boden und sorgt so für eine bessere Belüftung des Schelfes. Die zwischenjährlichen Fluktuationen in der küstensenkrechten Strömungskomponente sind überraschend gering. Das deutet auf geringe interannuelle Variabilität im lokalen Windantrieb hin.

Die küstenparallele Strömungskomponente wechselt saisonal ihre Richtung. In der Auftriebssaison ist die Strömung nordwärts gerichtet und transportiert ESACW in den nördlichen Benguela. Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt von der Oberfläche bis zum Boden kontinuierlich ab. Im Sommer ist die meridionale Strömung unterhalb der Deckschicht durch den zu dieser Zeit starken polwärtigen Unterstrom nach Süden gerichtet. In der Deckschicht wird der polwärtige Strom durch die Auftriebsdynamik kompensiert, so dass die Strömung hier im Mittel sehr klein oder nordwärts gerichtet ist. Im Gegensatz zur Querkirkulation ist die meridionale Strömung durch starke interannuelle Fluktuationen gekennzeichnet. Ein Extrem stellt hier das Jahr 2004 dar. Nach nur schwachem nordwärts gerichtetem Transport von SACW in der Auftriebssaison, der eine 40 m dicke Bodenschicht gar nicht erfasste, war der polwärtige Unterstrom im Sommer 2004 besonders ausgeprägt.

Das führte zu langandauernden und räumlich ausgedehnten anoxischen Verhältnissen, die von zahlreichen Schwefelwasserstoffausbrüchen an der Küste begleitet wurden.

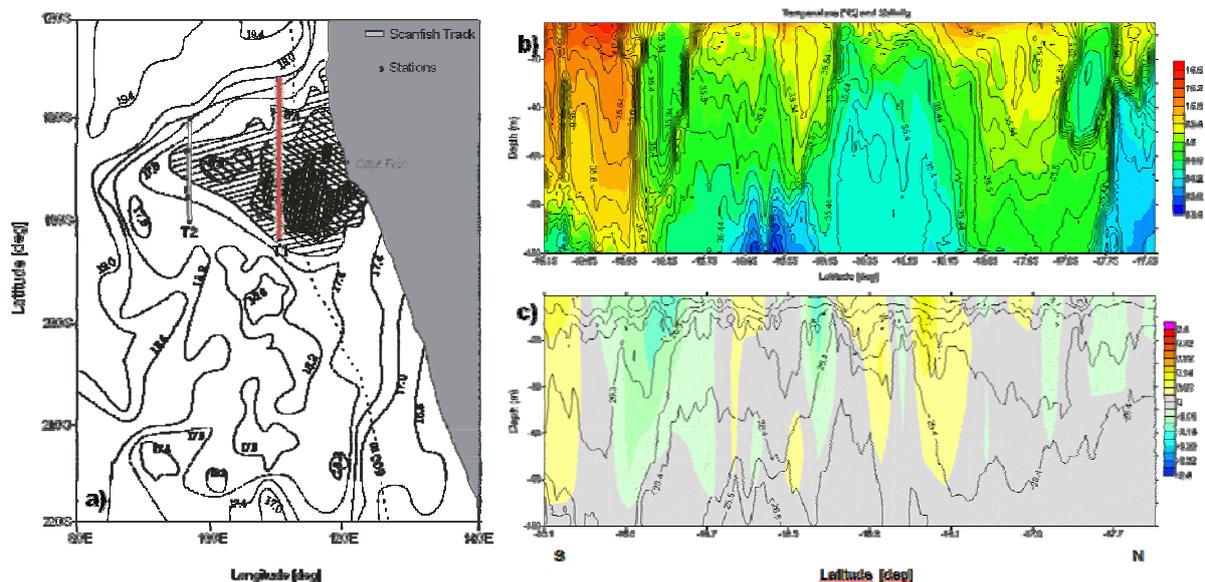
Die zwischenjährliche Variabilität in Meridional Komponente der Strömung wird vor allem durch die Intensität des polwärtigen Unterstromes bestimmt. Da die küstensenkrechte Strömungskomponente keine ausgeprägte zwischenjährliche Variabilität aufweist, scheinen die interannuellen Fluktuationen vor allem durch fernwirkende Prozesse aus dem tropischen Atlantik bestimmt zu sein.



**Abbildung 4:** Saisonal gemittelte Stromprofile an der Verankerung vor Walvis Bay für die küstenparallele Stromkomponente (durchgezogene Linien) und küstensenkrechte Stromkomponente (gestrichelt). Verschiedene Farben stellen unterschiedliche Jahre dar.

Eine Schlüsselstellung im Benguela-System nimmt der Wasser- und Stoffaustausch zwischen Schelfgebiet und angrenzendem Ozean ein. Dieser wird im Mittel durch eine langsame Querzirkulation, bestehend aus seewärtigem Ekman Transport in der Oberfläche und Kompensationsstrom unterhalb der Thermokline bestimmt. Mesoscale Auftriebsfilamente die regelmäßig beobachtet werden, können jedoch mit einem mehrfach effektiveren Transport verbunden sein. Mit hochauflösenden Messungen konnte auf der Discovery Expedition 2010 erstmals auch die vertikale Struktur eines Auftriebsfilamentes untersucht werden. Abbildung 5 zeigt einen ScanFish-Transekt quer zur Längsachse des untersuchten Auftriebsfilamentes. Die Temperatur und Salzverteilung im Filament zeigt klar das kalte salzärmere Wasser im Filamentkern, dass durch „scharfe“ Fronten vom wärmeren und salzreicheren ozeanischen Wasser abgegrenzt ist. An der Oberfläche führen die lokalen Wärmefflüsse zu einer Erwärmung der Deckschicht. Dadurch kann das Filament „maskiert“ werden und ist in SST Satelliten Daten nur noch eingeschränkt sichtbar. Das Filament hat eine vertikale Ausdehnung von 90-100 m und stimmt damit gut mit im Modell beobachteten Filamenten überein. Die berechneten geostrophischen Geschwindigkeiten zeigen im Mittel eine schwachen Offshore-Transport. Tatsächlich ist der Offshore-Transport von Auftriebswasser im Filament erheblich höher (1,46 m<sup>2</sup>/s auf Transekt 1), und ist damit etwa doppelt so hoch wie der Ekman Offshore-Transport in der Deckschicht. Der seewärtige Transport wird jedoch weitgehend durch einen starken auf die Küste gerichteten Transport von ozeanischem Wasser kompensiert (1.10 m<sup>2</sup>/s auf Transekt 1). Mit dem Auftriebswasser wurden auch die für die innere Schelfregion typischen Organismengemeinschaften in ozeanische Gebiete exportiert. Die Fronten zwischen Auftriebsfilament und umgebenden ozeanischen Wasser sind durch stark erhöhte Primarproduktion gekennzeichnet.

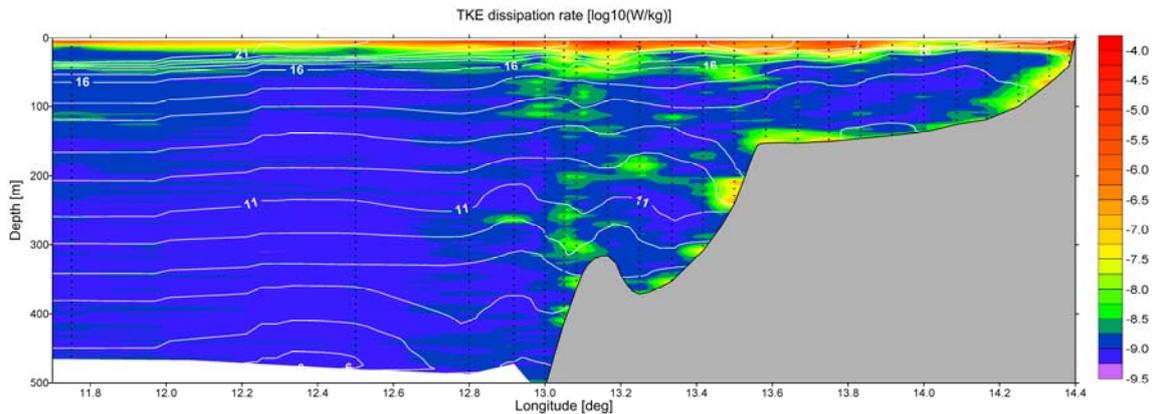
Auftriebsfilamente spielen eine wesentliche Rolle beim Materialexport in den offenen Ozean und sie intensivieren den Austausch zwischen Schelf und angrenzenden Ozean. Ihre Dynamik ist jedoch noch nicht vollständig geklärt und wird in der 2. Phase des Projektes genauer untersucht.



**Abbildung 5:** (a) Position und Ausdehnung des während der Discovery-Expedition beobachteten ScanFish-Transektes (rote Linie), dessen Daten in den Abbildungen b und c dargestellt sind. b) Vertikale Verteilung von Temperatur (farbige Kontur) und Salzgehalt (Isolinien) von der Oberfläche bis 100 m Tiefe. Das Filament ist deutlich als kälterer Wasserkörper im Zentrum des Transektes erkennbar. Die aus dem Dichtefeld (Isolinien) berechneten geostrophischen Geschwindigkeiten (farbige Kontur) in zonaler Richtung sind in Abbildung c) dargestellt.

Die hohe Produktivität des Auftriebsgebietes führt zu einer starken Akkumulation von organischem Kohlenstoff in den Oberflächensedimenten. Das Auftreten anoxischer Verhältnisse auf dem Namibischen Schelf ist eng an die Verteilung dieser kohlenstoffreichen Sedimente gekoppelt. Mit Hilfe intensiver Mikrostrukturmessungen wurde gezeigt, dass die Akkumulationsgebiete auf dem Schelf Schattenzonen mit niedriger turbulente kinetische Energie (TKE) in der bodennahen Wasserschicht sind. An der Schelfkante und kritischen Gradienten der Bodentopographie auf dem Schelf erhöhen brechende interne Wellen und auflaufende Dünung lokal die TKE und verhindern eine dauerhafte Ablagerung von kohlenstoffreichen Partikeln. Diese werden in Trübungsschichten in den angrenzenden Ozean exportiert und tragen zum Kohlenstofftransport in den tiefen Ozean bei. Abbildung 6 zeigt diese Prozesse anhand von Mikrostrukturmessungen entlang eines küstennormalen Transektes bei 23°S. An der Schelfkante (13°E) verursacht die Wechselwirkung der einlaufenden internen Gezeit mit der Topographie starke vertikale Auslenkungen der Isothermen und eine Erhöhung der TKE-Dissipation in der gesamten Wassersäule. Auf dem Schelf wird hohe TKE an starken Gradienten der Bodentopographie beobachtet, während die ebenen Bereiche des inneren Schelf (14°E) eine Schattenzone für die TKE darstellt. Diese Schattenzonen sind die Akkumulationsgebiete für Sedimente mit hohem Anteil an organischem Kohlenstoff. Die aus dem Ozean einlaufende Dünung hat eine der internen Gezeit ähnliche Wirkung, sie ist jedoch zeitlich intermittierend.

Die kleinskaligen Prozesse in der Bodengrenzschicht, wie die durch das Brechen interner Wellen und Dünung erzeugte Turbulenz, beeinflussen das Ökosystem erheblich.



**Abbildung 6:** Hotspots der TKE Dissipation auf dem Namibischen Schelf entlang eines küstennormalen Transektes bei 23°S. Daten der Merian Expedition Feb. 2011, TKE Dissipation – farbige Kontur, Temperatur – Isolinien.

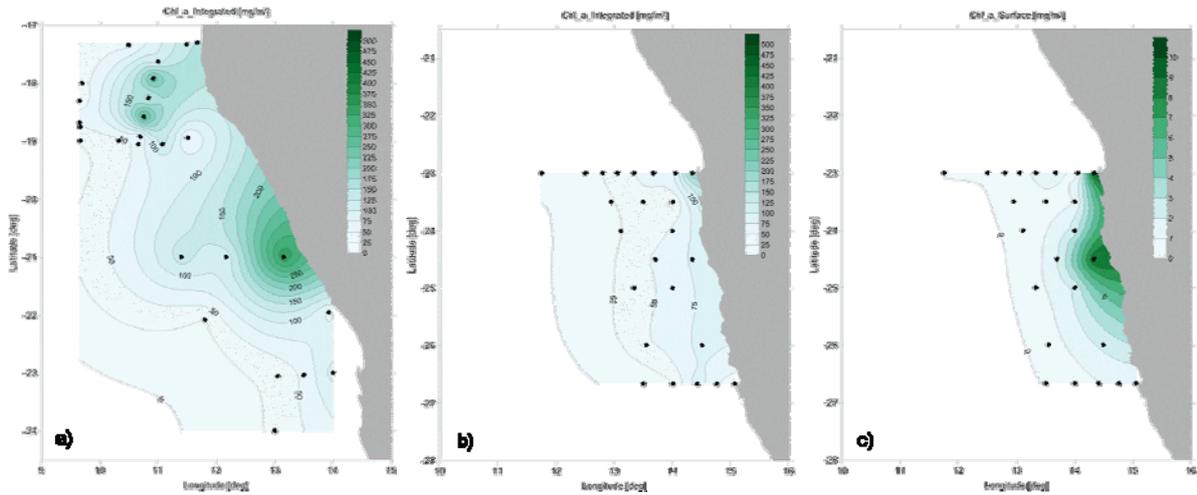
Neben der Untersuchung der physikalischen Prozesse wurden die validierten hydrographischen Parameter als Basisdaten für die anderen Teilprojekte bereitgestellt.

### **Phytoplankton**

Das Phytoplankton ist bisher insbesondere im nördlichen Benguela-Gebiet wenig erforscht. Da das Phytoplankton als Primärproduzent die Nahrungsgrundlage für alle höheren trophischen Ebenen darstellt, ist seine Qualität und Quantität und seine räumliche und zeitliche Verfügbarkeit von entscheidender Bedeutung für das gesamte Ökosystem. Während der Expeditionen wurden folgende Phytoplanktonparameter in ihrer räumlichen Verteilung untersucht:

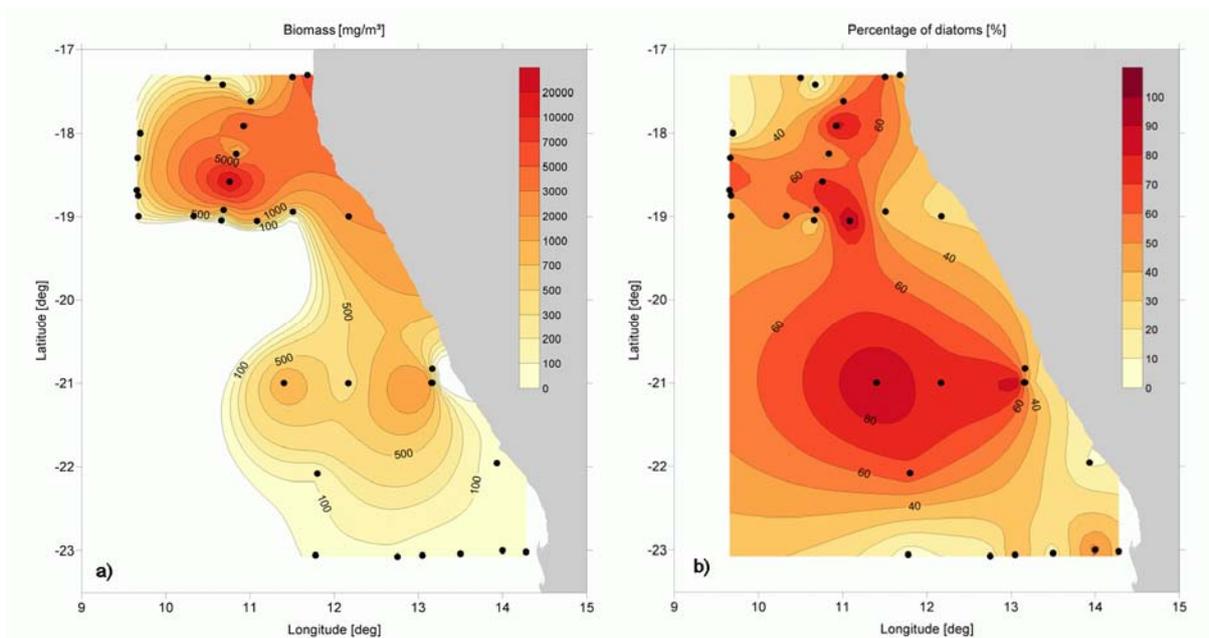
1. Chlorophyll *a*-Konzentration (als Proxy für die gesamte Phytoplanktonbiomasse)
2. Qualitative und quantitative Phytoplanktonzusammensetzung
3. Primärproduktion
4. Stickstofffixierung.

Die Chlorophyll *a*-Konzentration ist als Maßzahl für die Phytoplankton-Biomasse anerkannt. Allerdings ist eine Umrechnung in Biomasse nur möglich, wenn der zellspezifische Chlorophyllgehalt bekannt ist. Dieser ist jedoch sehr variable und hängt insbesondere von den Strahlungsverhältnissen ab. So fand Pitcher (1988) im Benguela-Gebiet in 0-10 m Tiefe Kohlenstoff:Chlorophyll *a*-Verhältnisse von 30-120 und in 20-40 m Tiefe ein Verhältnis von 10-30. In tieferen Wasserschichten ist das Phytoplankton wegen der geringeren Strahlung also Chlorophyll-reicher. Die von uns an allen Stationen bestimmte Tiefenverteilung des Chlorophyll wird nicht gesondert betrachtet. Wir geben in Abbildung 7 bereits die über eine Tiefe von 40 m integrierten Chlorophyll *a*-Konzentrationen an. Wie erwartet, ist die Chlorophyll *a*-Konzentration im Auftriebsgebiet besonders hoch (während der Fahrt D356 bei 21°S, Abb. 7a). In dem südlicheren Beprobungsgebiet der Fahrt MSM17/3 (1. Fahrtabschnitt) fanden wir eine ähnliche Verteilung nicht (Abb. 7b). Erst wenn wir die Oberflächenwerte darstellen, zeigt sich eine küstennahe Blüte bei 24,5°S, die offensichtlich nahe der Wasseroberfläche konzentriert ist (Abb. 7c). Derartige Phytoplanktonblüten in küstennahem Auftrieb sind bekannt und wurden erwartet. Bislang wenig beachtet waren jedoch die sich weit in den Ozean erstreckenden Filamente, die ebenfalls eine hohe Phytoplankton-Biomasse hervorbringen (auf der Fahrt D356 um 18°S).



**Abbildung 7:** Horizontale Verteilung der Chlorophyll  $a$ -Konzentration auf den Fahrten D356 (a) und MSM17/3 (b, c). In den Abbildungen a und b sind die integrierten Werte über die oberen 40 m der Wassersäule und in Abbildung c nur die Oberflächenwerte gezeigt.

Die hohe Biomasse dieser Filamente zeigt sich sowohl in den Chlorophyll  $a$ -Konzentrationen (Abb. 7a) als auch in der mikroskopisch bestimmten Phytoplanktonbiomasse (Abb. 8a). Sie wird offensichtlich genauso wie im direkten Küstenauftrieb durch Kieselalgen (Diatomeen) verursacht (Abb. 8b). Interessant ist die mesoskalige Struktur innerhalb des Filaments. Die hohe Biomasse wird an den Rändern und nicht im Zentrum des Filaments gefunden. Wahrscheinlich schafft erst eine Vermischung von alterndem Auftriebswasser mit ozeanischem Umgebungswasser die Bedingungen für starkes Wachstum, insbesondere im Fall von Kieselalgen.



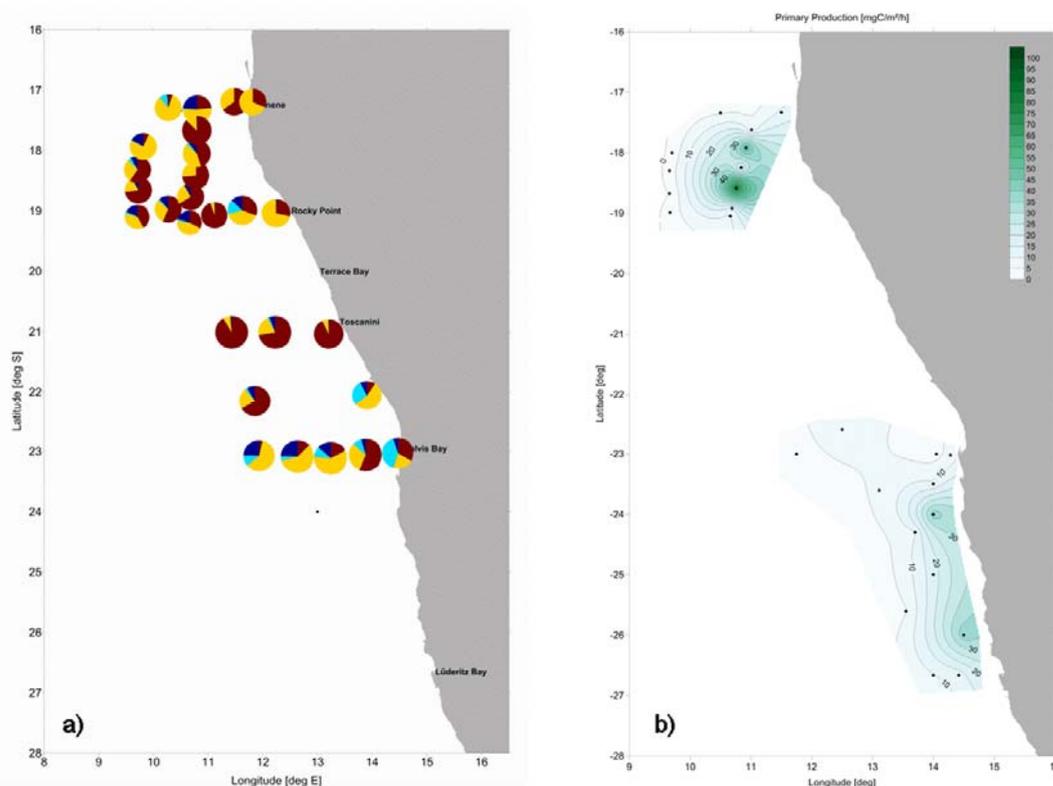
**Abbildung 8:** Horizontale Verteilung der Phytoplanktonbiomasse (a) und des Anteils der Kieselalgen an der Phytoplanktonbiomasse während der Fahrt D356 (b).

Das Verhältnis der wichtigsten taxonomischen Gruppen ist in Abb. 9 in Kreisdiagrammen dargestellt. Exemplarisch wurde nur die Fahrt D356 ausgewählt. Auch hier zeigt sich die Dominanz von Kieselalgen an den Rändern des Filaments, während im Zentrum und außerhalb des Filaments Dinoflagellaten dominieren. Dinoflagellaten und Coccolithophoriden sind offensichtlich außerhalb von Auftriebszellen typisch. Bei der Untersuchung der

Phytoplanktonzusammensetzung galt den potenziellen Stickstofffixierern, also den Cyanobakterien, besonderes Augenmerk. Im gesamten Untersuchungsgebiet und auf den drei Projektfahrten konnten keine *Trichodesmium*-Vorkommen mikroskopisch nachgewiesen werden. Lediglich in den küstenfernsten Bereichen fanden sich sporadisch einzelne *Trichodesmium*-Aggregate im Planktonnetz.

Die Größenordnung der Stickstofffixierung im Untersuchungsgebiet war von hohem Interesse, die sie hier noch nie bestimmt wurde. In ein und demselben Versuchsansatz wurden neben den Stickstofffixierungsraten auch Primärproduktionsraten ermittelt. Diese methodische Möglichkeit ergab sich durch Doppelmarkierung der Proben mit den Isotopen  $^{15}\text{N}$  und  $^{13}\text{C}$ , die parallel im Massenspektrometer gemessen werden. Die  $^{15}\text{N}$ -Methode wird seit Ihrer Beschreibung durch Montoya et al. (1996) am IOW erfolgreich eingesetzt. Die  $^{13}\text{C}$ -Methode war für uns neu. Sie löste die traditionelle  $^{14}\text{C}$ -Methode ab, die zwar sehr genau, aber wegen ihrer Radioaktivität nur sehr begrenzt auf Expeditionen einsetzbar ist. Parallelbestimmungen mit beiden Methode ergaben, dass die  $^{13}\text{C}$ -Produktionswerte erst mit einem Umrechnungsfaktor von 2 an die  $^{14}\text{C}$ -Produktionswerte angepasst werden mussten. In der 2. Projektphase wird die Primärproduktionsbestimmung mit Hilfe von Sauerstoffoptoden durchgeführt. Diese Methode wird bereits erfolgreich in anderen Teilprojekten zur Bestimmung der Respirationsraten von Zooplanktonorganismen eingesetzt.

Die Messungen der Stickstofffixierung und der Primärproduktion wurden nur auf den Fahrten D356 und MSM17/3 (1. Fahrtabschnitt) durchgeführt. Wegen der Inkubationsdauer (6 Stunden, gelegentlich bis 8 Stunden) war im allgemeinen nur ein Experiment, bei Verzicht auf Parallelen bis drei Experimente pro Tag möglich. Bei der Fahrt D356 konzentrierten sich die Messungen auf das Filament, das zwischen 17 und 19°S gefunden wurde. Auf der Fahrt MSM17/3 wurde zusätzlich eine Größenfraktionierung vorgenommen, um die Anteile des Planktons  $<40\mu\text{m}$  und  $>40\mu\text{m}$  zu trennen. Es zeigte sich, dass der weitaus größte Teil der Primärproduktion (88,7 %) von Phytoplankton  $<40\mu\text{m}$  stammt. Der Beitrag der Organismen  $>40\mu\text{m}$  (blütenbildende Kieselalgen, große Dinoflagellaten, theoretisch auch *Trichodesmium*-Aggregate) ist vergleichsweise gering.



**Abbildung 9:** Darstellung der Phytoplanktonzusammensetzung auf den Stationen der Fahrt D356. Die quantitativen Anteile der vier Hauptgruppen sind in den Kreisdiagrammen dargestellt: Kieselalgen rot,

Dinoflagellaten gelb, Coccolithophoriden dunkelblau, sonstige Flagellaten hellblau. b) Horizontale Verteilung der Primärproduktionsraten in den oberen 40 m der Wassersäule während der Fahrt D356 (nördliches Messgebiet).

Die untersuchten Stationen der beiden Fahrten sind in Abb. 9b zusammengefasst. Die auf den dort eingezeichneten Stationspunkten durchgeführten Messungen ergaben keine messbare Stickstofffixierung. Einen methodischen Fehler schließen wir aus, da wir mit derselben Methode in der Ostsee sehr hohe Fixierungsraten messen konnten (z.B. Wasmund et al. 2001). Trotzdem nahmen wir kritische Bemerkungen von Mohr et al. (2010) zur Methode ernst und führten auf der Fahrt D356 die traditionelle Methode nach Montoya et al. (1996) und eine Modifikation nach Mohr et al. (2010) mit hohem Aufwand parallel durch. Mit beiden Methoden war keine signifikante Stickstofffixierung nachzuweisen. Auf der Fahrt MSM17/3 wurde nur noch die neue, aber aufwändigere Modifikation eingesetzt. Die angewendeten Methoden umfassen das gesamte partikuläre Material, d.h. einschließlich der potenziell Stickstoff-fixierenden Picocyanobakterien. Das Ergebnis, dass keine signifikante Stickstofffixierung stattfand, ist beachtenswert.

Die Proben für die Bestimmung der Primärproduktions wurden an den Stationen jeweils aus mehreren Tiefen genommen und bei sieben verschiedenen Photonenflussdichten inkubiert, um Tiefenprofile zu simulieren. Die über die oberen 40 m der Wassersäule integrierten Primärproduktionsraten sind in Abb. 9b dargestellt, wobei das nördliche Messgebiet von der Fahrt D356 und das südliche Messgebiet von der Fahrt MSM17/3 stammt. Wie bereits oben diskutiert, zeigen sich die höchsten Werte im küstennahen Auftriebsgebiet und an den Rändern des Filaments.

Prozesse in Filamenten sollen in zukünftigen Untersuchungen detaillierter untersucht werden.

### ***Entwicklung des gekoppelten biogeochemischen Ökosystemmodells***

Das am IOW entwickelte und gepflegte Ökosystemmodell ERGOM wurde für das Projekt auf die spezifischen Verhältnisse im Benguela-Auftriebsgebiet angepasst und erweitert. Bei der Modellentwicklung gab es zwei Schwerpunkte:

1. Implementierung des Ökosystemmodells in *mom4p1* (GFDL, Princeton, NJ). Dieses Zirkulationsmodell stellt numerisch positive Verfahren für den advektiven Tracertransport zur Verfügung, die für komplexe Ökosystemmodelle unverzichtbar sind. Außerdem besitzt es eine für massiv paralleles Rechnen zugeschnittene Modellinfrastruktur. Das GENUS-Zirkulationsmodell ist ein regionales Modell mit offenen Randbedingungen. Die benötigten Algorithmen wurden überarbeitet (gemeinsam mit dem GFDL, NJ und dem CSIRO, Hobart).
2. Verfeinerung des Ökosystemmodells:
  - Erweiterung des Nahrungsnetzmodells um weitere Zooplanktongruppen,
  - Implementierung von Algorithmen zur Vertikalmigration von Zooplankton, getriggert durch Licht, Nahrungsgradienten und Sauerstoffverhältnisse.
  - Überarbeitung der Raten für Primärproduktion, Zooplanktonnahrungsaufnahme und Respiration
  - Erweiterung des Modells für Stoffumsätze am Sediment, Einbeziehung von Schwefelbakterien
  - Einfaches Sedimenttransportmodell

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

## 1. Einrichten der physikalischen Modellkomponenten,

- Modellantrieb mit Scatterometer-Windfeldern (QuikSCAT). Die Satellitendaten wurden als tägliches 3-Tageskomposit mit 12.5 km Auflösung beschafft und für die Modellierung formatiert. Seit 2009 ist QuikSCAT ausgefallen, es steht jedoch ASCAT zur Verfügung. Ein ähnliches Produkt wie für QuikSCAT wurde zuvorkommender Weise von A. Bentamy (IFREMER, Brest, Frankreich) verfügbar gemacht. Eine abgeleitete Klimatologie steht für die anderen Modellgruppen zur Verfügung. Sowohl die Auftriebsintensität als auch die berechneten Stromfelder stimmen soweit mit Beobachtungen überein, dass die modellierten hydrographischen Bedingungen für realistische Experimente mit dem Ökosystemmodell geeignet sind.
- Einrichten der offenen Randbedingungen. Das GENUS-Modell ist ein regionales Modell und benötigt offene Randbedingungen. Diese wurden dem globalen ECCO-Modell entnommen. Die Daten wurden beschafft und formatiert. Die Parameter der verwendeten Sommerfeldschen Abstrahlungsbedingung sind schwer einzurichten. Das regionale GENUS-Modell mit offenen Randbedingungen wird in einem Kapitel in Herzfeld et al. (2011) beschrieben.
- Modellantrieb mit REMO-Winden. Obwohl sowohl die Intensität als auch die räumlichen Strukturen der aus REMO-Läufen abgeleiteten Windfelder gut mit Scatterometer-Windfeldern übereinstimmen, sind die Auftriebsintensität und der Küstenstrahlstrom zu schwach entwickelt. Als Folge wird der Anteil von SACW auf dem namibischen Schelf stark überschätzt. An einer Lösung des Problems wird gemeinsam mit dem CSC gearbeitet.
- Die welleninduzierte Vermischung im Bodenwasser auf dem Schelf ist wesentlich für die Sauerstoffversorgung des Bodenwassers verantwortlich. Ohne diese Vermischung ist das Wasser in den untersten Modellzellen auf dem Schelf fast immer anoxisch und nitratfrei. Chemoautotrophe Bakterien wie die Schwefelbakterien, die im Untersuchungsgebiet große Matten auf dem Sediment bilden, könnten unter diesen Bedingungen nicht existieren. Durch einfache Algorithmen zur bodennahen, welleninduzierten Vermischung konnte dieser Nachteil behoben werden.

## 2. Verfeinerung des Ökosystemmodells

- Erweiterung des modellierten Nahrungsnetzes um weitere Zooplanktongruppen. Das Zooplankton umfasst jetzt drei funktionelle Gruppen, eine Gruppe repräsentiert die herbivoren Copepoden, eine andere herbivoren Krill mit ausgeprägter Vertikalmigration (z.B. *Eupausia hansenii*) und die dritte carnivoren Krill (z.B. *Nematoscelis megalops*), der sich vor allem in tieferen Wasserschichten aufhält. Nahrungspräferenzen, Temperaturoptima, Vertikalmigrations-Verhalten sowie Wachstums- und Respirationsraten orientieren sich an den physiologischen Messungen anderer Projektpartner.
- Implementierung der täglichen Vertikalwanderung von Zooplankton. Der Algorithmus beruht auf folgenden Regeln: Die Bewegung in die Tiefe wird durch Licht ausgelöst. Bei wenig Licht folgt das Plankton Nahrungsgradienten, suboxischen Bedingungen und Schwefelwasserstoff werden vermieden. Für einzelne Artengruppen gibt es Temperaturbereiche der optimalen Entwicklung. Wasserkörper, in denen diese Bedingungen herrschen werden nur verlassen, wenn andere Umweltbedingungen das erzwingen.
- Für die Berechnung der Stoffumsätze im Sediment wurde ein Algorithmus entwickelt, der berücksichtigt, dass schwefeloxidierende Bakterien das Austreten von Schwefelwasserstoff aus dem Sediment in die Wassersäule weitestgehend verhindern können.

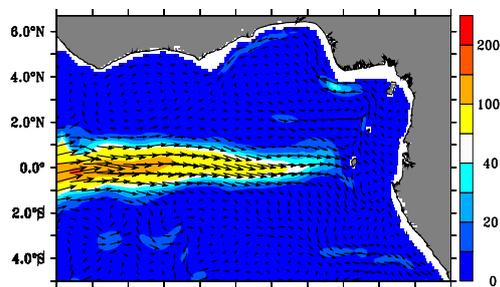
- Für die Berücksichtigung von Resuspensionsprozessen wurde ein einfaches Wellenmodell implementiert, das die Berechnung der Bodenschubspannung aus Strömungs- und Wellenfeld gestattet.

### 3. Numerische Experimente

- Die Einrichtung der offenen Randbedingung
- Die Modellverfeinerungen werden schrittweise eingeführt, zunächst in kurzen Läufen (2-3 Modelljahre) prinzipiell erprobt und dann mit Simulationen über 11 Modelljahre getestet. Die Validation erfolgt gegen Phytoplankton (Chlorophyll)- Konzentrationen im Benguela Auftriebsgebiet, Zooplanktonkonzentrationen sowie die Variabilität der Sauerstoffverhältnisse auf dem Schelf Namibias und im Angolawirbel.

### 4. Ergebnisdiskussion

Die Wahl der offenen Randbedingungen im Bereich der Äquatorialströme ist kritisch für die Intensität der Ostrandströme vor Angola und in nördlichen Benguela. (M. Schmidt in Herzfeld et al., 2011).



**Abbildung 10:** Die kinetische Energiedichte im äquatorialen Unterstrom (oben) und dessen Fortsetzung in den Ostrandströmen (rechts).

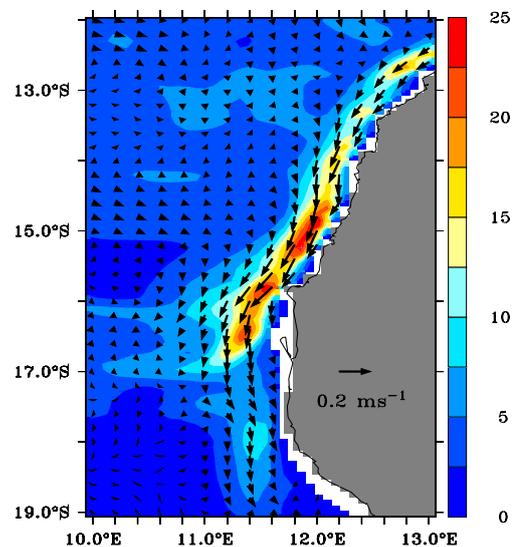


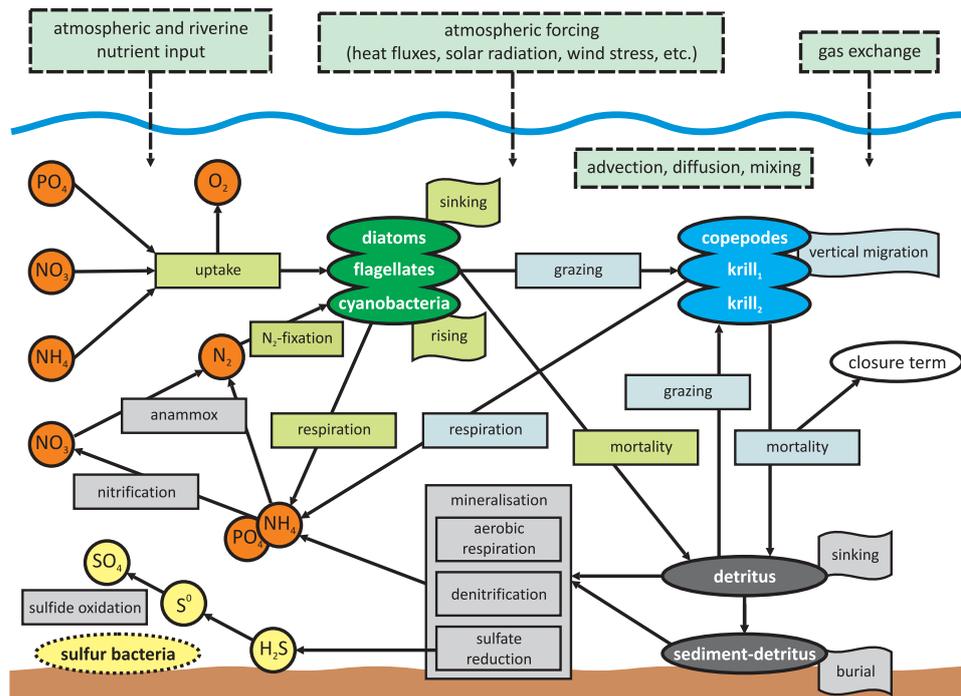
Abbildung 10 zeigt die Einkopplung der Äquatorialströme an der offenen Grenze bei 10°W sowie ein Beispiel für deren intensive Fortsetzung als Ostrandstrom vor Angola.

Eine Analyse der lokalen Stromfelder zeigt gute Übereinstimmung mit der analytischen Theorie. Gemessene SST als Maß für die Auftriebsintensität spiegelt die jährliche und auch die zwischenjährliche Variabilität von MODIS-SST-Daten wieder. Die Modellergebnisse zeigen aber auch, dass die SST alleine kein gutes Maß für die Auftriebsintensität ist, da die Variabilität auch durch lokale strahlungsbedingte Erwärmung bedingt ist.

Während Simulationen mit Windfeldern aus Satellitenmessungen gut mit Messdaten korrelieren, ist es nicht gelungen mit REMO-basierten Windfeldern eine ähnliche Übereinstimmung zu erreichen. Obwohl keine signifikanten Defizite der REMO-Winddaten erkennbar sind, dringt Modell-SACW zu häufig weit nach Süden vor, so dass die unrealistische Wassermassenverteilung die Ökosystemdynamik verfälscht.

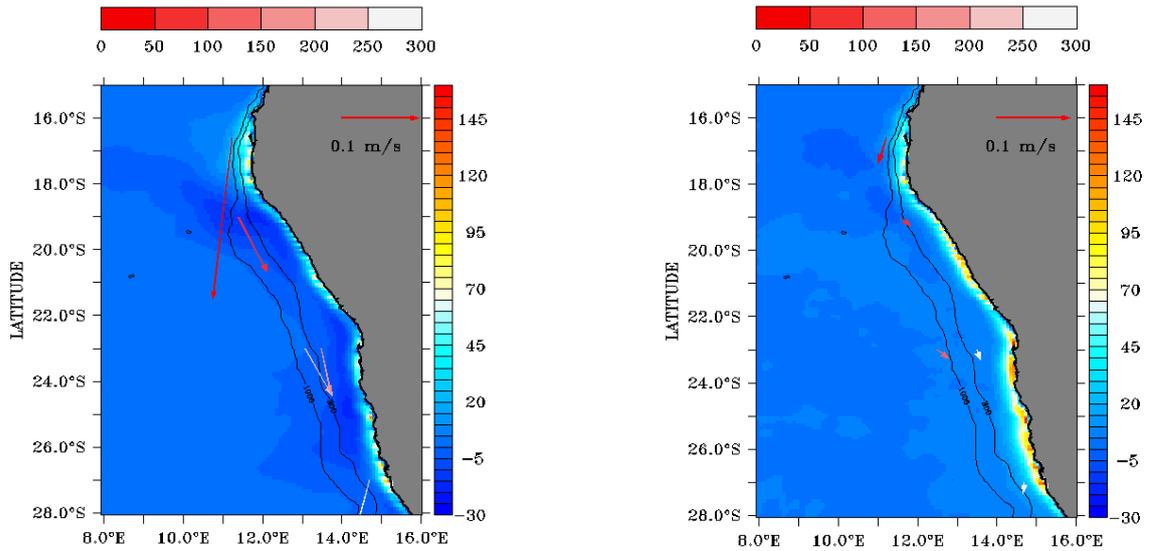
Abbildung 11 fasst das im Rahmen von GENUS erarbeitete Ökosystemmodell zusammen. Für die wichtigen Prozesse wurden die Reaktionsraten validiert und neu eingerichtet. Die 3 Zooplanktongruppen unterscheiden sich durch ihre Fähigkeit zur Vertikalwanderung, den Temperaturbereich optimalen Wachstums sowie ihre Nahrungspräferenzen. Spezifisch für den Schelf vor Namibia sind die Matten aus Schwefelbakterien (*Thiomargarita namibiensis*, *Beggiatoa*-Arten) auf den Sedimenten,

die das Austreten von Schwefelwasserstoff aus dem Sediment in die Wassersäule verhindern, solange Oxidationsmittel (Sauerstoff, Nitrat) verfügbar sind.

