

# Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>	
3. Titel <b>Advektive Pfade von Nährstoffen und ökologischen Schlüsselsubstanzen in der Arktis</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Rabe, Benjamin Vredenburg (ehem. Horn), Myriël Schaffer, Janin Schulz, Kirstin Torres-Valdés, Sinhué Heuzè, Cèline Karcher, Michael Sumata, Hiroshi	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31. Dezember 2021	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Alfred-Wegener-Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research Am Handelshafen 12 D-27570 Bremerhaven Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
11. Seitenzahl 22		
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>		13. Literaturangaben 54
	15. Abbildungen 11	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ		
18. Kurzfassung Die Arktis ist eine Region, in der sich der globale Klimawandel besonders manifestiert. Dabei spielt der Ozean eine besondere Rolle, da er in ständigen Austausch mit der Atmosphäre und dem Meereis, sowie niederen Breiten steht. Änderungen in Zirkulationspfaden verschiedener Wassermassen, die sich durch charakteristische Salzgehalte und Temperaturen auszeichnen, sowie nach Formationsregion zugeordnet werden können, sind Teil dieses Wandels. Diese Wassermassen transportieren nicht nur Wärme und Salz bzw. Süßwasser, sondern auch biologisch relevante Substanzen. Hier sind besonders die Makronährstoffe hervorzuheben, die im oberflächennahen Teil des Nordpolarmeeres im Sommer die Primärproduktion in Form von Phytoplankton und anderer Pflanzen limitiert. Im Winter wiederum werden diese Nährstoffe durch Vermischung wieder aus größeren Tiefen nach oben befördert. Die Advektionspfade der Wassermassen und Makronährstoffe können mit in-situ Messdaten analysiert werden. Allerdings weist das Nordpolarmeer eine geringe Dichte an Messungen auf, was nicht zuletzt auf die logistischen Herausforderungen der Messungen in großenteils meereisbedeckten Gebieten zurückzuführen ist. Sowohl die Erhebung neuer Messdaten als auch die gründliche Aufarbeitung und Zusammenführung historischer Daten von Temperatur, Salzgehalt und Makronährstoffen ist notwendig, um die entsprechenden Analysen der Advektionspfade und deren Änderungen durchzuführen. Innerhalb des Projektes APEAR wurden solche Daten aufbereitet, im Weiteren qualitätskontrolliert und in Analysen zu den Advektionspfaden benutzt. Dabei spielte auch die Datenerhebung während des Multidisciplinary Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAiC), neben anderen Expeditionen, eine wesentliche Rolle. Die Arbeiten sind in Zusammenarbeit mit Projektpartnern in UK als Teil des CAO Verbundes durchgeführt worden und werden zu gemeinsamen Publikationen führen, die auch Ergebnisse numerischer Modelle beinhalten wird.		
19. Schlagwörter Nordpolarmeer, Klimawandel, Zirkulation, Wassermassenanalyse, Nährstoffe, Ausbreitungspfade, MOSAiC		
20. Verlag	21. Preis	

## I. Kurze Darstellung

### 1. Aufgabenstellung

Hauptziel des Vorhabens war es, unter Nutzung historischer Daten, neuer Beobachtungen und hochauflösenden und durch Daten eingeschränkten Modellen, die Mechanismen zu untersuchen, die advective Flüsse von Nährstoffen und ökologischen Schlüsselsubstanzen bestimmen.

Zur Erfüllung der Aufgaben wurden folgende Ziele gesetzt:

- A) Synthese neuer und existierender Beobachtungen und Modellsimulationen, um die großskalige Zirkulation im oberen Nordpolarmeer im Hinblick auf physikalische Eigenschaften und Advektion biologisch wichtiger Substanzen zu analysieren.
- B) Quantifizierung von Änderungen in der Zufuhr biologisch wichtiger Substanzen zu unterschiedlichen Becken innerhalb des Nordpolarmeeres in den vergangenen Dekaden und die Erstellung von Zukunftsprojekten für das 21. Jahrhundert.
- C) Einschätzung der Änderungen von Zirkulationspfaden und Nährstoffausbreitung, möglichen Änderungen in künftigen Klimaszenarien und wie dadurch Änderungen in der arktischen Biogeochemie und Ökosystemen beeinflusst werden können; Bereitstellung von Daten und Datensynthesen zur Analyse von höheren Skalen des Ökosystems und von Sozioökonomie.
- D) Anpassung von Modellen durch historische Daten und kürzlich erhobene Beobachtungen, um Schlüsselprozesse in Wechselwirkungen zwischen Ozean und Ökosystem zu verstehen; Vorschläge für EMS Modellstrategien.

Wissenschaftliche Arbeitsziele:

- I. Erstellen einer Datensynthese existierender Beobachtungen im Nordpolarmeer
- II. Planung und Erhebung neuer Beobachtungen im Rahmen von Feldarbeiten, insbesondere als Teil des Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate" (MOSAIC), was im Eurasischen Becken des Nordpolarmeeres stattfinden und über einen vollen Jahresgang in 2019/20 laufen wird. Der Fokus ist hierbei auf Ozeanzustandsvariablen (Temperatur, Salzgehalt), Spurenstoffen („Tracern“, insbesondere SF6/CFC, Sauerstoffisotope) in Zusammenarbeit mit einem PP der Universität Göteborg (Schweden) und Nährstoffen (Silikat, Phosphat, Nitrat/Nitrit).
- III. Existierende Beobachtungen der Wassermasseneigenschaften und Nährstoffe auf regionaler Skala (Arktis) in einem Datenprodukt zusammenfassen und im Hinblick auf arktisweite Zirkulationsänderungen untersuchen.
- IV. Bestimmung von Änderungen im mittleren Zustand der Zirkulation im oberen Nordpolarmeer und der Variabilität des warmen Wassers atlantischen Ursprungs.
- V. Synthese der momentanen und künftigen Änderungen in arktischer Biogeochemie und Ökosystemen auf zwischenjährlichen bis dekadischen Skalen unter Berücksichtigung des Jahresgangs.
- VI. Bestimmung momentaner Änderungen im physikalischen Zustand und biogeochemischen Eigenschaften des Nordpolarmeeres: Beteiligung an den vom UK-Partner geleiteten Arbeiten zur Validierung von Model-Hindcasts, biogeochemischer Modellierung und Verständnis der Ausbreitungspfade und Flüsse von ökologischen Schlüsselsubstanzen.
- VII. Die obigen Arbeiten werden auch zu vom UK-Partner geleiteten Arbeiten zur Synthese der momentanen und künftigen Änderungen in arktischer Biogeochemie und Ökosystemen, sowie zu Projektionen für das 21. Jahrhundert beitragen.

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

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

Dr. Benjamin Rabe, Projektleiter (DE), Dr. Yevgeny Aksenov, Projektleiter (UK)

Dr. Myriel Vredenburg, Projektwissenschaftlerin, Dr. Janin Schaffer,

Projektwissenschaftlerin, Dr. Kirstin Schulz, Projektwissenschaftlerin, Dr. Sinhué Torres-Valdés, Projektwissenschaftler, Dr. Cèline Heuzè, Projektwissenschaftlerin, Dr. Michael Karcher, Projektwissenschaftler, Dr. Hiroshi Sumata, Projektwissenschaftler.

