

**BMBF-Verbundprojekt CUSCO**  
**(CUSCO: Coastal Upwelling System in a Changing Ocean)**  
**Förderkennzeichen: 03F0813C**

**Pelagische Nahrungsnetzstrukturen, trophische Wechselwirkungen und die  
Rolle des Meso- und Makrozooplanktons für die trophische Transfereffizienz im  
Humboldt-Auftriebsgebiet vor Peru**

**Teilprojekt 4: Universität Bremen**  
**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**  
**01.10.2018 bis 31.12.2022**

**I. Kurzbericht**

**Prof. Dr. Wilhelm Hagen, PD Dr. Holger Auel und Dr. Anna Schukat**

Universität Bremen (FB 02)  
BreMarE - Bremen Marine Ecology  
Marine Zoologie, Postfach 330 440, 28334 Bremen  
whagen@uni-bremen.de



**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

# **I. Kurzbericht**

## **1. Aufgabenstellung**

Um robuste Prognosen über die Auswirkungen des Klimawandels auf das pelagische Ökosystem des Humboldtstroms vor Peru machen zu können, ist es entscheidend, die Faktoren zu verstehen, die seine Produktivität und seine hohe trophische Transfereffizienz (TTE) innerhalb des Nahrungsnetzes bestimmen und wie diese durch Veränderungen der Auftriebsintensität beeinflusst werden können. Die Untersuchungen der Universität Bremen konzentrierten sich auf die Rolle des Meso- und Makrozooplanktons im Nahrungsnetz des Humboldtstroms vor Peru. Das Zooplankton besetzt eine Schlüsselstellung als Brückenglied zwischen Algenproduktion und Fischbeständen, so dass die TTE maßgeblich vom Zooplankton beeinflusst wird. Daher kann das Zooplankton als wichtiger Indikator für Klimaveränderungen fungieren, da seine fein abgestimmten und hoch angepassten Lebenszyklen sehr sensibel auf klimatische Einflüsse reagieren. Im HUS dominieren Leuchtgarnelen (Euphausiaceen, Krill) den Kohlenstofffluss. Diese Krebse haben komplexe Lebensstrategien entwickelt (Fortpflanzung, Energiespeicherung, Vertikalwanderung, Lebenszyklen etc.), die ein Überleben im dynamischen Auftriebssystem bzw. in der Sauerstoffminimumzone unterhalb der Deckschicht sicherstellen. Regionale Unterschiede in Biomasse, Diversität und Artenspektrum des Zooplanktons in Abhängigkeit von der Auftriebsintensität wurden erfasst und Respirationsraten von Zooplankton-Schlüsselarten bestimmt. Trophische Nischen und Nahrungspräferenzen wurden mit Hilfe von stabilen Isotopen (Stickstoff, Kohlenstoff) und trophischen Biomarkern (Fettsäuren) entschlüsselt. Mit diesen Forschungsarbeiten trägt die Universität Bremen wesentlich zur Entwicklung nachhaltiger Nutzungsstrategien und Managementoptionen für marine Ressourcen im Kontext des Klimawandels sowie zum Schutz der biologischen Vielfalt in Peru bei. Sie liefert damit wichtige Daten für Kernziele des BMBF-Rahmenprogramms "Forschung für nachhaltige Entwicklung" (FONA3).

## **2. Wissenschaftlicher/technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Küstenauftriebsgebiete spielen, neben ihrer großen sozioökonomischen Bedeutung durch sehr hohe Fischereierträge, eine essenzielle Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel. CUSCO untersuchte trophische Wechselwirkungen sowie Energie- und Kohlenstoffflüsse im peruanischen Humboldt-Auftriebssystem, um die trophische Transfer-effizienz (TTE) und die biologische Kohlenstoffpumpe besser zu verstehen sowie die Vorhersagbarkeit der Reaktionen von Küstenauftriebssystemen auf den Klimawandel zu verbessern. Das Küstenauftriebssystem des Humboldtstroms (HUS) vor Peru weist trotz vergleichbarer Primärproduktionsraten einen bis achtmal höheren Fischereiertrag auf als andere Küstenauftriebsgebiete. Diese außerordentliche Produktivität der höheren trophischen Ebenen kann nur durch eine höhere trophische Transfereffizienz (TTE) erklärt werden, mit der die Energie entlang der Nahrungskette weitergegeben wird. Die Mechanismen, die zu dieser erhöhten TTE beitragen, waren bisher nur unzureichend verstanden und deshalb die zentrale Fragestellung des CUSCO-Projekts. TP4 trägt zu den übergreifenden Zielen von CUSCO bei, indem es die zooplanktonbezogenen Daten bereitstellt, v.a. zu Nahrungsnetz-beziehungen (stabile Isotope, Fettsäuremuster), Zooplanktonbiomasseverteilung und -artenzusammensetzung sowie arten- und stadienspezifische Umsatzraten (Respiration, Ingestion, Kotballenproduktion), u.a. um am Ende die trophische TTE im Humboldtssystem zu bestimmen. Die Untersuchungen ermöglichen ein besseres Verständnis über die Prozesse der Produktion und Nahrungsaufnahme bzw. -verwertung in Küstenauftriebsgebieten und verbessern somit auch unser Verständnis, wie Produktion und Stabilität von Ökosystemen durch Klimawandel beeinflusst werden.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben begann am 01.10.2018. Vom 01.12.2018 bis 31.08.22 wurde die wissenschaftliche Mitarbeiterin Dr. Anna Schukat innerhalb der Projektlaufzeit mit 35 Wochenstunden angestellt. Priorität hatte zunächst die Vorbereitung der FS *Maria S. Merian*-Expedition (MSM80) ins Humboldt-Auftriebssystem vor Peru (Fahrtleiter Auel). Die Forschungsreise fand planmäßig vom 20.12.2018 - 31.01.2019 statt. Das während der Expedition gewonnene reichhaltige Probenmaterial traf nach der Reise zeitnah in Deutschland ein, so dass bald mit der Auswertung der Proben im Labor begonnen werden konnte. Anfang 2020 erfolgten die Vorbereitungen der experimentellen KOSMOS-Forschungsarbeiten mit dem Aufbau der Mesokosmen in Lima, Peru. Für TP4 nahm Dr. Schukat am KOSMOS-Experiment teil. Bedingt durch die COVID-19-Restriktionen ergaben sich im Frühjahr 2020 massive Einschränkungen bei der Durchführung der KOSMOS-Studie sowie bei den Laborarbeiten. Die Forschungsarbeiten in Lima mussten vorzeitig abgebrochen werden, die meisten Teilnehmenden der KOSMOS-Studie wurden vor Beendigung der Experimente nach Deutschland ausgeflogen. Auch in Deutschland waren die Laborarbeiten durch die COVID-19-Auflagen über Monate erheblich eingeschränkt bzw. undurchführbar. Daher wurde eine einjährige Verlängerung des Verbundvorhabens durch das BMBF bewilligt und das CUSCO-Projektende auf den 31.12.2022 festgelegt.

