

# Schlussbericht zum Vorhaben: MiMeMo - Mikroben bis Megafauna Modellierung im arktischen Ozean

Dr. Ute Daewel  
Dr. Déborah Benkort  
Prof. Dr. Corinna Schrum



Die Arbeiten wurde im Rahmen eines Verbundprojektes in  
Zusammenarbeit mit  
M.R. Heath, A. S. Brierley, J. H. Laverick, D. C. Speirs, R. Hofmeister, R. Proud  
durchgeführt.

Förderkennzeichen: 03F0801A  
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2018 – 31.12.2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Changing  
Arctic  
Ocean **NERC**

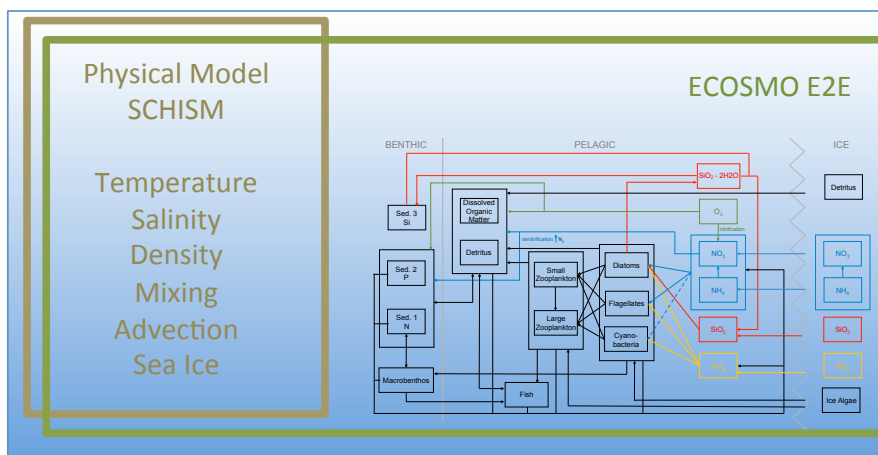
# Inhalt

<b>1</b>	<b>AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN .....</b>	<b>2</b>
1.1	VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND ERZIELTE ERGEBNISSE.....	2
1.2	WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES.....	18
1.3	NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN PROJEKTARBEITEN .....	19
1.4	VORAUSSICHTLICHE NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES .....	19
1.5	WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN .....	20
1.6	ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES.....	20
<b>2</b>	<b>ANHANG – LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>22</b>

# 1 Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

## 1.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Ziel des Projektes MiMeMo war es, mit Hilfe zweier unterschiedlich strukturierter mathematischer Modelle des arktischen Nahrungsnetzes Veränderungen von räumlichen und saisonalen Muster von Biomasse, Produktion und Fischereiertrag unter klimatisch veränderlichen Bedingungen zu quantifizieren. Dabei konzentrierten wir uns auf die Entwicklung von zwei komplementären mathematischen Modellen für das Ökosystems der Barentssee. Eines der Modelle (StrathE2E<sup>1</sup>) hat eine geringe räumliche Auflösung, deckt aber das gesamte Nahrungsnetz von gelösten anorganischen Nährstoffen bis zu den höchsten trophischen Ebenen (Eisbären) ab und ist zusätzlich mit einem Modell für Fischereiaktivitäten gekoppelt. Das andere Modell (SCHISM-ECOSMO<sup>2</sup>) hat eine hohe räumliche Auflösung, dafür aber ein eingeschränktes Nahrungsnetz, das weder die höheren trophischen Ebenen noch Formulierungen für Fischerei umfasst, dafür aber die Kopplung zu einem hochau aufgelösten physikalischen Model erlaubt (Abb. 1). Dazu wurden zunächst die notwendigen Modelentwicklungen durchgeführt um die existierenden Ökosystemmodelle an die Region Barentssee anzupassen. Der Fokus von Hereon lag dabei auf der Entwicklung und Anwendung von SCHISM-ECOSMO-Polar (Abb. 1). Insgesamt wurde die Modellentwicklung im Rahmen der AP 2-3 durchgeführt, in AP 4 wurden Hindcast-Simulationen und Sensitivitäts-Experimente zu spezifischen Einflüssen auf die Ökosystemproduktion der Region, und in AP 5 wurden schließlich vergleichende Zukunftsszenarien durchgeführt. Das Projekt wurde in einer bi-lateralen Kollaboration mit der Strathclyde Universität (SU) und der Universität von St. Andrews (UStA) im Rahmen des Changing Arctic Ocean (CAO) Programmes durchgeführt. Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten in den einzelnen APs im Einzelnen beschrieben.



**Abbildung 1:** links: Modelregion mit Repräsentation des Modellgitters. Rechts: simulierte Eisbedeckung, Oberflächentemperatur und Oberflächensalinität im April und September des simulierten Jahres. 1: Modelstruktur des Geplanten SCHISM-ECOSMO-E2E Modellsystems.

### AP 1. Workshop zur Ökosystemmodellierung im CAO Programm

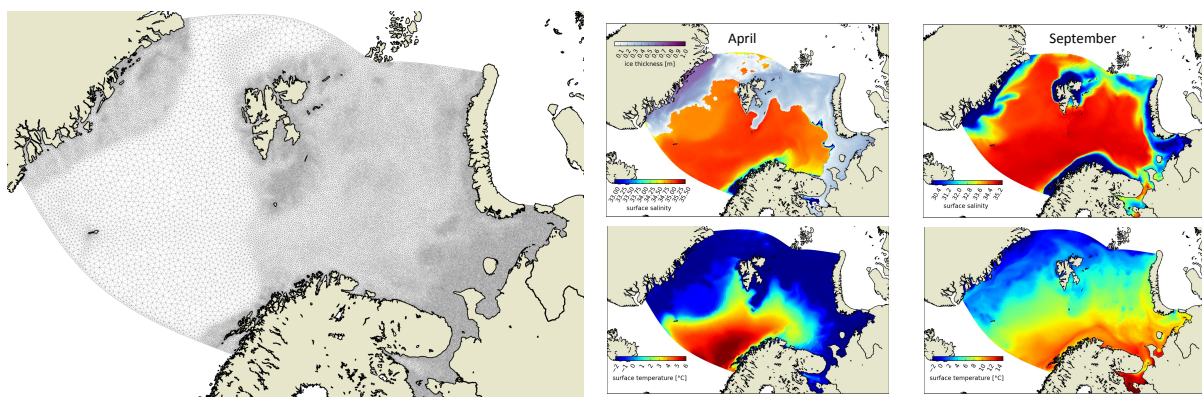
Wir haben bei dieser Aufgabe mit dem CAO-Koordinator für das Thema Modellierung (Neil Banas, Strathclyde) zusammengearbeitet. Workshops zu dem Thema fanden auf den Jahrestagungen des CAO in Birmingham und Potsdam statt, and denen wir auch teilgenommen haben.

### AP 2. Implementierung des physikalischen Modells SCHISM

Für die geplanten Modellsimulationen wurde zunächst das Zirkulationsmodell SCHISM<sup>3</sup> in der Region Barents See/Framstraße implementiert (Abb. 2.1). SCHISM ist ein dreidimensionales, baroklines physikalisches Modell basierend auf unstrukturierten Gittern, das in einer Reihe von Anwendungen getestet und validiert wurde. Das unstrukturierte Modellgitter ermöglicht eine optimale Auflösung des

Untersuchungsgebietes, die unabhängig von der Gitterkonvergenz in sphärische Koordinatengittern oder Verfeinerungen in kurvilinearen Gittern ist. Für die vertikale Auflösung wurde in SCHISM ein hybrides Koordinatensystem entwickelt (LSC<sup>2</sup>; <sup>3</sup>), das von Sigma-Koordinaten in flachen Gebieten bis zu geopotentiellen Koordinaten reicht. SCHISM ist über das FABM-Framework<sup>4</sup> an ECOSMO gekoppelt, was eine flexible Erweiterung der Ökosystemmodellkomponente für die Anforderungen dieses Projektes ermöglicht.

Das Modell verwendet unstrukturiertes Modellgitter auf der Basis von finiten Volumen mit einer Auflösung von etwa 5km – 50km. Der Vorteil dieser Modelstruktur ist, dass es in flacheren, Küstennahen Regionen eine höhere Auflösung erlaubt ohne dabei in der Gesamtregion die Anzahl der Gitterpunkte und damit die Rechenzeit zu erhöhen (Abb. 2.1). Das Modell berechnet Strömungen, Dichte, Gezeiten (Kopplung zum GOTM Turbulenzmodell), Eisbedeckung (Kopplung zum Meereis Model FESIM <sup>5</sup>) und das für das Ökosystemmodell benötigte Lichtklima. Für eine erste Simulation wurden Randbedingungen aus MERRA2<sup>6</sup> (Athmosphäre), HAMTIDE<sup>7</sup> (Gezeiten) und WOA2013<sup>8</sup> (barokline Randbedingungen) verwendet. Für die weiteren Hindcast Simulationen wurde die Randbedingungen an den offenen Rändern durch Simulationsergebnisse aus dem NEMO-MEDUSA<sup>9</sup> Simulationen zur Verfügung gestellt, einem globalen Modell das im Rahmen des CAO Programmes genutzt und die Daten entsprechend zur Verfügung gestellt wurden.

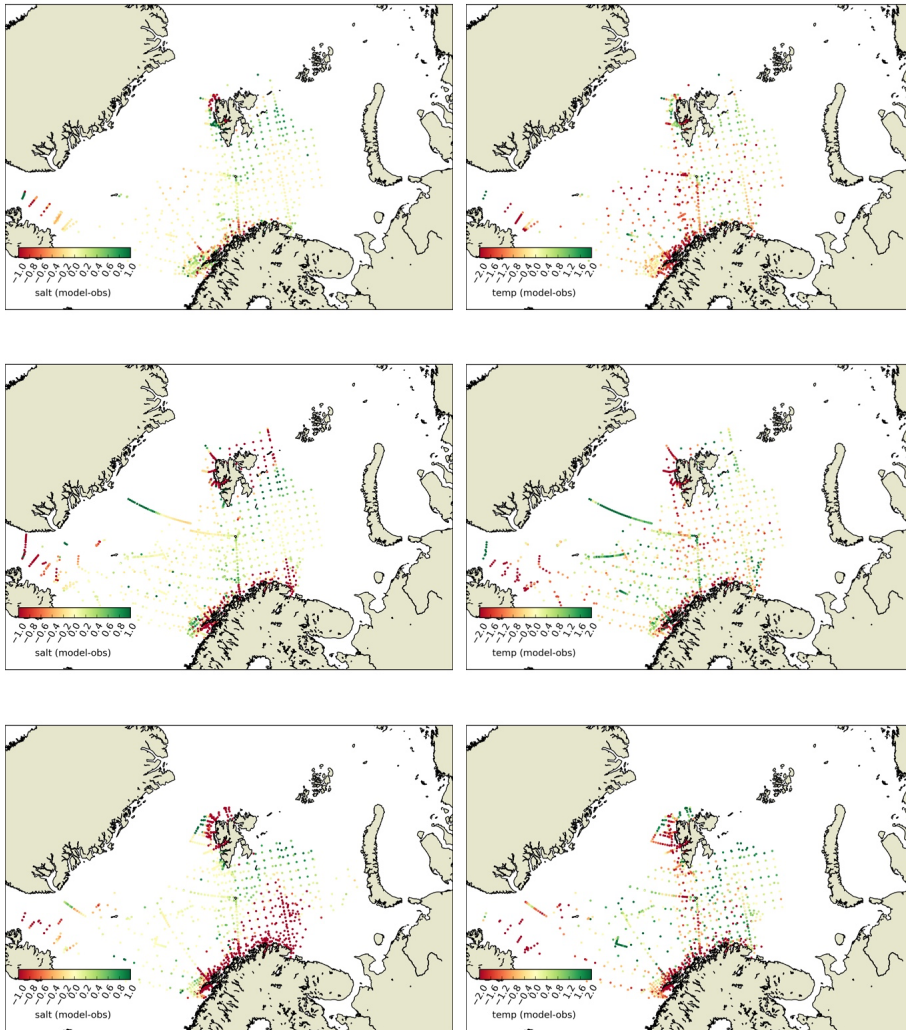


**Abbildung 2.1:** links: Modelregion mit Repräsentation des Modellgitters. Rechts: simulierte Eisbedeckung, Oberflächentemperatur und Oberflächensalinität im April und September des simulierten Jahres.