Das AWI verfügt über eine umfassende Raum-, Rechner-, Labor- und Instrumentenausstattung, die dem Projekt zur Verfügung stand. Eine besondere Rolle spielte die Bereitstellung des Forschungseisbrechers Polarstern, durch den auch Messungen in der zentralen Arktis möglich sind. Die instrumentelle Ausstattung der messenden Ozeanographie erlaubte die Feldarbeiten weitgehend durch institutionelle Mittel abzudecken.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die während der Schiffsexpedition TRANSDRIFT XXIV mit der Akademik Tryoshnikov in 2018 gesammelten Beobachtungsdaten lieferten einen wertvollen Beitrag zur Datensynthese, da die historische Datenabdeckung in der Laptewsee und Ostsibirischen See mangelhaft ist.

Das Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate" (MOSAiC) wurde aufwendig geplant, koordiniert und vorbereitet, ehe es vom Herbst 2019 bis Herbst 2020 stattfand. Durch internationale Kooperation wurde ein umfangreicher Datensatz verschiedenster Parameter in Atmosphäre, Eis und Ozean über ein gesamtes Jahr in der zentralen Arktis gewonnen, der für die Wissenschaft von unschätzbarem Wert ist.

Historische Beobachtungsdaten hydrographischer Wassermasseneigenschaften und Nährstoffen könnten zu einem umfangreichen Datenprodukt zusammengefasst werden. Die Daten wurden einer aufwendigen Qualitätskontrolle unterzogen und chemische Flaschendaten wurden kontinuierlichen hydrographischen Profilen zugeordnet. Das Datenprodukt soll noch dieses Jahr auf dem Datenrepositorium Pangaea veröffentlicht werden. Eine begleitende Publikation befindet sich derzeit in Vorbereitung.

Das Datenprodukt konnte dazu verwendet werden, Signaturen von Wasser pazifischen Ursprungs sowohl in den Nährstoffdaten als auch in den Wassermasseneigenschaften zu identifizieren und das räumliche Vorkommen dieser Wassermassen zu untersuchen. Diese Ergebnisse fließen in eine Synthese-Studie mit den UK-Partnern ein. Die hydrographischen Daten wurden dazu verwendet eine Beobachtungszeitreihe der Süßwasserverteilung und -inventare im Nordpolarmeer bis 2018 fortzuführen. Außerdem wurde die Kombination an kontinuierlichen hydrographischen Profilen und Nährstoffdaten dazu verwendet, die biologische Nährstoffaufnahme im oberen Nordpolarmeer historisch zu berechnen.

Mit Hilfe eines Ozeanzirkulationsmodells und Messungen von Jod-Konzentrationen (129I) in Wasserproben wurde die Zirkulation von warmem Atlantikwasser im zentralen Nordpolarmeer untersucht. Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Zeitschrift veröffentlicht.

Durch COVID-bezogene Verzögerungen von Datenprozessierung und Labortätigkeiten konnte die Auswertung der MOSAiC Beobachtungen erst verspätet begonnen werden. Erste Analysen der Wassermasseneigenschaften des oberen Ozeans und Vergleiche mit historischen Daten aus unserem Datenprodukt zeigen Veränderungen im Haloklinenwasser und im warmen Atlantikwasser. Durch nationale und internationale Kooperationen sollen die Analysen fortgeführt und in einer wissenschaftlichen Studie veröffentlicht werden.

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

Meereis- und Ozeanbeobachtungen der vorangegangenen Jahrzehnte stellten mehrere Änderungen in der Region Arktis heraus: Zum einen der Rückgang des Meereises über den gesamten Jahresgang hinweg, stärker ausgeprägt im Sommer und Herbst, aber auch deutlich sichtbar im Winter und Frühling. Dies wird durch Verringerung der Eisdicke und

der Eiskonzentration begleitet [z.B. Laxon et al 2013; Maslanik et al., 2011], obwohl das Meereisvolumen kürzlich angestiegen ist [e.g., Tilling et al 2015]. Die Fragmentation des Meereises hat sich außerdem erhöht (Eisschollen werden kleiner) und die Beschleunigung des Meereises ist stärker geworden [Giles et al, 2012]. Weitere Änderungen sind in oberen und mittleren Tiefen des Nordpolarmeeres sichtbar: der Spin-Up der Zirkulation des oberen Ozeans durch stärkere Winde, direkte Anbindung größerer Ozeanflächen an die Atmosphäre durch geringere Eisbedeckung [z.B. Giles et al., 2012; Armitage et al 2016], Änderungen im Süßwassergehalt [Proshutinsky et al., 2009; Rabe et al., 2011, 2014; Giles et al., 2012] und die Ausbreitungspfade der dominanten Wassermassen im Nordpolarmeer, Wasser atlantischen und pazifischen Ursprungs [e.g., Aksenov et al 2016; Janout et al., 2015; Polyakov et al 2017; Karcher et al, 2012].

Die Vermischung im Ozean in den Bereichen der Kontinentalhänge und Meeresrücken hat sich durch die Wechselwirkung zwischen Strömungen, steiler Topographie, Leewellen [z.B. Rippeth et al 2015; Lincoln et al., 2016] und Gezeiten tides [Luneva et al., 2015] erhöht. Die erhöhte Anbindung des Ozeans an die Atmosphäre und das Auslösen von nahezu-Intertialwellen hat zu erhöhter Vermischung in der vermischten Deckschicht und der Halokline geführt [z.B. Martini et al., 2014]. Der Jahresgang des Meereises und des Ozeans hat sich ebenso verändert: eine längere eisfreie Jahreszeit auf den arktischen Schelfmeeren und dem kanadischen Teil des Nordpolarmeeres und die Anbindung der Ozeanoberfläche an die warme Atmosphäre im Sommer erwärmt die obere Wassersäule und erhöht die Schichtung im oberen Bereich der Deckschicht. Die vermindert den Austausch von Impuls und Masse zwischen der Ozeanoberfläche und dem tieferen Teil des Ozeans. Auf der anderen Seite führt eine intensivere Eisbildung im Herbst zu höherem Salzeintrag und Dichtefluss in den Ozean und erhöht somit die Vermischung, was einen negativen „Feedback“ in den oben beschriebenen Wechselwirkungen darstellt.

Beobachtungen zeigen, dass die Eisrandzone („Marginal Ice Zone“, MIZ), ein Bereich niedriger Eiskonzentration, der aus einer weitläufig verteilten Ansammlung von kleinen Eisschollen besteht, sich vergrößert hat. Modellprognosen sagen eine Vergrößerung der MIZ von momentan 10% auf 80% der Meereisbedeckung im Sommer bis zum Jahr 2050 voraus. Dies weist darauf hin, dass die gesamte Meereisbedeckung bis zur Mitte dieses Jahrhunderts Teil der MIZ wird [Aksenov et al 2017]. In Folge werden die atmosphärischen und ozeanischen Grenzschichten [Lupkes et al 2012; Elvidge et al., 2016], der Austausch zwischen Atmosphäre, Meereis und Ozean [z.B. Tsamados 2014] und die Nährstoffflüsse in biologisch aktiven Bereichen verändert [Polyakov et al., 2013; Janout et al., 2016].

