



**Changing
Arctic
Ocean**

NERC



Abschlussbericht

Understanding the links between pelagic microbial ecosystems and organic matter cycling in the changing Arctic (microARC)

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3
24148 Kiel

Förderkennzeichen: 03F0802A

Laufzeit: 01.07.2018 - 31.12.2021

Koordinatorin: Prof. Dr. Anja Engel

Autoren: Prof. Dr. Anja Engel, Dr. Markus Schartau

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung / Vorhabenbeschreibung

microARC untersuchte die kurzfristigen (z.B. saisonalen) und langfristigen (z.B. klimabedingten) Auswirkungen der Veränderungen der physikalischen Umwelt des Arktischen Ozeans auf pelagische mikrobielle Ökosysteme, anhand von neuen Daten und in Verbindung mit vorhandenen Zeitserien-daten. Ökologische und biogeochemische Beobachtungsdaten, insbesondere Messungen aus der Framstraße, sollten in ein größenbasiertes Planktonökosystemmodell assimiliert werden, um massenkonsistente Abschätzungen von Kohlenstoff- und Stickstoffflüssen zu erhalten. Eine solche Daten-Modellsynthese sollte die Basis liefern für ein verbessertes Verständnis darüber wie sich saisonale und klimagetriebene Änderungen, am nordatlantischen Eingang zur Arktis, auf das pelagische mikrobielle Ökosystem auswirken.

I.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Das Projekt wurde über die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit (WTZ) mit Großbritannien im Rahmen der Ausschreibung ‚Der Arktische Ozean im Wandel - Auswirkungen auf Meeresbiologie und Biogeochemie‘ und in Zusammenarbeit mit dem NERC Programm Changing Arctic Ocean (CAO) gefördert. Das Projekt knüpfte an die Vorarbeiten und wissenschaftlichen Erkenntnisse der seit 2009 bestehenden AWI-GEOMAR Kooperation Plankton Ecology in a Changing Arctic Ocean (PEBCAO) an. Für die Erhebung der Proben im Arktischen Ozean konnte Schiffzeit auf 10 Expeditionen in den Jahren 2019-2021 genutzt werden (**Abbildung 1**).

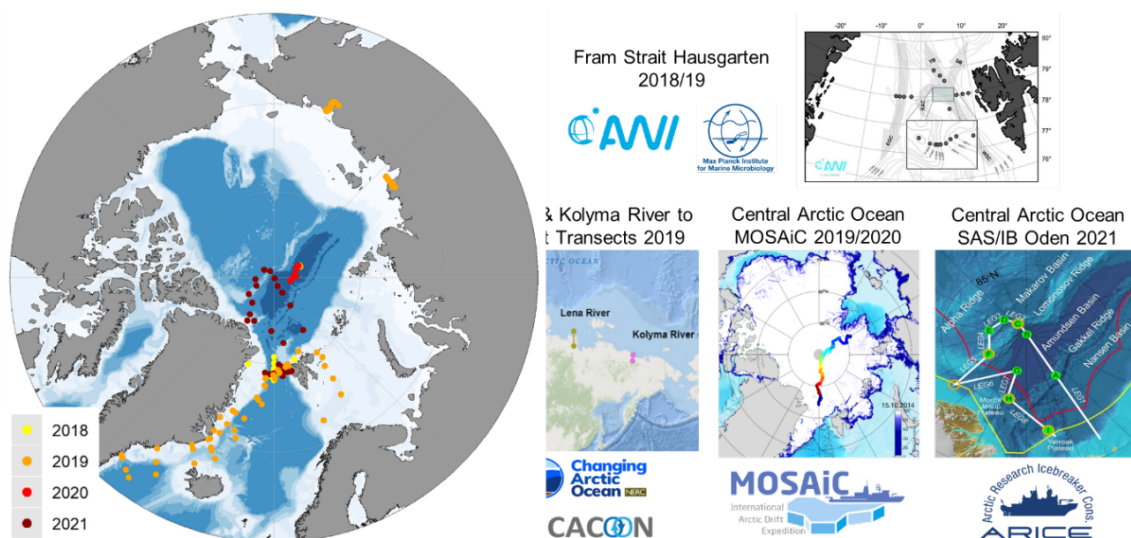


Abbildung 1: Stationen und Fahrten mit microARC Beteiligung.

Leider fiel ein Teil der Projektzeit in die Covid-19 Pandemie. Die Pandemie-bedingten Einschränkungen führten zu Verzögerungen im Projekttablauf.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt umfasste fünf Arbeitspakete:

- WP1** Struktur und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaft (Leitung: MBA)
- WP2** Planktonveränderungen in der Größen-/Biomasseverteilung (Leitung: AWI)
- WP3** Qualität und Quantität der organischen Substanz (Leitung: GEOMAR)
- WP4** Modellentwicklung und Daten-Modellsynthese (Leitung: Universität Southampton)
- WP5** Modellierung organischer Stoffflüsse (Leitung: GEOMAR)

Für die Teilprojekte **WP3 und WP5** war eine enge Kooperation mit den Teilprojekten **WP1** (Michael Cunliffe, MBA, UK), **WP2** (Eva-Maria Nöthig, AWI Bremerhaven), und **WP4** (Ben Ward, Southampton, UK) vorgesehen. Insbesondere die mikroskopischen Messungen der Proben aus der Framstraße durch **WP2** und deren Aufbereitung (**WP5**) sollten in die Modellierung einfließen. Die Modellentwicklung sollte innerhalb **WP4** geschehen, während **WP5** überwiegend Parameteroptimierungen durchführen sollte sowie die Auswertung der optimierten Modellergebnisse hinsichtlich der Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse innerhalb des mikrobiellen Planktonökosystems. Die Besonderheit der Kooperation zwischen **WP1-WP5** besteht in der Zusammenführung theoretischer Aspekte der Planktonphysiologie (insbesondere Allometrie) und der Planktoninteraktion, unter Verwendung ökologischer und biogeochemischer Daten. Das dynamische Modell sollte dann auch Ergebnisse liefern zu der Planktonentwicklung vor und nach den eigentlichen Beobachtungszeiträumen.

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

In den Polarregionen gibt es starke saisonbedingte Schwankungen der Tageslänge und der Temperatur, die die Primärproduktion der organischen Materie und dessen heterotrophen Abbau bestimmen. Zusätzlich zu den bereits bestehenden Umweltbedingungen erwärmt sich die Arktis rund zwei bis drei Mal schneller als der übrige Teil unseres Planeten. Es ist deshalb von zentraler Bedeutung, zu verstehen, wie die biogeochemischen und mikrobiellen Prozesse ablaufen, um mögliche klimarelevante Auswirkungen einzuordnen. Bereits erste Studien aus der Beaufort See und zentralen Arktis legten nahe, dass heterotrophische Bakterien ihre Abundanz und Aktivität in der euphotischen Zone vom Winter zum Sommer verdoppelten. Die starke saisonale Veränderung des Bakterioplanktons ist auf eine kurze Wachstumsperiode in der Arktis zurückzuführen, die durch Temperatur und der Verfügbarkeit organischer Materie kontrolliert wird. Zur Schließung dieser Wissenslücke waren die Ziele des microARC Projektes, einen Datensatz zur zeitlichen Variabilität des mikrobiellen Stoffumsatzes in der Framstraße, inklusive Beobachtungsdaten der Feldstudien 2018/2019 zu erstellen.

Für die Modellentwicklung konnte auf 3D-Simulationsergebnisse des norwegischen SINMOD Modells für die Arktis zurückgegriffen werden. Die biogeochemischen Beobachtungsdaten aus der Framstraße konnten über das World Data Center PANGEA bezogen werden. Die von **WP2** erhaltenen Messdaten beziehen sich auf Proben von den Ausfahrten PS99.1, PS107, PS114 (FS Polarstern) und MSM77 (FS Merian). Verwendet wurden Satellitendaten der Oberflächentemperatur und Konzentration von Chlorophyll-a, die von NOAA Coast Watch/Ocean Watch (USA) für wissenschaftliche Zwecke bereitgestellt werden. Modellgleichungen und die Methode zur Herleitung kontinuierlicher Planktonspektren knüpfen an publizierten Vorarbeiten von Ben Ward und Markus Schartau an.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde als Verbundprojektes microARC und in enger Kooperation mit den Forschungspartner am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polarforschung (AWI), der Marine Biological Association (MBA), und der University of Southampton durchgeführt sowie in Kollaboration mit weiteren CAO Projekten. microARC war ein von MOSAiC unterstütztes Projekt, und hauptsächlich mit der Arbeitsgruppe Ökosysteme verbunden. Das Projekt konnte an der II. Etappe von MOSAiC teilnehmen. Während des Projekts wurden zusammen mit Friederike Prowe (*GEOMAR*), Bei Su (*Institute of Marine Science and Technology, Qingdao, China*) und Jens Nejstgaard (*IGB, Stechlin*) begleitende Modellstudien durchgeführt zum arktischen mikrobiellen Nahrungsnetz. In Zusammenarbeit mit Fabian Grosse aus der Arbeitsgruppe von Niel Banas (*University of Strathclyde, Glasgow, UK*) konnten (Lagrangesche) Trajektorien aus der Arktis und aus dem Nordatlantik aus einem norwegischen 3D-Zirkulationsmodell extrahiert werden.



**Changing
Arctic
Ocean**

NERC



Abschlussbericht

microARC - WP3 und WP4/WP5
Understanding the links between
pelagic microbial ecosystems and
organic matter cycling in the changing Arctic

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3
24148 Kiel
Förderkennzeichen: 03F0802A
Laufzeit: 01.07.2018 - 31.12.2021
Kordinatorin: Prof. Dr. Anja Engel
Leitende Wissenschaftler: Prof. Dr. Anja Engel, Dr. Markus Schartau

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

II. Eingehende Darstellungen WP3 und WP4/WP5

II.a Verwendung der Zuwendung - WP3 Qualität und Quantität der organischen Substanz

II.a.1 Expeditionen

Mit der Zuwendung für microArc konnten neue Beobachtungsdaten zu den mikrobiellen Gemeinschaften und zu Verteilung und Umsatz der organischen Materie in der Wassersäule des arktischen Ozeans im Rahmen folgender Expeditionen erhoben werden:

- Expedition 1: 07/18-08/18, FS POLARSTERN (PS114) in der Fram Straße. 2 Plätze zugeteilt an AG Engel
- Expedition 2: 09/18-10/18 FS MARIA S. MERIAN (MSM77) in der Fram Straße. 2 Plätze zugeteilt an AG Engel
- Expedition 3: 07/19-08/19 FS MARIA S. MERIAN (MSM85) in der Fram Straße. 1 Platz zugeteilt an AG Engel
- Expedition 4: 08/18-09/19, FS POLARSTERN (PS121) in der Fram Straße. 2 Plätze zugeteilt an AG Engel
- Expedition 5: 12/19-3/21 FS POLARSTERN (PS122/2) in der zentralen Arktis. 1 Platz zugeteilt an AG Engel

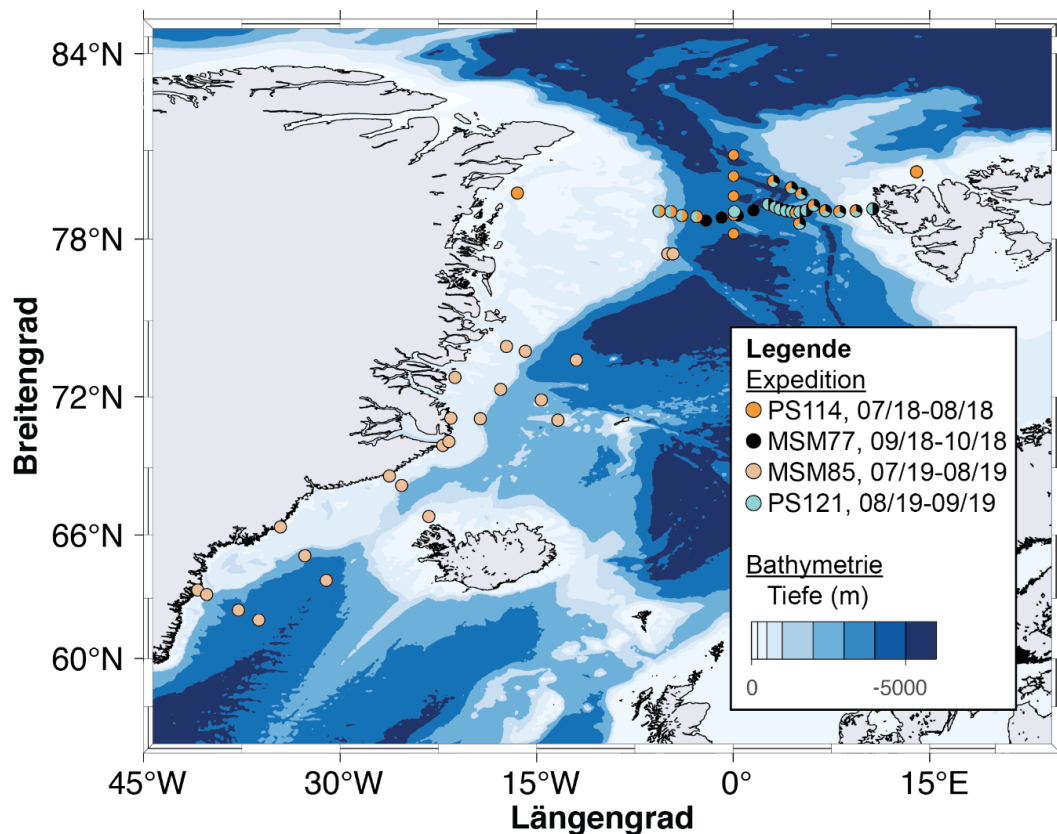


Abbildung 1: Karte der Expedition 2018/2019 in der Fram Straße und Ostgrönlandstrom im Rahmen des MicroARC Projektes. MOSAiC-leg 2 (PS122-2) nicht gezeigt.