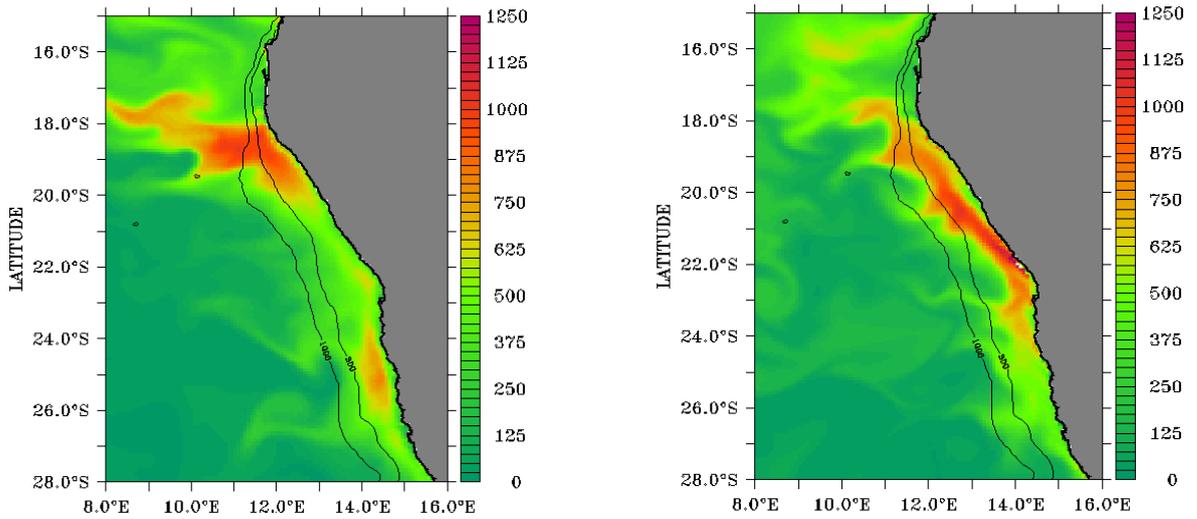


**Abbildung 11:** Nährstoffkreislauf und Elemente des Schwefelzyklus im gekoppelten GENUS-Ökosystemmodell

Abbildung 12 zeigt die AOU an der Untergrenze der vermischten Deckschicht in Kombination mit Geschwindigkeit und Tiefe des Unterstroms. Nördlich von  $18^\circ S$  ist die AOU stark positiv und korrespondiert zum starken polwärtigen Unterstrom, der Wasser mit reduziertem Sauerstoffgehalt aus dem Angolawirbel transportiert. Bedingt durch die hohe Primärproduktion liegt südlich davon im offenen Ozean ein mit Sauerstoff übersättigter Wasserkörper (negative AOU) vor, während an der Küste durch Auftrieb sauerstoffarmes Wasser mit hoher AOU die Deckschicht erreicht. Dieses Bild zeigt eine starke saisonale Variabilität, im Oktober führt ein kräftiger Unterstrom zu einer guten Nährstoffversorgung des nördlichen Benguela, was zu einer hohen Primärproduktion und guten Sauerstoffversorgung der Deckschicht führt. Im Juni ist der Unterstrom schwach, das Gebiet geringer AOU verlagert sich nach Norden, während infolge verstärkten Auftriebs sauerstoffarmem Wassers die AOU in Küstennähe erhöht ist. Abbildung 13 zeigt die entsprechende Chlorophyllverteilung für das Jahr 2008.

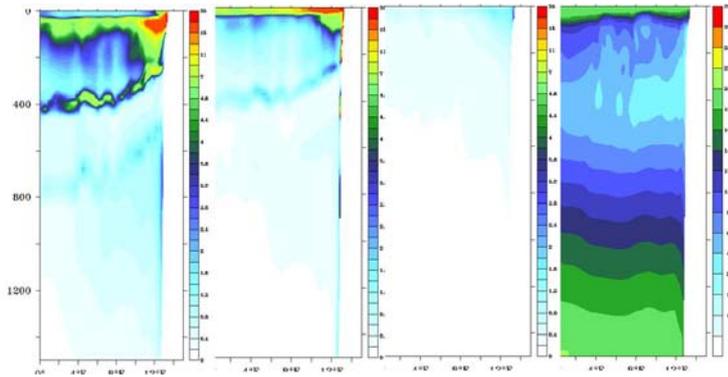


**Abbildung 12:** AOU (rechte Farbskala) an der Untergrenze der durchmischten Deckschicht. Die Pfeile stellen die Stromgeschwindigkeit im Kern des Unterstroms dar, die Farbe der Pfeile symbolisiert die Tiefe des Unterstroms (obere Farbskala). Auf dem Weg nach Süden spaltet sich der Unterstrom in zwei Zweige auf. Die linke Abbildung zeigt den klimatologischen Wert (2000-2008) für Oktober, die rechte Abbildung für den Monat Juni.

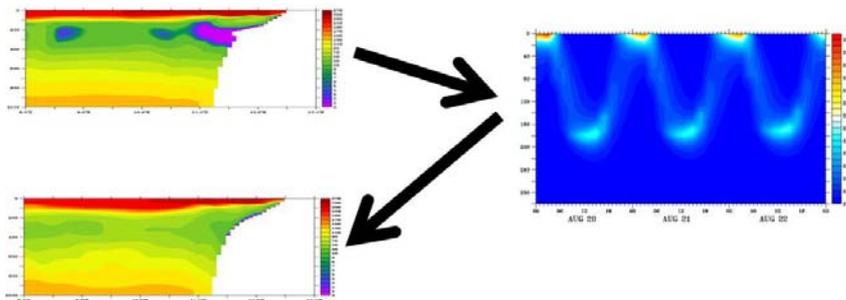


**Abbildung 13:** Chlorophyllkonzentration integriert über die oberen 40 Meter für Oktober 2008 (links) und Juni 2008.





**Abbildung 15:** Beiträge zum Sauerstoffverbrauch im Angola-Dom auf einem Schnitt bei 10°S im Januar 2006. Von links nach rechts: Zooplanktonatmung, Nitrifizierung, Detritusmineralisierung, die sich entwickelnde Sauerstoffminimumzone.



**Abbildung 16:** Sauerstoffgehalt im Unterstrom bei 20°S. Das obere Bild zeigt Ergebnisse aus einem Experiment ohne Zooplanktonvertikalwanderung, das untere Bild mit Berücksichtigung der Vertikalwanderung.

Die Berücksichtigung der Vertikalwanderung von Zooplankton hat damit signifikante Auswirkung auf die Vertikalverteilung des Sauerstoffs. Ohne Berücksichtigung der Vertikalwanderung wird das Wasser im Unterstrom stets anoxisch, so dass die Belüftung des Schelfs mit dem Unterstrom im Modell unterschätzt wird. Dieses Problem wird durch die Berücksichtigung der Zooplanktonvertikalwanderung behoben, siehe Abbildung 16.

## **Datenhaltung im Projekt**

### **1. PANGAEA Datenbank**

Die Metadaten (d.h. vollständige Stationslisten, Parameterlisten und Gerätelisten) folgender drei GENUS-Expeditionen wurden in der Pangaea-Datenbank vollständig angelegt: RV Africana 258 (1.12.2009-17.12.2009), RV Discovery 356 (10.9.2010-13.10.2010) und FS M.S. Merian 17/3 (30.1.2011-7.3.2011). Aktuell sind folgende Parameter in die Datenbank erfolgreich eingespeist:

- Biochemische Parameter des Karbonatsystems (6864 georeferenzierte Datenpunkte, TP4)
- Ferrybox-Nährstoffdaten (504.038 georeferenzierte Datenpunkte, TP3)
- Phytoplanktondaten (2298 georeferenzierte Datenpunkte, TP2)
- Zooplanktondaten, Meso- und Makrozooplankton (10.730 georeferenzierte Datenpunkte, TP5)
- Zooplanktondaten, Mesozooplankton (630 georeferenzierte Datenpunkte, TP6)

Die gewonnenen hydrographischen Daten sind validiert und wurden auf einem projektinternen FTP Server bereitgestellt. Alle CTD Daten sind in der Datenbank des IOW abgelegt, die Überführung in die Pangaea-Datenbank steht jedoch noch aus.



Data Description

Show Map Google Earth

Citation: **Martin, Bettina (2011):** Zooplankton biomass from different transects in the northern Namibian upwelling area (Benguela Current System) during AFR 258. *Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaften, Universität Hamburg*. Unpublished dataset #772730

Project(s): **Geochemistry and ecology of the Namibian upwelling system (GENUS)** ↗

Coverage: Median Latitude: -20.075000 \* Median Longitude: 11.999999 \* South-bound Latitude: -23.000000 \* West-bound Longitude: 10.500000 \* North-bound Latitude: -17.250000 \* East-bound Longitude: 14.050000

Date/Time Start: 2009-12-08T16:10:00 \* Date/Time End: 2009-12-14T00:11:00

Minimum DEPTH, water: 12.5 m \* Maximum DEPTH, water: 675.0 m

Event(s): **AFR258\_30252\_7 (T-5-4\_7)** ↗ \* Latitude: -19.000000 \* Longitude: 12.250000 \* Date/Time Start: 2009-12-08T16:10:00 \* Date/Time End: 2009-12-08T19:57:00 \* Elevation: -111.0 m \* Location: Benguela Upwelling ↗ \* Campaign: AFR258 ↗ \* Basis: Africana II ↗ \* Device: Singel MOCNESS 2000 ↗

**AFR258\_30254\_7 (T-5-1\_7)** ↗ \* Latitude: -19.000000 \* Longitude: 11.433330 \* Date/Time Start: 2009-12-09T03:08:00 \* Date/Time End: 2009-12-09T07:55:00 \* Elevation: -400.0 m \* Location: Benguela Upwelling ↗ \* Campaign: AFR258 ↗ \* Basis: Africana II ↗ \* Device: Singel MOCNESS 2000 ↗

**AFR258\_30256\_6 (Add-10\_6)** ↗ \* Latitude: -17.250000 \* Longitude: 11.500000 \* Date/Time Start: 2009-12-09T20:01:00 \* Date/Time End: 2009-12-09T22:15:00 \* Elevation: -150.0 m \* Location: Benguela Upwelling ↗ \* Campaign: AFR258 ↗ \* Basis: Africana II ↗ \* Device: Singel MOCNESS 2000 ↗



Parameter(s):

#	Name	Short Name	Unit	Principal Investigator	Method	Comment
1	Event label	Event				Metadata
2	LONGITUDE ↗	Longitude				Geocode
3	LATITUDE ↗	Latitude				Geocode
4	Sample code/label ↗	Label		Martin, Bettina ↗		
5	DEPTH, water ↗	Depth water	m			Geocode
6	Depth, top/min ↗	Depth top	m	Martin, Bettina ↗		
7	Depth, bottom/max ↗	Depth bot	m	Martin, Bettina ↗		
8	Time of day ↗	TOD		Martin, Bettina ↗		
9	Size fraction ↗	Fraction		Martin, Bettina ↗		
10	Biomass, wet mass per volume ↗	Biomass WM	µm³	Martin, Bettina ↗		

Size: 1440 data points

Download Data (login required)

**Abbildung 17:** Beispieldatensatz (Meso- und Makrozooplanktonparameter, TP5), der in die Pangaea-Datenbank eingespeist wurde und auf den projektintern zugegriffen werden kann.

## 2. THREDDS und LAS-Server

Die Modelldaten sind über einen THREDDS-Server verfügbar (Domenico et al., 2002). Unter der Adresse

[phy-51.io-warnemuende.de/thredds](http://phy-51.io-warnemuende.de/thredds)

sind ein Katalog der Experimente sowie die Adresse für einen *opendap*-Zugriff z.B. mit *ferret*, *python*, *grads* oder *Matlab* verfügbar. Direkter Datenzugriff ist auch über den LAS-Server

[phy-51.io-warnemuende.de/las](http://phy-51.io-warnemuende.de/las)

möglich.

## III.3. Fortschreibung des Verwertungsplans.

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Im Rahmen des Projektes wurde die Auswirkung von Klima- und Umweltwandel auf das Ökosystem im Küstenauftriebsgebiet vor Namibia/Südwestafrika untersucht. Schwerpunkte der Arbeiten des TP2 am IOW lagen auf Untersuchungen der physikalischen und biogeochemischen Veränderungen auf dem Schelf und in der angrenzenden Tiefsee durch Messungen und Modellierung. Dazu führten die Wissenschaftler des TP2 Beobachtungen der Ozeanzirkulation durch und beteiligten sich an den Untersuchungen zu biogeochemischen und biologischen Prozessen im Nahrungsnetz dieses fischreichen Küstenmeers. Im TP2 wurden außerdem in Modellen die Jetztzeit und ausgewählte Perioden der Vergangenheit nachgebildet. Ziel ist es, mit dem konsolidierten Modellsystem die möglichen Entwicklungen dieses fischreichen Ökosystems unter veränderten Klimabedingungen der Zukunft abzuschätzen. Daher lag unser Focus im Rahmen des Projektes nicht auf einer wirtschaftlich verwertbaren Entwicklung. GENUS arbeitet jedoch

eng mit namibischen und südafrikanischen Institutionen zusammen und begleitet die wissenschaftliche Arbeit durch ein Ausbildungsprogramm für Nachwuchswissenschaftler aus der Region. Inwieweit das geschaffene Modellsystem, einzelne Mess- und Modellkomponenten und die Ausbildungskomponente von GENUS von anderen Ländern übernommen werden und dann vielleicht auch wirtschaftlich verwertbar sind, ist gegenwärtig noch nicht absehbar.

Die Projektergebnisse schaffen wissenschaftliche Voraussetzungen für das Monitoring des Benguela-Ökosystems, insbesondere Frühwarnsysteme für HABS und Ereignisse mit suboxischen Bedingungen. Die weiterentwickelten Modelle erlauben Aussagen über die lokalen Auswirkungen von veränderten klimatischen Antrieben. Sie gestatten es, Effekte von Veränderungen in den ozeanischen und atmosphärischen physikalischen Variablen durch das Nahrungsnetz zu verfolgen und ermöglichen weitergehenden Untersuchungen zu Entwicklung und Management von Fischbeständen.

Die gekoppelten Ökosystemmodelle werden allgemein verfügbar gemacht und in die Distribution des Modellsystems FMS (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA) aufgenommen. Es steht damit als ein Standardökosystemmodell für Randmeere zur Verfügung.

Eine kurz- und mittelfristige wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse stand bei der Konzeption des TP2 nicht im Vordergrund der Erwägungen und ist derzeit nicht erkennbar.

#### *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten*

Das GENUS-Konsortium vertritt alle relevanten Disziplinen und Ressourcen, die zur erfolgreichen Durchführung des Projekts nötig waren. Die Mitglieder des Konsortiums und insbesondere des TP2 haben seit Jahren in eigenen Projekten (NAMIBGAS, Undercurrent) eine enge Kooperationen mit regionalen Wissenschaftsorganisationen in Namibia und Südafrika (NATMIRC, MC; BENEFIT) aufgebaut. Diese – zum Teil disziplinären – Vorarbeiten haben die wissenschaftliche Grundlage für unsere Hypothesen gelegt und die ausgezeichnete Kooperation der an GENUS beteiligten Gruppen begründet.

Die durchgeführten Expeditionen haben gezeigt, dass alle schiffsgebundenen Messmethoden wie erwartet eingesetzt werden konnten. Die gewonnenen Daten waren zur Erreichung der Projektziele ausreichend. Ein Antrag auf zwei Folgeexpeditionen mit der FS Merian für das Jahr 2013 und 2014 wurden positiv begutachtet und bewilligt.

Wesentliche Teile der geplanten Modellrechnungen konnten am HLRN-II durchgeführt werden. Leider war die Maschine für drei Monate nur partiell verfügbar, so dass es zu Rechenzeitengpässen kam. Außerdem kam es durch den Totalausfall eines Filesystems zu Datenverlusten, so dass insbesondere Rechnungen mit den REMO-Antrieben wiederholt werden mussten. Das war innerhalb der Projektlaufzeit möglich, die neuen Experimente wurden gleichzeitig mit verbesserten Ökosystemparametern durchgeführt.

Die Modellrechnungen haben konsistente Datensätze von atmosphärischen Antrieben, Stromfeldern und Wasserinhaltsstoffen sowie den Stoffflüssen durch die trophischen Ebenen des Ökosystems erzeugt, die gegenwärtig weiter analysiert werden. Der Vergleich von Modellergebnissen und Feldmessungen zeigt für hydrographische Variable eine gute Übereinstimmung.

Die hydrographischen Messungen auf dem Schelf vor Walvis Bay ergeben in Kombination mit bereits vorhandenen Messdaten einen Datensatz von einmaliger Qualität. Damit wird erstmals eine Trennung von kurzzeitiger Variabilität und Langzeitveränderungen in der Wassermassenzusammensetzung und dem Sauerstoffhaushalt auf dem namibischen Schelf möglich. Die ebenfalls gemessene Variabilität der Vertikalmigration des Zooplanktons kann als Folge variabler Umweltparameter wie veränderte Sauerstoffverhältnisse in Abhängigkeit von lokalen und entfernten Antrieben verstanden werden.

### *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Das Gesamtvorhaben GENUS ordnet sich in die Forschung zum Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, im Bereich „System Erde: Forschung zum Klimawandel“ ein. Durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde leistet es einen innovativen Beitrag zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels.

Das Projekt GENUS ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER- Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten. GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungs Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen deutsche Wissenschaftler des ZMT, IOW und der Universität Bremen in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren. Zur Fortsetzung und Intensivierung der Zusammenarbeit beteiligten sich die Wissenschaftler des TP2 an der Fortführung der erfolgreichen BENEFIT-Aktivitäten zum Aufbau meereswissenschaftlicher Expertise (Capacity Building) bei jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Region. Die Kooperation mit Partnern aus Südafrika erfolgte durch GENUS-flankierende Aktivitäten dortiger Forschungseinrichtungen, durch gemeinsame Expeditionen und durch Teilnahme der Kooperationspartner aus Südafrika an den GENUS-workshops.

Die wissenschaftlichen Arbeiten des TP2 haben unmittelbare Relevanz für die Abschätzung der klimatisch bedingten Schwankungsbreite von Zirkulationsmustern und Stoffflüssen in einem wichtigen Auftriebsgebiet. Die Untersuchungen der Beziehungen zwischen klimatischem Antrieb, Ozeanzirkulation, biogeochemischen Stoffflüssen sowie ihrer vergangenen Veränderungen als Folge Klimawandels hat direkte Relevanz für Projektionen der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung auf dem Schelf und im angrenzenden Ozean.

Es wird erwartet, dass durch die Weiterentwicklung der Ökosystemmodelle in der zweiten Phase des Projektes ein Allgemeinheitsgrad und prognostische Kapazität erreicht wird, die eine Übertragung des Modellsystems auf ähnlich Auftriebsgebiete vor Nordafrika bzw. Südamerika ermöglicht. Im Verlauf der ersten Projektphase wurden wissenschaftliche Manuskripte erstellt, die zur Veröffentlichung in der internationalen Fachliteratur eingereicht wurden bzw. noch eingereicht werden.

Die wesentlichen Ergebnisse des TP2 wurden auf der ASLO „Ocean Science“ Konferenz in Salt Lake City einer breiten internationalen Wissenschaftlergemeinschaft und der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt. Dabei konnten Kontakte zu anderen Gruppen geknüpft werden die die weitere Arbeit in der zweiten Projektphase von GENUS befördern werden.

Die im Rahmen von GENUS entwickelte Version des Ökosystemmodells ERGOM wird in die Distribution des Modellsystems FMS (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA) aufgenommen und steht damit als ein Standardmodell für Randmeere zur Verfügung.

Im Rahmen des Deutsch – Südafrikanischen Jahres der Wissenschaft werden die Projektergebnisse vor einem internationalen wissenschaftlichen Publikum in der Region im Rahmen eines Workshops dargestellt.

### *Schutzrechtsanmeldungen*

Es sind keine Schutzrechtsanmeldungen für das TP2 am IOW geplant.

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

Es bisher nicht gelungen, das Ozeanmodell auch mit Atmosphärendaten, die mit dem regionalen Modell REMO berechnet wurden, so anzutreiben, dass ausreichend Auftrieb vor Namibia erzeugt wird. Daher wurde auf längerfristige Simulationen mit REMO-Antrieben zugunsten einer detaillierteren Entwicklung des Ökosystemmodells verzichtet. Eine Analyse der REMO-Daten gemeinsam mit gemessenen Windfeldern zeigt keine signifikanten Defizite, die als Ursache in Frage kommen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung genauer Winddaten für realistische Simulationen der Ostrandströme. An einer Lösung des Problems wird daher gemeinsam von CSC und IOW weiterhin gearbeitet.

### III.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

*Ausgewählte Modellergebnisse sind auf dem LAS-Server [phy-51.io-warnemuende.de/las](http://phy-51.io-warnemuende.de/las) allgemein verfügbar. Wesentliche Daten aus den hydrographischen Messungen sind in PANGAEA gespeichert.*

### III.6. die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.

Die ursprüngliche Ausgaben und Zeitplanung wurde eingehalten.

### Literatur:

- Armstrong, D. A., Mitchell-Innes, B. A., Verheye-Dua, F., Waldron, H. Hutchings, L., 1987: Physical and biological features across an upwelling front in the southern Benguela. In: A. I. L. Payne, J. A. Gulland and K. H. Brink (eds.): *The Benguela and Comparable Ecosystems*. S. Afr. J. Mar. Sci., 5: 171-190.
- Brown, P. C., Painting, S. J. and Cochrane, K. L. 1991: Estimates of phytoplankton and bacterial biomass and production in the northern and southern Benguela ecosystems. S. Afr. J. mar. Sci. 11: 537-564.
- Capone, D.G., Burns, J.A., Montoya, J.P., Subramaniam, A., Mahaffey, C., Gunderson, T., Michaels, A.F., Carpenter, E.J., 2005. Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp.: An important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic Ocean. *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB2024.
- Carpenter, E.J., Capone, D.G., 1992. Nitrogen fixation in *Trichodesmium* blooms. In: Carpenter, E.J., Capone, D.G., Rueter, J. (Eds.), *Marine pelagic cyanobacteria: Trichodesmium and other diazotrophs*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 211-217.
- Domenico, Ben, John Caron, Ethan Davis, Robb Kambic, Stefano Nativi, 2002. Thematic Real-time Environmental Distributed Data Services (THREDDS): Incorporating Interactive Analysis Tools into NSDL. *ournal of Digital Information*, Vol 2, No 4 (2002)
- Fennel, W., Junker, T., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2011, Response of the Benguela Upwelling Systems to spatial variations in the wind stress, ICES CM 2011/E: 04, available online: <http://www.ices.dk/products/CMdocs/CM-2011/E/E0411.pdf>
- Fennel, W., Junker, T., Schmidt, M., Mohrholz, V., 2012, Response of the Benguela Upwelling Systems to spatial variations in the wind stress, CSR (submitted).
- Hewes, C.D., Sakshaug, E., Reid, F.M.H., Holm-Hansen, O., 1990. Microbial autotrophic and heterotrophic eucaryotes in Antarctic waters: relationships between biomass and chlorophyll, adenosine triphosphate and particulate matter. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 63, 27-35.
- Herzfeld, M., M. Schmidt, S.M. Griffies, Z. Liang, 2011. Realistic test cases for limited area ocean modeling. *Ocean Modelling*, 37, Issues 1–2, 2011, page 1–34.
- Lass, H.U. and Mohrholz, V., 2008. On the interaction between the subtropical gyre and the Subtropical Cell on the shelf of the SE Atlantic. *J. Mar. Sys.* 74: 1-49
- Mohr, W., Großkopf, T., Wallace, D.W.R., LaRoche, J., 2010. Methodological Underestimation of Oceanic Nitrogen Fixation Rates. *PLoS ONE* 5, e12538.

- Montoya, J.P., Voss, M., Kähler, P., Capone, D.G., 1996. A simple, high-precision, high-sensitivity tracer assay for N<sub>2</sub> fixation. *Appl. Environm. Microbiol.* 62, 986-993.
- Pitcher, G.C., 1988. Mesoscale heterogeneities of the phytoplankton distribution in St. Helena Bay, South Africa, following an upwelling event. *South African J. Mar. Sci.* 7, 9-23.
- Pitcher G. C., Boyd A. J., Horstman D. A. Mitchell-Innes B. A., 1998: Subsurface dinoflagellate populations, frontal blooms and the formation of red tide in the southern Benguela upwelling system. *Mar Ecol Prog Ser*, 172, 253-264.
- Pitcher G. C., Walker D. R., Mitchell-Innes B. A. Moloney C. L., 1991: Short-term variability during an anchor station study in the southern Benguela upwelling system: Phytoplankton dynamics, *Prog. Oceanogr.*, 28, 39-64.
- Schmidt M., Mohrholz, V., Schmidt T., John, H.-Ch., Weinreben, S., Diesterheft, H., Iita, A., Filipe, V., Sangolay, B.-B., Kreiner A., Hashongoo, V., da Silva Neto, D., 2000. Data report of R/V „Poseidon“ cruise 250, ANDEX 1999. Marine Science Reports No. 40. Institut für Ostseeforschung Warnemünde.
- Silulwane, N. F., Richardson, A. J., Shillington, F. A. and Mitchell-Innes, B. A. 2001: Identification and classification of vertical chlorophyll patterns in the Benguela upwelling system and Angola-Benguela front using an artificial neural network. *S. Afr. J. mar. Sci.* 23, 37-51.
- Walker D. R. Peterson W. T., 1991: Relationships between hydrography, phytoplankton production, biomass, cell size and species composition, and copepod production in the southern Benguela upwelling system in April 1988., *S. Afr. J mar. Sci.*, 11, 289-305.
- Wasmund, N., Voss, M., Lochte, K., 2001. Evidence of nitrogen fixation by non-heterocystous cyanobacteria in the Baltic Sea and re-calculation of a budget of nitrogen fixation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 214, 1-14.
- Wasmund N., Lass H.-U. and Nausch G., 2005: Distribution of nutrients, chlorophyll and phytoplankton primary production in relation to hydrographic structures bordering the Benguela-Angolan frontal region. *African J. Marine Science*, 27, 177-190.
- Zehr J. P., Waterbury J. B., Turner P. J., Montoya J. P., Omoregie, E., Steward G. F., Hansen, A., Karl D. M., 2001: Unicellular cyanobacteria fix N<sub>2</sub> in the subtropical North Pacific Ocean., *Nature* 412, 635-638.

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 3**

## Schlussbericht GENUS Teilprojekt 3

### Regulierung der Nährstoffversorgung und Rekonstruktion vergangener Stoffkreisläufe im Schelf-Ökosystem mittels geochemischer und isotopengeochemischer Proxies

Förderkennzeichen: 03F0497A

Projektlaufzeit: 01.03.2009 - 30.04.2012

Kay-Christian Emeis und Niko Lahajnar

Institut für Biogeochemie und Meereschemie, Universität Hamburg  
Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

## I. Kurzdarstellung

### I.1. Aufgabenstellung

Küstenauftrieb düngt den Auftriebsschelf und den angrenzenden mesopelagischen Ozean mit Nährstoffen und facht mit diesen Nährstoffen die biologische „soft tissue“ Pumpe für CO<sub>2</sub> über den unmittelbaren Auftriebsschelf hinaus an. Allerdings moduliert der Redox-Zustand des Auftriebswassers die Effektivität der Nährstoff-Remineralisierung und ist eine erstrangige Steuergröße im Kreislauf von reaktivem Stickstoff (Nitrifizierung versus Denitrifizierung/Anammox), in der Sequestrierung von organischem Kohlenstoff in sowie der Freisetzung von P aus Sedimenten. Alle diese Prozesse ändern die Nährstoffverhältnisse und wirken sich auf die Produktivitätsleistung (und das CO<sub>2</sub>-Sequestrierungspotential) und die Ökosystemstrukturen aus. Redox-Zustände in Folge veränderter physikalischer Zirkulationsmuster und O<sub>2</sub>-Gehalte in Wassermassen auf dem Schelf stellen also die zentrale Weiche, die den Kurs biogeochemischer Zyklen und Ökosysteme in Auftriebssystemen bestimmt. Das Küstenauftriebsgebiet vor Namibia ist besonders variabel in seinem Redoxzustand und bietet außergewöhnlich gute Bedingungen, um die biogeochemischen und ökosystemaren Folgen veränderter Sauerstoffversorgung zu skalieren und auf Änderungen im physikalischen Antrieb zurückzuführen. Daraus ergeben sich die übergeordneten Ziele im GENUS Teilprojekt 3.

Im Einzelnen sollten während der Feldexperimente die synoptischen Muster der Sauerstoff- und Nährstoffkonzentrationen sowie ihrer stöchiometrischen Verhältnisse im Auftriebsgebiet vor Namibia aufgenommen werden. Weiterhin wurden auch Messungen über die Denitrifikation/Anammox und N<sub>2</sub>-Fixierung (in Zusammenarbeit mit TP-2 Phytoplankton) in den Isotopenverhältnissen des gelösten anorganischen Stickstoffs im Wasser und Porenwasser durchgeführt, die zur Erfassung des Beitrags vom gelösten organischen Stickstoff zum N-Zyklus im Küstenauftriebsgebiet beitragen sollten. In diesem Zusammenhang wurde auch Beziehung zwischen den Isotopenverhältnissen  $\delta^{15}\text{N}$  in DIN, Chlorophyll-Abbauprodukten, Schwebstoffen und Sedimenten untersucht. In Kooperation mit TP-4 Biogeochemie sollten auch die CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Gehalte im Benguela Schelfgebiet bestimmt werden. Alle Ergebnisse waren integraler Bestandteil für die Validierung der Modellergebnisse in TP-1 und TP-2.

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

Das Teilprojekt 3 ist Bestandteil des BMBF Verbundprojekts GENUS. Das Gesamtvorhaben GENUS zielt auf einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. Es soll einen Beitrag

zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde leisten. Das GENUS-Projekt ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als *Endorsed Project* und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten. GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungsk Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen deutsche Wissenschaftler des ZMT, IOW und der Universität Bremen in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren.

Die Ergebnisse von TP-3 dienen dem grundlegenden Verständnis von biogeochemischen Stoffflüssen in vom Auftrieb beeinflussten Schelfgebieten und den daran angrenzenden Meeresregionen. Sie helfen bei der Beantwortung der von IMBER postulierten Kernfragen der Interaktion von biogeochemischen Zyklen mit marinen Organismen, die Einfluss auf die gesamte marine Ökosystemstruktur haben. Die Ausrichtung von TP-3 und GENUS insgesamt unterstützt die zentralen Ziele von IMBER bei der Entwicklung eines zukunftsgerichteten Verständnisses, wie biogeochemische Zyklen und damit nachfolgend ganze Ökosysteme auf komplexe physikalische Einflüsse wie großräumige Klimaveränderungen oder Änderung des Windantriebs, auf Kohlenstoff- und Nährstoffflüsse oder anthropogene Einflüsse wie Fischereiwirtschaft reagieren.

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

Das Projekt GENUS profitierte von den bereits zugrundeliegenden und teilweise sehr intensiven Forschungsaktivitäten im Benguela Auftriebsgebiet sowie den Zusammenarbeiten der Wissenschaftler aus den Teilprojekten mit Partnern aus der Region vor dem eigentlichen Beginn im Frühjahr 2009. So konnte beispielsweise auf die langjährige Erfahrung von dem Projektkoordinator Prof. K.-C. Emeis (IfBM Hamburg) zurückgegriffen werden, der bereits zahlreiche Forschungsvorhaben (u.a. NAMIBGAS) vor Namibia durchgeführt hatte (Meteor 48/2, AHAB-5, Meteor 76-2).

Mit Beginn von GENUS wurde der Projektwissenschaftler Dr. Niko Lahajnar eingestellt (TP-3 und TP-0). Während der Projektlaufzeit standen drei große Schiffsexpeditionen im Benguela-Auftriebsgebiet im Zentrum der Forschungsaktivitäten: FRS Africana (Dezember 2009, Fahrleitung W. Ekau), RRS Discovery (September/Oktobre 2010, Fahrleitung: F. Buchholz) und FS Maria S. Merian (Januar-März 2011, Fahrleitung N. Lahajnar). Die Bearbeitung und analytischen Messungen der Probenätze sind zum großen Teil abgeschlossen und flossen / fließen in Beiträge zu nationalen / internationalen Tagungen sowie in geplante und bereits veröffentlichte Publikationen. Neben der Bereitstellung für ein internationales Fachpublikum wurde ein öffentlichkeitswirksamer und mehr auf die Allgemeinheit ausgerichteter Video-Podcast in Zusammenarbeit mit TP-0 und dem Multimedia Kontor Hamburg erstellt: (<http://genus.mmkh.de/2012/05/03/der-stickstoffkreislauf-im-benguela-auftriebsgebiet>)

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

Die Klimaveränderung stellt ein Schlüsselphänomen des durch menschliche Aktivitäten verursachten globalen Umweltwandels dar, mit deren Folgen und Herausforderungen

Wissenschaft und Gesellschaft gegenwärtig konfrontiert werden (IPCC-Report 2007a, b). Damit verbunden sind gravierende Veränderungen der globalen und regionalen Stoffflüsse im Ozean. Das Schicksal verschiedener Stoffgruppen hängt nach dem jetzigen Stand des Wissens von vertikalen sowie lateralen Stoffflüssen organischen Materials in marinen Ökosystemen ab. Schelfmeer- und Küstenökosysteme, insbesondere die großen Auftriebsgebiete vor den Kontinenten, haben sich als besonders sensibel gegenüber Klima- und Stoffflussänderungen und zunehmender menschlicher Nutzung erwiesen. Der Auftrieb versorgt den Schelf und die angrenzenden Gebiete mit einer Vielzahl an Nährstoffen und bildet damit die Grundlage für eine reichhaltige Primärproduktion. Allerdings moduliert der Redox-Zustand des Auftriebswassers die Effektivität der Nährstoff-Remineralisierung und ist eine erstrangige Steuergröße im Kreislauf von reaktivem Stickstoff, in der Sequestrierung von organischem Kohlenstoff in sowie der Freisetzung von Phosphor aus Sedimenten. Alle diese Prozesse ändern die Nährstoffverhältnisse und wirken sich auf die Produktivitätsleistung und damit auf die Ökosystemstrukturen aus. Redox-Zustände in Folge veränderter physikalischer Zirkulationsmuster und O<sub>2</sub>-Gehalte in Wassermassen auf dem Schelf stellen also die zentrale Weiche, die den Kurs biogeochemischer Zyklen und Ökosysteme in Auftriebssystemen bestimmt. Eine zentrale Fragestellung sind dabei die vergleichsweise niedrigen N:P-Verhältnisse, die nach Stand der Forschung von Prozessen auf dem Schelf gesteuert werden, die wiederum alle mit sehr variablen Sauerstoffgehalten dort zusammen hängen. Als mögliche Erklärung dienen die Regeneration von Nährstoffen aus Schelfsedimenten (Nitrifizierung und Phosphatfreisetzung; Bailey, 1991) sowie Denitrifizierung (Tyrrell und Lucas, 2002) und die anaerobe Oxidation von Ammonium (Anammox; Kuypers et al., 2005). Die Nährstoffverhältnisse und das Nährstoffangebot insgesamt haben wiederum direkten Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf („biologische Pumpe“ - siehe TP-4 Biogeochemie).

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

GENUS ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) des IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungsk Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen GENUS-Wissenschaftler in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, INIP Angola) beteiligt waren und sind. Einen besonderen Stellenwert nahm das NatMIRC in Namibia ein, mit deren Wissenschaftlern (u.a. Anja v.d. Plas, Anja Kreiner, Bronwen Currie) und Stipendiaten Forschungsaktivitäten während der Projektlaufzeit, auch insbesondere während der Schiffsexpeditionen, gemeinsam durchgeführt wurden. Weiterhin gibt es enge Absprachen mit dem Projekt NASCLIM, ein von Norwegen finanziertes NORAD-Projekt. Das FONA-Rahmenprogramm (Forschung für Nachhaltige Entwicklungen) des BMBF (BMBF, 2010) identifiziert das südliche Afrika als eine Schlüsselregion im Forschungsbereich Erdsystem und Geotechnologien. Das Rahmenprogramm wird durch die SPACES-Initiative (Science Partnerships for the Assessment of Complex Earth System Processes) umgesetzt, welche wissenschaftliche Aktivitäten im Spannungsfeld Land-Meer-Kopplung initiieren will und zur Ausbildung von wissenschaftlichen Kapazitäten zur nachhaltigen Entwicklung in der Region beitragen möchte. Als erstes Projekt unter dem SPACES Schirm hat GENUS seit 2009 die FONA-Direktiven in einem Forschungsprogramm zur Interaktion von Klima mit marinen Ökosystemen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet umgesetzt.

## II. Eingehende Darstellung

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

Die Fördermittel wurden dem Antrag entsprechend verwendet. Mithilfe der bewilligten Zuwendungen konnten erfolgreiche Beprobungskampagnen auf den GENUS-Schiffsexpeditionen (2009-2011) durchgeführt werden. Insbesondere eine synoptische Aufnahme der Nährstoff- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sowie deren Rahmenparameter an der Wasseroberfläche mit fast 90.000 durchgeführten Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten und die Einspeisung aller Daten in das Pangaea-Datenarchiv stellt eine wichtige Arbeitsgrundlage für verschiedene Arbeitsgruppen im Benguela-Auftriebsgebiet dar.

Im TP-3 (Biogeochemie) wurden Wasserproben der Fahrt METEOR 76-2 und der Projektfahrten AFRICANA 258, DISCOVERY 356 und MARIA S. MERIAN 17/3 auf Nährstoffgehalte und Nitratisotope untersucht. Alle Fahrten wurden mit einer FerryBox begleitet, sodass physikalische, chemische und biologische Zustandsgrößen der Oberflächenwasser lückenlos erfasst werden konnten. Auf den Fahrten AFRICANA 258 und MARIA S. MERIAN 17/3 wurden zudem Sedimentproben mit Multicorern genommen.