Diese Änderungen haben bis jetzt wenig Aufmerksamkeit in der wissenschaftlichen Community, in der Politik und in der Allgemeinbevölkerung erhalten. Dies ist auf ein Fehlen von beckenweiten Langzeitbeobachtungen in der Arktis zurückzuführen. Allerdings wurde durch Beobachtungen des Nordpolarmeeres in den vergangenen drei Dekaden klar, dass diese Änderungen im Ozean [Rudels et al., 2013, 2015] genauso von Bedeutung sind wie die im Meereis. Die Klimaprognosen des Intergovernmental Panel for Climate Change Assessment [IPCC AR5, 2014] und kürzlich verfügbare hochauflösende Zukunftsprognosen aus Erdsystemmodellen (ESM) [z.B. Yool, 2013; Aksenov et al 2017] legen nahe, dass die momentanen Trends in Meereis und oberem Ozean weitergehen werden und sich sogar erhöhen. Desweiteren werden auch die mittleren Bereiche der Wassersäule im Nordpolarmeer starke Änderungen aufweisen. Die größten Änderungen sind im atlantischen Teil der Arktis vorhergesagt. Modelle sagen eine Intensivierung des Zustroms von Wasser atlantischen Ursprungs in den eurasischen Teil des Nordpolarmeeres (Nansen- und Amundsenbecken) und eine gleichzeitige Verringerung des Ozeanaustausches über den Lomonosovrücken voraus. Es wird prognostiziert, dass die Zirkulationssysteme im eurasischen und im amerasischen (Kanada- und Makarovbecken) Teil des Nordpolarmeeres nur schwach entlang des sibirischen Kontinentalhangs gekoppelt sein werden. Es wird erwartet, dass Wasser atlantischen Ursprungs innerhalb der eurasischen Arktis stark rezirkuliert, was den Zustrom dieses Wasser in die kanadische Arktis reduzieren würde (Abbildung 1) [Aksenov et al., 2017]. Diese These wird durch vorhergehende und laufende

Beobachtungsanalysen unterstützt [Rudels et al., 2015]. Diese Änderungen hätten Einfluss auf arktischen Ökosysteme, Fischerei, lokale Industrie und die lokale Bevölkerung [<http://www.earctic.org/>]. Die Primärproduktion in der eurasischen Arktis ist momentan limitiert durch Nährstoffe und Licht [Fernandez-Méndez et al 2015] und es wird prognostiziert, dass sie in Zukunft licht-limitiert wird [Popova et al 2012].

Demgegenüber ist der Einstrom von Wasser pazifischen Ursprungs durch die Meerenge der Beringstraße limitiert und könnte in der Zukunft nährstofflimitiert werden [Popova et al 2010; Aksenov et al. 2016]. Die vorhergesagte Entkopplung der Zirkulationssysteme weist auf eine stärkere Trennung der Primärproduktion und der Ökosystemregime im eurasischen und im amerasischen Teil des Norpolarmeers in der Zukunft hin.

Die obigen Prozesse sind die Basis für die Untersuchung folgender Hypothese in APEAR: Durch den arktischen Meereisrückgang wird der Austausch von Nährstoffe transportierenden Wassermassen atlantischen und pazifischen Ursprungs über den Lomonosovrücken durch Änderungen im Impulsfluss zwischen Atmosphäre, Meereis und Ozean modifiziert. Die Zirkulationssysteme in der eurasischen und amerasischen Arktis könnten dann weniger gekoppelt sein. Während die regionalen Unterschiede im Ozean und Ökosystemen stärker werden könnten, kann eine verlängerte eisfreie Zeit im Jahr Unterschiede zwischen den zwei Zirkulationsgebieten der Arktis durch stärkere haline Konvektion und wind-/wellengetriebene Vermischung abschwächen.

Dieses Projekt wird damit das Verständnis von Schlüsselprozessen, die Änderungen im arktischen Ökosystem mit Änderungen in den physikalischen Größen der Ozeanumgebung verbinden, verbessern. Dies wird ein neues Verständnis der fundamentalen Prozesse in arktischem Klimawandel ermöglichen und, daher, helfen, Unsicherheiten in Klimasimulationen für Projektionen der Zukunft zu verringern [Swart et al, 2015]. Robuste Klimaprojektionen sind wesentlich für verlässlichere Einschätzungen des Einflusses auf Umwelt und Sozioökonomie in der Arktis.

## Literatur

- Aksenov, Y., **Karcher, M.**, Proshutinsky, A., Gerdes, R., De Cuevas, B., Golubeva, E., Kauker, F., Nguyen, A.T., Platov, G.A., Wadley, M., Watanabe, E., Coward, A.C. and Nurser, A.J. (2016),: Arctic pathways of Pacific Water: Arctic Ocean Model Intercomparison experiments, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 27–59, doi:10.1002/2015JC011299.
- Armitage, T. W. K., S. Bacon, A. L. Ridout, S. F. Thomas, Y. Aksenov, and D. J. Wingham (2016), Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, 2003–2014, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 4303–4322, doi:10.1002/2015JC011579.
- Behrendt, A., **Sumata, H., Rabe, B.** and Schauer, U. (2017b): A comprehensive, quality-controlled and up-to-date data set of temperature and salinity data for the Arctic Mediterranean Sea (Version 1.0), links to data files. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.872931>.
- Behrendt, A., **Sumata, H., Rabe, B.,** and Schauer, U. (2017a): UDASH – Unified Database for Arctic and Subarctic Hydrography, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2017-92>, in review.
- Dodd, P. A., **B. Rabe**, E. Hansen, E. Falck, A. Mackensen, E. Rohling, C. Stedmon, and S. Kristiansen (2012), The freshwater composition of the Fram Strait outflow derived from a decade of tracer measurements, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:{10.1029/2012JC008011}.
- Elvidge, A. D., I. A. Renfrew, A. I. Weiss, I. M. Brooks, T. A. Lachlan-Cope, and J. C. King (2016), Observations of surface momentum exchange over the marginal ice zone and recommendations for its parametrisation, *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS*, 16(3), 1545–1563, doi:{10.5194/acp-16-1545-2016}.
- Fernandez-Mendez, M., C. Katlein, **B. Rabe**, M. Nicolaus, I. Peeken, K. Bakker, H. Flores, and A. Boetius (2015), Photosynthetic production in the Central Arctic during the record sea-ice minimum in 2012, *Biogeosciences*, 12, 3525–3549, doi:10.5194/bg-12-3525-2015.
- Giles, K.A., Laxon, S.W., Ridout, A.L., Wingham, D.J., Bacon, S., 2012. Western Arctic Ocean freshwater storage increased by wind-driven spin-up of the Beaufort Gyre. *Nat. Geosci.* <http://dx.doi.org/10.1038/NCEO1379>.