### 4. Wesentliche Ergebnisse, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund des reichen Proben- und Datenmaterials der FS *Maria S. Merian*-Expedition konnten die Forschungsziele des Teilprojekts trotz massiver Einschränkungen durch COVID-19 erreicht werden. Dies betraf die Rolle des Meso- und Makrozooplanktons (vor allem Euphausiaceen und Copepoden, aber auch die erstaunlich dominante semipelagische Decapodenart *Pleuroncodes monodon*) im Nahrungsnetz, die Quantifizierung wichtiger Räuber-Beute-Beziehungen des Zooplanktons (sowohl als Konsumenten des Phytoplanktons, als auch als Beute für clupeiforme Fische) und die Aufklärung der generellen Struktur und Komplexität des pelagischen Nahrungsnetzes, welche die TTE entscheidend beeinflussen.

Die Expedition sowie die Mesokosmos-Arbeiten erforderten detaillierte koordinierte Planungen sowie gute Teamarbeit, gegenseitige Unterstützung und intensive Zusammenarbeit an Bord und bei den experimentellen Arbeiten in Lima. Zooplankton ist das Bindeglied zwischen Primärproduktion und höheren trophischen Ebenen; daher fand auch nach der Expedition bzw. den Mesokosmos-Arbeiten ein kontinuierlicher Austausch mit den verschiedenen Teilprojekten und Kooperationspartnern statt, um über die Auswertung und Ergebnisse zu diskutieren, oft per Videokonferenz wegen der COVID-19-Pandemie. Die CUSCO-Daten sind bereits in die Datenbank PANGAEA überführt (s. II.6.).

#### *Kooperationspartner außerhalb des Verbundes*

Es wurde eng mit dem IMARPE (Dr. Patricia Ayón und Mitarbeitende, Instituto del Mar de Peru, Lima) zusammengearbeitet. An der Expedition MSM80 nahmen zwei Mitarbeitende des IMARPE teil, die aufgrund ihrer Expertise des lokalen Zooplanktons und ihres großen Engagements während der Arbeiten an Bord wertvolle Beiträge zum Erfolg des Projekts lieferten und anteilig auch Ko-Autoren der wissenschaftlichen Publikationen sind. Besonders intensiv war die Kooperation mit den Mitarbeitenden des IMARPE-Instituts vor Ort in Lima im Rahmen der sehr ambitionierten Mesokosmos-Arbeiten.

**BMBF-Verbundprojekt CUSCO**  
**(CUSCO: Coastal Upwelling System in a Changing Ocean)**  
**Förderkennzeichen: 03F0813C**

**Pelagische Nahrungsnetzstrukturen, trophische Wechselwirkungen und die  
Rolle des Meso- und Makrozooplanktons für die trophische Transfereffizienz im  
Humboldt-Auftriebsgebiet vor Peru**

**Teilprojekt 4: Universität Bremen**  
**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**  
**01.10.2018 bis 31.12.2022**

**II. Ausführliche Darstellung**

**Prof. Dr. Wilhelm Hagen, PD Dr. Holger Auel und Dr. Anna Schukat**

Universität Bremen (FB 02)  
BreMarE - Bremen Marine Ecology  
Marine Zoologie, Postfach 330 440, 28334 Bremen  
whagen@uni-bremen.de



**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

## II. Ausführliche Darstellung

### 1. der durchgeführten Arbeiten

Im Rahmen der bewilligten Zuwendung konnten die Hauptziele des Teilprojekts im CUSCO-Verbundprojekt erreicht werden. Die Struktur des pelagischen Nahrungsnetzes, die Räuber-Beute-Beziehungen und die Rolle des Zooplanktons für die trophische Transfer-Effizienz (TTE) wurden bestimmt. Darüber hinaus wurden Kohlenstoffumsatzraten wichtiger Copepodenarten quantifiziert, die zu einem besseren Verständnis der Rolle des Zooplanktons für die biologische Kohlenstoffpumpe beitragen.

Der extrem hohe Fischereiertrag des HUS (achtmal höher als in vergleichbaren Küstenauftriebssystemen), trotz vergleichbarer Primärproduktionsraten wie in anderen Auftriebsgebieten, ist nur durch eine außerordentlich hohe TTE erklärbar, mit der die Energie entlang der Nahrungskette weitergegeben wird. Hierbei spielt das Zooplankton als zentrales Bindeglied zwischen Phytoplankton-Primärproduktion und pelagischen Schwarmfischen eine zentrale Rolle. Daher lagen die spezifischen Zielsetzungen der Universität Bremen im Rahmen von CUSCO auf der Erforschung der Rolle des Meso- und Makrozooplanktons (vor allem Copepoden und Euphausiaceen) im Nahrungsnetz, der Erfassung wichtiger Räuber-Beute-Beziehungen des Zooplanktons (sowohl als Fressfeind des Phytoplanktons, als auch als Beute für pelagische Fische wie die Sardelle) und der Aufklärung der generellen Struktur und Komplexität des pelagischen Nahrungsnetzes, welche die TTE entscheidend beeinflussen.

Mit Hilfe der bewilligten Zuwendung konnten die Mechanismen, die zu einer außergewöhnlich hohen TTE im HUS beitragen von der Universität Bremen anhand der folgenden spezifischen Ziele innerhalb des CUSCO-Projekts untersucht werden:

- *Regionale Unterschiede in Abundanz, Biomasse, Biodiversität und Artenzusammensetzung des Meso- und Makrozooplanktons im HUS vor Peru*

Insgesamt wurden 37 Multinetz-Stationen auf sechs Transekten von 8,5°S bis 16°S für die Zusammensetzung der Mesozooplanktongemeinschaft analysiert. Das Untersuchungsgebiet wurde in Norden (Transekte T1-T2), Zentrum (Transekt T3) und Süden (Transekte T4-T6) unterteilt (Abb. 1, 3). Die dominanten großen calanoiden Copepoden während der MSM80-Ausfahrt mit dem FS *Maria S. Merian* waren *Calanus chilensis*, *Nannocalanus minor*, *Eucalanus inermis*, *Subeucalanus mucronatus*, *Subeucalanus subtenuis*, *Centropages brachiatus*, *Euchaeta longicornis* und *Euchaeta rimana*. Hohe Abundanzen in den oberen 50 m von 38 bis 58 x 10<sup>3</sup> Ind. m<sup>-2</sup> der acht dominanten Arten traten küstennah auf T2, über der Schelfkante auf T3 und weit draußen im offenen Ozean auf T5 auf (Abb. 1). Ein geringes Auftreten (<2,3 x 10<sup>3</sup> Ind. m<sup>-2</sup>) der calanoiden Arten wurde von der Küste bis ca. 130 km entfernt auf T6 festgestellt, während sie küstennah auf T4 nicht vorkamen.