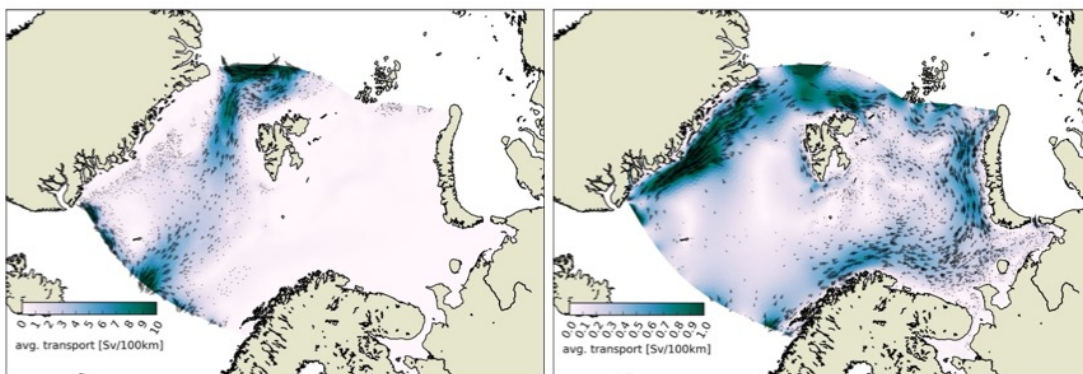
Das Modell wurde zunächst nur für ein Jahr simuliert und die Verteilungen von Temperatur, Salinität, Wasserstandsänderungen durch Gezeiten und Eisbedeckung mit Beobachtungen verglichen.

Um die Gezeiten im Modell zu validieren, wurden die Wasserstandsänderungen an vier verschiedenen Stationen der Region mit Entsprechenden Messungen verglichen und dabei gezeigt, dass die simulierte Tidenphase mit der Beobachteten sehr gut übereinstimmt, wird die Amplitude vom Modell generell etwas unterschätzt.

Simulierte Meeresoberflächentemperatur und Salzgehalt wurden ebenfalls mit Beobachtungen (Verfügbar über die Datenbank des International Council for the Exploration of the Sea [www.ices.dk](http://www.ices.dk)) verglichen (Abb. 2.2) und zeigen generell eine gute Übereinstimmung in der zentralen Barentssee. Unsicherheiten in dem Vergleich wurden vornehmlich am Eingang zur Barentssee und in den sehr küstennahen, stark durch Frischwasser beeinflussten, Gebieten gefunden und stammen wahrscheinlich von den hier gewählten Randbedingungen für Temperatur und Salinität. Da diese aus einer Klimatologie des World Ocean Atlas stammen, können damit Interannuale Variabilitäten nicht korrekt wiedergeben.



**Abbildung 2.2** Differenzdiagramme, die die Modellergebnisse mit Oberflächenbeobachtungen der ICES-Datenbank für den Salzgehalt (links) und die Temperatur (rechts) vergleichen, und zwar für drei verschiedene Jahre (2012 – oben bis 2014 unten). Das Modell wird mit Randdaten aus dem Weltozeanatlant erzwungen und läuft mit dem Eismodell.

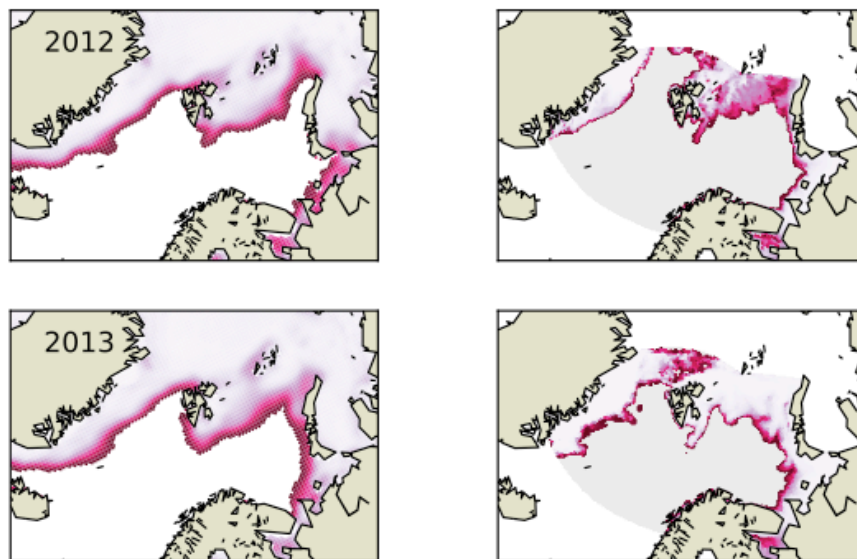


**Abbildung 2.3** Monatlich gemittelte Transporte in den oberen 20 Schichten (rechts) und den unteren 30 Schichten (links), skaliert in Sv pro 100 km horizontaler Länge.

Desweiteren wurde überprüft ob das Modell die generellen Strömungsmuster (Abb. 2.3) der Region korrekt simuliert. Im Vergleich zeigt sich, dass die Strömungen generell gut repräsentiert werden, die Stärke des Svalbard Stroms jedoch unterschätzt wird (e.g.<sup>10</sup>).

Im letzten Schritt wurde die vom Model berechnete Ausdehnung der Meereisbedeckung mit Beobachtungen aus ESACCI Satellitendaten verglichen (Abb. 2.4). Der Vergleich zeigt, dass das Model

in der Lage ist die Meereisbedeckung, besonders in der östlichen Barentssee, zuverlässig nachzubilden.



**Abbildung 2.4** Vergleich zwischen berechneter (rechts) und beobachteter (links) Eiskonzentration. Dargestellt sind die mittleren Eiskonzentrationen in April für 2012 und 2013.

### AP 3. Modelentwicklung End-to-End Ökosystemmodelle

In Arbeitspaket 3 wurden die notwendigen Erweiterungen an den Ökosystemmodellen vorgenommen, die eine korrekte Simulation des arktischen Ökosystem ermöglichen. In Tabelle 1 sind die zunächst vorhandenen und die neu implementierten Zustandsvariablen der beiden Modelle aufgelistet.

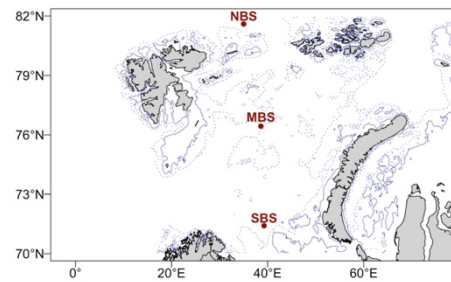
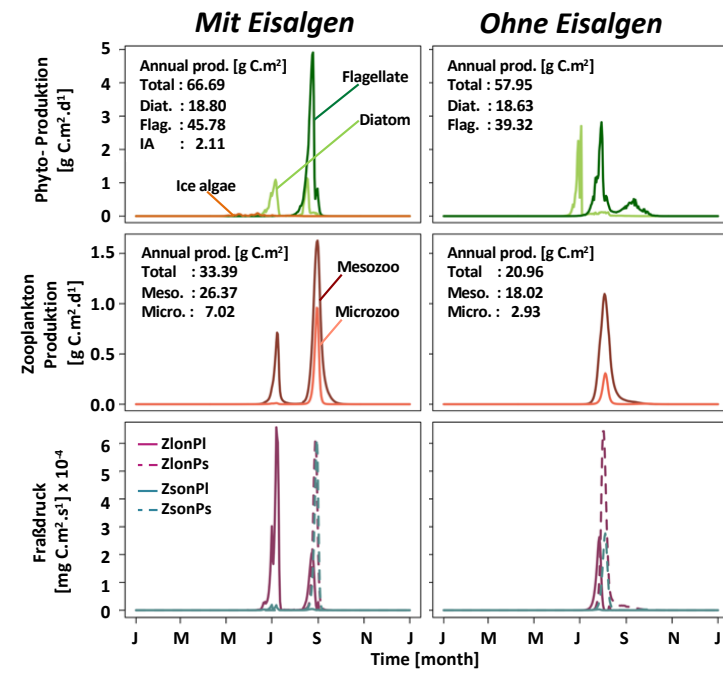
*Tabelle 1. Ökologische Gruppen oder Klassen von totem und lebendem Material, die in den Modellen ECOSMO-Polar und StrathE2E-Polar enthalten sind. Die mit \* gekennzeichneten Begriffe wurden den jeweiligen Ausgangsmodellen, die zu Beginn des Projekts zur Verfügung standen, hinzugefügt, um die Polar-Versionen zu erstellen. Klassen in Klammern wurden nicht in allen Simulationen mitgerechnet.*

Art der Gruppe oder Klasse	StrathE2E-Polar	ECOSMO-Polar
Gelöste anorganische Nährstoffe	-Nitrat in Schnee*, Eis*, Wassersäule, Sedimentporenwasser. -Ammonium in Schnee*, Eis*, Wassersäule, Sedimentporenwasser	- Nitrat im Eis*, in der Wassersäule, im Porenwasser der Sedimente. - Ammoniak im Eis*, in der Wassersäule, im Sedimentporenwasser - Phosphat in Eis*, Wassersäule, Sedimentporenwasser - Silikat in Eis*, Wassersäule, Sedimentporenwasser
Abgestorbenes organisches Material und Bakterien	-Detritus und Bakterien im Schwebzustand - Eisdetritus und Bakterien* - Labiler Sedimentdetritus und Bakterien - Refraktärer Sedimentdetritus - Makrophyten-Überreste - Kadaver - Rückwürfe aus der Fischerei	- Suspensierter Detritus und Bakterien - Gelöstes organisches Material und Bakterien - Eisdetritus und Bakterien* - Labiler Sedimentdetritus und Bakterien
Primärproduzenten	- Phytoplankton - Eisalgen* - Makrophyten	- Flagellaten - Diatomen - Eisalgen*
Zooplankton	- Omnivores Zooplankton - Carnivores Zooplankton - Larven von planktivoren Fischen	- Mikrozooplankton - Mesozooplankton

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Larven von Grundfischen</li> <li>- Larven von Suspensions- und Ablagerungsfressern im Benthos</li> <li>- Larven von Carnivoren und aasfressenden Benthosorganismen</li> </ul>	
Benthos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suspensions- und Ablagerungsfresser</li> <li>- Fleischfresser und Aasfresser</li> </ul>	- Makrobenthos
Fische	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planktivore</li> <li>- migrierende</li> <li>- Grundfische (benthisch-fischfressend)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (Planktivoren)</li> <li>- (Benthivoren)</li> </ul>
Obere trophische Ebenen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seevögel</li> <li>- Stachelmakrelen</li> <li>- Cetacea</li> <li>- Meeressäugetiere (Eisbären)*</li> </ul>	

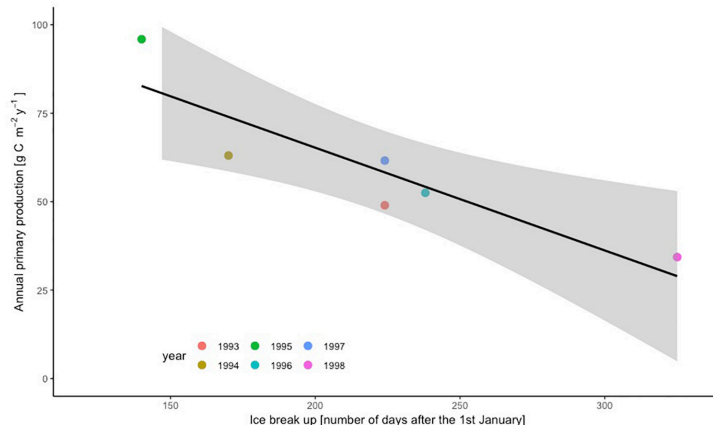
### **Implementierung Meereisbiogeochemie im Modellsystem**

Eine der wichtigsten Entwicklungen im Projekt war die Modelbeschreibung von biogeochemischen Prozessen im Meereis. Obgleich Meereisalgen einen eher geringen Teil zur Gesamtprimärproduktion in arktischen Ökosystemen beitragen, spielen sie doch eine wichtige Rolle in der Dynamik des Nahrungsnetzes. Um die Reaktion des Ökosystems auf die Erwärmung und den Rückgang der Eisbedeckung besser zu verstehen, ist eine angemessene Darstellung der Phänologie der Meereisalgen und der Verbindung mit den pelagischen und benthischen Systemen erforderlich. Die Erweiterung der biogeochemischen Modelle um ein sympagisches System in der Modellformulierung wurde daher während des Projektes erfolgreich umgesetzt. Die Implementierung in ECOSMOII<sup>11</sup> und dessen Relevanz für das Ökosystem der Barentssee wurde in Benkort et al. (2020)<sup>12</sup> ausführlich beschrieben. Die neue Parametrisierung für Meereisbiogeochemie umfasst vier Nährstoffe (NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> und SiO<sub>2</sub>), eine funktionelle Gruppe für Meereisalgen und einen Detritus-Pool sowie den Austausch mit der obersten Meeresschicht. Im Rahmen des Projektes wurden die Auswirkungen der Verknüpfung zwischen den drei Systemen (sympagisch, pelagisch und benthisch) auf die Ökosystemdynamik, der Beitrag der Eisalgen zur gesamten Primärproduktion und die Auswirkungen der veränderlichen Eisbedeckung auf die Dynamik des arktischen Ökosystems untersucht. Um die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Kopplung zu lösen, wurde das Modell in eine 1D-Anwendung des General Ocean Turbulence Model (GOTM) implementiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell das saisonale Muster der sympagischen Komponenten realistisch simulierte, wenn man es mit dem aktuellen Wissen über die Barentssee vergleicht<sup>13</sup>. Unsere Ergebnisse zeigen, dass das sympagische System den Zeitpunkt und die Amplitude der pelagischen Primär- und Sekundärproduktion in der Wassersäule beeinflusst (Abb. 3.1). Wir haben auch gezeigt, dass die Produktion von Meereisalgen früh im Jahr die initiale Biomasse der pelagischen Diatomen erhöht und zu einer Steigerung der Zooplanktonproduktion führt.