- Haine, T. W., Curry, B., **Gerdes, R.**, Hansen, E., **Karcher, M.**, Lee, C., & Woodgate, R. (2015). Arctic freshwater export: Status, mechanisms, and prospects. *Global and Planetary Change*, 125, 13-35.
- IPCC AR5 (2014), see <https://ipcc.ch/report/ar5/>.
- Itkin, P., **M. Karcher**, and R. Gerdes (2014), Is weaker Arctic sea ice changing the Atlantic water circulation?, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 5992–6009, doi:10.1002/2013JC009633.
- Janout, M. A., Y. Aksenov, J. A. Hoelemann, **B. Rabe**, U. Schauer, I. V. Polyakov, S. Bacon, A. C. Coward, **M. Karcher**, Y.-D. Lenn, H. Kassens, and L. Timokhov (2015), Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 120(7), 4925–4944, doi:{10.1002/2014JC010635}.
- Janout, M., J. Hoelemann, B. Juhls, T. Krumpfen, **B. Rabe**, D. Bauch, C. Wegner, H. Kassens, and L. Timokhov (2016), Episodic warming of near-bottom waters under the Arctic sea ice on the central Laptev Sea shelf, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 43(1), 264–272, doi:{10.1002/2015GL066565}.
- Karcher, M.**, Beszczynska-Möller, A., Kauker, F., Gerdes, R., Heyen, S., Rudels, B. and Schauer, U. (2011), Arctic Ocean warming and its consequences for the Denmark Strait overflow, *J. Geophys. Res.*, 116, C02037, doi:10.1029/2010JC006265.
- Karcher, M.**, Gerdes, R., Kauker, F., Köberle, C. and Yashayev, I. (2005), Arctic Ocean change heralds North Atlantic freshening. *Geophysical research letters*, 32(21), L21606. doi:10.1029/2005GL023861.
- Karcher, M.**, Smith, J. N., Kauker, F., Gerdes, R. and Smethie Jr, W. (2012): Recent changes in Arctic Ocean circulation revealed by 129-Iodine observations and modelling, *Journal of Geophysical Research-Oceans*.doi: 10.1029/2011JC007513
- Korhonen, M., B. Rudels, M. Marnela, A. Wisotzki, and J. Zhao (2013), Time and space variability of freshwater content, heat content and seasonal ice melt in the Arctic Ocean from 1991 to 2011, *OCEAN SCIENCE*, 9(6), 1015–1055, doi:{10.5194/os-9-1015-2013}.
- Laxon, S. W., K. A. Giles, A. L. Ridout, D. J. Wingham, R. Willatt, R. Cullen, R. Kwok, A. Schweiger, J. Zhang, C. Haas, S. Hendricks, R. Krishfield, N. Kurtz, S. Farrell, and M. Davidson (2013), CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 40(4), 732–737, doi:{10.1002/grl.50193}.
- Lincoln, B. J., T. P. Rippeth, Y.-D. Lenn, M. L. Timmermans, W. J. Williams, and S. Bacon (2016), Wind-driven mixing at intermediate depths in an ice-free Arctic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*,43,9749–9756, doi:10.1002/2016GL070454.
- Luepkes, C., V. M. Gryanik, J. Hartmann, and E. L. Andreas (2012), A parametrization, based on sea ice morphology, of the neutral atmospheric drag coefficients for weather prediction and climate models, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-ATMOSPHERES*, 117, doi:{10.1029/2012JD017630}.
- Luneva, M. V., Y. Aksenov, J. D. Harle, and J. T. Holt (2015), The effects of tides on the water mass mixing and sea ice in the Arctic Ocean, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 120(10), 6669–6699, doi:{10.1002/2014JC010310}.
- MacGilchrist, G.A., A. Naveira Garabato, T. Tsubouchi, S. Bacon, **S. Torres-Valdés**, and K. Azetsu-Scott (2014): “The Arctic Ocean carbon sink,” *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 86, pp. 39–55.
- Martini, K. I., H. L. Simmons, C. A. Stoudt, and J. K. Hutchings (2014), Near-Inertial Internal Waves and Sea Ice in the Beaufort Sea, *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, 44(8), 2212–2234, doi:{10.1175/JPO-D-13-0160.1}.
- Maslanik, J., J. Stroeve, C. Fowler, and W. Emery (2011), Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 38, doi:{10.1029/2011GL047735}.
- Polyakov, I. V., V. A. Alexeev, I. M. Ashik, S. Bacon, A. Beszczynska-Moeller, E. C. Carmack, I. A. Dmitrenko, L. Fortier, J.-C. Gascard, E. Hansen, J. Hoelemann, V. V. Ivanov, T. Kikuchi, S. Kirillov, Y.-D. Lenn, F. A. McLaughlin, J. Piechura, I. Repina, L. A. Timokhov, W. Walczowski, and R. Woodgate (2011), Fate of Early 2000s Arctic Warm Water Pulse, *BULLETIN OF THE AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, 92(5), 561–566, 5/6

- Polyakov, I. V., A. V. Pnyushkov, R. Rember, L. Padman, E. C. Carmack, and J. M. Jackson (2013a), Winter Convection Transports Atlantic Water Heat to the Surface Layer in the Eastern Arctic Ocean, *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, 43(10), 2142–2155, doi:{10.1175/JPO-D-12-0169.1}.
- Polyakov, I. V., U. S. Bhatt, J. E. Walsh, E. P. Abrahamson, A. V. Pnyushkov, and P. F. Wassmann (2013b), Recent oceanic changes in the Arctic in the context of long-term observations, *ECOLOGICAL APPLICATIONS*, 23(8), 1745–1764, doi:{10.1890/11-0902.1}.
- Polyakov, I., U. S. Bhatt, J. E. Walsh, E. P. Abrahamson, A. V. Pnyushkov, and P. F. Wassmann (2013), Recent oceanic changes in the Arctic in the context of long-term observations, *Ecological Applications*, 23, 1745–1764, doi:10.1890/11-0902.1.
- Popova, E. E., A. Yool, A. C. Coward, Y. K. Aksenov, S. G. Alderson, B. A. de Cuevas, and T. R. Anderson (2010), Control of primary production in the Arctic by nutrients and light: insights from a high resolution ocean general circulation model, *BIOGEOSCIENCES*, 7(11), 3569–3591, doi:{10.5194/bg-7-3569-2010}.
- Popova, E. E., A. Yool, A. C. Coward, F. Dupont, C. Deal, S. Elliott, E. Hunke, M. Jin, M. Steele, and J. Zhang (2012), What controls primary production in the Arctic Ocean? Results from an intercomparison of five general circulation models with biogeochemistry, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 117, doi:{10.1029/2011JC007112}.
- Proshutinsky, A., R. Krishfield, M.-L. Timmermans, J. Toole, E. Carmack, F. McLaughlin, W. J. Williams, S. Zimmermann, M. Itoh, and K. Shimada (2009), Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JC005104.
- Rabe, B., Karcher, M., Kauker, F., Schauer, U.**, Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., Kikuchi, T., Su, J., 2014. Arctic Ocean basin liquid freshwater storage trend 1992–2012. *Geophys. Res. Lett.* 41, 961 – 968. <http://dx.doi.org/10.1002/2013GL058121>
- Rabe, B., Karcher, M., Schauer, U.**, Toole, J.M., Krishfield, R.A., Pisarev, S., **Kauker, F., Gerdes, R.**, Kikuchi, T., 2011. An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the 2006 – 2008 period. *Deep-Sea Res. I* 58, 173–185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2010.12.002>
- Rabe, B.**, P. A. Dodd, E. Hansen, E. Falck, **U. Schauer**, A. Mackensen, A. Beszczynska-Möller, G. Kattner, E. J. Rohling, and K. Cox (2013), Export of Arctic freshwater components through the Fram Strait 1998–2011, *Ocean Sci.*, 9, 91–109, doi:10.5194/os-9-91-2013.
- Rabe, B., Schauer, U.**, Mackensen, A., **Karcher, M.**, Hansen, E. and Beszczynska-Möller, A. (2009), Freshwater components and transports in the Fram Strait: - recent observations and changes since the late 1990s. *Ocean Sci.*, 5, 219–233.
- Rippeth, T. P., B. J. Lincoln, Y.-D. Lenn, J. A. M. Green, A. Sundfjord, and S. Bacon (2015), Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography, *NATURE GEOSCIENCE*, 8(3), 191–194, doi:{10.1038/NGEO2350}.
- Rudels, R., E. P. Jones, U. Schauer, and P. Ericksson (2004), Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters, *Polar Research*, 23(2), 181–208.
- Rudels, B., Schauer, U., Björk, G., Korhonen, M., Pisarev, S., **Rabe, B.**, and Wisotzki, A. (2013) "Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s", *Ocean Sci.*, 9, 147–169, doi:10.5194/os-9-147-2013.
- Rudels, B., Korhonen, M., Schauer, U., Pisarev, S., **Rabe, B.**, and Wisotzki, A. (2015) "Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget" *Prog. Oceanogr.*, 132, pp. 128–152, doi:10.1016/j.pcean.2014.04.003.
- Sumata, H.**, Kauker, F., **Karcher, M., Rabe, B.**, Timmermans, M.-L., Behrendt, A., Gerdes, R., Schauer, U., Shimada, K., Cho, K.-H., and Kikuchi, T.: Decorrelation scales for Arctic Ocean Hydrography. Part I: Amerasian Basin, *Ocean Sci.*, 2018, in press.
- Swart, C.S., Fyfe, J.C., Hawkins, E. Kay, J.E. and Jahn, A. (2015): Influence of internal variability on Arctic sea-ice trends *Nature Climate Change* 5, 86–89, doi:10.1038/nclimate2483.