1) *Erstellung einer synoptischen Aufnahme der Nährstoffverhältnisse in Bezug auf die vorherrschenden Sauerstoffbedingungen im Benguela-Auftriebsgebiet (Expeditionen Meteor 76-2, Mai - Jun. 2008; Africana AF-258, Dez. 2009; Discovery D-356, Sep. - Okt. 2010, und Maria S. Merian, Jan.- Mrz. 2011)*

Für die Messungen der Datensätze wurde ein automatisches on-line Durchfluss-Messsystem (FerryBox) eingesetzt, das die physikalischen und chemischen Parameter in ca. 5 m Wassertiefe während der durchgeführten Expeditionen aufgenommen hat (Abb. 1 und 2). Insgesamt wurden mit der FerryBox zwischen den Jahren 2007 bis 2011 über 100.000 Messungen durchgeführt und ermöglichen dadurch eine großräumig saisonale und interannuelle Erfassung der Nährstoffverhältnisse im Arbeitsgebiet (Abb. 1 a-d). Die Oberflächendaten zeigen eine zum Teil sehr heterogene Verteilung der Nährstoffe (Nitrat, Phosphat, Silikat) sowie der physikalischen Parameter. Tendenziell und je nach Intensität des Küstenauftriebs sind die Nährstoffkonzentrationen an der Küste am höchsten, wo kaltes, sauerstoffarmes und CO<sub>2</sub>- sowie nährstoffreiches Wasser an die Oberfläche transportiert wird. Die Ausprägung zwischen den einzelnen Expeditionen variiert dabei signifikant in Hinblick auf Gehalt und räumliche Ausdehnung. Mit der vorhandenen Technik konnten ebenfalls kleinskalige und räumlich relativ scharf abgetrennte Wirbel bzw. Filamente und lokale, jahreszeitlich spezifische Ereignisse wie die Auftriebszellen vor Lüderitz, in der Walvis Bay Region oder vor der Kunene-Mündung erfasst werden. Die *in situ* gemessenen Daten bestätigen die aus den Satellitenaufnahmen erkannte kleinskalige Variabilität der Wassermassen abgeleitet von der unterschiedlichen Oberflächentemperatur (SST). Diese lokalen Phänomene treten zeitlich wie räumlich sehr variabel im gesamten Arbeitsgebiet auf und sind mit der herkömmlichen instrumentellen Beprobung mittels klassischer CTD/Rosetten-Einsätze flächenmäßig nicht zu erfassen gewesen. Des Weiteren dienen die aufgenommenen Datensätze als Grundlage für statistische Indizes für unterschiedliche Wassermassen und deren unterschiedlichen biogeochemischen Zusammensetzung in Hinblick auf die Nährstoffverhältnisse (Abb. 2)

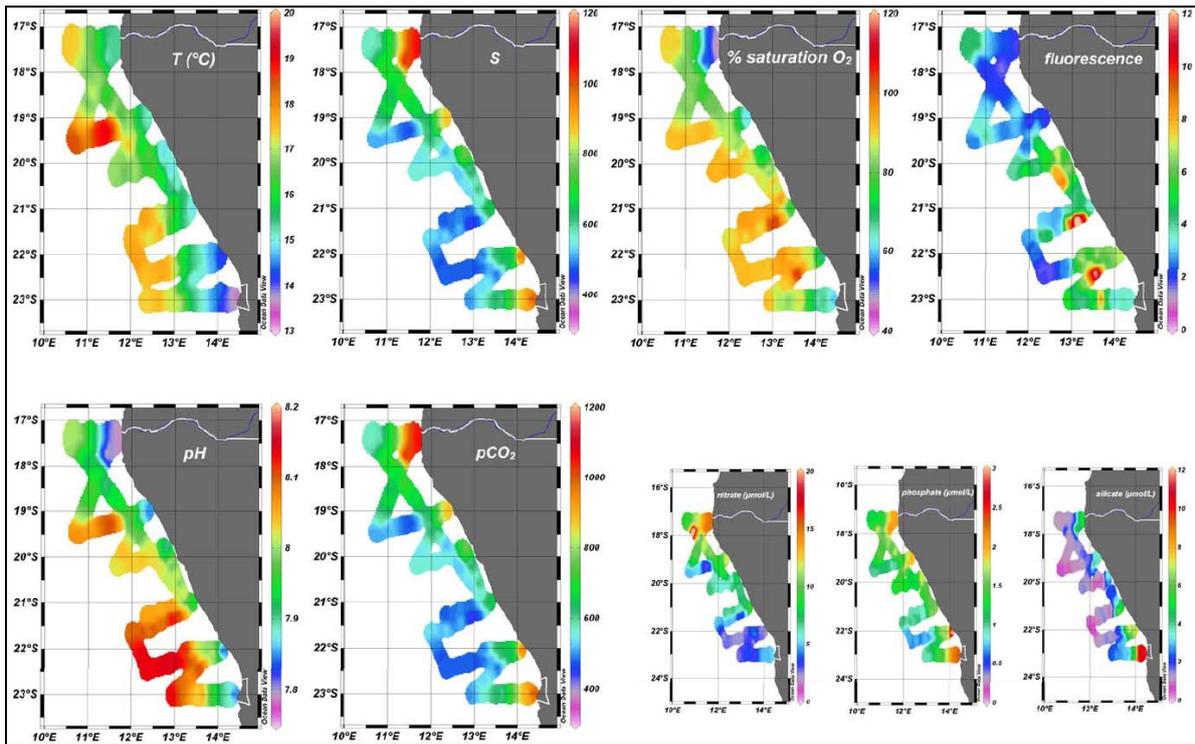


Abb. 1a: FerryBox Messungen aufgenommen auf der Fahrtroute von *Meteor 76/2* (Mai - Juni 2008) in 5 m Wassertiefe.

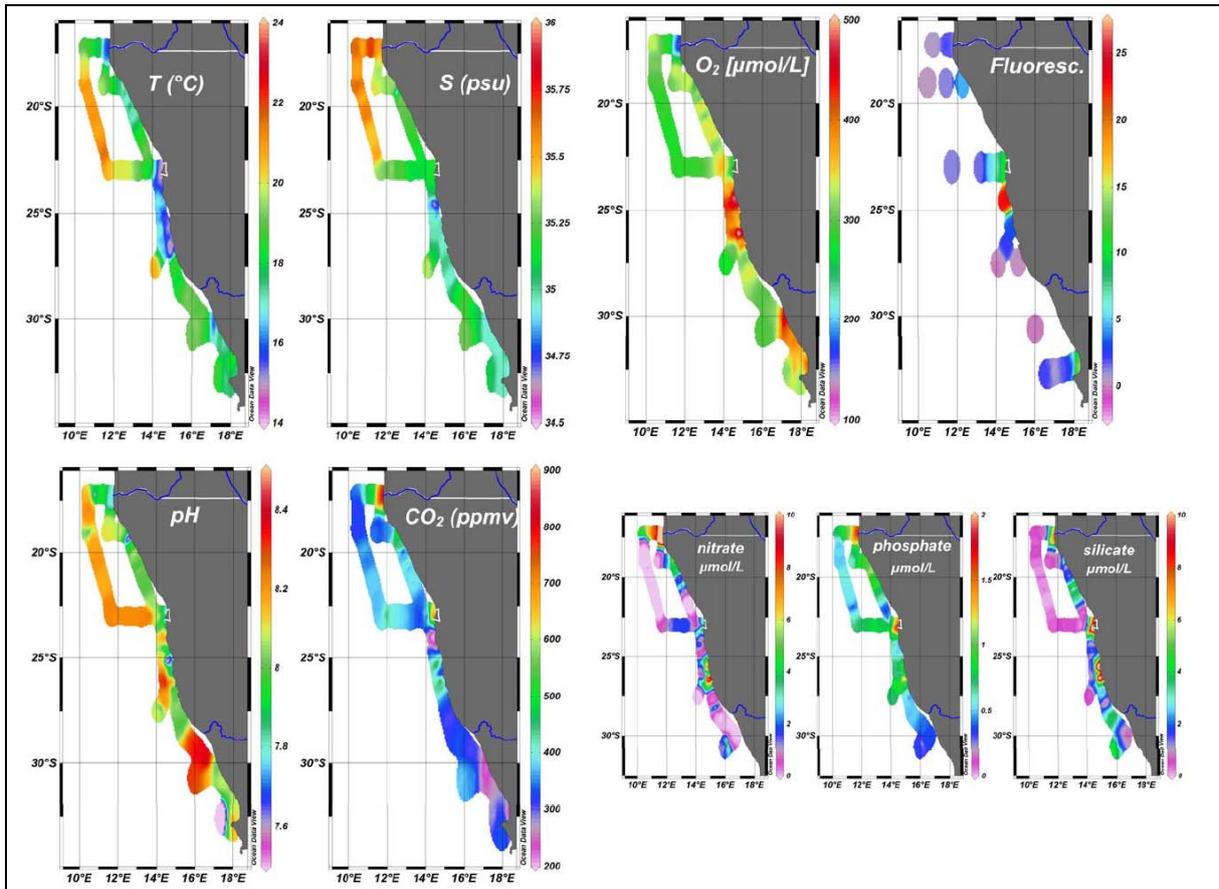


Abb. 1b: FerryBox Messungen aufgenommen auf der Fahrtroute von *Africana 258* (Dezember 2009) in 5 m Wassertiefe.

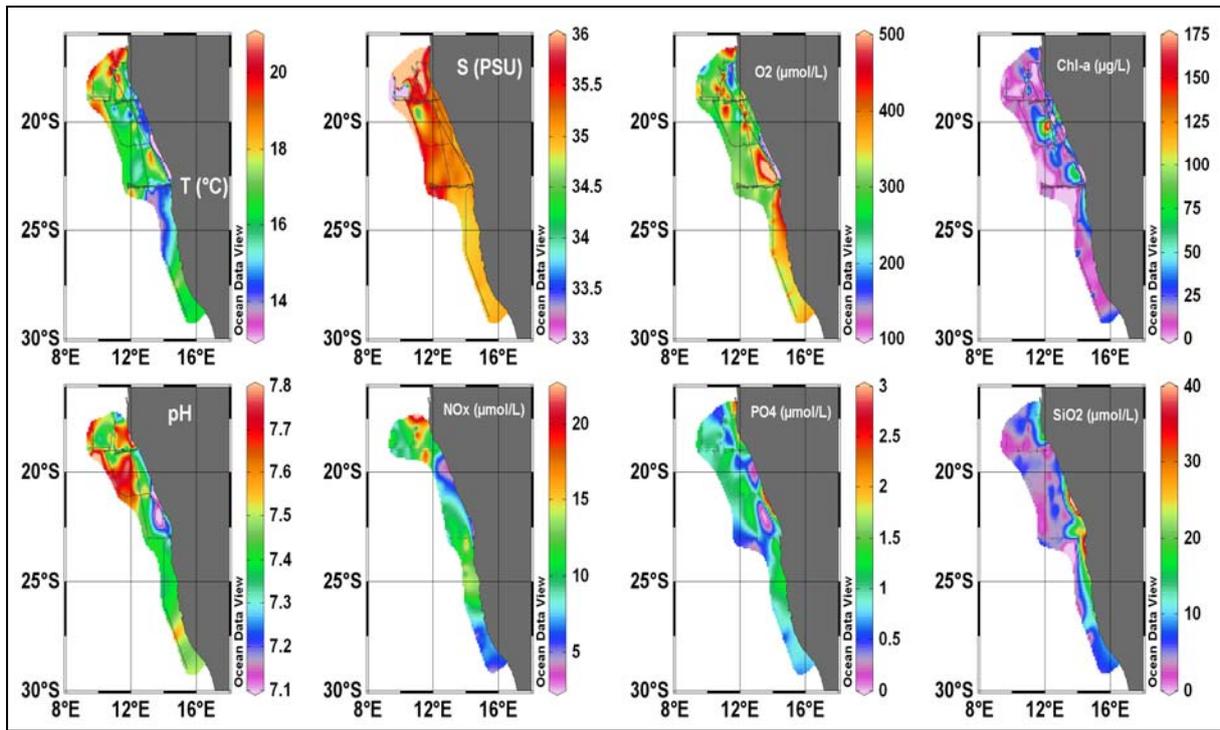


Abb. 1c: FerryBox Messungen aufgenommen auf der Fahrtroute von *Discovery 356* (September - Oktober 2010) in 5 m Wassertiefe.

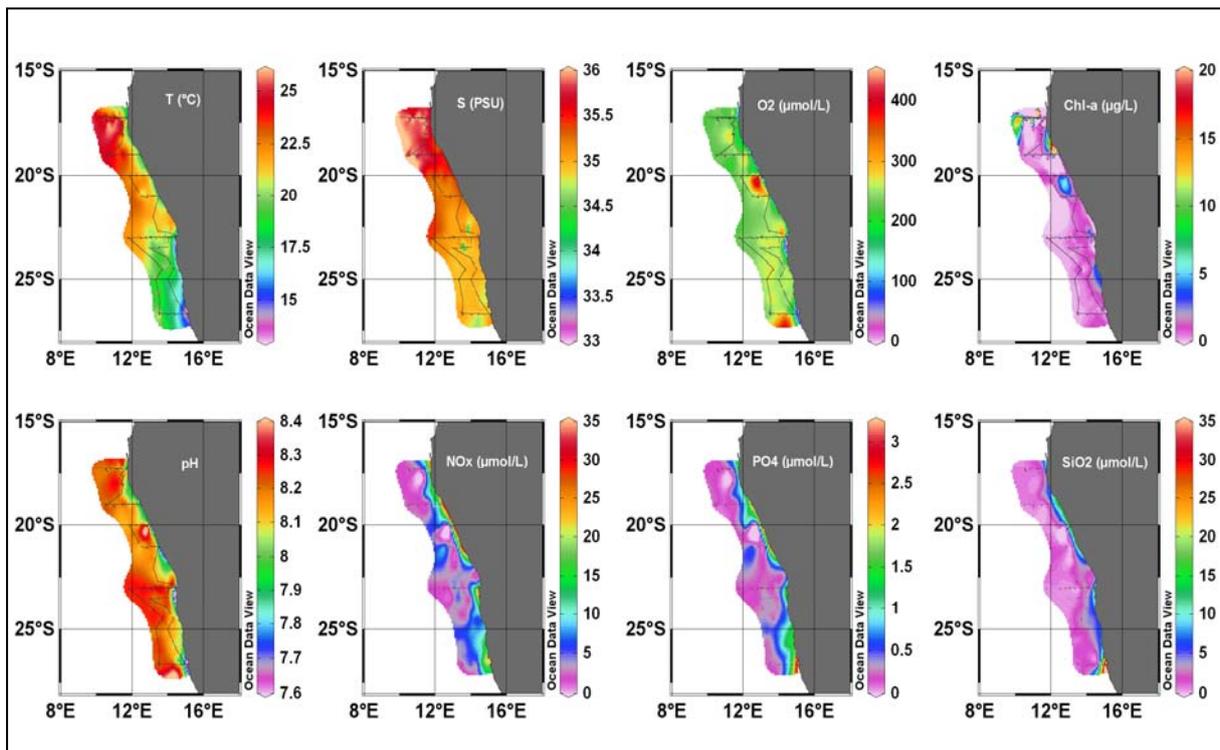


Abb. 1d: FerryBox Messungen aufgenommen auf der Fahrtroute von *Maria S. Merian 17/3* (Januar - März 2011) in 5 m Wassertiefe.

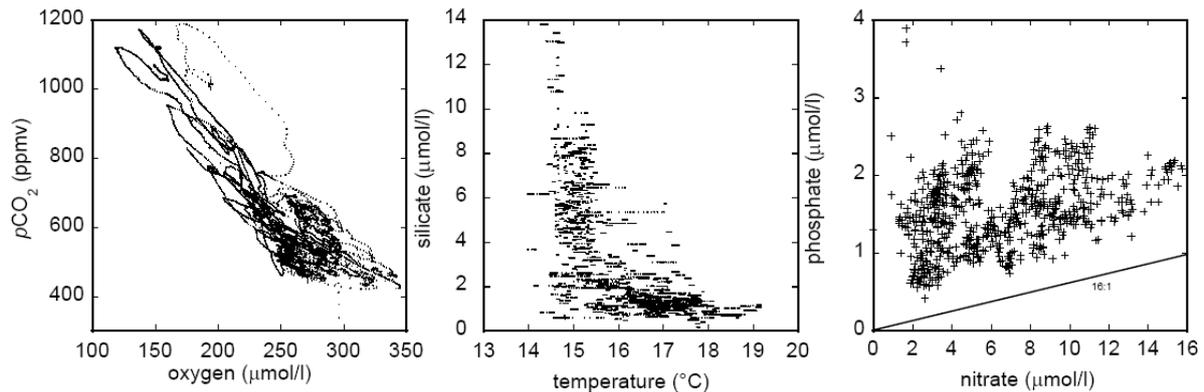
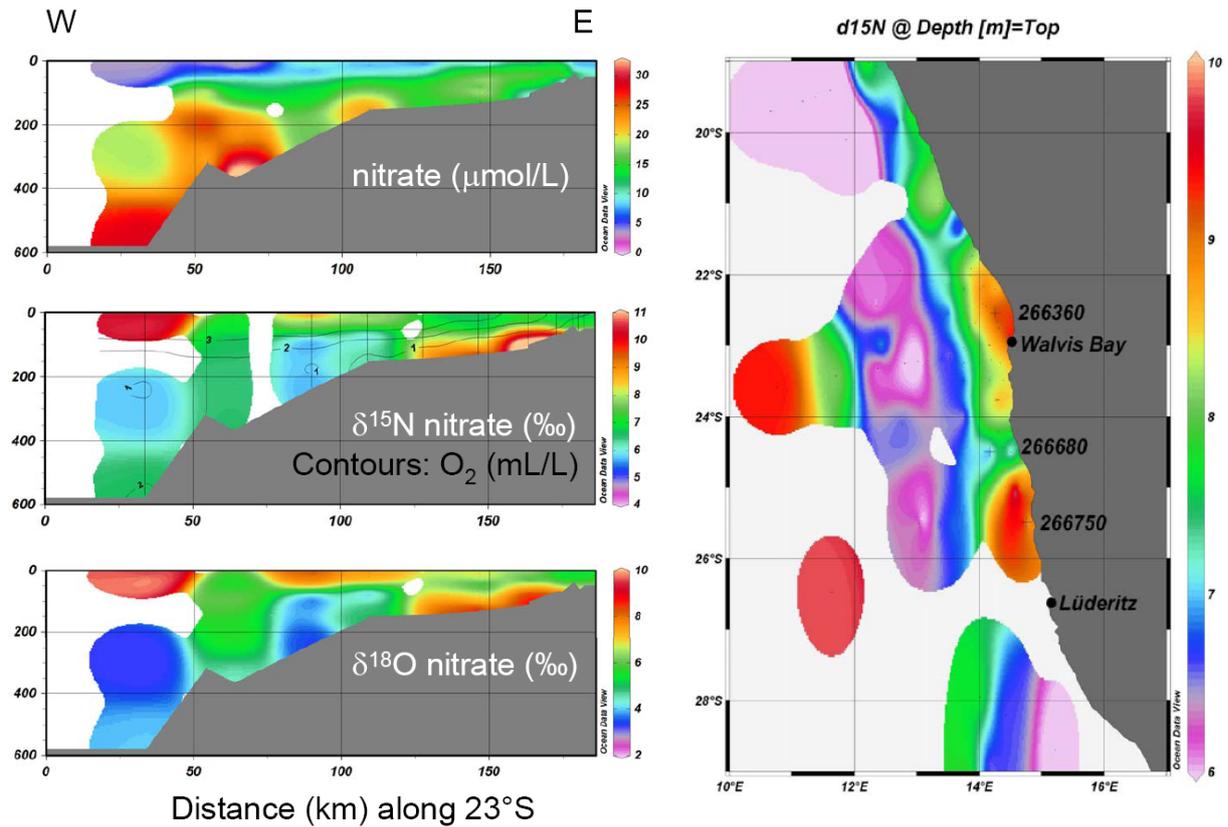


Abb. 2: Ausgewählte Beziehungen von Wassereigenschaften gemessen mit der FerryBox auf M 76/2. Links: Wie erwartet korreliert  $p\text{CO}_2$  stark negativ mit dem Sauerstoffgehalt im Oberflächenwasser. Mitte: Die Silikatkonzentration im Oberflächenwasser nimmt mit zunehmender Erwärmung des Auftriebswassers und dem Aufkommen von Diatomeen-Blüten in der Auftriebsfahne ab. Rechts: Der Nitrat-Verlust (oder Phosphat-Zuwachs) führt zu einem deutlichem Nitrat-Defizit verglichen zum klassischen Redfield-Verhältnis von 16:1 (molar) im Oberflächenwasser.

## 2) Nachweis und Quantifizierung von Denitrifikations- und Nitrifikationsprozessen anhand der isotopischen Zusammensetzung von gelöstem Nitrat und Ammonium sowie gelöstem organischen Stickstoff

Proben aus den CTD-Einsätzen (*bottle samples*) der Expeditionen M 76/2, AF-258, D-356 und MSM 17/3 wurden auf Nährstoffkonzentration und Isotopenzusammensetzung ( $\delta^{15}\text{N}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  des Nitrats mittels *Denitrifyer* Methode) gemessen. Aus den Ergebnissen lässt sich der Rückschluss ziehen, dass die aus der Angola Dome Region stammende Wassermasse SACW in einem polwärtigen Unterstrom entlang der Schelfkante strömt und maßgeblich die  $\delta^{15}\text{N}$  Signatur des Nitrats auf dem äußeren Schelf bzw. oberen Kontinentalhang beeinflusst. Offensichtlich findet in den suboxischen Wassermassen des Angola Domes keine Denitrifizierung statt, da sich die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Nitrats um ca. 5‰ bzw. die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte unter 3‰ liegen (Abb. 3). Das vom polwärtigen Unterstrom transportierte und durch den Auftrieb advektierte Nitrat scheint für eine ungewöhnliche und teilweise rätselhafte Isotopensignatur in den Oberflächensedimenten auf dem oberen Schelf verantwortlich zu sein. Unsere Daten lassen den Schluss zu, dass das vom Auftrieb an der Schelfkante (*shelf-break upwelling*) eingetragene Nitrat, gekennzeichnet durch eine relativ niedrige  $^{15}\text{N}$ -Signatur, zügig assimiliert wird und dadurch einen Gürtel mit geringen  $\delta^{15}\text{N}$ -Gehalten an der Schelfkante bewirkt. Dieser Gürtel zieht sich von Angola bis zum südlichen Teil der namibischen Küste fort (siehe Abb. 4). Auf dem Schelf selbst, insbesondere in den Regionen um Walvis Bay und nördlich von Lüderitz, führen die Wassermassen mit geringen Sauerstoffgehalten zu einer erhöhten Denitrifikation, die wiederum einen deutlichen Anstieg der Isotopensignaturen im Nitrat ( $\delta^{15}\text{N}$  und  $\delta^{18}\text{O}$ ) zur Folge hat. Die genauen Mechanismen werden zurzeit in einer Doktorarbeit von Frau B. Nagel an der Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Küstenforschung des HZG untersucht.



Distance (km) along 23°S

Abb. 3a: Ost-West-Verteilung der Nitrat-Isotope entlang 23° S. Es sind deutlich die hohen Nitratkonzentrationen im Bereich des polwärtigen Unterstroms (~350 m Wassertiefe) zu erkennen. Der Isotopenwert dieses Nitrats lässt auf keine bzw. nur geringe Denitrifikationsprozesse schließen, obwohl die Sauerstoffkonzentrationen im Zentrum des polwärtigen Unterstroms sehr gering sind. Im Bereich der Sediment-Wasser-Grenze und den darüberliegenden tiefen Wasserschichten auf dem Schelf (Wassertiefen < 200 m) führen Denitrifikationsprozesse unter geringen Sauerstoffbedingungen zu erhöhten  $\delta^{15}\text{N}$ - bzw.  $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Nitrat.

Abb. 3b:  $\delta^{15}\text{N}$  in Oberflächensedimenten (Emeis et al., 2009; Nagel et al., in prep.).  $^{15}\text{N}$  ist in suboxischen / anoxischen Sedimenten auf dem Schelf aufgrund von Denitrifikationsprozessen in der Wassersäule angereichert. Ab der Schelfkante seewärts zeigen die Sedimente deutlich geringere  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte, vermutlich durch die Aufnahme des isotopisch leichten Nitrats aus dem polwärtigen Unterstrom, das an der Schelfkante aufgetrieben wird.

3) Quantifizierung und Einfluss von trophischen und diagenetischen Effekten auf den Stickstoffkreislauf abgeleitet anhand von gelösten Stickstoffkonzentrationen und  $\delta^{15}\text{N}$ -Indizes in Nährstoffen, Schwebstoffen und Oberflächensedimenten mit dem Ziel,  $\delta^{15}\text{N}$ -Signaturen als Anzeiger für Denitrifikationsprozesse in der sedimentologischen Vergangenheit besser anwenden zu können

Unsere Studien im hochdynamischen Benguela Auftriebsgebiet haben gezeigt, dass die Nährstoffverteilung und Sauerstoffbedingungen sehr variabel sind. Es deuten alle Anzeichen darauf hin, dass die Denitrifikationsprozesse, also der Verbrauch von gelöstem anorganischem Stickstoff in Teilen des Schelfs mehr als eine Potenz größer ist als der Ausgleich durch Stickstofffixierung von diazotrophen Algen in der photischen Zone. Das Ungleichgewicht zwischen N-Verlust und N-Zufuhr ist ein Hinweis darauf, dass die Prozesse räumlich voneinander entkoppelt sind und teilweise zu einer deutlichen Abweichung vom klassischen N:P Redfield-Verhältnis führen. Arbeiten des TP-3 haben in diesem Zusammenhang zum ersten Mal eine gekoppelte Isotopenanalyse am Nitrat ( $\delta^{15}\text{N}$  und  $\delta^{18}\text{O}$ ) im Benguela Auftriebsgebiet durchgeführt (Abb. 4a). Dabei zeigt sich, dass innerhalb der Sauerstoffminimum-Zone (OMZ) das Stickstoffdefizit sowohl durch verstärkte Denitrifikation als auch durch gleichzeitige Abgabe von Phosphat aus dem Sediment ausgelöst wird. Dabei reichert sich - ebenso wie durch den Abbau von organischem Material - Ammonium in der OMZ an und wird durch den Auftrieb in den Küstenbereich transportiert. Dieses isotopisch schwere Ammonium wird bei der Produktion von organischem Material in der photischen Zone eingebaut und führt zu einer positiven Abweichung der  $\delta^{15}\text{N}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte - der sogenannten  $\Delta(15,18)$  Anomalie - auf dem inneren Schelf (Abb. 4b).

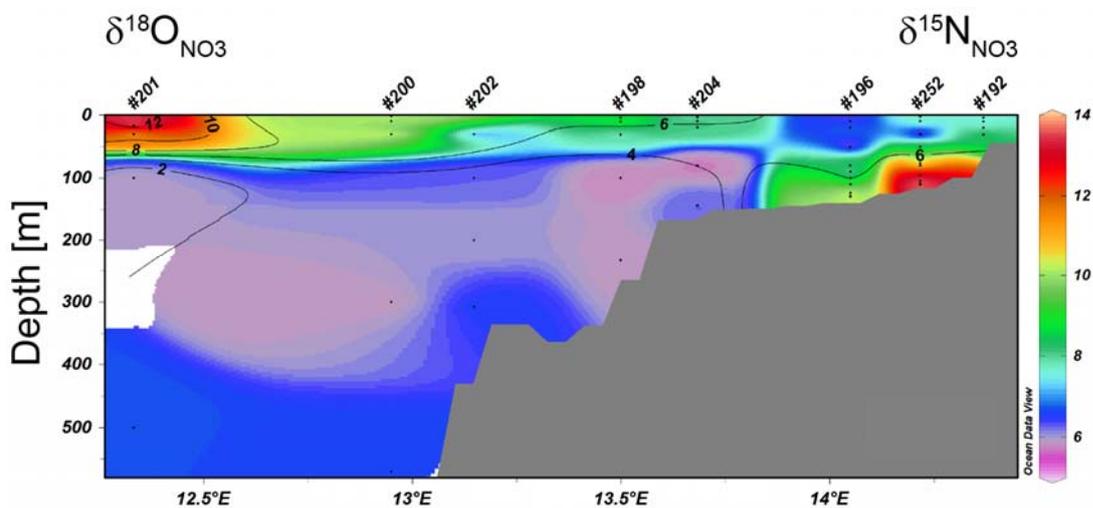


Abb. 4a: Verteilung der Isotopenzusammensetzungen ( $\delta^{15}\text{N}$  und  $\delta^{18}\text{O}$ ) des Nitrats auf dem namibischen Schelf entlang des Transekts 23°S (Nagel et al., eingereicht).

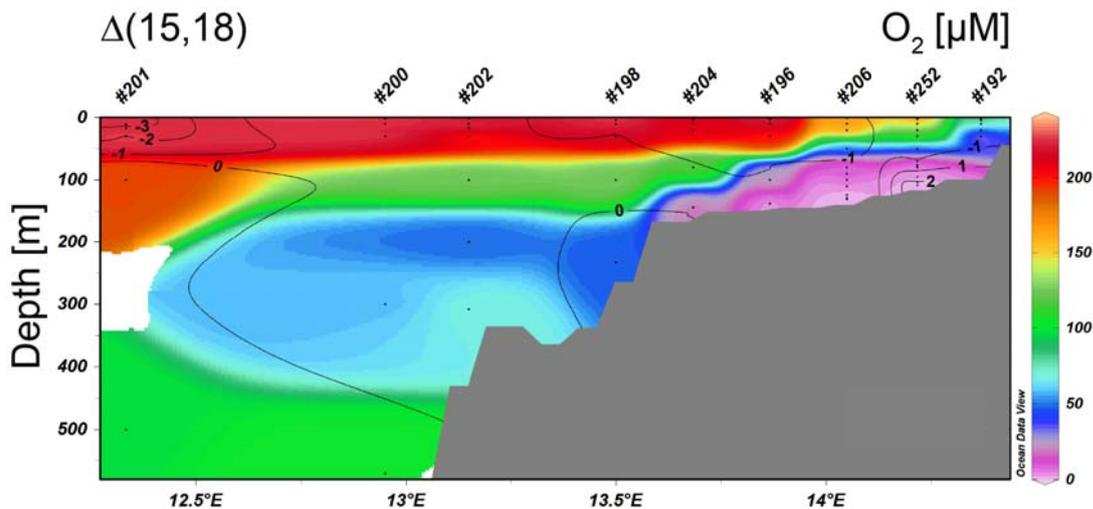


Abb. 4b: Positive  $\Delta(15,18)$  Anomalie im Nitrat in Abhängigkeit zur niedrigen Sauerstoffkonzentration auf dem inneren Schelf entlang des Transekts 23°S (Nagel et al., eingereicht).

Um die Bedeutung der Sedimente für den Stickstoffkreislauf näher zu beleuchten, wurde die benthische Remineralisierung von organischem Material entlang der namibischen Küste untersucht. Dazu wurden an 36 Stationen ungestörte Kerne des Oberflächensedimentes mit einem Multicorer aus 30 – 3.000 m Wassertiefe gewonnen und die Konzentrationsgradienten von Sauerstoff,  $N_2$  und den Nährstoffen Nitrat, Ammonium und Phosphat gemessen. Die Konzentrationen von Sauerstoff wurden mittels Mikro-Optode gemessen, für die Messung der  $N_2$ -Konzentrationen wurde die Membraneinlass-Massenspektrometrie (MIMS) mit miniaturisierter Membransonde verwendet (Hartnett & Seitzinger 2003). Die  $N_2$ -Messungen wurden zusätzlich durch Isotope-Pairing Inkubationen (Risgaard-Petersen et al. 2003) kontrolliert. Zur Ermittlung der Nährstoffkonzentrationen wurde Porenwasser mittels Rhizonen entnommen und später im Labor analysiert. Die so erhaltenen Konzentrationsprofile wurden genutzt, um mittels eines Transport-Reaktions-Modells (Berg et al., 1998) die diffusiven Flüsse und Umsatzraten im Oberflächensediment zu ermitteln.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Freisetzung von Ammonium und Phosphat aus dem Sediment exponentiell mit der Wassertemperatur ansteigt und die höchsten Werte im inneren Mudbelt erreicht werden (Abb. 5a,b). Unter hypoxischen Bedingungen wird zusätzliches Phosphat mobilisiert und verstärkt ins Bodenwasser abgegeben. Bei hohen Sauerstoffkonzentrationen im Bodenwasser wird dagegen die Freisetzung von Ammonium durch gekoppelte Nitrifikation-Denitrifikation limitiert. Die benthische  $N_2$ -Produktion speist sich zusätzlich durch Nitrat aus dem Bodenwasser, deren Intensität dadurch von der Nitratkonzentration im Bodenwasser abhängt (Abb. 5c). Deshalb ist die benthische Nitrataufnahme aus der Wassersäule dort am intensivsten, wo nitratreiches Antarktisches Zwischenwasser (AAIW) das Sediment erreicht. Als wesentliche Stickstoffquelle der  $N_2$ -Produktion erscheint der Prozess von gekoppelter Nitrifikation-Denitrifikation, sodass die  $N_2$ -Produktion gut mit der Sauerstoffaufnahme des Sedimentes einhergeht (Abb. 5d).

Zusammengefasst kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass durch Denitrifikation das N:P-Verhältnis im Bodenwasser reduziert wird. Zusätzliche Freisetzung von gespeichertem Phosphat in hypoxischem Bodenwasser verschärft das scheinbare Stickstoffdefizit des auftriebenden Wassers.

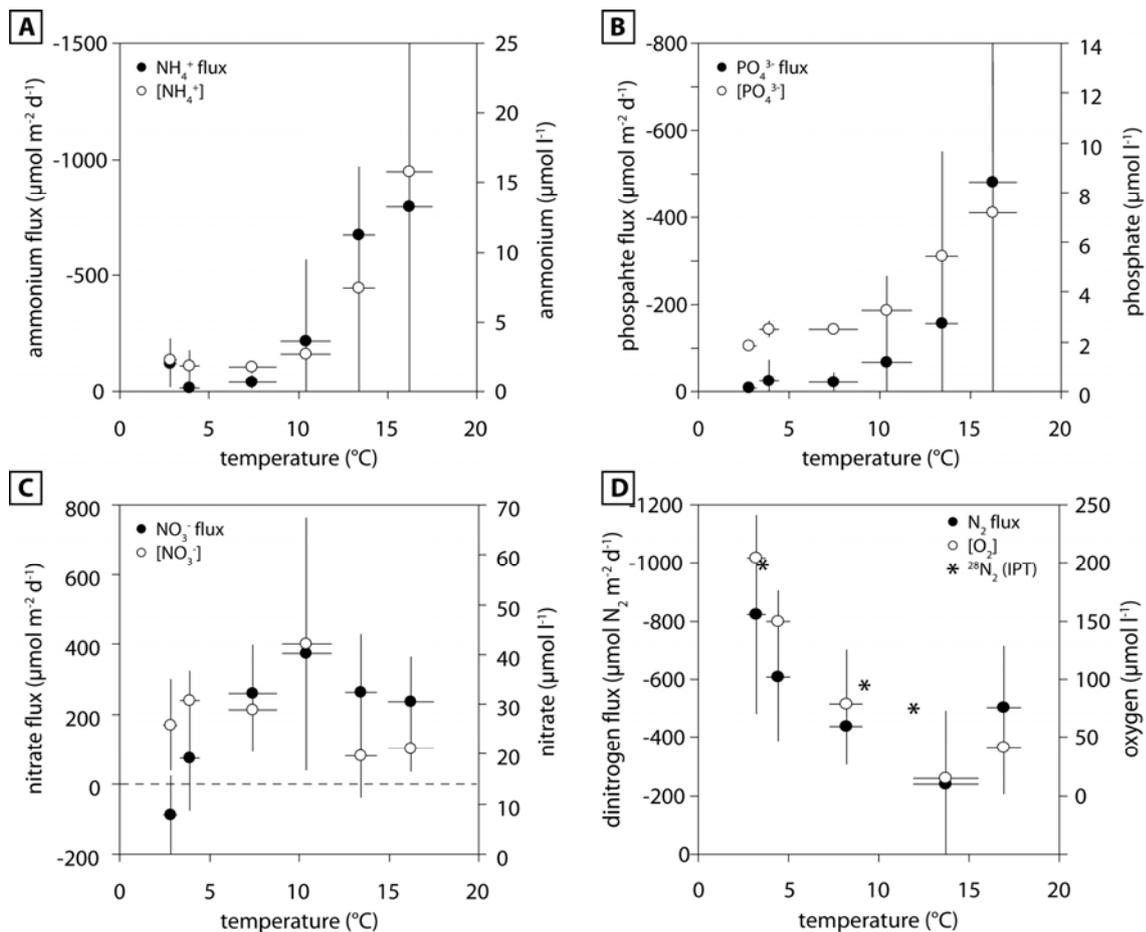


Abb. 5: Mittlere Bodenwasserkonzentrationen und diffusive Flüsse ( $n = 6$ ) von Ammonium (A), Phosphat (B), Nitrat (C),  $\text{N}_2$  (D) und Sauerstoff (D). Negative Flüsse zeigen Freisetzung aus dem Sediment in die Wassersäule, positive Flüsse zeigen Aufnahme ins Sediment. Fehlerbalken zeigen einfache Standardabweichung der Mittelwerte.

#### 4) Quantifizierung von $\text{pCO}_2$ auf dem namibischen Schelf

Auf den Fahrten M 76/2 und AF-258 wurde ein automatisches  $\text{pCO}_2$ -Messsystem an die installierte FerryBox angeschlossen, um den  $\text{CO}_2$ -Gehalt an der Meeresoberfläche (5 m Wassertiefe) kontinuierlich und flächenmäßig zu erfassen. Die Qualität der Messungen konnte während M76/2 nicht durch validierte und kalibrierte Kontrollmessungen bestätigt werden. Auf AF-258 hingegen wurde von TP-4 ein SUNDANS  $\text{CO}_2$ -Messgerät mit kalibrierten Kontrollgasen parallel eingesetzt und somit eine qualitative Abschätzung der FerryBox-Daten ermöglicht. Es zeigte sich, dass die Messungen - versehen mit einem Korrekturfaktor - eine Korrelation von  $r^2=0,94$  aufweisen und somit gut vergleichbar sind (Abb. 6). Dementsprechend ist auch der Vergleich der Feldmessungen zwischen Mai 2008 und Dez. 2009 hinreichend aussagekräftig. Gebiete vor Walvis Bay bzw. der Kunene-Mündung weisen  $\text{pCO}_2$ -Konzentrationen von mehr als 1000 ppmv auf - ein Wertebereich, der zunächst angezweifelt wurde, sich aber auf den folgenden Fahrten wiederholt bestätigt wurde. Insgesamt waren die  $\text{CO}_2$ -Gehalte im Mai 2008 an der Oberfläche deutlich höher als im Dezember 2009 (Abb. 7). In beiden Messzeiträumen agiert jedoch das nördliche Benguela-Auftriebsgebiet (zwischen Lüderitz und Kunene) als starke  $\text{CO}_2$ -Quelle und hebt sich damit deutlich vom südlichen Benguela-Gebiet ab ( $\text{CO}_2$ -Senke, siehe auch TP-4 Biogeochemie).

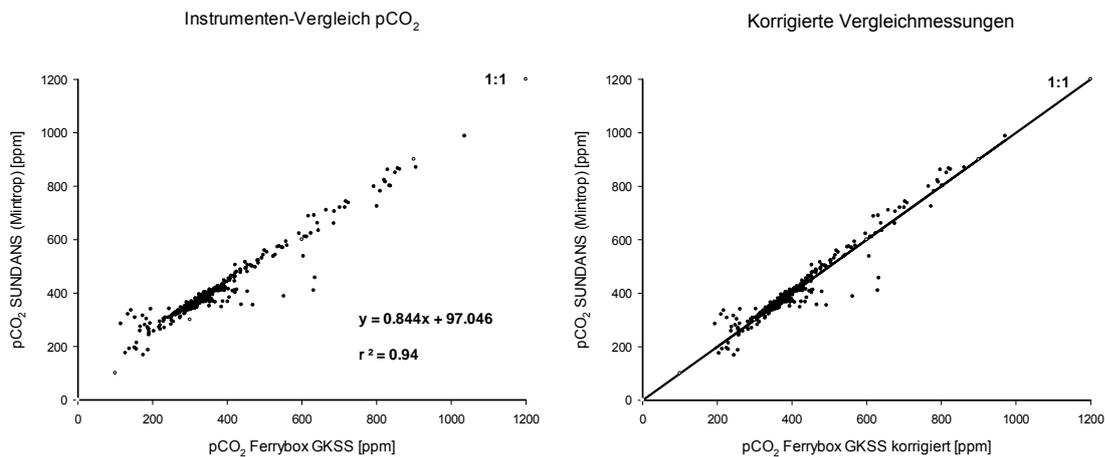


Abb. 6: Vergleichsmessungen von CO<sub>2</sub> zwischen den Methoden SUNDANS CO<sub>2</sub>-Messgerät (Teilprojekt 4) und FerryBox Systema (Teilprojekt 3). Die linke Abbildung stellt die tatsächliche Korrelation dar, bei der rechten Abbildung wurden die Daten der FerryBox mit einem Korrekturfaktor versehen, der bei zukünftigen Messungen einfließt.

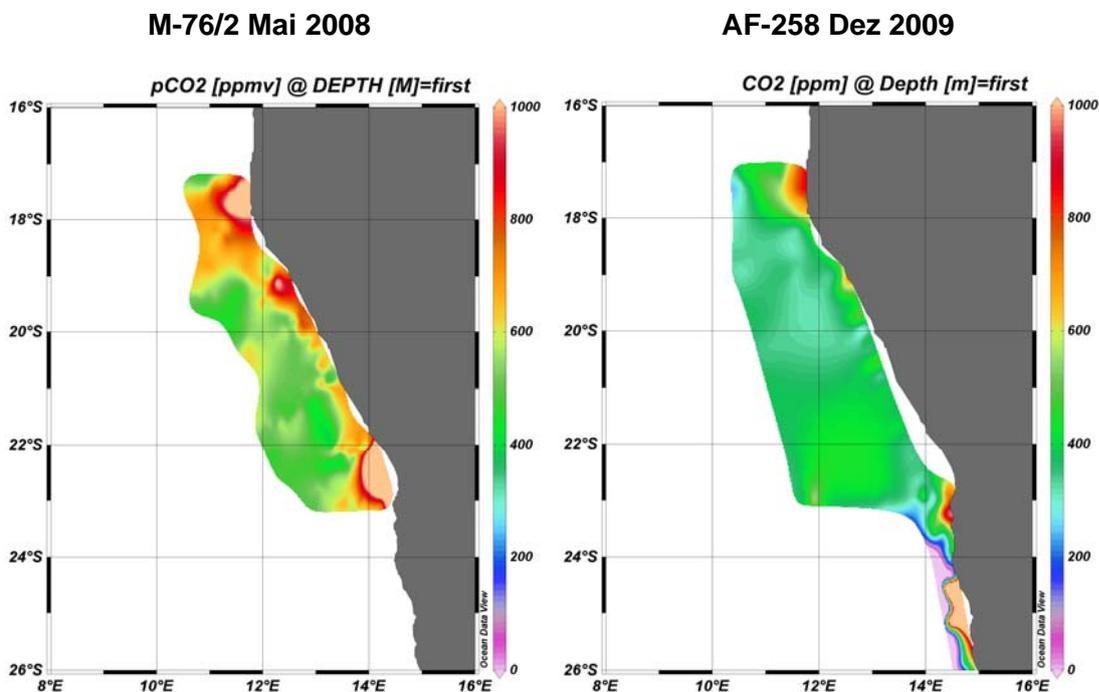


Abb. 7: Synoptische Aufnahme der pCO<sub>2</sub>-Konzentrationen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet. Im Mai 2008 agieren große Teile des erfassten Gebietes als CO<sub>2</sub>-Quelle, wohingegen im Dezember 2009 nur die Küstenbereiche um Kunene und der Küstenabschnitt südlich 23°S als deutliche CO<sub>2</sub>-Quelle hervortritt.