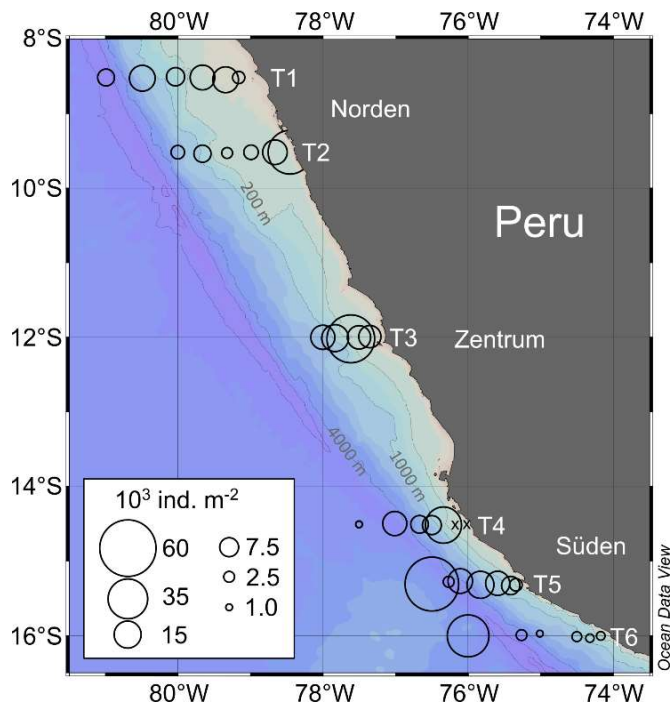


Abb. 1: Gesamtabundanz (0-50 m) der dominanten calanoiden Copepodenarten während der MSM80-Ausfahrt im Dezember 2018/Januar 2019.

Deutliche regionale Unterschiede in der Zusammensetzung der Copepodengemeinschaft traten zwischen den drei Regionen, Norden, Zentrum und Süden auf. Im Norden dominierte klar die Art *Calanus chilensis*. Auf dem Schelf auf T1 und T2 stellte *C. chilensis* 63-94% der Gesamtbiomasse der größeren calanoiden Copepoden. Im offenen Ozean nahmen neben *C. chilensis* die beiden *Euchaeta*- und *Subeucalanus*-Arten (22-64%) einen hohen Anteil der Gesamtbiomasse ein. Im Zentrum (T3) umfassten *C. chilensis* und *Centropages brachiatus* den Hauptanteil (83-100%) der Biomasse. Im Süden auf den Transekten T5 und T6 dominierten die drei Copepenarten *C. brachiatus*, *C. chilensis* und *Eucalanus inermis* die Gesamtbiomasse mit 77-100%. Die höchste Diversität der größeren calanoiden Copepoden trat entlang des Transektes T4 auf. Neben *C. chilensis* und *C. brachiatus* (37-83%) stellten die beiden *Subeucalanus*-Arten (3-42%) einen bedeutenden Anteil der Gesamtbiomasse sowie teilweise *Nannocalanus minor* (0-23%) und *Euchaeta* spp. (2-16%).

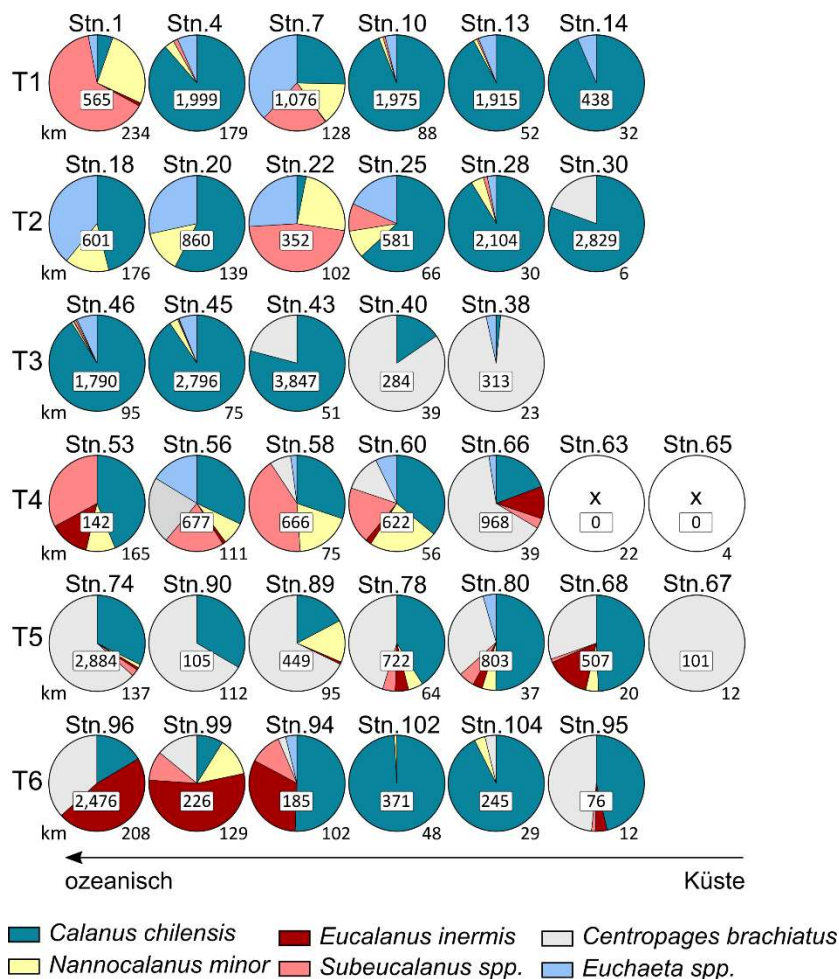


Abb. 2: Artenzusammensetzung der dominanten größeren calanoiden Copepoden während MSM80. Die Gesamtbiomasse (mg Trockenmasse  $m^{-2}$ ) und Distanz zur Küste (km) ist für jede Station angegeben.

Die maximale Copepoden-Biomasse lag bei 3,8 g Trockenmasse (TM)  $m^{-2}$ , somit stellten die acht Copepodenarten überwiegend den Hauptanteil des Mesozooplanktons während der MSM80-Schiffsreise. Teilweise wurde das Mesozooplankton aber auch durch ein erhöhtes Auftreten von gelatinösem Zooplankton (maximale Biomasse von 15 g TM  $m^{-2}$ ) geprägt. Allgemein konzentrierte sich der Hauptanteil der Biomasse des Mesozooplanktons in den oberen 100 Metern der Wassersäule (Abb. 3). Die Sauerstoffminimumzone (SMZ) ist im nördlichen Humboldtstrom vor Peru stark ausgeprägt und erstreckt sich von ca. 50 bis 900 m Wassertiefe. Im Kern der SMZ liegen nahezu anoxische Bedingungen vor ( $<1 \mu\text{mol O}_2 \text{ L}^{-1}$ ). Die enorme Ausprägung der SMZ führt zu einer Konzentrierung des Mesozooplanktons in den sauerstoffreichen oberen Wasserschichten. Da die meisten Zooplanktonarten sauerstoffsensitiv sind, meiden sie die SMZ. Einige Zooplankter jedoch, wie vertikal wandernder Krill und die Copepodenart *Eucalanus inermis* sowie der semipelagische Furchenkrebs *Pleuroncodes monodon*, sind regelmäßig in der SMZ zu finden.