II.a.2 Detaillierte Ergebnisse

WP3 hat neue Erkenntnisse für ein besseres Verständnis des mikrobiellen Umsatzes der wichtigsten organischen Elementpools (C, N) im Arktischen Ozean gewonnen. Mit der Sachmittelförderung und der Förderung für technisches und wissenschaftliches Personal konnten umfangreiche chemische und biologische Studien realisiert werden. Folgende, im Arbeitsplan definierte, Aufgaben wurden erfüllt:

Bestimmung der Konzentration und Stöchiometrie von DOM und POM (mit WP2-AWI)

Anhand von Zeitseriendaten (2009-2017) wurden zwischenjährliche Veränderungen in den Konzentrationen von partikulärem und gelöstem organischem Kohlenstoff (POC, DOC) zusammen mit biologischen Faktoren wie der Abundanz von Phyto- und Bakterioplankton in der Framstraße, dem atlantischen Tor zum zentralen Arktischen Ozean, bestimmt. Die Daten wurden jeweils im Sommer während acht Expeditionen am Langzeit-Ökoforschungsobservatorium HAUSGARTEN erhoben (**Abbildung 1**). Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass das dynamische physikalische System der Framstraße zu einer starken Heterogenität des Ökosystems führt, das sowohl innerhalb der Jahreszeiten als auch zwischen den Jahren erhebliche Schwankungen aufweist. Während des Beobachtungszeitraums waren die DOC-Konzentrationen signifikant negativ mit der Temperatur und dem Salzgehalt verknüpft, was darauf hindeutet, dass der Abfluss von zentralarktischem Wasser mit einer hohen DOC-Belastung die Hauptsteuerung der DOC-Konzentration in dieser Region ist. Die POC-Konzentration hing nicht mit der Temperatur oder dem Salzgehalt zusammen, sondern war eng mit der Phytoplankton-Biomasse verbunden, die anhand der Chlorophyll-*a*-Konzentration (Chl-*a*) geschätzt wurde. Für die Jahre 2009-2017 (**Abbildung 2**) wurden keine zeitlichen Trends bei den tiefenintegrierten (0-100 m) DOC- und Chl-*a*-Mengen beobachtet. Im Gegensatz dazu nahmen die tiefenintegrierten (0-100 m) Mengen an POC sowie das Verhältnis [POC]:[TOC] im Laufe der Zeit deutlich ab. Dies deutet auf eine stärkere Verteilung des organischen Kohlenstoffs in die gelöste Phase hin.

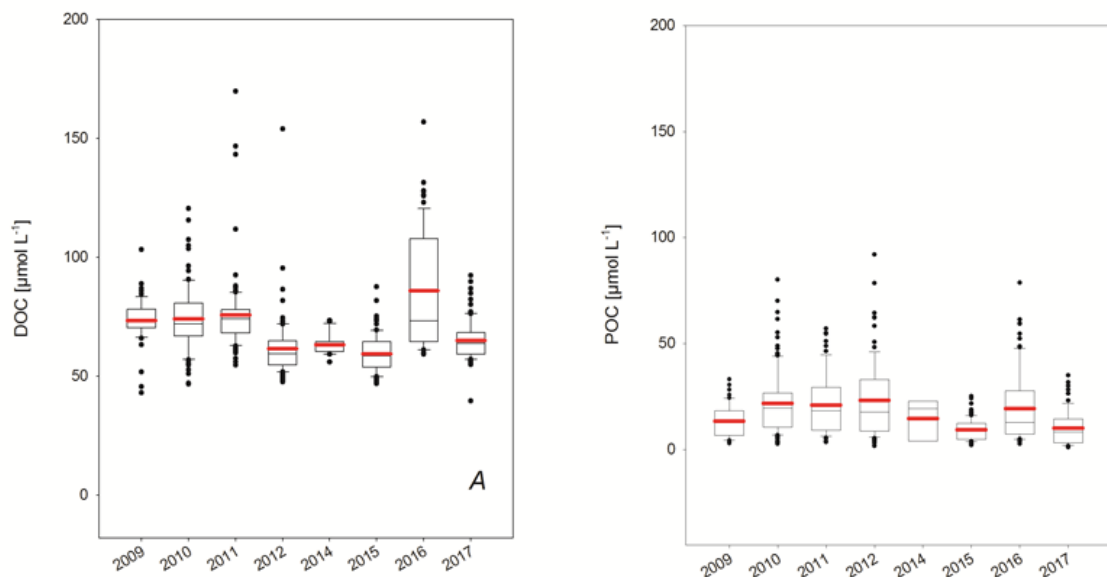


Abbildung 2: Variabilität der DOC und POC Konzentration in der oberen Wassersäule (100 m) der Framstraße (aus Engel et al., 2019).

Saisonale Schwankungen der DOC Konzentration der Wassersäule wurden im Sommer und Herbst 2018 untersucht. Unsere Daten zeigen, dass die tiefenintegrierte DOC-Konzentration im Sommer von 6029 bis 8171 mmol m⁻² (nst = 11) und im Herbst von 5953 bis 8103 mmol m⁻² reicht (nst = 22) und keine signifikanten saisonalen Unterschiede zeigt (Mann-Whitney-Test, $p = 0.8$).

Bestimmung von Marinen Gel-Partikel (TEP, CSP).

Die Konzentration von marinen Gel-Partikel im Epipelagial der Framstrasse unterliegt starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen. So wurden Variationen der TEP Konzentration von 5-517 $\mu\text{g Xeq. L}^{-1}$, äquivalent zu 0.25-26 $\mu\text{mol TEP-C L}^{-1}$ gefunden (Engel et al., 2017). Eine mögliche Erklärung ist ein hoher heterotropher Bedarf an labiler organischer Substanz in Regionen wie der Arktis, in denen die Primärproduktion vorübergehend durch die Sonneneinstrahlung eingeschränkt ist. microArc konnte erstmals die saisonale Variabilität von marinen Gelen im Arktischen Ozean bestimmen (Jackowski et al., 2021). In 2018 reichte die Abundanz der TEP von 365 bis 1936 $\times 10^6 \text{ m}^{-2}$ im Sommer (nst = 11) und von 220 bis 1398 $\times 10^6 \text{ m}^{-2}$ im Herbst (nst = 18). Die Gesamtfläche der TEP reichte von 45 bis 295 $\times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ im Sommer (nst = 11) und von 4 bis 12 $\times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ im Herbst (nst = 19). Die Menge von TEP (Gesamtpartikelfläche) unterschied sich signifikant zwischen Sommer und Herbst (Mann-Whitney-Test; $p < 0,0001$) mit den stärksten Unterschieden an der Oberfläche bis unterhalb des Tiefen-Chlorophyll-Maximums (DCM) (ANOVA $F_{4,118} = 16,0$, $p < 0,0001$; MCT $p < 0,0001$). Die Kohlenstoffkonzentration im TEP (TEP-C) reichte von 82 bis 255 mmol m⁻² im Sommer (nst = 11) und 19 bis 115 mmol m⁻² im Herbst (nst = 19). Der TEP-C-Anteil am DOC-Pool betrug im Sommer $2.1 \pm 0.9 \%$ DOC (nst = 11) und im Herbst $0.7 \pm 0.3 \%$ DOC (nst = 19). Die Abundanz der CSP reichte von 672 bis 1801 $\times 10^6 \text{ m}^{-2}$ im Sommer (nst = 11) und von 284 bis 2344 $\times 10^6 \text{ m}^{-2}$ im Herbst (nst = 19). Die Gesamtfläche der CSP reichte von 63 bis 377 $\times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ im Sommer (nst = 11) und von 3 bis 25 $\times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-2}$ im Herbst (nst = 19). Das Verhältnis [TEP]:[CSP] (Fläche:Fläche) betrug im Sommer 1:1.6 und im Herbst 1:3.0, was die relative Zunahme der CSP im Herbst widerspiegelt. Auch in der zentralen Arktis zeigt der saisonale Vergleich der TEP Konzentration einen deutlichen Rückgang der TEP Konzentrationen in der oberen Wassersäule der zentralen Arktis vom Sommer zum Winter (**Abbildung 3**). Variierten die TEP Konzentrationen nördlich von 86°N im Sommer 2012 zwischen 11.9-87.3 $\mu\text{g Xeq. L}^{-1}$, so wurden im Winter 2019 Werte zwischen 7.0-33.2 $\mu\text{g Xeq. L}^{-1}$ gemessen (Daten unveröffentlicht). Der starke Verlust von TEP von Sommer über Herbst bis zum Winter deutet darauf hin, dass Gelpartikel unterschiedliche zeitliche Funktionen für das mikrobielle Nahrungsnetz haben könnten. Zukünftige Untersuchungen der Zusammensetzung von Gelpartikeln und der damit verbundenen Zusammensetzung der Gemeinschaft könnten klären, ob die beiden Partikeltypen zu verschiedenen Jahreszeiten unterschiedliche Mikro-Nischen für an Partikel gebundene Bakterien bieten.

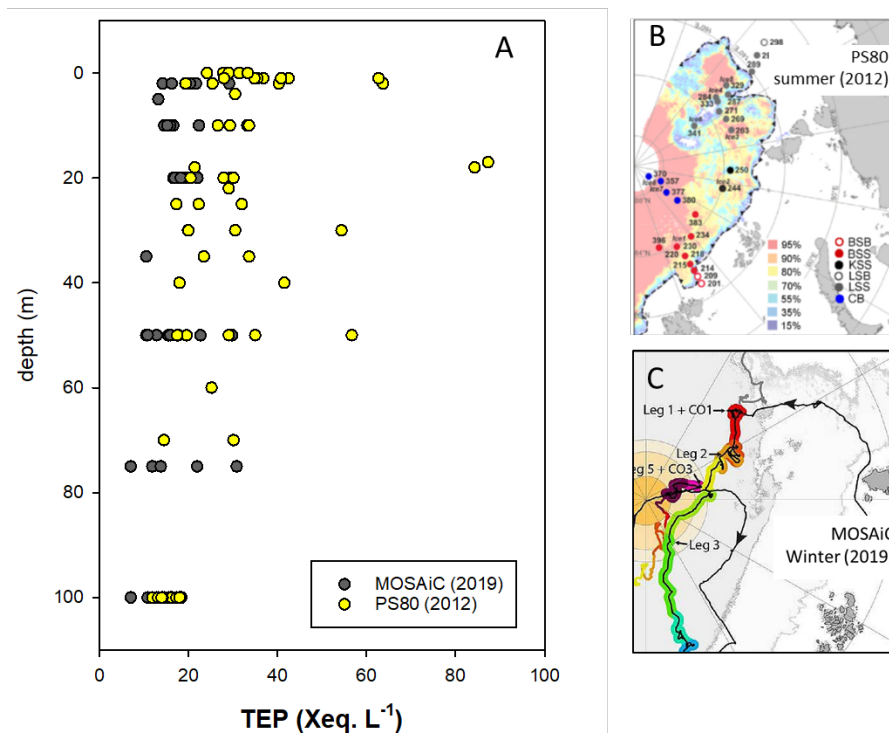


Abbildung 3: Saisonale Variabilität der TEP Konzentration in der oberen Wassersäule (100 m) der zentralen Arktis. A) Vergleich Sommer (Daten PS80) und Winter (MOSAiC, leg 2 PS122_2) (Engel et al., unveröffentlichte Daten), B) Karte der Probennahme-Stationen während PS80 (aus Piontek et al. 2021), C) Karte der MOSAiC Driften, mit dem Winter-Abschnitt Leg 2 (MOSAiC Team Ice; M. Nicolaus; modifiziert).

Bestimmung der Zusammensetzung organischer Materie

Ziel unserer Studie war es, die Quantität und Qualität einzelner Biomoleküle, insbesondere Polysaccharide (CHO) und Aminosäuren (AA) und deren Kohlenstoffanteile in den verschiedenen Pools organischer Materie in der Arktis zu bestimmen (**Abbildung 4**). Polare und atlantische Gewässer in der Framstraße wiesen dabei ähnliche Konzentrationen an partikulärem und gelöstem AA und CHO auf, obwohl die höchsten DOC-Konzentrationen in polaren Gewässern gemessen wurde (Grosse et al., 2021). Dort, wo sich die beiden Wassermassen miteinander und mit dem schmelzenden Meereis vermischen, waren die Konzentrationen von partikulären und gelösten AA und CHO am höchsten. Die Zusammensetzung von AA und CHO unterschied sich erheblich zwischen den partikulären und den gelösten Fraktionen. Die partikuläre Fraktion war angereichert mit essentiellen AA und die CHO mit Galaktose, Xylose/Mannose und Muraminsäure. In der gelösten Fraktion waren nicht-essentielle AA, mehrere neutrale CHO sowie saure und Amino-CHO angereichert. Die Biomolekülzusammensetzung der 0,2 - 0,7 μm großen Fraktion wies einen höheren Anteil an nicht-essentiellen AA sowie sauren und Amino-CHO auf, was sie von den 0,7 - 10 μm und >10 μm großen Fraktionen unterschied, die die gleiche Zusammensetzung aufwiesen. Die beobachteten Verschiebungen in der AA- und CHO-Zusammensetzung könnten den Stand der Verarbeitung organischer Stoffe anzeigen und helfen den Beitrag von autotrophem Phytoplankton oder heterotropher Biomasse zu bewerten. Die AA- und CHO-Signaturen könnten somit als Tracer verwendet werden, um Rückschlüsse auf Veränderungen in mikrobiellen Kreislaufprozessen und Nahrungsnetzinteraktionen zu ziehen.

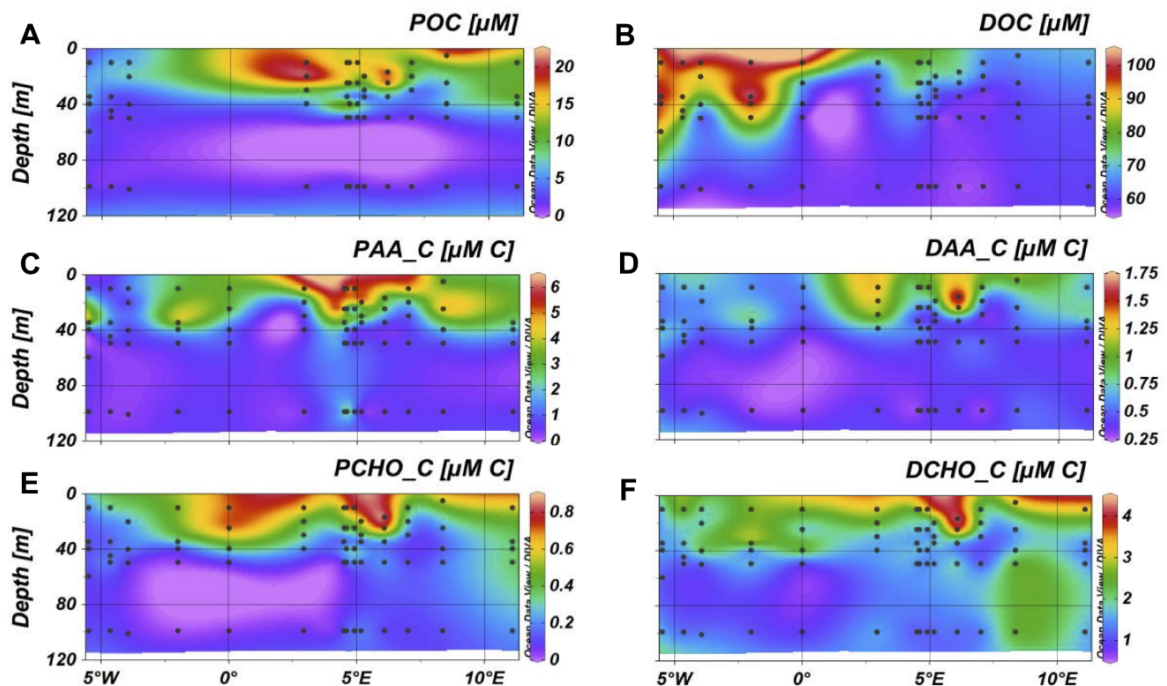


Abbildung 4: Verteilung von partikulärem und gelöstem organischem Kohlenstoff in der Framstraße (A, B) und Beitrag von Aminosäuren (C, E) und Kohlenhydraten (D, F) zum Kohlenstoffgehalt dieser Fraktionen; aus Grosse et al. (2021).