#### Referenzen:

- Berg P, Risgaard-Petersen, N., Rysgaard, S. (1998): Interpretation of measured concentration profiles in sediment pore water. *Limnology and Oceanography* 43 (7), 1500-1510.
- Hartnett H. E., Seitzinger, S.P. (2003): High-resolution nitrogen gas profiles in sediment porewaters using a new membrane probe for membrane-inlet mass spectrometry. *Marine Chemistry* 83, 23–30.
- Kuypers, M.M.M., Lavik, G., Woebken, D., Schmid, M., Fuchs, B.M., Amann, R., Jörgensen, B.B., Jetten, M.S.M. (2005): Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through ammonium oxidation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 6478-6483.

Risgaard-Petersen N., Nielsen, L.P., Rysgaard, S., Dalsgaard, T., Meyer, R.L. (2003): Application of the isotope pairing technique in sediments where anammox and denitrification coexist. *Limnology and Oceanography: Methods* 1, 63–73.

Tyrell, T., Lucas, M.I. (2002): Geochemical evidence of denitrification in the Benguela upwelling System. *Continental Shelf Research*, 22, 2497-2511.

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

Wichtigste Position im Finanzplan waren die Personalkosten (TV-L E13Ü, Dr. Lahajnar). Alle Positionen wurden entsprechend der Bewilligung verwendet.

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

Alle Arbeiten wurden entsprechend der wissenschaftlichen Zielsetzung des Teilprojekts 3 eingesetzt und waren notwendig wie angemessen, um die Projektziele zu erreichen.

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

Das Gesamtvorhaben GENUS zielt auf einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. Es soll einen Beitrag zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) leisten durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde. Das GENUS-Projekt ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als „Affiliated Project“ und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten. Eine wirtschaftliche Zielsetzung stand bei der Planung und Durchführung des Teilprojekts 3 nicht im Fokus der Arbeiten und sind nach derzeitigem Stand auch nicht zu erwarten.

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

Es sind keine Arbeiten oder Ergebnisse bekannt, die mit dem Projekt GENUS konkurrieren oder die einen entscheidenden Einfluss auf die Durchführbarkeit der Projektarbeit gehabt haben. Ständige Literaturrecherchen sichern den neuesten Kenntnisstand ab.

## **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Annhöfer, M. (2012): Phosphat- und Ammoniumaustausch zwischen dem Porenwasser des Schelfsediments und der Wassersäule im Benguela Auftriebsgebiet. Masterarbeit, Universität Hamburg, 76 S.

Kaiser, C. (2011): Verteilung von Kohlenstoff und Stickstoff in Oberflächensedimenten im Benguela Auftriebsgebiet vor Namibia. Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 34 S.

- Koppelman, R., Kullmann, B., Lahajnar, N., Martin, B., Mohrholz, V. (2012). Onshore-offshore distribution of Thecosomata (Gastropoda) off Namibia and their stable carbon and nitrogen isotopic composition. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* (accepted).
- Martens, P. (2011): Verteilung von partikulärem Material (Suspension) im Benguela Auftriebsgebiet vor Namibia unter besonderer Berücksichtigung der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte. Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 43 S.
- Meisel, S., Struck, U., Emeis, K.-C. (2011): Nutrient regime and upwelling in the northern Benguela since the middle Holocene in a global context - a multi-proxy approach. *Fossil Record* 14, 153-169.
- Meisel, S., Struck, U., Emeis, K.-C., Kristen, I. (2011): Nutrient dynamics and oceanographic features in the central Namibian upwelling region as reflected in delta N-15-signals of suspended matter and surface sediments. *Fossil Record* 14, 171-193.
- Nagel, B., Emeis, K.-C., Flohr, A., Rixen, T., Schlarbaum, T., Mohrholz, V., van der Plas, A. (2012). N-Cycling and Balancing of the N-Deficit Generated in the Oxygen-Minimum Zone over the Namibian Shelf – an Isotope-based Approach. *Journal of Geophysical Research* (eingereicht).
- Neumann, A. (2012): Benthic elimination of reactive nitrogen: Application of membrane inlet mass spectrometry. Ph.D.-Thesis, University of Hamburg, 130 pp.
- Neumann, A., Lahajnar, N., Emeis, K.-C. (in prep.): Remineralisation continental shelf and slope sediments off Namibia. *Continental Shelf Research*.
- Rixen, T., Flohr, A., van der Plas, A., Lahajnar, N., Emeis, K.-C. (2012): Spatial and temporal variations of pCO<sub>2</sub> in coastal waters off SW Africa. (ready for submission)

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 4**

## Schlussbericht GENUS Teilprojekt 4

Werner Ekau (TP-4Bio) und Tim Rixen (TP4-Biogeο)

Mit Beiträgen von Andreas Kunzmann, Anita Flohr und Simon Geist

<i>Zuwendungsempfänger:</i> Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie (ZMT) GmbH Fahrenheitstr. 6 28359 Bremen	<i>Förderkennzeichen:</i> <b>03F0497D</b>
<i>Vorhabenbezeichnung:</i> Verbundprojekt : <b>GENUS - Teilprojekt 4</b> Die Auswirkungen von klimabedingten Umweltveränderungen auf die biologische Pumpe, die CO <sub>2</sub> Emission und die biologischen Prozesse in den oberen trophischen Ebenen.	
<i>Laufzeit des Vorhabens:</i>	01.03.2009 - 30.04.2012
<i>Berichtszeitraum:</i>	01.03.2009 - 30.04.2012

**Das Teilprojekt 4 umfasste zwei sehr unterschiedliche Aufgabenfelder aus den Bereichen Biogeochemie und Fischereibiologie. Daher werden besonders die fachlich-inhaltlichen Teile des Berichts separat dargestellt.**

### **Teilprojekt 4 - Biologie**

#### *1.1 Aufgabenstellung*

Als Beitrag zur Gesamtfragestellung der Stoffflüsse im pelagischen Ökosystem des Benguela-Auftriebsgebietes und der Auswirkung von klimatischer Variabilität auf die Systemkomponenten und Prozesse lag beim Teilprojekt 4-Biologie der Schwerpunkt auf der quantitativen Erfassung der Schlüsselarten des Ichthyoplanktons und ihrer Stellung im Nahrungsnetz. Dazu sollte eine Abschätzung der Konsumptionsraten der Schlüsselarten und ihrer Bedeutung für die Energieflüsse im System durchgeführt werden. Über ihre Wachstumsleistungen sollte die Produktionsleistung der Schlüsselarten quantifiziert werden. Um die Organismen im Modellsystem (TP2) hinlänglich darstellen zu können, müssen ihr Transferleistungen in den Energie- und Stoffwechselflüssen abgeschätzt werden. Dazu waren Experimente zu Sauerstoffverbrauch (Ruhe- und Aktivitätsstoffwechsel) und Aktivität sowie erste Messungen zur Ermittlung der unteren Sauerstofftoleranzwerte geplant.

#### *1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde*

Das ZMT ist seit 1997 in die Arbeiten im Benguela-Auftriebssystem eingebunden und nimmt seit 1999 aktiv an den Forschungs- und Ausbildungsinitiativen in der Region im Rahmen des Forschungsprogramms BENEFIT (Benguela Environment and Fisheries Interaction and Training) teil, schwerpunktmäßig zur Verbreitung und Rolle des Ichthyoplanktons in der Region (Auel et al. 2005; Ekau and Verheye 2005; Ekau et al. 2001; Grote et al. 2007; Kreiner et al. 2008; Loick et al. 2005; Verheye and Ekau 2005; Verheye et al. 2005). Seit 2001 gab es drei bilaterale, vom BMBF über IB-DLR finanzierte Kooperationsprojekte, in denen allerdings keine Personalkosten enthalten waren. Die Kooperationsaktivitäten waren daher sehr eingeschränkt, haben aber zu einer guten und langjährigen Zusammenarbeit mit Partnern aus Namibia, Südafrika und Angola geführt, die den Arbeiten in GENUS zu gute kamen.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Zusammenarbeit wurden in Sonderbänden des South African Journal of Science 2001 und des African Journal of Marine

Science 2005 veröffentlicht. Durch diese Zusammenarbeit waren wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Bearbeitung der Fragestellung gewährleistet.

### *1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens*

Wesentliche Vorarbeiten für das Projekt konnten während einer Fahrt mit FS Maria S. Merian im Februar 2008 geleistet werden. Die Fahrt stand in einer Reihe mit Forschungsfahrten in die Region mit den Schiffen Africana (1999, 2002), Alexander von Humboldt (2004) und Dr. Frithjof Nansen (2007). Während der Fahrt konnten Proben für die Beschreibung der horizontalen und vertikalen Verbreitung von Entwicklungsstadien der Fische gesammelt werden, die als Einstieg in erste Modellläufe von Bedeutung waren. Außerdem konnten auf dieser Fahrt erste Experimente mit Fischlarven durchgeführt und dadurch wichtige Erfahrungen für eine erfolgreiche Hälterung der Tiere gesammelt werden.

Im November 2009 hielten sich A. Kunzmann und S. Geist (Doktorand) in Kapstadt auf, um mit frischem Material Experimente zur Sauerstoffaufnahme von Holzmakrelen durchzuführen. Die Experimente sollten im Experimentier- und Aquarien-Gebäude von MCM (Marine and Coastal Management, heute DEA) in Seapoint stattfinden, da dort eine gute Infrastruktur vorzufinden ist. Die Fänge von Lebendmaterial sollten während Routinefahrten von FFS Africana und mit Hilfe von kleinen, von der Küste aus einzusetzenden Booten durchgeführt werden. Obwohl der Zeitpunkt des Aufenthalts aufgrund der Erfahrungen der Partner vor Ort geplant war, konnte das Material nicht in gewünschter Menge besorgt werden. Der Aufenthalt ergab aber wichtige Erfahrungswerte für den Aufbau und die Durchführung von Experimenten mit den Zielorganismen. Sowohl von der Größe als auch von der Lebensweise der Zielarten her gibt es wenig bis gar keine Erfahrung im Bereich Sauerstoffverbrauchsmessungen. Hier war eine Menge an experimenteller Erfahrung zu sammeln.

Während der ersten Expedition innerhalb des Zeitraumes von GENUS, einer Fahrt mit dem gecharterten südafrikanischen Fischereiforschungsschiff Africana im Dezember 2009, sollte vor allem das gesamte Größenspektrum der Zielfischarten besammelt werden. Während dieser Fahrt konnten sowohl Jugendstadien mit diversen Planktonnetzen als auch adulte Exemplare mit pelagischen und Bodenschleppnetz gesammelt werden. Dieses Material bildete die Grundlage für die mit dem Teilprojekt verbundenen Doktorarbeiten von Simon Geist (Jugendstadien), Beau Tjizoo (Namibia, Holzmakrele und Quallen) und Nadine Moroff (Namibia, Sardine). Die aus diesen Arbeiten ebenfalls möglichen Produktionsabschätzungen geben quantitative Eckpunkte für die Modellierung des Systems.

Während der dritten GENUS-Fahrt im September 2010 (HMS Discovery anstelle des beantragten FS Meteor) lag der Schwerpunkt auf Experimenten zu Stoffwechselaktivität und Nahrungsbedarf von Schlüsselarten, um die quantitative Bedeutung als Konsumenten und ihre trophische Stellung im System darzustellen. Diese Reise fand in der Zeit des Auftriebsmaximums im Südwinter statt und stellte eine der beiden Kern-Expeditionen des Projektes dar. Die Fahrt im Südsommer im Februar 2011 mit FS Maria S. Merian erbrachte dann entsprechende Proben aus der Zeit des Auftriebsminimums. Im Südsommer sind normalerweise wesentlich mehr Fischlarven zu erwarten, und so wurden auch diesmal ungewöhnlich hohe Materialmengen der Zielarten gefangen, die eine Komplettierung des Untersuchungsmaterials hinsichtlich Arten- und Größenspektrum erlaubten sowie einen Vergleich zwischen verschiedenen Auftriebszuständen zulassen.

Die Zeiten zwischen den Expeditionen wurden zur Aufarbeitung des Materials in den Labors in Bremen genutzt: Sortierung der Fänge, Vermessung der Fischlarven und

Entnahme der Otolithen (Wachstum), Mägen (mikroskopische Nahrungsuntersuchungen) und Gewebeproben (Fettsäuren, Lipide, Isotope für Stellung im Nahrungsnetz).

Tabelle der Schiffsexpeditionen, auf denen Proben für die biologischen Untersuchungen des Teilprojektes genommen wurden:

R.V. M.S. Merian	MSM07/2	Mar. 10 – 20, 2008	WB – WB
FRS Africana	A258	Dec. 02 – 16, 2009	CT – CT
RRV Discovery	D356	Sep. 10 – Oct 19, 2010	WB – CT
R.V. M.S. Merian	MSM17-3	Jan. 20 – March 07, 2011	WB - Dakar
R.V. M.S. Merian	MSM18-4	July 24 – Aug. 20, 2011	Libreville - WB
R.V. M.S. Merian	MSM19-1b	Oct. 02 – Oct.11, 2011	WB - WB

#### *1.4. Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde,*

Im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet (vor Namibia) hat ein Ökosystemwechsel stattgefunden (Cury und Shannon 2004), nachdem die ursprünglich dominierenden Sardinen durch andere Fischarten ersetzt wurden, aber auch andere Organismen wie das gelatinöse Plankton in höheren Abundanzen vorkommen. Ichthyoplanktonuntersuchungen ergaben in den letzten Jahren extrem geringe Abundanzen an Sardine und Sardelle (Ekau et. al 1999, Ekau und Verheye 2005, Ekau und Bröhl 2008, Kreiner et al. 2008), vor allem Stöcker hat deutlich zugenommen. Dies spiegelt sich in den kommerziellen Fängen wieder (FAO, 2008), die heute weitgehend auf Stöcker und Seehecht beruhen.

Im Benguela-Auftriebsgebiet dominieren normalerweise Diatomeen das Phytoplankton und werden hauptsächlich von Copepoden (*Calanoides carinatus* und andere; Loick et al. 2005) und Krill (*Euphausiacea*) gefressen. Das Zooplankton ist eine wichtige Nahrungsquelle für kommerzielle Fischarten wie Sardinen und Sardellen sowie Pferdemaikrele (*Trachurus sp.*; Barange & Stuart 1991). Größere Arten wie *Euphausia hanseni* sind auch potentielle Nahrung für bisher nicht kommerziell genutzte Fischarten, wie z.B. Leuchtsardinen (*Myctophidae*) oder die pelagische Grundelart *Sufflogobius bibarbat* (Gibbons & Salvanes 2004). Wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Entwicklung der kommerziellen Arten sind dabei sowohl abiotische Faktoren wie Temperatur- oder Sauerstoffverteilung als auch eine geeignete Zusammensetzung der Futterorganismen nach Art und Größe sowie günstige Konkurrenzverhältnisse. Diatomeen und Dinoflagellaten bedingen in der Folge eine veränderte Zooplanktonzusammensetzung, was wiederum Konkurrenzarten wie z.B. gelatinöses Plankton begünstigt und zu einem Regimewechsel führen kann. Das explosionsartige Auftreten von Quallen und Rippenquallen als Folge veränderter Umweltsituationen ist aus verschiedenen Gebieten bekannt (Billet et al. 2006, Purcell et al. 2001). In diesem Fall treten Quallen nicht nur als Konkurrenten sondern auch als Räuber für junge Fischstadien auf und können Fischpopulationen in doppelter Hinsicht beeinflussen. Auch vor Namibia sind als lokales Phänomen stark erhöhte Quallenvorkommen beobachtet worden (Brierley et al. 2001, Gibbons et al. 2003), die als Konkurrenz für frühe Fischlarvenstadien gelten können.

Um die Bedeutung einzelner Fischarten im System zu erfassen und die begrenzenden Faktoren für die Entwicklung der Populationen abzuschätzen, wurden Parameter wie Sauerstoffverbrauch ( $VO_2$ ) als Maß für den Energiestoffwechsel, Nahrung für die Einordnung ins trophische System und Wachstum und Kondition als Indikator für die Überlebensfähigkeit der Organismen erfasst. Bisher gibt es nur wenige vergleichende Studien über grundlegende Messungen zum Ruhestoffwechsel (Kunzmann et al. 2007; MacDonald et al. 1987; Zimmermann & Kunzmann, 2001). Zu pelagischen Fischen aus Auftriebsgebieten gibt es praktisch

keine Vergleichswerte, obwohl gerade hier die Sauerstoffverhältnisse einen entscheidenden Einfluss auszuüben scheinen.

### *1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.*

Da zur Einschätzung der verschiedenen gemessenen Parameter eine genaue Kenntnis der Umgebung der Fischlarven und Jungfische notwendig ist, ist eine enge Zusammenarbeit mit den Partnern aus den anderen Teilprojekten und den Partnern vor Ort unumgänglich. Im Verlaufe des Projektes hat sich eine gute Zusammenarbeit mit Kollegen des namibischen Meeresforschungsinstituts NatMIRC (National Marine Information and Research Center) in Swakopmund und des südafrikanischen Instituts für Umweltforschung DEA (Department of Environmental Affairs) in Kapstadt ergeben. Außerdem besteht eine gute Zusammenarbeit mit dem Fischereiinstitut INIP in Luanda, Angola.

## **Teilprojekt 4 – Biogeochemie**

### *1.1. Aufgabenstellung*

Zu den Hauptzielen des Teilprojektes Biogeochemie gehörte die Charakterisierung der anorganischen Nährstoff- und Kohlenstoffchemie des Benguela-Auftriebsgebietes (BUS) um Rückschlüsse auf die Funktionsweise der biologischen Pumpe und das Ausmaß der Emissionen von Treibhausgasen zu machen. Dazu wurden Untersuchungen zur Nährstoffverteilung und zum Karbonatsystem der Wassersäule sowie zum CO<sub>2</sub> Gehalt im Oberflächenwasser durchgeführt.

### *1.2. Voraussetzungen*

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

### *1.3. Planung des Vorhabens*

Für die Projektphase I war die Teilnahme an 4 Expeditionen ins Untersuchungsgebiet geplant sowie ein Auslandsaufenthalt am NatMIRC vom 20.12.2009 bis 02.06.2010. Um die ausgeprägte zeitliche und räumliche Variabilität noch besser erfassen zu können, haben wir im Jahre 2011 die Möglichkeit ergriffen an zwei weiteren Merian-Ausfahrten (MSM18-4, MSM19-1) in das Arbeitsgebiet teilzunehmen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Forschungsschiff, Ausfahrt, Zeitraum und angelaufene Häfen (WB – Walvis Bay, CT - Cape Town)

R.V. M.S. Merian	MSM07/2	Mar. 10 – 20, 2008	WB – WB
R.V. Meteor	M67/2	May 15 – June 05, 2008	WB – WB
FRS Africana	A258	Dec. 02 – 16, 2009	CT – CT
RRV Discovery	D356	Sep. 10 – Oct 19, 2010	WB – CT
R.V. M.S. Merian	MSM17-3	Jan. 20 – March 07, 2011	WB - Dakar
R.V. M.S. Merian	MSM18-4	July 24 – Aug. 20, 2011	Libreville - WB
R.V. M.S. Merian	MSM19-1b	Oct. 02 – Oct.11, 2011	WB - WB

#### *1.4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde*

Bis zum Zeitpunkt unserer Untersuchungen sind Langzeitdaten zu gängigen Parametern vorhanden gewesen. Vor allem Nährstoff- und Sauerstoffdaten sowie Informationen über die Kohlenstoffgehalte in den Sedimenten (v. d. Plas et al. 2007) und Nitratreduktionsraten (Anammox und Denitrifizierung) (Kuypers et al. 2005; Lavik et al. 2009) waren verfügbar. Um den Einfluss zu untersuchen, den Nitratreduktion auf die Nährstoffverhältnisse und damit auf die Funktion der biologischen Pumpe hat, wurden während der 4 GENUS-Expeditionen weitere Nährstoffdaten erhoben.

Die einzige uns bekannte Studie zu großskaligen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Benguela-Einzugsgebiet fand entlang der VOS Routen (voluntary observing ship) statt (Santana-Casiano et al. 2009). Diese Routen verlaufen weit entfernt vom Einfluss des Küstenauftriebes vor allem im Bereich des nördlichen Benguela-Systems (NBUS). Diese Untersuchung ist der Grund dafür, dass das Schelfgebiet des BUS im Unterschied zu dem der anderen großen Auftriebsgebiete des Ozeans, als CO<sub>2</sub>-Senke in den globalen Synthesen auftaucht (Laruelle et al. 2010). Die von uns durchgeführten Messungen zur Erfassung des Karbonatsystems und des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks (pCO<sub>2</sub>) im Oberflächenwasser sind nach unserer Kenntnis die ersten umfangreich durchgeführten Messungen ihrer Art entlang der vom Auftrieb beeinflussten Küste Südwestafrikas.

#### *1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen*

Im Rahmen von GENUS wurde eng mit Wissenschaftlern aus Namibia und Südafrika sowie den deutschen GENUS Partnern zusammengearbeitet. Für einen Zeitraum von 6 Monaten arbeitete Frau Anita Flohr mit Anja van der Plas am NatMIRC zusammen und führte Messungen der Gesamtalkalität (AT) und des gesamt gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) vor Ort durch. Weitere Zusammenarbeit im Zuge von GENUS II sind vereinbart.

## II. Eingehende Darstellung

### **Teilprojekt 4 - Biologie**

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

Die Fördermittel wurden dem Antrag entsprechend verwendet. Wesentliche Ziele des Projektes waren:

- Die trophische Position von Schlüsselarten zu bestimmen
- Wachstumsleistungen in Abhängigkeit von Umweltbedingungen zu erfassen
- Sauerstoffverbrauch von Schlüsselarten zu messen

Zu diesen Kernfragen konnte das Teilprojekt wesentliche Ergebnisse sammeln, die zum Gesamtprojekt beitragen.

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

Wichtigste Position im Finanzplan waren die Personalkosten, die wie beantragt für die Finanzierung einer halben Wissenschaftlerstelle genutzt wurde.

Der überwiegende Teil der Reisekosten war notwendig für die Teilnahme an den verschiedenen Schiffsexpeditionen. Die Investitionsmittel wurden wie beantragt für die Anschaffung entsprechender Geräte für die Messung des Sauerstoffverbrauchs und eines Fanggerätes zur schonenden Beschaffung der Versuchsorganismen verwendet.

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

Die Arbeiten zur Verbreitung sind notwendig, um die Struktur der Fischlarvengemeinschaft im Untersuchungsgebiet zu verstehen. Die Arbeiten zu Kondition und Wachstum geben Aufschluss über die Abhängigkeit der einzelnen Arten und Organismen von den sie umgebenden, unmittelbaren Umweltbedingungen. Die Sauerstoffmessungen sind ein Maß für den Energieumsatz der Fischlarven und ergänzen die Nahrungs- und Wachstumsuntersuchungen. Sie sind außerdem ein wichtiges Bindeglied zu anderen Systemkomponenten im Auftriebsgebiet.

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

Das Verständnis der Biologie und Ökologie früher Lebensstadien ist besonders wichtig zur Abschätzung des Produktionspotentials einzelner Arten, da die frühen Stadien aufgrund ihrer erhöhten Empfindlichkeit und geringeren physiologischen Anpassungsfähigkeit einen Engpass in der ontogenetischen Entwicklung einer Art darstellen. Die Ergebnisse tragen daher wesentlich zum Verständnis des Gesamtsystems bei und liefern einen Beitrag zu den übergeordneten Fragestellungen in Forschungsprogrammen wie IMBER, FONA oder SPACES. Durch die enge Verknüpfung von GENUS mit seinen Teilprojekten und der Benguela Current Commission oder die Vorstellung auf regionalen Symposien (SAMSS 2011) fließen die Ergebnisse auch direkt in die entsprechenden regionalen Management-Organisationen ein (Department of Environmental Affairs, National Marine Information and Research Center).

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

In Bezug auf die Ökologie und Physiologie von jungen Stadien der pelagischen Arten Sardine, Sardelle und Stöcker sind uns keine konkurrierenden Arbeiten bekannt. Über Sauerstoffphysiologie bei Gobiiden gibt es einzelne Veröffentlichungen, die im Rahmen eigener Ergebnisse ausführlich diskutiert werden.

### *II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse*

- Auel, H., Ekau, W. 2009: Distribution and respiration of the high-latitude pelagic amphipod *Themisto gaudichaudi* in the Benguela Current in relation to upwelling intensity. *Progr. Oceanogr.* vol. 83 pp. 237-241
- Beau Mbeurora Tjizoo: Ecological significance of Cape horse mackerel (*Trachurus capensis*) and Jellyfish species (*Chrysaora hysoscella* and *Aequorea forskalea*) interactions in the northern Benguela pelagic ecosystem. (PhD thesis ongoing)
- Ekau, W., Auel, H., Pörtner, H.-O., and Gilbert, D., 2010: Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish), *Biogeosciences*, 7, 1669-1699, doi:10.5194/bg-7-1669-2010.
- Ekau, W., Auel, H., Pörtner, H.-O., Gilbert, D. 2009: Impacts of hypoxia on the structure and processes in the pelagic community (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences Discuss.*, 6, 5073-5144
- Ekau, W. and Michalowski, K. (in prep): Growth and trophic position of larval pelagic goby, *Sufflogobius bibarbatus* in the Northern Benguela upwelling system.
- Ekau, W. and Verheye, H.H. (in prep): A change in larval fish community of the Northern Benguela induced by changes of the oxygen minimum layer.
- Franceschinis, L. 2009 Routine metabolic rate and critical oxygen levels of Cape Horse Mackerel larvae and juveniles in the Northern Benguela System. MSc Thesis, Faculty for Biology & Chemistry, University of Bremen, 54 pp
- Geist, Simon, et al. (in prep) Competitive performance of larval stages support the dominant position of cape horse mackerel in the Northern Benguela: feeding ecology, growth and condition.
- Geist, Simon, et al. (in prep) Larval competition amongst clupeid species mixed assemblages: feeding ecology, growth and condition
- Geist, Simon, et al. (in prep) Minimum energetic demand of larval and juvenile cape horse mackerel, *Trachurus capensis* (Castelnaud, 1861) from the Northern Benguela
- Kreiner, A., Ekau, W. and Stenevik, E.K. 2009: Notes on the distribution of pelagic eggs and larvae in relation to dissolved oxygen concentrations in the Northern Benguela. *J. Fish Biology* 74, 270-277
- Levin, L. A., Ekau, W., Gooday, A., Jorrisen, F., Middelburg, J., Naqvi, W., Neira, C., Rabalais, N., Zhang, J. 2009: Effects of Natural and Human-Induced Hypoxia on Coastal Benthos. *Biogeosciences Discuss.*, 6, 2063-2098
- Michalowski, Katharina: Wachstum und Kondition von frühen Stadien der pelagischen Gobies *Sufflogobius bibarbatus* im Nord-Benguela-Gebiet. (Dipl. Arb. Uni HB, 2011)
- Neill Herbert; Mark Goodman; Andreas Kunzmann (in review) Fish with a safe low O<sub>2</sub> strategy: the cape silverside (*Atherina breviceps*) avoids low O<sub>2</sub> with a sizeable degree of aerobic metabolic scope. Submitted to *Physiology & Behavior*.
- Zhang, J, Gilbert, D, Gooday, A, Levin, L, Naqvi, S. W. A, Middelburg, J, Scranton, M, Ekau, Werner, Pena, A, Dewitte, B, Oguz, T, Monteiro, P M S, Urban, E, Rabalais, N N, Ittekkot, V, Kemp, W M, Ulloa, O, Elmgren, R, Escobar-Briones, E, Plas, A K Van der, 2010: Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences*, vol. 7 pp. 1443-1467

Poster and presentations:

Ekau, W., Kreiner, A. and Bröhl, S. (2009): A change in larval fish community of the Northern Benguela induced by the extension of the oxygen minimum layer. Presentation at Joint Meeting of Ichthyologists and Herpetologists (JMIH), 22-27- July 2009, Portland, Oregon, USA

Geist, S., Ekau, W., Kunzmann, A. (2011): Food source identification of early life stages of horse mackerel (*Trachurus trachurus capensis*) and anchovy (*Engraulis capensis*) from the Northern Benguela Current System revealed from stomach content, stable isotope and lipid analyses. Presentation at the South African Marine Science Symposium SAMSS, 4.-7.4.2011, Grahamstown, South Africa

Herbert, N.A.; Goodman, M. and Kunzmann, A. 2010 Integrating respirometric measures of metabolic scope and Pcrit to resolve the energetic basis of hypoxia avoidance behaviour in the cape silverside, *Atherina breviceps*. ICBF 2010 - 9th International Congress on the Biology of Fishes - July 5-9, Vila Universitaria UAB Barcelona, Spain

Michalowski, K. and Ekau, W. (2009): Growth and trophic position of larval pelagic goby, *Sufflogobius bibarbatus* in the Northern Benguela upwelling system. – Poster at the South African Marine Science Symposium SAMSS, 4.-7.4.2011, Grahamstown, South Africa

#### ***Teilprojekt 4 - Biogeochemie***

##### *II.1. Verwendung der Gelder in Bezug auf die erzielten und vorgegebenen Ergebnisse*

Der Finanzierungsplan wurde bei der Durchführung des Projekts weitgehend eingehalten und die definierten Ziele wurden ebenfalls weitgehend erreicht.

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

Die zahlenmäßig größten Positionen waren Personalkosten und Investitionen: beide Positionen sind wie beantragt ausgegeben worden.

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

Die Untersuchungen zu pCO<sub>2</sub>, AT und DIC waren notwendig um die Dynamik des Karbonatsystems exakt bestimmen und beschreiben zu können. Da der Kohlenstoff- und die Nährstoffkreisläufe eng gekoppelt sind, wurden Nährstoffmessungen durchgeführt, die weitere wichtige Randparameter für die Beschreibung der biologischen Pumpe liefern.

##### *II.4. Voraussichtlicher Nutzen (insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse)*

Auftriebsgebiete gehören zu den produktivsten Regionen der Erde. Die Funktionsweise der biologischen Pumpe sowie die Emission von Treibhausgasen sind wichtige Prozesse im globalen Kohlenstoffkreislauf und damit im Klimageschehen. Um zu einem besseren Verständnis der Auftriebsgebiete im Klimageschehen beisteuern zu können, wurde im Rahmen des Teilprojekts 4 Biogeochemie die Funktion der biologischen Pumpe untersucht. Unsere Ergebnisse wurden auf internationalen Foren und Konferenzen (BBC Forum, Namibia und SAMSS, Südafrika) vorgestellt und flossen in Weiterbildungsmaßnahmen ein, die im Rahmen von SPACES (MSM 19-1) durchgeführt wurden.

### *II.5. Während der Durchführung bekannt gewordenen Fortschritte von anderer Stelle*

Uns sind keine Fortschritte bekannt.

### *II.6. Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen*

#### Veröffentlichungen:

Gutknecht, E., Dadou, I., Le Vu, B., Marchesiello, P., Cambon, G., Sudre, J., Garçon, V., Machu, E., Rixen, T., Kock, A., Flohr, A., Paulmier A., Lavik G. Nitrogen transfers and sea-air N<sub>2</sub>O fluxes in the upwelling off Namibia within the oxygen minimum zone: a 3-D model approach. *Biogeosciences Discussions* 8, 3537-3618, 2011

Nagel, B., Emeis, K.-C., Flohr, A., Rixen, T., Schlarbaum, T., Mohrholz, V., van der Plas, A. N-Cycling and Balancing of the N-Deficit Generated in the Oxygen Minimum Zone over the Namibian Shelf – an Isotope-based Approach (2012). *Journal of Geophysical Research* (subm.)

Rixen, T., Flohr, A., van der Plas, A., Lahajnar, N., Emeis, K.-C. (2012). Spatial and temporal variations of pCO<sub>2</sub> in coastal waters off SW Africa. (under internal review)

Flohr, A., Rixen, T., van der Plas, A. (2012), Spatial patterns of N:P anomaly within the Benguela Upwelling System (in prep.)

Flohr, A., Rixen, T., van der Plas, A. (2012). Impact of low saturation state on carbon export within the Benguela Upwelling System (in prep.)

Flohr, A., Rixen, T., van der Plas, A. (2012). On diurnal fluctuations in carbonate system parameters and its relation to H<sub>2</sub>S outbreaks off Swakopmund, Namibia (in prep.)

#### Tagungsbeiträge:

Rixen, T., 2010, October 13th. Some Aspects of the Carbon and Nitrogen Cycles within the Benguela Upwelling System. Meeting of the Benguela Current Commission (BCC), Swakopmund, Namibia.

Rixen et al. 2011 Carbon Pumps in the Benguela Upwelling System, Meeting of the Benguela Current Commission (BCC), Swakopmund, Namibia.

Flohr, A., Rixen, T. 2011, April 4th. Biogeochemical dynamics of the Benguela Upwelling with emphasis on the Carbonate System. 14th South African Marine Science Symposium, Grahamstown, South Africa

### III. Erfolgskontrollbericht

#### *III.1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen*

Im BMBF-Verbundprojekt GENUS werden die Ökosystemstruktur sowie die Rolle der Stoffkreisläufe im Benguela Auftriebsgebiet vor dem Hintergrund des Klimawandels untersucht. GENUS ist ein Beitrag zu IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) und die marine Säule der BMBF-Initiative SPACES (Science Partnership for the Assessment of Complex Earth Systems), die verschiedene deutsch-afrikanische Forschungsvorhaben unter einem Dach vereinigt.

Das Teilprojekt 4 mit seinen beiden Teilen Biologie und Biogeochemie ist ein Bestandteil von GENUS. Es hat die Aufgabe, saisonale und jahreszeitliche Variationen der Kohlenstoffflüsse sowie deren Abhängigkeit von sich ändernden Umweltparametern, wie der CO<sub>2</sub>- und Sauerstoffkonzentration, zu erfassen. Da die biologische Pumpe ein wichtiger Faktor im globalen Kohlenstoffkreislauf ist, leistet dieses Projekt einen bedeutenden Beitrag zum besseren Verständnis der Folgen des Klimawandels. Außerdem sollen die Veränderungen in der pelagischen Lebensgemeinschaft, hier speziell des Fischplanktons, untersucht werden, um die Folgen der Klimaveränderungen auf die höheren trophischen Stufen im System und letztendlich auf die Fischerei zu verstehen und besser vorhersagen zu können. Dies geschieht in enger Zusammenarbeit mit unseren Partnern in Südafrika und Namibia wobei neue Methoden genutzt und Netzwerke gefestigt bzw. ausgebaut werden. Damit trägt dieses Projekt auch zur Realisierung des BMBF-Schwerpunktes FONA bei, der sich zum Ziel gesetzt hat Netzwerke auszubauen und die Position Deutschlands bei der Entwicklung von Technologien zur Minderung der Folgen des globalen Wandels zu stärken.

#### **Teilprojekt 4 - Biologie**

#### *III.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen*

Im Fokus der Untersuchungen standen die sogenannten „kleinen pelagischen“ Arten Stöcker, Sardine und Sardelle; Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem dem Stöcker, der von diesen Arten momentan die größte wirtschaftliche Bedeutung für Namibia besitzt. Ziel war es, die Stellung der Arten im Nahrungsnetz des Benguela Auftriebssystems zu bestimmen und über ihre Nahrungsbeziehungen ihre Bedeutung für Stoffflüsse im System, aber auch die Abhängigkeit ihrer Verbreitung und Lebensleistungen Wachstum, Überlebensfähigkeit und Energietransfer von den Umweltparametern zu erfassen.

Die Langzeitdaten über die Verbreitung von Fischlarven im nördlichen Benguelastromsystem deuten auf eine Verschiebung der Verteilungsmuster hin, die mit großräumigen Veränderungen in der Hydrographie vor der Küste Namibias korreliert werden können. Exemplarisch wird dies hier an den beiden wichtigen Arten Stöcker und Sardinen gezeigt. In Abb. 1 ist klar zu erkennen, dass das Aufkommen von Sardinenlarven (Abb. 1 oben) in den Jahren seit 2002 drastisch abgenommen hat, während die Menge an Stöckerlarven (Abb. 1 unten) kontinuierlich zugenommen hat. Mit Zu- und Abnahme in der Abundanz einzelner Arten hat auch eine Verschiebung einzelner Verbreitungsgebiete nach Süden eingesetzt. Die Verschiebungen gehen einher mit einem langzeitlichen positiven Trend in der Wassertemperatur und einer Anhebung der Sauerstoffgrenzschichten auf dem Schelf.

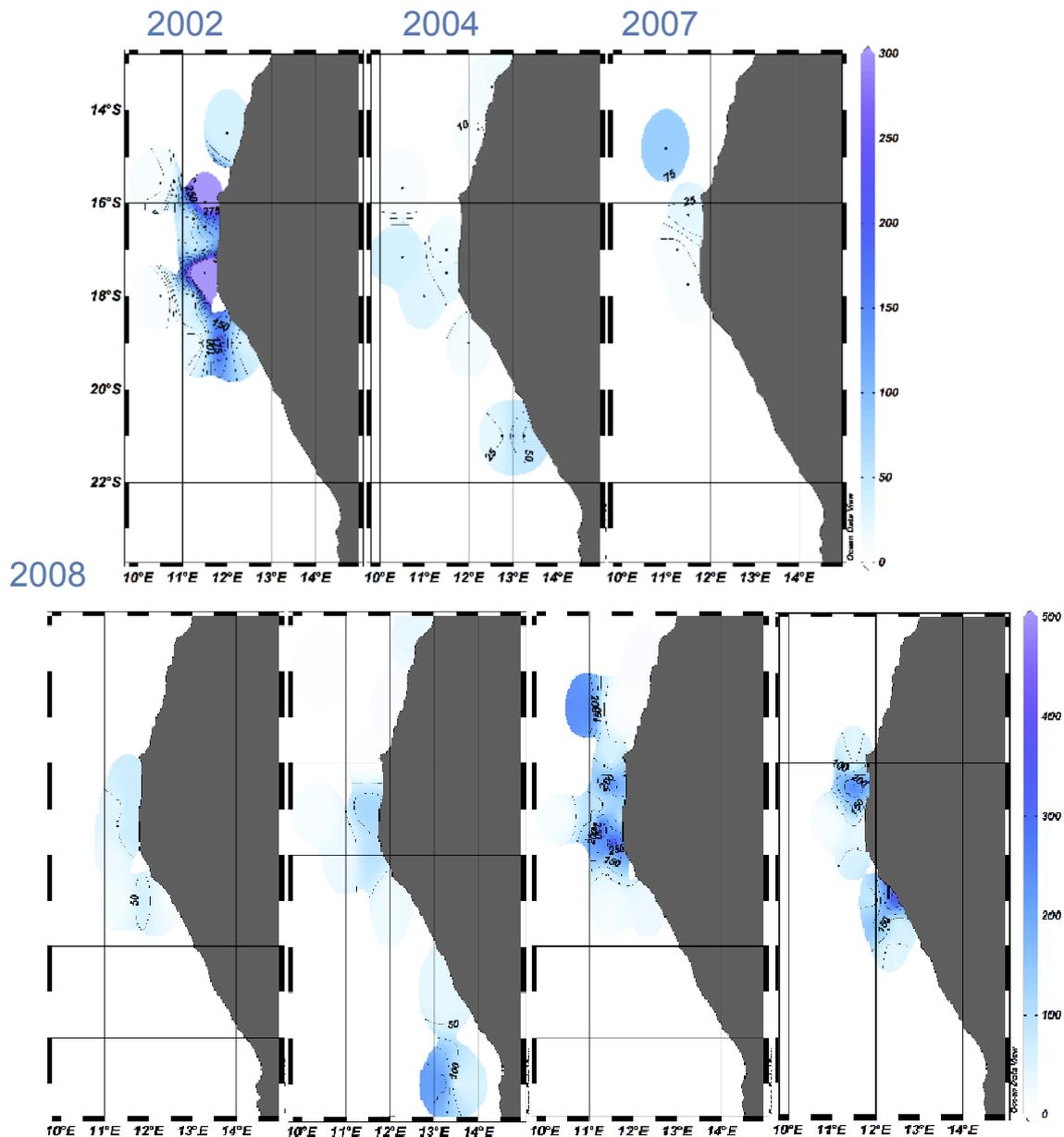


Abb. 1: Horizontale Verbreitung und Abundanz von Sardinen- (oben) und Stöckerlarven (unten) in den letzten zehn Jahren im nördlichen Benguela Auftriebssystem

Die jungen Lebensstadien des Stöcker scheinen in ihrem Beutespektrum recht flexibel auf das vorherrschende Nahrungsangebot reagieren zu können, solange die Beuteorganismen in Bezug auf ihre Körpergröße durch die Larven bewältigt werden können. In einem Großteil der untersuchten Mägen von Stöckerlarven wurden hauptsächlich kleine Ruderfußkrebarten (Copepoden) der Ordnung Cyclopoida gefunden. An einigen Stationen wurde der Mageninhalt jedoch von Larvalstadien größerer Ruderfußkrebarten und adulten Stadien der Ordnung Harpacticoida dominiert, die hier auch im Mikrozooplankton häufig waren. Mit zunehmender Körpergröße basierte die Nahrung dann vermehrt auf größeren Ruderfußkreben der Ordnung Calanoida und vereinzelt auch auf Larvalstadien des Krill (*Calypoteis*) (Siehe Abb. 2). Für eine repräsentative Erfassung des Mikroplanktons wurde ein spezielles Netz entwickelt, das im Multinetz montiert wird und den gleichzeitigen Fang der Fischlarven und ihrer potentiellen Beuteorganismen erlaubt!