**Abbildung 3.1** Simulierte Zeitserien am Punkt MBS für Primärproduktion, Sekundärproduktion und Frassraten von Meso- (Zl) und Micro- (Zs) zooplankton auf Diatomeen (PI) und Flagellaten (Ps) mit und ohne Berücksichtigung von Meereisbiogeochemie (see Benkort et al. 2020).

In dem Zusammenhang haben wir außerdem mehrjährige Simulationen durchgeführt um die Bedeutung des Meereises und dessen Ökosystems auf die Gesamtprimärproduktion in der Barentssee zu untersuchen (Abb. 3.2). Wie bereits in zuvor beschriebenen Studien<sup>14</sup> zeigte sich ein klarer Zusammenhang zwischen Primärproduktion und dem Einsetzen der Eisschmelze. Unsere Simulationen zeigten allerdings außerdem, dass die höchste Primärproduktion keineswegs in einem eisfreien Ozean vorkommt, sondern in Jahren mit dünner Eisbedeckung und früher Eisschmelze. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Primärproduktion in der Barentssee unter den kommenden eisfreien Bedingungen nicht unbedingt zunehmen wird, sondern lokal sogar abnehmen könnte, insbesondere in Regionen mit saisonaler Meereisdynamik.



**Abbildung 3.2** Beziehung zwischen der jährlichen Primärproduktion und dem Zeitpunkt des Eisaufruchs für die 7 Jahre, die an der zentralen Barentssee-Station simuliert wurden. Werte ( $p = 0,0159$ ,  $R^2$  bereinigt = 0,75). (see Benkort et al. 2020).

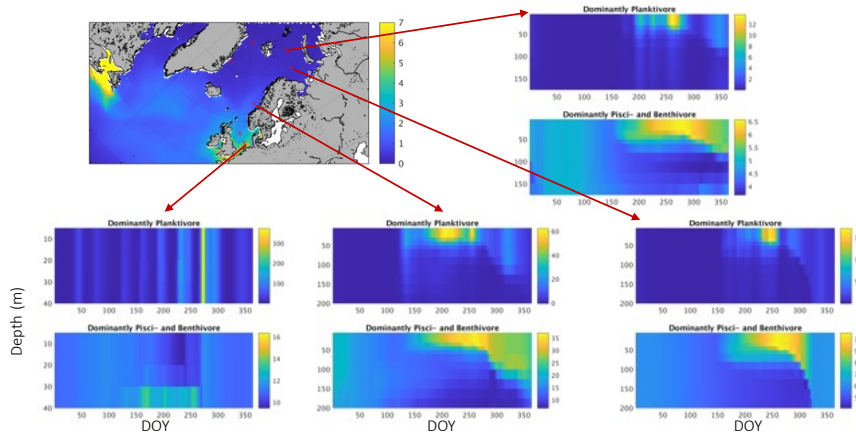
### Entwicklung und Testung von statischen und dynamischen Repräsentationen zeitabhängiger Verteilung (vertikal und horizontal) von Plankton und Fisch funktionalen Gruppen zur Anwendung in beiden Modellsystem

Zielsetzung hier ist es mathematische Funktionen zu entwickeln die in den verwendeten Modellsystemen SCHISM-ECOSMO und STRATH E2E eine ähnliche Verteilung der Fischbiomasse erzeugen wie in den Akustischen Daten (durch UStA zur Verfügung gestellt) zu sehen ist.

In beiden Modellsystemen wird die vertikale Verteilung der Fisch Funktionalen Gruppen indirekt im



Modellsystem implementiert. Während die Futterverfügbarkeit in jeder horizontalen Gitterzelle die Produktion der Fischbiomasse in derselben bestimmt, wird die integrierte Fischbiomasse auf Basis die relative vertikale Verteilung der Beutegruppen zu jedem Zeitschritt vertikal neu verteilt. Futterverfügbarkeit ist damit die einzige Größe die die vertikale Verteilung der Fischbiomasse bestimmt (siehe Beispiel aus ECOSMO E2E Abb. 3.3).



**Abbildung 3.3** Zeitlicher Verlauf der Vertikalverteilung der beiden Fischgruppen (oben: Planktivore; unten: Pisci- und Benthivore) in ECOSMO E2E (gC/m<sup>2</sup>) im Modell für das Jahr 1995. Simulation: 1981-2009 (plus 10 Jahre Spinup).

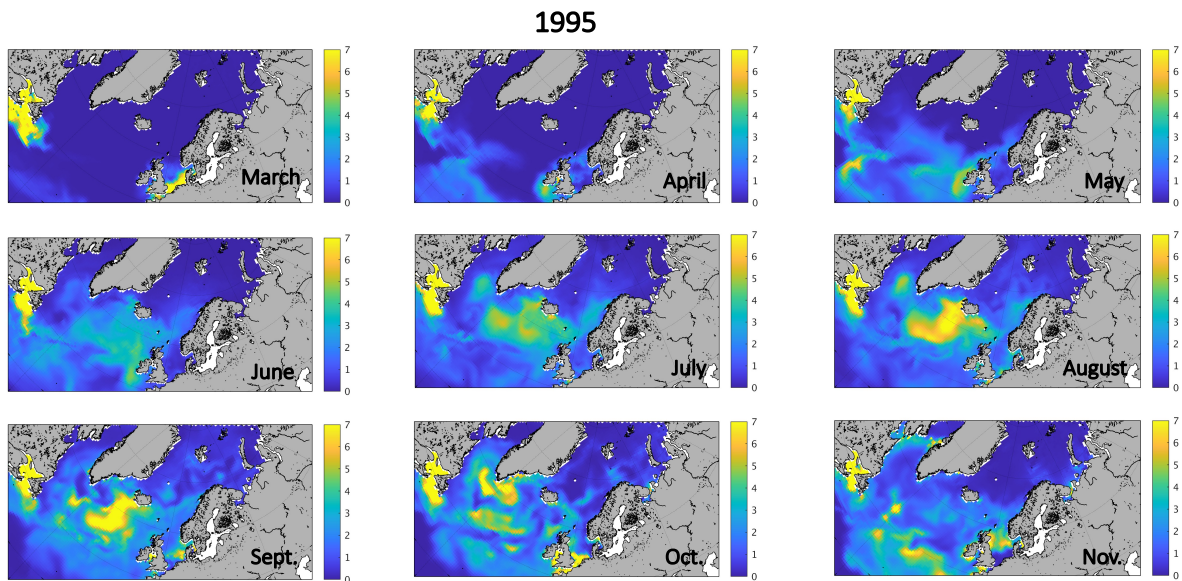
Da großskalige Fischmigrationsmuster vor Allem im Bereich der Norwegische See relevant sind<sup>15</sup> wurde die horizontale Migration der pelagischen Fischgruppe zunächst in einem grobskaligen Model setup des gesamten Nordatlantik mit dem physikalischen Model HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)<sup>16</sup> implementiert. In zukünftigen Arbeiten soll überprüft werden, ob die Implementierung auch für das SCHISM-ECOSMO E2E setup für die Barentssee und Framstraße notwendigerweise berücksichtigt werden muss. Im Rahmen des Projektes was es uns leider durch einige Verzögerungen in der Modelentwicklung nicht mehr möglich die Migration in SCHISM-ECOSMO E2E zu testen.

Die horizontale Migration der Fischgruppe wird dabei durch die den Gradienten der gewählten Umweltfaktoren bestimmt „Fisch“ darf sich dabei in Richtung positiver Gradienten bewegen. Die relative Größe des Gradienten bestimmt dabei über die Biomasse der Fischgruppe die, innerhalb eines Zeitschrittes, von einer Gitterzelle in die benachbarte Gitterzelle überführt wird. Die Änderung der Biomasse in einer Gitterzelle pro Zeitschritt wird daher wie folgt berechnet:

$$\Delta J_{mn} = - \sum_{k=1}^4 R_{k,mn} \times J_{mn} \times a_{k,mn}$$

mit  $J_{mn}$ : Fischbiomassenkonzentration;  $R_{k,mn}$ : relativer Gradient des Räuber/Beute Verhältnisses (die Umweltbedingung die hier als entscheidende Größe gewählt wurde);  $a_{k,mn}$ =Fisch Schwimmgeschwindigkeit ( $a_{k,mn}$ : Zufallszahl zwischen 0.2 and 1.2 m sec<sup>-1</sup>).

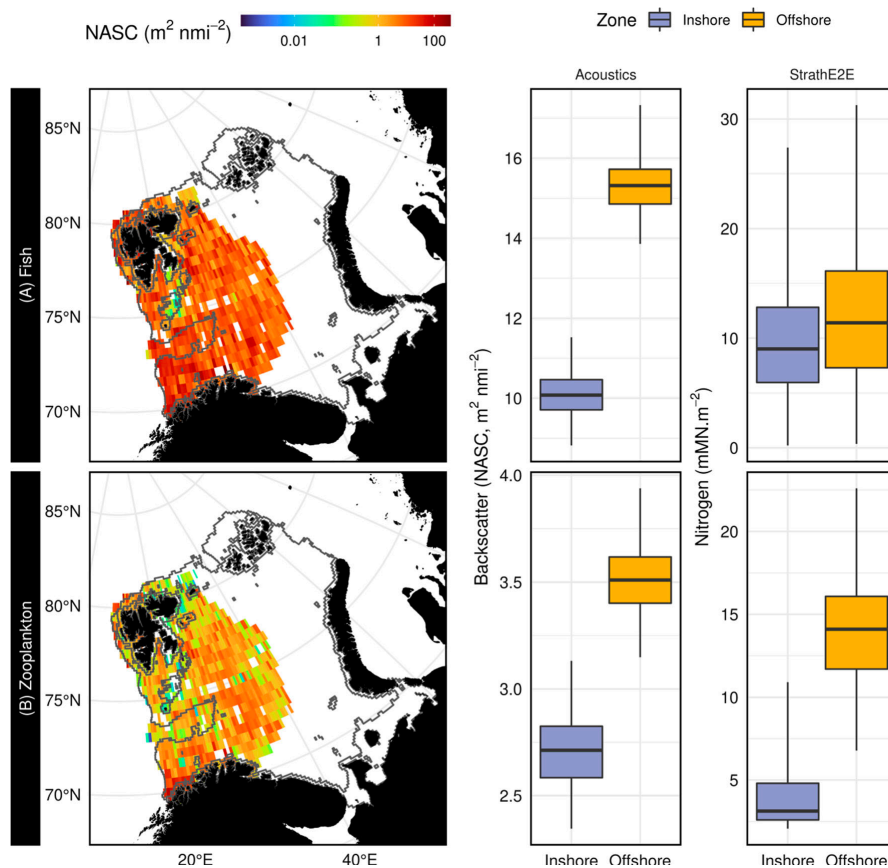
Mit Hilfe des Modellsystems wurden Simulationen zu Langzeitveränderungen im Nordatlantischen und Arktischen Ozean durchgeführt. Abbildung 3.4 zeigt die räumliche Verteilung der migrierenden (pelagischen) Fischgruppe im Verlauf eines Simulationsjahres. Die Fischmigration ist dabei als Funktion des Verhältnisses zwischen Räuber und Beute parametrisiert um sowohl Nahrungsverfügbarkeit als auch Konkurrenz mit zu berücksichtigen. Im Verlauf des Jahres ergibt sich dabei eine der Zooplanktonblüte folgenden nordwärts Migration der Fischgruppe insbesondere entlang der norwegischen Küste (Abb. 3.4), welche mit beobachteten Migrationsmustern der pelagischen Fischgruppe in der Region übereinstimmt<sup>17</sup>.