Bestimmung der Raten der mikrobiellen Produktion von organischer Materie

Produktionsraten in Meerwasserproben wurden in Inkubationsexperimenten mit radioaktiv-markierten Substraten bestimmt. Die Primärproduktion von POC und DOC wurden mittels ^{14}C -Messungen nach Steemann Nielsen gemessen, die bakterielle Produktion mit ^3H -Leucin. Saisonale Unterschiede in mikrobiellen Aktivitäten und ihrer Treiber wurden im Rahmen des microArc Projektes auch während der Sommer und Herbst-Ausfahrten in 2018 bestimmt (von Jackowski et al., 2020, 2022; **Abbildung 5**). Von Sommer bis Herbst nahm die Primärproduktion (PP) in der Fraktion des gelösten organischen Kohlenstoffs (PP-DOC) um mehr als das Zweifache ab, in der partikulären Fraktion (PP-POC) um das Dreifache (Wilcoxon Rank Sum Test $p < 0.05$). PP-DOC sank von $1.74 \pm 0.86 \mu\text{mol C L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ im Sommer ($n = 8$) auf $0.62 \pm 0.69 \mu\text{mol C L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ im Herbst ($n = 10$). Der PP-POC ging von $1.42 \pm 1.68 \mu\text{mol C L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ im Sommer ($n = 8$) auf $0.29 \pm 0.39 \mu\text{mol C L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ im Herbst ($n = 10$) zurück. Gleichzeitig nahmen die Zellhäufigkeiten von Cryptophyten und Picoeukaryoten zwischen Sommer und Herbst signifikant ab (Wilcoxon Rank Sum Test $p < 0,00$). Die Cryptophytenhäufigkeit ging von $0.7 \pm 0.4 \text{ Zellen L}^{-1}$ im Sommer ($n = 32$) auf $0.2 \pm 0.2 \text{ Zellen L}^{-1}$ im Herbst ($n = 32$) zurück, wobei die Häufigkeit im tiefen Chlorophyll-a Maximum (deep chlorophyll maximum, DCM) und in 100 m insgesamt deutlich geringer war (ANOVA Saison:Tiefe $p < 0.05$, Multiple Contrast Test $p < 0.05$ bzw. $p < 0.01$). In ähnlicher Weise sank die Abundanz von Picoeukaryoten von $4.5 \pm 3.8 \times 10^6 \text{ Zellen L}^{-1}$ im Sommer ($n = 32$) auf $2.3 \pm 3.9 \times 10^6 \text{ Zellen L}^{-1}$ im Herbst ($n = 32$). Die Umrechnung der Picoeukaryotenhäufigkeit in Kohlenstoff unter Annahme eines Kohlenstoff-Biomasse-Umwandlungsfaktors von 530 fg C L^{-1} (Worden et al., 2004) zeigte, dass Picoeukaryoten im Sommer ($n = 32$) $2.4 \pm 2.0 \mu\text{g C L}^{-1}$ oder 1.1 % POC zum Kohlenstoffpool beitrugen und im Herbst ($n = 32$) $1.2 \pm 2.1 \mu\text{g C L}^{-1}$ oder 1.3 % POC.

Die Abundanz der Nanoeukaryoten zeigte die geringsten saisonalen Veränderungen und nahm von $5.1 \pm 4.1 \times 10^6$ Zellen L^{-1} im Sommer ($n = 32$) auf $4.9 \pm 5.2 \times 10^6$ Zellen L^{-1} im Herbst ($n = 32$) ab. Es ist wahrscheinlich, dass der Rückgang der PP-DOC-Fraktion auf die abnehmende Zahl der Cryptophyten-, Pico- und Nanoeukaryontenzellen zurückzuführen ist. Insbesondere Picoeukaryoten könnten weniger von Temperatur und Salzgehalt beeinflusst werden, als vielmehr von der jahreszeitlichen Lichtintensität und -dauer im West-Spitzbergenstrom (WSC) (Paulsen et al., 2016). Alles in allem untermauern unsere Daten den beobachteten Rückgang des relativen Biovolumens vom Sommer zum Herbst in der östlichen Framstraße (Lampe et al., 2021).

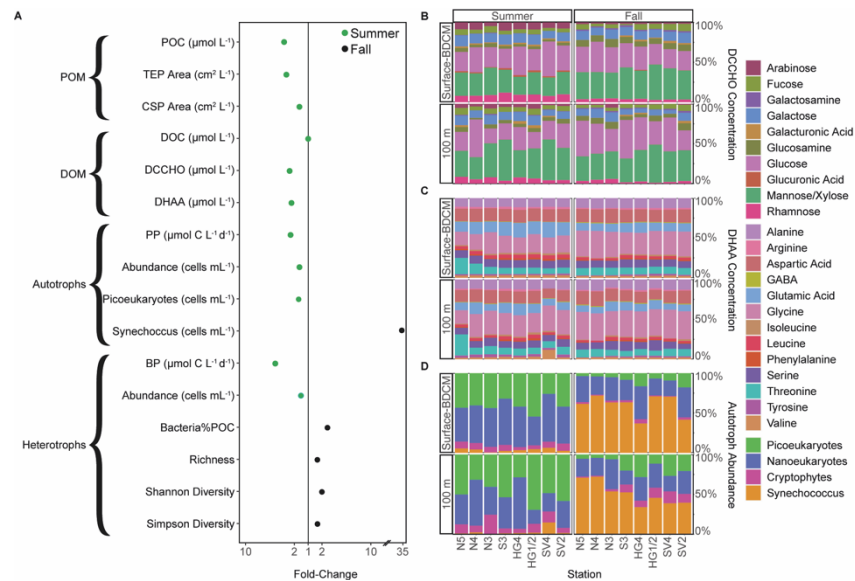


Abbildung 5. Anreicherung, relative Zusammensetzung und Abundanz im Sommer und Herbst in der Framstraße. A Anreicherung (fache Veränderung) zwischen Sommer und Herbst bei biogeochemischen und ökologischen Parametern. Die fache Änderung wurde bestimmt, indem der höhere durch den niedrigeren Mittelwert im Sommer oder Herbst geteilt wurde. B Relative Konzentrationen von gelösten kombinierten Kohlenhydraten (DCCHO), gemessen durch Hochleistungs-Anionenaustausch-Chromatographie mit gepulster amperometrischer Detektion. C Relative Konzentrationen gelöster hydrolysierbarer Aminosäuren (DHAA), gemessen durch ortho-Phthaldialdehyd-Derivatisierung mit Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie. D Relative Häufigkeit von Autotrophen, gemessen durch Durchflusszytometrie. B, C, D Relative Häufigkeit und Konzentrationen von der Oberfläche bis zur BDCM wurden gemittelt, da es keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Tiefen gab (siehe Text). Abkürzungen: BDCM, unterhalb des tiefen Chlorophyllmaximums; DOC, gelöster organischer Kohlenstoff; SLDOC, semilabiler DOC; POC, partikulärer organischer Kohlenstoff; TEP Fläche, Fläche der transparenten Exopolymerpartikel; CSP Fläche, Fläche der Coomassie Stainable blue Partikel, PP; Primärproduktion; BP, heterotrophe bakterielle Produktion. Daten für gelöste Parameter und Gelpartikeldaten aus entsprechenden Proben; aus von Jackowski et al. (2020).

Die bakterielle Abundanz reichte von 3 bis 22×10^5 Zellen mL^{-1} im Sommer ($n = 53$) und von 2 bis 15×10^5 Zellen mL^{-1} im Herbst ($n = 110$, **Abbildung 6**). Die Bakterienhäufigkeit unterschied sich signifikant zwischen Atlantikwasser (AW) und Zwischenwasser (IW), aber nicht zwischen Sommer und Herbst, was zeigt, dass sich die Bakterien in den beiden Wassermassen unterschiedlich verhalten (ANOVA $F_{1,136} = 10,6$; $p < 0,001$). Die Bakterienhäufigkeit in AW nahm von $10,34 \pm 4,32 \times 10^5$ Zellen mL^{-1} im Sommer ($n = 41$) auf $6,02 \pm 2,53 \times 10^5$ Zellen mL^{-1} im Herbst ($n = 59$) ab, verglichen mit IW, wo sie von $5,97 \pm 2,40 \times 10^5$ Zellen mL^{-1} im Sommer ($n = 11$) auf $6,87 \pm 2,73 \times 10^5$ Zellen mL^{-1} im Herbst ($n = 51$) relativ gleich blieb.

Dennoch deuten die signifikanten Korrelationen mit Chlorophyll-a ($r^2 = 0,47$, $p < 0,001$) und semilabilem DOC ($r^2 = 0,48$, $p < 0,001$) darauf hin, dass der semilabile DOC-Pool die Bakterienhäufigkeiten in allen Wassermassen kontrolliert. Darüber hinaus haben wir zwischen Low-Nucleid-Acid (LNA) und High-Nucleid-Acid (HNA) Bakterien unterschieden. Die Abundanz von LNA reichte von 1 bis 9×10^5 Zellen ml^{-1} im Sommer ($n=53$) und 1 bis 8×10^5 Zellen ml^{-1} im Herbst ($n = 110$). Die Häufigkeit von HNA reichte von 2 bis 13×10^5 Zellen ml^{-1} im Sommer ($n = 53$) und 1 bis 9×10^5 Zellen ml^{-1} im Herbst ($n = 110$). Daher nahm der Anteil der HNA vom Sommer zum Herbst ab. Das Verhältnis von [HNA]:[LNA] (Abundanz : Abundanz) betrug 1,6:1 im Sommer ($n = 53$) und 1,1:1 im Herbst ($n = 110$).

Die Bakterielle Produktion (BP) wurde für alle Proben bei 4°C gemessen und lag zwischen 15 und 75 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ im Sommer ($nst = 11$) und von 3 bis 15 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ im Herbst ($nst = 22$) (**Abbildung 6**). Die BP war im Sommer also mehr als viermal so hoch wie im Herbst und veränderte sich in allen Tiefen signifikant. Auch hier deutet die signifikante Korrelation zu Chlorophyll-a sowie zu labilen Komponenten darauf hin, dass die Labilität für den signifikanten Unterschied im BP zwischen Sommer und Herbst verantwortlich war. Der in den BP aufgenommene Kohlenstoff betrug 0.80 ± 0.37 % SL-DOC d^{-1} im Sommer ($n = 11$) und 0.45 ± 0.27 % SL-DOC d^{-1} im Herbst ($n=22$).

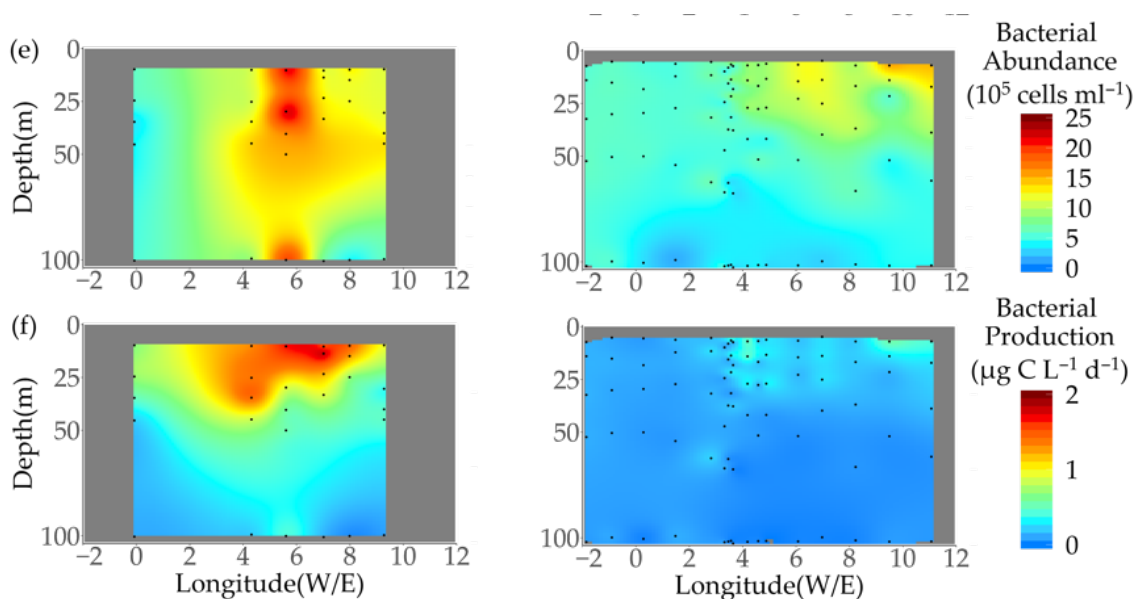


Abbildung 6: Räumliche Variabilität entlang des Breitengrades von etwa 79°N in der Framstraße im Sommer (links) und Herbst (rechts) des Jahres 2018. Zu den dargestellten Parametern gehören (e) bakterielle Abundanz und (f) bakterielle Produktion (BP). Für den grau schattierten Bereich liegen keine Daten vor. Aus Von Jackowski et al. (2020).