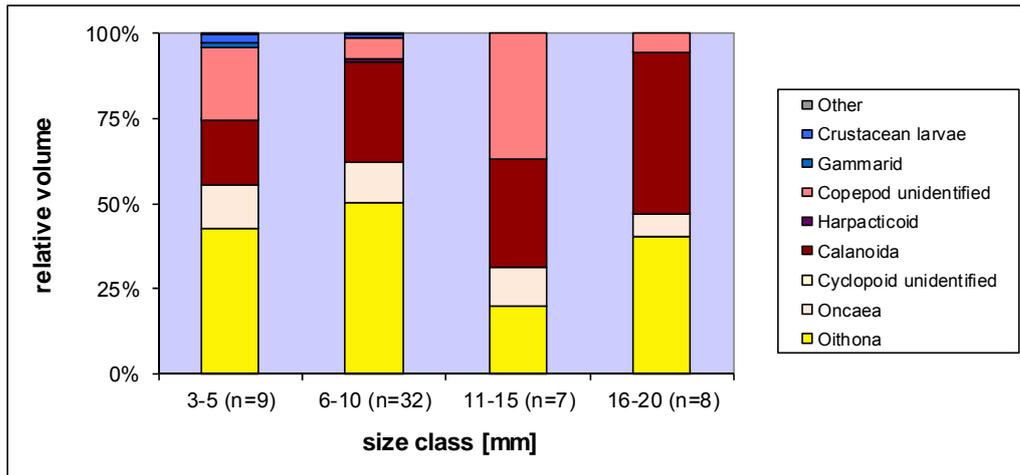


Abb. 2: Volumetrische Zusammensetzung der Nahrung von Stöckerlarven im Untersuchungsgebiet geordnet nach Larvengrößen.

Für Larven von Sardinen und Sardellen sind die entsprechenden Daten weniger belastbar, da nur an wenigen Tieren Nahrungsanalysen durchgeführt werden konnten. Bei den meisten Tieren war der Verdauungstrakt entleert, da die Tiere tagaktiv sind. Zusätzlich zu den auch beim Stöcker gefundenen verschiedenen Formen von kleinen Ruderfußkrebsen machte Phytoplankton (Diatomeen und seltener auch Dinoflagellaten) einen größeren relativen Anteil aus als beim Stöcker.

Die Ergebnisse der Isotopenanalysen des Stickstoffs (Abb. 3) erbrachten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Larvenstadien der drei untersuchten Arten und ergaben in Übereinstimmung mit den Magenanalysen eine ähnliche trophische Positionierung innerhalb des planktonischen Nahrungsnetzes.

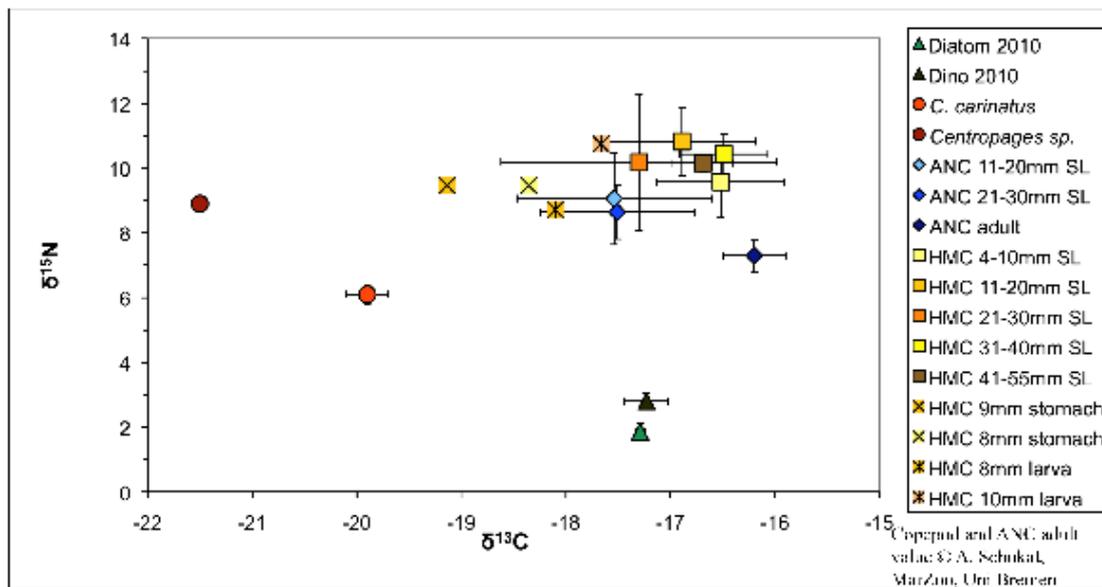
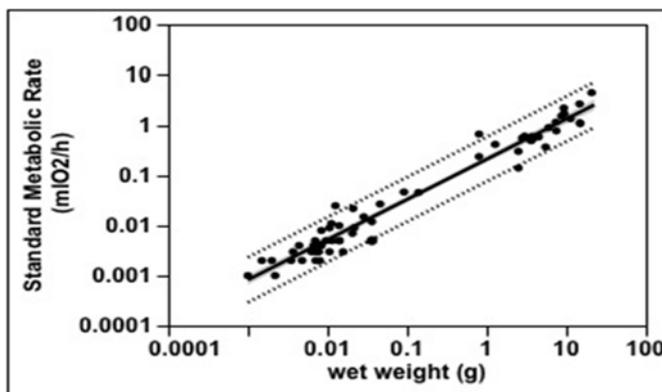


Abb. 3: Stabile Kohlen- und Stickstoffisotope von Stöcker, Sardelle und einigen Nahrungsorganismen der Fischlarven.

Auch im Muskelgewebe von Stöckerlarven und Juvenilen wurden Fettsäuren gefunden, die bereits eine carnivore Ernährungsweise anzeigen. Zusätzlich legt die

Dominanz von essentiellen Fettsäuren aus Diatomeen gegenüber solchen aus Dinoflagellaten eine auf Diatomeen basierende Nahrung nahe.

Respirationsmessungen über ein sehr weites Größenspektrum von Larven bis hin zu Juvenilen konnten vor allem beim Stöcker realisiert werden (Abb. 4). Generell ist es schwierig lebende Tiere zu fangen, dabei ist Stöcker deutlich robuster als Sardine und Sardelle. Aber auch beim Stöcker ist es abhängig davon, ob man a) Tiere findet und b) ein schonender Fang möglich ist (Quallen im Netz stellen zum Beispiel ein Problem dar). Hinlänglich gute Bedingungen, um ausreichend Organismen für die Messung von Ruhe- und Aktivitätsverbrauch von Stöckern unter normalen Sauerstoffsättigungsbedingungen bei 18°C Wassertemperatur wurden vor allem im Februar 2011 vorgefunden. Der Sauerstoffverbrauch steigt allometrisch mit dem Körpergewicht. Abgeleitet aus den berechneten Beziehungen für den Ruhe-, mittleren-, und Aktivitätssauerstoffverbrauch ergeben sich folgende Beziehungen: Bei 18°C ist der mittlere Sauerstoffverbrauch für Larven von 0.01g Feuchtgewicht (FG) um das 1,7 fache und der Aktivitätsverbrauch um das 3,2 fache höher als der Ruhesauerstoffverbrauch. Für einen juvenilen Fisch von 10g FG ist diese Spanne geringer und beträgt 1,2 und 2,0.



$$\text{SMR} = a * W^b$$

**a= 0.21±0.08, b=0.80±0.02, n=62, R<sup>2</sup><sub>adj</sub>=0.96**

Abb. 4: Standard Sauerstoffverbrauch des Stöckers über den gesamten Größenbereich.

Aus der Kenntnis des Ruhesauerstoffverbrauchs kann eine Abschätzung der minimal benötigten Energie, die für grundlegende, überlebenswichtige Prozesse benötigt wird, getroffen werden. Eine Larve von 0.01g FG benötigt circa 0,1 Joule pro Stunde (J/h), was 0,003 mg Kohlenstoff pro Stunde (mgC/h) entspricht. Ein juveniler Fisch von 10g Feuchtgewicht hat dagegen einen Energiebedarf von 26,0 -26,4 J/h (entspricht 0,504-0,689 mgC/h). Ein um das 100fache schwererer Fisch benötigt also in etwa 250mal mehr Energie. Der Energiegehalt von Copepoden kann großen saisonalen Schwankungen unterworfen sein und die Angaben über die Assimilationseffizienz von marinen, carnivoren Fischen in der Literatur schwanken sehr stark. In einer groben Abschätzung bei optimaler Ausnutzung der Energie benötigt eine Larve von 0.1g FW ca. 70 cyclopoide Copepoden und ein juveniler Fisch von 10mg FW ca. 7-22 calanoide Copepoden pro Stunde um den minimalen Energiebedarf zu decken.

Im Rahmen einer Diplomarbeit an Bord von Merian und ergänzender Messungen im Aquarium in Kapstadt wurden adulte Holzmakrelen bis 5 g WW (*Trachurus capensis*) untersucht. Werte für die Etablierung von Grundstoffwechsel, Routinestoffwechsel und Aktivitätsstoffwechsel (SMR, RMR, MMR) wurden bei Normoxie ermittelt und sind mit publizierten Werten aus anderen Regionen vergleichbar. Die Beziehung

zwischen Sauerstoffverbrauch und Gewicht wurde mit  $RMR = 1.2106W^{0.4872}$  bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass adulte Stöcker ihren Metabolismus unverändert bis zu einem Sauerstoffsättigungsniveau von etwa 50% (4.8 - 3.9 mg O<sub>2</sub>/l) aufrecht erhalten können. Bei Sättigungen unter 40% kommt es zu deutlich abnehmenden Routine- und Ruhestoffwechselraten. Sobald wieder sauerstoffgesättigtes Wasser angeboten wird, steigen kurzfristig Sauerstoffverbrauchsdaten an. Diese Phasen dauern aber nie länger als 30 min, vermutet wird, dass angehäuften anaeroben Metaboliten wie z.B. Lactat dem aeroben Stoffwechsel sehr schnell zugeführt werden. Adulte Trachurus erholen sich erstaunlich schnell auch aus tiefen Hypoxie-Phasen (<10% O<sub>2</sub>; 0,7-1,4 mg O<sub>2</sub>/L).

Fasst man diese Ergebnisse für Stöcker zusammen, so scheint hier nicht eine alternative Nahrungsquelle der Grund für eine bessere Entwicklung der Population gegenüber der Sardelle (Sardine war zahlenmäßig noch zu gering für eine statistisch signifikante Aussage) zu sein, sondern der Hauptgrund für eine erfolgreiche Entwicklung des Bestandes in den letzten Jahren scheint die größere Robustheit gegenüber schlechten Umweltbedingungen, z.B. niedriger Sauerstoffgehalt, zu sein.

### *III.3. Fortschreibung des Verwertungsplans.*

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen wurden nicht gemacht

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten beziehen sich hauptsächlich auf den Informationszuwachs hinsichtlich eines besseren Fischereimanagements. Direkte wirtschaftliche Auswirkungen sind nicht zu erwarten.

Das Hauptziel des Teilprojekts 4 – Biologie war Mechanismen und Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf die Entwicklungsmöglichkeiten wichtiger Fischarten im Benguela Auftriebssystem zu verstehen. Dieses Ziel konnte für einzelne Arten erreicht werden. Technische Schwierigkeiten bei einigen wichtigen Arten des Systems haben die Erhebung von Wachstums- und Sauerstoffverbrauchsdaten bisher verhindert. Außerdem ist klar, dass für eine systemorientierte Betrachtung der Lebensleistungen der untersuchten Arten die Sauerstofftoleranz im Zusammenhang mit Temperaturänderungen von entscheidender Bedeutung ist. Diese Aspekte stehen daher im Zentrum eines Folgeantrags, und sollen unter Einbeziehung der südafrikanischen Partner und verstärkter Nutzung von experimentellen Möglichkeiten in Namibia und Südafrika in der zweiten Phase von GENUS bearbeitet werden. Eine Ausdehnung des Untersuchungsgebiets in GENUS II erlaubt außerdem eine bessere Erfassung der gesamten Populationen im nördlichen Benguelasystem und ihrer Ausbreitungsgrenzen sowie die Gesamtvariabilität physiologisch relevanter Umweltparameter.

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

Das Ziel, Sauerstoffverbrauchsmessungen auch an Larven von Sardine und Sardelle durchzuführen, konnte nicht erreicht werden. Die Larven erwiesen sich als extrem empfindlich und waren aus Netzfängen nicht über genügend lange Zeit zu halten, um brauchbare Versuchsergebnisse zu erzielen. Auch ein Versuch, Sardinen und Sardellen aus gefangenen Eiern aufzuziehen und mit diesen dann Experimente durchzuführen, war in der zur Verfügung stehenden Zeit in Kapstadt 2009 nicht erfolgreich. Dieser Ansatz wurde auf Grund der begrenzten Zeit und anderer wichtiger Fragestellungen auf eine mögliche zweite Projektphase verschoben.

III.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen nicht zutreffend

III.6. die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Siehe II.2 und II.3

### Teilprojekt 4 - Biogeochemie

III.2. wissenschaftlich-technische Ergebnisse , erreichte Nebenergebnisse und gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Die bisherigen Ergebnisse zur Nährstoffverteilung weisen darauf hin, dass das (BUS) von Norden her mit an Nitrat angereichertem Wasser versorgt wird. Die Nitratanreicherung erfolgt nach unseren bisherigen Kenntnissen durch die Remineralisierung von stickstofffixierenden Cyanobakterien im tropischen Atlantik und dem Angola-Wirbel. Das Stickstoff angereicherte Wasser gelangt mit dem South Atlantic Central Water (SACW) auf den namibischen Schelf wo es aufgrund von Sauerstoffmangel zur Reduktion von Nitrat (Anammox, Denitrifizierung) kommt. Durch die Nitratreduktion verringern sich N:P-Verhältnisse aber bereits am äußeren Schelf finden sich die normalen Redfield-Verhältnisse wieder. Dies ist sowohl auf die Mischung mit Stickstoff angereichertem Wasser und als auch den verstärkten Eintrag von Phosphat aus den organisch reichen Sedimenten zurückzuführen.

Messungen zu AT und DIC zeigen, dass das Auftriebwasser nicht nur nährstoffreich ist, sondern auch eine sehr geringe Karbonatsättigung  $<2$  aufweist. Als optimaler Richtwert für Kalzifizierer werden Werte um  $\approx 4-5$  angesehen. Wir vermuten, dass die Ablagerung nahezu karbonatfreier Sedimente entlang der namibischen Küste die Folge der geringen Karbonatsättigung im Wasser ist, die das Wachstum kalzifizierender Organismen wie Foraminiferen und Coccolithophoriden stark behindert. Dieser Frage soll im Rahmen von GENUS II nachgegangen werden.

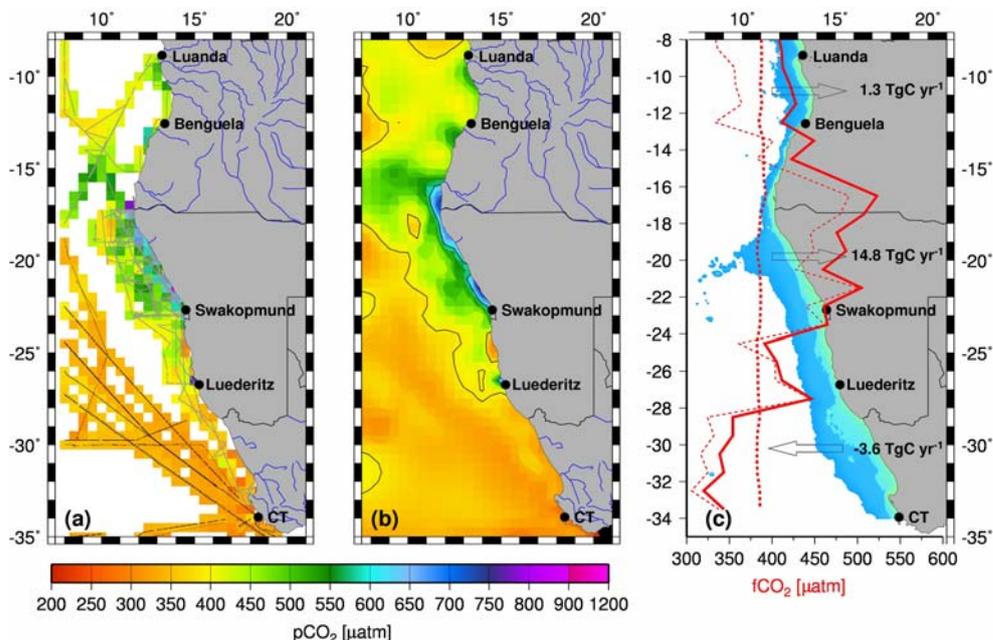


Abbildung 5: (a) pCO<sub>2</sub> gemittelt auf einem 0.5° Netz entlang der Fahrtrouten (VOS Linien in schwarz, GENUS Fahrten in grau). (b) die gleichen Daten über die gesamte Fläche gemittelt (c) alle fCO<sub>2</sub> Daten gemittelt entlang der Breitengrade. Ozeandaten sind durch die breite rote und die Atmosphärendaten durch breite gestrichelte Linie dargestellt. Die dünne gestrichelte Linie zeigt den theoretischen fCO<sub>2</sub> bei gleicher Wassertemperatur in allen Regionen. Die Zahlen zeigen die gemittelten CO<sub>2</sub> Flüsse für Angola, das NBUS und das SBUS.

Die Untersuchungen zum  $p\text{CO}_2$  im Oberflächenwasser zeigen, dass es aufgrund von Flusseinträgen und erhöhten Wassertemperaturen auf dem angolanischen Schelf zu  $\text{CO}_2$ -Emissionen kommt (Abb. 5). Auch im nördlichen BUS wird  $\text{CO}_2$  emittiert, während unsere Daten eine netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahme für das SBUS belegen. Wir gehen davon aus, dass die entgegengesetzte Funktionsweise der Subsysteme im Wesentlichen durch die Eigenschaften der Zentralwassermassen angetrieben wird. Im Gegensatz zum Norden (SACW), enthalten die Zentralwassermassen im südlichen System (ESACW) einen erhöhten Anteil an Nährstoffen, die noch nicht biologisch verwertet wurden. Diese sogenannten preformed nutrients ( $\text{PO}_4$ ) machen ca. 60% aller im Ozean befindlichen Nährstoffe aus und werden im Zuge der Tiefenwasserbildung in den niedrigen Breiten gebildet. Die Verwertung dieser bisher ungenutzten Nährstoffe scheint es der biologischen Pumpe zu ermöglichen den südafrikanischen Schelf trotz Flusseinträgen und Auftrieb in ein Gebiet zu verwandeln in dem der Ozean  $\text{CO}_2$  aufnimmt.

Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen des Schelfes im NBUS weisen eine ausgeprägte jährliche Variabilität auf, die sich besonders in den sommerlichen  $\text{CO}_2$ -Flüssen der Jahre 2008 und 2011 äußert (siehe Abb. 6). Die Saisonalität scheint dadurch unterdrückt zu werden, dass im Winter zum Zeitpunkt des stärksten Auftriebs, überwiegend das aus dem SBUS kommende ESACW auftreibt. Im Sommer hingegen können die  $\text{CO}_2$ -Emissionen trotz des geringen Auftriebs hoch sein aufgrund der Dominanz des SACWs.

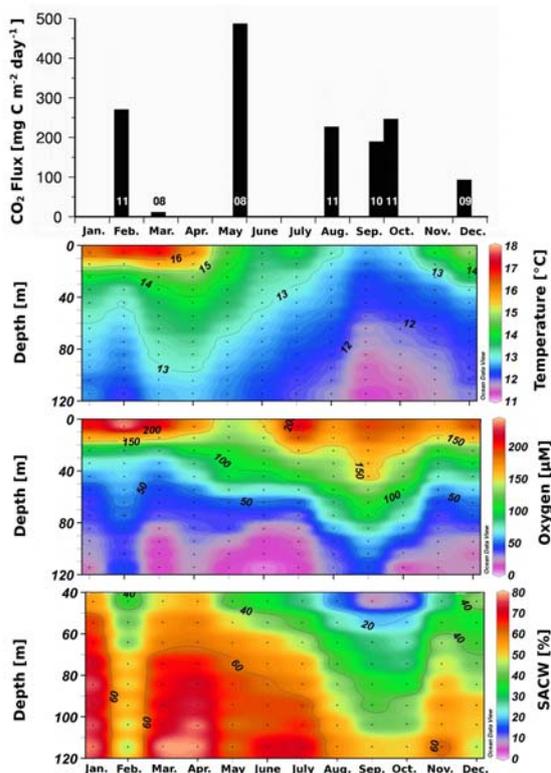


Abbildung 6: Das Säulendiagramm zeigt die zeitliche Variabilität der  $\text{CO}_2$ -Flüsse im NBUS. Die Jahre, in denen die Flüsse gemessen wurden, sind innerhalb der Säulen weiß dargestellt. Die unteren Abbildungen zeigen die Saisonalität der Wassertemperaturen, des Sauerstoffgehaltes und des Anteiles an SACW, wobei die Summe aus SACW und ESACW 100% entspricht.

Auf Grundlage der bisher erhobenen Daten wurde ein  $\text{CO}_2$  Austausch zwischen Wasseroberfläche und Atmosphäre von  $-3.6 \text{ Tg C a}^{-1}$  für das SBUS und  $14.8 \text{ Tg C a}^{-1}$  für das NBUS berechnet. D.h. gemeinsam beträgt der  $\text{CO}_2$ -Fluß vom Ozean in die Atmosphäre  $11.2 \text{ Tg C a}^{-1}$  was zeigt, dass die Schelfe des BUS wie auch die der anderen Auftriebsgebiete als  $\text{CO}_2$  Quellen fungieren. Die  $\text{CO}_2$ -Flüsse des BUS übersteigen sogar die Hochrechnungen, die für die Auftriebsgebiete im Pazifik und Indischen Ozean ermittelt wurden ( $8 \text{ Tg C a}^{-1}$ ) (Larouelle et al. 2010).

Weiterhin wurden von uns N<sub>2</sub>O-Profile gemessen, die in die Validierung von Modellergebnissen eingeflossen sind. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Benguelauftriebssystem auch ca. 4 - 8% zu den globalen marinen N<sub>2</sub>O Emissionen beitragen kann (Nevison et al. 2004; Gutknecht et al. 2012).

#### Literatur:

- Gutknecht, E., I. Dadou et al. (2012). Nitrogen transfers and sea-air N<sub>2</sub>O fluxes in the upwelling off Namibia within the oxygen minimum zone: a 3-D model approach. *Biogeosciences Discussions* 8, 3537-3618, 2011
- Kuypers, M. M. M., G. Lavik et al. (2005). Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation. *PNAS* 102(18): 6478-6483.
- Lavik, G., T. Stührmann et al. (2009). Detoxification of sulphidic African shelf waters by blooming chemolithotrophs. *nature letters* 457: 581-585.
- Mohrholz, V., C. H. Bartholomae et al. (2008). The seasonal variability of the northern Benguela undercurrent and its relation to the oxygen budget on the shelf. *Continental Shelf Research* 28: 424-441.
- Nevison, C. D., Lueker T. J. et al. (2004). Quantifying the nitrous oxide source from coastal upwelling. *Global Biogeochemical Cycles* 18:1-17.
- Plas, A. K. v. d., P. M. S. Monteiro et al. (2007). Cross-shelf biogeochemical characteristics of sediments in the central Benguela and their relationship to overlying water column hypoxia. *African Journal of Marine Science* 29(1): 37-47.
- Santana-Casiano, J. M., M. Gonzalez-Davila et al. (2009). Carbon dioxide fluxes of the Benguela upwelling system during winter and spring: A comparison between 2005 and 2006. *Deep-Sea Research II* 56: 535-541.

### *III.3. Fortschreibung des Verwertungsplans*

Das Hauptziel des Teilprojektes Biogeochemie war es die Funktionsweise der biologischen Pumpe zu untersuchen und die Emissionen von Treibhausgasen abzuschätzen. Dabei konzentrierten wir uns auf Nährstoffe und den anorganischen Kohlenstoff. Es stellte sich jedoch auch heraus, dass die Rolle des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) bisher noch nicht untersucht wurde. Zudem zeigten sich Verständnislücken bezüglich der Interaktion von karbonat- und nicht karbonatschaligem Plankton sowie die Rolle von Flüssen aus dem Sediment in die Wassersäule unter den stark variierenden Sauerstoffbedingungen der Bodenwasserschichten auf dem Schelf. Um diese Fragen sowie die ausgeprägte interannuelle Variabilität untersuchen zu können, wurde die Fortführung dieses Projektes beantragt.

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

keine

#### IV. Kurzfassung des Schlussberichts

##### **Teilprojekt 4 - Biologie**

Das Hauptziel des Teilprojektes Biologie war die Erfassung der Verbreitungsmuster wichtiger pelagischer Fischarten im nördlichen Benguela Auftriebssystem und ihrer Abhängigkeit zur klimatischen/hydrographischen Veränderungen über die Zeit sowie die Bestimmung der trophischen Stellung der Arten und ihr Energieumsatz im pelagischen Nahrungsnetz. Folgende Ergebnisse können festgestellt werden:

1. Die Verbreitungsmuster der Fischlarven verschiedener Arten haben sich über die letzten Jahre kontinuierlich verändert, indem sich einerseits die Dominanzen der Arten und außerdem die Verbreitungsschwerpunkte bei einigen Arten nach Süden verschoben haben.
2. Wachstum und Kondition der Fischlarven sind von Umweltbedingungen wie Temperatur und Auftriebsereignissen (erhöhtes Nährstoff-/Futterangebot) abhängig.
3. Sardellen- und Stöckerlarven unterscheiden sich nicht signifikant bei der Nahrungszusammensetzung, sowohl makroskopisch als auch in der stabilen Isotopenzusammensetzung. Beide Arten nehmen vergleichbare trophische Stufen im Nahrungsnetz ein.
4. Stöckerlarven zeigen mit zunehmender Größe einen Vorteil beim Größenspektrum ihrer Nahrung. Sie erreichen schneller die entsprechende Körpergröße, um höherenergetische calanoide Copepoden aufzunehmen und haben dadurch einen energetischen Vorteil gegenüber Arten (Sardellen), die kleinere und darum mehr Nährtiere jagen müssen.
5. Stöckerlarven und juvenile zeigen sich relativ robust gegenüber niedrigen Sauerstoffkonzentrationen. Dies scheint ihnen einen wesentlichen Vorteil gegenüber clupeiden Arten für das Überleben bei erhöhten Temperaturen und niedrigeren Sauerstoffkonzentrationen zu geben.

##### **Teilprojekt 4 - Biogeochemie**

Das Hauptziel des Teilprojektes Biogeochemie war es die anorganische Nährstoff- und Kohlenstoffchemie des Benguela Auftriebssystems (BUS) zu charakterisieren, um Rückschlüsse auf die Funktionsweise der biologischen Pumpe und das Ausmaß der Emissionen von Treibhausgasen zu machen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass

1. die Effizienz der biologischen Pumpe dadurch gesteigert wird, dass das Wachstum von karbonatschaligen Organismen in dem korrosiven Auftriebswasser an der Küste unterdrückt wird,
2. Stickstoffverluste aufgrund von Anammox kompensiert werden durch den verstärkten Eintrag von N aus dem tropischen Atlantik sowie durch einen verstärkten Eintrag von Phosphat aus den organik-reichen Sedimenten des NBUS,
3. das BUS ca. 4 - 8% zu den globalen marinen N<sub>2</sub>O-Emissionen beitragen kann,
4. der angolische Schelf aufgrund von Flusseinträgen und erhöhten Wassertemperaturen als CO<sub>2</sub>-Quelle fungiert (ca. 1.3 Tg C a<sup>-1</sup>),
5. der Schelf des nördlichen BUS ebenfalls als CO<sub>2</sub> Quelle fungiert, während der Schelf im SBUS trotz Flusseinträgen und Auftrieb als CO<sub>2</sub>-Senke wirkt,
6. die entgegengesetzte Funktionsweise des S und NBUS im Wesentlichen durch die Eigenschaften der Zentralwassermassen getrieben zu sein scheint, die im Süden einen erhöhten Anteil an Nährstoffen enthalten, die noch nicht biologisch verwertet

wurden,

7. ein verstärkter Eintrag von Wassermassen aus dem Süden auch die CO<sub>2</sub>-Emission in den Zeiten des stärksten Auftriebs im NBUS zu reduzieren scheint und somit die Saisonalität abschwächt,

8. entgegen bisheriger Annahmen CO<sub>2</sub> vom Schelf des BUS in die Atmosphäre emittiert wird und der Fluss von insgesamt 11.2 Tg C a<sup>-1</sup> die der anderen großen Auftriebsgebiete im Pazifik und Indischen Ozean (8 Tg C a<sup>-1</sup>) übersteigt.

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 5**

BMBF-Verbundprojekt GENUS

Teilprojekt 5

**Die Rolle des Meso- und Makrozooplanktons in der Stoffflussdynamik des südwestafrikanischen Auftriebsgebietes: Interaktionen Schelfmeer - Hochsee**

**Schlussbericht für die Projektlaufzeit  
01.03.2009 - 30.04.2012**

**Dr. R. Koppelman, Dr. B. Martin & Dr. B. Christiansen**  
Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft  
Große Elbstraße 133, 22767 Hamburg  
koppelman@uni-hamburg.de

## **I. Kurzdarstellung**

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

Zooplanktonorganismen spielen als Konsumenten und Produzenten organischen Materials eine wichtige Rolle in den marinen Ökosystemen. Sie transportieren Kohlenstoff über die Nahrungskette zu höheren trophischen Ebenen, tragen aber auch zum Transport von Kohlenstoff in größere Wassertiefen bei. Außerdem tragen sie über ihren Energiestoffwechsel zur Remineralisation von organisch gebundenem Kohlenstoff bei. Das GENUS-Teilprojekt 5 trägt zur Untersuchung lateraler und vertikaler Stoffflüsse auf das Zooplankton und die Rückkoppelungseffekte auf biogeochemische Stoffflüsse im hochproduktiven Benguela Auftriebsgebiet bei. Dazu wurde Zooplanktonmaterial, das während vier Schiffs-Expeditionen gewonnen wurde, hinsichtlich des Bestands, der Zusammensetzung, der trophischen Ebenen und des Kohlenstoffumsatzes untersucht.

Im Detail werden im GENUS-Teilprojekt 5 Summenparameter des Zooplanktons in verschiedenen Größenklassen und spezielle Gruppen (z.B. Coelenterata, Pteropoda, Chaetognatha, Thaliacea) untersucht. Detailuntersuchungen zu anderen Gruppen werden von anderen Teilprojekten des Verbundprojekts geleistet. Weiterhin sollte der laterale Transport von lebender und toter organischer Substanz von den Auftriebsgebieten in die offene See sowie in tiefere, mesopelagische Wasserschichten erfasst werden. Die Ergebnisse gehen in die im Verbundprojekt durchzuführende Synthese und Modellierung ein und werden der Öffentlichkeit in Form von Publikationen zur Verfügung gestellt.

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

Das Projekt ist Teil des BMBF Verbundprojekts GENUS (Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System). Das Gesamtvorhaben GENUS zielt auf einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. Es soll einen Beitrag zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) leisten durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde. Das GENUS-Projekt ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als „Affiliated Project“ und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten. GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungsk Kooperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training,

1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, seit 2002) auf, an denen deutsche Wissenschaftler des ZMT, IOW und der Universität Bremen in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren. Zur Fortsetzung und Intensivierung der Zusammenarbeit fand unter der Koordination von GENUS eine enge Kooperation mit der Benguela Current Commission sowie des namibischen NATMIRC zum Aufbau meereswissenschaftlicher Expertise (Capacity Building) bei jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Region statt.

Die Untersuchungen des Teilprojekts 5 tragen zum Verständnis der Rolle klimarelevanter Stoffe in den Ozeanen bei und stehen in engem Zusammenhang zu den Untersuchungen im Rahmen von IMBER: "Welche Rolle spielt das Zooplankton in biogeochemischen Kreisläufen und wie werden diese Mechanismen durch globale Umweltveränderungen beeinflusst?" Zudem lassen sich die Ergebnisse in Relation zu anderen großen Auftriebsgebieten setzen und versprechen einen Erkenntnisgewinn im Forschungsfeld "Die Zukunft der Meere". Durch die Einbindung in internationale Großprojekte und nationale Initiativen und durch die Unterstützung durch das BMBF und der Universität Hamburg waren alle Voraussetzungen gegeben, um das Projekt erfolgreich durchzuführen.

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

Bereits im März/April 2008 wurde eine Untersuchung mit dem Forschungsschiff *Maria S. Merian* (MSM07) als Pilot-Studie begonnen. Während dieser Expedition erfolgten erste Analysen des Probenmaterials. Weiteres Material wurde sofort nach dem Start des Projekts ausgewertet. Nach dem offiziellen Projektstart am 01.03.2009 wurde zunächst Frau Dr. Bettina Martin als Projektwissenschaftlerin eingestellt. Die beantragte und bewilligte Investition eines 1 m<sup>2</sup>-MOCNESS (Multiple Opening and Closing System and Environmental Sensing System) wurde bestellt. Die Lieferung erfolgte jedoch erst im November 2009. Während der Projektlaufzeit wurden drei weitere Expeditionen in das Untersuchungsgebiet durchgeführt: RV *Africana* im Dezember 2009, RV *Discovery* im September 2010 und FS *Maria S. Merian* im Januar/Februar 2011. Die quantitative Bearbeitung aller Proben ist abgeschlossen, die taxonomische Untersuchung der Proben dreier Ausfahrten ist weitestgehend erfolgt. Über den Fortschritt des Projekts wurde ständig während nationaler und internationaler Tagungen berichtet und diskutiert. Weiterhin wurde ein kurzer Videobeitrag erstellt, der die Arbeiten im Teilprojekt 5 zeigt (<http://genus.mmkh.de/2011/11/23/meso-und-makrozooplankton-im-benguela-system/>).

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

Um Flüsse organischen Materials innerhalb der Organismengemeinschaften des Zooplanktons zu beschreiben, ist die Kenntnis über die trophische Stellung der Massenarten bzw. bestimmter Größenklassen notwendig. In den letzten zwei Dekaden wurden ozeanische Stoffflüsse im Projekt JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) intensiv untersucht. In anderen Projekten (z.B. GLOBEC, Global Ocean Ecosystem Dynamics) wurde die Transferleistung zwischen trophischen Ebenen behandelt. Wenig ist zurzeit über die Wechselwirkungen zwischen Ökosystemkomponenten, biogeochemischen und physikalischen Prozessen und den direkten und indirekten anthropogenen und klimatischen Veränderungen sowie damit verbundenen Rückkopplungen bekannt. Diese Mechanismen sollen im südwestafrikanischen Auftriebsgebiet untersucht werden.

Auftriebsgebiete sind hochproduktive Ozeanregionen in denen nährstoffreiches Tiefenwasser in die euphotische Zone aufsteigt und eine hohe Primärproduktion induziert. In der Regel sind diese Regionen durch kurze Nahrungsketten (großes Phytoplankton - herbivores Zooplankton - Fische) gekennzeichnet, die aber durch klimatische Effekte und/oder hohen Fischereidruck zu langkettigen Nahrungsketten und -netzen mit z.B. hohen Beständen an gelatinösen Organismen führen können. Auch im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet (vor Namibia) hat vermutlich ein entsprechender Ökosystemwechsel stattgefunden. Während in früheren Jahren Fische sehr abundant waren, traten in den letzten Jahren vermehrt gelatinöse Organismen auf. Inwieweit diese

Veränderungen klimatisch bedingt sind bzw. sich über den Stoffhaushalt auf das Klimasystem auswirken ist Gegenstand dieser Untersuchungen.

Es wurden keine Konstruktionen und Verfahren für die Durchführung des Vorhabens verwendet, für die Schutzrechte angemeldet sind. Es werden laufend Literaturrecherchen zum Untersuchungsthema in ASFA und Web of Science durchgeführt. Es wurden keine Ergebnisse in der neueren Literatur gefunden, die die Durchführung des Vorhabens beeinflusst haben.

## I. 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Enge Absprachen und wissenschaftliche Kooperationen bestehen mit dem norwegischen NORAD-Projekt und dem internationalen IMBER-Projekt. Eine gemeinsame Veröffentlichung mit Wissenschaftlern des NatMIRC (Namibia) ist in Planung.

Die erhobenen Daten wurden in die Datenbank PANGAEA überführt und werden nach der Veröffentlichung der geplanten Publikationen öffentlich zur Verfügung stehen.

## II. Eingehende Darstellung

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

Mit Hilfe der bewilligten Zuwendung konnte die Zusammensetzung und Verteilung des Zooplanktons im Untersuchungsgebiet in hoher räumlicher Auflösung für verschiedene Jahre und Jahreszeiten untersucht werden. Die quantitative Aufarbeitung der genommenen Proben ist abgeschlossen. Insgesamt wurden 84 Stationen mit dem MOCNESS beprobt (Abb. 1). Die erzielten Ergebnisse werden nachfolgend im Einzelnen kurz dargestellt.

#### *Biomasse*

Um den Kohlenstoff im Untersuchungsgebiet von 17°S bis 23°S zu quantifizieren, wurde das Gebiet in die Bereiche Schelf, Kontinentalhang und angrenzender Ozean eingeteilt. Es wurde der Zooplanktonbestand je nach Wassertiefe berechnet: von 0-50 bzw. 0-150 m über dem Schelf, von 0-200 bzw. 0-900 m über dem Hang und von 0-1000 m auf den ozeanischen Stationen gemittelt (Ausnahme war die ozeanische Station auf dem Kunene River Transekt, auf dem wegen Problemen mit der Winde nur eine Tiefe von 650 m befischt werden konnte). Die Nassgewichte wurden anhand von Literaturwerten in g C umgerechnet.

Der gemittelte Biomasse des Zooplanktons über dem Kontinentalschelf vor Namibia (33700 km<sup>2</sup>) betrug 775 000 t (= 43 \* 10<sup>9</sup> g C), über dem Kontinentalhang (34900 km<sup>2</sup>) 1 145 000 t (= 64 \* 10<sup>9</sup> g C) und im angrenzenden ozeanischen Bereich (48200 km<sup>2</sup>) 1 131 000 t (= 63 \* 10<sup>9</sup> g C). Insgesamt liegen im Jahresmittel ca. 3 Mill. t Zooplanktonbiomasse vor. Ausgehend von einer 10%igen Transfereffizienz zwischen trophischen Ebenen und einem im Jahresmittel vorhandenen "steady state" der einzelnen Trophie-Ebenen, reicht der Zooplanktonbestand aus um insgesamt einen Bestand von 300 000 t planktivorer Fische und Cnidaria im nordnamibischen Auftriebsgebiet zu versorgen. Unbekannt ist aber zurzeit noch in welchem exakten Verhältnis diese beiden Gruppen vorliegen. Während planktivore Fische wiederum von größeren räuberischen Fischen gefressen werden, stellen Cnidaria mehr oder weniger ein Endglied der Nahrungskette dar. Nur wenige Tiere wie Meeresschildkröten ernähren sich von diesen Organismen; aber auch der jetzt im Gebiet häufige Gobiidae (*Sufflogobius bibarbatus*) zählt zu den Quallenfressern.