- Tilling, R., Ridout, Al, Shepher, A. and Wingham, D.J. (2015): Increased Arctic sea ice volume after anomalously low melting in 2013, *Nature Geoscience*, 8, pages 643–646, doi:10.1038/ngeo2489
- Torres-Valdés, S.**, T. Tsubouchi, E. Davey, I. Yashayaev, and S. Bacon (2016), Relevance of dissolved organic nutrients for the Arctic Ocean nutrient budget, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 6418–6426, doi:10.1002/2016GL069245.
- Torres-Valdés, S.**, T. Tsubouchi, S. Bacon, A. C. Naveira-Garabato, R. Sanders, F. A. McLaughlin, B. Petrie, G. Kattner, K. Azetsu-Scott, and T. E. Whitledge (2013), Export of nutrients from the Arctic Ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 1625–1644, doi:10.1002/jgrc.20063.
- Tsamados, M., D. L. Feltham, D. Schroeder, D. Flocco, S. L. Farrell, N. Kurtz, S. W. Laxon, and S. Bacon (2014), Impact of Variable Atmospheric and Oceanic Form Drag on Simulations of Arctic Sea Ice\*, *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, 44(5), 1329–1353, doi:{10.1175/JPO-D-13-0215.1}.
- Yool, A., E. E. Popova, A. C. Coward, D. Bernie, and T. R. Anderson (2013), Climate change and ocean acidification impacts on lower trophic levels and the export of organic carbon to the deep ocean, *BIOGEOSCIENCES*, 10(9), 5831–5854, doi:{10.5194/bg-10-5831-2013}.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das NOC war als Projektpartner kontinuierlich in die Arbeiten in APEAR als Teil gemeinsamer Diskussionen und folgender Analysen involviert. Innerhalb von MOSAiC gab es weitreichende Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums, u.a. bei der Probennahme und Planung der Feldarbeiten und folgender Analyse (siehe gemeinsame Publikationen unter II.1. Weiterhin bestand enge Zusammenarbeit mit den BMBF-geförderten Projekten MVRE, PEANUTS und RACE.

## II. Eingehende Darstellung

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

Die Zuwendungen wurde verwendet zur Finanzierung der *Wissenschaftlerstellen* für  
 Dr. Myriel Vredenburg, angestellt von 01.08.2018 bis 31.12.2021 (Mutterschutz und Elternzeit: 26.12.2019 bis 15.01.2021)  
 Dr. Janin Schaffer, angestellt 16.03.2020 bis 15.07.2020  
 Dr. Kirstin Schulz, angestellt 01.07.2021 bis 31.08.2021

### *Inlandsreisen:*

MOSAiC Implementation Workshop, Potsdam, März 2019 (Vredenburg; 386,25 €)

### *Auslandsreisen:*

CAO Meeting in Birmingham, UK, Januar 2019 (Rabe, Vredenburg; 1.228,95 €)

EGU General Assembly, Wien, AT, April 2019 (Vredenburg; 1.318,53 €)

ASOF Meeting, Kopenhagen, DK, April 2019 (Vredenburg; 117,94 €)

APEAR Projekttreffen, Southampton, UK, September 2019 (Vredenburg, Rabe; 2.070,24 €)

vEGU General Assembly, virtuell, April 2021 (Vredenburg; 210 €)



Folgende Studien wurden unternommen, untergliedert nach den in I.1. aufgelisteten Zielsetzungen:

### 1.1 Datensynthese existierender Beobachtungen im Nordpolarmeer

Projektwissenschaftlerin Myriell Vredenburg hat alle öffentlich verfügbaren und am AWI existierenden Beobachtungsdatensätze aus dem zentralen Nordpolarmeer für den Zeitraum 1980 bis 2018 zusammengetragen. Dabei hat Frau Vredenburg die kontinuierlichen Temperatur- und Salzgehaltsprofile den separat veröffentlichten Flaschendaten (Nährstoffe, Fluorchlorkohlenwasserstoffe(FCKW)/SF6) räumlich wie auch zeitlich zugeordnet und in einem Datensatz zusammengefasst. Die Gesamtanzahl der zusammengetragenen Temperatur- und Salzgehaltsprofilen beträgt >105.000 und die Anzahl der Nährstoff- und FCKW/SF6-Profilen liegt bei >2.500. Dabei konnten etwa 65% der Nährstoff- und FCKW/SF6-Profilen vorhandenen Temperatur- und Salzgehaltsprofilen zugeordnet werden. Die Beobachtungsdaten aus der Datensynthese zeigen eine gute räumliche Abdeckung im zentralen Nordpolarmeer (Abb. 1+2).