Referenzen:

- Engel, A., Piontek, J., Metfies, K., Endres, S., Sprong, P., Peeken, I., Gäbler-Schwarz, S. und Nöthig, E. M. (2017) Inter-annual variability of transparent exopolymer particles in the Arctic Ocean reveals high sensitivity to ecosystem changes. *Scientific Reports*, 7 (1). Art.Nr. 4129. DOI 10.1038/s41598-017-04106-9.
- Engel, A., Bracher, A., Dinter, A., Endres, A., Grosse, J., Metfies, K., Peeken, I., Piontek, J., Salter, I, Nöthig, E.-M. (2019) Inter-Annual Variability of Organic Carbon Concentration in the Eastern Fram Strait During Summer (2009-2017) *Front. in Mar. Sci*, 6 . Art.Nr. 187. DOI 10.3389/fmars.2019.00187.

- Grosse, J., Nöthig, E.-M., Torres-Valdés, S., Engel, A., (2021) Summertime Amino Acid and Carbohydrate Patterns in Particulate and Dissolved Organic Carbon Across Fram Strait. *Front. Mar. Sci.* 8:684675. doi: 10.3389/fmars.2021.684675
- Lampe, V., Nöthig, E.-M., and Schartau, M. (2021) Spatio-Temporal Variations in Community Size Structure of Arctic Protist Plankton in the Fram Strait. *Front Mar Sci* 7: 1–18.
- Paulsen, M.L., Doré, H., Garczarek, L., Seuthe, L., Müller, O., Sandaa, R.-A., et al. (2016) *Synechococcus* in the Atlantic Gateway to the Arctic Ocean. *Front Mar Sci* 3: 1–14.
- Piontek, J., Galgani, L., Nöthig, E., Peeken, I. and Engel, A. (2021) Organic Matter Composition and Heterotrophic Bacterial Activity at Declining Summer Sea Ice in the Central Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 66 (S1). S343-S362. DOI 10.1002/lno.11639.
- von Jackowski, A., Grosse, J., Nöthig, E. M. and Engel, A. (2020) Dynamics of Organic Matter and Bacterial Activity in the Fram Strait during Summer and Autumn. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378 (2181). Art.Nr. 20190366. DOI 10.1098/rsta.2019.0366.
- Von Jackowski, A., Becker, K.W., Wietz, M., Bienhold, C., Zäncker, B., Nöthig E.-M. and Engel, A. (2022) Variations of Microbial Communities and Substrate Regimes in the Eastern Fram Strait Between Summer and Fall. *Environmental Microbiology*. DOI 10.1111/1462-2920.16036.
- Worden, A.Z., Nolan, J.K., and Palenik, B. (2004) Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: The importance of the eukaryotic component. *Limnol Oceanogr* 49: 168-179.

II.b Verwendung der Zuwendung - WP4/WP5 Modellierung von Größenhäufigkeitsspektren & Synthese der Flüsse organischer Materie

II.b.1 Ursprüngliche Planung der Arbeiten in den Teilprojekten WP4 und WP5

Ziel des Vorhabens war es ökologische und biogeochemische Beobachtungsdaten, insbesondere arktische Messungen aus der Framstraße, in ein größenbasiertes Planktonökosystemmodell zu assimilieren, um massenkonsistente Abschätzungen von Kohlenstoff- und Stickstoffflüssen zu erhalten. Eine solche Daten-Modellsynthese sollte die Basis liefern für ein verbessertes Verständnis darüber wie sich saisonale und klimagetriebene Änderungen, am nordatlantischen Eingang zur Arktis, auf das pelagische mikrobielle Ökosystem auswirken.

Für das Teilprojekt **WP5** war eine enge Kooperation mit den Teilprojekten **WP2** (Eva-Maria Nöthig, AWI Bremerhaven), **WP3** (Anja Engel, GEOMAR Kiel) und **WP4** (Ben Ward, Southampton, UK) vorgesehen. Insbesondere die mikroskopischen Messungen der Proben aus der Framstraße durch **WP2** sollte als essentieller und besonders wertvoller Beitrag aufgefasst werden. Die Analysen und die Aufbereitung der mikroskopischen Messungen sollten unter **WP5** am GEOMAR erfolgen. Die Modellentwicklung sollte innerhalb des Teilprojektes **WP4** geschehen, während **WP5** überwiegend Parameteroptimierungen durchführen sollte sowie die Auswertung der optimierten Modellergebnisse hinsichtlich der Kohlenstoff und Stickstoffflüsse innerhalb des mikrobiellen Planktonökosystems. Die Besonderheit der Kooperation zwischen **WP2**, **WP3**, **WP4** und **WP5** besteht in der Zusammenführung theoretischer Aspekte der Planktonphysiologie (insbesondere Allometrie) und Planktoninteraktion in einem dynamischen Modell, unter Verwendung ökologischer Daten zu zeitlichen und räumlichen Änderungen in der Planktongrößenverteilung und biogeochemischen Beobachtungen. Das Modell sollte insbesondere Ergebnisse liefern zu der Planktonentwicklung vor und nach den eigentlichen Beobachtungszeiträumen.

II.b.2 Entwicklungsarbeiten und erzielte Ergebnisse

II.b.2.1 Größenhäufigkeitsspektren des Planktons in der Framstraße

Mikroskopische Planktonzählungen und Größenmessungen bedarf einer besonderen Erfahrung und Kenntnisse, welche durch die Zuarbeit aus **WP2** sichergestellt wurden. Die Beschreibung der Methode zur Herleitung der kontinuierlicher Planktonspektren aus den gemessenen Proben von der Framstraße sind in Lampe et al., (2021) publiziert worden. Die Auswertung dieser Daten erfordert wiederum aufwendige statistische Methoden, insbesondere um Planktonspektren derart herzuleiten so dass sie Unsicherheiten einbeziehen. Die Berücksichtigung dieser Unsicherheiten ist besonders wichtig für die Bewertung der Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Spektren. Zur Generierung von repräsentativen, kontinuierlichen Planktonspektren wurde ein zweistufiges Resamplingverfahren angewandt (Schartau et al., 2010). **Abbildung 7** veranschaulicht das zweistufige Auswerteverfahren zur Herleitung der Planktonspektren aus den Einzelmessungen. Beim ersten Resampling werden Unsicherheiten bei den Zählungen berücksichtigt, gemäß einer Poisson Wahrscheinlichkeitsverteilung. Bei geringer Abundanz (wenigen Zählungen) seltener Planktongruppen bestehen größere Unsicherheiten als bei hoher Abundanz. Eine geringe

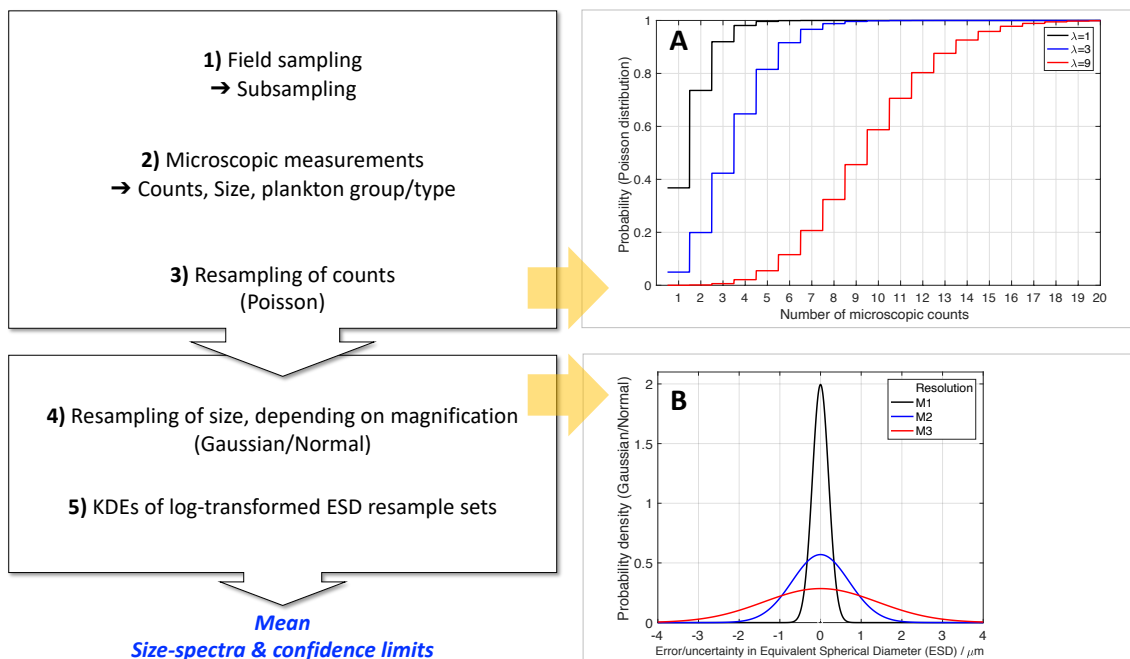


Abbildung 7: Herleitung kontinuierlicher Planktongrößenspektren aus mikroskopischen Planktonzählungen und Größenmessungen. Schritte 1) - 3) umfassen die mikroskopischen Messungen sowie ein Resampling von einer Poisson Wahrscheinlichkeitsverteilung (A), in Abhängigkeit der jeweiligen Zählungen (Counts). Basierend auf dem ersten Resampling erfolgt ein weiteres Resampling, diesmal der Größenmessungen (B) in Schritte 4). In Schritt 5) werden log-transformierte Planktongrößen verwendet, um kontinuierliche Dichteschätzungen (Spektren) herzuleiten. Das zweistufige Resamplingverfahren ermöglicht die Bestimmung durchschnittlicher (gemittelter) Spektren und die zugehörigen Konfidenzintervalle.

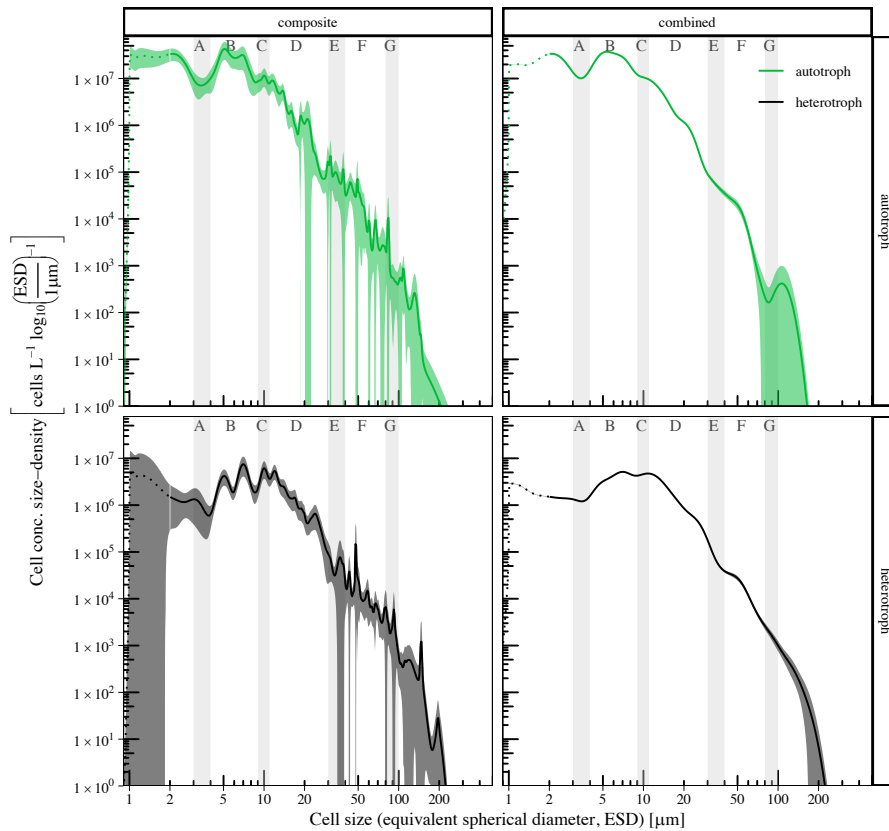


Abbildung 8: Zweierlei Arten von Planktongrößenspektren: a) Composite – Summe einzelner, für jede Planktongruppe explizit aufgelöste Spektren, b) Combined – Spektren bei denen die Größenhäufigkeitsdichten bestimmt wurden anhand der Kombination der einzelnen Planktongruppen.

Abundanz findet man überwiegend bei großen Planktonzellen und somit größere Unsicherheiten im oberen Größenbereich der Spektren. Das zweite Resampling (basierend auf einer Normalverteilung) beachtet die mögliche Präzision bei den Größenmessungen, welche je nach mikroskopischer Vergrößerung variiert. Mit diesem Verfahren wurden zweierlei Arten von Spektren generiert. Detailreiche Spektren konnten gewonnen werden indem man kontinuierliche Größenhäufigkeitsdichten der einzeln identifizierten Planktongruppen auswertet und diese aufsummiert (composite spectra), einschließlich der Aufsummierung der Varianzen (exemplarisch in **Abbildung 8**, linke Seite). Die zweite Art an Spektren (combined) sind kontinuierliche Größenhäufigkeitsdichten bei denen die Messungen der einzelnen Planktongruppen kombiniert wurden (**Abbildung 8**, rechte Seite). Sind weniger detailreich haben dafür aber geringere Unsicherheiten. Besonders beachtenswert sind Stufen und Delen die sowohl in den Spektren des Phytoplanktons als auch jenen des Mikrozooplanktons erkennbar sind.

Die Spektren der kombinierten Größenhäufigkeitsdichten erwiesen sich als ausreichend informativ und konnten sowohl zeitlich als auch räumlich differenziert werden (**Abbildung 9**). So konnten die Spektren entweder einer arktischen oder einer aus dem Nordatlantik stammenden Wassermasse zugeordnet werden, womit sie hinsichtlich ihrer Vorgeschichte zu unterscheiden sind. Auch der Zeitraum der Probenahme, ob Sommer oder Herbst, wurde bei der Unterscheidung der Spektren berücksichtigt. Unter der Annahme, dass die zugrundeliegende Planktodynamik der arktischen und der atlantischen Wassermassen vergleichbar ist, können die Spektren als eine zeitliche Abfolge im saisonalen Wachstumszyklus interpretiert werden (Spektren S1 – S4 in Folge relativ zum Zeitpunkt der maximalen Blüte in

der Framstraße). Die Zeit der maximalen Blüte in der Framstraße wurde anhand von Satellitendaten bestimmt. Zum Zeitpunkt der Probennahme in der Framstraße war die Blüte der polaren Wassermassen bereits vorbei, während eine zweite Blüte mit dem nordwärts strömenden atlantischen Meerwasser die Framstraße erreicht hat. Die Unterschiede bestehen in der Vorgeschichte, die durch die jeweiligen hydrographischen, chemischen Randbedingungen sowie der Lichthistorie bestimmt sind. **Abbildung 9** zeigt eine zeitliche Entwicklung der Größenhäufigkeitszusammensetzung (von S1 zu S4) des Phytoplanktons und des Mikrozooplanktons. Nach der Blüte verringert sich die Abundanz. Beim Phytoplankton verringert sich die Abundanz und das Biovolumen der kleinen Zellen mehr als bei den großen Zellen. Zum Herbst hin überwiegen die großen Phytoplanktonzellen. Die Spektren des Mikrozooplanktons zeigen eine deutliche Reduzierung sowohl der kleinen als auch der großen Zellen. Diese Verschiebungen der Spektren sind in **Abbildung 10** hervorgehoben. Die in **Abbildung 10** dargestellten Änderungen reflektieren die trophische Interaktion und dokumentieren welches Plankton zum Herbst hin als wichtige Nahrungsgrundlage für das Mesozooplankton (Copepoden) noch vorhanden ist. Die Ergebnisse unserer Analysen zeigen auch, dass eine, aktuell diskutierte, Zunahme der Abundanz von Picoplankton nur einen sehr kleinen Beitrag zum gesamten Biovolumen beiträgt und somit keine nennenswerte Konkurrenz zu den großen Diatomeen darstellt. Interessant ist es zu untersuchen, ob eine erhöhte Abundanz des Picoplankton das bakterielle Wachstum beeinträchtigen kann.

