# FKZ 03F0876A-C
# CO2Meso: Potential und Risiken mesopelagischer Fischerei
# – eine erste kohlenstoffbasierte Bewertung

## Abschlussbericht Teil I:

Bis heute sind die Schätzungen der Biomasse von mesopelagischen Fischen nicht gut abgesichert und reichen von frühen Schätzungen von 1 Gt (Gjøsæter & Kawaguchi, 1980) bis zu neueren Schätzungen von ~10 Gt Nassgewicht (Irigoien et al., 2014). Mögliche Ursachen für diese Divergenz sind Unsicherheiten bei den Umrechnungsfaktoren in der Studie von Irigoien et al. (2014), die Vernachlässigung von gasblasentragenden Siphonophoren als starke akustische Ziele (Proud et al., 2019), Annahmen über die trophische Ebene von mesopelagischen Fischen (Davison et al., 2015), Unsicherheiten über die Übertragungseffizienz zwischen verschiedenen Organismengruppen sowie die Ernährungspräferenzen von Fischen (wandernde vs. ansässige Gruppe) und ihre Nahrungsquellen (Anderson et al., 2019). Die starke räumliche Streuung der mesopelagischen Fischbestände führt zu Schwierigkeiten bei der Beobachtung (Milligan & Sutton, 2020), wenn es darum geht, Quellen und Senken auf lokaler und globaler Ebene zu identifizieren.
Traditionell werden die Verteilung, Zusammensetzung und Vertikalwanderung mesopelagischer Arten anhand von Netzfängen erfasst. Die meisten Studien haben sich jedoch nicht auf die biologische Kohlenstoffpumpe konzentriert (Kiko et al. 2020b). Allerdings werden in den Netzfängen empfindliche Arten wie gelatinöses Plankton (Hoving et al. 2019) und große Protozoen (Biard et al. 2016) unterschätzt, so dass das Kohlenstoffbudget unvollständig ist. Die Bedeutung von Komponenten wie mesopelagischen Fischen kann allerdings nur bewertet werden, wenn auch die anderen Komponenten gut charakterisiert sind. Bei groß angelegten Bewertungen werden häufig akustische Daten verwendet (z. B. Irigoien et al. 2014), wobei Beiträge von Arten wie Siphonophoren übersehen werden (Proud et al. 2019). Optische In-situ-Beobachtungen (Hoving et al. 2019, Lombard et al. 2019) sind daher optimal und sollten ergänzend verwendet werden.
In diesem Projekt wurden vorhandene Daten neu ausgewertet um die Lücke im Kohlenstoffbudget zu schließen.
Zur quantitative Biomasse- und Kohlenstoffflussabschätzung haben wir existierende und neue Daten aus dem tropischen Atlantik (Expeditionen M97, MSM49, POS520, POS532, MSM106, Saildrone Mission ATL2MED), dem Humboldtstrom (M93 & M138) und Norwegen (HE570 und GOSars ICES Training) herangezogen. In verschiedenen regionalen Fallstudien wurden erhebliche Fortschritte in der Beobachtung der Verteilung mesopelagischer Fische und ihrer Rolle im Kohlenstoffkreislauf gemacht. Wir haben hierzu Netzfänge sowie akustische und optische in situ Beobachtungen und eDNA verwendet.
Die Ergebnisse wurden zusammen mit Literaturwerten genutzt um das im Projekt weiterentwickelte globale Modell zu evaluieren. Mit Hilfe des Modells konnten erstmals Abschätzungen zu dem Einfluss einer potentiellen mesopelagischen Fischerei und anderen anthropogenen Stressoren auf die mesopelagische Fischbiomasse und den zugrundeliegenden biogeochemischen Kreisläufen untersucht werden. Die Ergebnisse

zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen einer Abnahme in der Biomasse mesopelagischer Fische, bedingt z.B. durch Fischerei, oder einer Abnahme in der Futterqualität als Konsequenz der Folgen des Tiefseebergbaus, und einer Abnahme im Kohlenstoffexport und auch der Primärproduktion. Auch klimabedingte Änderungen ($CO_2$ Anstieg unter einem RCP 8.5 Szenario) führen zu einer globalen Abnahme der mesopelagischen Fischbiomasse.
Um Unsicherheiten in einer ökonomisch rationalen Bewirtschaftung mesopelagischer Fischbestände zu erfassen, wurde ein bioökonomische Modelle erstellt und analytisch sowie numerisch untersucht. Insbesondere haben wir untersucht, ob die verschiedenen Unsicherheiten eher zu mehr oder weniger intensiver Befischung beitragen. Es hat sich gezeigt, dass beides der Fall sein kann. Unsicherheit über die Bestandsdynamik führt eher dazu, den Bestand intensiver zu nutzen. Dagegen machen Unsicherheiten über den künftigen Wert der Fisch Investitionen in Fangkapazitäten tendenziell weniger attraktiv. Denn es gibt einen Realoptionswert, Investitionen der Fischereikapazität in die Zukunft zu verschieben. Insgesamt kommen wir zu dem Ergebnis, dass aus ökonomischer Sicht auf absehbare Zeit nur eine Versuchsfischerei auf mesopelagische Bestände geben sollte, jedoch keine großskalige kommerzielle Fischerei.
Des Weiteren wurde mit dem Vorhaben eine Lücke im völkerrechtlichen Schrifttum geschlossen, indem erstmals die relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen, Grundsätze sowie Erhaltungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen für künftige mesopelagische Fischereien identifiziert und analysiert wurden. In einem ersten Schritt wurde zunächst die bestehende außerrechtliche Literatur zusammengefasst, um bestehende wissenschaftliche Unsicherheiten sowie Besonderheiten mesopelagischer Spezies aufzuzeigen, die bei der Entwicklung von Managementmaßnahmen berücksichtigt werden müssen. Sodann wurden potentiell relevante internationale Übereinkommen (u.a. UN-Seerechtsübereinkommen (SRÜ), United Nations Fish Stocks Agreement (UNFSA) etc.) auf ihre Anwendbarkeit auf mesopelagische Fischbestände hin überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass das bestehende internationale Fischereirecht zwar dem Grunde nach auf mesopelagische Fischbestände anwendbar ist, jedoch keine spezifisch auf die betreffenden Spezies zugeschnittene Regelungen statuiert. Deshalb kommt im Hinblick auf eine künftige Bewirtschaftung mesopelagischer Bestände dem Ökosystem- und dem Vorsorgeansatz besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund wurden im zweiten Schritt die Anforderungen, die sich aus dem in zahlreichen internationalen Fischereiinstrumenten normierten Vorsorgeansatz für die Bewirtschaftung der mesopelagischen Fischbestände ergeben, erarbeitet. Es wurde aufgezeigt, dass sich mit diesem Ansatz – seine effektive Anwendung zugrunde gelegt – den bestehenden wissenschaftlichen Unsicherheiten ebenso wie den Besonderheiten mesopelagischer Spezies angemessen Rechnung tragen lässt. Im dritten Schritt beschäftigte sich das Projekt mit der Frage, wie ein optimales, den Anforderungen der Fischereiwirtschaft wie der nachhaltigen Nutzung und der Bestandserhaltung gerecht werdendes Managementregime aus völkerrechtlicher Sicht ausgestaltet werden sollte. Dabei zog das Projekt Lehren aus den Erfahrungen, die im Rahmen bestehender regionaler Fischereiorganisationen sowie im Hinblick auf die Bewirtschaftung von Tiefseebeständen gesammelt wurden. Im Ergebnis konnte das Projekt aufzeigen, dass ein vollständiges Fischereimoratorium in der mesopelagischen Zone nicht erforderlich ist. Ein strikt am Vorsorgeansatz orientiertes und schrittweise vorgehendes Bewirtschaftungsregime kann vielmehr zu einem besseren Verständnis des mesopelagischen Ökosystems und seine Rolle im Kohlenstoffkreislauf beitragen.

# FKZ 03F0876A-C
# CO2Meso: Potential und Risiken mesopelagischer Fischerei
# – eine erste kohlenstoffbasierte Bewertung

## Abschlussbericht Teil II:

### Darstellung der Ergebnisse

Mesopelagische Organismen sind auf Nahrung angewiesen, die letztendlich aus der photosynthetischen biologischen Produktion in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht des Ozeans stammt und entweder nachts gejagt wird, wenn viele Arten von der mittleren Wassertiefe an die Oberfläche wandern, oder durch passives Absinken organischer Partikel in die Tiefe transportiert wird (Craiger et al. 2021). Da ein großer Teil dieses organischen Materials entweder in der Tiefe veratmet oder in dichte, schnell sinkende Kotpellets umgepackt wird, sind mesopelagische Organismen ein integraler Bestandteil der biologischen Kohlenstoffpumpe (Saba, 2021). Der Einfluss des Kohlenstoffflusses durch die tägliche Vertikalwanderung (DVM) beträgt etwa 10-30% des gesamten Kohlenstoffflusses von der Oberfläche in das Innere des Ozeans (Davison et al., 2013; Aumont et al., 2018). Da DVM sehr artspezifisch sein kann und Daten über die Gemeinschaftsstruktur fehlen, bleibt die genaue Menge des auf diesem Weg sequestrierten Kohlenstoffs unsicher. Für eine potenzielle mesopelagische Fischerei werden modellierte Schätzungen durch das Fehlen einer soliden Beobachtungsgrundlage erschwert und wurden daher bis dato noch nicht durchgeführt (z.B. Martin et al., 2020).

Angesichts der Unsicherheiten in Bezug auf die Umweltauswirkungen, die kommerzielle Rentabilität und die gesellschaftlichen Kosten der mesopelagischen Fischerei besteht Unklarheit darüber, ob mesopelagische Arten wirklich als wirtschaftlich nutzbare Ressourcen betrachtet werden können. Trotz dieser Unsicherheit sind mesopelagische Arten, wie andere Ziele neuer und aufstrebender Fischereien, aufgrund von Faktoren wie verlockenden kurzfristigen Gewinnen, fehlenden spezifischen Vorschriften und erheblichen Wissenslücken über die Auswirkungen der Fischerei auf die Zielbestände und das umliegende Ökosystem hoch anfällig für Überfischung (Caddell, 2018). Folglich ist ein effektives Bestandsmanagement, das eine nachhaltige Fischerei sicherstellt, unerlässlich, um eine Übernutzung mesopelagischer Organismen zu vermeiden und die marine Biodiversität und ökologische Funktionen zu erhalten. Da jede potenzielle Bewirtschaftung initiiert wird, bevor wissenschaftliche Gewissheit über die oben genannten Faktoren hergestellt werden kann (vorausgesetzt, dass dies überhaupt möglich ist), wird die Anwendung des Vorsorgeprinzips unerlässlich sein, um gegen potenzielle negative Umweltauswirkungen zu schützen. Diese dringende politische Herausforderung muss vor dem Beginn der mesopelagischen Fischereiaktivitäten angegangen werden.