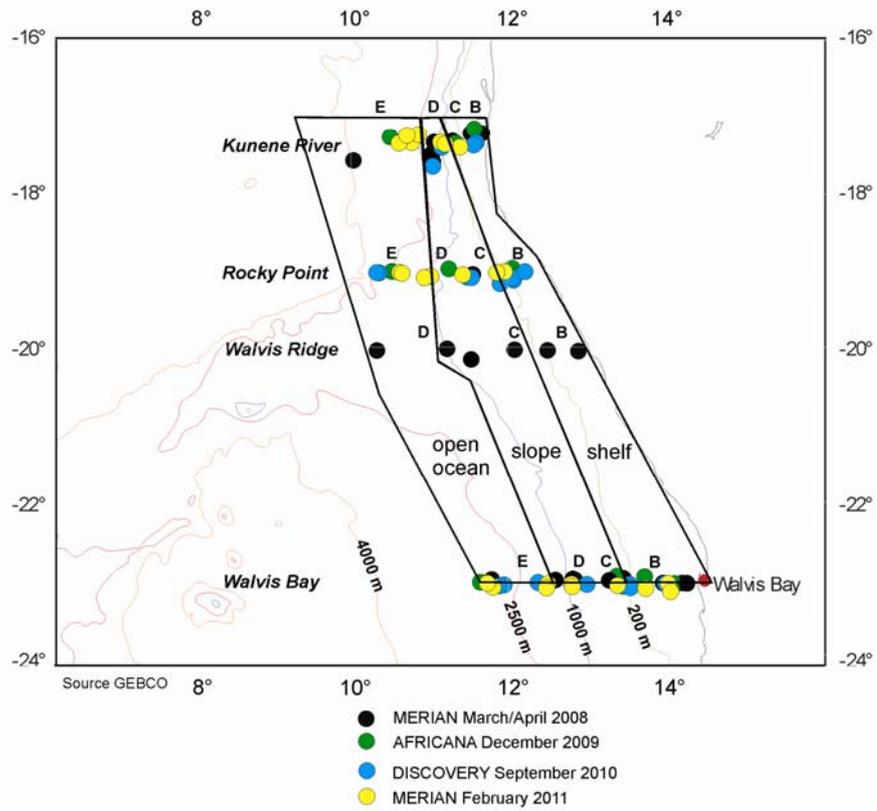


Abb 1. Die während der vier Ausfahrten mit dem MOCNESS besuchten Stationen und die Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Schelf, Kontinentalhang und angrenzender offener Ozean.

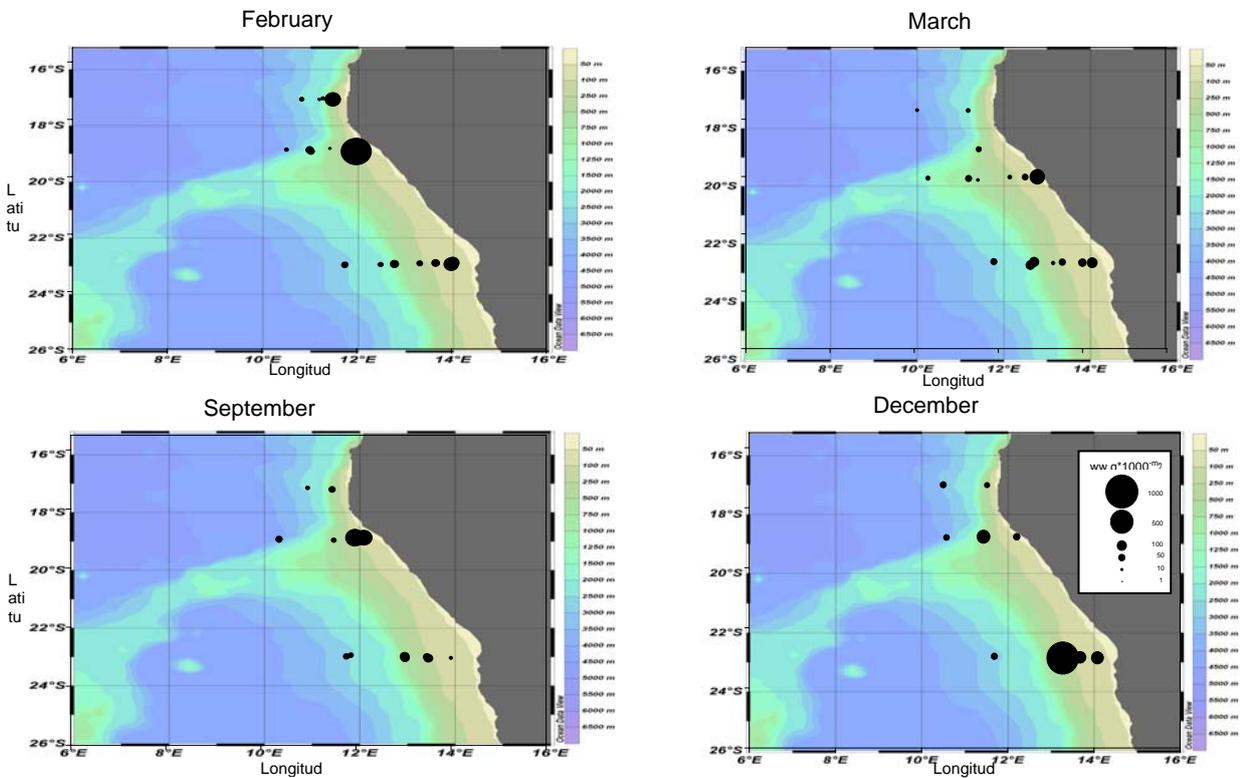


Abb. 2 Verteilung der Zooplanktonbiomasse in den oberen 200 m während der vier Forschungsreisen.

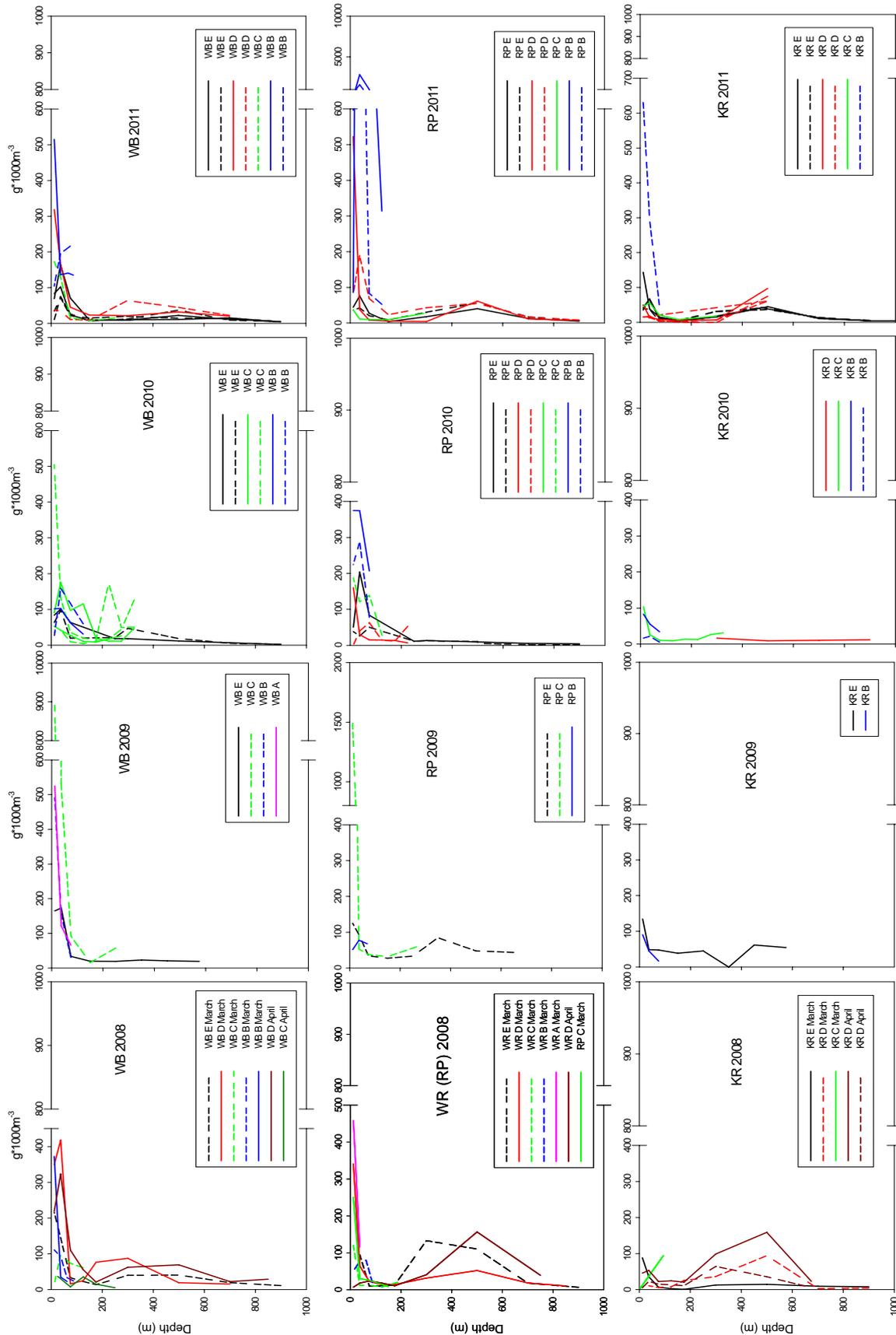


Abb. 3: Tiefenverteilung der Biomasse von Zooplankton der Größe 0.5-5 mm in Nassgewicht ( $g \cdot 1000m^{-3}$ ) auf drei Transekten während vier Forschungsfahrten. WB = Walvis Bay Transekt, WR = Walvis Ridge Transekt bzw. RP = Rocky Point Transekt KR = Kunene River Transekt. Wassertiefe A = < 100 m, B = 100 - 250 m, c = 250 – 500 m, d = 500 – 1500 m, e = > 1500 m. Unterbrochene Linie = Tagfänge, durchgezogene Linie = Nachtfänge.

Die synoptischen Aufnahme des Zooplanktons während der Forschungsfahrten MSM07, Africana, Discovery 356 und MSM17/3 zeigte hohe Biomassewerte während des Südsommers (Dezember 2009 und Februar 2011) auf dem Schelf bzw. über der Schelfkante vor Walvis Bay und Rocky Point. Die Biomassewerte auf den ozeanischen Stationen dagegen waren konstant über die Jahre und Jahreszeiten.

Die Verteilung der Zooplanktonbiomasse über die Tiefe entsprach nicht dem Bild, welches von tagesperiodisch wandernden Organismen erwartet wird. So fand sich in 2008 eine Biomassenspitze zwischen 200 und 600 m auf allen Transekten unabhängig von der Tageszeit (Abb. 3). Ein ähnliches Bild, nur weniger ausgeprägt, fand sich auch in 2011.

Zusammen mit den aus den oberen 200 m erhobenen Daten (Abb. 2) ergibt sich folgendes Bild: die bei einem Auftriebsereignis produzierte Zooplanktonbiomasse wird zum größten Teil nicht im Oberflächenwasser Richtung Westen über die Schelfkante hinaus exportiert. Große Teile des Bestandes scheinen sich in größere Tiefen über dem Hang absinken zu lassen. Es ist anzunehmen, dass dadurch ein Teil des Bestandes mit dem Auftriebswasser zurück auf das Schelf transportiert wird, und somit ein aktiver Retentionsmechanismus besteht.

### *Verteilung der Größenklassen*

Die klassische Nahrungskette in hochproduktiven Meeresgebieten, zu denen das namibische Auftriebsgebiet zählt, ist kurz und besteht aus großen Primärproduzenten wie Diatomeen, gefolgt von großen Primärkonsumenten (Copepoden), kleinen pelagischen Fischarten und Prädatoren wie Thunfische, Meeressäuger und Vögel, wobei im Auftriebsgebiet vor Namibia Cnidaria in Konkurrenz zu Fischen an Bedeutung gewinnen.

In nährstoffärmeren Gebieten findet sich in der Regel ein verzweigtes Nahrungsnetz mit kleineren Primärproduzenten und –konsumenten. Eine Arbeitshypothese im TP5 war, dass sich die Verteilung der Größenklassen des Zooplanktons mit der Alterung des Auftriebswassers von größeren Organismen auf dem Schelf hin zu kleineren Größenklassen über dem Kontinentalhang und im angrenzenden ozeanischen Bereich entwickelt. Diese Hypothese konnte nicht bestätigt werden. Die Größenverteilung in den meisten Proben war wie folgt: Tiere der Größen 1-2 und 2-5 mm machten zusammen 60-80% der Zooplanktonbiomasse aus, solche der Größe 0.5 – 1 mm 15 – 30%, die kleinste Größenklasse (< 0.5 mm) trug mit weniger als 10% (Abb. 4) zur Gesamtbiomasse bei. Abweichungen von dieser generellen Verteilung fanden sich in den oberen 200 m auf den meisten Schelfstationen wie vor Walvis Bay in 2008, vor Rocky Point in 2009, 2010 und 2011 sowie vor Kunene in 2010 und 2011. Außerdem auf der Schelfkante vor Walvis Bay in 2009, vor Rocky Point 2008 und 2009. Dieses abweichende Muster setzte sich vor Walvis Bay und Kunene in den nach offshore angrenzenden Stationen im tieferen Wasser fort. Diese Resultate deuten, wie schon die Verteilung der Biomasse, darauf hin, dass sich Teile des Zooplanktonbestandes über der Schelfkante und dem Kontinentalhang in größere Tiefen verlagern.

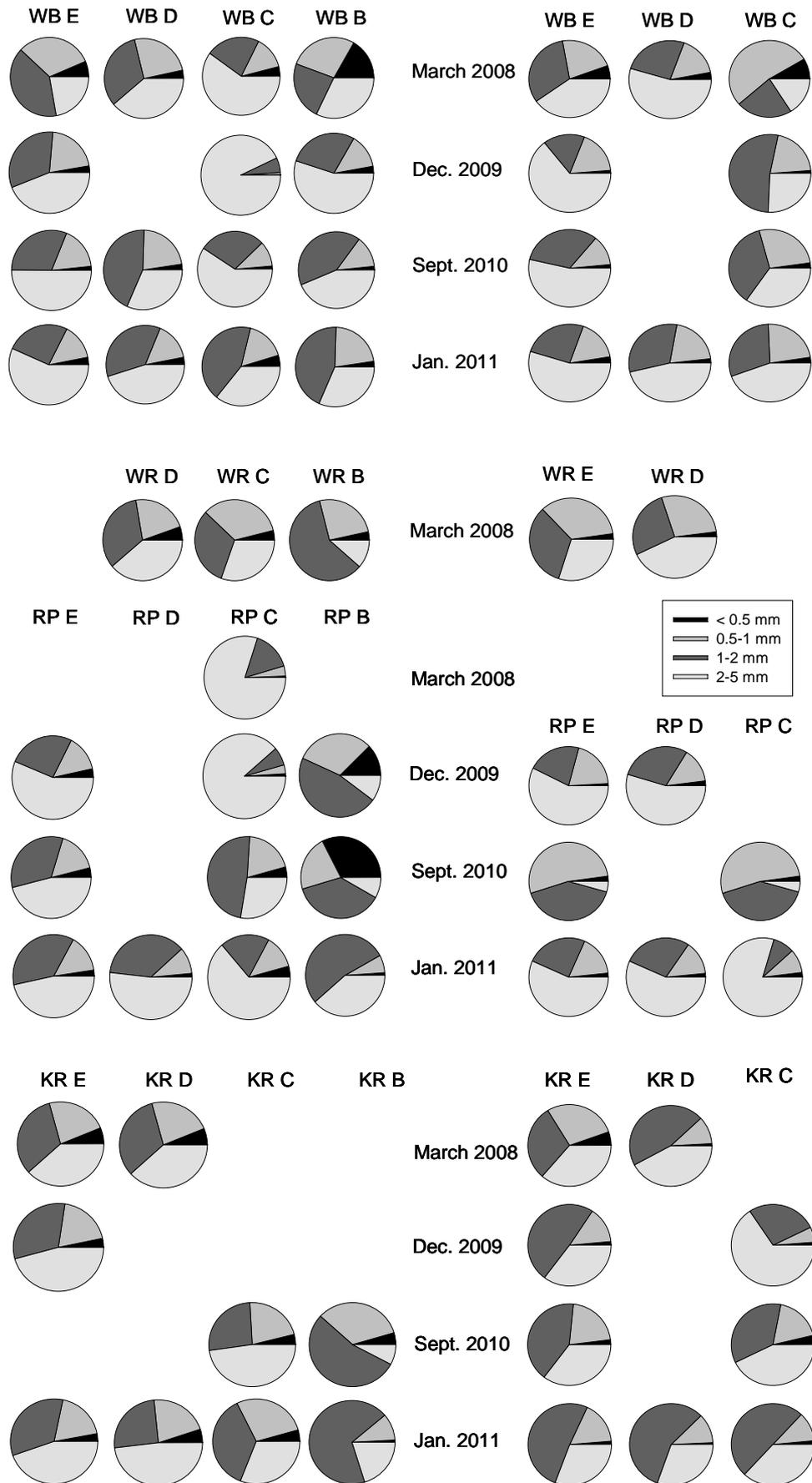


Abb. 4: Verteilung der Zooplankton-Größenklassen auf den untersuchten Transekten. links: in den oberen 200 m rechts: unterhalb 200 m. WB=Walvis Bay WR=Walvis Ridge RP=Rocky Point KR = Kunene River. B (A+B) = Schelf. C = Schelfkante. D = Hang. E = Ozeanisch.

### Taxonomische Untersuchungen

Die taxonomischen Untersuchungen wurden für die ersten drei Fahrten durchgeführt, die Interpretation der Daten konnte für einige Organismengruppen bereits abgeschlossen werden. Eine Publikation zur taxonomischen Zusammensetzung der Hauptgruppen des Zooplanktons sollte im Laufe dieses Jahres fertig gestellt werden. An zahlreichen Stationen war der calanoide Copepode *Calanoides carinatus* dominant. Dieser Organismus wird von TP6 detailliert untersucht.

Im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten wurde die Zusammensetzung, Verteilung und ökologische Bedeutung spezieller Gruppen (Coelenterata, Pteropoda, Chaetognatha, Thaliacea) untersucht (Abb. 5-8). Erste Analysen der Coelenterata haben gezeigt, dass Scyphozoa (*Chrysaora* sp.), Leptomedusae (*Aequorea* sp.) und Trachymedusae im System sehr häufig sind. Innerhalb der Pteropoda wurde ein besonderes Augenmerk auf die Thecosomata gelegt. Diese Organismen ernähren sich mit Hilfe eines Schleimnetzes und filtern Sestonpartikel und Phytoplankton. Sie tragen stark zur Partikelbildung und dem Partikelfluss bei. Aufgrund ihres Aufbaus mit einer Aragonitschale sind diese Organismen bei einer zunehmenden Ozeanversauerung besonders gefährdet. Chaetognatha wiederum sind carnivore Organismen, die im Plankton als Top-Prädatoren von großer Bedeutung sind. Thaliacea sind tönnchenförmige Organismen, die große Mengen Phytoplankton filtern können. Bei manchmal massenhaftem Auftreten halten sie den Phytoplanktonbestand niedrig und entziehen so anderen herbivoren Tieren die Nahrungsgrundlage. Sie produzieren relativ große und schnell sinkende Fäzes, die den Partikelfluss in größere Tiefen beschleunigen können.

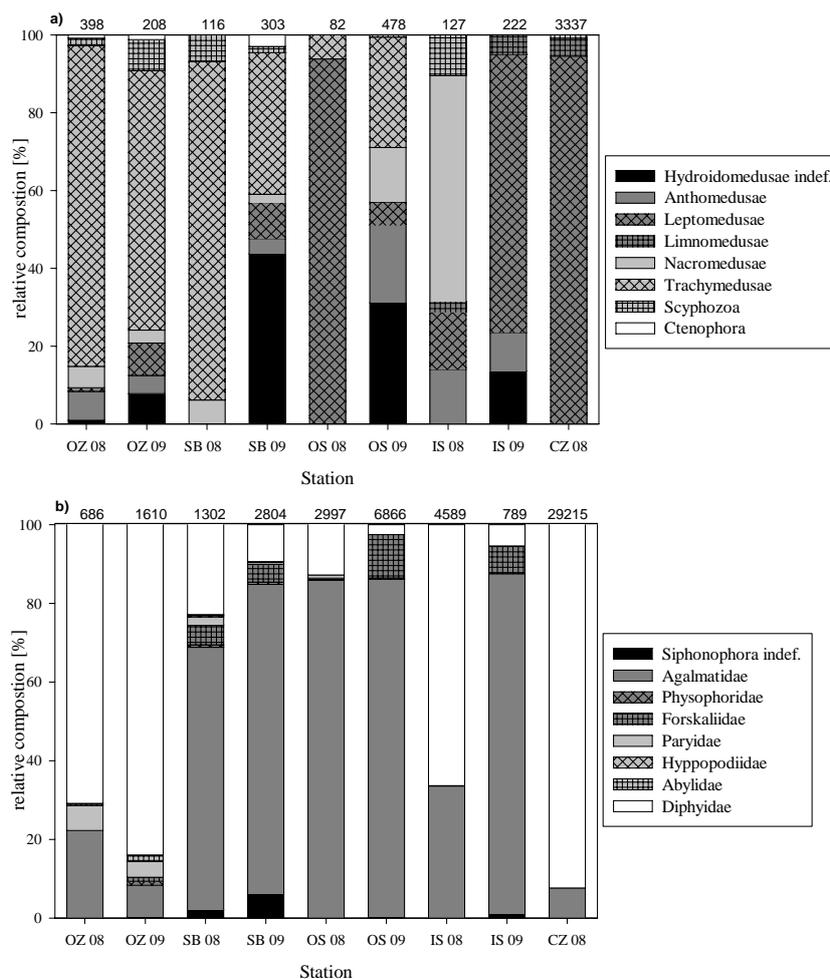


Abb. 5: Relative Zusammensetzung der Medusae(a) und Siphonophora (b) an verschiedenen Stationen auf dem Walvis Bay Transket im März 2008 und Dezember 2009. Oberhalb der Säulen sind die Konzentrationen in Ind. oder Teile der Siphonophora per 1000 m<sup>3</sup> dargestellt. OZ = Ozeanisch; SB = Schelfkante; OS = äußerer Schelf; IS = innerer Schelf; CZ = Küstenzone.

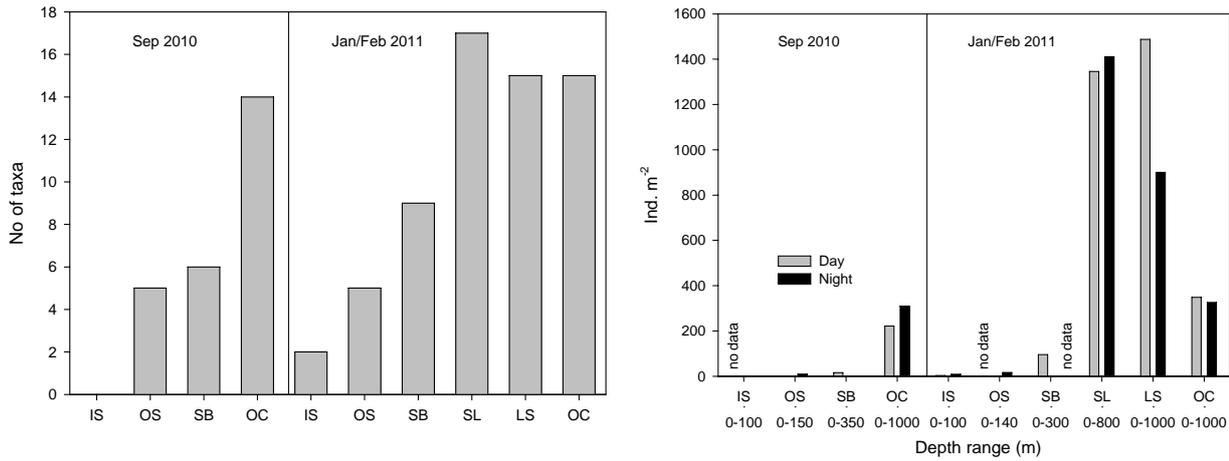


Abbildung 6: Anzahl der Thecosomata-Arten und deren Häufigkeit auf einem Schnitt von der Küste bis in die offene See vor Walvis Bay, Namibia, während zweier unterschiedlicher Jahreszeiten. IS = innerer Schelf; OS = äußerer Schelf; SB = Schelfkante; SL = Hang; LS = unterer Hang, OC = Ozeanisch.

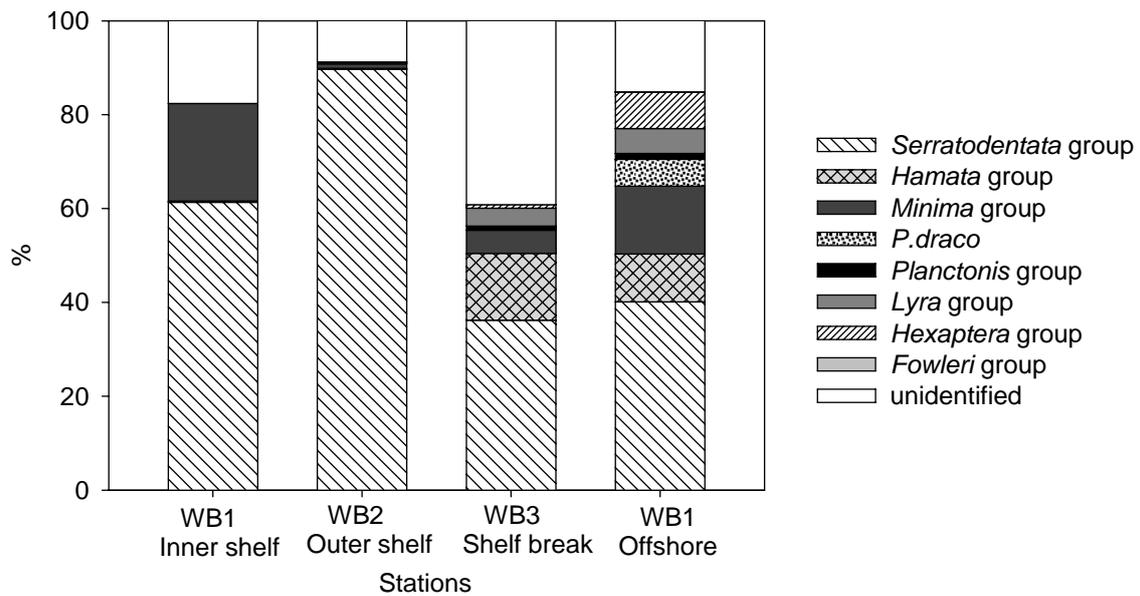


Abb. 7: Relative Zusammensetzung der Chaetognatha Gruppen an vier Stationen des Walvis Bay Transects.

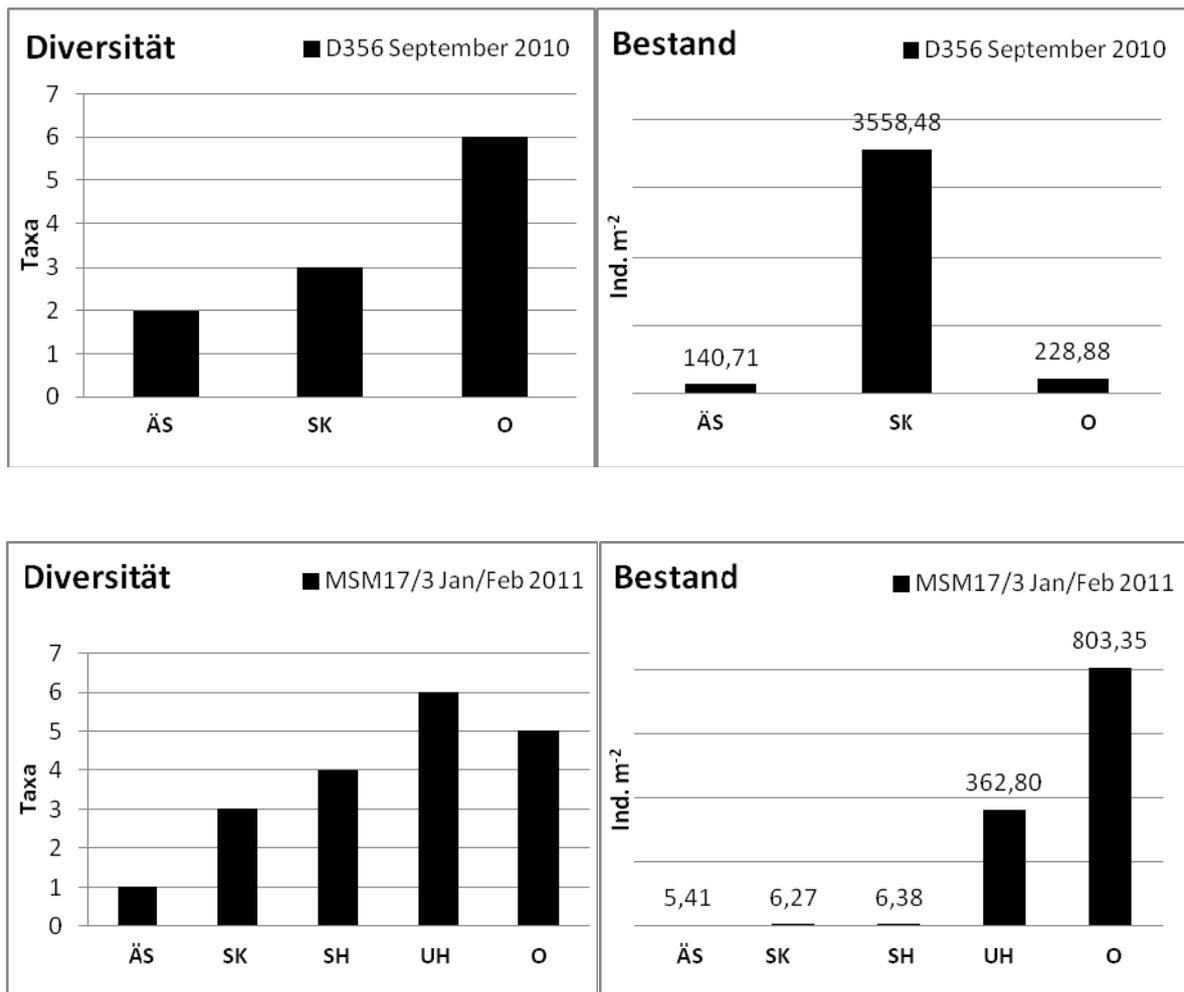


Abb. 8: Links ist jeweils die Artendiversität der Thaliacea auf einem Schnitt von der Küste in den offenen Ozean dargestellt, rechts die ausgerechneten Bestände (Ind. m<sup>2</sup> bis 200 m Tiefe) an den jeweiligen Stationen. Oben: September 2010 (Südfrühling), unten: Januar/Februar 2011 (Südsommer). ÄS: äußerer Schelf; SK: Schelfkante; SH: Schelfhang; UH: unterer Hang; O: offener Ozean

### Technische Entwicklungen

In Kooperation mit der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg wurde ein Planktonprobennehmer für ein am Institut vorhandenes Tauchgerät (Remotely Operated Vehicle) entwickelt und gebaut. Die Arbeiten sind abgeschlossen, die Implementierung in das Unterwassersystem steht noch aus.

### Stand des Vorhabens im Vergleich zur Antragsplanung

Die meisten geplanten Arbeiten sind abgeschlossen (Tab. 1). Lediglich einige der zeitaufwändigen taxonomischen Analysen sowie der Abschluss einer Bachelorarbeit sind noch offen. Die Synthese der Ergebnisse innerhalb des Verbundprojekts soll als nächstes erfolgen. Auf diesen Datensätzen basierende Publikationen befinden sich in Vorbereitung oder sind geplant (siehe Kapitel II. 6.).

Tabelle 1: Geplante und durchgeführte Arbeiten

<b>Deliverable</b>	<b>Due</b>	<b>State</b>	<b>Remarks</b>
<b><i>Merian cruise 2008</i></b>			
Biomass	Jul 2009	abgeschlossen	
Abundance, Composition	Okt 2010	abgeschlossen	
O <sub>2</sub> -demand, ETS	Feb 2010	gestrichen	Literaturdaten und TP6
Trophic position, Stable Isotopes	Apr 2010	abgeschlossen	
<b><i>Africana cruise 2009</i></b>			
Biomass	Oct 2010	abgeschlossen	
Abundance, Composition	Nov 2011	abgeschlossen	
Trophic position, Stable Isotopes	Jul 2010	abgeschlossen	gelatinöse Organismen
<b><i>Discovery cruise 2010</i></b>			
Biomass	Mar 2011	abgeschlossen	
Abundance, Composition	GENUS II	in Bearbeitung	
O <sub>2</sub> -demand, ETS	Apr 2011	gestrichen	Literaturdaten und TP6
Trophic position, Stable Isotopes	Jul 2011	abgeschlossen	
<b><i>Merian cruise 2011</i></b>			
Biomass	Nov 2011	abgeschlossen	
Abundance, Composition	GENUS II	in Bearbeitung	
O <sub>2</sub> -Demand, ETS	Oct 2011	gestrichen	Literaturdaten und TP6
Trophic position, Stable Isotopes	Aug 2011	abgeschlossen	
ROV - Observations	Apr 2011	abgeschlossen	
<b><i>Theses</i></b>			
Coelenterata	Oct 2010	abgeschlossen	M.Sc. Sarina Jung
Zooscan	Oct 2010	abgeschlossen	B.Sc. Tina Kesselring
Upwelling filaments	May 2011	abgeschlossen	B.Sc. Sarah Fitzek
Pteropoda	Sep 2011	abgeschlossen	B.Sc. Björn Kullmann
Zooplankton and backscatter	Sep 2011	abgeschlossen	M.Sc. Richard Horaeb
Chaetognatha	Dec 2011	abgeschlossen	M.Sc. Karolina Bohata
Thaliacea	Mar 2012	abgeschlossen	B.Sc. Pawel Kassatov
ROV Zooplankton Sampling System	May 2012	abgeschlossen	Dipl.-Ing. Tobias Pehmöller
ROV-Video analyses	Sep 2012	in Vorbereitung	B.Sc. Johanna Werner

## II. 2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

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

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

Alle Arbeiten erscheinen notwendig und angemessen, um das Projektziel zu erreichen.

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

Das Gesamtvorhaben GENUS zielt auf einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. Es soll einen Beitrag zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) leisten durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten

Meeresregionen der Erde. Das GENUS-Projekt ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als „Affiliated Project“ und zielt auf die gemeinsamen Aktivitäten von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten standen bei der Konzeption des Teilprojekts 5 nicht im Vordergrund der Erwägungen und sind derzeit nicht erkennbar.

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

Es werden laufend Literaturrecherchen zum Untersuchungsthema in ASFA und Web of Science durchgeführt. Es wurden keine Ergebnisse in der neueren Literatur gefunden, die die Durchführung des Vorhabens wesentlich beeinflusst haben.

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

Bohata K, Koppelman R (in Vorbereitung) Chaetognatha of the Namibian Upwelling Region: taxonomy, distribution and trophic position.

Koppelman R, Kullmann B, Lahjanar N, Maritin B, Mohrholz V (eingereicht) Onshore-offshore distribution of Thecosomata (Gastropoda) off Namibia and their stable carbon and nitrogen isotopic composition.

Koppelman R, Jung S, Kassatov P, Möllmann C (geplant) Herbivorous Thaliacea and carnivorous Coelenterata - two contrasting elements of gelatinous zooplankton in the Benguela Current Region.

Martin B, Koppelman R, Mohrholz V (in Vorbereitung) Zooplankton biomass distribution and onshore offshore gradients in the Namibian upwelling area.

Martin B, Koppelman R (geplant) Composition and distribution of Zooplankton main groups in the Namibian upwelling area.

Master und Bachelorarbeiten:

Bohata K (2011) Biomass, abundance and trophic position of Chaetognatha species in the Namibian Upwelling Region. M.Sc. thesis, University of Hamburg. 45 + 23 pp

Fitzek S (2011) Distribution of zooplankton in relation to an upwelling filament off Namibia. B.Sc. thesis, Universities of Cologne and Hamburg, 51 pp.

Horaeb R (2011) Zooplankton distribution in the Namibian Upwelling Region: A comparison of net catches with ADCP measurements. M.Sc. thesis, University of Bremen. 65 pp.

Jung AS (2010) Abundance and trophic position of gelatinous and half-gelatinous organisms in the Namibian Upwelling Region. M.Sc. thesis, University of Hamburg. 49 pp.

Kassatov P (2012) Untersuchung zur Verteilung und Ökologie der Thaliacea im Südostatlantik vor Namibia. B.Sc. thesis, Universität Hamburg. 47 pp.

Kesselring T (2010) Analyse von Zooplanktonproben aus dem namibianischen Auftriebsgebiet mit Hilfe eines automatisierten Analyseverfahrens (Zooscan). B.Sc. thesis, Universität Hamburg. 35

pp.

Kullmann B (2011) Untersuchung zur Verteilung, ökologischen Rolle und trophischen Stellung der Thecosomata (Gastropoda: Ophistobranchia) auf einem Schnitt von der Küste in die offene See im Auftriebsgebiet vor Namibia, B.Sc. thesis, University of Hamburg, 34 pp.

Pehmöller T (2012) Entwicklung und Konstruktion eines Planktonprobennehmers und Implementierung in ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug (ROV). Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und Universität Hamburg. 76 pp.

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 6**

**Förderkennzeichen: 03F0497E**

**Verbundvorhaben**

**GENUS**

**Einfluss des Klimawandels auf biogeochemische Zyklen und  
ökologische Prozesse im Schelfgebiet des Südostatlantiks**

**Teilprojekt 6:**

**Quantifizierung und Modellierung trophischer Interaktionen  
wichtiger Meso- und Makrozooplankter –  
der Beitrag calanoider Copepoden und Decapoden zum Kohlenstofffluss**

**Abschlussbericht**

Marine Zoologie  
Universität Bremen  
Postfach 330 440  
28334 Bremen

Teilprojektleiter: Prof. Dr. Wilhelm Hagen und PD Dr. Holger Auel

# **I Kurzdarstellung zu**

## **1 Aufgabenstellung**

Zu den Schwerpunkten des TP6 gehörte die Quantifizierung trophischer Interaktionen von Schlüsselarten innerhalb des Benguela-Küstenauftriebsgebiets mittels individueller Ingestions- und Stoffumsatzraten, die sich aus Respirationmessungen ableiten lassen, die Erforschung von Nahrungszusammensetzung und -präferenzen mithilfe trophischer Biomarker-Analysen sowie die Determination von Abundanz- bzw. Biomassedaten des Mesozooplanktons, um von den experimentell bestimmten individuellen Raten auf die Populationsumsätze hochrechnen zu können. Die Daten sind unmittelbar relevant für die Parametrisierung dieser Prozesse innerhalb von Energieflussmodellen. Die Felddaten wurden in ein Nahrungsnetzmodell eingeschleust, wobei die ECOPATH mit ECOSIM-Software (EwE) genutzt wird, um eine großskalige Abschätzung der trophischen Interaktionen und eine Übersicht über die Energieflüsse im nördlichen Benguela-Auftriebssystem zu erhalten.

## **2 Voraussetzungen**

Die entscheidende Voraussetzung für die Durchführbarkeit dieses Projekts war zunächst die logistische Gewährleistung der Probennahme im Auftriebsgebiet durch erfolgreiche Beantragung und Zugriff auf die entsprechenden Forschungsschiffe. Bei der Expeditionsplanung wurden die verschiedenen Interessen der unterschiedlichen Forschergruppen sorgfältig aufeinander abgestimmt und miteinander verzahnt. Wichtig für die weitere Datenerhebung im Teilprojekt war die Expertise in der Arbeitsgruppe Marine Zoologie u.a. bzgl. der taxonomischen Expertise und der langjährigen Erfahrung in der Ökophysiologie und Biomarker-Analytik.

## **3 Planung und Ablauf**

Innerhalb des Projektzeitraums wurden während drei Expeditionen Proben von verschiedenen Copepoden- und Decapodenarten gesammelt, um Untersuchungen an Lipiden, trophischen Biomarkern (Fettsäuren und stabile Isotope) sowie Enzymmessungen durchzuführen. Zudem wurde der Sauerstoffverbrauch der Tiere bestimmt.

Alle drei Expeditionen verliefen sehr erfolgreich und es konnten hinreichend viele Proben für die biochemischen und metabolischen Analysen gesammelt werden. Des Weiteren konnten insgesamt über 600 Respirationmessungen hauptsächlich an calanoiden Copepoden, aber

auch an Decapoden, auf den Expeditionen mit RRS Discovery (10.09.-13.10.2010) und FS Maria S. Merian (30.01.-07.03.2011) durchgeführt werden.