**Abbildung 3.4** Monatsmittel der vertikal integrierten pelagischen Fischbiomasse ( $\text{gC}/\text{m}^2$ ) im Modell für das Jahr 1995. Simulation: 1981-2009 (plus 10 Jahre Spinup).

Sowohl in ECOSMO als auch in StrathE2E wurden die Bewegungen der Fischgruppen in jedem Zeitschritt entlang räumlicher Gradienten im Verhältnis von Beute- zu Räuberbiomasse ausgerichtet, um sowohl die Nahrungsverfügbarkeit als auch die Konkurrenz zu berücksichtigen. Höhere trophische Ebenen (Robben, Wale, Vögel und Meeressäuger (Eisbären)) waren nur in StrathE2E<sup>18,19</sup> vertreten, und hier wurden neuartige Bewegungsalgorithmen, die sowohl die Nahrungs- als auch die Eisabhängigkeit dieser Gruppen berücksichtigen. Das StrathE2E räumlich nur zwischen küstennah und küstentfern unterscheidet ergeben sich daraus entsprechende Migrationsmuster zwischen den beiden Bereichen. *(Die Dokumentation ist Teil des StrathE2EPolar-Modell-R-Pakets, das auf der GitLab-Seite verfügbar ist (<https://gitlab.com/MarineResourceModelling/StrathE2E/StrathE2EPolar>)).*

Zielsetzung hier war es mathematische Funktionen zu entwickeln die in den verwendeten Modellsystemen SCHISM-ECOSMO und StrathE2E eine ähnliche Verteilung der Fischbiomasse erzeugen wie in den Akustischen Daten (durch die Universität von St. Andrews in AP4 zur Verfügung gestellt) zu sehen ist. Die Kollegen von UStA haben im Verlauf des Projektes akustische Daten in Größen überführt, die mit den, vom Modell berechneten, Fischbiomasse vergleichbar sind. Ein Vergleich zwischen Modelldaten aus dem Modellsystem StrathE2E-Polar und den akustischen Daten wurde in Heath et al. (2021)<sup>19</sup> durchgeführt (Abb. 3.5). Ein qualitativer Vergleich zwischen den simulierten Verteilungen aus ECOSMOE2E (Abb. 3.4) für August und September mit der beobachteten Verteilung (Abb. 3.5) zeigt zunächst eine ähnlich Verteilung in der Region, mit höheren Biomassen am Eingang zur Barents See und entlang der Norwegischen Küste, und geringeren Biomassen im den küstennahen Bereichen von Svalbard-Archipels.

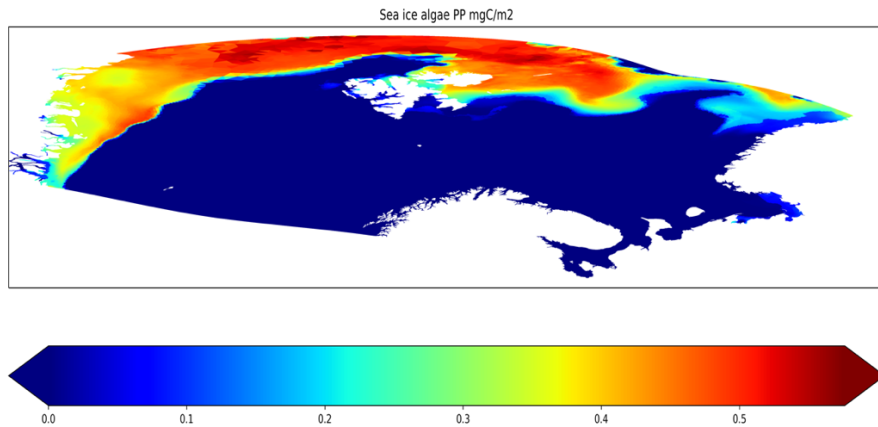


**Abbildung 3.5** (Abbildung aus Heath et al. 2022<sup>19</sup>) Vorhersagen des Modells StrathE2EPolar für die küstennahe und küstenferne Zone im Vergleich zu Echolotbeobachtungen. Obere Reihe: Fischbiomasse, untere Reihe: Makro-Zooplankton. Die Karten auf der linken Seite zeigen die tiefenintegrierte akustische Rückstreuungintensität (NASC) in einem 0,5 x 0,5 Grad regelmäßigen Raster und gemittelt über August und September 2011-2016. Mittlere Spalte: Interquartilsbereiche (0,5., 25., Median, 75. und 99,5. Zentile) der NASC-Flächendichtewerte über den küstennahen und küstenfernen Bereichen des Modellgebiets. Rechte Spalte: Glaubwürdige Interquartilsbereiche der August und September 2010 in der küstennahen und küstenfernen Zone für Makrozooplankton (fleischfressendes Zooplankton und Fischlarven zusammen) und Fisch (planktivore, wandernde und demersale Gilden kombiniert) aus dem StrathE2EPolar-Modell.

### Implementierung von SCHISM-ECOSMO in der Region Barents See/Arktischer Ozean

Das Modellsystem SCHISM-ECOSMO-POLAR (einschließlich Meereis-Biogeochemie) wurde im Gebiet Barentssee/Framstraße implementiert und zeigt im Allgemeinen eine sehr gute Performance mit Hinblick auf Ökosystemproduktivität und Verteilung von Nährstoffen. Die Modellvalidierung mit entsprechenden Beobachtungsdaten zu Chlorophyll, Nährstoffen. Beobachtungsdaten zu Nährstoffen stehen über die ICES Datenbank (ices.dk) zur Verfügung.

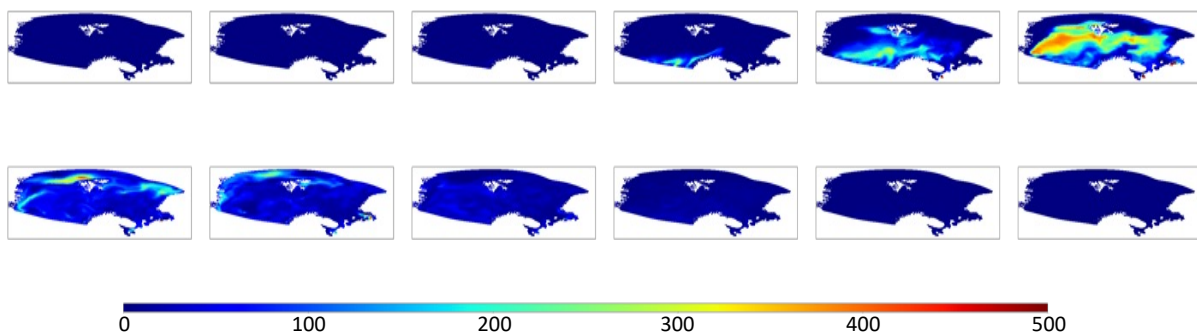
Die Simulationen zeigten, dass das gekoppelte Modell eine angemessene und realistische räumliche und saisonale Dynamik der Meereis-Biogeochemie-Komponente über der Barentssee und der Framstraße liefert. Die Ergebnisse der Gesamteisalgenproduktion (Abb. 3.6) stimmen mit den bekannten Mustern in der Region überein, und zeigen vergleichbare Ergebnisse wie vorherige Modellierungsstudien<sup>20</sup>



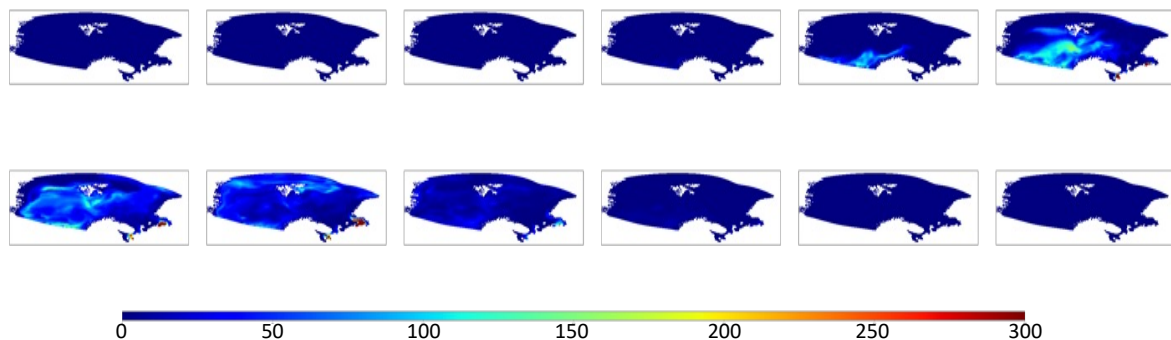
**Abbildung 3.6** Jährliche Eisalgenproduktion in  $\text{g C m}^{-2} \text{y}^{-1}$  für das Jahr 1991.

Die räumliche und saisonale Verteilung der pelagischen Phyto- und Zooplanktonblüte zeigt ebenfalls realistische, zu erwartende Muster (Abb. 3.7 & 3.8)

Die Ergebnisse zeigen eine Breitenabhängigkeit von Zeitpunkt und Amplitude der pelagischen Phytoplankton- (Abb. 3.7) und Zooplankton-Biomasse (Abb. 3.8). Wobei die Blüte in der südlichen Barents See im April beginnt und sich im Laufe der Saison nach Norden ausdehnt. Dabei setzt die Zooplanktonblüte etwa einen Monat später als die Phytoplanktonblüte ein. Die Produktion folgt dabei den typischen Limitationsmustern in der Region, die in erster Linie durch die Lichtverfügbarkeit und die saisonale Schichtung der Wassersäule bestimmt werden.



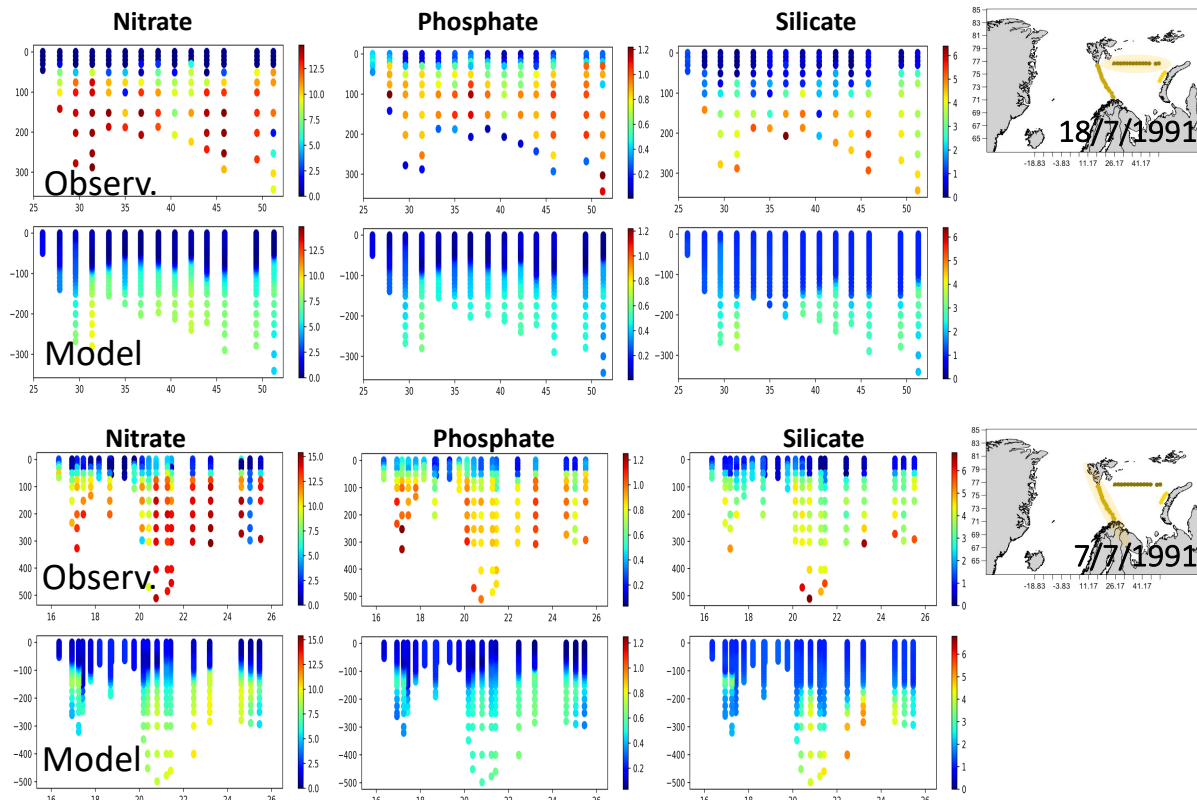
**Abbildung 3.7** Monatsmittelwert der Oberflächen-Phytoplankton-Biomasse ( $\text{mg C m}^{-3}$ ). Simuliertes Jahr ist 1991.