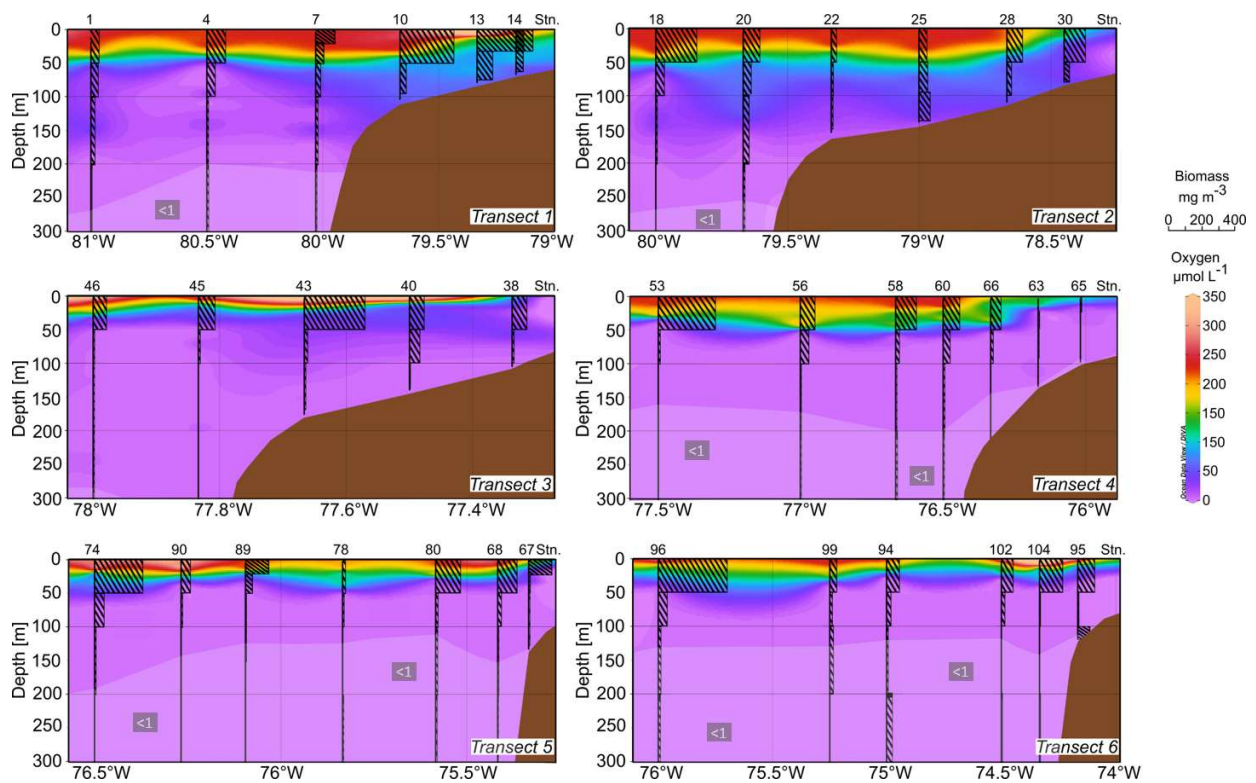


Abb. 3: Vertikale Verteilung des Mesozooplanktons insgesamt (beprobte mit dem Multinetz) für sechs Transekte während der MSM80-Reise. Die Mesozooplanktonbiomasse ist als Balken (schwarz gemustert) dargestellt und über die Sauerstoffprofile der einzelnen Transekte gelegt. Die Sauerstoffminimumzone ist in lila dargestellt.

Die Makrozooplanktongemeinschaft im Humboldtstrom vor Peru wurde dominiert durch Krill und den Decapoden *P. monodon*. Insgesamt wurden vier Krillarten (*Euphausia mucronata*, *Euphausia distinguenda*, *Euphausia eximia* und *Nematoscelis gracilis*) während der MSM80-Ausfahrt vor der Küste Perus identifiziert. Die Verteilung der Gesamtabundanz der juvenilen und adulten Stadien dieser Arten im Untersuchungsgebiet ist in Abb. 4 gezeigt. Hohe Krillabundanzen traten über der Schelfkante auf, während küstennah die Juvenilen und Adulten nur selten oder gar nicht zu finden waren, sondern nur die jungen Calyptopis- und Furcilia-Larvenstadien. Die höchsten Abundanzen von  $1,5$  bis  $2,5 \times 10^3$  Ind.  $m^{-2}$  der Juvenilen und Adulten wurden über der Schelfkante auf T2, T5 und T6 festgestellt. Weiter entfernt von der Küste bei Wassertiefen über  $2000$  m variierten die Abundanzen zwischen  $0,4$  und  $0,9 \times 10^3$  Ind.  $m^{-2}$ . Die beiden Krillarten *E. distinguenda* und *E. eximia* machten 30-85% der Gesamtabundanz auf T1 aus. Auf T2 dominierten *E. mucronata*, *N. gracilis* und *E. eximia*, während auf dem zentralen Transekt T3 und im Süden (T4-T6) *E. mucronata* dominierte mit 62-100% der Gesamtabundanz. Die maximale Biomasse der vier Krillarten lag bei  $33$  g TM  $m^{-2}$  und war somit deutlich höher als die des Mesozooplanktons.



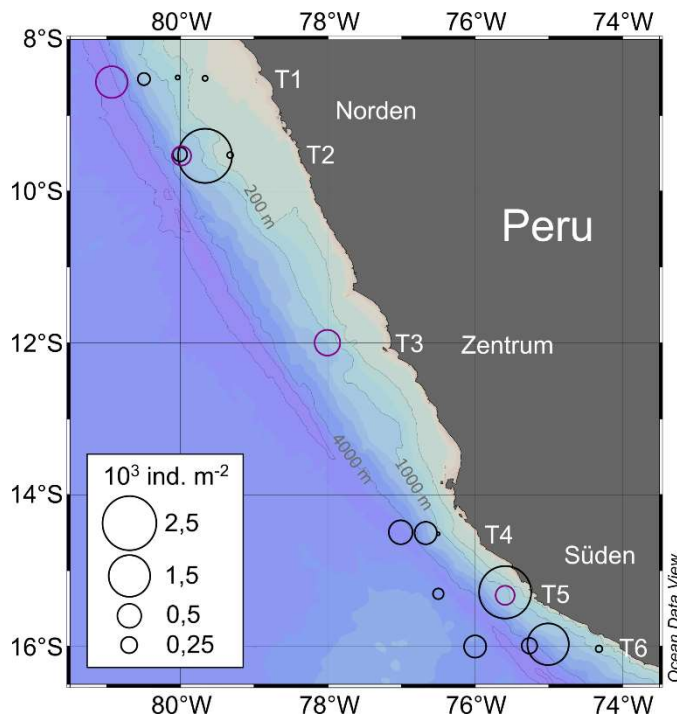


Abb. 4: Gesamtabundanz (0-1000 m) der dominanten Krillarten (Juvenile und Adulte) während der MSM80-Ausfahrt im Dezember 2018/Januar 2019. Multinetz-Stationen sind in schwarz und MOCNESS-Stationen in lila gekennzeichnet.