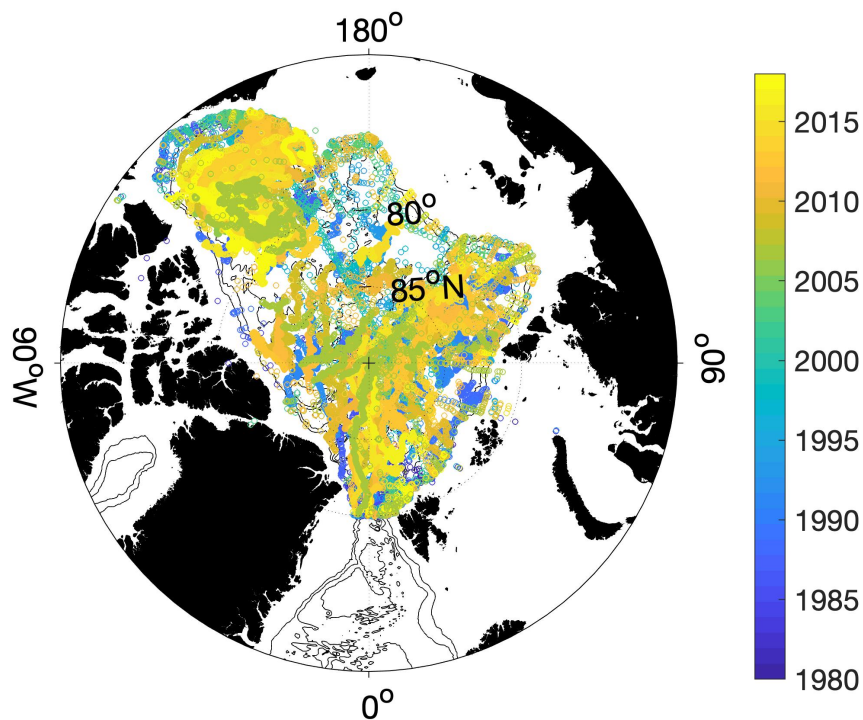


Abbildung 1: Räumliche Abdeckung der hydrographischen Profile aus dem in der Datensynthese zusammengestellten Beobachtungsdatensatz. Die zeitliche Abdeckung ist farblich dargestellt.

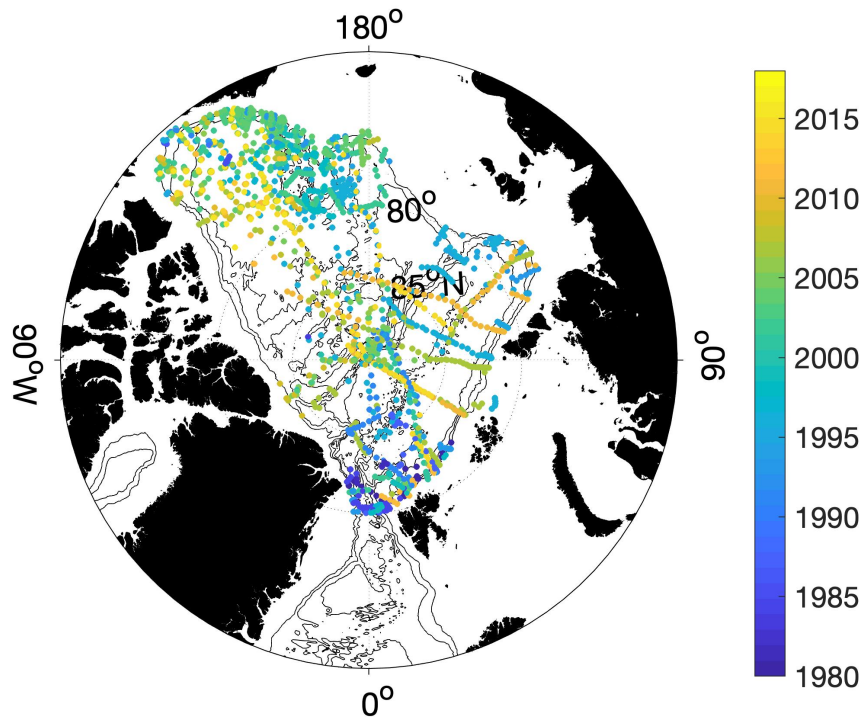


Abbildung 2: Räumliche Abdeckung der chemischen Flaschendaten-Profile aus dem in der Datensynthese zusammengestellten Beobachtungsdatensatz. Die zeitliche Abdeckung ist farblich dargestellt.

## 1.2 Planung und Erhebung neuer Beobachtungen im Rahmen von Feldarbeiten

Antragsteller Benjamin Rabe und Projektwissenschaftlerin Myriel Vredenburg nahmen vom 18. August bis zum 29. September 2018 an der Schiffsexpedition TRANSDRIFT XXIV mit der Akademik Tryoshnikov in die Laptewsee und Ostsibirische See teil. Die Expedition startete und endete in Archangelsk, Russland.

Es wurden insgesamt 145 hydrographische Profile mit der Schiffs-CTD (Conductivity Temperature Depth) gemessen und zusätzlich an einigen Fahrtabschnitten hydrographische Unterwegsmessungen (Underway CTD) vorgenommen. Diese Messungen flossen in den von Frau Vredenburg erstellten Beobachtungsdatensatz und stellen eine wichtige Ergänzung dar, um großskalige Änderungen in der Hydrographie und Zirkulation des Nordpolarmeeres zu untersuchen. Der Bezug zu den kleinskaligen Prozessen findet über die Zusammenarbeit mit dem ebenfalls durch NERC-CAO/BMBF geförderten PEANUTS Projekt statt

Die Planungen und Vorbereitungen der ozeanographischen Feldarbeiten innerhalb des Multidisciplinary Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC) wurden vom Antragsteller Benjamin Rabe und von der am Projekt beteiligten Wissenschaftlerin Céline Heuzé koordiniert und von den Projektwissenschaftlerinnen Myriel Vredenburg, Kirstin Schulz und Janin Schaffer unterstützt. Alle beteiligten AWI-Wissenschaftler des Teams OZEAN trafen sich einmal pro Monat, um Informationen auszutauschen und die Planung voranzubringen. Das einjährige Eis-Drift-Experiment innerhalb MOSAIC fand vom 20. September 2019 bis zum 12. Oktober 2020 statt und umfasste 5 Fahrtabschnitte (Abb. 3).