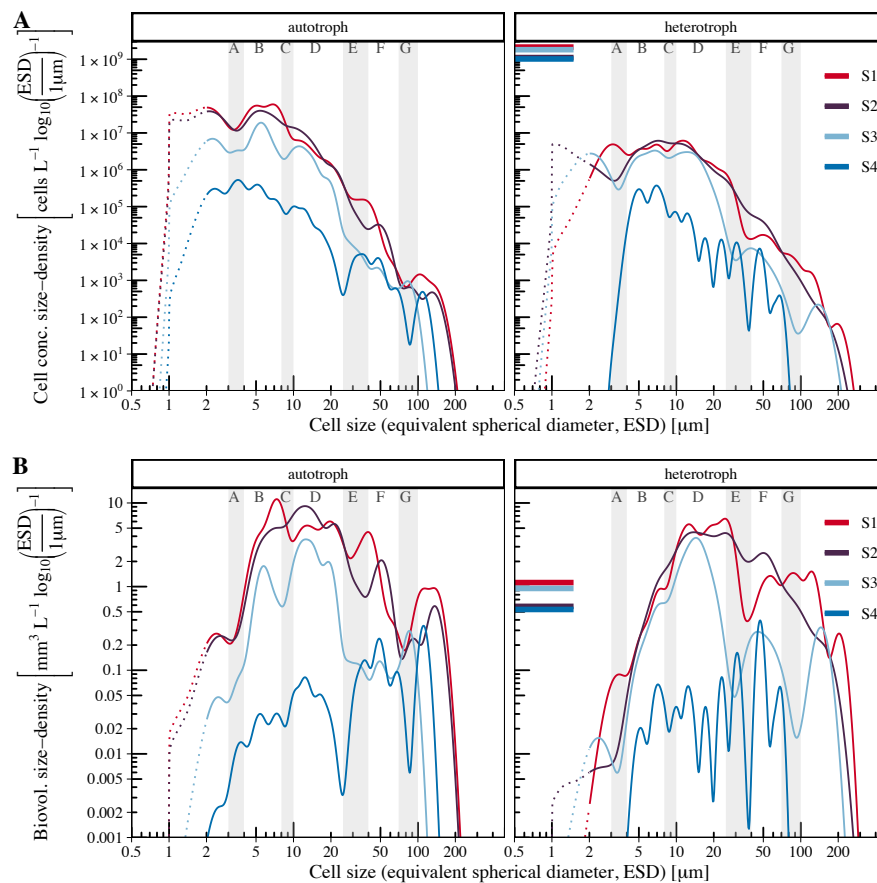


Abbildung 9: Zeitliche Abfolge der Entwicklung der Größenhäufigkeitszusammensetzung (A) und der Biovolumina (B): S1 (zum Zeitpunkt einer zweiten Blüte in der nordwärts strömenden atlantischen Wassermasse), S2 (1-8 Wochen nach der Blüte der arktischen Wassermasse), S3 und S4 (9-11 und 15-17 Wochen nach der Blüte in der Framstraße).

Die hier zusammengefassten Ergebnisse wurden in Lampe et al. (2021) publiziert. Die in **Abbildung 10** illustrierten Änderungen der Spektren gilt es mit dem dynamischen, größen aufgelösten Planktonökosystem abzubilden und zu erklären.

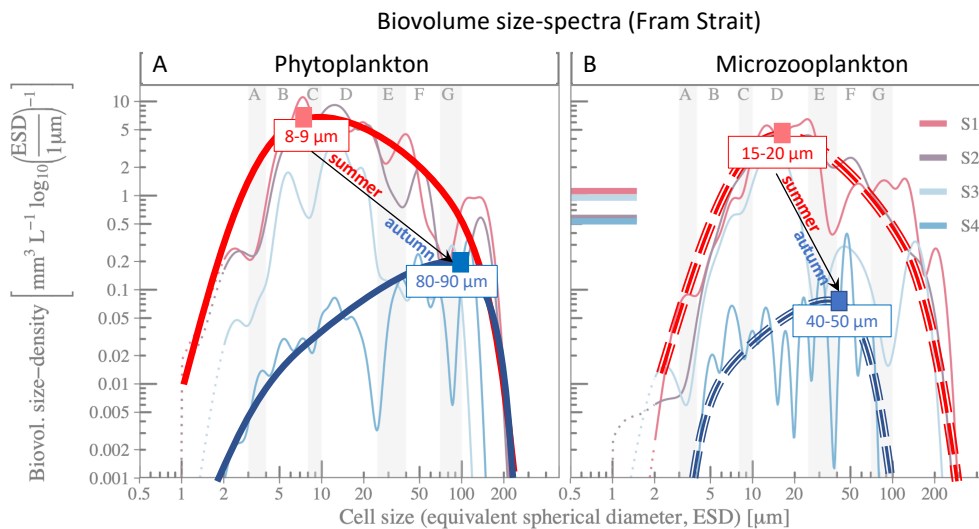


Abbildung 10: Größenspektren der Biovolumina (linke Seite - Phytoplankton, rechte Seite - Mikrozooplankton), basierend auf Messungen der Abundanzen und Zellgrößen der Proben aus der Framstraße (2016 - 2018). Hervorgehoben (rot=Sommer und blau=Herbst) sind die Spektren der Biovolumina des Phytoplankton und des Mikrozooplanktons (überwiegend heterotrophe Dinoflagellaten und Ciliaten). Die Maxima der Spektren des Phytoplanktons verschieben sich zu den großen Zellen hin (von 8 - 9 μm hin zu 80 - 90 μm ESD). Die Maxima der Mikrozooplanktonspektren verschieben sich von 15 - 20 μm hin zu 40 - 50 μm . Große Ciliaten verschwinden, wahrscheinlich bedingt durch den Fraßdruck des Mesozooplanktons (Copepoden).

II.b.6.2 Lagrangesche Trajektorien aus der Arktis und aus dem Nordatlantik

Eine räumliche Auftrennung Planktongrößenspektren erfolgte durch das Hinzuziehen von Satellitenmessungen der Oberflächentemperatur (SST=Sea Surface Temperature) für den Zeitraum der Probennahmen in einem Gebiet, das die Framstraße als Kernregion erfasst. Vanessa Lampe konnte unter Anwendung einer Clusteranalyse jene Stationen identifizieren, die entweder von polaren Wassermassen (südwärtige Strömung) oder von nordwärts strömenden Nordatlantik Wassermassen zum Zeitpunkt der Probennahme beeinflusst waren. Gemäß dieser Differenzierung sollten die entsprechenden Randbedingungen (Temperatur, Salinität, Strahlung, turbulente Austauschkoefizienten) für die Modellierung definiert werden. In der Arbeitsgruppe von Neil Banas (University of Strathclyde, Glasgow) wurden zuvor, für das CAO-DIAPOD Projekt, Modelltrajektorien aus Simulationen des norwegischen SINMOD Modells (Slagstad and McClimans, 2005) verwendet. In Absprache mit unseren UK Projektpartnern, Ben Ward und Aidan Hunter, wurde beschlossen, den gleichen Modellansatz zu verfolgen und auf den vorhandenen Code zur Extraktion von Modelltrajektorien aus SINMOD Simulationen zurückzugreifen. Mit Unterstützung von Fabian Grosse (zu der Zeit in der Arbeitsgruppe von Neil Banas) konnten insgesamt vier Ensembles an Trajektorien gewonnen werden: 1) arktische und 2) nordatlantische Trajektorien die jeweils zu den Zeitpunkten der a) Sommer- und b) Herbstmessungen die Framstraße erreichen.

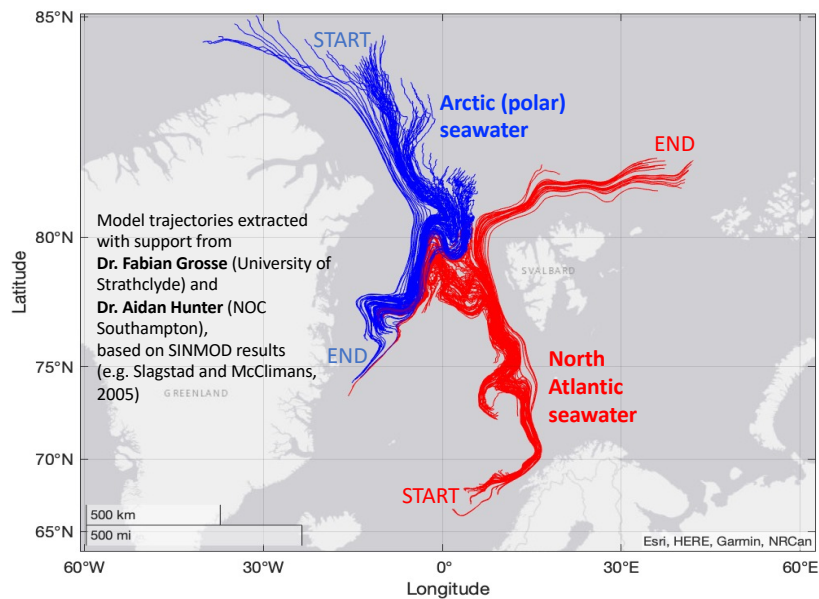


Abbildung 11: Modelltrajektorien die die Unterschiede zwischen arktischen, polaren Wassermassen und dem nordwärts strömendem Nordatlantikwasser durch die Fram Straße auflösen. Dargestellt sind die Ensembles an Trajektorien die die Framstraße erreichen zum Zeitpunkt der Sommermessungen im Jahr 2017.

Abbildung 11 zeigt die Ensembles der arktischen und nordatlantischen Trajektorien für die Sommermessungen in der Framstraße. Mit den Randbedingungen dieser Trajektorien wird das vertikal-aufgelöste (1D) größenbasierte Planktonökosystemmodell angetrieben. Die Modelllösungen beschreiben entsprechend die zeitliche Entwicklung des Planktons und der Biogeochemie vor und nach den Zeiten der Messungen. Der direkte Vergleich zwischen Modellergebnissen und den Messungen beschränkt sich zunächst auf den Beobachtungszeitraum in der Framstraße. Noch in Vorbereitung ist auch ein Daten-Modellvergleich von Monatsmitteln entlang der Trajektorien, mit Daten aus dem World Ocean Atlas (WOA 2018, Garcia et al., 2019) und mit, aus Satellitenmessungen hergeleiteten, Chlorophyll-a Oberflächenkonzentrationen.

II.b.6.3 Ergebnisse aus Modellanwendungen

Die Identifizierung von bestmöglichen, kalibrierten, Modelllösungen erfolgt über die Schätzung und Optimierung von Modellparametern (Modellkonstanten), deren Werte meist ungenau oder unbekannt sind. Dafür ist die Quantifizierung der Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Beobachtungsdaten (Metriken) erforderlich, unter Berücksichtigung bestimmter statistischer Annahmen (siehe Abschnitt **II.b.6.4**). Die Ausarbeitung der Metriken ist nahezu abgeschlossen, aber eine rigorose, abschließende Parameteroptimierung konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gemacht werden. Parallel zu den Arbeiten in **WP4** und **WP5**, wurde eine Studie zur Optimierung eines speziell für die Arktis entwickelten Modells des mikrobiellen Loops (Minimum Microbial Food Web) durchgeführt (Prowe et al., 2022). Für dieses Modell sollte eine optimale Lösung identifiziert werden für die Simulation von Beobachtungsdaten eines Polar Aquatic Microbial Ecology (PAME-I) Mesokosmos-Experiments, das in Svalbard auf Spitzbergen durchgeführt wurde (Larsen et al., 2015). Die Ergebnisse dieser Modellstudie lieferten wichtige Einblicke, die relevant sind für die

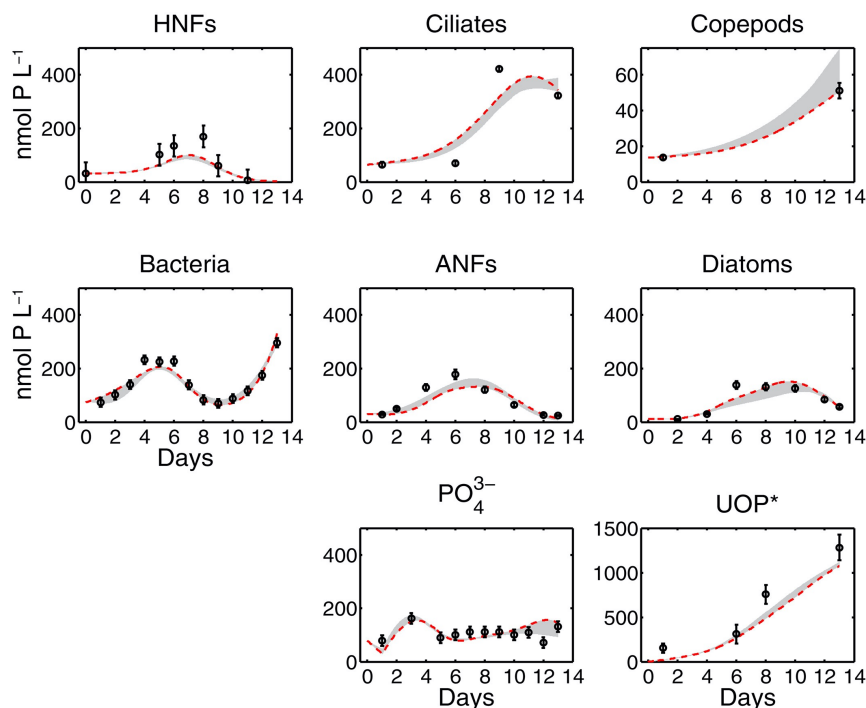


Abbildung 12: Beobachtungsdaten aus dem Polar Aquatic Microbial Ecology (PAME-I) Mesokosmos-Experiment (Larsen et al., 2015) sowie eine Schar von Modelllösungen (grau schattiert) verschiedener Varianten des Minimum Microbial Food Web Modells (Thingstad et al., 2007). Der Unterschied zwischen den Lösungen der Modellvarianten geringerer Komplexität zu der Lösung der komplexesten Modellvariante (rot gestrichelt) ist nicht signifikant bezüglich des Daten-Modellvergleichs. Jedoch unterscheiden sich die Modelllösungen hinsichtlich der Effizienz des trophischen Massentransfers hin zu höheren trophischen Ebenen (z.B. Copepoden).