Unsicherheiten in den globalen Biomasseschätzungen sind sehr groß. Beobachtungen reichen von 1 Gt (Gjøsæter & Kawaguchi, 1980) bis zu 10 Gt (Irigoien et al., 2014). Unsicherheiten entstehen hier zum einen dadurch, dass die Messdatendichte nicht

besonders groß ist und zum anderen durch Unsicherheiten, die von den Messmethoden selbst verursacht werden. In diesem Projekt wurden verschiedene vorhandene Daten- und Probensätze im tropischen Nordostatlantik analysiert (Harouna, 2022; Silva, 2022; Rodrigues, 2022). Die Inselgruppe Cabo Verde liegt im östlichen tropischen Nordatlantik zwischen den oligotrophen Gewässern des offenen Ozeans und dem produktiven küstennahen Auftriebssystem des Kanarenstroms.

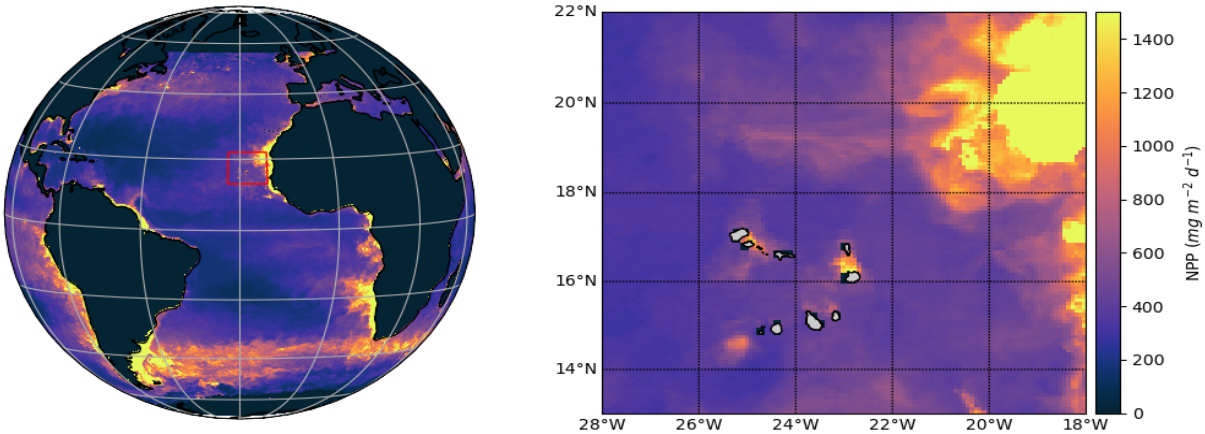


**Fig. 2.** Satellitengestützte Nettoprimärproduktivität (NPP, mg C $m^{-2}$ $d^{-1}$) im November 2019 weltweit (links, der rote Kasten zeigt das vergrößerte Gebiet an) und in der Region Cabo Verde (rechts). Die Daten sind Standard-VGPM nach Behrenfeld & Falkowski, 1997 und wurden von der Ocean Productivity Home Page (http://sites.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/standard.product.php) heruntergeladen.

Die Region der Kapverden zeichnet sich durch eine relativ geringe Primärproduktivität aus, obwohl in Modellen die höchste Biomasse an mesopelagischem Mikronekton im tropischen und subtropischen Nordatlantik zu finden ist (>200 mg C $m^2$, SEAPODYM, Lehodey et al., 2015). Diese Vorkommen mit hoher Biomasse sind jedoch äußerst lückenhaft und hängen mit Wirbeln, Filamenten und insel- oder seeberginduziertem Auftrieb zusammen. Wie sich dies auf die Verteilung höherer trophischer Ebenen auswirkt, ist derzeit noch nicht genau bekannt. In zwei MSc-Arbeiten im Rahmen des WASCAL- Programms und CO2MESO wurden die räumliche Verteilung und die tägliche vertikale Migration von mesopelagischen Organismen im Hinblick auf Merkmale analysiert, die ihre Biomasse potenziell fördern. Dazu wurden während der ALT2MED-Mission im Oktober bis Dezember 2019 zwei mit einem ADCP und einem Simrad EK80-Echolot ausgestattete Segeldrohnen eingesetzt, die mit einem Zweifrequenz Kombischwinger (38 kHz und 200 kHz) betrieben wurden (Fig. 3). Weitere Daten, ebenfalls mit einem EK80 38/200kHz, wurden aufgenommen während der „Floating University“- Reise MSM106 mit RV Maria S. Merian im Februar 2016. Hier wurde auch ein autonomes EK80 (WBAT) mit der Schleppkamera PELAGIOS kombiniert, um

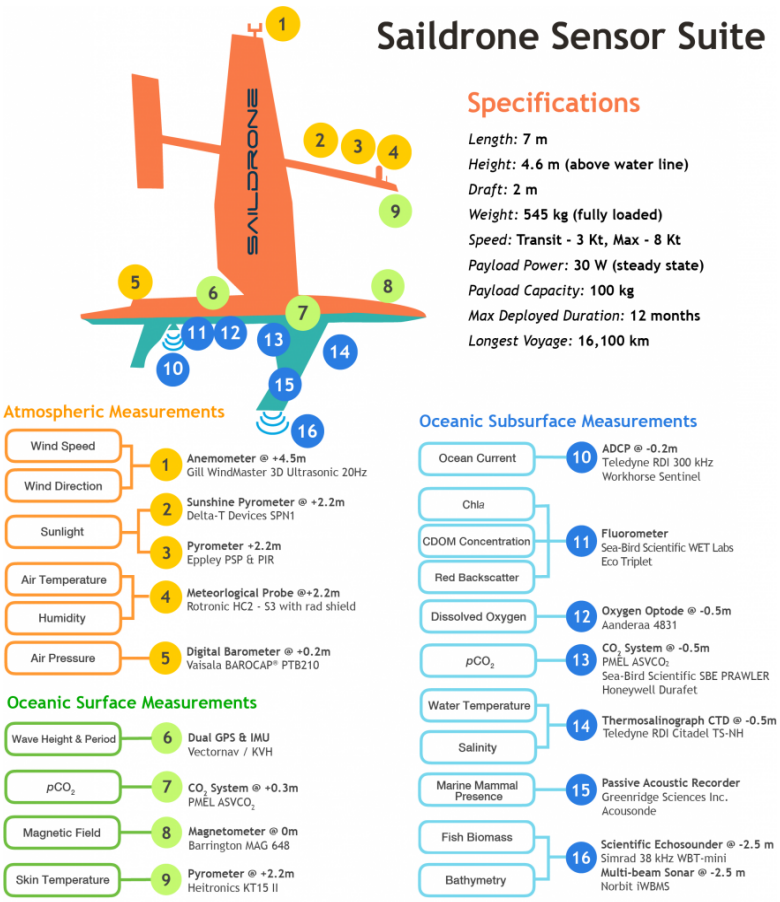


Fig. 3: Saildrone mit beispielhaften Sensoren. Auf ATL2MED wurden zwei Saildrones eingesetzt, von der die eine mit einem ADCP und die andere mit einem EK80 ausgestattet war.

optische Belege für akustische Targets (insbesondere Siphonophoren) zu erlangen. Der direkte Vergleich von in situ akustischen und optischen Beobachtungen von Siphonophoren konnte noch nicht fertiggestellt werden, es liegen hierzu jedoch Rohdaten vor (MSM106 und HE570). Das allgemeine vertikale Migrationsmuster wurde bestätigt und mit der Oberflächeneinstrahlung in Verbindung gebracht, mit der größten Tiefe zur Mittagszeit und geringerer Tiefe am Morgen und Nachmittag. Die vertikale Verteilung zeigte, dass auch die Tiefe in den Tageslichtstunden dynamisch ist und am Sonnenmittag am tiefsten ist sowie von der Oberflächenlichtintensität abhängt. Mesopelagische Organismen passen ihre Position also während des

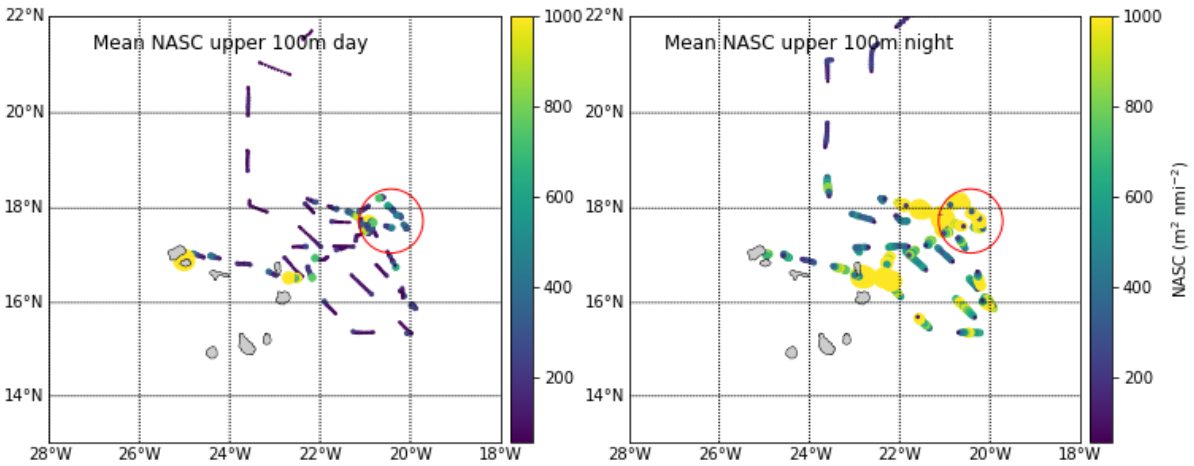


**Fig. 4.** Nautischer Flächenstreukoeffizient (NASC in m2 nmi-2) bei 200 kHz (SD1053), integriert über die oberen 100 m während des Tages (links) und während der Nacht (rechts). Die Daten sind stündlich gemittelt.