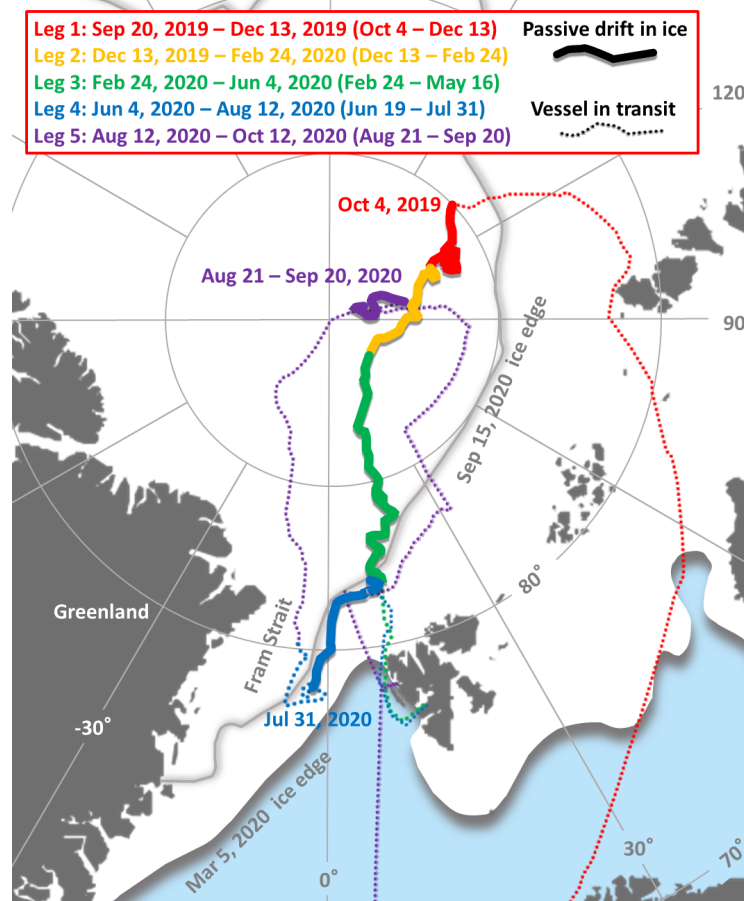


Abbildung 3: Drift- und Fahrtverlauf des einjährigen MOSAiC Eis-Drift-Experiments. Die Farben kennzeichnen die verschiedenen Expeditionsabschnitte. Die dicken Linien veranschaulichen die passive drift mit dem Meereis, die gestrichelten Linien die Transitfahrten des Forschungsschiffes Polarstern.

Beteiligte Wissenschaftler:innen (Projektwissenschaftlerin Janin Schaffer; Projektwissenschaftlerin Kirstin Schulz, Antragsteller Benjamin Rabe; projektbeteiligter Wissenschaftler Sinhué Torres-Valdés) nahmen für das Projekt an Feldarbeiten innerhalb der MOSAiC-Expedition teil. Dies beinhaltete unter anderem die Probenahme von FCKW-SF6 und Nährstoffen, Messungen von Temperatur- und Salzgehalt, sowie Koordination. Die Nährstoffproben konnten in 2021 erfolgreich im Labor analysiert werden, die Datenaufarbeitung ist in 2022 noch laufend. Ebenso liegen zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes noch nicht alle Temperatur- und Salzgehaltsprofile nach finaler Prozessierung vor.

### 1.3 Zusammenfassung existierender Beobachtungen der Wassermasseneigenschaften und Nährstoffe des Nordpolarmeers in einem Datenprodukt

Projektwissenschaftlerin Myriel Vredenburg hat die >105.000 hydrographischen Profile der Datensynthese (s. II.1.1) einer aufwendigen Qualitätsprüfung unterzogen. Die Qualitätsprüfung beinhaltet Prüfungen auf

- Duplikate
- Plausibilität der geographischen Position
- Ausreißer und fehlerhafter Ausschläge in den Zustandsvariablen
- Verdächtige vertikale Gradienten
- Dichteinstabilitäten
- Statistische Plausibilität der Zustandsvariablen durch Vergleich mit einer Klimatologie.

In etwa 500 Profile wurden nach einer automatisierten Qualitätsprüfung zusätzlich visuell überprüft und davon ca. 50 Profile als auffällig markiert. Die Prüfungen auf Dichteinstabilitäten und Statistische Plausibilität der Zustandsvariablen wurden ausschließlich automatisiert durchgeführt und führten zu einer Markierung von ca. 2000 Profile als auffällig (Abb. 4).

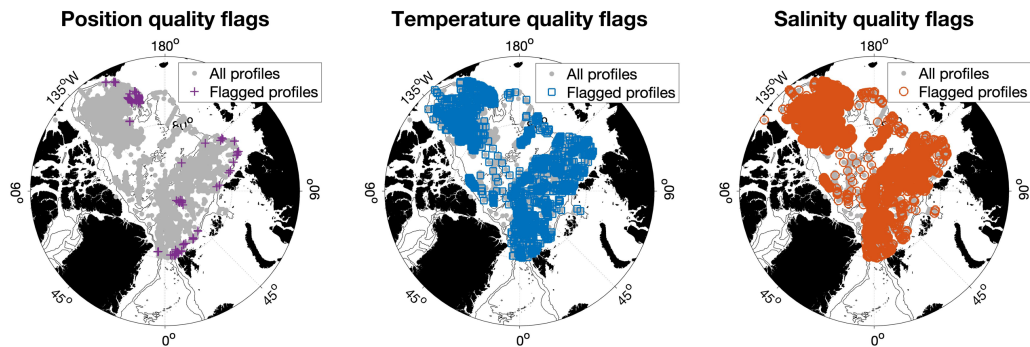


Abbildung 4: Position der Salzgehalts- und Temperatur-Profile vor und nach der Qualitätsprüfung.

Ebenso hat Frau Vredenberg die >2.500 Nährstoff-Flaschendaten-Profile der Datensynthese (s. II.1.1) aufwändig auf ihre Qualität überprüft. Dies beinhaltete Prüfungen auf

- Duplikate
- Plausibilität der geographischen Position
- Plausibilität der Datenwertspannweite
- Statistische Plausibilität der Zustandsvariablen durch Vergleich mit einer Klimatologie

Die Qualitätsprüfung der Nährstoffdaten fand in enger Abstimmung mit dem am Projekt beteiligten Wissenschaftler Sinhué Torres-Valdés statt.

In etwa 350 Profile wurden nach einer automatisierten Qualitätsprüfung zusätzlich visuell überprüft und ca. 15 Profile als auffällig markiert.

Begleitend zur Veröffentlichung des Datenproduktes im Datenrepositorium Pangaea soll eine Publikation in einem peer-reviewed Daten-Journal veröffentlicht werden. Beides befindet sich derzeit in Vorbereitung.

#### 1.4 Änderungen der Zirkulation des oberen Nordpolarmeeres und des warmen Atlantikwassers

Der am Projekt beteiligte Wissenschaftler Michael Karcher hat die Zirkulation von warmem Atlantikwasser mit einem Ozeanzirkulationsmodell und Messungen von 129l in Wasserproben der Arktis untersucht. Dabei wurde eine in 2015 verstärkt antizyklonale Zirkulation in der warmen Atlantikwasserschicht, relativ zu den 1990ern, gefunden (Abb. 5). Dies ging mit einer großskaligen Änderung des atmosphärischen Oberflächendrucks repräsentiert durch weniger positive Werte der sogenannten Arktischen Oszillation („Arctic Oscillation“) einher. In Zusammenarbeit mit internationalen Kolleg:innen wurde die Studie in Smith et al. (2021) publiziert.