Planung und Umsetzung der Modelloptimierung in **WP4** und **WP5**. Wichtigste Erkenntnis war, dass die experimentellen Daten von verschiedenartigen Verknüpfungen innerhalb des Nahrungsnetzes gleichermaßen gut beschrieben werden können (**Abbildung 12**). Obgleich Plankton des mikrobiellen Nahrungsnetzes von den Beobachtungen gut aufgelöst werden konnten, so reichen diese nicht aus um die Effizienz des trophischen Transfers eindeutig zu bestimmen. Dies verweist auf die Bedeutsamkeit der in **WP2** und **WP5** analysierten Planktonspektren für die Identifizierung einer eindeutigen Modelllösung für das mikrobielle Nahrungsnetz, auch wenn die Spektren nur zeitlich beschränkte Details über die Planktonzusammensetzung liefern können.

Im August 2021 wurden erste Optimierungsergebnisse von Aidan Hunter vor für das microARC-Modell vorgestellt, die sich jedoch als nicht repräsentativ erwiesen. Einige Modelländerungen wurden danach hier am GEOMAR durchgeführt wurden. Diese Änderungen betrafen die vertikale turbulente Vermischung sowie die Berechnung der täglichen, vertikal-gemittelten Lichtlimitierung des Phytoplanktonwachstums. Im Folgenden werden ausschließlich Modellergebnisse der korrigierten Modellversion gezeigt. **Abbildung 13** zeigt Modellergebnisse einer exemplarischen einzelnen Trajektorie, die im Sommer die Messgebiete im Jahr 2017 in der Framstraße erreicht. Zum Zeitpunkt des Starts (nördlich von 65° N) ist das Phytoplanktonwachstum bis Anfang April lichtlimitiert und eine ausgeprägte Blüte entwickelt sich erst im Juni, dann noch deutlich südlich von Spitzbergen. Sobald die Framstraße erreicht wird ist die erste Blüte bereits vorbei. Es entwickelt sich im

späten Sommer eine zweite Blüte, welche in dieser Simulation jedoch bereits etwas nördlich von Spitzbergen entsteht. Die Entwicklung dieser zweiten Blüte in den Modellergebnissen zeigt, dass die grundlegende mikrobielle Dynamik des Modells eine schnelle regenerierte Produktion zulässt, nur eben noch nicht schnell und effizient genug. Ziel ist es diese Modelllösung entsprechend zu optimieren, mit Hilfe der Assimilation der Planktonspektren zusammen mit den biogeochemischen Tracer-Daten. Die Tiefe des simulierten Chlorophyll-a Maximums entspricht bereits den Beobachtungen.

Die Vorgeschichte, z.B. Lichthistorie, der arktischen Trajektorien unterscheidet sich wesentlich von den nordatlantischen Trajektorien. Die in **Abbildung 13** gezeigten Modellergebnisse basieren auf den gleichen Modellparameterwerten wie sie auch für die nordatlantischen Trajektorien verwendet werden. Sie zeigen, dass sich eine Blüte erst spät im August entwickelt, was nicht Einklang ist mit der bekannten frühen Entwicklung von Eisrandblüten. Die aus SINMOD stammenden physikalischen Randbedingungen des Modells beinhalten keine flache Stratifizierung an den Eisrändern. Es gibt hierfür zwei Lösungsansätze, die sich nicht einander ausschließen müssen. Zum einen kann man die Randbedingungen der turbulenten Vermischung dahingehend verändern, so dass es zu einer flachen Stratifizierung zu Zeiten der Eisschmelze kommt. Eine weitere Annahme wäre, dass bestimmte Parameterwerte, insbesondere jene für das lichtlimitierte Wachstum des Phytoplanktons, sich von denen der nordwärts-strömenden Trajektorien unterscheiden dürfen. Zum Beispiel könnte die photosynthetische Lichteffizienz des Lichtlimitierungsterms im Modell in der Arktis höher sein als im Nordatlantik.

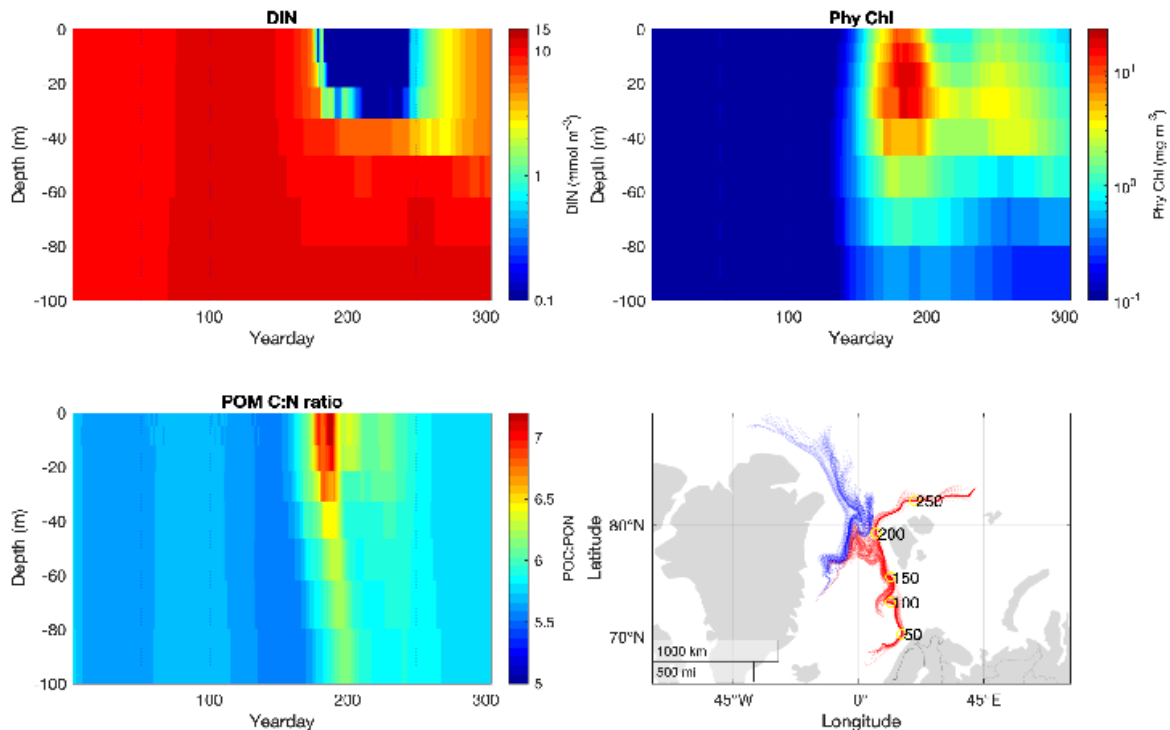


Abbildung 13: Simulationsergebnisse für eine Modelltrajektorie der aus dem Nordatlantik stammenden Wassermasse, die im Sommer die Framstraße erreicht: Anorganischer gelöster Stickstoff (Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN) in $(\text{mmol N}) \text{ m}^{-3}$, Chlorophyll-a in mg m^{-3} , Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) Verhältnis (C:N) des partikulären organischen Materials (POM). Zeiten (Tag im Jahr) sind entlang der Trajektorie angegeben. Die Sommermessungen in den Jahren 2016 und 2017 umfassen den Zeitraum (Tag 174 - 231 im Jahr).

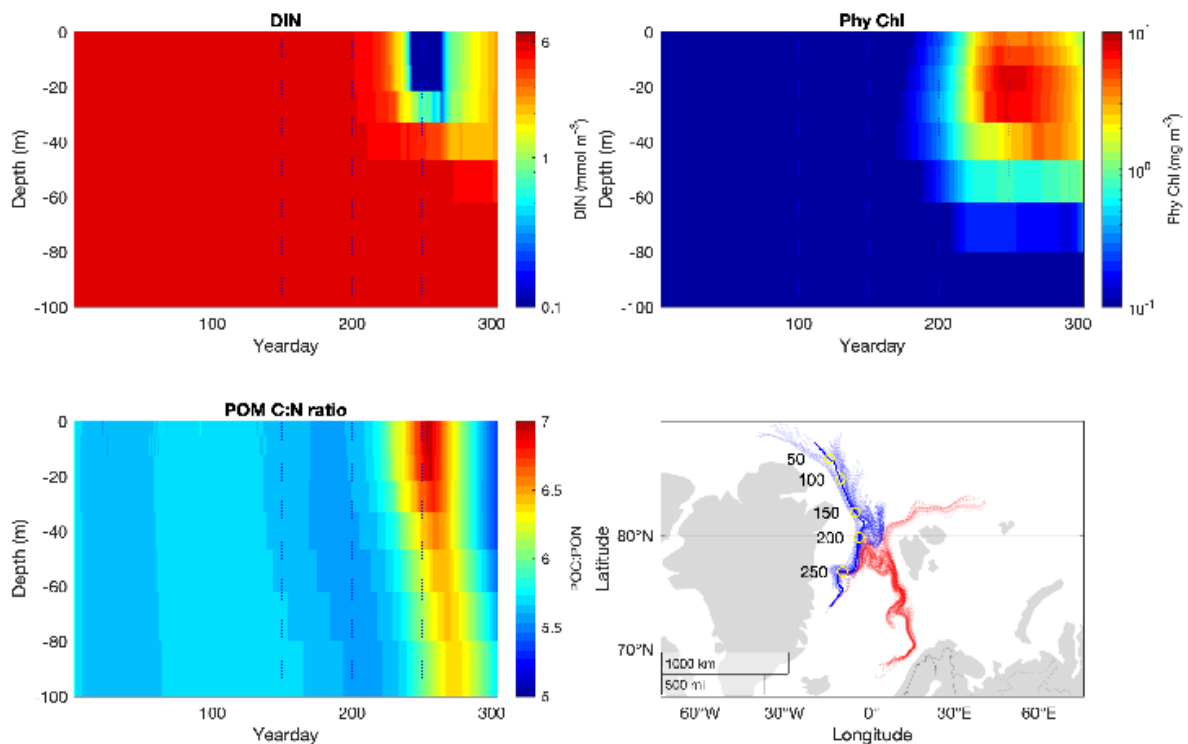


Abbildung 14: Simulationsergebnisse für eine Modelltrajektorie der aus der Arktis stammenden Wassermasse, die im Sommer die Framstraße erreicht: Anorganischer gelöster Stickstoff (Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN) in $(\text{mmol N}) \text{ m}^{-3}$, Chlorophyll-a in mg m^{-3} , Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) Verhältnis (C:N) des partikulären organischen Materials (POM). Zeiten (Tag im Jahr) sind entlang der Trajektorie angegeben. Die Sommermessungen in den Jahren 2016 und 2017 umfassen den Zeitraum (Tage 174 – 231 im Jahr).

Eine Besonderheit des microARC Modells ist die Einbeziehung allometrischer (größenabhängiger) Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung von Änderungen und der Plankton-Größenhäufigkeitszusammensetzung. Die biogeochemischen Variablen, wie z.B. partikulärer organischer Kohlenstoff (POC), unterliegen dem größenabhängigen Phytoplanktonwachstum und der Planktoninteraktion (Fraßdruck des Mikrozooplanktons). In **Abbildung 15** ist die zu **Abbildung 13** zugehörige Modelllösung der Planktongrößenklassen, des photoautotrophen Phytoplanktons und des heterotrophen Mikrozooplanktons, zu sehen. Die Phytoplanktonbiovolumina zeigen anfangs eine nahezu gleiche Verteilung im Größenbereich 8 bis 200 μm ESD. Die zeitliche Entwicklung zeigt eine Verschiebung hin zu den großen Größenklassen im Spätsommer/Herbst, wie es den hergeleiteten Spektren entspricht (**Abbildung 16**). Zum Zeitpunkt des Maximums der Blüte ist das gesamte Biovolumen des Phytoplanktons vergleichbar mit dem Biovolumen des Mikrozooplanktons. Im Herbst überwiegt das Biovolumen des Mikrozooplanktons, was nicht der Entwicklung in den hergeleiteten Spektren (**Abbildungen 9 und 10**) entspricht. Um die Modelllösung an die Entwicklung der beobachteten Spektren anzupassen muss beachtet werden dass gleichzeitig auch die Modellergebnisse möglichst den Konzentrationsmessungen der biogeochemischen Variablen entsprechen. Dafür muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen der größenabhängigen Planktoninteraktion und den biogeochemischen Variablen, wie z.B. den Konzentrationen an DIN (Nitrat + Nitrit) und Chlorophyll-a sowie dem gelösten organischen Kohlenstoff (dissolved organic carbon, DOC).