Tagesgangs als Reaktion auf die Intensität des Lichts an, das sie wahrnehmen können. Im Untersuchungsgebiet wurde eine erhöhte Chl-a-Konzentration wie auch erhöhte Zooplankton – und Mikronektonbiomasse nachgewiesen i) nahe der Inseln Sal und Sao Vicente und ii) im Einflussbereich eines zykonalen Wirbels nordöstlich der Insel Sal (Abb. 4-6).

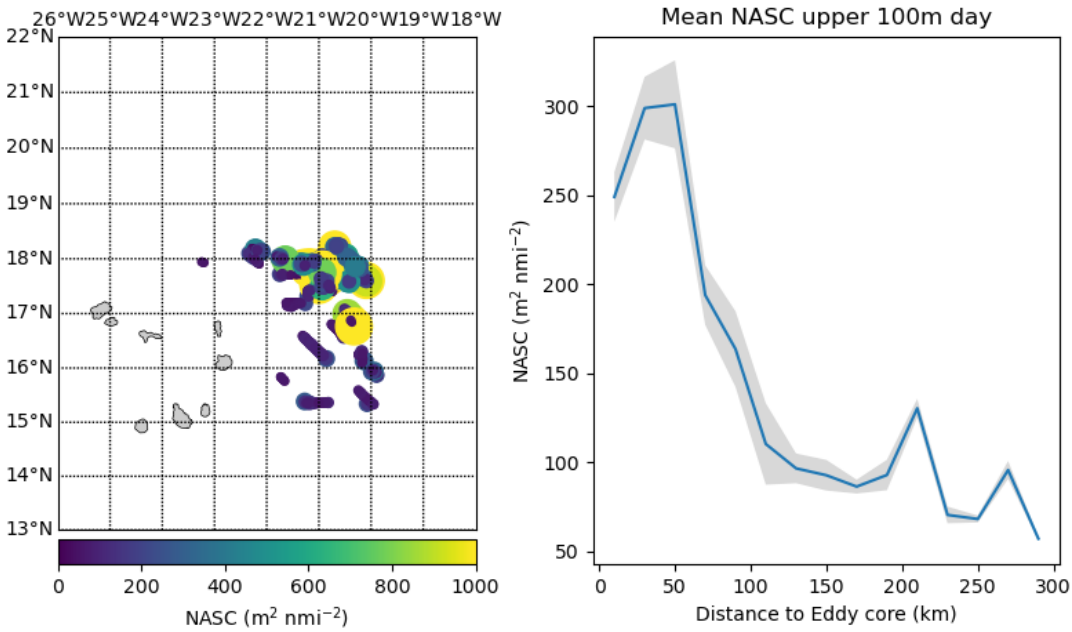


**Fig. 5.** Beziehung zwischen NASC (Saildrone EK80, 200kHz) und der Entfernung zum Wirbelkern in km (integriert über die oberen 100 Meter) während des Tages um Cabo Verde von Oktober bis Dezember 2019.

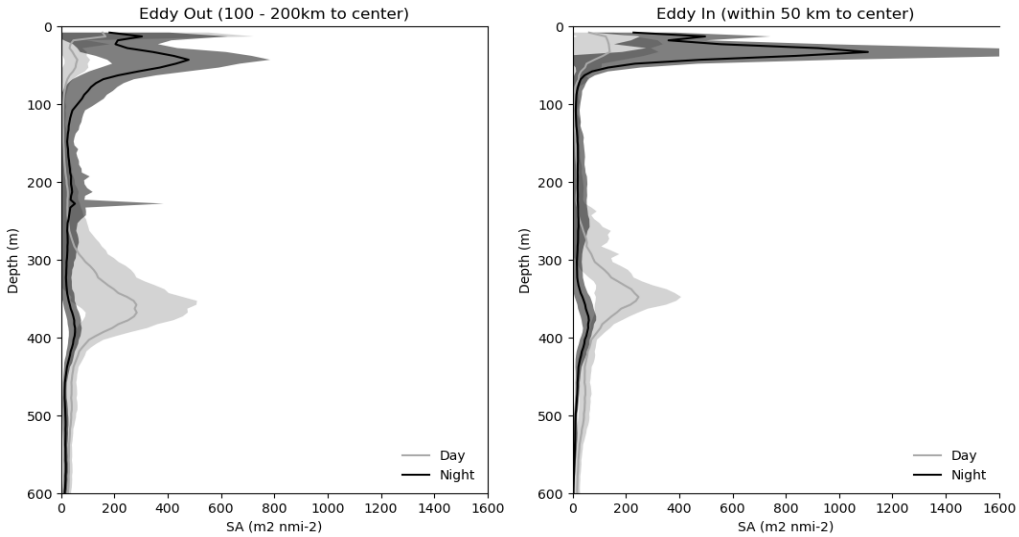


**Fig. 6.** Vertikale Verteilungen der akustischen Rückstreuung (Streukoeffizient SA für die nautische Fläche in $m^2$ $nmi^{-2}$). Mittlere (+- Standardabweichung) Rückstreuung von Saildrone EK80_38Khz ausserhalb des Eddys (links; in 100 bis 300 km Entfernung zum Zentrum) und innerhalb (rechts, < 50 km zum Zentrum) während des Tages (grau) und der Nacht (schwarz).

Im Projektzeitraum hat Frau Dr. Hauss eine Expedition mit RV Heincke beantragt und durchgeführt (HE570), die neben der Harmonisierung von in situ Beobachtungsmethoden

zwischen den in der Meeresforschung aktiven Helmholtz-Instituten AWI, HEREON und GEOMAR gebräuchlichen Instrumente (insbesondere Kamerasysteme) zum Ziel hatte, die biologische Kohlenstoffpumpe in zwei Fjorden (jeweils einer mit und ohne mesopelagische Fische) quantitativ zu erfassen. Frau Kea Witting hat ihre MSc-Arbeit hierzu erfolgreich fertiggestellt, das Manuskript wird innerhalb der nächsten drei Monate zur Begutachtung eingereiht. Die Studie vergleicht die BCP zweier benachbarter norwegischer Fjorde mit ähnlicher Topographie, aber unterschiedlichen pelagischen Ökosystemen. In dem einen Fjord kommen zwei mesopelagische Fischarten vor (*Maurolicus muelleri* und *Benthosema glaciale*) und in dem anderen dominiert als Prädator im Mesopelagial die Tiefsee-Medusa *Periphylla periphylla*. In dieser Studie wurden eine Vielzahl von Fanggeräten (MultiNets) und bildgebenden Instrumenten (UVP5, PELAGIOS) verglichen. Dies ermöglichte es, unterschiedliche Wege des BCP zu verstehen und mögliche Stichprobenverzerrungen oder Wissenslücken zu identifizieren, die sich aus den verwendeten Instrumenten ergeben. Wir stellten auch die Hypothese auf, dass der von mesopelagischen Fischen verursachte Kohlenstoffexportfluss (durch Feces und herabsinkende Kadaver) im Meeresbodensediment des Fjords nachgewiesen werden kann, indem wir den relativ neuen Ansatz der Verwendung von Sediment-Umwelt-DNA (eDNA) verwenden. Die Ergebnisse weisen auf große Unterschiede zwischen den Fjordökosystemen hin, die bei allen verwendeten Instrumenten erkennbar sind. Alle Ergebnisse deuten auf eine geringere Kohlenstoffbindungsrate im von *P. periphylla* dominierten Lurefjord aufgrund von Veränderungen des BCP-Wegs hin. Im Sediment sicher nachgewiesen werden konnte jedoch keine der beiden Fischarten, allerdings mehrere im Gebiet vorkommende andere epipelagische und demersale Fischarten wie etwa Makrelen, mehrere heringsartige und kabeljauartige Fischarten sowie (Zucht-) Lachs. Frau Witting hat die Arbeit beim Marine Imaging Workshop vorgestellt, hier wurde auch ein Vortrag von H. Hauss zum Vergleich verschiedener Kamerasysteme auf der Heincke-Fahrt HE570 gehalten. Alle auf HE570 durchgeführten Arbeiten wurden auch auf der Statuskonferenz Forschungsschiffe 2024 präsentiert (Hauss 2024).
Das Verständnis der trophischen Interaktionen in der mesopelagischen Zone ist sowohl im ökologischen als auch für die potenzielle kommerzielle Nutzung von Bedeutung. Mittels eines während des ICES Kurses 2019 mit G.O. Sars im Sørfjorden erhobenen Daten- und Probensatzes haben wir trophische Interaktionen zwischen mesopelagischen Fischen (*Maurolicus muelleri*) und ihrer Beute (*Calanus finmarchicus)* sowie das großräumige Verhalten beider Arten zusammen mit der Lichtintensität und der Beutetierdichte untersucht (Thorvaldsen et al. in prep, Fig. 7). Es gibt bisher nur begrenzte Kenntnisse darüber, wie sich das individuelle 3D-Verhalten von *C. finmarchicus* bei Begegnungen mit dem Räuber *Maurolicus muelleri* ändert. Wir haben erfolgreich einzelne Individuen von *C. finmarchicus* in situ verfolgt, ihr unterschiedliches Schwimmverhalten in verschiedenen Tiefen parametrisiert und ihre skalenabhängige Selbstüberlappung auf der Grundlage der durch ihre Bewegung erzeugten spezifischen Pfade berechnet. Wir fanden heraus, dass die Schwimmaktivität in den Oberflächenschichten (bei höherer Lichtintensität) höher war. Dies erklärt warum juvenile *Maurolicus* zur Nahrungssuche eine Tiefenschicht mit geringerer *C. finmarchicus* Dichte aufsuchen.
In-situ-Beobachtungen mit Tauchbooten und Schleppkameras können neue Erkenntnisse über die Biologie der Fische und ihre Rolle im Ökosystem der Tiefsee liefern. Diese Beobachtungsvideotechniken können auch die Entdeckung neuer Fischarten und Aufzeichnungen in Gebieten ermöglichen, die mit Netzen nur schwer zu beproben sind, und ermöglichen das Verhalten von Tiefseefauna in ihrer natürlichen Umgebung zu dokumentieren. In Hoving & Freitas 2021 beschreiben wir das bisher unbekannte Auftreten eines weit verbreiteten demersalen Tiefseefisches, *Ectreposebastes imus*, im Mesopelagial

(300-900 m Tiefe). Diese ersten mesopelagischen Beobachtungen von *E. imus* deuten auf ein Wanderverhalten (möglicherweise zur Nahrungsaufnahme) in den pelagischen Bereich und damit auf eine mögliche Rolle dieser Art bei der trophischen Kopplung zwischen den pelagischen und benthischen Lebensräumen in der Tiefsee von Cabo Verde und anderswo in ihrer weltweiten Verbreitung hin.