**Abbildung 3.8** Monatsmittelwert der Oberflächen-Zooplankton-Biomasse ( $\text{mg C m}^{-3}$ ). Simuliertes Jahr ist 1991.

Für die Validation der simulierten Verteilung der Nährstoffen wurde die Beobachtungsdaten an zwei Profilen in der Barents See mit den räumlich und zeitlich zugeordneten Modelldaten verglichen (Abb. 3.9). Der Vergleich zeigt, dass das Modell sehr gut in der Lage ist die räumliche Verteilung und die

Größenordnung der biogeochemischen Variablen abzubilden. Generell werden allerdings die Nährstoffe zu dem Zeitpunkt insbesondere in den tieferen Bereichen etwas unterschätzt. Der Unterschiede zu können zum einen aus den Randbedingungen, zum Anderen auch aus den Initialbedingungen der Simulation stammen, da es sich bei dem Jahr erst um das zweite Jahr der Simulation handelt und keine weitere Spin-up-Periode berücksichtigt wurde.

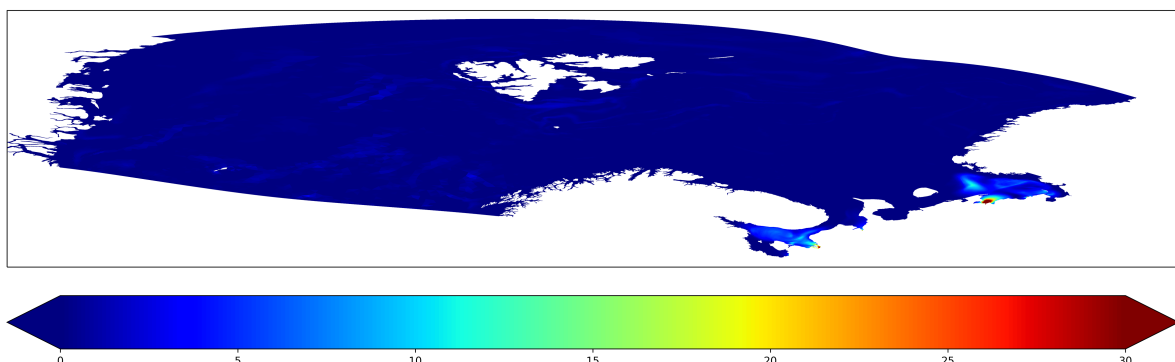


**Abbildung 3.9** Nährstoffkonzentrationen ( $\text{mgC m}^{-3}$ ) aus in-situ Beobachtungen ([www.ices.dk](http://www.ices.dk)) und Modellsimulation entlang zweier Profile in Barentssee (jeweils gelb markiert in der Karte rechts oben).

#### AP 4. Zusammentragen von verfügbaren Daten, Parameteroptimierung und Sensitivitätsanalysen

##### Zusammentragen von verfügbaren Daten

Im Rahmen von AP4 wurden zunächst eine Reihe von Daten zusammengetragen, die für die Modellsimulationen und deren Validation notwendig sind. Hereon hat dazu vor Allem die Antriebsdaten für das 3-d SCHISM-ECOSMO-E2E und Daten für physikalische und biologische Variablen zur Modellvalidation zusammengestellt. Als besonders wichtig erwiesen sich dabei Daten zu Nährstoffeinträgen durch Flüsse in der Barents See Region<sup>21</sup>, etwas was in Modellen der Region oft vernachlässigt wird, aber elementar für die Darstellung der Primärproduktionsverteilung ist. Durch Hinzufügen der 4 größten Flüsse und der damit verbundenen Nährstoffbelastung erhöht sich die Primärproduktion lokal um bis zu  $30\text{gC m}^{-2}$  (Abb. 4.1).



**Abbildung 4.1** Differenz in der Gesamtprimärproduktion ( $\text{gC m}^{-2}$ ) bei Hinzufügung der Nährstoffbelastung durch die 4 wichtigsten Flüsse in der Barentssee Region.

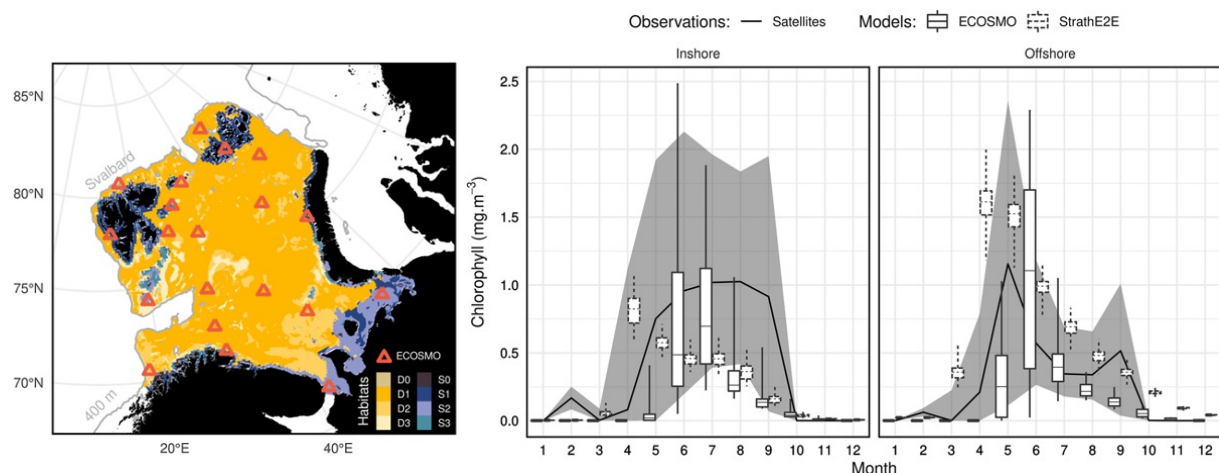
Die für das Modell StrathE2E erforderlichen Eingabe- und Modellvalidierungs-/Optimierungsdaten wurden von der SU zusammengetragen. Dabei handelt es sich um bathymetrischen, sedimentologischen, hydrologischen und atmosphärischen Ablagerungsdaten, Daten zu Fischereiaktivitäten, Anlandungen, Rückwürfen und Beifängen sowie Temperatur, Geschwindigkeiten, Eisausdehnung und -bedeckung aus dem 0,25-Grad-NEMO-MEDUSA-Modells, und, für die Modellvalidierung/-optimierung, um 76 Beobachtungsindikatoren für den Zustand des Ökosystems der Barentssee. Daten und Dokumentation stehen auf der Gitlab-Seite (siehe oben) zur Verfügung, die Karten zur Sedimentverteilung wurden im Projektverlauf veröffentlicht<sup>22</sup>.

Außerdem wurden durch die UStA archivierte hydroakustischer Daten aus arktischen Erhebungen weiterverarbeitet. Dabei wurde mit Hilfe von maschinellem Lernen (z. B. neuronale Netze) die Verteilung der Echoenergie in der Wassersäule und ihre saisonale und tägliche vertikale Verteilung kartiert und dokumentiert (Abb. 3.5). Diese Verteilung lässt sich verschiedenen Tiergruppen (z. B. Fischen und Zooplankton) zuordnen, und die daraus abgeleitete Biomasse wurde zum Testen der Modellergebnisse zur Verfügung gestellt (siehe AP3).

## Dekadische Hindcast-Simulation

### 1d GOTM-ECOSMO

Dekadische Hindcast-Simulationen wurden zunächst mit dem 1d GOTM-ECOSMO-Modellsystem durchgeführt und die Modellergebnisse mit denen von StrathE2E und Beobachtungen verglichen (Abb. 4.2). Dabei wurde das 1d Modellsystem auf verschiedene Orte in der Barents See angewendet, die Ergebnisse statistisch gemittelt und mit Beobachtungen von Chlorophyll in der Barents See verglichen. Die Ergebnisse für den Zeitraum 2011-2019 wurden im Rahmen der CAO-Sonderausgabe von AMBIO veröffentlicht<sup>19</sup>.

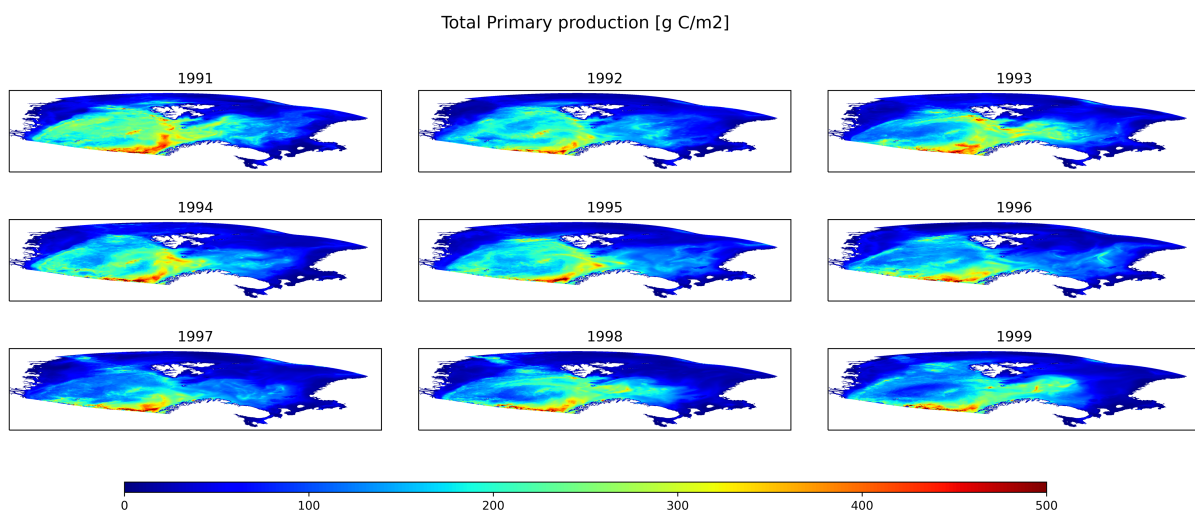


**Abbildung 4.2** (Abbildung aus Heath et al. 2022<sup>19</sup>) Phytoplankton-Chlorophyll-Vergleich zwischen Modellausgaben und Beobachtungen für die Klimatologie der 2010er Jahre. Box-Plots zeigen den Median und den Interquartilsbereich. Der schattierte Bereich zeigt den Interquartilsbereich für Satellitenbeobachtungen ([https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=OCEANCOLOUR\\_ARC\\_CHL\\_L4\\_REP\\_OBSERVATIONS\\_009\\_088](https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=OCEANCOLOUR_ARC_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_088)), mit dem Median als durchgezogene Linie. Die Bereichsbalken für die ECOSMO-Ergebnisse stellen die räumliche Variabilität zwischen den Modellstandorten (linkes Bild) innerhalb jeder Zone dar. Für StrathE2E-Polar stellen die Bereichsbalken glaubwürdige Intervalle der Modellausgabe aufgrund der Parameterunsicherheit dar.