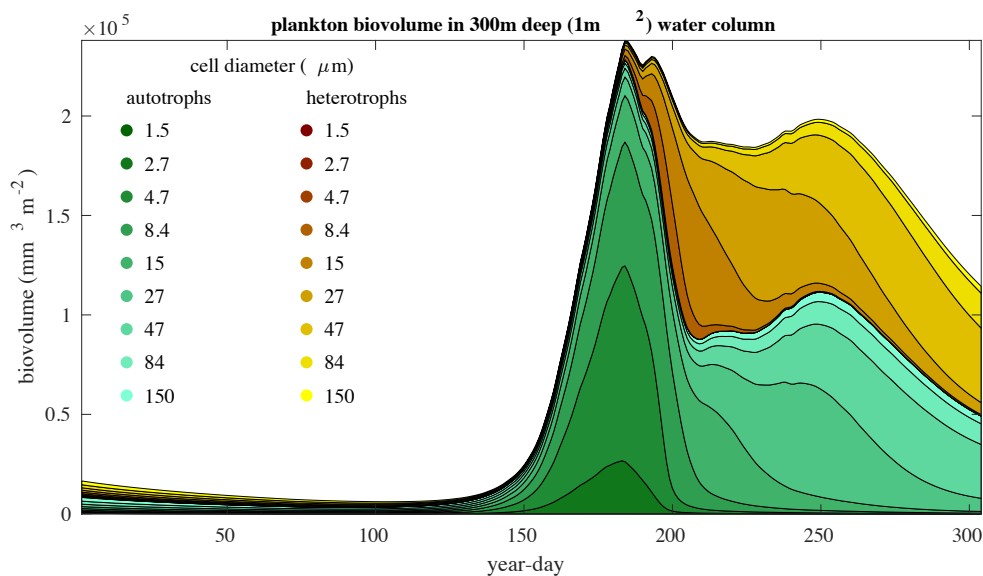


Abbildung 15: Zeitliche Entwicklung der Biovolumina der einzelnen Größenklassen des microARC Modells für eine nordatlantische Trajektorie: Phytoplankton (grün) und Mikrozooplankton (braun/gelb).

Leider konnte zum Projektende von microARC keine abschließende Synthese zwischen Beobachtungsdaten und Modellergebnisse ausgearbeitet werden. Im Prinzip könnten Ergebnisse zu den Kohlen- und Stickstoffflüssen hier bereits analysiert und vorgestellt werden. Diese Analysen erscheinen jedoch wenig sinnvoll, sofern die Methode zur Datenassimilation und Parameteroptimierung (Anwendung der Metriken, siehe **II.b.6.4**) nicht konsolidiert wurde. Aufgrund der im Rahmen von microARC geleisteten Vorarbeiten werden die Ziele des Vorhabens auch zukünftig weiter verfolgt. Zur Zeit werden Machbarkeitsstudien durchgeführt, die zeigen sollen, dass die Verwendung zweier Metriken zur Identifizierung optimaler Modelllösungen genutzt werden kann. Die Kombination einer Metrik für die Planktonspektren und einer Likelihood-Metrik für die biogeochemischen Tracer-Daten ist ein Novum und man kann davon ausgehen, dass die in microARC entwickelten Ansätze auch in zukünftige Modellstudien einfließen werden.

II.b.6.4 Metriken zur Quantifizierung der Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Beobachtungsdaten

Im Verlauf des Vorhabens wurde mitunter viel Zeit in die Entwicklung zweier Metriken investiert. Aidan Hunter (**WP4**) hat eine Standardisierung der biogeochemischen Messdaten aus der Framstraße (DIN, particulate organic nitrogen and carbon, PON & POC, und Chlorophyll-a Konzentrationen) unter Anwendung eines linearen „mixed“ Modells (LMM) durchgeführt, welches zwischen festen (fixed) und zufälligen (random) Effekten auf die gemessenen Größen unterscheidet. Diese Art der Standardisierung führt dazu dass die Fehlerabweichungen zu den gemittelten Werten nahezu normalverteilt sind. Die Standardisierung (basierend auf den Beobachtungen) entspricht einer Transformation in Abhängigkeit von der Tiefe, welche dann auch 1:1 bei den Modellergebnissen angewandt wird. Die Metrik für die biogeochemischen Messungen basiert auf einer Likelihood Wahrscheinlichkeitsverteilung (L) unter der Annahme, dass die Schwankungen der (standardisierten) Beobachtungswerte

einer (parametrischen) Normalverteilung folgen. Der Mehraufwand für die Anwendung des LMM lohnt sich, weil dann auch die Residuen, Abweichungen zwischen den transformierten/standardisierten Daten und Modellergebnissen, normalverteilt sind. Das Maximum der Likelihood Wahrscheinlichkeit entspricht einer bestmöglichen Modellrepräsentation der Messdaten. In der Praxis wird jedoch versucht, das Minimum der negativen logarithmierten Likelihood, $-\log(L)$, zu identifizieren.

Die zweite Metrik, entwickelt am GEOMAR, beschreibt die Abweichungen zwischen den simulierten Planktonspektren (Spektren der Zellvolumina) und den aus den Messungen hergeleiteten Spektren. Hierfür werden die Distanzen zwischen den kumulativen, normalisierten Spektren quadriert und aufsummiert, integrated quadratic distance (IQD). Die Verwendung einer solchen nichtparametrischen Metrik für den Daten-Modellvergleich von Planktongrößenverteilungen ist bislang einzigartig, was wahrscheinlich auch daran liegt, dass oftmals keine kontinuierlichen Spektren, die aus mikroskopischen Messungen hergeleitet wurden, verfügbar sind. Die Spektren, wie sie in microARC bestimmt werden konnten, sind außerordentlich. Spektren dieser Art können direkt mit Ergebnissen verschiedener Modelle, mit beliebiger Anzahl und Aufteilung an Größenklassen, verglichen und die Abweichungen entsprechend der IQD quantifiziert werden.

Die beiden Metriken (L und IQD) sind die Grundlage für eine multiobjektiven Modelloptimierung, bei der ein Kompromiss identifiziert werden muss, zwischen der Güte der Modellergebnisse der Planktonspektren und der Fähigkeit des Modells die beobachteten Konzentrationsmessungen zu beschreiben. Diese beiden Metriken informieren über die Wirkungsweise der ökologische Planktoninteraktion im Modell und über die biogeochemischen Prozesse. Beide Metriken sollten unabhängige Informationen liefern. In welchem Maß dies zutrifft ist Bestandteil aktueller Untersuchungen. Nach den letzten Modellkorrekturen konnte eine Vielzahl von Modellläufen realisiert werden. Zunächst wurde ein Ensemble von 2000 verschiedenen Parameterkombinationen generiert, mittels Latin Hyper Cube Sampling, und das Modell mit jeder dieser Parameterkombinationen laufen lassen (mit identischen Parameterkombinationen für die jeweiligen nordatlantischen und die arktischen Trajektorien). Für die entsprechenden Modellergebnisse wurden jeweils die Likelihood und die IQD Metrik evaluiert. **Abbildung 16** zeigt eine Pareto Front, welche einen Kompromiss zwischen ökologischem Detail und der Biogeochemie darstellt. Das blaue Quadrat in **Abbildung 16** stellt eine gute (derzeit bestmögliche) Modellbeschreibung der normalisierten Planktonspektren dar (minimaler Wert der IQD). Dieser minimale Wert in IQD geht jedoch zu Lasten der Biogeochemie, was zu einer Verschlechterung im Daten-Modellvergleich der biogeochemischen Variablen ($-\log(L)$ nimmt höhere Werte an). Umgekehrt verhält es sich beim roten Quadrat.

Die Identifizierung und Auflösung einer solchen (Ökologie vs. Biogeochemie) Pareto Front mittels der in microARC entwickelten Metriken ist Bestandteil der jetzigen Forschungsarbeit, welche in die Doktorarbeit von Frau Vanessa Lampe einfließen soll. Geplant ist hierzu eine Publikation, die vor Abgabe der Doktorarbeit in *Ecological Modelling* eingereicht sein soll. Die so optimierten Modellergebnisse sollen dann hinsichtlich der Stick- und Kohlenstoffflüsse analysiert werden. Diese abschließende microARC Daten-Modellsynthese ist bis Ende 2022 geplant.

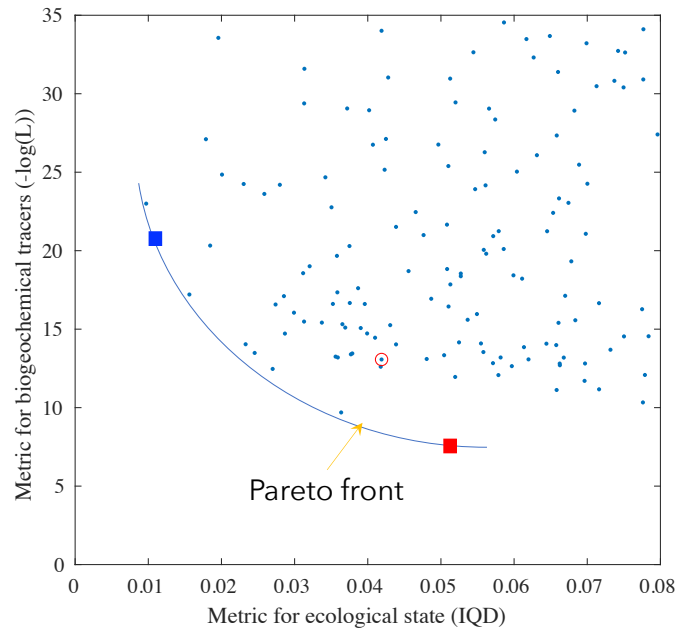


Abbildung 16: Eine Pareto Front, die den Kompromiss aufweist zwischen der ökologischen Metrik (Integrated Quadratic Distance, IQD, between observed and simulated plankton size spectra) und der Likelihood-Metrik, welche die Abweichungen der Modellergebnisse von den biogeochemischen Tracer-Daten quantifiziert.

Referenzen:

- Garcia, H.E., Weathers, K.W., Paver, C.R., Smolyar, I., Boyer, T.P., Locarnini, R.A., Zweng, M.M., Mishonov, A.V., Baranova, O.K., Seidov, D., and Reagan, J.R. (2019a) World Ocean Atlas 2018, Vol. 4: Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate). A. Mishonov Technical Editor, *NOAA Atlas NESDIS 84*, 35pp.
- Lampe, V., Nöthig, E.-M., and Schartau, M. (2021) Spatio-Temporal Variations in Community Size Structure of Arctic Protist Plankton in the Fram Strait. *Front. Mar. Sci.*, 7, DOI=10.3389/fmars.2020.579880
- Larsen, A., Egge, J.K., Nejstgaard, J.C., Di Capua, I., Thyrhaug, R., Bratbak, G., Thingstad, T.F. (2015) Contrasting response to nutrient manipulation in Arctic mesocosms are reproduced by a minimum microbial food web model. *Limnol Oceanogr.* 2015 Mar;60(2):360-374. doi: 10.1002/lno.10025
- Prowe, A. E. F., Su, B., Nejstgaard, J. C. and Schartau, M. (2022) Food web structure and intraguild predation affect ecosystem functioning in an established plankton model. *Limnology and Oceanography*, pp. 843-855, DOI 10.1002/lno.12039.
- Schartau, M., Landry, M. R., and Armstrong, R. A. (2010) Density estimation of plankton size spectra: a reanalysis of IronEx II data. *J. Plankton Res.*, doi.org/10.1093/plankt/fbq072
- Slagstad, D., and McClimans, T.A. (2005) Modeling the ecosystem dynamics of the Barents sea including the marginal ice zone: I. Physical and chemical oceanography, *J. Mar. Syst.*, 58, Issues 1-2: 1-18, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.05.005.
- Slagstad D., Wassmann, P.F.J., and Ellingsen, I. (2015) Physical constrains and productivity in the future Arctic Ocean. *Front. Mar. Sci.* 2:85. doi: 10.3389/fmars.2015.00085
- Thingstad, T. F., Havskum, H., Zweifel, U.L., Berdalet, E., Sala, M.M., Peters, F., Alcaraz, M., Scharek, R., Perez, M., Jacquet, S., Flaten, G.A.F., Dolan, J.R., Marrasé, C., Rassoulzadegan, F., Hagstrøm, A., Vaulot, D. (2007) Ability of a "minimum" microbial food web model to reproduce response patterns observed in mesocosms manipulated with N and P, glucose, and Si. *J. Mar. Syst.* 64: 15-34. doi:10.1016/j.jmarsys.2006.02.009

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung des GEOMAR.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten in microARC entsprechen dem Arbeitsplan und sind somit gegeben.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das Projekt verfolgt keine wirtschaftlichen Zwecke.

Die Einbindung der Modellierung in dieses Projekt wird ermöglichen, dass unsere Erkenntnisse direkt für großskalige und globale Modellabschätzungen und zur Simulation zukünftiger Entwicklungen genutzt werden können. Unsere Erkenntnisse und Daten werden öffentlich zur Verfügung stehen und können somit Eingang in Modell- und Synthesestudien sowie in Risikoschätzungen finden.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse des Projektes wurden und werden in internationalen biologisch, ozeanographischen Fachzeitschriften oder übergreifenden Journalen publiziert. Des Weiteren wurden Ergebnisse auf internationalen Konferenzen (z.B. AGU/ASLO) präsentiert. Die Beobachtungs- und Messdaten des Projektes wurden und werden entsprechend dem Datenmanagementkonzept am GEOMAR sowie in der globalen PANGAEA-Datenbank (www.pangaea.de) archiviert und stehen damit auch anderen interessierten Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit zur Verfügung. Die Veröffentlichung von Ergebnissen in der wissenschaftlichen Literatur hat eine Werbewirkung für die deutsche Meeresforschung, aus der Bedarf an Expertise, Techniken und Geräten entstehen kann. Die messtechnischen Anwendungen von **WP3** tragen dazu bei, die Bedeutung dieser Methoden für Untersuchungen gelöster organischer Substanzen im Ozean hervorzuheben und weiter international zu etablieren. Die in Lampe et al. (2021) analysierten Ergebnisse sowie die zugehörigen Analyseskripte (in R) wurden beim GEOMAR Datenmanagement zur Prüfung eingereicht und eine Persistent Identifier (PID) und Link werden zugeteilt sobald die Daten und Skripte validiert wurden. Mit der PID werden die Daten und Skripte über den THREDDS Server für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht, mit Verweis auf die entsprechende Publikation.

Sowohl die Modellentwicklung als auch die geplante Prozedur zur Parameteroptimierungen am GEOMAR umfassen neue Ansätze, die voraussichtlich in zukünftigen Studien im Bereich der biogeochemischen Modellierung weitere Anwendungsmöglichkeiten finden werden. Das in **WP4/WP5** entwickelte microARC Modell lässt sich zukünftig nutzen und kann für bestimmte Fragestellungen angewandt werden. Die microARC Arbeiten zu dem Datenassimilationsverfahren sind in ihrem Ansatz einzigartig und auch diese liefern neue Anwendungsmöglichkeiten, die für ähnliche Studien in anderen Ozeangebieten genutzt werden können. Eine Erweiterung des microARC Modells ist geplant: eine größenbasierte Variante des optimal-regulierenden Planktonmodells von Markus Pahlow (GEOMAR).