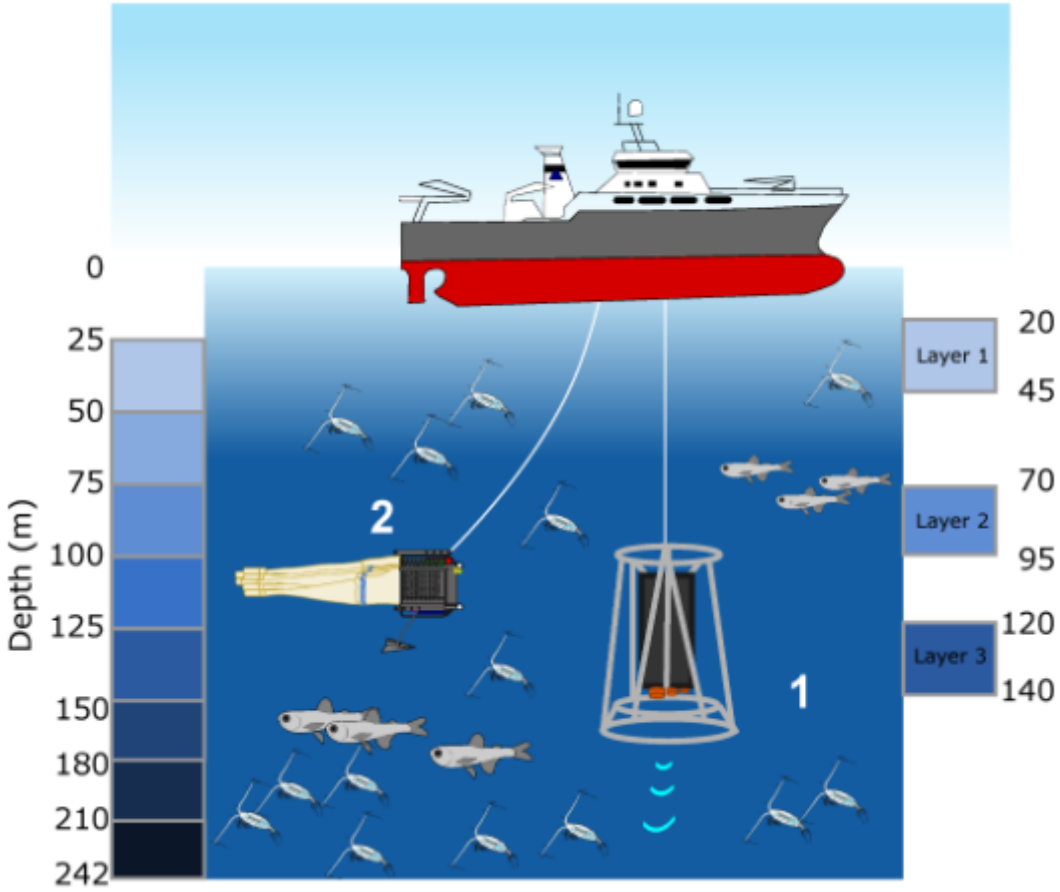


**Fig. 7.**: Vereinfachte Darstellung des Einsatzes der TS-Sonde (1), wobei die TS-Sonde in drei Tiefenschichten abgesenkt wird Schichten von 20-45 Metern, 70-95 Metern und 120-145 Metern abgesenkt wird, die auf der rechten y-Achse markiert sind. Das Hydrobios Mammut-Multinet (2) beprobte die Tiefenschichten auf der linken y-Achse. Schematisch sind *Maurolicus muelleri* und *Calanus finmarchicus* dargestellt. Aus Thorvaldsen et al. in prep.

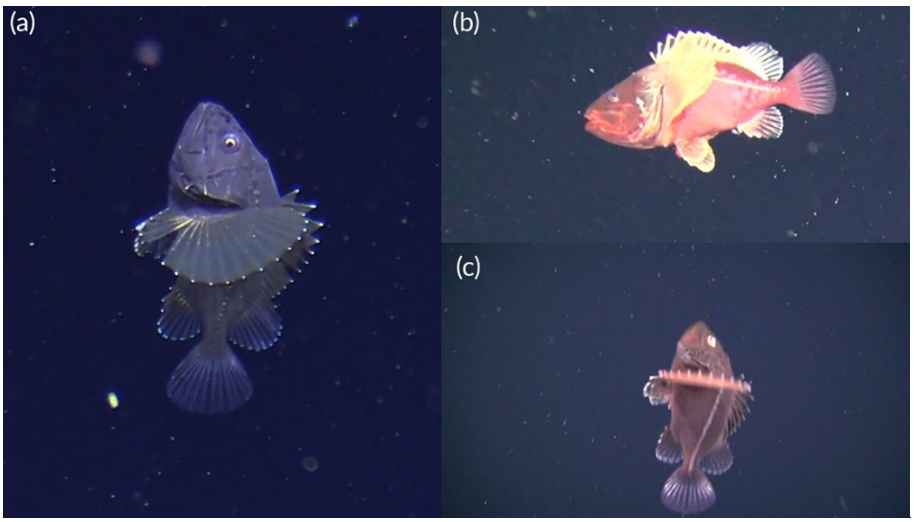


**Fig. 8.** Beispielbilder von *Ectreposebastes imus* (a) beobachtet von Tauchboot JAGO im Mesopelagial auf 350 m vor der Insel Santo Antão, Cabo Verde. Seitenansicht des Fisches in vertikaler Position mit Kopf nach oben, (b) beobachtet von PELAGIOS in horizontaler Position und (c) beobachtet von PELAGIOS in vertikaler Position.

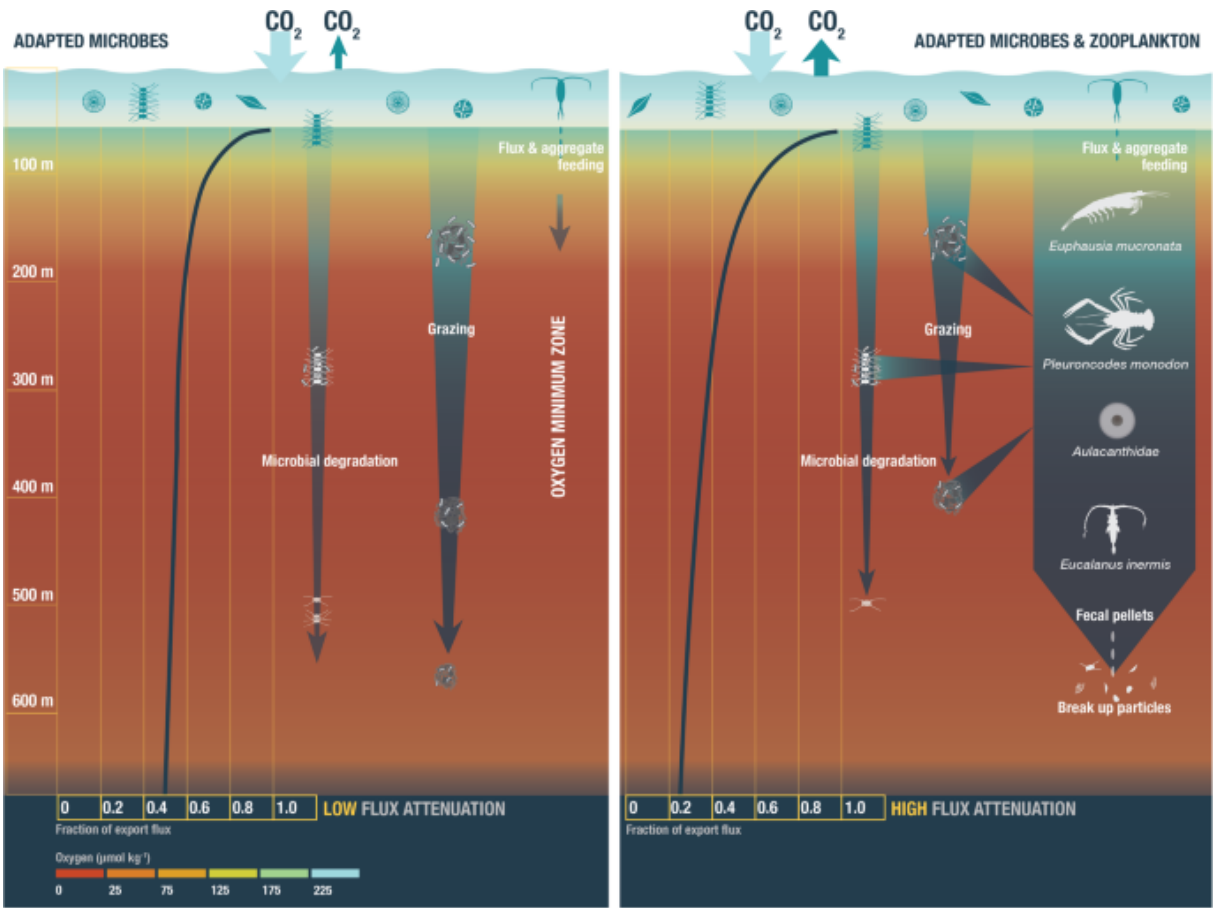


**Fig. 9.** Konzeptuelles Modell der Abschwächung des POC-Exportflusses in der Wassersäule von OMZs. Links: Eine geringe Attenuation des POC-Flusses wird beobachtet, wenn der Abbau organischer Stoffe ausschließlich durch anaerobe mikrobielle Gemeinschaften erfolgt, die an Hypoxie angepasst sind. Rechts: Zusätzlich zu anaeroben Mikroorganismen ernährt sich Zooplankton und Mikronekton, das sich an hypoxische Bedingungen angepasst hat, von sinkenden Partikeln und bricht diese auf, wodurch die Abschwächung des Partikelflusses durch die OMZ verstärkt wird. Engel et al. (2023).