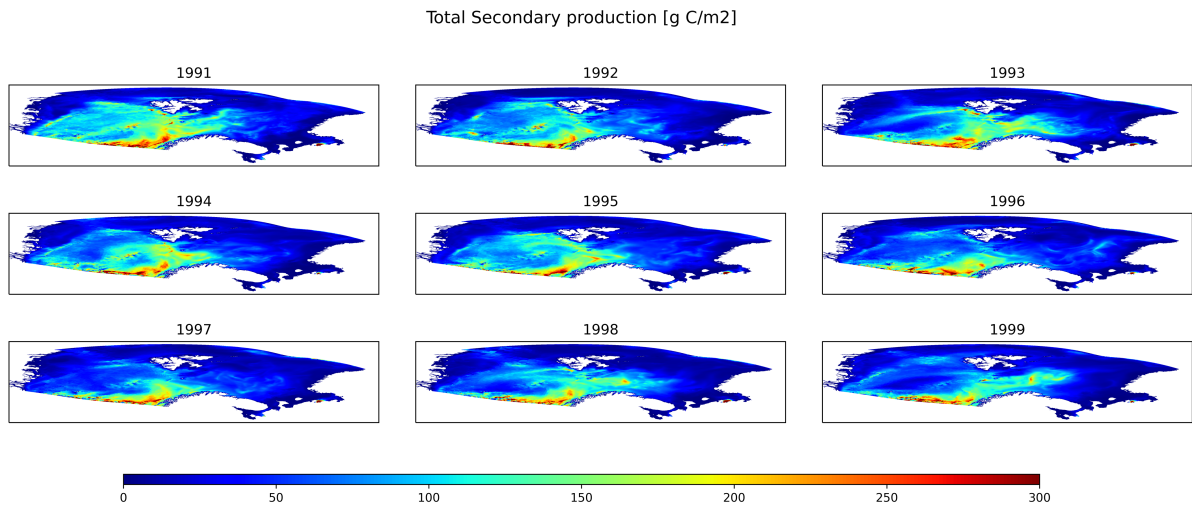
### 3d SCHISM-ECOSMO-Polar

Um die Veränderungen der räumlichen Variabilität, insbesondere mit Bezug zu Veränderungen der Meereisbedeckung und der Rolle der Eisalgen, genauer zu untersuchen wurden schließlich dekadische Simulationen mit SCHISM-ECOSMO-Polar durchgeführt. In Abbildung 4.3 & 4.4 sind die Simulationsergebnisse für die jährliche Primär- und Sekundärproduktion für die Jahre 1991-1999 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine starke interannuale sowie räumlich Variabilität. Die höchste

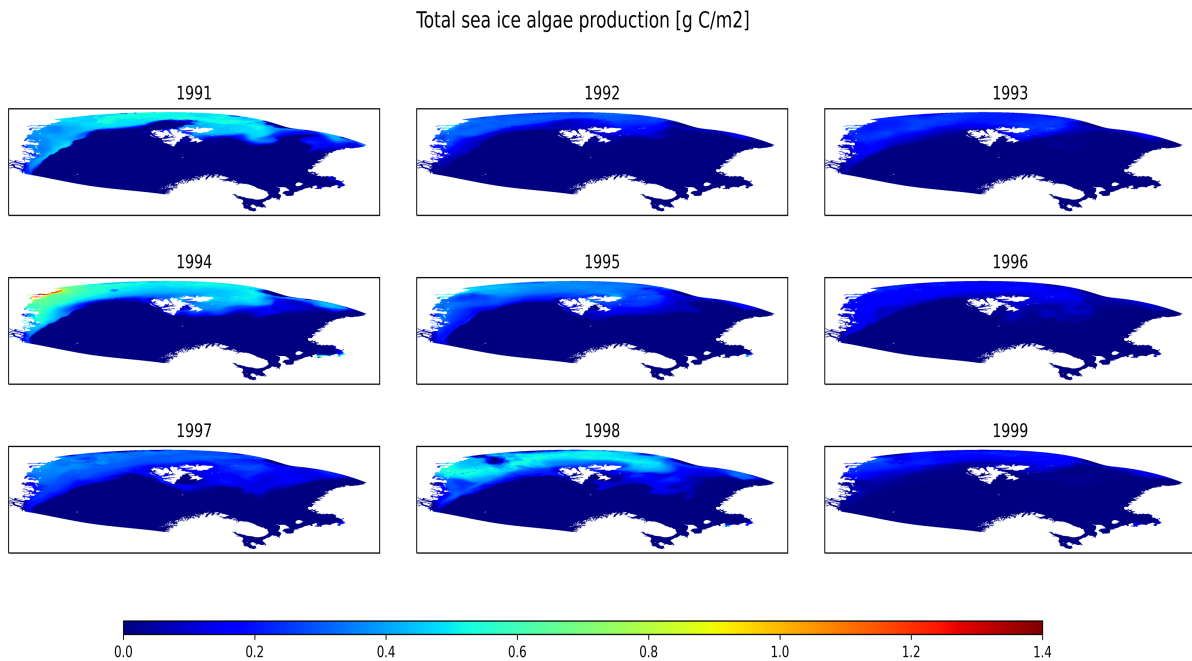
Produktion zeigen dabei die atlantischen Gewässer entlang der norwegischen Küste und westlich des Svalbard-Archipels. Ein Vergleich zu Satelliten gestützten Abschätzungen der Primärproduktion in der Region<sup>23</sup> zeigt, dass das Modell die Primärproduktionsmuster sowohl qualitativ als auch quantitativ gut nachbildet. Die Produktion in der östlichen Barentssee scheint jedoch nach wie vor unterrepräsentiert. Allerdings ist der Vergleich zu Satellitenbeobachtungen hier nur bedingt aussagekräftig, da Satellitenprodukte aufgrund der verwendeten Algorithmen mit Unsicherheiten behaftet sind und mit Unterschieden in den Absorptions- und Rückstreuungseigenschaften des Phytoplanktons und den Konzentrationen von farbigen, gelösten organischen Stoffen (CDOM) und Mineralien zusammenhängen<sup>24</sup>. Daher sind die Abschätzungen gerade in Küstennahen Gebieten mit hohen Flusseinträgen oft fehlerhaft. In einigen der simulierten Jahre beobachten wir eine stärkere Primärproduktion in der südlichen Barents See, die mit einem stärkeren Einstrom von atlantischen Wassermassen in die Barentssee zusammenhängt (1991, 1993, 1998, 1999). Diese Situation wird vermutlich in Zukunft häufiger auftreten mit dem kontinuierlich zunehmenden Einfluss der Atlantischen Wassermassen in der Barentssee (Arctic Atlantification)<sup>25</sup>. Im Norden schränkt das Meereis die Primärproduktion ein. In den letzten Simulationsjahren (1997-1999) beobachten wir eine nord-westwärts gerichtete Zunahme der Primärproduktion im Meereis, die mit einer Öffnung des Meereises zusammenhängt. Die Sekundärproduktion, die letztlich die Verteilung des Zooplankton bestimmt, folgt weitestgehend der Verteilung der Primärproduktion (Abb. 4.4). Die Primärproduktion im Meereis (Abb. 4.5) zeigt ebenfalls ein starke interannuelle und räumliche Variabilität wobei die grönländische Küste ist die zumeist produktivste Region darstellt. Die Produktion von Meereisalgen ist zunächst abhängig von der Lichtverfügbarkeit zu Beginn der Saison, im weiteren Verlauf der Blüte bedingen Nährstoffverfügbarkeit und Meereisschmelze die Produktivität. Im Allgemeinen ist Silikat hier die limitierende Nährstoffquelle.



**Abbildung 4.3** Jährliche Primärproduktion simuliert mit SCHISM-ECOSMO-Polar



**Abbildung 4.4** Jährliche Sekundärproduktion simuliert mit SCHISM-ECOSMO-Polar.

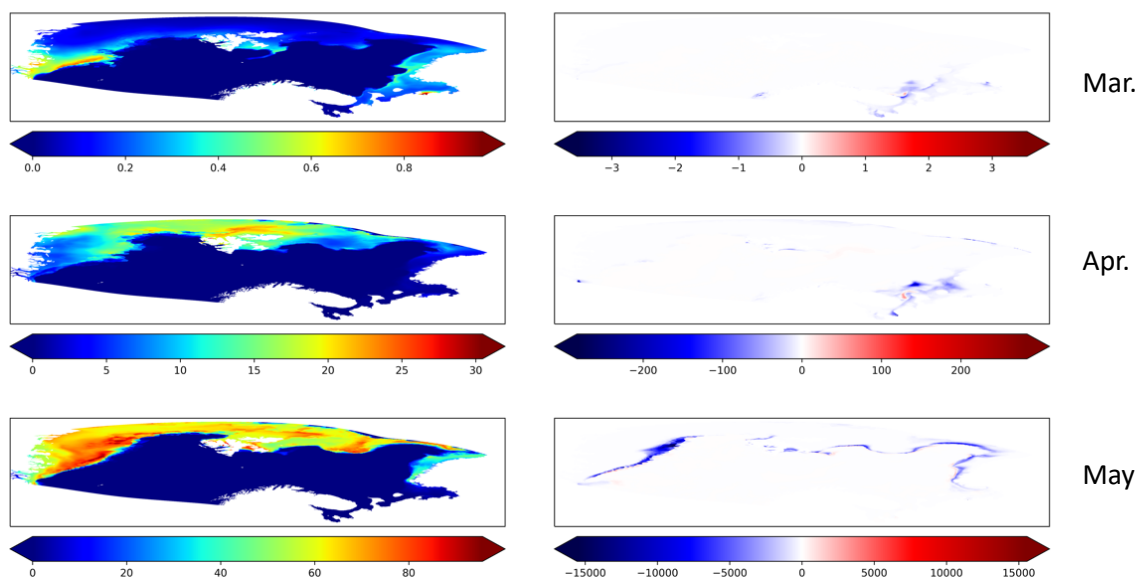


**Abbildung 4.5** Jährliche Meereisalgenproduktion simuliert mit SCHISM-ECOSMO-Polar.

### Sensitivität der Produktionsverteilung zur Meereisalgenblüte

Um die Rolle der Meereisproduktion auf die räumliche Verteilung der pelagischen Primärproduktion zu untersuchen haben wir ein analoges Sensitivitätsszenario mit SCHISM-ECOSMO-Polar gerechnet in dem die Meereisproduktion nicht berücksichtigt wurde. Die Ergebnisse zeigen die Relevanz der Biogeochemie des Meereises insbesondere für die Primärproduktion entlang der Eiskante (Abb. 4.6). Im Allgemeinen kommt es zu einer räumlichen Umverteilung der Produktion. Unter dem Eis führen Eisalgen zu einem Rückgang der pelagischen Primärproduktion in Folge erhöhter Lichtlimitierung durch Abschattungseffekte. Direkt an der Eiskante wo Meereis schmilzt, trägt ein Teil der in der Wassersäule freigesetzten Eisalgen jedoch positiv zur pelagischen Primärproduktion bei, was zu einem lokalen Anstieg der pelagischen Produktion führt (siehe Abbildung vom Mai).

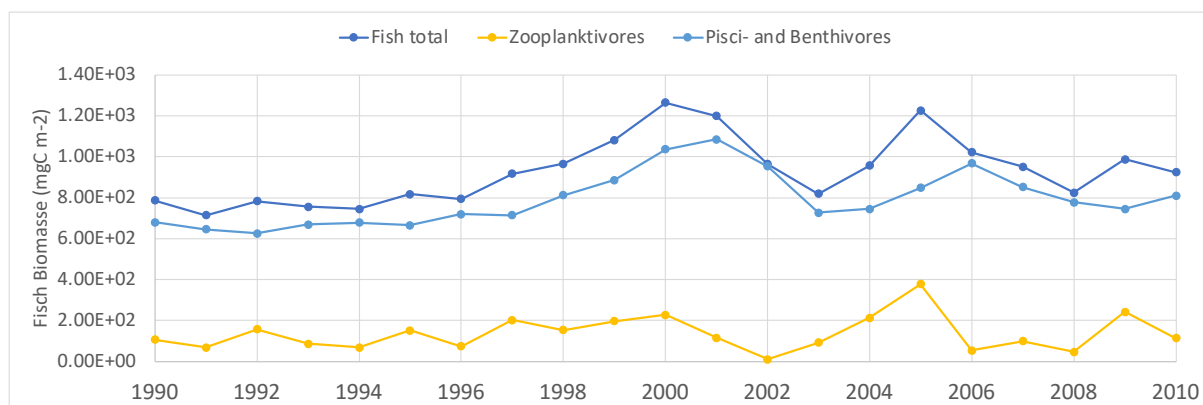




**Abbildung 4.6** Jährliche Meeresalgenproduktion simuliert mit SCHISM-ECOSMO-Polar.

### 3d HYCOM-ECOSMO E2E

Desweiteren wurden Multidekadische Hindcast Simulationen mit dem HYCOM-ECOSMO E2E Modellsystem durchgeführt um die Umwelteinflüsse auf die Fischverteilung zu untersuchen. Ein erster Vergleich der simulierten Variabilität der Fisch Biomasse (Abb. 4.7) mit Beobachtungsdaten aus der Barents See <sup>26</sup> zeigt, dass das Modell einen Teil der Variabilität abbilden kann. In den 1990iger Jahren zeigen die Ergebnisse jedoch eine von den Beobachtungen verschiedene Variabilität. Als mögliche Ursache dafür ist hier zum Beispiel zu nennen, dass in der Simulation keine veränderliche Fischereimortalität berücksichtigt wurde. Ein erster Vergleich zu der von StrathE2E berechneten Fischbiomasse für dem Zeitraum 2010-2019 zeigt außerdem, dass beide Modelle die Biomasse in der gleichen Größenordnung berechnen<sup>19</sup>.