- *Die Länge der Nahrungsketten von den Primärproduzenten zu den kommerziell genutzten Arten*

Zur Bestimmung der trophischen Positionen und Nahrungsspektren dominanter Arten des Zooplanktons wurden an über 500 Proben Lipid- und stabile Isotopenanalysen durchgeführt. Insgesamt wurden 43 (Lipide) bzw. 59 Arten (stabile Isotope, Stickstoff N, Kohlenstoff C) untersucht, verteilt über alle trophischen Positionen des Nahrungsnetzes von Plankton über Nekton bis hin zu Seevögeln, und deren Nahrungspräferenzen und Stellung im Nahrungsnetz anhand der Biomarker bestimmt (Abb. 5). Dabei wurde eine hohe räumliche Auflösung von 8.5° bis 16°S und bis zu einer Wassertiefe von 1000 m abgedeckt. Eine deutliche Zunahme der  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von bis zu 5‰ innerhalb einer Art im Untersuchungsgebiet von Nord nach Süd wurde festgestellt. Neben der regionalen Verschiebung trat auch eine Zunahme der  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte mit der Tiefe auf, mit bis zu 3.8‰ von der Oberfläche bis zum Zentrum der Sauerstoffminimumzone. Als Resultat zeigten Suspensionsfresser, die permanent in größeren Tiefen verweilen, bis zu 6‰ höhere  $\delta^{15}\text{N}$ -Signale im Vergleich zu Arten nahe der Oberfläche oder Vertikalwanderer.  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte für Zooplanktonarten aus den oberen 50 m lagen zwischen 2‰ für die Salpe *Pyrosoma* sp. und 12‰ für den ostpazifischen Bonito (*Sarda chiliensis*) im nördlichen Untersuchungsgebiet (Abb. 5). Copepodenarten aus dem sauerstoffreichen Oberflächenwasser zeigten  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen 4 und 6‰, während die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von tiefer lebenden Copepoden aus der SMZ im Mittel bei 10 bis 15‰ lagen (Abb. 5).

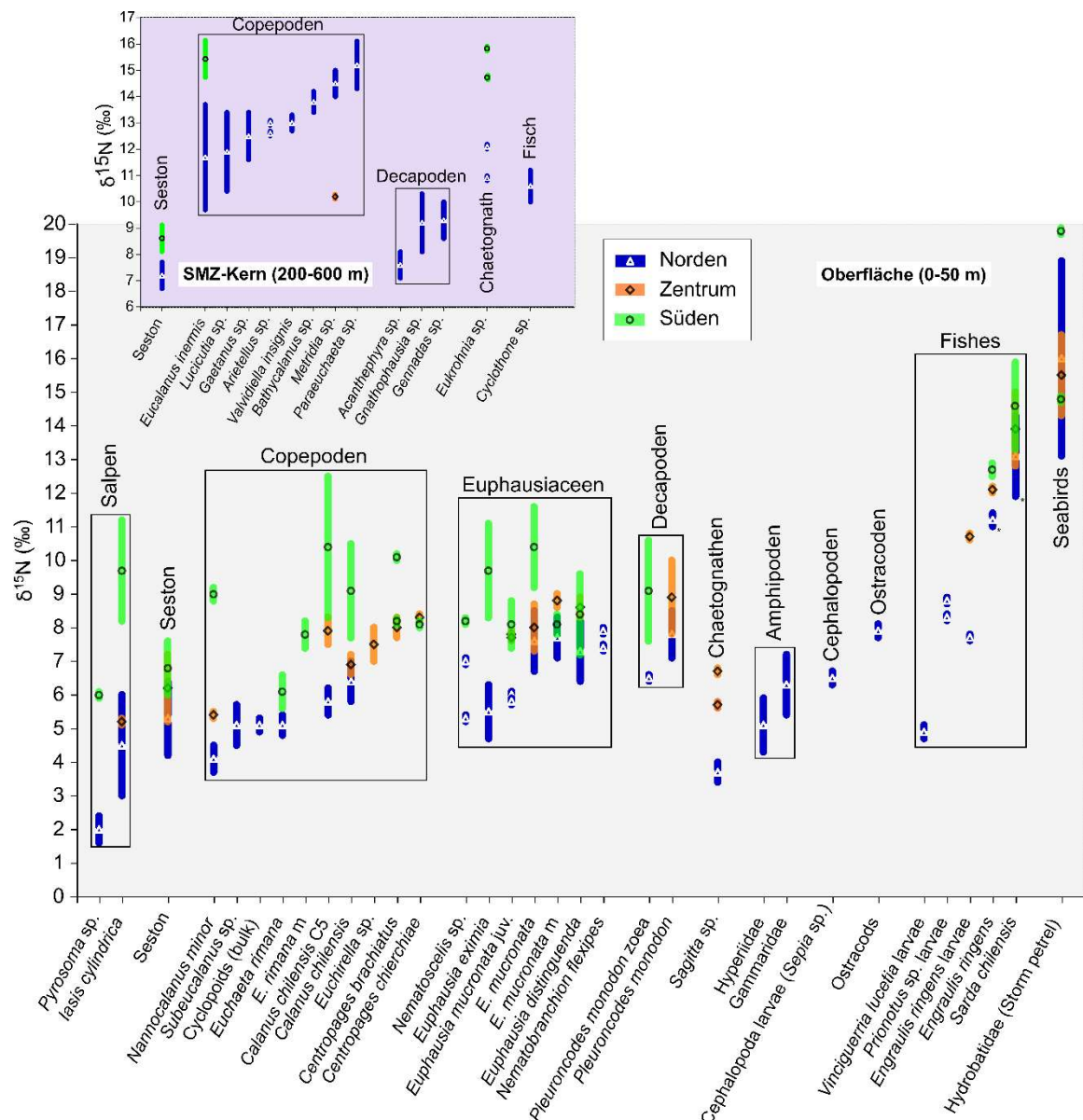


Abb. 5:  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte verschiedener Taxa von Seston und Plankton über Nekton bis hin zu Seevögeln aus dem nördlichen Humboldtstrom vor Peru während MSM80. Regionale Unterschiede in den  $\delta^{15}\text{N}$ -Werten innerhalb einer Art sind farblich markiert für das nördliche (blau), zentrale (orange) und südliche (grün) Untersuchungsgebiet. Große Graphik:  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte für Arten aus Oberflächenwasser (0-50 m). Kleine Graphik:  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte für Arten aus dem Kern der Sauerstoffminimumzone (SMZ) von 200 bis 600 m (modifiziert nach Maßing 2019).