In Engel et al. 2023 beschäftigten wir uns schließlich detailliert mit der Frage, inwiefern Zooplankton und Mikronekton im Auftriebsgebiet vor Peru daran beteiligt ist den Partikelfluss in die Tiefsee zu regulieren. Man ging davon aus, dass die Effizienz des abwärts gerichteten Kohlenstofftransfers in tropischen Auftriebssystemen besonders hoch ist, da die unter dem produktiven Oberflächenwasser auftretende Hypoxie den Abbau der Partikel behindern sollte. In dieser Arbeit zeigen wir, dass sich Hypoxie-tolerantes Zooplankton von sinkenden Partikeln in der ausgedehnten Sauerstoffminimumzone (OMZ) vor Peru ernährt. Mit Hilfe mehrerer Arrays von driftenden Sedimentfallen und In-situ-Bildgebung zeigen wir geochemische und morphologische Transformationen von sinkenden Partikeln und eine wesentliche Kontrolle des Kohlenstoffexports durch Zooplankton. Unsere Ergebnisse stellen die Annahme einer durchgängig effizienten biologischen Kohlenstoffpumpe in OMZ in Frage und zeigen, dass bei der Untersuchung der ozeanischen Kohlenstoffbindung auch die Anpassungen der Organismen an extrem niedrige Sauerstoffkonzentrationen berücksichtigt werden müssen (Fig. 9). Unsere Arbeiten legen nahe, dass vor allem der Krill vor Peru eine Schlüsselrolle nicht nur im Nahrungsnetz, sondern auch in den biogeochemischen Prozessen einnimmt. Wir gehen nun davon aus, dass dessen Aktivitäten zu einer gewissen Retention von Nährstoffen in der Deckschicht führt und somit eine hohe Primärproduktion begünstigt. Welche Rolle in diesem System die mesopelagischen Fische spielen, die noch etwas sensitiver gegenüber niedrigen Sauerstoffkonzentrationen sind, aber ebenfalls tagsüber in die OMZ wandern (Urbina & Koppelmann 2006) ist derzeit noch nicht bekannt

und konnte mit dem vorhandenen Datensatz (erhoben während SFB754) nicht aufgelöst werden.

Beobachtungsdaten sind die notwendige Grundlage um numerische Modelle entwickeln und evaluieren zu können. In diesem Projekt wurde ein globales Erdsystemmodell um eine mesopelagische Modellkomponente erweitert. Diese löst zum einen den Effekt des migrierenden Zooplanktons auf und zum anderen mesopelagische Fische. Es ist weltweit das zweite Modell, dass diese Prozesse explizit auflöst. Dieses Modell hat allerdings den Vorteil, dass es nur um die notwendigsten Komponenten erweitert wurde, und somit weiterhin ein kompletter Spin-up von 10 000 Jahren in einer angemessen Zeit gerechnet werden kann (notwendig für Analysen des tiefen Kohlenstoffexports). Anhand der von den Beobachtern (AP2) zur Verfügung gestellten Daten (eigene und aus Literaturrecherche) konnte gezeigt werden, dass im globalen Mittel die simulierten Zooplanktonbiomassen innerhalb der beobachteten Unsicherheiten liegen. Auf regionaler Skala (40ºS-40ºN) unterschätzt das Modell die Biomasse von migrierendem Zooplankton im Bereich 40ºS-40ºN um 1-30%. Im Südozean wird die gesamte Masse an Zooplankton, insbesondere die des migrierenden Zooplankton, stark unterschätzt. Hier spielt Krill (wird im Modell nicht explizit repräsentiert) eine wichtige Rolle für die Repräsentation des Ökosystems und macht ca. 1/3 der gesamtem Zooplanktonbiomasse aus.

In Bezug auf die Repräsentation der mesopelagischen Fischbiomasse liegen die größten Unsicherheiten in den Parametrisierungen der Flüsse von der Primärproduktion hin zu den höher trophischen Stufen. Der Parameter, der mit den größten Einfluss auf die resultierende Biomasse hat, ist die Fischsterblichkeit. Generell ist die Sterblichkeit ist eine Funktion von Alter, Geschlecht, Anzahl der Raubtiere, Nahrungsverfügbarkeit, Krankheiten und anderen Umwelteinflüssen. Um diesen Parameter aus Beobachtungen ableiten zu können, ist es notwendig die gesamte Lebensspanne einer Altersgruppe von Fischen zu überwachen. In der Regel wird die Sterblichkeit indirekt als Funktion der Langlebigkeit berechnet. Dafür gibt es unterschiedliche Funktionen, welche alle auf Daten von epipelagischen Fischen basieren. Mariana Hill Cruz hat im Rahmen ihrer Doktorarbeit, welche sie in Kollaboration mit CO2Meso abgeschlossen hat, gezeigt, dass die rule-of-thumb, als auch die Parametrisierung von Then et al. (2014) auch für die Berechnung der Sterblichkeit mesopelagischer Fische angewandt werden kann. Die Ergebnisse wurden in Hill Cruz et al. (2023) veröffentlicht. Damit liegen unsere Modellergebnisse der globalen Biomasse mesopelagischer Fische von 1 – 1.4 Gt Nassgewicht (Fig. 10) näher an den frühen Beobachtungen von 1 Gt (Gjøsæter & Kawaguchi, 1980).

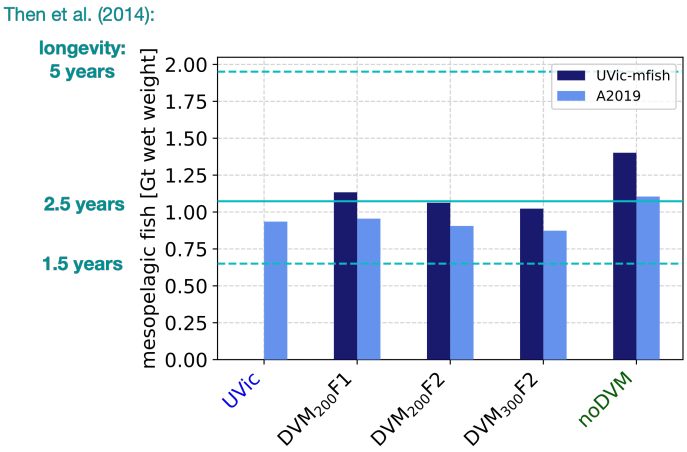


**Fig. 10:** Global integrierte mesopelagische Fischbiomasse in dunkelblau für Simulationen des neuen Modells mit vertikaler Migration (DVM200F1, DVM200F2, DVM300F2), ohne Migration (noDVM) und des ursprünglichen Modells ohne mesopelagischer Komponente. In hellblau sind Werte angegeben, die man erhält wenn man mit dem Modell von Anderson et al. 2019 und der Primärproduktion der entsprechenden Simulationen die Biomasse mesopelagischer Fische berechnet. Die türkisen Striche geben einen Unsicherheitsbereich an, der von der angenommen Langlebigkeit der mesopelagischen Fische abhängt.

Migration von Organismen (Zooplankton und mesopelagische Fische) hat einen weitreichenden Einfluss auf die biogeochemischen Kreisläufe. So nimmt die Primärproduktion global um 14 - 21% und im Bereich zwischen 40ºS und 40ºN um 19 - 29% ab (Fig. 11). Das lässt sich durch den Transport von Nährstoffen (NO3 und PO4) aus der Oberfläche in größere Tiefen aufgrund der im Modell integrierten Migrationsprozesse erklären.

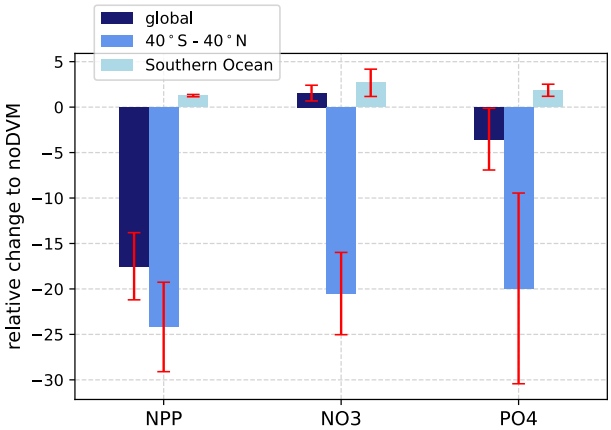


**Fig. 11:** Relative Änderung von NPP, NO3 und PO4 der Simulationen mit vertikaler Migration zu noDVM (alle Organismen sind enthalten, allerdings ohne, dass diese migrieren). Die roten Balken zeigen die Unsicherheiten, die durch unterschiedliche Annahmen über die Migrationstiefen entstehen.

Des Weiteren hat vertikale Migration einen direkten Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf und führt zu einem geringeren Kohlenstoffexport über den Tiefenhorizont von 125m (Fig. 12a). In größeren Tiefen hingegen finden wir eine Zunahme im Kohlenstoffexport, wie wir erwarten würden. Der aktive Export von Kohlenstoff durch die Migration von mesopelagischen Fischen ist etwas größer, als der von migrierendem Zooplankton (Fig. 12b).

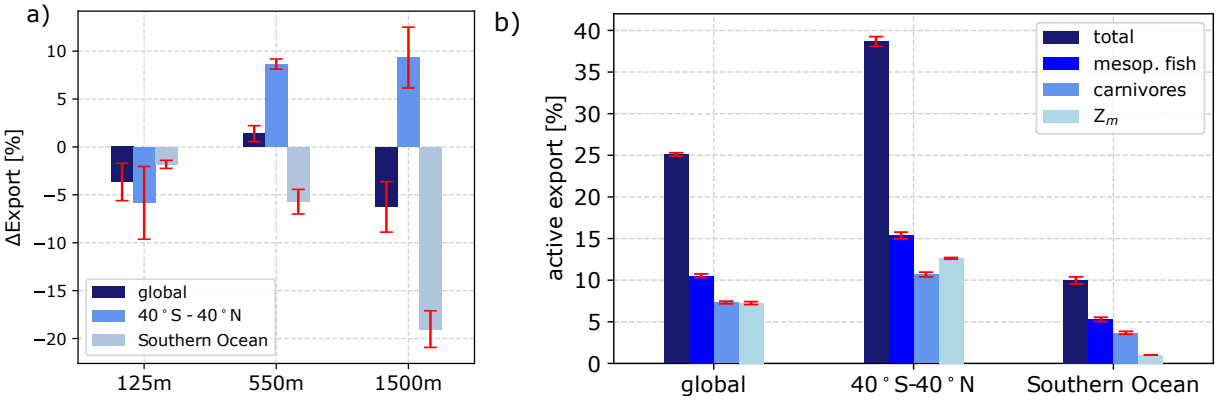


Fig. 12: a) Global integrierte Exportproduktion von Kohlenstoff (dunkelblau), integriert zwischen 40ºS-40ºN (mittelblau) und für den Südozean (hellblau) über einen Tiefenhorizont von 125m, 55m und 1500m für alle Simulationen mit vertikaler Migration zu noDVM (alle Organismen sind enthalten, allerdings ohne, dass diese migrieren). Die roten Balken zeigen die Unsicherheiten, die durch unterschiedliche Annahmen über die Migrationstiefen entstehen. b) Aktiver Export durch Migration relativ zum totalen Kohlenstoffexport über den 125m Tiefenhorizont.