**Abbildung 4.7** Jährlich gemittelte simulierte Fischbiomasse für die beiden Fischgruppen (1. Zooplanktivores; 2. Pesci- and Benthivores) und die Gesamtfischbiomasse in der Barents See.

## AP 5. Zukunftsszenarien – Reaktion des Ökosystems auf Umweltveränderungen

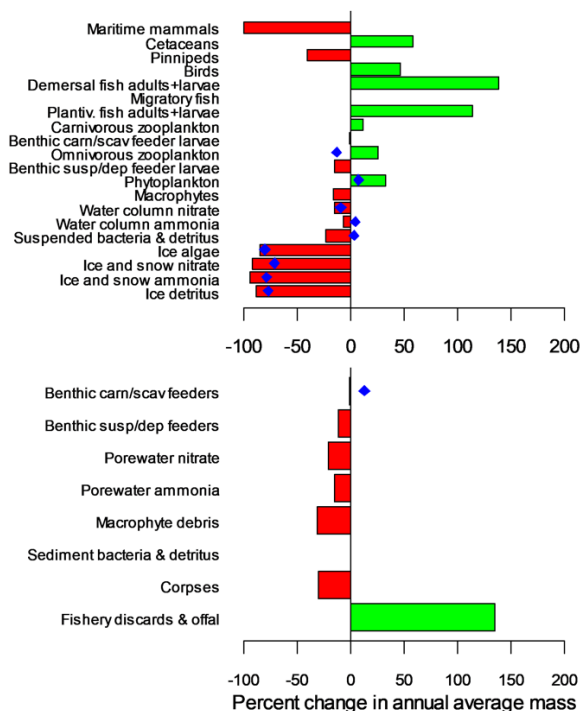
Die Simulationen umfassen den Zeitraum 2040-2049 und wurden konsistent zu den Simulationen für den Zeitraum 2010-2019 für beide Modelle ECOSMO-E2E-POLAR und StrathE2EPolar durchgeführt<sup>19</sup>. Die Antriebsdaten für die Zukunftsprojektionen wurden aus den Simulationen mit NEMO-MEDUSA für den Ozean extrahiert und zur Verwendung mit in beiden Modellen vorbereitet. Das erste Jahr der Simulation 2040 markiert den Beginn der nahezu ganzjährig eisfreien Bedingungen in der Region, die sich aus dem verfügbaren NEMO-MEDUSA Szenario<sup>27</sup> (IPCC RCP8.5) ergeben. Dabei ist das gewählte Szenario eines, das sehr hohe CO<sub>2</sub> Emissionen voraussetzt und damit zu einem der extremsten

Zukunftsszenarios zählt. Für beide Modelle wurden die für diese Läufe maßgeblichen Umweltdaten aus den NEMO-MEDUSA-Ergebnissen entnommen. Da für die Region unseres Wissens keine Projektionen der Nährstoffeinträge aus Flüssen oder der atmosphärischen Depositionsraten von Nährstoffen zur Verfügung stehen wurden diese konstant gehalten. Künftige Fischereiszenarien waren Gegenstand der Szenarioexperimente wobei als Referenz der Status quo der Fischereiaktivitäten und der Eigenschaften der Fanggeräte für die Jahre 2011-2019 angenommen wurde. Für die atmosphärischen Antriebsdaten für SCHISM-ECOSMO-POLAR wurden die Daten (consistent mit den Nemo-Medusa Simulationen) aus der Simulation mit HadGEM2-ES RCP8.5 extrahiert <sup>28</sup>.

Die geplanten IPCC Szenarios mit dem voll gekoppelten SCHISM-ECOSMO-Polar Model konnten auf Grund von Verzögerungen in der Modelentwicklung während der Projektlaufzeit noch nicht abschließend durchgeführt und analysiert werden, werden aber nach Abschluss in einer weiteren Veröffentlichung diskutiert werden. Grund für die Verzögerungen waren vor Allem das unerwartete Ausscheiden von Schlüsselpersonal im zweiten Projektjahr und der erhöhte Arbeitsdruck der sich aus den Umstellungen während Pandemie ergab.

### **Vergleichende Simulationen der beiden Modelle und Fischereiszenarios**

Für die vergleichenden Modellsimulationen wurden die ECOSMO-Polar in einem 1d setup für verschiedene Orte im Bereich der Barentssee durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt und somit vergleichbar zu den Ergebnissen des Boxmodels StrathE2E-Polar gemacht. Im Vergleich der beiden Zeiträume, zeigen die Ergebnisse signifikante Veränderungen im Ökosystem für allen berücksichtigten Ökosystemgruppen (Abb. 5.1), welche sowohl mit dem Rückgang des Meereises als auch mit Veränderungen in der Nährstoffverfügbarkeit zusammenhängen. Am repräsentativsten ist dabei aber die generelle Abnahme der Meereisalgen. Aus den Simulationen mit StrathE2EPolar zeigt sich außerdem ein signifikanter Einfluss der veränderten Umweltbedingungen auf die verschiedenen Fischgruppen als Konsequenz von sowohl bottom-up als auch top-down Effekten. Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass die Produktivität und der maximal nachhaltige Ertrag (MSY) von demersalen Fischen in der Barentssee wahrscheinlich zunehmen werden, was zu einem zusätzlichen Fraßdruck auf planktivore Fische führt, was wiederum Auswirkungen auf höhere trophische Ebenen hat. Diese Veränderungen werden durch den Verlust des Meereises vorangetrieben, der sich sowohl auf den Lebensraum, die Migration und die Ernährung der hohen trophischen Ebenen auswirkt, als auch auf die erhöhte Primärproduktion durch das Eindringen von Licht in den Ozean. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 illustriert und wurden ebenfalls in Heath et al. (2022) <sup>19</sup> veröffentlicht.



**Abbildung 5.1.** (Abbildung aus Heath et al. 2022<sup>19</sup>) Differenzen der durchschnittlichen jährlichen modellierten Biomassen der Nahrungsnetzkomponenten zwischen den 2040er und 2010er Jahren. Rot und grün beziehen sich auf die Ergebnisse von StrathE2EPolar. Blaue Symbole kennzeichnen die Ergebnisse von ECOSMO-Polar (mit einem eingeschränkteres Nahrungsnetz). Grüne Balken und Symbole auf der rechten Seite indizieren einen größeren Wert der jeweiligen Variablen in den 2040ern als in den 2010ern, und umgekehrt, für rote Balken und Symbole auf der linken Seite zeigt sich eine Reduktion des Wertes in den Projektionen.

## AP 6. Auswirkung und Wissensaustausch

Leider konnten die geplanten Webinar Produkten in Zusammenarbeit mit dem *Arctic Council CAFF* während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden. Die Kommunikation mit dem CAFF-Sekretariat des Arktischen Rates verzögerte sich vor Allem durch die Arbeitsbedingungen während der Pandemie. Nicht wegen der schwierigeren Kommunikation sondern wegen des allgemein erhöhten Arbeitsdrucks der auf dem Personal lastete. Daher haben wir der Umsetzung der Forschungsaufgaben Vorrang eingeräumt. Auch weil wir für die Kommunikation mit CAFF zunächst solide Forschungsergebnisse benötigten.

### 1.2 Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Alle Beträge in Euro (€)			
1	2	3	4
Position Gesamtvor- kalkulation	Entstandene Kosten insgesamt bis einschl. 2021	Anerkannte Kosten insgesamt bis einschl. 2021	Gesamtvorkalkulation
0813	0,00		0,00
0823	0,00		0,00
0837	356.119,73		323.815,00
0838	2.865,71		3.450,00
0847	0,00		0,00
0848	0,00		0,00
0850	0,00		0,00
0856	0,00		0,00
0860	38.554,42		32.727,00
<b>Summe:</b>	<b>397.539,86</b>		<b>359.992,00</b>

### *1.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten*

Der zunehmende Rückgang der saisonalen Eisbedeckung der Arktis hat Auswirkungen auf die Primärproduktion in der Barentssee und auf das Gleichgewicht zwischen den Arten. Räumliche und zeitliche Veränderungen in der Produktivität beeinträchtigen das gesamte Nahrungsnetz was eine Herausforderung für das Fischereimanagement darstellt. Es gibt klare Argumente für die Annahme eines Ökosystemansatzes für die Fischerei (EAF) in dieser Region als Teil einer Strategie zur Bewältigung der Auswirkungen des Klimawandels. Dazu bedarf es jedoch angemessener Modelinstrumente die zum einen die Veränderungen in der Produktion abbilden können und die Bewertung von Managementstrategien ermöglichen. Die in MiMeMo geleisteten Arbeiten ermöglichten die Entwicklung gekoppelter Modellsysteme mit dessen Hilfe die Veränderungen im Ökosystem der Barentssee Region evaluiert und projiziert werden können.

Die in MiMeMo geleisteten Arbeiten und dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie dem im Projektantrag formulierten Arbeitsplan entsprachen und alle wesentlichen geplanten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Die Mittel wurden wie geplant vor Allem für Personalmittel aufgewandt. Während der kostenneutralen Verlängerung wurden außerdem noch eigene Personalmittel beigestellt um die Arbeiten weiterzuführen.

### *1.4 Voraussichtliche Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses*

Die im Projekt erfolgten Modellentwicklungen, Simulationen und Erkenntnisse zur Veränderungen des arktischen Ökosystems stellen eine signifikante Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Marinen Ökosystemmodellierung dar und erlauben, gerade in Zusammenhang mit dem ECOSMO-E2E Modell, nun eine wesentlich breitere Adressierung der der Bottom-up und Top-down Kontrolle in Marinen Ökosystemen der Arktis. Dies eröffnet eine Vielzahl von weiterführenden wissenschaftlichen -und im weiteren Sinne auch wirtschaftlich interessanten- Anwendungen. Die Entwicklungen am arktischen ECOSMO E2E-Polar werden in den kommenden Jahren zu operationellen Modellprodukten für höhere trophische Stufen beitragen. Das am Hereon verwendete und von den deutschen PIs Corinna Schrum und Ute Daewel entwickelte Ökosystem Model ECOSMO wird bereits im Rahmen der Copernicus Marine and Environmental Services (CMEMS)- Arctic MFC in einem operationell betriebenen Model der Arktis verwendet (<https://marine.copernicus.eu/de/%C3%BCber/datenerzeuger/arctic-mfc>).

Die in CMEMS erzeugten Datenprodukte dienen unter anderem dazu die Berichterstattung im Rahmen der Marine Strategy Framework Directives (MSFD) zu unterstützen. Die Produktpalette soll aber auch in den kommenden Jahren um Variablen für höheren trophische Stufen im marinen Ökosystem (e.g. Fischbiomasse) erweitert werden, womit die Modellergebnisse auch interessant werden zur Unterstützung von Fischereimanagement in der Region. Hereon ist Partner in einem gerade bewilligten EU Projekt NECCTON (Call: HORIZON-CL4-2022-SPACE-01) in welchem wir auf den Entwicklungen von MiMeMo aufbauend entsprechende Produkte entwickeln werden. In dem Zusammenhang sind wir auch in Kontakt mit den Entsprechenden Arbeitsgruppen beim International Council for the Exploration of the Sea (ICES; WGINOR; WGIBAR) mit denen in einer entsprechenden Fallstudie die Nutzbarkeit der Produkte für die Integrierte Bewertung des regionalen Ökosystems getestet werden soll. Weiterhin kann das in MiMeMo entwickelte Model für Meereisbiogeochemie ebenfalls in die Produktentwicklung für das Arctic MFC mit aufgenommen werden.

Mit Hinblick auf wissenschaftlichen und technischen Austausch der Modellentwicklungen haben wir bereits eine Reihe von Zusammenarbeiten initiiert, welche in den kommenden Jahren fortgesetzt werden. Das beinhaltet eine kontinuierliche Zusammenarbeit mit dem NERSC (Nansen Environmental and Remote Sensing Centre in Bergen, Norwegen) welches federführend für das Arctic MFC verantwortlich ist, und eine Zusammenarbeit mit dem Institute of Oceanology (Polish Academy of

Science) in Form eines Doktorandenaufenthalts am Hereon, sowie eine aktive Beteiligung an der BEPSII (Biogeochemical exchange processes at the sea ice interface) Arbeitsgruppe.