Die detaillierte Studie der stabilen Isotopen zeigte zudem, dass die Erhebung einer adäquaten Referenz (Primärproduzenten) für die Bestimmung von trophischen Positionen in einem Nahrungsnetz von großer Bedeutung ist. Um eine Basislinie des Nahrungsnetzes zu bestimmen, wurden zwei verschiedene Herangehensweisen angewandt: Seston wurde als Referenz für die trophische Ebene 1 und eine filtrierende Salpe (*lasis cylindrica*) als Referenz für die trophische Ebene 2 gesetzt. Anhand beider Ansätze wurden die trophischen Ebenen der verschiedenen Zooplanktonorganismen unter Anwendung eines üblichen  $\delta^{15}\text{N}$ -Anreicherungs-faktors von 3.4‰ pro trophischer Ebene berechnet. Die ermittelten

trophischen Ebenen variierten zwischen 2 für den Copepoden *Calanus chilensis* und 3,5 bis 4,5 für die peruanische Sardelle (*Engraulis ringens*) bzw. den ostpazifischen Bonito (*Sarda chiliensis*). Innerhalb der verschiedenen Krillarten traten Unterschiede in den trophischen Ebenen auf. Arten der Gattung *Euphausia* wiesen niedrigere trophische Ebenen (2,0-2,6) auf als Arten der Gattung *Nematobrachion* und *Nematoscelis* (Abb. 6).

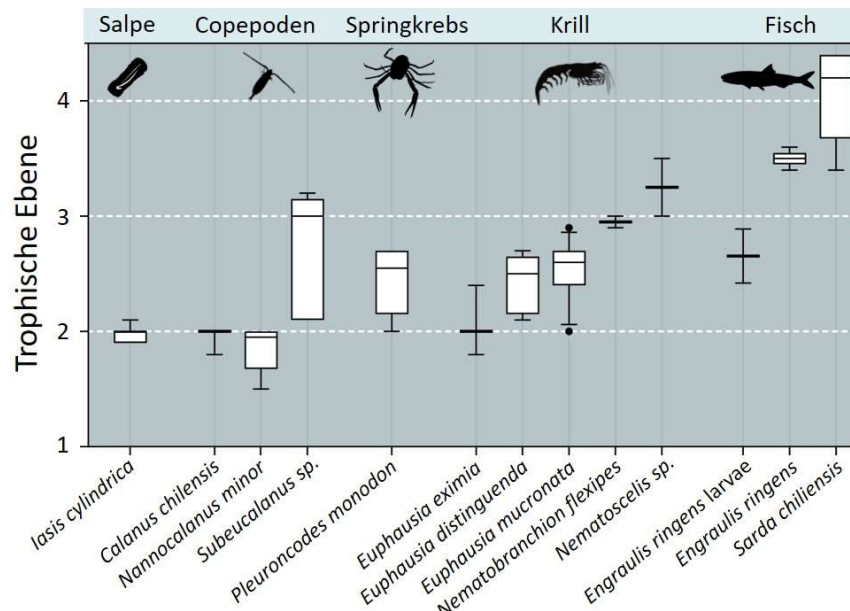


Abb. 6: Trophische Ebenen verschiedener Taxa aus dem nördlichen Humboldtstrom vor Peru während MSM80. Ein  $\delta^{15}\text{N}$ -Anreicherungsfaktor von 3.4‰ pro trophischer Ebene wurde zur Berechnung angewandt.

Vier Crustaceenarten konnten als Schlüsselarten in der Zooplanktongemeinschaft des Humboldtstroms vor Peru identifiziert werden, die Copepoden *Calanus chilensis* und *Eucalanus inermis*, der Krill *Euphausia mucronata* und der Furchenkreb *Pleuroncodes monodon*. Dabei scheint *P. monodon* eine Schlüsselrolle bei benthisch-pelagischen Wechselwirkungen (Kopplung) zu spielen, angedeutet durch die sehr hohen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte. Durch eine anteilige Ernährung aus benthischen Ressourcen und ihre ausgeprägte diurnale Vertikalwanderung hat *Pleuroncodes* anscheinend einen einzigartigen Pfad für den Rücktransport von Kohlenstoff und Energie vom Meeresboden ins Epipelagial realisiert und erhöht somit die Nahrungsressourcen für pelagische Fische. Die beiden Copepodenarten und der Krill sind hingegen direkte Hauptnahrungskomponenten der peruanischen Sardelle und stellen somit ein wichtiges Bindeglied des Energietransfers zwischen der Primärproduktion und den Sardellen dar. Dies führt generell zu einem strukturierten Nahrungsnetz mit wenigen Trophiestufen bis zur Sardelle und somit zu einer effizienten Nahrungskette. Die Konzentrierung der Biomasse von *C. chilensis* (bis zu 3 g TM m<sup>-2</sup>) in den oberen 50 m ermöglicht Prädatoren wie der peruanischen Sardelle zudem eine einfache und effiziente Nahrungssuche. Zusammen mit der hohen Produktivität von *C. chilensis*, die sich bis weit entfernt von der Küste erstreckt, kann dies eine mögliche Erklärung für die außergewöhnlich hohe trophische Transfereffizienz und den damit verbundenen enormen Fischereiertrag des Humboldtstroms im Vergleich zu den anderen Küstenauftriebsgebieten sein.

- Die Rolle größerer Filtrierer im HUS

Wie die vorherigen Ergebnisse bereits gezeigt haben, sind Euphausiaceen (Krill) ein wichtiger Bestandteil des Zooplanktons im Humboldtstrom vor Peru. Krill (max. Länge ca. 25 mm) zählt zu den größeren Filtrierern im HUS und hat ein weites Größenspektrum an Nahrungsorganismen, welches von Bakterien bis zum Mesozooplankton reicht. Werden pelagische Gemeinschaften durch Filtrierer dominiert, die ihre Beuteorganismen sehr effizient konsumieren, führt das im Allgemeinen zu einem weniger komplexen Nahrungsnetz mit insgesamt höherer TTE. Vor allem die Krillart *Euphausia mucronata* ist vorherrschend im HUS vor Peru. Daher stand diese Art im Fokus der Analysen der MSM80-Ausfahrt. Während einer 24-Stunden Station auf T5 wurde das Vertikalwanderungsverhalten von *E. mucronata* untersucht. Das tägliche Wanderverhalten von *E. mucronata* variierte in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (Abb. 7). Die Larvenstadien (Calyptopis und Furcilia) von *E. mucronata* zeigten keine tägliche Wanderung, sondern hielten sich während der Nacht und am Tag in einer Tiefe von 0 bis 50 m auf. Die Adulten und Juvenilen hingegen wanderten von der Oberfläche (50-0 m) in der Nacht bis in tiefere Wasserschichten während des Tages. Die Mehrzahl der Juvenilen und Adulten hielten sich am Tag zwischen 400-200 m auf (Abb. 7). Der große Unterschied in der Gesamtabundanz von *E. mucronata* zwischen Nacht und Tag ist auf das extreme Schwarmverhalten von Krill zurückzuführen.