Externe Stressoren können nicht nur zu einer Änderung in der Biomasse mesopelagischer Fische führen, sondern zusätzlich auch die biogeochemischen Kreisläufe beeinflussen. So führt z.B. ein Anstieg in den atmosphärischen CO2 Konzentrationen (unter RCP 8.5) zu einer Abnahme in der mesopelagischen Fischbiomasse um 8-13% (in der Region zwischen 40ºS-40ºN) bis 2100 bei nur einer sehr geringen Änderung in der Primärproduktion in diesem Bereich. Eine potentielle mesopelagische Fischerei wurde durch einen idealisierten, globalen Ansatz (als zusätzlicher Mortalitätsterm) realisiert. Mit zunehmender Fischerei, nimmt die Biomasse mesopelagischer Fische ab. Dies führt zusätzlich in einer Abnahme der Primärproduktion und ebenso in einer Abnahme des Kohlenstoffexportes. Auch der

Tiefseebergbau kann das Mesopelagial und somit auch dessen Fischbestände beeinflussen. Wir haben hier den Fokus auf den Einfluss auf die Futterqualität gelegt und nehmen an, dass die Verfügbarkeit von verwertbarem Futter in den Regionen in denen das verschmutzte Wasser des Tiefseebergbaus wieder eingeleitet wird, abnimmt. Unsere Ergebnisse zeigen auch hier, dass nicht nur die Fischbiomasse abnimmt, sondern ebenfalls eine Abnahme in der Primärproduktion und dem Kohlenstoffexport zu finden ist.

Für mesopelagische Fischbestände sind Bestandsgröße, Bestandsdynamik, Technologie und der Nutzen der Fischerei allesamt unsicher. Diese vielfache Unsicherheit unterscheidet die mesopelagische Fischerei von anderen Fischereien und macht, für die Beantwortung ökonomischer Fragestellungen, die Entwicklung eines neuen Modells erforderlich. Wir haben daher ein bio-ökonomisches Modell für die mesopelagische Fischerei entwickelt, mit Unsicherheiten über die biologische Dynamik, sowie über die zukünftigen Nutzen und die Kosten des Fangertrags. Wir haben angestrebt, das biologische Teilmodell aus der entsprechenden Komponente des in CO2Meso entwickelten biogeochemischen Modells zu entnehmen. Es hat sich aber gezeigt, dass die ökologischen Rückkopplungen in diesem Modell ganz anders berücksichtigt werden als in den etablierten bioökonomischen Modellen der Fischerei. Daher haben wir für das Projekt entschieden, das bioökonomische Modell zunächst eigenständig zu entwickeln, und ökonomisch-theoretisch zu untersuchen. Weiterhin hat sich im Zuge der Forschungsarbeiten gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Modellierung für bekannte Fischbestände zu testen, um die Wirkungsmechanismen des Modells kennenzulernen.

Wir haben daher Modellvarianten entwickelt, die sich für Bestände eignen, die Unsicherheiten in Bezug auf die Bestandsdynamik aufweisen, aber in anderer Hinsicht weniger unsicher sind als die mögliche mesopelagische Fischerei. Konkret haben wir ein Modell für den Ostseedorsch entwickelt, dessen Bestandsdynamik aufgrund klimatischer Einflüsse unsicher ist. Wir koppeln hier ein statistisches Rekrutierungsmodell mit einem modernen, altersstrukturierten bioökonomischen Modell der Ostsee-Dorschfischerei, um zu untersuchen, wie die optimale Bewirtschaftung von der Unsicherheit über die zukünftige Produktivität abhängt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eines Wechsels zu hoher Produktivität das optimale Management der die Fischerei kurzfristig konservativer wird. Dieses Modell und die Analyse sind inzwischen bereits publiziert worden (Voss und Quaas 2022). Für CO2Meso leiten wir daraus die Hypothese ab, dass Unsicherheit über die zukünftige Produktivität ebenfalls zu einer stärker konservativen Bewirtschaftung führen sollte.

Es hat sich gezeigt, dass die Analyse eines solchen ökologisch-ökonomischen Modells sehr komplex ist. Insbesondere spielen die Risiko- und Zeitpräferenzen der beteiligten Akteure eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich ist es hilfreich, bei Fragestellungen, die von so vielen Unsicherheiten bestimmt sind, zunächst auf allgemeine, analytische Ergebnisse zu zielen. Zu diesem Zweck haben wir ein Modell erstellt, das Unsicherheit in Bezug auf die Bestandsdynamik aufweist, die Risikoaversion der Entscheidungsträger berücksichtigt und trotzdem eine analytische Lösung erlaubt. Das entsprechende Manuskript wurde im Journal of Environmental Economics and Management publiziert (Kelsall et al. 2023). Wir zeigen dort, dass Risiko und Risikoaversion zwei Effekte hat: Einerseits gibt es eine vorsorgende Investition in den Naturkapitalbestand. Andererseits führt Risikoaversion aber zu einer verstärkten Nutzung des Fischbestands im Vergleich zur Nutzung eines hypothetischen risikofreien Fischbestands, da Risikoaverse Fischer alternative Investionen relativ höher

bewerten. Der zweite Effekt überwiegt quantitativ bei weitem. Ein rein ökonomisches Kalkül steht daher im Widerspruch zum Vorsichtsprinzip.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde erstmals das bestehende internationale Fischereirecht im Hinblick auf seine Anwendbarkeit auf mesopelagische Fischbestände untersucht. Dabei wurden konkrete Fischereimaßnahmen berücksichtigt, die in anderen Regelungskontexten von regionalen Fischereibewirtschaftungsmaßnahmen zur Anwendung gebracht wurden. Zur Vorbereitung wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt und deren Ergebnisse zusammengefasst. In Anbetracht der dabei identifizierten Forschungslücke wurden Veröffentlichungen anderer Wissenschaftsdisziplinen ausgewertet, um die Besonderheiten mesopelagischer Arten und ihrer Rolle in den marinen Ökosystemen besser zu verstehen. In rechtlicher Hinsicht wurden sodann potentiell relevante internationale Übereinkommen auf ihre Anwendbarkeit auf mesopelagische Fischbestände überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass das bestehende internationale Fischereirecht zwar dem Grunde nach auf mesopelagische Fischbestände anwendbar ist, jedoch keine spezifisch auf die betreffenden Spezies zugeschnittenen Regelungen statuiert. So beziehen sich weder das UN-Seerechtsübereinkommen (SRÜ) noch das Übereinkommen über gebietsübergreifende und weit wandernde Fischbestände (UNFSA) ausdrücklich auf die mesopelagischen Bestände. Sie betreffen primär horizontal wandernde Arten, berücksichtigen aber nicht die für mesopelagische Arten charakteristischen vertikalen Bewegungen. Auch die bestehenden Instrumente des internationalen Fischereirechts, die sich mit der Tiefseefischerei befassen, sind nicht unmittelbar auf die in der Regel in Wassertiefen von 200–1000 Metern lebenden mesopelagischen Arten anwendbar. Insbesondere fallen sie mangels Bezugs zum Tiefseeboden nicht in den Geltungsbereich der Leitlinien der FAO für das Management der Tiefseefischerei auf Hoher See; denn diese fokussieren sich auf empfindliche marine Ökosysteme, die durch Fischereipraktiken physisch beeinträchtigt werden. Untersucht wurden ferner das Central Arctic Ocean Fisheries Agreement (CAOFA) und tradierte Praktiken regionaler Fischereibewirtschaftungsorganisationen. Dies geschah mit dem Ziel, potentielle Modelle für die Entwicklung einer vorsorglichen und auf eine schrittweise Entwicklung der Bestände abzielenden Bewirtschaftung zu identifizieren. Das CAOFA, das darauf abzielt, die zuvor unregulierte kommerzielle Fischerei in den Hochseegebieten des zentralen Arktischen Ozeans zu verhindern, ist ein seltenes Beispiel für die Entwicklung eines proaktiven und vorsorglichen Ansatzes für ein Fischereimanagement in einem ökologisch sensiblen Gebiet mit begrenzten wissenschaftlichen Daten. Dieser Ansatz ist für die mesopelagische Fischerei besonders wichtig, da erhebliche wissenschaftliche Unsicherheiten in Bezug auf diese Arten und ihre Rolle in den marinen Ökosystemen bestehen. Unter Einbeziehung, Auswertung und Anwendung der Erfahrungen, die im Kontext des CAOFA und der Bestandsbewirtschaftung im Rahmen regionaler Fischereibewirtschaftungsorganisationen gesammelt wurden, plädiert die Studie für einen vorsorglichen und schrittweise zu entfaltenden Ansatz für das Management mesopelagischer Bestände. Dies umfasst die schrittweise Entwicklung und Umsetzung von Erhaltungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf der Grundlage der besten verfügbaren wissenschaftlichen Informationen sowie die kontinuierliche Überwachung und Anpassung dieser Maßnahmen, sobald neue wissenschaftlichen Erkenntnisse vorliegen. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein solches Vorgehen eine kooperative und anpassungsfähige Strategie zur Bewirtschaftung neuer Ressourcen fördert und eine nachhaltige Nutzung mesopelagischer Arten ermöglicht.