Die Zusammenarbeit mit der Polish Academy of Science wird über ein weiteres Austauschprojekt (<https://nawa.gov.pl/naukowcy/program-imienia-bekker>) fortgeführt in dem das Modellsystem SCHISM-ECOSMO-Polar angewendet werden soll um mögliche Klimaeffekte auf die Artenzusammensetzung des Planktons in den Küstengewässern um Svalbard zu untersuchen.

Das im Projekt entwickelte Modellsystem kombiniert einzigartig ein unstrukturiertes physikalisches Modell mit einem Nahrungsnetzmodell und einem Meereisökosystemmodell und stellt damit die Basis für weitere Wissenschaftliche und technische Fragestellungen. So erlaubt die Umsetzung eines E2E Ökosystemmodells mit Hilfe unstrukturierter Gitter beispielsweise spezifische hochaufgelöste Modellanwendungen in küstennahen Bereichen womit spezifische Fragestellungen zu Langzeitveränderungen und anthropogenen Einflüssen auf das Küstenökosystem, wie sie in POF IV Topic 4 formuliert sind, adressiert werden können.

Weitere Modellentwicklungen die für andere Regionen im Rahmen des DAM Missionsprojektes „Coastal Futures“ geplant sind, adressieren die trophische Kopplung des ECOSMO E2E Modellsystems zu Spezies-auflösenden Modellen von höheren trophischen Stufen. Diese Entwicklung lässt sich in das entwickelte Modellsystem überführen und erlaubt damit die Beantwortung von klaren Managementfragestellungen hinsichtlich des Fischereimanagement im Nordatlantischen/Arktischen Ökosystem. Außerdem ist derzeit die Modellkopplung zu einem Schadstoff Modelframework in Arbeit, mit dessen Hilfe zum Einen der Einfluss des Ökosystems auf den Schadstoffumsatz in marinen System untersucht wird. Zum Anderen kann mit Hilfe einer Bioakkumulationsparameterisierung auch das Risiko von Schadstoffbelastung auf höhere trophische Stufen im polaren Ökosystem quantifiziert werden kann.

### *1.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen*

Alle Projektmitarbeiter verfolgten kontinuierlich internationale Veröffentlichungen, stehen im Austausch mit nationalen und internationalen Forschern und sind in internationalen Arbeitsgruppen aktiv. Während des Projektzeitraumes sind uns keine, für die Projektdurchführung relevanten, Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

Relevante Arbeitsgruppen:

- BEPSII (ein offenes Netz für den internationalen Wissensaustausch im Zusammenhang mit biogeochemischen Austauschprozessen an der Meereisgrenze)
- ICES WGIPEM Working Group on Integrative, Physical-biological and Ecosystem Modelling

### *1.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses*

Benkort, D., Daewel, U., Heath, M., and Schrum, C. 2020. On the Role of Biogeochemical Coupling Between Sympagic and Pelagic Ecosystem Compartments for Primary and Secondary Production in the Barents Sea. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenvs.2020.548013>.

Heath, M. R., Benkort, D., Brierley, A. S., Daewel, U., Hofmeister, R., Laverick, J. H., Proud, R., et al. 2020. HOW IS CLIMATE CHANGE AFFECTING MARINE LIFE IN THE ARCTIC ? *Frontiers for Young Minds*.

Heath, M. R., Benkort, D., Brierley, A. S., Daewel, U., Laverick, J. H., Proud, R., and Speirs, D. C. 2022. Ecosystem approach to harvesting in the Arctic: Walking the tightrope between exploitation and conservation in the Barents Sea. *Ambio*, 51: 456–470.

Laverick, J. H., Speirs, D. C., and Heath, M. R. 2022. Synthetic shelf sediment maps for the Greenland Sea and Barents Sea. *Geoscience Data Journal*: 1–11.

Szeligowska, M., Benkort, D., Trudnowska, E., and Błachowiak-Samołyk, K. 2022. How Do Dark Streams of Arctic Glacial Meltwater Affect Plankton? *Frontiers for Young Minds*, 10.

ICES. 2021. Working Group on Integrative, Physical-biological and Ecosystem Modelling (WGIPEM). *ICES Scientific Reports*. 3:73. 62 pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.8231>

### Geplante Veröffentlichungen

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R. and Schrum, C. in prep. Past and Future ecosystem changes in the Barents Sea and Fram Strait area.

Daewel, U, Samuelsen, A., Schrum, C., Yumruktepe, Ç. in prep. Potential implications of environmental changes on fish productivity in the in the North Atlantic/Arctic Ocean.

### Konferenzen/Vorträge

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R., Schrum, C. (2019) Implementing sea-ice algae into the biogeochemical model ECOSMO-E2E. Poster presentation, *CAO – annual meeting, 01/2019, in person*

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R. (2019) Biogeochemical modelling of the Arctic system: role of the sea-ice and pelagic systems linkage on the primary production. Talk presentation, *WGIPEM – Annual meeting, 03/2019, in person*

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R., Schrum, C. (2019) Biogeochemical modelling of the Arctic system: role of the sea-ice and pelagic systems linkage on the primary production. Pico-presentation, *EGU – General assembly, 01/2019, in person*

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R., Schrum, C. (2019) Biogeochemical linkage of the sea-ice and pelagic systems and its role on the Arctic ecosystem dynamic. Talk presentation, *IGS – Sea Ice Symposium, 08/2019, in person*

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R., Schrum, C. (2020) Role of biogeochemical coupling between sympagic, pelagic and benthic ecosystem for primary and secondary production. Poster presentation, *CAO – annual meeting, 01/2020, in person*

Benkort, D., Daewel, U., Hofmeister, R., Schrum, C. (2021) Spatio-temporal variability of the primary and secondary production in the Barents Sea: from a 1D to a 3D modelling approach. Poster presentation, *CAO – Final meeting, 11/2021, online*

Daewel, U, Samuelsen, A., Schrum, C., Yumruktepe, Ç. (2019) Lower trophic level ecosystem response to change in higher trophic level production: a modelling study in the Northern Atlantic/Arctic ocean. *ICES WGIPEM Annual meeting – March 2019 – Bergen, Norway*

Daewel, U, Samuelsen, A., Schrum, C., Yumruktepe, Ç. (2019) On the role of higher trophic levels for changes in ecosystem productivity: A modelling study in the North Atlantic/Arctic Ocean. *IMBER Ocean Science Conference, 06/2019, Brest France*

Daewel, U, Samuelsen, A., Schrum, C., Yumruktepe, Ç. (2021) Lower trophic level ecosystem response to change in higher trophic level production: a modelling study in the Northern Atlantic/Arctic ocean. Poster presentation, *CAO final meeting, 11/2021, online*

## 2 Anhang – Literaturverzeichnis

1. Heath, M. R. Ecosystem limits to food web fluxes and fisheries yields in the North Sea simulated with an end-to-end food web model. *Progress in Oceanography* **102**, 42–66 (2012).
2. Daewel, U., Schrum, C. & Macdonald, J. Towards End-2-End modelling in a consistent NPZD-F modelling framework (ECOSMOE2E\_vs1.0): Application to the North Sea and Baltic Sea. *Geoscientific Model Development Discussions* **2018**, 1–40 (2018).
3. Zhang, Y. J., Ye, F., Stanev, E. v. & Grashorn, S. Seamless cross-scale modeling with SCHISM. *Ocean Modelling* **102**, 64–81 (2016).
4. Bruggeman, J. & Bolding, K. A general framework for aquatic biogeochemical models. *Environmental Modelling and Software* **61**, 249–265 (2014).
5. Danilov, S. *et al.* Finite-Element Sea Ice Model (FESIM), version 2. *Geoscientific Model Development* **8**, 1747–1761 (2015).
6. Gelaro, R. *et al.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate* **30**, 5419–5454 (2017).
7. Taguchi, E., Stammer, D. & Zahel, W. Inferring deep ocean tidal energy dissipation from the global high-resolution data-assimilative HAMTIDE model. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **119**, 4573–4592 (2014).
8. Levitus, S. *et al.* *World Ocean Atlas 2013 (NCEI Accession 0114815)*. NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset (2015) doi:<https://doi.org/10.7289/v5f769gt>.
9. Yool, A. & Fasham, M. J. R. An examination of the “continental shelf pump” in an open ocean general circulation model. *Global Biogeochemical Cycles* **15**, 831–844 (2001).
10. Muilwijk, M., Smedsrud, L. H., Ilicak, M. & Drange, H. Atlantic Water Heat Transport Variability in the 20th Century Arctic Ocean From a Global Ocean Model and Observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **123**, 8159–8179 (2018).
11. Daewel, U. & Schrum, C. Simulating long-term dynamics of the coupled North Sea and Baltic Sea ecosystem with ECOSMO II: Model description and validation. *Journal of Marine Systems* **119–120**, 30–49 (2013).
12. Benkort, D., Daewel, U., Heath, M. & Schrum, C. On the Role of Biogeochemical Coupling Between Sympagic and Pelagic Ecosystem Compartments for Primary and Secondary Production in the Barents Sea. *Frontiers in Environmental Science* vol. 8 217 Preprint at <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.548013> (2020).
13. Leu, E., Søreide, J. E., Hessen, D. O., Falk-Petersen, S. & Berge, J. Consequences of changing sea-ice cover for primary and secondary producers in the European Arctic shelf seas: Timing, quantity, and quality. *Progress in Oceanography* **90**, 18–32 (2011).
14. Arrigo, K. R., van Dijken, G. & Pabi, S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophysical Research Letters* **35**, L19603 (2008).
15. Gullestad, P., Sundby, S. & Kjesbu, O. S. Management of transboundary and straddling fish stocks in the Northeast Atlantic in view of climate-induced shifts in spatial distribution. *Fish and Fisheries* 1–19 (2020) doi:10.1111/faf.12485.
16. Bleck, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling* **4**, 55–88 (2002).
17. Huse, G. Spatially explicit estimates of length and biomass of *Micromesistius poutassou* (Blue Whiting) and *Clupea harengus* (Norwegian spring spawning herring) from acoustic and trawl surveys in the North-East Atlantic (2004-2012). *Supplement to: Huse, Geir; MacKenzie, Brian R; Trenkel, Verena M; Doray, Mathieu; Nøttestad, Leif; Oskarsson, Guomundur J (2015): Spatially explicit estimates of stock sizes, structure and biomass of herring and blue whiting, and catch data of bluefin tun* Preprint at <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.831204> (2014).
18. Heath, M. R., Speirs, D. C., Thurlbeck, I. & Wilson, R. J. StrathE2E2: An R package for modelling the dynamics of marine food webs and fisheries. *Methods in Ecology and Evolution* **12**, 280–287 (2021).
19. Heath, M. R. *et al.* Ecosystem approach to harvesting in the Arctic: Walking the tightrope between exploitation and conservation in the Barents Sea. *Ambio* **51**, 456–470 (2022).
20. Deal, C. *et al.* Large-scale modeling of primary production and ice algal biomass within arctic sea ice in 1992. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **116**, (2011).
21. Terhaar, J., Lauerwald, R., Regnier, P., Gruber, N. & Bopp, L. Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion. *Nature Communications* **12**, 1–10 (2021).
22. Laverick, J. H., Speirs, D. C. & Heath, M. R. Synthetic shelf sediment maps for the Greenland Sea and Barents Sea. *Geoscience Data Journal* 1–11 (2022) doi:10.1002/gdj3.154.
23. Frey, K. E., Comiso, J. C., Cooper, L. W., Grebmeier, J. M. & Stock, L. v. Arctic Ocean Primary Productivity: The Response of Marine Algae to Climate Warming and Sea Ice Decline. *Arctic Report Card 2018* 2–7 (2018).
24. Dierssen, H. M. Perspectives on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate. *Proc Natl Acad Sci U S A* **107**, 17073–17078 (2010).
25. Asbjørnsen, H., Årthun, M., Skagseth, Ø. & Eldevik, T. Mechanisms Underlying Recent Arctic Atlantification. *Geophysical Research Letters* **47**, (2020).
26. Eriksen, E., Skjoldal, H. R., Gjøsæter, H. & Primicerio, R. Spatial and temporal changes in the Barents Sea pelagic compartment during the recent warming. *Progress in Oceanography* **151**, 206–226 (2017).
27. Yool, A., Popova, E. E. & Coward, A. C. Future change in ocean productivity : Is the Arctic the new Atlantic? *Journal of Geophysical Research Oceans* **120**, 7771–7790 (2015).
28. Jones, C. D. *et al.* The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* **4**, 543–570 (2011).