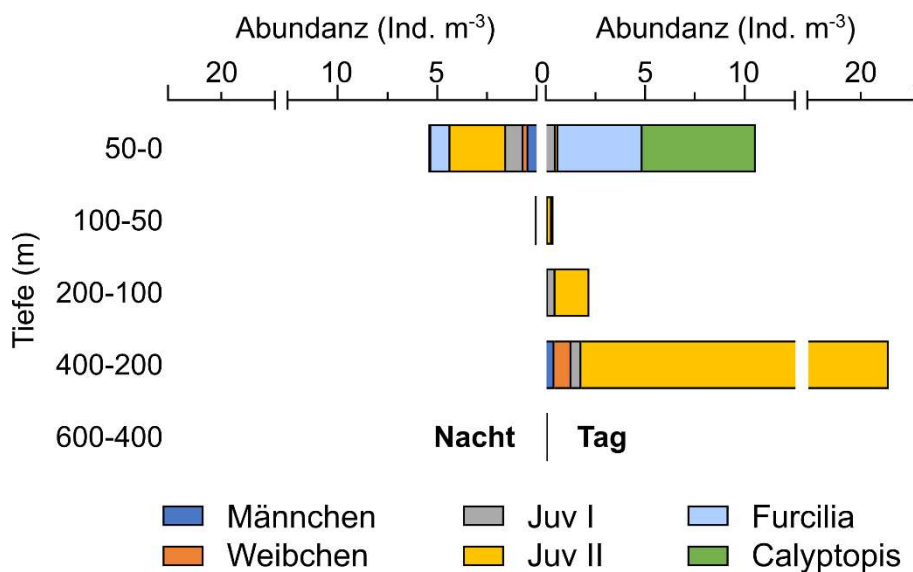


Abb. 7: Verteilung der verschiedenen Entwicklungsstadien von *Euphausia mucronata* über die Tiefe in der Nacht und am Tag an Station 80.

Anhand der gewichteten mittleren Tiefe (WMD) lassen sich die Wanderamplituden der verschiedenen Entwicklungsstadien von *E. mucronata* an Station 80 gut darstellen (Abb. 8). Die WMDs der Larvenstadien (Furcilia, Calyptopis) variierten von 13-37 m während des Tages und der Nacht. Die WMDs der Adulten und Juvenilen lagen bei 200 bis 300 m am Tag und bei 25 bis 110 m in der Nacht. Das Wanderverhalten dieser Stadien unterschied sich hinsichtlich der Distanzen, die zwischen Tag und Nacht zurückgelegt wurden. Die Männchen und Weibchen wiesen die größte Wanderamplitude von maximal 275 bzw. 272 m auf. Bei den Juvenilen (I+II) lag diese bei ca. 230 m.

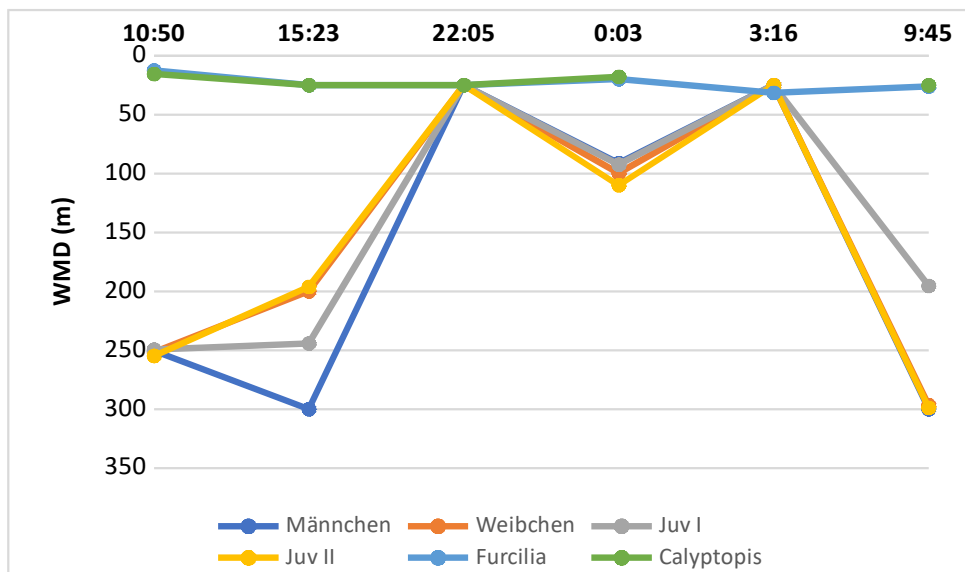


Abb. 7: Gewichtete mittlere Tiefen (WMD) von verschiedenen Entwicklungsstadien von *Euphausia mucronata* im 24 Stunden-Verlauf auf Station 80.

Die Juvenilen und Adulten wandern somit in die Sauerstoffminimumzone und verweilen bei sehr geringen bis anoxischen Sauerstoffkonzentrationen, um tagsüber die dunklen Wasserschichten als Refugium vor Prädatoren zu nutzen. Im Gegensatz dazu verweilen die Larvenstadien an der Oberfläche. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Larven wegen ihrer geringen Masse in tieferen Gewässern durch Strömungen fortgespült werden, es könnte aber auch durch physiologische Einschränkungen (z.B. Metabolismus noch nicht an Wanderung angepasst) begründet sein.

Am Schelfhang und im ozeanischen Bereich spielen juvenile und adulte Euphausiaceen aufgrund ihres erhöhten Vorkommens (Abb. 4) und ihrer ausgeprägten täglichen Vertikalwanderungen eine wichtige Rolle für den Kohlenstofffluss im HUS vor Peru. Durch die Vertikalwanderung wird einerseits Kohlenstoff aktiv in tiefere Wasserschichten transportiert und andererseits passiv durch die Produktion großer, schnell sinkender Kotballen. Die maximal migrierende Biomasse von *E. mucronata* betrug  $33 \text{ g TM m}^{-2}$ , die aus der Oberfläche in die SMZ unterhalb von 100 m verlagert wird. Daraus ergibt sich ein täglicher Kohlenstofffluss von ca.  $230 \text{ mg C m}^{-2}$ , der durch Respiration in Tiefen von 100-600 m gelangt. Egestionsraten, die als Proxy für die Kotballenproduktion genutzt werden können, ergaben, dass von *E. mucronata*  $170 \text{ mg C m}^{-2}$  pro Tag potenziell als Kotballen ausgeschieden werden und absinken.

Durch die zentrale Rolle, die *E. mucronata* im Nahrungsnetz einnimmt, spielt diese Art eine Schlüsselrolle im Energietransfer des Nahrungsnetzes im HUS vor Peru.

## 2. Zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung wurde entsprechend der Bewilligung verwendet. Die im Rahmen der Personalausgaben beantragten und bewilligten Mittel wurden wie vorgesehen ausgegeben. Der weitaus größte Teil diente der Anstellung von Frau Dr. Anna Schukat als wissenschaftliche Mitarbeiterin. Weitere Personalmittel wurden für die Finanzierung studentischer Hilfskräfte zur Vorbereitung und Teilnahme an der MSM80-Expedition sowie zur Unterstützung der Laborarbeiten ausgegeben. Aufgrund tariflicher Gehaltssteigerungen während der Projektlaufzeit waren die Personalmittel letztendlich höher als ursprünglich veranschlagt. Reisemittel

wurden wie vorgesehen für die Expedition mit FS *Maria S. Merian* (MSM80) sowie für die Mesokosmos-Arbeiten vor Ort in Lima verwendet.