Innerhalb des Projektzeitraumes wurden eine Diplomarbeit und vier Masterarbeiten vergeben. Lena Teuber beendete ihre Diplomarbeit 2009 über „Größenabhängige Gemeinschaftsstrukturen und Ökologie von Zooplankton im Benguela-Küstenauftriebsgebiet“. Rodrigo Carballo bearbeitete 2010 in einer Masterarbeit das Thema „Biodiversität und Nahrungsökologie von pelagischen Decapoden im südöstlichen Atlantik“. 2011 wurde von einem namibischen Masterstudenten, Richard Horaeb, die Zooplanktonverteilung im namibischen Auftriebsgebiet untersucht, indem Netzfänge mit ADCP-Messungen verglichen wurden. Maya Bode stellte 2011 ihre Masterarbeit über „Metabolismus und physiologische Anpassungen von pelagischen Copepoden im Benguela-Ökosystem“ fertig. Im Frühling 2012 hat Francisco Souza Dias seine Masterarbeit über den Effekt von Auftriebsfilamenten auf die Zooplanktongemeinschaft und -verteilung begonnen.

In den letzten Projektmonaten wurden die Ergebnisse weiter ausgewertet und sie werden zurzeit in Form von Manuskripten ausgearbeitet. Ein Manuskript ist bereits eingereicht (siehe Kap. II.6: Veröffentlichungen).

Ergebnisse des Teilprojekts wurden auf dem 14. South African Marine Science Symposium (4.-7. April 2011) in Grahamstown, Südafrika, sowie beim Benguela Current Commission Annual Science Forum im Oktober 2011 in Swakopmund, Namibia, einem internationalen Kreis von Wissenschaftlern vorgestellt.

#### **4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Projekts**

Über trophische Interaktionen im Allgemeinen und den trophischen Interaktionen calanoider Copepoden und Decapoden im Speziellen ist im nördlichen Benguela Auftriebssystem, abgesehen von einigen Einzelergebnissen der dominanten Art *Calanoides carinatus*, nur wenig bekannt. Neben *Calanoides carinatus* sind weitere calanoide Copepodenarten, die sich teilweise sehr stark in ihrer Ernährungsweise unterscheiden, maßgeblich an der Gemeinschaftszusammensetzung des Mesozooplanktons im Küstenauftriebsgebiet beteiligt. Dazu gehören u.a. die omnivoren Arten *Pleuromamma* spp., *Metridia lucens* und *Aetideopsis carinata* sowie die räuberische *Euchaeta marina* (Loick et al. 2005, Auel & Verheye 2007). Neben calanoiden Copepoden wurde die Zooplanktonbiomasse im Untersuchungsgebiet während vorangegangener Forschungsreisen (AHAB 2004, Nansen 2007, Polarstern ANT XXIV/1 2007) durch verschiedene Decapodenarten dominiert, vor allem im küstenferneren Bereich. Gibbons (1999) listet mindestens 13 Decapodenarten der Großgruppen Penaeidea

und Caridea, die regelmäßig in höheren Abundanzen im Benguela-Auftriebsgebiet vorkommen. Über die Rolle von Decapoden im Ökosystem ist bisher nur sehr wenig bekannt.

## **Referenzen**

Loick N, Ekau W, Verheye HM (2005) Water-body preferences of dominant calanoid copepod species in the Angola-Benguela frontal zone. *Afr J Mar Sci* 27: 597-608.

Auel H, Verheye HM (2007) Hypoxia tolerance in the copepod *Calanoides carinatus* and the effect of an intermediate oxygen minimum layer on copepod vertical distribution in the northern Benguela Current upwelling system and the Angola-Benguela Front. *J Exp Mar Biol Ecol* 352: 234-243.

## **5 Zusammenarbeit**

Die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundes war sehr fruchtbar und intensiv, von der gemeinsamen Expeditionsplanung über die hervorragende Kooperation und gegenseitige Unterstützung an Bord der Expeditionsschiffe bis hin zur Auswertung und Diskussion der Ergebnisse im Anschluss an die Expeditionen.

### **Kooperationspartner außerhalb des Verbundes:**

Dr. Hans M. Verheye, DEA Kapstadt (Copepoden-Sekundärproduktion)

Prof. Dr. Sigrid Schiel, AWI Bremerhaven (Zooplankton-Biodiversität, CMarZ, CoML)

Prof. Dr. Gerhard Kattner, AWI Bremerhaven (Lipidbiochemie)

Dr. Rainer Kiko, IFM-GEOMAR Kiel (Respirationsmessungen)

## II Eingehende Darstellung zu

### 1 Ergebnisse im Einzelnen

#### Generelle Zielsetzung des TP6

Die Hauptziele des TP6 im Rahmen von GENUS I waren die Identifizierung von Copepoden- und Decapoden-Schlüsselarten und ihre Abundanzen und Biomassen sowie die Bestimmung ihrer Nahrungspräferenzen, trophischen Positionen und Energiebedürfnisse, um ihren Beitrag zum Kohlenstofffluss zu bestimmen und um ein Nahrungsnetzmodell des nördlichen Benguela-Küstenauftriebsgebiet zu erstellen.

- **Schlüsselarten und ihre Abundanzen**

Die neritische (Wassertiefe unter 200 m) und ozeanische (Wassertiefe über 200 m) Abundanz verschiedener Copepodenarten wurde an zehn Stationen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet bestimmt. Die Abundanzdaten stammen aus zwei verschiedenen Untersuchungsjahren, unterscheiden sich jedoch nicht signifikant voneinander.

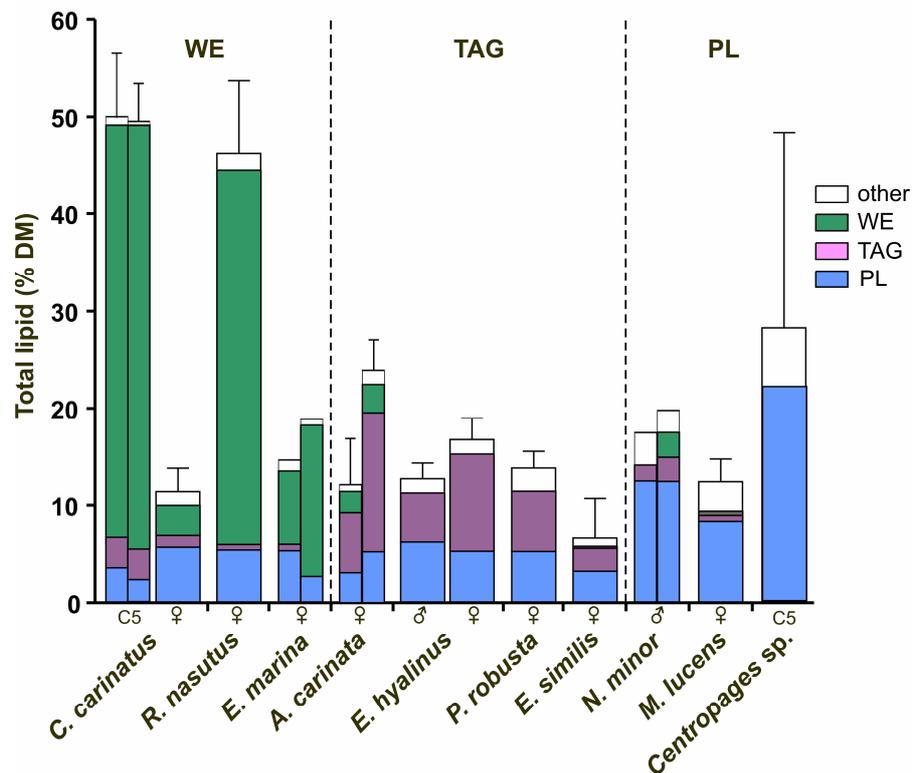
Unter den calanoiden Copepoden war *Calanoides carinatus* küstennah bis zu einer Wassertiefe von 200 m die dominante Art mit einer maximalen Abundanz von 15633 Ind. m<sup>-2</sup>. Die zweithäufigste Art war *Metridia lucens* (5867 Ind. m<sup>-2</sup>), gefolgt von *Rhincalanus nasutus* (271 Ind. m<sup>-2</sup>). Weitere Arten traten küstennah nur in sehr geringen Abundanzen unter 100 Ind. m<sup>-2</sup> oder gar nicht auf.

Die ozeanischen Stationen wurden durch in Diapause befindliche Copepoditstadien C5 von *Calanoides carinatus* dominiert mit einer maximalen Abundanz von 18839 Ind. m<sup>-2</sup>. *Aetideopsis carinata* erreichte eine ebenfalls hohe maximale Abundanz von 10045 Ind. m<sup>-2</sup>. *M. lucens* zeigte eine ähnliche ozeanische Abundanz (5060 Ind. m<sup>-2</sup>) verglichen mit ihrem neritischen Vorkommen. *R. nasutus* und *Pleuromamma robusta* sowie *Nannocalanus minor* wiesen maximale Abundanzen von 500-1200 Ind. m<sup>-2</sup> an den ozeanischen Stationen auf.

Decapoden traten hauptsächlich entlang des Kontinentalhanges und im offenen Ozean in mesopelagischen Tiefen auf. Sie wiesen eine relativ hohe Diversität auf (sechs Caridea- und sieben Penaeidea-Arten). *Sergestes* war die am häufigsten vorkommende Decapoden-Gattung.

- **Lebensstrategien der Schlüsselarten**

Die Lipidmenge und -zusammensetzung von Zooplanktonorganismen liefert Hinweise auf die Kondition der Organismen und im weiteren Sinne auch auf ihre Lebensstrategien. Manche Arten akkumulieren Wachsester als Speicherlipide; dies gilt als eine Anpassung, um lange Perioden ohne Nahrung oder mit ungünstigen Nahrungsbedingungen zu überstehen. Andere Arten hingegen benutzen Triacylglycerine als Kurzzeitspeicher, welche einfacher zu mobilisieren sind. Das Lipidspeicherungsmuster von zehn dominanten calanoiden Copepoden ist in Abb. 1 gezeigt. Hohe Lipidgehalte (bis zu 60% der Trockenmasse) mit einem hohen Wachsesteranteil wurden im Copepoditstadium C5 von *Calanoides carinatus* und Weibchen von *Rhincalanus nasutus* gemessen. Alle anderen Arten haben nur moderate Lipidmengen gespeichert mit Triacylglycerinen oder Phospholipiden als hauptsächliche Lipidklasse.

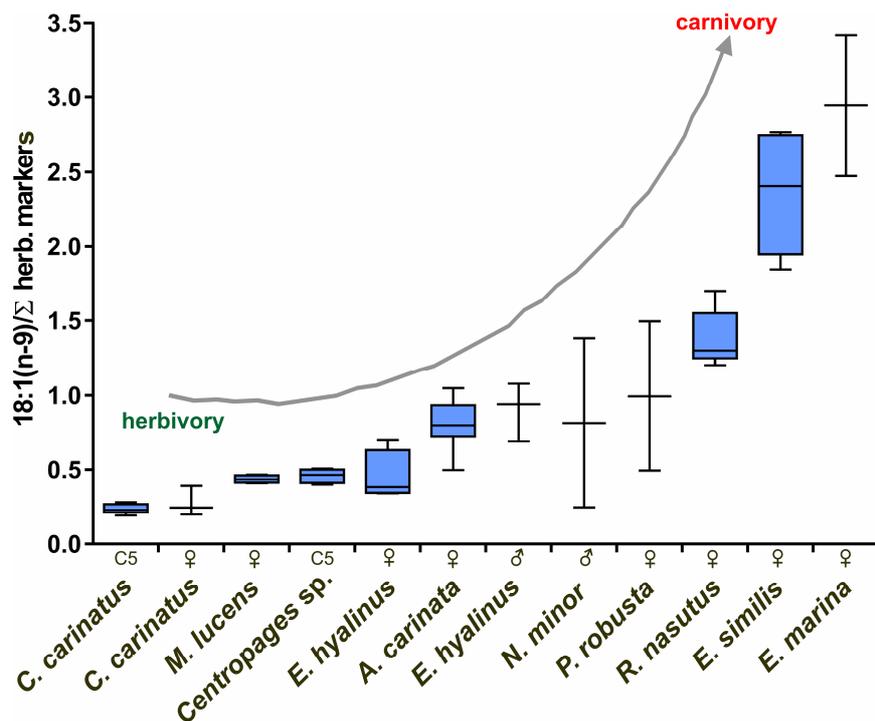


**Abb. 1:** Gesamtlipidgehalt (in % der Trockenmasse, % DM) und prozentuale Verteilung der Hauptlipidklassen zum Lipidgehalt in dominanten Copepoden (inkl. Standardabweichung). WE: Wachsester, TAG: Triacylglycerine, PL: Phospholipide. Im Fall von zwei Probenahmejahren (erster Wert: 2008, zweiter Wert: 2009) oder bei nur zwei Replikaten wurden beide Werte als geteilte Säule dargestellt.

- **Nahrungspräferenzen und trophische Position der Schlüsselarten**

Trophische Biomarker wie Fettsäuren und stabile Isotope erlaubten die Charakterisierung von verschiedenen Nahrungspräferenzen und trophischen Stufen von verschiedenen Copepoden- und Decapodenarten.

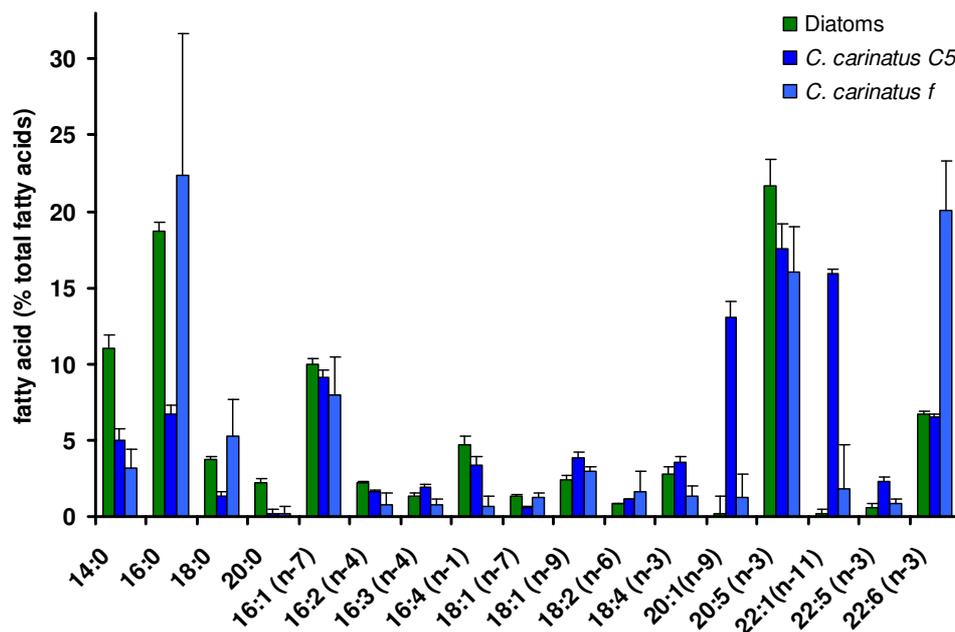
Fettsäurebiomarker zeigten verschiedene Grade von Herbivorie und Karnivorie (Abb. 2) sowie den Beitrag von Diatomeen gegenüber Dinoflagellaten in der Nahrung der Copepoden (Abb. 3). Das Fettsäure-Verhältnis  $18:1(n-9)/\Sigma$  herbivore Marker kann als Index für den Grad an Karnivorie zu Herbivorie verwendet werden. *Euchaeta marina* wies den höchsten Grad an Karnivorie auf mit signifikant höheren Fettsäure-Verhältnissen, im Vergleich zu allen anderen Copepodenarten (außer zu *Euchirella similis*). *Calanoides carinatus* zeigte hingegen den niedrigsten Karnivorieindex, ist also geprägt durch eine ausgeprägte herbivore Ernährungsweise (Abb. 2).



**Abb. 2:** Fettsäure-Verhältnis  $18:1(n-9)/\Sigma$  herb. Marker. Copepodenarten sind nach ihrer Ernährungsweise von karnivor zu herbivor angeordnet.

Der Vergleich der Fettsäurezusammensetzung von *C. carinatus* mit dem Fettsäuremuster von Diatomeen unterstützt die Bedeutung der Herbivorie für die Ernährung dieser Art. Beide Fettsäurezusammensetzungen waren ähnlich und die typischen Fettsäuren der Diatomeen,  $16:1(n-7)$  und  $20:5(n-3)$ , waren auch wichtige Bestandteile des Fettsäureprofils von *C. cari-*

*natus* (Abb. 3). Diese Ergebnisse betonen die Wichtigkeit von Diatomeen in der Copepoden-nahrung innerhalb von Auftriebsblüten. *Nannocalanus minor*, der im offenen Ozean vorkommt, zeigte erhöhte Werte des Dinoflagellaten-Fettsäuremarkers 18:4(n-3). Die Unterschiede in den Fettsäuremustern von *C. carinatus* und *N. minor* stimmen überein mit dem generellen Zonierungsmuster von Phytoplankton in Küstenauftriebsgebieten mit Diatomeen-dominierten Gemeinschaften nahe der Küste und hohen Dinoflagellaten-Abundanzen im offenen Ozean.



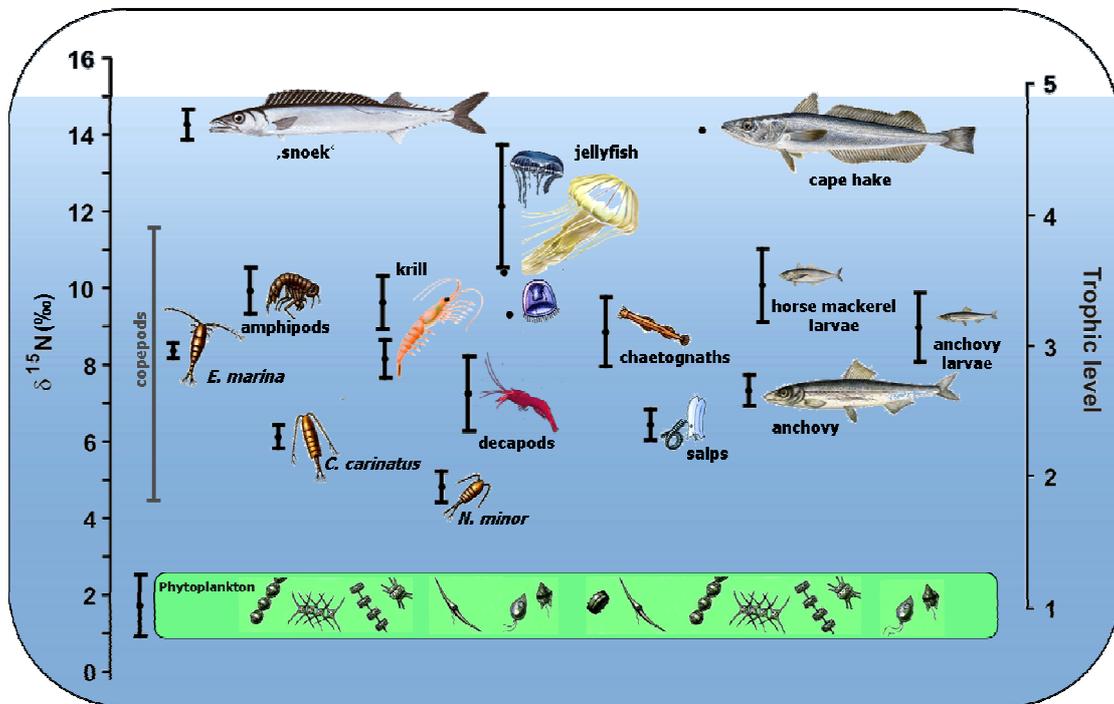
**Abb. 3:** Vergleich des Fettsäuremusters von Diatomeen und *C. carinatus*. C5: Copepodite C5, f: Weibchen.

Fettsäure- und stabile Isotopen-Biomarker liefern trophische Informationen über längere Zeitspannen von mehreren Wochen. Das Anwenden beider Methoden lieferte einen guten Überblick über die trophischen Beziehungen des Zooplanktons im nördlichen Benguela Küstenauftriebsgebiet.

Basierend auf den Analysen stabiler Isotope konnten verschiedene Taxa bezüglich ihrer trophischen Stufe charakterisiert werden (Abb. 4). Das Spektrum reichte von primär herbivoren Taxa (z.B. *C. carinatus*, *N. minor* und Salpen) über omnivore Copepoden (z.B. *Metridia lucens*, *Pleuromamma* sp. *Centropages* sp.) und Decapoden (z.B. *Sergestes armatus*) zu Räubern wie dem Copepoden *Euchaeta marina* und Amphipoden, Quallen sowie Fischen.

Überraschenderweise zeigten die calanoiden Copepoden eine große Spannweite von  $\delta^{15}\text{N}$ -Werten. Sie deckten nahezu den gesamten Bereich von  $\delta^{15}\text{N}$ -Verhältnissen ab, verglichen mit

allen anderen analysierten Taxa aus dem Benguela-Küstenauftriebsgebiet. Dies zeigt deutlich die große Bedeutung und die vielfältigen trophischen Positionen, die Copepodenarten im Nahrungsnetz des nördlichen Benguela-Auftriebsgebiets aufweisen.



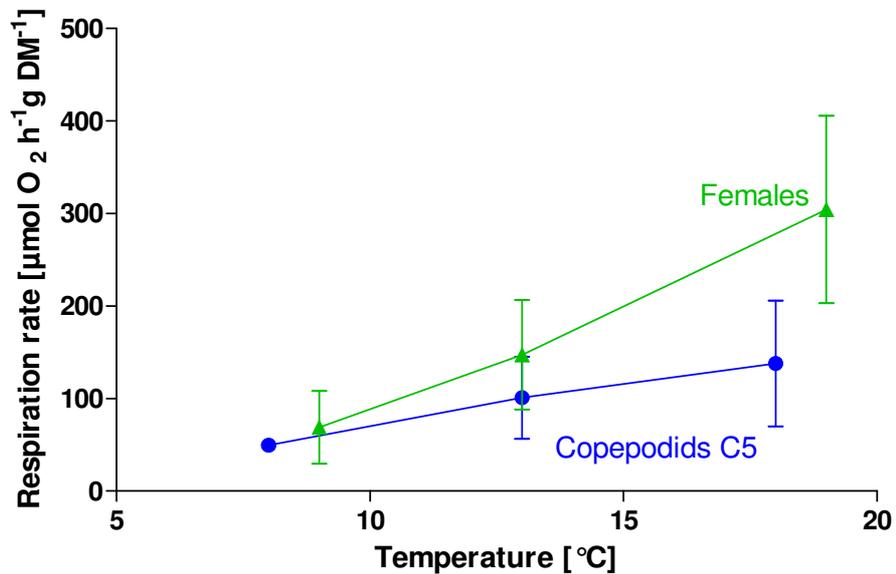
**Abb. 4:** Modell der trophischen Beziehungen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet basierend auf Analysen von  $\delta^{15}\text{N}$ -Isotopen.

- **Sauerstoffverbrauch der Schlüsselarten**

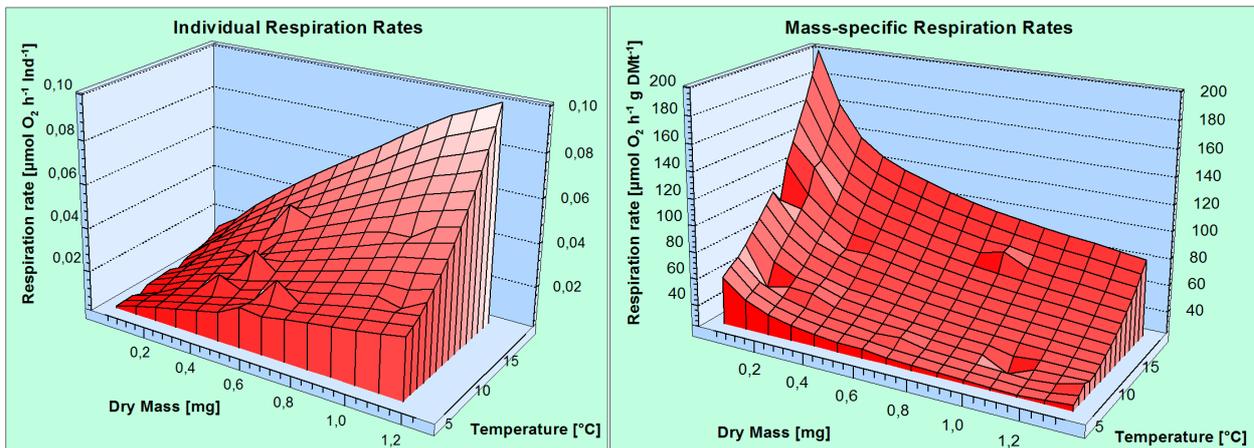
Der Sauerstoffverbrauch von verschiedenen Copepodenarten wurde mithilfe der Optoden-Respirometrie ermittelt, während die Respiration von Decapoden aufgrund ihrer Körpergröße über die Winkler-Titration bestimmt wurde. Über 600 individuelle Messungen an Copepoden und 14 Messungen an Decapoden verschiedener Arten und Stadien wurden durchgeführt. Das experimentelle Set-up der Optoden-Respirometrie präsentiert einen wichtigen Durchbruch in der ökophysiologischen Methodik, da der neu entwickelte Versuchsaufbau eine hohe Auflösung von individuellen Respirationsraten kleiner bis mittelgroßer Zooplanktonorganismen unter *in situ* Bedingungen ermöglicht.

Respirationsraten bei Umgebungstemperatur wurden an 18 Copepodenarten und drei Decapodenarten gemessen und variierten von 2,4 bis 34,9  $\mu\text{l O}_2 \text{ d}^{-1} \text{ Ind}^{-1}$  bei den Copepoden und von 2225 bis 2996  $\mu\text{l O}_2 \text{ d}^{-1} \text{ Ind}^{-1}$  bei den Decapoden. Die massenspezifischen Respirationsraten lagen zwischen 8,1 bis 194,7  $\text{ml O}_2 \text{ d}^{-1} \text{ g}_{\text{TM}}$  für Copepoden und 6,7 bis 35,6  $\text{ml O}_2 \text{ d}^{-1} \text{ g}_{\text{TM}}$  für Decapoden.

Von sechs Copepodenarten wurde zusätzlich der Sauerstoffverbrauch bei veränderten Temperaturen (*in situ* Temperatur  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) gemessen. Wie erwartet, stieg der Sauerstoffverbrauch mit steigender Temperatur. Der Einfluss der Temperatur auf die Respirationsrate von *C. carinatus* ist in Abb. 5 gezeigt.



**Abb. 5:** Massenspezifische Respirationsraten bei drei verschiedenen Temperaturen von Copepoditstadium C5 (blau) und Weibchen (grün) von *C. carinatus*.



**Abb. 6:** a) Individuelle und b) massenspezifische Respirationsraten von Copepoden, aufgetragen gegen Trockenmasse und Temperatur.

Umgebungstemperatur und Körpermasse waren die wichtigsten Faktoren, welche die Respiration beeinflusst haben. Sie eignen sich daher gut als Parameter um diese Prozesse für die Modellierung zu parametrisieren. Unter Anwendung einer multiplen Regressionsanalyse mit Temperatur und Körpermasse wurden die Respirationsraten und die Energiebedürfnisse

von Copepoden modelliert (Abb. 6). Bis zu zwei Drittel der Varianz in den Respirationsraten konnten durch Änderungen in Temperatur und Körpermasse erklärt werden.

### **Standardisierung der Sauerstoffverbrauchsraten**

Um Respirationsraten von Copepoden aus verschiedenen Tiefen direkt miteinander vergleichen zu können, ohne den Einfluss der Temperatur und Körpermasse, wurden die massenspezifischen Respirationsraten standardisiert auf eine für Küstenauftriebsgebiete übliche Temperatur von 15°C und eine mittlere individuelle Trockenmasse von 300 µg. Alle Copepodenarten zusammen zeigten eine standardisierte durchschnittliche massenspezifische Respirationsrate (SMR) von 55,9 ml O<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub><sup>-1</sup>. Generell konnten keine signifikanten Unterschiede der SMR zwischen den Copepodenarten festgestellt werden, mit Ausnahme von aktiven Individuen und Artgenossen in Diapause. Aktive Copepoditstadien C5 von *C. carinatus* besaßen eine signifikant höhere SMR von 80,6 ± 19,6 ml O<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub><sup>-1</sup> verglichen mit Copepoditstadien C5 in Diapause mit 23,8 ± 7,6 ml O<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub><sup>-1</sup> (t-test, p ≤ 0.0001). Dies entspricht einer metabolischen Reduktion von 71% während der Diapause in größerer Tiefe gegenüber den aktiven Tieren an der Wasseroberfläche. Ein intraspezifischer Unterschied in der metabolischen Aktivität konnte auch für *Rhincalanus nasutus* festgestellt werden. Weibchen, die bei 21°S gesammelt wurden, zeigten eine SMR von 81,3 ± 17,3 ml O<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub><sup>-1</sup>, während Weibchen von 23°S eine 62% niedrigere SMR (30,7 ± 15,6 ml O<sub>2</sub> d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub><sup>-1</sup>) aufwiesen.

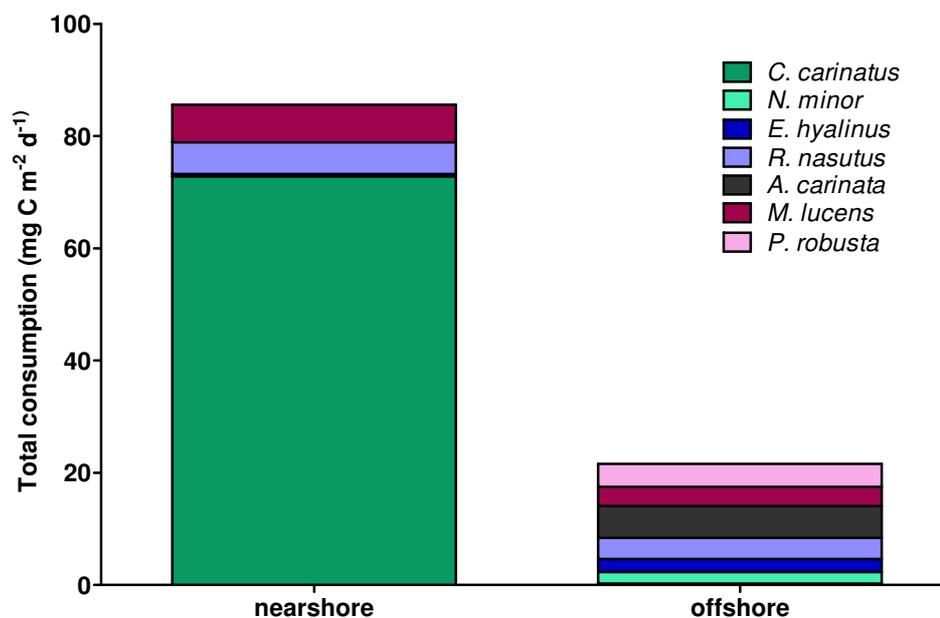
- **Energiebedürfnisse und Kohlenstoffkonsum der Schlüsselarten**

Um die Energiebedürfnisse von dominanten Copepoden und Decapoden aufzuzeigen, wurden die individuellen Sauerstoffverbrauchsdaten in Kohlenstoffeinheiten umgerechnet. Den niedrigsten Kohlenstoffbedarf von allen Copepoden besaß das Copepoditstadium C5 in Diapause von *Calanoides carinatus* (9 µg C d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub>). Für die Familie der eucalaniden und aetideiden Copepoden wurde ein durchschnittlicher Kohlenstoffbedarf von 18 µg C d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub> festgestellt. Die anderen Copepoden-Familien besaßen höhere Energiebedürfnisse von durchschnittlich 26 bis 34 µg C d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub> mit maximalen Werten für *Nannocalanus minor* (68 µg C d<sup>-1</sup> g<sub>TM</sub>).

Aus den individuellen Respirationsraten wurden zusätzlich die Ingestionsraten berechnet. Unter Einbeziehung der Abundanzdaten konnte anschließend der Gesamtkohlenstoffkonsum verschiedener Copepoden-Populationen ermittelt werden. Maximale Ingestionsraten von über 30 µg C d<sup>-1</sup> ind.<sup>-1</sup> wurden für *Neocalanus robustior*, *Euchirella splendens*, *Pleuromamma*

*xiphias* und *Rhincalanus nasutus* gemessen. *Aetideus armatus* und *Metridia lucens* besaßen die niedrigsten Ingestionsraten unter  $5 \mu\text{g C d}^{-1} \text{ ind.}^{-1}$ . Die neritische Copepodengemeinschaft zeigte einen Gesamtkohlenstoffkonsum von  $86,1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , während die ozeanische Gemeinschaft weitaus weniger Kohlenstoff konsumierte mit  $21,6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Abb. 7).

Die herbivore Art *C. carinatus* war küstennah verantwortlich für einen Anteil von 85% des Gesamtkonsums an Kohlenstoff. Wird von einer Primärproduktion von durchschnittlich  $1,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Barlow et al. 2009, Estrada & Marrase 1987, Heileman & O’Toole 2008) im nördlichen Benguela-Auftriebssystem ausgegangen, würde *C. carinatus* im Durchschnitt täglich 5% der Primärproduktion in neritischen Regionen konsumieren. Lokal kann der Konsum an der Primärproduktion aufgrund sehr hoher Abundanzen auf bis zu 60% ansteigen. Somit zählt *C. carinatus* zu den wichtigsten Primärkonsumenten im nördlichen Benguela-Auftriebssystem.



**Abb. 7:** Kohlenstoffkonsum neritischer und ozeanischer Copepodengemeinschaften.

- **Modellierung von trophischen Interaktionen mit ECOPATH und ECOSIM**

Mithilfe des EwE Software-Pakets wurde ein erstes Nahrungsnetz-Modell für das nördliche Benguela-Auftriebsgebiet, basierend auf veröffentlichten Daten von Biomasse, Ingestionsraten und Nahrungsspektren, entwickelt. Zurzeit werden die in GENUS I neu erhobenen Daten in das Modell eingegeben. Basierend auf den jetzt vorliegenden Erkenntnissen wird das Modelldesign in Hinblick auf die Auswahl der Schlüsselarten aus GENUS I überarbeitet.

**Zusammenfassend kann hervorgehoben werden, dass die Zielsetzung von TP6 in GENUS I vollständig erreicht wurde. Schlüsselarten wurden identifiziert und ihre Nahrungspräferenzen sowie Energiebedürfnisse wurden ermittelt und können in Ökosystem-Modelle eingespeist werden.**

## **Referenzen**

- Barlow R, Lamont T, Mitchell-Innes B, Lucas M, Thomalla S (2009) Primary production in the Benguela ecosystem, 1999–2002. *Afr J Mar Sci* 31: 97-101
- Estrada M & Marrasé C (1987) Phytoplankton biomass and productivity off the Namibian coast. In: Payne AIL, Gulland JA, Brink KH (eds) *The Benguela and comparable ecosystems*. *Afr J Mar Sci* 5: 347–356.
- Heileman S & O’Toole MJ (2008). Benguela Current: LME #29. In: Sherman K & Hempel G (eds) *The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world’s Regional Seas*. UNEP Regional Seas Report and Studies No. 182. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.

## **2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die im Rahmen der Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgegeben, der größte Teil diente der Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter, weitere Personalmittel wurden für die Bezahlung von studentischen Hilfskräften auf den Seereisen sowie während der Arbeiten im Labor verwendet. Reisemittel wurden wie vorgesehen für die Teilnahme an den Schiffsexpeditionen und einer Konferenz genutzt.

Mit Zustimmung des Projektträgers wurden anstelle des beantragten Mehrkanal-Optoden-Respirometers der Firma PreSens (Precision Sensing, Regensburg) mehrere Ein-Kanal-Optoden-Respirometer mit Temperaturkompensation desselben Herstellers zum gleichen Preis beschafft. Diese Änderung war notwendig, da auf den ausländischen Schiffen, die von GENUS I genutzt wurden (insbesondere RRS Discovery statt FS Meteor für die Reise 2010), nur begrenzt temperaturkonstante Laborräume zur Verfügung standen. Daher war eine systemintegrierte Temperaturkompensation für die Respirationmessungen erforderlich. Die für Investitionen zur Verfügung stehenden Mittel wurden wie beantragt und bewilligt zur Beschaffung eines Gaschromatographen eingesetzt. Verbrauchsmittel wurden wie geplant insbesondere für die umfangreichen und aufwendigen biochemischen Analysen verwendet.

Der Projektzeitraum wurde kostenneutral vom 01.03.2012 bis zum 30.04.2012 verlängert.

### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit**

Die von uns durchgeführten Forschungsarbeiten waren entsprechend unserem Antrag in vollem Umfang notwendig und angemessen, um die Ziele des Forschungsvorhabens zu erreichen.

### **4 Nutzen und Verwertbarkeit**

Da es sich um ein Projekt mit Fokus auf Grundlagenforschung handelte, waren keine direkten wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten avisiert worden. Diese haben sich aus dem Vorhaben auch nicht unmittelbar entwickelt.

Die Erkenntnisse dieses Projektes tragen sicherlich zum besseren Verständnis trophischer Interaktionen in Auftriebsgebieten und somit insgesamt zum ökologischen Wirkungsgefüge bei. Dies kann auch für ein optimiertes Management der lokalen Fischereiressourcen von Bedeutung sein.

### **5 Fortschritte anderer Stellen**

Fortschritte anderer Stellen bezüglich unserer Thematik wurden im Verlaufe des Projektes anhand der einschlägigen wissenschaftlichen Publikationen und im Rahmen von Konferenzen intensiv recherchiert. Es wurden jedoch keine Veröffentlichungen bekannt, die direkte Auswirkungen auf unser Forschungsvorhaben gehabt hätten oder die in diesem Projekt bearbeiteten Fragestellungen bereits beantwortet hätten.

### **6 Veröffentlichungen**

Wesentliche Erkenntnisse dieses Teilprojektes sind bereits auf zwei internationalen Konferenzen präsentiert worden (siehe Kap. I.3). Das Manuskript mit dem Titel „From simple links to complex food webs: Trophic interactions of calanoid copepods in the Benguela upwelling system“ wurde Anfang März 2012 bei der hochangesehenen Zeitschrift „Marine Ecology Progress Series“ zur Begutachtung angenommen. Drei weitere Manuskripte über den Sauerstoffverbrauch und die Energiebilanzen von calanoiden Copepoden, sowie die Ernährungsweise und metabolische Aktivität von Decapoden sind zurzeit in Vorbereitung und sollen demnächst bei internationalen Fachzeitschriften eingereicht werden.

# **Schlussbericht GENUS I**

## **Teilprojekt 7**

**Die trophische Stellung der Euphausiiden (Krill) in den Auftriebsgebieten des südwestafrikanischen Schelfs im Klimawandel**

**Schlussbericht für die Projektlaufzeit**

**01.03.2009 - 30.04.2012**

**Prof. Dr. Friedrich Buchholz und Dipl.-Biol. Thorsten Werner**

Sektion Funktionelle Ökologie, Abtlg. Evertebraten

Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung

Am Handelshafen 12

27570 Bremerhaven

**I. Kurzdarstellung**

**I. 1. Aufgabenstellung**

Die Studien der Ökophysiologie von Krillarten und ihres Vertikalwanderungs-Verhaltens - als bedeutende Komponente des Zooplanktons - stehen im direkten Zusammenhang mit den Themen internationaler Projekte zur Aufklärung von Nahrungsnetzbeziehungen, z.B. Helgoland-Foodweb-Project, GLOBEC, IMBER. Klimatisch bezogene Fragestellungen sollen daraus auf die Nahrungsnetzsituation im Benguelastromgebiet übertragen und die Ergebnisse verglichen werden. Besonderes Interesse erhalten die Arbeiten am Krill durch die Beobachtung, dass in anderen Meeresgebieten die Bestände zurückgehen (Atkinson et al. 2004) – Ähnliches hätte fatale Folgen auch im Benguela-Stromgebiet, vor allem vor dem Hintergrund des aktuellen klimatisch bedingten Wandels dieses Ökosystems. Die auch dort typische kurze Krill - Nahrungskette und deren Amplifikationspotential kann im Hinblick auf qualitative wie quantitative Veränderungen im Modellieransatz gut erfasst werden. Folgende zentrale Fragen wurden bearbeitet:

Welche Stellung haben die Krillarten, insbesondere *Euphausia hanseni*, im Nahrungsnetz und in den Stoffflüssen?

Wie passt der omnivore Krill Ernährung, Wachstum, Reproduktion und Energiestoffwechsel an die scharfen Temperatur-, Sauerstoff- und trophischen Gradienten an?

Welchen Einfluss hat dabei das stark gepulste Auftriebsregime?

In welcher Weise wird das ausgeprägte Vertikalwanderungs-Verhalten des Krills auf diese Faktoren eingestellt?

Welche Folgen hätten klimatisch bedingte Fluktuationen in den Krillbeständen für das Schelf-Ökosystem?