Im Verbund mit den Projektpartnern haben wir diese Ergebnisse in den Gesamtzusammenhang einer möglichen Fischerei auf mesopelagische Bestände eingeordnet. Wir haben ein Manuskript erarbeitet (Getzlaff et al. 2024), dass die verschiedenen Unsicherheiten einer mesopelagischen Fischerei adressiert. Insbesondere analysieren wir die Bedeutung der verschiedenen Unsicherheiten für eine ökonomisch rationale Bewirtschaftung mesopelagischer Bestände. Während Unsicherheiten in der Bestandsdynamik tendenziell zu Anreizen führen, den Bestand zügig zu nutzen, machen Unsicherheiten über den künftigen Nutzen Investitionen in Fangkapazitäten tendenziell weniger attraktiv. Insbesondere wenn die Fischereikapazität spezifisch für die mesopelagische Ressource ist und nicht ohne weiteres für einen anderen Zweck verwendet werden kann, ist die Kapazitätsinvestition irreversibel. Unter diesen Bedingungen ist das Aufschieben der Investitionsentscheidung eine Realoption: Zu einem späteren Zeitpunkt werden mehr Informationen über den Nutzen und die Kosten der mesopelagischen Fischerei zur Verfügung stehen, und es kann besser sein, die Fischereikapazität aufzubauen, wenn der Nutzen hoch ist, und die Option zu nutzen, die Fischereikapazität nicht auszubauen, wenn sich herausstellt, dass die Kosten den Nutzen einer mesopelagischen Fischerei überwiegen. Aus diesen Gründen sollte eine kommerzielle Fischereikapazität derzeit nicht aufgebaut werden. Wir jedoch argumentieren weiter, dass es ratsam sein kann, eine Versuchsfischerei zuzulassen, um mehr über den Ressourcenbestand und die Nutzen und Kosten der Fischerei auf den mesopelagischen Bestand zu lernen.

In rechtlicher Hinsicht wird untersucht, wie der fischereirechtliche Vorsorgeansatz konkret in Bezug auf künftige bzw. in der Entwicklung befindliche mesopelagische Fischereien implementiert werden kann. Als entscheidendes Rechtsinstrument zur Aufrechterhaltung der komplexen Balance zwischen der Erhaltung und Nutzung lebender Ressourcen wurde der Vorsorgeansatz identifiziert. Dieser erkennt an, dass ein Mangel an wissenschaftlicher Gewissheit kein Grund sein sollte, regulatorische Maßnahmen aufzuschieben. Zugleich unterstreicht er die Notwendigkeit umsichtigen Handelns, indem er die Verabschiedung vorbeugender Maßnahmen gebieten kann, obwohl ein kausaler Zusammenhang zwischen einer Bestandsbewirtschaftung und ihren möglichen negativen Folgen noch nicht nachgewiesen werden kann. Im Kontext der potentiellen mesopelagischen Fischerei ist dies insoweit besonders relevant, als die mesopelagische Zone und der Beitrag der mesopelagischen Arten zu wichtigen ökologischen Prozessen und zur Kohlenstoffpumpe allenfalls ansatzweise bekannt sind. Auf dieser Grundlage wurden sodann Möglichkeiten zur Umsetzung eines Vorsorgekonzepts untersucht, das die Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse über die mesopelagische Zone fördern und gleichzeitig mögliche Risiken mindern kann. Die Ergebnisse der ersten Projektpublikation (Rayegani, 2024) fortführend und vertiefend, wurden dabei bestehende Fischereipraktiken, die sich in den Maßnahmen der Kommission für die Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (CCAMLR) und im CAOFA widerspiegeln, analysiert und an die Besonderheiten mesopelagischer Arten angepasst.

## Notwendigkeit und Angemessenheit der durchgeführten Projektarbeit

Wie bei allen neuen bzw. aufkommenden Fischereien besteht die Gefahr, dass die etwaige künftige Bewirtschaftung der mesopelagischen Arten zu einer Überfischung der betreffenden Spezies führt. Dies hängt traditionell mit kurzfristigem Gewinnstreben, dem Fehlen hinreichend passgenauer Vorschriften sowie Wissenslücken, die Beurteilung der

Auswirkungen der Fischerei auf die Zielbestände und das sie umgebende Ökosystem betreffend, zusammen. Eine nachhaltige Bestandsbewirtschaftung ist daher unerlässlich, um die künftige Überfischung der mesopelagischen Organismen zu vermeiden und die biologische Vielfalt des Meeres zu erhalten; denn die mögliche Bewirtschaftung der mesopelagischen Bestände würde einsetzen, bevor wissenschaftliche Gewissheit über die genannten Faktoren besteht (sofern sie überhaupt erreicht werden kann). Vor diesem Hintergrund war das Projekt in hohem Maße relevant und zeitgemäß, widmet es sich doch der Frage, wie mit den Mitteln des Rechts eine nachhaltige Bewirtschaftungsstrategie gewährleistet werden kann, bevor eine kommerzielle Bestandsbewirtschaftung beginnt. Zahlreiche Beispiele zeigen, dass die Entwicklung meist anders herum verläuft, indem mangelnde regulatorische Voraussicht zu erheblichen ökologischen Schäden und hohen gesellschaftlichen Kosten führen. Dieses Projekt hat einen Beitrag dazu geleistet, zu ergründen, wie ähnliche Fehler künftig vermieden werden können.

## Erwartete Vorteile und Verwendbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Projekts sind für die Entwicklung künftiger Bewirtschaftungspläne für die mesopelagische Fischerei von Nutzen. Es verdeutlicht den aktuellen Stand des internationalen Fischerei- und Umweltrechts, wie es auf diese Fischereien in verschiedenen Stadien anwendbar ist, und stützt sich auf Versäumnisse der Vergangenheit und bewährte Verfahren, um einen Weg in die Zukunft aufzuzeigen. Sowohl die rechtswissenschaftliche Forschung als auch die im Rahmen des Gesamtprojekts erzielten interdisziplinären Erkenntnisse, den Umgang mit wissenschaftlicher Unsicherheit betreffend, sind mit Blick auf die Bewirtschaftung der mesopelagischen Fischbestände neu und bilden damit eine Grundlage für künftige Forschung und Entscheidungsprozesse.
Die ausgewerteten Beobachtungsdaten wurden und werden auf PANGAEA archiviert und öffentlich zugänglich gemacht. Dadurch stehen sie zur Information der breiten Öffentlichkeit Zusätzlich bilden die Ergebnisse eine gute Grundlage für weitere Forschungsprojekte.
Das entwickelte Modell ist ebenfalls veröffentlicht. Die Modellgleichungen wurden in Getzlaff und Kriest (2024, Biogeochemical Cycles, accepted) veröffentlicht und können so in jedes Erdsystemmodell (mit biogeochemischer Komponente vom Typ NPZD) eingebaut werden. Zusätzlich wurde ein pragmatischer Ansatz entwickelt, wie der Effekt der Migration in Modelle eingebaut werden kann, der einfach in Modelle integriert werden kann und in zukünftigen Forschungsprojekten genutzt werden kann.

## Fortschritte auf dem Gebiet des Projekts

Bis heute sind die Schätzungen der Biomasse von mesopelagischen Fischen nicht gut abgesichert und reichen von frühen Schätzungen von 1 Gt (Gjøsæter & Kawaguchi, 1980) bis zu neueren Schätzungen von ~10 Gt Nassgewicht (Irigoien et al., 2014). Mögliche Ursachen für diese Divergenz sind Unsicherheiten bei den Umrechnungsfaktoren in der Studie von Irigoien et al. (2014), die Vernachlässigung von gasblasentragenden Siphonophoren als starke akustische Ziele (Proud et al., 2019), Annahmen über die trophische Ebene von mesopelagischen Fischen (Davison et al., 2015), Unsicherheiten über die Übertragungseffizienz zwischen verschiedenen Organismengruppen sowie die Ernährungspräferenzen von Fischen (wandernde vs. ansässige Gruppe) und ihre Nahrungsquellen (Anderson et al., 2019). Die starke räumliche Streuung der mesopelagischen Fischbestände führt zu Schwierigkeiten bei der Beobachtung (Milligan & Sutton, 2020), wenn es darum geht, Quellen und Senken auf lokaler und globaler Ebene zu identifizieren. Um Lösungen für diese Schwierigkeiten zu entwickeln hat sich in den letzten

Jahren Jetzon (Joint Exploration of the Twilight Zone Ocean Network, https://jetzon.org) als essentielle Austausch und Informationsplattform weiter entwickelt und war Organisator des Ocean Twilight Zone Symposiums in Woods Hole (September 2023). Bei diesem Symposium sind die weltweit führenden Experten aus dem beobachtenden und modellierenden Bereich zusammengekommen. Ein wichtiges Ergebnis dieses Symposiums war, dass wir zum einen noch viel zu wenig über das mesopelagische Ökosystem wissen, es aber für den Kohlenstoffkreislauf eine durchaus wichtige Rolle spielt. In Bezug auf die Modellierung fehlen bisher Ansätze wie man mit den bestehenden Unsicherheiten umgehen kann. Der in diesem Projekt erarbeitete Modellierungsansatz ist daher sehr willkommen gewesen und wurde sehr positiv aufgenommen.

Seit Beginn der Durchführung dieses Projekts im Jahre 2021 haben sich erste Versuchsfischereien entwickelt; zudem konnten neue Erkenntnisse über Verbreitung und Verhalten mesopelagischer Arten generiert werden. Gleichwohl bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten und Wissenslücken. So sind viele der vorgelegten Daten durch erhebliche Diskrepanzen untereinander gekennzeichnet. Neue anthropogenen Aktivitäten (z.B. Meeresbodenbergbau) können weitere Risiken für die mesopelagische Zone nach sich ziehen (z.B. Anstieg von Sedimentfahnen); ihnen muss daher in der Zukunft Aufmerksamkeit geschenkt werden. In völkerrechtlicher Hinsicht bedürfen künftig zudem die Anforderungen des im Juni 2023 angenommenen Übereinkommens der Vereinten Nationen über die biologische Vielfalt in Gebieten jenseits staatlicher Hoheitsgewalt (sog. BBNJ-Abkommen bzw. Hohe See-Schutzübereinkommen) näherer Untersuchung. Obwohl fischerei-bezogene Tätigkeiten nicht unmittelbar von diesem Übereinkommen erfasst werden, enthält es doch Bestimmungen (u.a. über den Austausch von Daten und Informationen, die Einrichtung von Meeresschutzgebieten und die Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen), die sich indirekt auf die Fischerei in der mesopelagischen Zone auswirken und zur Entwicklung geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen durch regionale Fischereiorganisationen beitragen können. Einbezogen werden müssen auch die Anforderungen, die sich aus dem Gutachten des Internationalen Seegerichtshofs zum Zusammenhang Meeresumweltschutz/Klimawandel vom Mai 2024 ergeben. Sie sind im Hinblick auf eine potentielle künftige Bewirtschaftung der mesopelagischen Arten auch deshalb relevant, weil sie die Bedeutung eines vorsorgenden Ansatzes mit Blick auf die Relevanz der lebenden Ressourcen für das CO2-Aufnahmepotential des Ozeans unterstreichen.

## Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In diesem Verbund ist in allen Teilprojekten die Position der Personalkosten die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises. Frau Dr. Hauss hat im Dezember 2022 das GEOMAR und somit das Projekt CO2MESO verlassen, und leitet nun die Arbeitsgruppe Marine Ökologie bei NORCE in Stavanger, Norwegen. Die Wissenschaftlerstelle in WP2 wurde in Absprache mit dem BMBF umgewidmet, so dass die restlichen Aufgaben durchgeführt werden konnten. Hiermit sind die verbleibenden Personalmittel in bestmöglicher Weise verwendet worden.

## Erfolgte Veröffentlichungen

J. Getzlaff and I. Kriest (2024); Impacts of vertical migrants on biogeochemistry in an Earth system model, Global Biogeochemical Cycles, accepted

A. Rayegani, Mesopelagic Mysteries: Regulating an Emerging Resource Amid Uncertainty, ODIL 55 (2024), https://doi.org/10.1080/00908320.2024.2313744

M. Hill Cruz, I. Kriest and J. Getzlaf, (2023); Diving deeper: Mesopelagic fish biomass estimates comparison using two different models
Frontiers in Marine Science, https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1121569

I. Kriest, J. Getzlaff, A. Landolfi, V. Sauerland, M. Schartau, and A. Oschlies, (2023); Exploring the role of different data types and timescales for the quality of marine biogeochemical model calibration, Biogeosciences, https://doi.org/10.5194/bg-2023-9

V. Sauerland, C. von Hallern, I. Kriest and J. Getzlaff, (2023); A CMA-ES Algorithm Allowing for Stochastic Parameters in Model Calibration JAMES, https://doi.org/10.1029/2022MS003390

Engel, A., Cisternas-Novoa, C., Hauss, H., Kiko, R., & Le Moigne, F. A. (2023). Hypoxia-tolerant zooplankton may reduce biological carbon pump efficiency in the Humboldt current system off Peru. Communications Earth & Environment, 4(1), 458.

Hauss, H., Schwabe, L., & Peck, M. A. (2023). The costs and trade-offs of optimal foraging in marine fish larvae. Journal of Animal Ecology, 92(5), 1016-1028.

Kelsall, C, Quaas, MF, Quérou, N (2023). Risk aversion in renewable resource harvesting. Journal of Environmental Economics and Management 121: 102855.

Voss R, Quaas MF (2022). Fisheries management and tipping points: Seeking optimal management of Eastern Baltic cod under conditions of uncertainty about the future productivity regime. Natural Resource Modeling 35(1): e12336.

Hoving, H. J. T., & Freitas, R. (2022). Pelagic observations of the midwater scorpionfish Ectreposebastes imus (Setarchidae) suggests a role in trophic coupling between deep-sea habitats. Journal of Fish Biology, 100(2), 586-589.

M. Hill Cruz, I. Frenger, J. Getzlaff, T. Xue, I. Kriest and Y.-J. Shin, (2022); Understanding the drivers of fish variability in an end-to-end model of the Northern Humboldt Current System Ecological Modelling, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110097

Doktorarbeit im Zusammenhang mit CO2MESO (betreut von Iris Kriest, co-betreut von Julia Getzlaff):
Mariana Hill Cruz, From biogeochemistry to fisheries and back again (2022).

MSc- Arbeiten im Zusammenhang mit CO2MESO (von Helena Hauss betreut oder co-betreut):

Elizandro Rodrigues (2021) Determining the Cabo Verde island mass effect across trophic levels. Universidade Técnica do Atlântico, 118pp.,

Mahaman Harouna (2021) Analysis of distribution and migration of mesopelagic organisms based on 38 Khz backscatter around Cabo Verde. Universidade Técnica do Atlântico, 79pp.

Patricia Helena Silva (angefangen 2021) Effect of eddies on plankton productivity in the Cabo verde region. Universidade Técnica do Atlântico, 74pp.

## Geplante Veröffentlichungen

Getzlaff J., Hauss H., Witting K., Rayegani A., Schenk H., Quaas M., Proelss A (subm. To Marine Policy): Confronting uncertainties in resource exploitation: The case of potential mesopelagic fisheries

Thorvaldsen, K. G., Neuenfeldt, S., Mariani, P., Hauss, H., and Nielsen, J. R. Deviations from functional predation responses: Light and anti-predator behaviour are more important than density in encounters between mesopelagic fish and its prey. To be submitted to MEPS until December 2024

Witting K., Hoving H.J., Kim D.-Y., Möller K.O., Rogge A., Stenvers V., Iversen M., Niehoff B. & Hauss H. Pathways of the Biological Carbon Pump in two Fjords with Contrasting Food Web Structure. To be submitted to Frontiers in Marine Science until September 2024

Hauss H., Silva P.H., Harouna M., Fiedler B., Schaber M. Distribution, Vertical Migration of Zooplankton and Micronekton North of Cabo Verde and associated carbon fluxes. To be submitted to Biogeosciences until December 2024

Schütte F., (…) & Hauss H. Linking Physical Processes to Biological Responses:  A holistic approach to the Island Mass Effect in the Cape Verde Archipelago from an observational perspective. To be submitted to Progr in Oceanography until September 2024

Referenzen

T.R. Anderson, A.P. Martin, R.S. Lampitt, C.N. Trueman, S.A. Henson, D.J. Mayor, Quantifying carbon fluxes from primary production to mesopelagic fish using a simple food web model, ICES J. Mar. Sci. 76 (2019) 690–701. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx234.

O. Aumont, O. Maury, S. Lefort, L. Bopp, Evaluating the potential impacts of the diurnal vertical migration by marine organisms on marine biogeochemistry. Global Biogeochem. Cycles 32 (2018) 1622–1643. https://doi.org/10.1029/2018GB005886.

P.E. Caiger, L.S. Lefebve, J.K. Llopiz, (2021). Growth and reproduction in mesopelagic fishes: a literature synthesis. ICES Journal of Marine Science, 78(3), 765-781.

R. Caddell, Precautionary Management and the Development of Future Fishing Opportunities: The International Regulation of New and Exploratory Fisheries. The International Journal of Marine and Coastal Law 33 (2018) 199–260. https://doi.org/10.1163/15718085-13310013.

P.C. Davison, J.A. Koslow, R.J. Kloser, Acoustic biomass estimation of mesopelagic fish: backscattering from individuals, populations, and communities. ICES J. Mar. Sci. 72 (2015) 1413–1424. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv023.

A. Engel, C. Cisternas-Novoa, H. Hauss, R. Kiko, F. A. Le Moigne, (2023). Hypoxia-tolerant zooplankton may reduce biological carbon pump efficiency in the Humboldt current system off Peru. Communications Earth & Environment, 4(1), 458.

J. Gjøsæter, K. Kawaguchi, 1980. A review of the world resources of mesopelagic fish. FAO fisheries technical paper 193. FAO, Rome, 1980.

H. Hauss, L. Schwabe, M. A. Peck, (2023). The costs and trade-offs of optimal foraging in marine fish larvae. Journal of Animal Ecology, 92(5), 1016-1028.

M. Hill Cruz, I. Kriest, J. Getzlaff, (2023). Diving deeper: Mesopelagic fish biomass estimates comparison using two different models. Frontiers in Marine Science, 10. doi: 10.3389/fmars.2023.1121569

H. J. T. Hoving, R. Freitas, R. (2022). Pelagic observations of the midwater scorpionfish Ectreposebastes imus (Setarchidae) suggests a role in trophic coupling between deep-sea habitats. Journal of Fish Biology, 100(2), 586-589.

X. Irigoien, T.A. Klevjer, A. Røstad, U. Martinez, G. Boyra, J.L. Acuña, et al., 2014. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat. Commun. 5, 3271. https://doi.org/10.1038/ncomms4271.

P. Lehodey, A. Conchon, I. Senina, R. Domokos, B. Calmettes, J. Jouanno, O. Hernandez, R. Kloser, (2015) Optimization of a micronekton model with acoustic data. – ICES Journal of Marine Science, 72(5): 1399-1412. https://academic.oup.com/icesjms/article/72/5/1399/765328

A. Martin, P. Boyd, K. Buesseler, I. Cetinic, H. Claustre, S. Giering, et al., The oceans' twilight zone must be studied now, before it is too late. Nature 580 (2020) 26–28. https://doi.org/10.1038/d41586-020-00 et al. 915-7.

R. J. Milligan, T. T. Sutton (2020) Dispersion Overrides Environmental Variability as a Primary Driver of the Horizontal Assemblage Structure of the Mesopelagic Fish Family Myctophidae in the Northern Gulf of Mexico. Front. Mar. Sci. 7:15. doi: 10.3389/fmars.2020.00015

A. Rayegani, Mesopelagic Mysteries: Regulating an Emerging Resource Amid Uncertainty, ODIL 55 (2024), https://doi.org/10.1080/00908320.2024.2313744

A. Y. Then, J. M. Hoenig, N. G. Hall, D. A. Hewitt (2014). Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species. ICES Journal of Marine Science, 72. doi: 10.1093/icesjms/fsu136

G.K. Saba, A.B. Burd, J.P. Dunne, S. Hernández-León, A.H. Martin, K.A. Rose, J. Salisbury, D.K. Steinberg, C.N. Trueman, R.W. Wilson, S.E. Wilson, Toward a better understanding of fish-based contribution to ocean carbon flux. Limnol. Oceanogr. 66 (2021) 1639–1664. https://doi.org/10.1002/lno.11709.

R. Urbina, R.,Koppelmann, (2006). Distribution patterns of mesopelagic fishes with special reference to Vinciguerria lucetia Garman 1899 (Phosichthyidae: Pisces) in the Humboldt Current Region off Peru. Mar. Biol. 149, 1519–1537. doi: 10.1007/s00227-006-0319-z