Da das Teilprojekt TP4 mit Dr. Auel als Fahrtleiter für die Organisation der MSM80-Expedition verantwortlich war, wurden uns weitere Mittel für die Expeditionslogistik bewilligt und entsprechend verwendet (u.a. Containertransporte, Flugkosten für die Teilnahme peruanischer Projektpartner an der Expedition).

Die Mittel für Verbrauchsmaterial und externe Aufträge für die Analyse stabiler Isotope wurden planmäßig ausgegeben.

Pandemiebedingt wurde die Projektlaufzeit bis zum 31.12.2022 verlängert, die Stelle der wissenschaftlichen Mitarbeiterin Dr. Schukat jedoch nur um neun Monate bis zum 31.08.2022.

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

Die von uns im Rahmen des WP3 durchgeführten Forschungsarbeiten waren in vollem Umfang notwendig und angemessen, um die im Antrag dargestellten Ziele des Forschungsvorhabens zu erreichen.

### **4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Der Schwerpunkt des Projekts lag auf der Erforschung des pelagischen Nahrungsnetzes und der trophischen Transfereffizienz im Küstenauftriebssystem des Humboldtstroms und wie sich die Produktivität dieses Ökosystems mit dem Klimawandel ändern wird. Somit waren keine direkt wirtschaftlich verwertbaren Ergebnisse avisiert worden. Die Erkenntnisse dieses Projekts tragen jedoch wesentlich zum besseren Verständnis trophischer Interaktionen und der Produktivität des Humboldt-Auftriebssystems bei und bilden somit die Grundlage für ein nachhaltiges Management der Fischerei und natürlicher Ressourcen dieses Systems. Die dafür verantwortliche behördliche Institution IMARPE war als südamerikanischer Projektpartner direkt in das CUSCO-Projekt eingebunden, so dass wissenschaftliche Erkenntnisse auf schnellstem Wege in ein optimiertes Management einfließen können. Durch die aktive Einbindung junger Nachwuchswissenschaftler aus Peru (IMARPE) in die praktische Forschung wurde außerdem ein wesentlicher Beitrag zum Capacity Building in der Meeresforschung und dem nachhaltigen Management mariner Ressourcen geleistet. Die hochauflösenden CUSCO-Daten erweitern Langzeitdaten des IMARPE zur Zooplanktonverteilung als Basis für verbesserte Ökosystem- und Kohlenstoffflussmodelle.

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

Relevante Ergebnisse von dritter Seite sind nicht bekannt. Durch den engen Kontakt mit unseren Projektpartnern in Peru hatten wir jederzeit einen aktuellen Überblick über die Forschungsaktivitäten vor Ort. Darüber hinaus wurden potenzielle Fortschritte anderer Stellen bezüglich unserer Thematik im Verlaufe des Projekts anhand einschlägiger wissenschaftlicher Publikationen intensiv recherchiert. Es wurden jedoch keine Veröffentlichungen zu Arbeiten im CUSCO-Auftriebssystem vor Peru bekannt, die direkte Auswirkungen auf unser Forschungsvorhaben gehabt hätten oder die in diesem Projekt bearbeiteten Fragestellungen bereits beantwortet hätten.



## 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

### Veröffentlichungen

Massing JC, Schukat A, Auel H, Auch D, Kittu L, Pinedo Arteaga EL, Correa Acosta J, Hagen W (2022) Toward a solution of the “Peruvian Puzzle”: Pelagic food-web structure and trophic interactions in the northern Humboldt Current Upwelling System off Peru. *Front Mar Sci* 8:759603. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.759603>

Schukat A, Hagen W, Dorschner S, Correa Acosta J, Pinedo Arteaga EL, Ayón P, Auel H (2021) Zooplankton ecological traits maximize the trophic transfer efficiency of the Humboldt Current upwelling system. *Prog Oceanogr* 193: 102551. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102551>

Auch D, Steinen V, Steckhan L, Koppelman R, Yari S, Mohrholz V, Schukat A, Fernández-Méndez M, Kittu L, Peck MA (in revision) Oceanographic structuring of the mucous-mesh grazer community in the Humboldt Current off Peru. *Mar Ecol Prog Ser*

Schukat A, Bode-Dalby M, Massing JC, Hagen W, Auel H (in revision) Carbon budgets of copepod communities in the northern Humboldt Current System off Peru. *Mar Ecol Prog Ser*

Schukat A, Bode-Dalby M, Hagen W, Auel H (in preparation) Distribution patterns in relation to environmental factors of dominant calanoid copepods in the Peruvian upwelling systems.

Schukat A (2022) Abundance and biomass of *Calanus chilensis* in the Humboldt Current System during Maria S. Merian cruise MSM80. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940765>

Schukat A, Bode-Dalby M, Massing JC, Hagen W, Auel H (2022) Respiration, ingestion and egestion rates of copepods from the northern Humboldt Current System off Peru during Maria S. Merian cruise MSM80. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.949569>

Schukat A, Massing JC, Auch D, Dorschner S, Welker A, Auel H (2022): Stable isotope composition of zooplankton, fishes and sea birds from the northern Humboldt Current System during Maria S. Merian cruise MSM80. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.949564>

Schukat A, Massing JC, Dorschner S, Hagen W, Auel H (2022) Fatty acid composition of zooplankton, fishes and sea birds from the northern Humboldt Current System during Maria S. Merian cruise MSM80. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.949562>

### Abgeschlossene Projekt- und Examensarbeiten

Maßing JC (2019) Respiratory adaptations reflecting life strategies of key crustaceans in the Humboldt Current upwelling system. Student Research Project Report (SRP), Universität Bremen



Maßing JC (2019) Food web structure and trophic interactions in the Humboldt Current upwelling system off Peru. Masterarbeit, Universität Bremen

Jordan T (2021) Zur Dynamik des Vertikalaufstiegs von Euphausiaceen während der Dämmerung im Humboldt-Auftriebsgebiet vor Peru. Projektarbeit (PM4), Universität Bremen

Jordan T (2021) Zur stadienspezifischen Vertikalwanderung von Euphausiaceen im Humboldt-Auftriebsgebiet vor Peru. Bachelorarbeit, Universität Bremen

#### *Vorträge und Poster auf internationalen Konferenzen*

Ofelio C, Schukat A, Auch D, Kurbjuweit S, Moyano M, Rioual F, Sswat M, Aguirre-Velarde A, Peck MA (2022) Understanding the vulnerability of Peruvian anchovy larvae to environmental variables. Oral communication, International Symposium on Small Pelagic Fish: New Frontiers in Science for Sustainable Management, Lisbon 7-11 November 2022.

Maßing JC, Schukat A, Auel H, Hagen W (2019) Food web structure and trophic interactions in the Humboldt Current Upwelling System off Peru. Oral presentation, ICYMARE, Bremen, 24-27 September 2019.