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

Das Projekt ist Teil des BMBF-Verbundprojekts GENUS (Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System). Das Gesamtvorhaben GENUS leistet einen Beitrag zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“. GENUS ist ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP. GENUS baut auf den etablierten regionalen Forschungskoperationen BENEFIT (Benguela Environment Fisheries Interaction and Training, 1997-2007) und BCLME (Benguela Current Large Marine Ecosystem, 2002-2007) auf, an denen deutsche Wissenschaftler des ZMT, IOW und der Universität Bremen in enger Kooperation mit Partnern aus der Region (MCM Südafrika, NatMIRC Namibia, INIP Angola) beteiligt waren. Zur Fortsetzung und Intensivierung der Zusammenarbeit sind diese Partner im Projekt GENUS eingebunden. Teile des Programms waren außerdem in die internationalen Initiativen zur Erfassung und Erforschung der marinen Biodiversität CoML (Census of Marine Life) und CMarZ (Census of Marine Zooplankton) integriert und tragen so zu einem tieferen Verständnis der marinen Biodiversität auf globaler Ebene bei.

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

Im März/April 2008 fand bereits eine Pilot-Studie mit dem Forschungsschiff *Maria S. Merian* (MSM07) statt. Nach dem Projektstart am 01.03.2009 wurde zunächst Dipl. Biol. Thorsten Werner als Doktorand eingestellt. Während der Projektlaufzeit wurden drei weitere Expeditionen in das Untersuchungsgebiet durchgeführt: RV *Africana* im Dezember 2009, RV *Discovery* im September 2010 und FS *Maria S. Merian* im Januar/Februar 2011. Die taxonomische und quantitative Bearbeitung der wichtigsten Proben ist abgeschlossen. Über den Fortschritt des Projekts wurde während nationaler und internationaler Tagungen berichtet. Mit dem Publikationsprozess wurde frühzeitig begonnen.

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

Von grundsätzlichem Interesse ist die Frage, wie die Sekundärproduzenten sich auf die Auftriebspulse einstellen. Hier kann der unmittelbare Vergleich der unterschiedlich gepulsten nördlichen und südlichen Systeme Aufschluss geben. Bekannt ist bereits, dass Häutung- und Wachstum von Nordischem Krill durch Phytoplankton-Blüten präzise synchronisiert werden und diese physiologische Synchronisation auch anhält. Die Frage ist, wie sich Krill und andere Zooplankter in einem mehrfach gepulsten System im Benguela-Stromgebiet verhalten. Krill kann als Modellorganismus für den biologischen Vergleich in Schelfmeeren dienen. In umfangreichen Untersuchungen zur Ökologie des Benguela(/Angola) – Auftriebssystems wurden die Euphausiiden bereits als zentrale Komponente der Zooplankton-Gemeinschaften behandelt. Allerdings gibt es bisher keine detaillierten Studien von Wachstum, Reproduktion und Energiestoffwechsel. Diese betrifft besonders den Zusammenhang mit Sauerstoffmangel- und Temperaturtoleranzen. Die Wirkung dieser Faktoren – zusammen mit Abhängigkeiten vom trophischen Regime – sind notwendig, zu untersuchen, da die Euphausiiden ausgesprochene Vertikalwanderer sind und daher täglich scharfe Gradienten in dieser Hinsicht überwinden müssen. Arbeiten an Krill in der Antarktis und im Nordatlantik, einschließlich der Randmeere, liegen vor, insbesondere zur Lebensgeschichte wie Wachstum und Reproduktion wie auch physiologische Anpassungen an das Hydro-Klima im Bezug auf Temperatur, Sauerstoffbedarf und Ernährung. Der Antarktische Krill, *Euphausia superba*, diente als strikt polarer Kontrast und wurde einer Krillart gegenübergestellt, die von arktischen bis warmen Gewässern vorkommt, von der Barentssee bis in die Ägäis und zu den Kapverdischen Inseln, der Nordische Krill, *Meganyctiphanes norvegica*. Gefördert wurden diese Arbeiten von der DFG und der EU,

Es wurden keine Konstruktionen und Verfahren für die Durchführung des Vorhabens verwendet, für die Schutzrechte angemeldet sind. Es werden laufend Literaturrecherchen zum Untersuchungsthema in ASFA und Web of Science durchgeführt. Es wurden keine Ergebnisse in der neueren Literatur gefunden, die die Durchführung des Vorhabens beeinflusst haben.

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

Enge Absprachen und wissenschaftliche Kooperationen bestehen mit dem norwegischen NORAD-Projekt und dem internationalen IMBER-Projekt. Eine gemeinsame Veröffentlichung mit Wissenschaftlern des DEA, Kapstadt ist im Druck, weitere, z.B. mit NatMIRC (Namibia)

sind in Planung. Die erhobenen Daten wurden in die Datenbank PANGAEA überführt und werden nach dem Erscheinen der geplanten Publikationen öffentlich zur Verfügung stehen.

## **II. Eingehende Darstellung der Ergebnisse**

Das nördliche Benguela-Auftriebsgebiet ist ein poly-gepulstes System mit häufigen Phytoplanktonblüten im Jahresverlauf. Sekundärproduzenten, wie der Krill, müssen sich auf diese Ereignisse einstellen und physiologische, biochemische und ökologische Anpassungen an die hohe Variabilität in einem solchen System aufweisen. Da die meist omnivoren Euphausiiden in diesem Auftriebsgebiet die Zooplankton-Gemeinschaft dominieren können, haben sie eine besondere Stellung in den neritischen und pelagischen Nahrungsnetzen, sowohl als Konsumenten als auch als Nahrungsquellen für höhere trophische Ebenen. Als ausgesprochene Vertikalwanderer tragen sie erheblich zu den vertikalen Stoffflüssen bei und müssen in dieser Hinsicht Anpassungen an die starken Sauerstoff- und Temperaturgradienten in der Wassersäule entwickelt haben. Kenntnisse über Krill können aufgrund der kurzen „Krill-Nahrungskette“, seiner hohen Abundanz und Biomasse, seiner Indikatorfunktion für verschiedene Wassermassen und seiner hohen Sauerstoff-Mangelresistenz wichtige Aufschlüsse über klimatisch bedingte Fluktuationen und ihre Auswirkungen auf das Gesamt-Ökosystem des nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet liefern.

### **- Generelle Zielsetzung des TP7:**

Die Hauptziele des Teilprojektes 7 im Verbundprojekt GENUS I waren die Analyse der Stellung dominanter Krillarten im Nahrungsnetz und in den Stoffflüssen im Nord-Benguela System. Des Weiteren die Bestimmung der Abundanzen und Biomassen dieser Arten im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet, sowie deren physiologischen, biochemischen und ökologischen Anpassungen in Bezug auf Ernährung, Wachstums, Reproduktion und Energiestoffwechsel an die starken Temperatur-, Sauerstoff- und trophischen Gradienten in der Wassersäule. Weitere Ziele waren die Untersuchung des Einflusses dieser Gradienten auf das Vertikalwanderungsverhalten der Krillarten und deren Beitrag zu den vertikalen Stoffflüssen. Die gewonnen Daten sollten als Grundlage für Modelle des Nahrungsnetzes und der Stoffflüsse im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet dienen und somit auch Aussagen über klimatisch bedingte Fluktuation in den Krillbeständen für das Schelf-Ökosystem ermöglichen.

## II.6 Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Publikationsprozess

Zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse des Teilprojektes 7 wurden auf einer nationalen (Crustaceologen Tagung, 07.-10.04.2011, Regensburg) und einer internationalen Konferenz (Benguela Current Commission, 17.-19.10.2011, Swakopmund Namibia) präsentiert. Eine eingereichte Publikation mit dem Titel „*Thermal constraints on the respiration and excretion rates of krill, Euphausia hanseni and Nematoscelis megalops, in the northern Benguela upwelling system off Namibia*“ wurde von der internationalen Fachzeitschrift *African Journal of Marine Science* akzeptiert und befindet sich zur Zeit im Druck. Ein weiteres Manuskript „*Diel vertical migration behaviour in Euphausiids of the Northern Benguela Current: Seasonal adaptations to food availability and strong gradients of temperature and oxygen*“ ist vor kurzem bei der Fachzeitschrift *Journal of Plankton Research* eingereicht worden. Weitere Manuskripte sind in Vorbereitung und werden demnächst bei internationalen Fachzeitschriften eingereicht (s.u.).

### - Biodiversität

Während der Forschungsreisen mit den Forschungsschiffen RV *Africana* im Spätsommer 2009, RRS *Discovery* im Winter 2010 und mit der FS *Maria S. Merian* im Sommer 2011 wurden insgesamt 9 verschiedene Krillarten gefangen. Folgende Arten konnten dabei identifiziert werden: *Euphausia americana*, *Euphausia gibboides*, *Euphausia hanseni*, *Euphausia lucens*, *Euphausia recurva*, *Nematoscelis megalops*, *Nyctiphanes capensis* und *Thysanopoda mucronata*, wobei die Art *E. lucens* ausschließlich im südlichen Benguelagebiet anzutreffen war. Die Auswertungen der Netzfänge zeigten, dass die drei Arten *E. hanseni*, *N. capensis* und *N. megalops* die größten Abundanzen und Biomassen darstellten und somit die Euphausiiden - Gemeinschaft im nördlichen Benguela-Küstenauftriebsgebiet dominierten. Diese drei Arten konnten neritischen und ozeanischen Wassermassen zugeordnet werden und zeigten eine klare horizontale Zonierung. Neritisch und damit küstennah, dominierte die Art *N. capensis*, gefolgt von *E. hanseni* einer Art, die stark mit dem Schelfhang assoziiert war und deren Verbreitung mit der ozeanischen Art *N. megalops* überlappte (Abb. 1). Die Biomassen und Abundanzen der verschiedenen Krillarten im Untersuchungsgebiet zeigten eine hohe saisonale und interannuelle Variabilität, wobei unabhängig von saisonalen Effekten die höchsten Abundanzen und Biomassen im nördlichen Bereich des Benguelastroms zwischen Rocky Point (19°S) und der Mündung des Kunene Flusses (17°15`S) gefunden wurden. Die weiter im Süden gelegene Auftriebszelle bei Lüderitz (26°40`S) schien eine hydrographische Barriere für viele Krillarten darzustellen, da sich die Artzusammensetzung südlich und nördlich dieser Auftriebszelle deutlich unterschieden.

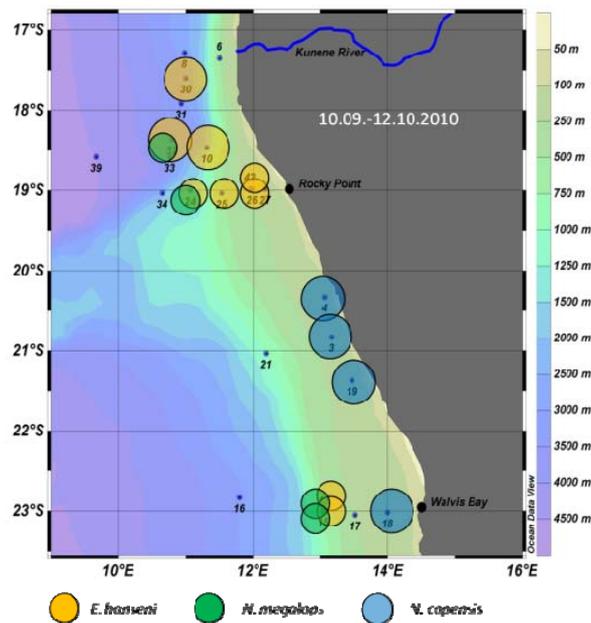


Abb. 1: Verteilung und Abundanzen der dominanten Krillarten, *E. hanseni*, *N. capensis* und *N. megalops*, im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet während der Fahrt mit dem Forschungsschiff RRS *Discovery* im Winter 2010. Die Größe der Kreise spiegelt die bestimmten Abundanzen wieder (kleiner Kreis: 1 Ind. m<sup>-3</sup>; großer Kreis: 10 Ind. m<sup>-3</sup>)

Veröffentlichung:

Buchholz F, Werner T (in Bearbeitung). On the horizontal and vertical distribution of krill, *E. hanseni* and *N. megalops* in the northern Benguela current. *J Mar Sys*

### - Lebenszyklus-Strategien

- Trophische Stellung der Euphausiiden im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet

Die Analysen stabiler Isotope und der Elementarzusammensetzung (CHN) wurden zur Bestimmung der trophischen Position der Krillarten im Nahrungsnetz des nördlichen Benguela-Auftriebsgebietes genutzt. Krill nahm dabei einen trophischen Level (TL) zwischen 2,5 und 3,7 ein (Abb. 2). Die untersuchten Euphausiiden des Benguelastroms stehen im Nahrungsnetz somit oberhalb der Salpen und der meisten Decapoden aber unterhalb verschiedener Quallenarten. Ein daraus abgeleitetes Nahrungsnetz wird zurzeit in Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten entwickelt (TP4(Bio)+TP6). Innerhalb der Euphausiiden nahm die eher seltene Art *T. mucronata* den höchsten trophischen Level ein (TL: 3,7, Winter 2010), gefolgt von *N. megalops* mit einem TL von  $3,1 \pm 0,3$ . *E. hanseni* und *E. gibboides* zeigten einen TL von  $2,7 \pm 0,2$  bzw. 2,7. Saisonale und regionale Unterschiede in den stabilen Isotopen Daten und in der Elementarzusammensetzung der Tiere deuteten auf eine hohe saisonale und regionale Variabilität der Nahrungspräferenzen und des Nahrungsangebotes der Krillarten hin.

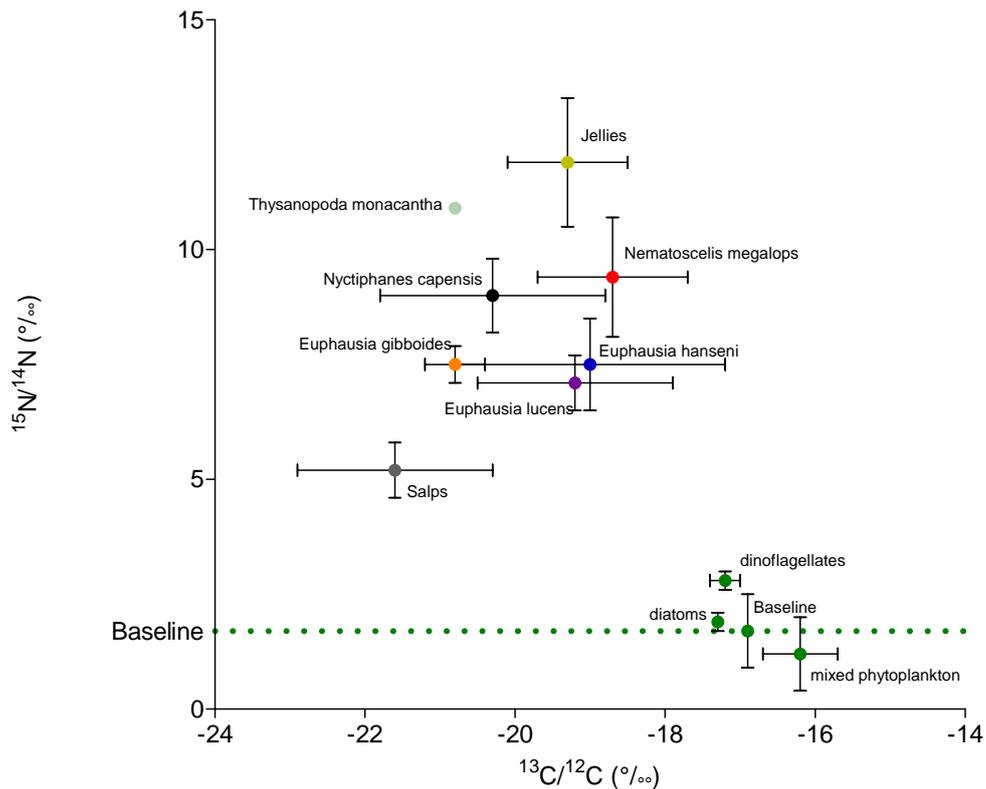


Abb. 2: Stickstoff ( $^{15}\text{N}$ ) und Kohlenstoffisotope ( $^{13}\text{C}$ ) verschiedener Euphausiiden-Arten des nördlichen Benguela-Auftriebsgebietes.

Analysen des Mageninhaltes (Abb. 3) und des Chlorophyll-a Gehaltes des Magen- und Darmtraktes von *E. hanseni* und *N. megalops*, als Maß für den Anteil der herbivoren Ernährungsweise, zeigten Unterschiede in den Nahrungspräferenzen beider Arten. Der Chlorophyll-a Gehalt im Magen und Darm war bei *E. hanseni* signifikant höher als bei *N. megalops*, wohingegen im Magen von *N. megalops* ein größerer Anteil an Copepoden - Mandibeln gefunden wurde. Beide Ergebnisse deuteten auf eine omnivore Ernährung bei *E. hanseni* und eine karnivore Ernährungsweise bei *N. megalops* hin.



Abb. 3: Aufnahmen des Mageninhaltes von *E. hanseni* bei 200x Vergrößerung. Linkes Bild: Tintinnide; mittleres Bild: Reste von Kieselalgen (Diatomeen) und Copepodenmandibeln, rechtes Bild: Diatomeenschalen und Foraminiferen.

Veröffentlichung:

Werner T, Schukat A, Geist S (in Bearbeitung). *Trophic position of different Euphausiid species of the North Benguela upwelling system. Helgoland Marine Research*

- Einfluss des saisonalen Auftriebsregimes auf den physiologischen Zustand von *Euphausia hanseni* und dessen anaerobe Kapazität

Der Einfluss der saisonalen Auftriebsereignisse auf den physiologischen Zustand von *E. hanseni* wurde während der Ausfahrten im Winter 2010 und Sommer 2011 untersucht. Hierzu wurden die metabolische Aktivität, der Häutungszustand und der sexuelle Reifegrad der Tiere analysiert und mit der jeweiligen Auftriebssituation abgeglichen. Saisonale Unterschiede der metabolischen Aktivität, bedingt durch unterschiedliche Temperaturregimes und Ernährungsbedingungen zwischen Sommer und Winter wurden festgestellt (Abb. 4).

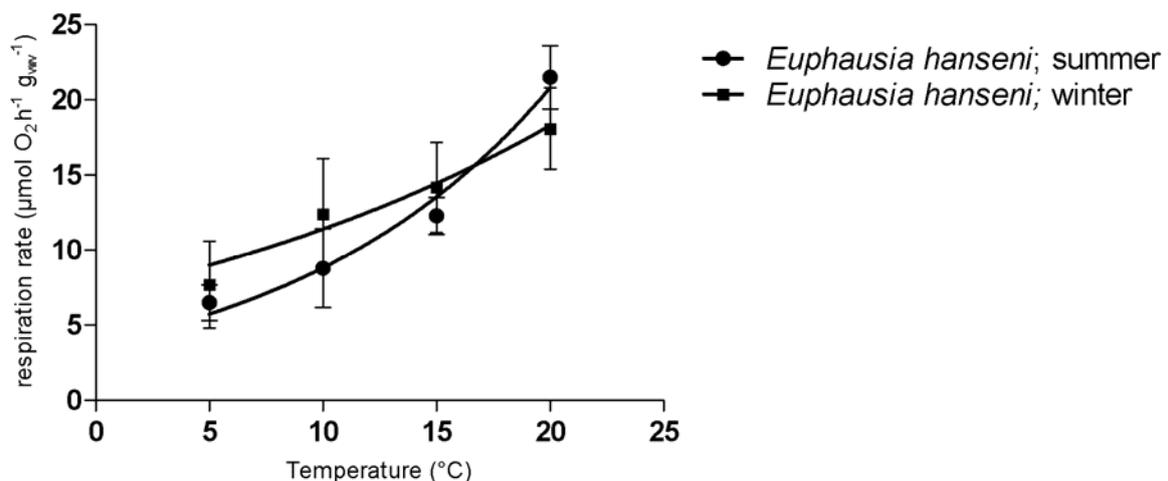


Abb. 4: Gewichtsspezifische Respirationsraten ( $\mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{FG}}$ ) von *E. hanseni* bei vier verschiedenen Temperaturen im Winter 2010 und Sommer 2011. Die Daten stammen von verschiedenen Stationen im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet wurden aber vorher auf mögliche signifikante Unterschiede getestet.

Des Weiteren wurden während der Fahrt mit der RRS *Discovery* im Winter 2010 signifikante Unterschiede im physiologischen Zustand der Tiere an verschiedenen Stationen festgestellt. Der beprobte Schwarm an der Station 10.1 (Rocky Point, Station 10.1; 18°27'S 11°19'E) zeigte einen signifikant niedrigeren Sauerstoffverbrauch, sexuellen Reifegrad und ein

geringeres O/N Verhältnis im Vergleich zu den Tieren an anderen Station im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet. Diese Unterschiede schienen durch ungünstige Nahrungsbedingungen hervorgerufen worden zu sein. Auftriebsbedingte günstige Nahrungssituationen führten dagegen an anderen Stationen zu einer raschen Zustandsänderung, bei der die metabolische Aktivität, das Wachstum und die Reproduktion der Tiere erhöht waren. Die Art *E. hansenii* war dementsprechend in der Lage auf Auftriebsereignisse, also günstige Nahrungsbedingungen, sehr schnell zu reagieren und diese zu nutzen.

Da im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet Sauerstoffmangelsituationen ( $< 2 \text{ mL O}_2 \text{ L}^{-1}$ ) ein vorherrschendes Phänomen sind, müssen die Krillarten Anpassungen an solche Bedingungen entwickelt haben. *E. hansenii* zeigte ein hohes Maß an Regulation, also der Fähigkeit unabhängig von dem umgebenden Sauerstoffgehalt die Sauerstoffaufnahme konstant zu halten (Abb. 5).

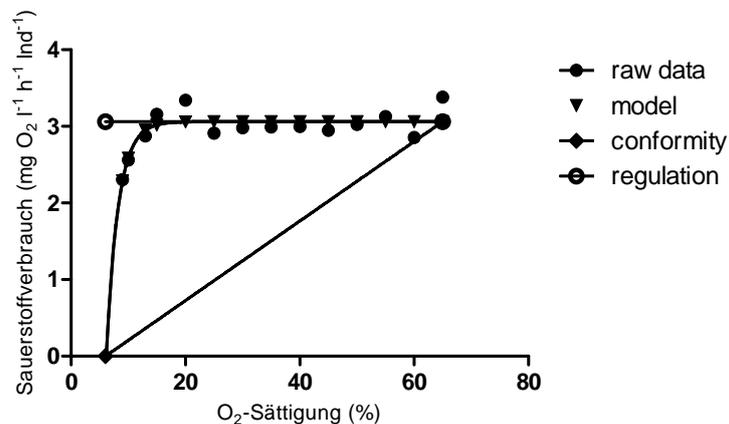


Abb.5: Sauerstoffverbrauchsrate (mg O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> Ind<sup>-1</sup>) in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes bei 10°C.

Außerdem konnte bei *E. hansenii* eine hohe Sauerstoffmangelresistenz festgestellt werden, da die Art bis zu einem Sauerstoffgehalt von  $0,6 \pm 0,3 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$  überlebte. Der kritische P<sub>O<sub>2</sub></sub> Wert, also der Sauerstoffgehalt bei dem der anaeroben Stoffwechsel einsetzt, lag bei  $1,9 \pm 0,6 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$  bei 10°C. Dieser Wert liegt weit unterhalb der P<sub>O<sub>2</sub></sub> Werte anderer Krillarten, aber innerhalb des Bereiches von Crustaceen aus Gebieten mit ausgeprägten Sauerstoffmangelzonen, kann also als Anpassung an die Region gewertet werden.

Veröffentlichung:

Werner T, Buchholz F (in Bearbeitung). Differences in the physiological state of *Euphausia hansenii*, induced by seasonal upwelling and its anaerobic capacity, in the northern Benguela upwelling system. *Mar Biol*

## - Häutung, Wachstum und Produktion

Die Bestimmung der Dauer der Zwischenhäutungsintervall bei *E. hanseni* zeigte eine klare Abhängigkeit von der Temperatur. Eine Zunahme der Hälterungstemperatur um 10°C resultierte in einer um 12 Tage verkürzten Zwischenhäutungsintervall-Dauer. Die Bestimmung des Längenzuwachses pro Häutung zeigte im Gegensatz dazu keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Temperaturen. Die Untersuchung des Häutungszustandes und des sexuellen Reifegrades der Weibchen an verschiedenen Stationen deutete auf eine Synchronisierung von Wachstum und Fortpflanzung innerhalb eines Schwarmes hin. Auslösender Faktor für solche synchronisierten Abläufe schienen die durch Auftriebsereignisse initiierten günstigen Nahrungssituationen gewesen zu sein. Eine Erhöhung der Häutungsaktivität und der Fortpflanzungsaktivität führte zu einer Anhebung der metabolischen Aktivität in den Tieren (Abb. 6).

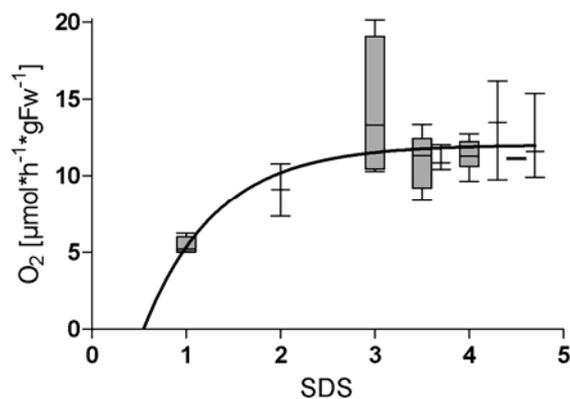


Abb. 6: Sauerstoffverbrauch ( $\mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fg}}$ ) von *E. hanseni* in Abhängigkeit des sexuellen Reifegrades (SDS) der Weibchen.

Veröffentlichung:

*Buchholz F, Buchholz C (in Bearbeitung). Moulting, growth and reproduction of E. hanseni in the North Benguela upwelling system. Mar Ecol Progr Ser*

## - Physiologisch/biochemische Anpassungen

- Diurnale Vertikalwanderung des Krills in Abhängigkeit von Temperatur, Sauerstoffverfügbarkeit und Nahrungssituation

Während einer 36-stündigen Dauerstation (Station T8.4a, Walvis Bay-Transekt) im Winter 2010 wurden Netzfänge über verschiedene Tiefenstufen durchgeführt und diese alle 6 Stunden wiederholt, um den Tagesverlauf der vertikalen Position der Krillarten bestimmen zu können. Die Daten wurden mit den Ergebnissen früherer Dauerstationen in diesem Gebiet verglichen und der Einfluss verschiedener Parameter, wie der Temperatur, des Sauerstoffgehaltes und des Nahrungsangebotes, bestimmt. Des Weiteren wurde das

Verhalten der Tiere modelliert und eine Tagesenergiebilanz für die Tiere berechnet. Die Art *E. hanseni* zeigte eine ausgeprägte diurnale Vertikalwanderung mit einer hohen Wanderungsamplitude, wohingegen die Art *N. megalops* ein schwaches Vertikalwanderungsverhalten aufwies (Abb. 7).

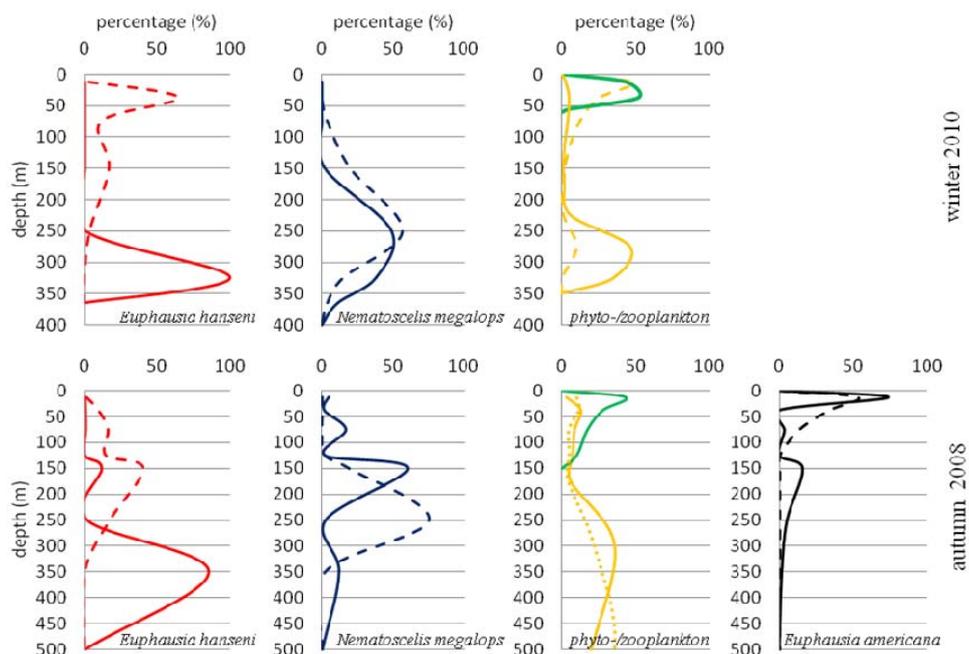


Abb. 7: Vertikale Position von *E. hanseni* (rot), *N. megalops* (blau) und *E. americana* (schwarz) am Tag (durchgezogene Linie) und in der Nacht (gepunktete Linie) während zwei 36-Stunden Stationen. Station T8.4a, Walvis Bay-Transect im Winter 2010 (oben) und Kunene-Transect im Herbst 2008 (unten).

*E. hanseni* trat des Nachts regelmäßig in die oberen Wasserschichten ein, durchschwamm dabei die Temperatursprungschicht und zog sich am Tage in die Sauerstoffmangelschicht zurück. Im Gegensatz dazu vermied *N. megalops* die Temperatursprungschicht und hielt sich dauerhaft in der Sauerstoffmangelschicht auf (Abb. 8).

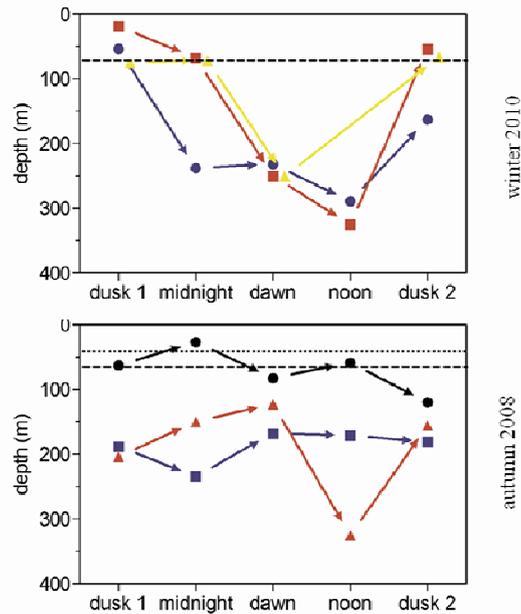


Abb. 8: Vertikale Position von *E. hanseni* (rot), *E. recurva* (gelb), *N. megalops* (blau) und *E. americana* (schwarz) während zwei 36-Stunden Stationen. Station T8.4a, Walvis Bay-Transect im Winter 2010 (oben) und Station T2.2a, Kunene-Transect im Herbst 2008 (unten).

Beide Arten zeigten größenbedingte Unterschiede im vertikalen Wanderungsverhalten, wobei größere Tiere eine höhere Wanderungsamplitude aufwiesen. Energiebilanzen zeigten, dass die Temperatur einen kontrollierenden Einfluss auf die vertikale Position des Krills ausübte, diese aber auch durch das jeweilige Nahrungsangebot beeinflusst wurde. Die Sauerstoffmangelschicht diente entweder als Rückzugsmöglichkeit für bestimmte Arten (*E. hanseni*, *E. recurva* und *N. megalops*) oder wurde weitestgehend gemieden (*E. americana*). Der Anteil der Vertikalwanderung am Tagesenergiebedarf, ausgedrückt als Kohlenstoffbedarf über 24 Stunden, war bei *E. hanseni* mit  $24 \pm 6\%$  etwa 300% höher als bei *N. megalops* mit  $6 \pm 2\%$ .

Das Vertikalwanderungsverhalten zusammen mit den Biomassedaten dient als Grundlage für die Berechnung der vertikalen Stoffflüsse und wird somit im GENUS-Modell des TP2 (IOW) implementiert werden. Des Weiteren wird der Kohlenstoffbedarf der Tiere über 24 Stunden, als Parameter für den minimalen Nahrungsbedarf, in das ECOPATH-Modell einfließen.

Veröffentlichung:

Werner T, Buchholz F (eingereicht). Diel vertical migration behaviour in Euphausiids of the Northern Benguela Current: Seasonal adaptations to food availability and strong gradients of temperature and oxygen. *Journal of Plankton Research*

- Sauerstoffverbrauch und Temperaturtoleranz von *E. hanseni* und *N. megalops*

Der Sauerstoffverbrauch verschiedener Krillarten im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet wurde mittels der Optoden-Respirometrie untersucht. Diese Methode ermöglicht die individuelle Bestimmung der Respirationsraten und die Analyse des Sauerstoffverbrauches in Abhängigkeit des Sauerstoffangebotes. Um den Einfluss der Temperatur auf die metabolische Aktivität von *E. hanseni* und *N. megalops* zu bestimmen, wurde der Sauerstoffverbrauch dieser Arten bei vier verschiedenen Temperaturen (5°C, 10°C, 15°C und 20°C) während der Forschungsreise mit dem FS *Maria S. Merian* im Sommer 2011 untersucht. Berechnete  $Q_{10}$  Werte spiegelten dabei direkt den Einfluss der Temperatur auf die metabolische Aktivität der Tiere wieder, wobei geringere Werte einen geringeren Einfluss der Temperatur bedeuteten. Parallel zu den Respirationsmessungen wurden auch die Ammonium-Exkretion dieser Arten bestimmt, um Aussagen über die metabolisierten Substrate treffen zu können und den Energiebedarf der Tiere abzuschätzen. Der Sauerstoffverbrauch von *E. hanseni* stieg von  $7,7 \mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fg}}$  (Fg: Frischgewicht) bei 5°C auf  $18,1 \mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fg}}$  bei 20°C. Bei *N. megalops* lagen die Werte zwischen  $7,0 \mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fg}}$  bei 5°C und  $23,4 \mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fg}}$  bei 20°C. Der Einfluss der Temperatur auf die Respirationsleistung der beiden Arten war somit signifikant unterschiedlich. *E. hanseni* zeigte eine Anpassung an Temperaturen zwischen 10°C und 20°C ( $Q_{10}=1,5$ ), wohingegen *N. megalops* besser an Temperaturen zwischen 5°C und 10°C angepasst war ( $Q_{10}=1,9$ ; Abb. 9).

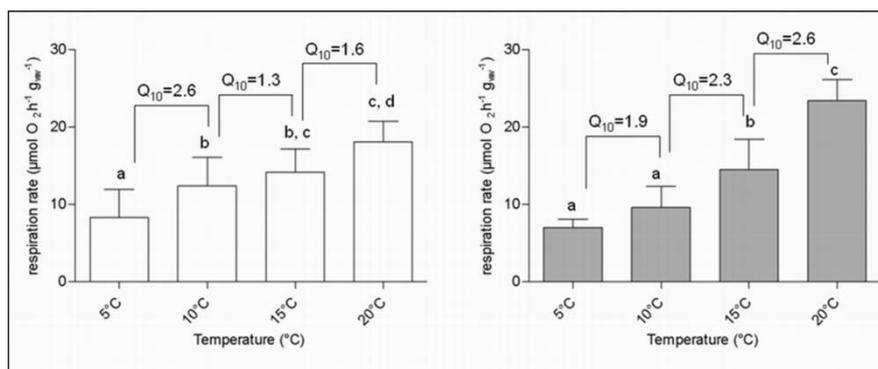


Abb. 9: Gewichtsspezifische Respirationsraten ( $\mu\text{mol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g}_{\text{Fw}}^{-1}$ ) von *E. hanseni* (links) und *N. megalops* (rechts) in Abhängigkeit der Temperatur. Verschiedene Buchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Temperaturen an. Der Einfluss der Temperatur auf die Respirationsraten ( $Q_{10}$ -Werte) ist für jedes Temperaturpaar angegeben.

*E. hanseni* metabolisierte vornehmlich Proteine, *N. megalops* vornehmlich Lipide. Der Kohlenstoffbedarf von *N. megalops* war bei Temperaturen zwischen 5°C und 15°C geringer

als bei *E. hanseni*. Bei 20°C zeigten beide Arten in etwa den gleichen Kohlenstoffbedarf (Abb. 10). Die Ergebnisse spiegelten die unterschiedlichen Anpassungen an die starken Temperaturgradienten im nördlichen Benguela-Auftriebsgebiet wieder und stehen im Einklang mit der vertikalen Einnischung beider Arten (siehe auch „Diurnale Vertikalwanderung des Krills).

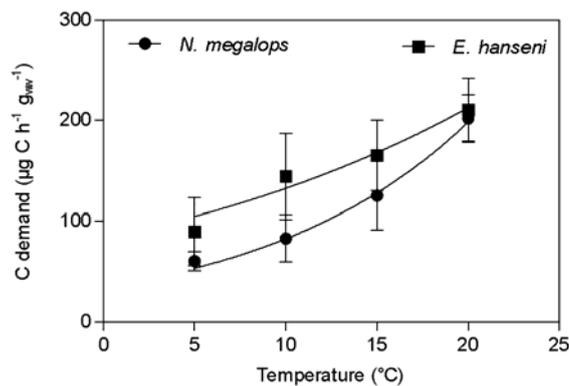


Abb. 10: Kohlenstoffbedarf ( $\mu\text{g C h}^{-1} \text{g}_{\text{FW}}^{-1}$ ) in Abhängigkeit der Temperatur von *E. hanseni* und *N. megalops*.

Veröffentlichungen:

Werner T, Huenerlage K, Verheye H und Buchholz F (im Druck). Thermal constraints on the respiration and excretion rates of krill, *Euphausia hanseni* and *Nematoscelis megalops*, in the northern Benguela upwelling system off Namibia. *African Journal of Marine Science*

Huenerlage K (2011). Metabolism and response to short-term starvation in three Euphausiid species of the Northern Benguela Current. Master Thesis, University of Bremen.

Huenerlage K und Buchholz F (in Bearbeitung) Krill of the northern Benguela Current and the Angola-Benguela frontal zone compared: physiological performance and short-term starvation in *Euphausia hanseni* *Journal of Plankton Research*

### Zusammenfassung:

Die Zielsetzungen des TP7 in GENUS I wurden vollständig erreicht. Abundanzen und Biomassen wurden bestimmt, physiologische, biochemische und ökologische Anpassungen untersucht, das Vertikalwanderungsverhalten analysiert und der Beitrag des Krills zu den Stoffflüssen quantifiziert. Der Energiebedarf einzelner Arten wurde berechnet und die gewonnenen Daten können in die angestrebten Ökosystem-Modelle eingespeist werden.

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

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

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

Alle Arbeiten erscheinen notwendig und angemessen, um das Projektziel zu erreichen.

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

GENUS trägt zur Forschung im Thema „Umwelt und Nachhaltigkeit“, besonders im Thema „System Erde: Forschung zum Klimawandel“ bei. Insbesondere zum Umgang mit unvermeidbaren Folgen des Klimawandels (Adaptation) durch die Bereitstellung von Szenarien zu möglichen Veränderungen in Stoffflüssen – einschließlich klimarelevanter Gase – und den Meeresressourcen in einer der biologisch produktivsten Meeresregionen der Erde. Das GENUS-Projekt ist wiederum ein deutscher Beitrag zur internationalen IMBER-Initiative des IGBP („Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research“ IMBER; International Geosphere Biosphere Project“ IGBP) als „Affiliated Project“ und steht weiter im Rahmen von IMBER und dem IGBP-Projekt LOICZ (Land-Ocean-Interaction in the Coastal Zone) in Schelfgebieten.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten standen bei der Konzeption des Teilprojekts 7 nicht im Vordergrund der Erwägungen und sind derzeit nicht erkennbar.

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

Es werden laufend Literaturrecherchen zum Untersuchungsthema in ASFA und Web of Science durchgeführt. Es wurden keine Ergebnisse in der neueren Literatur gefunden, die die Durchführung des Vorhabens wesentlich beeinflusst haben.

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

Die folgende Liste umfasst die am weitesten fortgeschrittenen Publikationen:

*Huenerlage K (2011). Metabolism and response to short-term starvation in three Euphausiid species of the Northern Benguela Current. Master Thesis, University of Bremen*

*Huenerlage K and Buchholz F (in Bearbeitung) Krill of the northern Benguela Current and the Angola-Benguela frontal zone compared: physiological performance and short-term starvation in Euphausia hanseni Journal of Plankton Research*

*Werner T, Huenerlage K, Verheye H und Buchholz F (im Druck). Thermal constraints on the respiration and excretion rates of krill, Euphausia hanseni and Nematoscelis megalops, in the northern Benguela upwelling system off Namibia. African Journal of Marine Science*

*Werner T, Buchholz F (eingereicht). Diel vertical migration behaviour in Euphausiids of the Northern Benguela Current: Seasonal adaptations to food availability and strong gradients of temperature and oxygen. Journal of Plankton Research*

*Werner T, Huenerlage K und Buchholz F (in Bearbeitung) Krill of the northern Benguela Current and the Angola-Benguela frontal zone compared: physiological performance and short-term starvation in Euphausia hanseni Journal of Plankton Research*