Nachwuchsförderung

Studenten, Doktoranden und promovierten Wissenschaftler wurden Möglichkeiten zur und Unterstützung bei der internationalen Vernetzung geboten. Entsprechend hat der microArc Verbund beigetragen, die Arbeiten/Studien der Nachwuchswissenschaftler/Innen international sichtbar zu machen. In WP3 wurde der Studentin Anabel von Jackowski die Möglichkeit zur Promotion über Themen des microArc Projektes gegeben. Die Studentin hat ihre Dissertation im Mai 2022 erfolgreich verteidigt. Auch der Studentin Alba Filella Lopez de Lamadrid, M.Sc. Biologische Ozeanographie, Universität Kiel, hat zu WP3 Themen ihre Abschlussarbeit (2020) durchgeführt. Des Weiteren wurden Studenten des gemeinsamen M.Sc. Studiengangs Biologische Ozeanographie der Universität Kiel und des GEOMARS werden aktiv als Studentische Hilfskräfte in praktische Arbeiten der Biologischen Ozeanographie und der mikrobiellen Biogeochemie im Projekt eingebunden. Sie konnten so einen praktischen Bezug zu ihrem Studium gewinnen.

Frau Vanessa Lampe war als Doktorandin bis einschließlich Juni 2022 in der Forschungseinheit Biogeochemische Modellierung angestellt. Während ihrer Vertragslaufzeit konnte keine abschließende Doktorarbeit fertiggestellt werden. Aufgrund der weitgediehenen Modellentwicklungsarbeiten sowie den zahlreichen Vorstudien und Modelltests plant Frau Lampe eine weitere Publikation und beabsichtigt die Fertigstellung einer Doktorarbeit bis Ende 2022.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Messdaten wurden und werden nach erfolgter Publikation in Datenbanken archiviert und stehen damit auch anderen interessierten Wissenschaftlern und der Öffentlichkeit zur Verfügung. Das Projekt wird die internationale Meeresforschung voranbringen, weil grundlegende Merkmale wie die räumliche und zeitliche Variabilität mikrobieller Prozesse sowie der Einfluss physikalischer Veränderungen auf das pelagische, mikrobielle Ökosystem im Arktischen Ozean wesentlich umfassender als bisher erforscht und erfasst werden. Das Projekt fördert die internationale Vernetzung, speziell mit britischen Kollegen, und unterstützt somit die Entwicklung zukünftiger Forschungsprojekte. Das microArc Projekt hat neue Erkenntnisse über die mikrobielle Produktion und den Umsatz jener organischen Substanzen erhoben, die auch die Eigenschaften der Oberflächengrenzschicht des Ozeans beeinflussen. Eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit besteht hinsichtlich Untersuchungen des Gasaustauschs (z.B. von CO₂) und der Emission/Absonderung von primären, organischen Aerosolen aus der Grenzschicht in die Atmosphäre. Dieser Anschluss besteht u.a. durch die neue DFG Forschungsgruppe (Biogeochemische Prozesse und Ozean/Atmosphäre- Austauschprozesse in marinen Oberflächenfilmen (BASS) ab 2022), die auch dynamische Anreicherungsprozesse von organischem Material in Oberflächenfilmen untersucht (T.P. 1.1 Engel/Schartau). Hier besteht Möglichkeit auf Ergebnisse von microArc zurückzugreifen.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Untersuchungen zu Biomasse und Artenzusammensetzung wurden im Rahmen des CAO NERC/BMBF Verbund Projektes von britischen Kollegen in DIAPOD und PEANUTS durchgeführt. Diese Studien konzentrierten sich überwiegend auf die Barentsee. Die britischen

Studien erfassten keine Details in der Planktonzusammensetzung hinsichtlich der Größenhäufigkeitsstrukturen im Größenbereich des kleinen Phytoplanktons und des Mikrozooplanktons. Höher trophische Level (z.B. Copepoden) wurden hingegen genauer untersucht, insbesondere die Bedeutung der großen Phytoplanktonzellen (z.B. große Diatomeen) als Nahrung vor der Diapause der Copepoden (Überwinterungszeit). Die Ergebnisse dieser und unserer Studien sind komplementär.

Ein zu microARC vergleichbares Modell existiert nicht und ein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens ist uns nicht bekannt.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Begutachtete Publikationen:

- Engel, A., Bracher, A., Dinter, A., Endres, A., Grosse, J., Metfies, K., Peeken, I., Piontek, J., Salter, I., Nöthig, E.-M. (2019) Inter-Annual Variability of Organic Carbon Concentration in the Eastern Fram Strait During Summer (2009-2017) *Front. in Mar. Sci.*, 6 . Art.Nr. 187. DOI 10.3389/fmars.2019.00187.
- von Jackowski, A., Grosse, J., Nöthig, E. M. and Engel, A. (2020) Dynamics of Organic Matter and Bacterial Activity in the Fram Strait during Summer and Autumn. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378 (2181). Art.Nr. 20190366. DOI 10.1098/rsta.2019.0366.
- Grosse, J., Endres, S. and Engel, A. (2020) Ocean Acidification Modifies Biomolecule Composition in Organic Matter Through Complex Interactions. *Scientific Reports*, 10 (1). Art.Nr. 20599. DOI 10.1038/s41598-020-77645-3.
- Engel, A., Endres, S., Galgani, L. and Schartau, M. (2020) Marvelous Marine Microgels: On the Distribution and Impact of Gel-Like Particles in the Oceanic Water-Column. *Front. in Mar. Sci.* 7. Art.Nr. 405. DOI 10.3389/fmars.2020.00405
- Nöthig, E.-M. et al. (2020). Summertime Chlorophyll a and Particulate Organic Carbon Standing Stocks in Surface Waters of the Fram Strait and the Arctic Ocean (1991-2015). *Front. Mar. Sci.* 7:350. doi: 10.3389/fmars.2020.00350
- Fadeev, E., Wietz, M., von Appen, W., Iversen, M. H., Nöthig, E.-M., Engel, A., Grosse, J., Graeve, M. and Boetius, A. (2021) Submesoscale Physicochemical Dynamics Directly Shape Bacterioplankton Community Structure in Space and Time. *Limnology and Oceanography*. DOI 10.1002/lno.11799.
- Grosse, J., Nöthig, E.-M., Torres-Valdés, S., Engel, A., (2021) Summertime Amino Acid and Carbohydrate Patterns in Particulate and Dissolved Organic Carbon Across Fram Strait. *Front. Mar. Sci.* 8:684675. doi: 10.3389/fmars.2021.684675
- Lampe, V., Nöthig, E.-M., and Schartau, M. (2021) Spatio-Temporal Variations in Community Size Structure of Arctic Protist Plankton in the Fram Strait. *Front. Mar. Sci.* 7, DOI=10.3389/fmars.2020.579880
- Piontek, J., Galgani, L., Nöthig, E., Peeken, I. and Engel, A. (2021) Organic Matter Composition and Heterotrophic Bacterial Activity at Declining Summer Sea Ice in the Central Arctic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 66 (S1). S343-S362. DOI 10.1002/lno.11639.

Prowe, A. E. F., Su, B., Nejstgaard, J. C., and Schartau, M. (2022) Food web structure and intraguild predation affect ecosystem functioning in an established plankton model. *Limnology and Oceanography*, pp. 843-855, DOI 10.1002/lno.12039.

Von Jackowski, A., Becker, K.W., Wietz, M., Bienhold, C., Zäncker, B., Nöthig E.-M. and Engel, A. (2022) Variations of Microbial Communities and Substrate Regimes in the Eastern Fram Strait Between Summer and Fall. *Environmental Microbiology*. DOI 10.1111/1462-2920.16036.

Geplante Publikationen:

Lampe, V., Hunter, A., Ward, B.A., and Schartau, M. Assimilation of plankton size spectra and biogeochemical tracer data into a plankton ecosystem model, using multiple objective functions. In Vorbereitung für *Ecological Modelling*.

Von Jackowski, A., Filella, A., Hopwood, M. J., Gu, Y. and Engel, A. Uncoupled Formation of Transparent Exopolymer Particles and Coomassie Stainable Particles (TEP and CSP) along East Greenland. In Vorbereitung für *Geophys. Res. Lett.*

Wissenschaftliche Vorträge:

Vorträge (Vanessa Lampe, Ben Ward und Markus Schartau) zu den Arbeiten in WP4 und WP5, 14.-17. Mai 2019, Jahrestreffen der microARC Projektpartner in Plymouth, UK.

Schartau, M., Lampe, V., Nöthig, E. M. (eingeladener Vortrag, 25.09.2019) Why should we and how can we identify structural details in size-spectra of marine microplankton? Seminar des Dept. of Mathematics and Statistics at Strathclyde University, Glasgow, UK (eingeladen von Prof. Dr. Neil Banas).

von Jackowski, A., Grosse, J., Nöthig, E. M. and Engel, A. (16-21.2.2020) Seasonal Dynamics of Microbial Activity and Organic Matter in the Arctic Gateway. Vortrag bei dem Ocean Science Meeting of American Geophysical Union in San Diego, Vereinigte Staaten von Amerika

Lampe, V., Nöthig, M.E., und Schartau, M. (11.08.2020) Spatio-temporal variations in community size structure of Arctic protist plankton in the Fram Strait. Online-Präsentation, Biogeochemical Modelling Seminar, Kiel

Lampe, V., Nöthig, M.E., und Schartau, M. 30.10.2020) Spatio-temporal variations in community size structure of Arctic protist plankton in the Fram Strait. Online-Präsentation, microARC Projekt Jahrestreffen.

Prowe, A. E. F., Su, B., Nejstgaard, J. C. und Schartau, M., (20.01.2021). Can plankton biomass tell us about the food web? Food web structure in a mesocosm model. Online-Präsentation, Gulf of Maine Research Institute (GMRI) Science Seminar Series

von Jackowski, A., Piontek, J., Lampe, V. and Engel, A. (22-27.06.2021) The composition of semi-labile dissolved organic matter across the Fram Strait throughout the summer phytoplankton bloom. Vortrag bei dem ASLO 2021 Aquatic Sciences Meeting, Online Konferenz

von Jackowski, A., Filella, A., Hopwood M., Gu, Y. and Engel A. (01-06.05.2022) Gel Particle

Distribution and Dynamics Along the East Coast of Greenland. Vortrag bei der 28. International Polartagung in Potsdam, Deutschland

Poster Präsentationen:

Von Jackowski, A, Grosse, J. und Engel, A. (15-17.01.2019) The Arctic Ocean - A Bacterial Perspective. Poster bei dem BMBF NERC Changing Arctic Ocean Annual Science Meeting 2019 in Birmingham, England

Lampe, V., Nöthig, E.M., und Schartau, M. (15.-17.01.2019) Resolving phytoplankton size spectra in a Changing Arctic Ocean. Jahrestreffen BMBF/NERC CAO Annual Meeting 2019 in Birmingham, England.

Engel, A., Bracher, A., Dinter, A., Endres, A., Grosse, J., Metfies, K., Peeken, I., Piontek, J., Salter, I, Nöthig, E.-M. (DELMENHORST) Inter-Annual Variability of Organic Carbon Concentration in the Eastern Fram Strait During Summer (2009-2017). Poster bei dem DELMENHORST

von Jackowski, A., Piontek, J., Lampe, V. und Engel, A. (01-17.12.2020) Dissolved Organic Matter and Microbial Abundances in the eastern Fram Strait between 2009-2018. Poster bei dem American Geophysical Union Fall Meeting, Online Konferenz

Lampe, V., Nöthig, E.M., und Schartau, M. (14.-16.01.2020) Resolving the community size structure of Arctic protist plankton, BMBF/NERC Changing Arctic Ocean Annual Science Meeting 2020 in Potsdam, Deutschland

von Jackowski, A., Grosse, J., Nöthig, E. M. und Engel, A. (13-16.01.2020) Seasonal Dynamics of Bacterial Activity and Organic Matter in the Arctic Gateway. Poster bei dem BMBF/NERC Changing Arctic Ocean Annual Science Meeting 2020 in Potsdam, Deutschland

Lampe, V., Nöthig, E.M., und Schartau, M. (16.-21.02.2020) Resolving the community size structure of Arctic protist plankton, Ocean Sciences Meeting of American Geophysical Union in San Diego, Vereinigte Staaten von Amerika

Abschlussarbeiten:

Von Jackowski, A. (2022) Seasonal Dynamics of Organic Matter Turnover in the Arctic Ocean. (Doktorarbeit), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany, 157 pp.

Filella Lopez de Lamadrid, A. (2020) Microbial Responses to the Release Of DOC by Sea Ice and Glacier Melting in the East Greenland System. (Masterarbeit), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany, 75 pp.

Andere Publikationen/ Fahrtberichte:

2021 - Hoppmann, McPherson, Lochthofen, Ludszuweit, Frommhold, von Jackowski, von Appen, Tippenhauer, Engel. The Expedition PS126 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2021, Section: Physical Oceanography. DOI: 10.48433/BzPM_0757_2021

- 2021 - Metfies, Golde, Hohe, von Jackowski, Kim, Klüver, Knüppel, Kraberg, Nicolaus, Strickmann, Weiss, Xi, Bracher, Nöthig, Niehoff, Peeken, Engel. The Expedition PS126 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2021, Section: PEBCAO - Plankton Ecology And Biogeochemistry In A Changing Arctic Ocean. DOI: 10.48433/BzPM_0757_2021
- 2019 - von Appen, von Jackowski, Veronique Merten. The Expedition PS121 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2019, Section: Physical Oceanography. DOI: 10.2312/BzPM_0738_2020
- 2019 - Bracher, Metfies, Rogge, Strack von Schijndel, Murawski, Wiegmann, Grosse, Leßke, von Jackowski, Niehoff, Engel, Nöthig, Peeken. The Expedition PS121 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2019, Section: Plankton Ecology And Biogeochemistry In The Changing Arctic Ocean (PEBCAO Group). DOI: 10.2312/BzPM_0738_2020
- 2018 - von Jackowski, Barz, Klüver, Nöthig, Engel, Metfies, Bienhold. LTER HAUSGARTEN 2018 - Long-Term Ecological Research in the Fram Strait, Cruise No. MSM77, Section: Biogeochemical and Ecological Studies in the Water Column. DOI: 10.2312/cr_msm77
- 2018 - Hildebrandt, Goldbach, Grosse, Knüppel, Staufenbiel, Töller, von Jackowski, Metfies, Niehoff, Nöthig, Peeken, Engel, Bäger, Wulf, Bienhold, Fuchs. The Expedition PS114 of the Research Vessel POLARSTERN to the Fram Strait in 2018, Section: Plankton Ecology And Biogeochemistry In The Changing Arctic Ocean (PEBCAO, Fram Microbial Observatory). DOI: 10.2312/BzPM_0723_2018