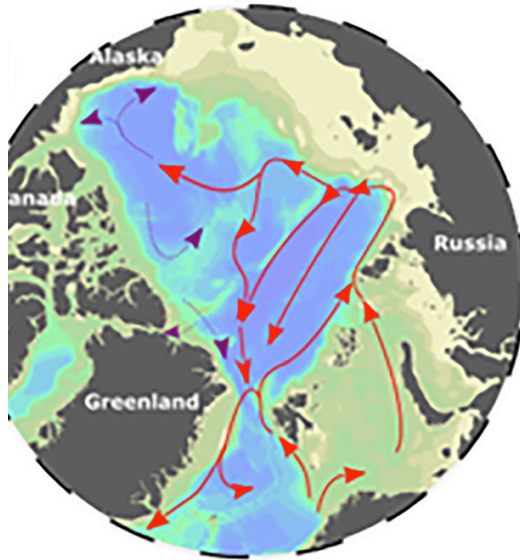


Abbildung 5: Zirkulationspfade des mit der Framstraße assoziierten warmen Atlantikwassers unter Einfluss des in 2015 vorherrschenden antizyklonalen Zirkulationsregimes (modifiziert nach Figure 12b, Smith et al., 2021). Die Simulationsergebnisse stimmen mit den Messungen in der Studie überein.

Projektwissenschaftlerin Myriell Vredenburg hat vorläufige Temperatur- und Salzgehaltsprofile der MOSAiC Expedition hinsichtlich hydrographischer Besonderheiten in den oberen Wasserschichten untersucht. Eine der großen Herausforderungen bei der Auswertung der während MOSAiC gewonnenen Daten, ist das Unterscheiden saisonaler und regionaler Effekte. Deshalb haben wir den Beobachtungsdatensatz hydrographischer Messungen mit der Schiffs-CTD räumlich unterteilt und für jede Region einen Vergleich zu historischen Beobachtungsdaten aus unserem Datenprodukt angestellt (S. Abb. 6).

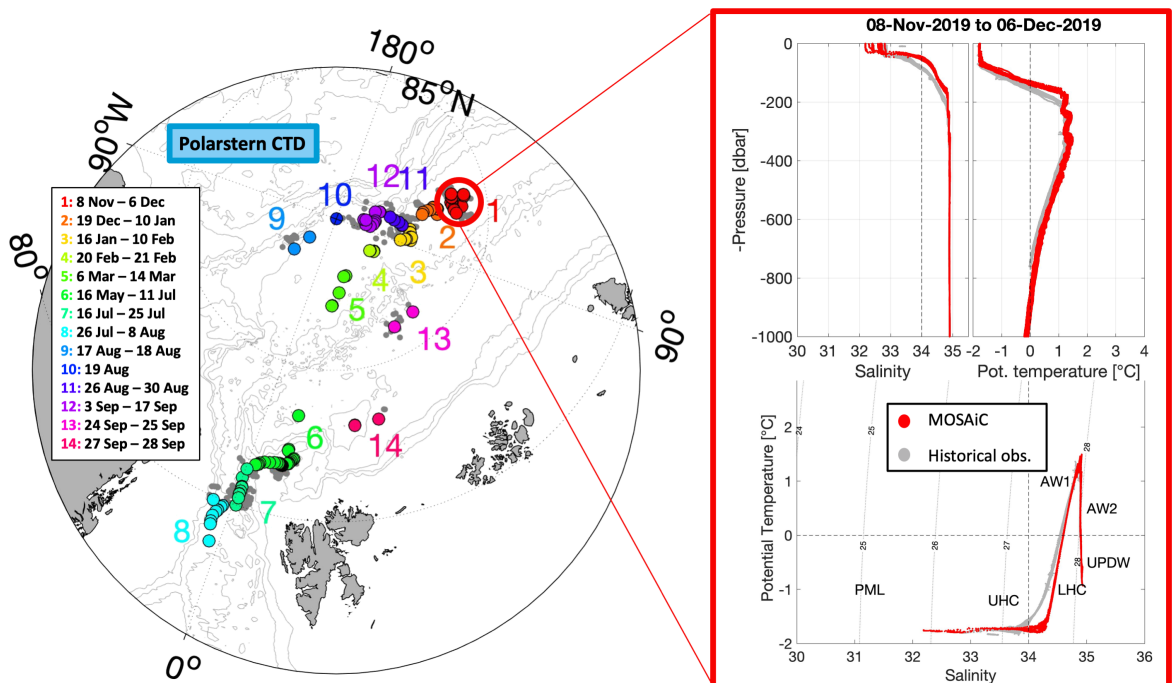


Abbildung 6: Geographische Position der während MOSAiC ausgeführten hydrographischen Messungen mit der Schiffs-CTD (links) sowie Temperatur- und Salzgehaltsprofile im östlichen Amundsenbecken (rechts) während MOSAiC (rot) im Vergleich zu historischen Beobachtungsdaten (grau). Die Farben in der Karte (links) kennzeichnen verschiedene Regionen, in die der Datensatz unterteilt wurde. Die Legende gibt die entsprechenden Zeiträume an. Die geographischen Positionen der zum Vergleich genutzten historischen Beobachtungsdaten sind als graue Punkte in der Karte dargestellt. Im Temperatur-Salzgehalts-Diagramm sind die populärsten Wassermassen markiert: Polare Deckschicht (PML), Obere Halokline (UHC), Untere Halokline (LHC), Oberes Atlantikwasser (AW1), Unteres Atlantikwasser (AW2), Oberes

Polartiefenwasser (UPDW).

In der ersten Region, die sich im östlichen Amundsenbecken befindet und Daten aus November bis Dezember 2019 enthält, zeigt sich in den Beobachtungsdaten aus MOSAiC eine auffällige Abweichung von den historischen Daten in der unteren Halokline (LHC; s. Abb. 6). Die untere Halokline war in 2019 deutlich kühler und salziger als in den vorangegangenen Jahren und Dekaden.

Die untere Halokline wird im Eurasischen Becken des Nordpolarmeeres in der Regel durch zwei verschiedene Mechanismen gebildet. Entweder sie bildet sich konvektiv durch eine Kombination aus Temperaturabfall zum Gefrierpunkt und Durchmischung im Winter sowie Süßwasserzufuhr durch Meereisschmelze im Sommer (Kikuchi et al., 2004). Oder sie bildet sich advektiv-konvektiv durch Süßwassereintrag über Flüsse oder Meereisschmelze (Kikuchi et al., 2004). Die konvektiv gebildete untere Halokline wird in der Regel nördlich der Framstraße oder weiter stromaufwärts gebildet, während die advektiv-konvektiv gebildete untere Halokline typischerweise der Barentssee entspringt (Rudels et al., 2012). Durch die unterschiedlichen Bildungsregionen lassen sich Rückschlüsse auf Zirkulationspfade ziehen.

Historische Beobachtungen zeigen eine Ausbreitung der konvektiv gebildeten Haloklinenwasser vornehmlich im Nansenbecken und nahezu ausschließlich advektiv-konvektiv gebildete Haloklinenwasser im Amundsenbecken (Karos in Abb. 7). Die innerhalb MOSAiC gewonnenen Beobachtungsdaten zeigen jedoch vermehrt Signaturen konvektiv gebildeter Haloklinenwasser im östlichen Amundsenbecken (gefüllte Kreise in Abb. 7). Mögliche Ursachen dafür wären eine Änderung der Zirkulationspfade oder eine lokale Bildung der konvektiv gebildeten Haloklinenwasser. Eine geplante Untersuchung der Konzentrationen an Sauerstoff und Fluorchlorkohlenwasserstoffen im entsprechenden Haloklinenwasser soll Aufschluss über die genauen Ursachen geben.

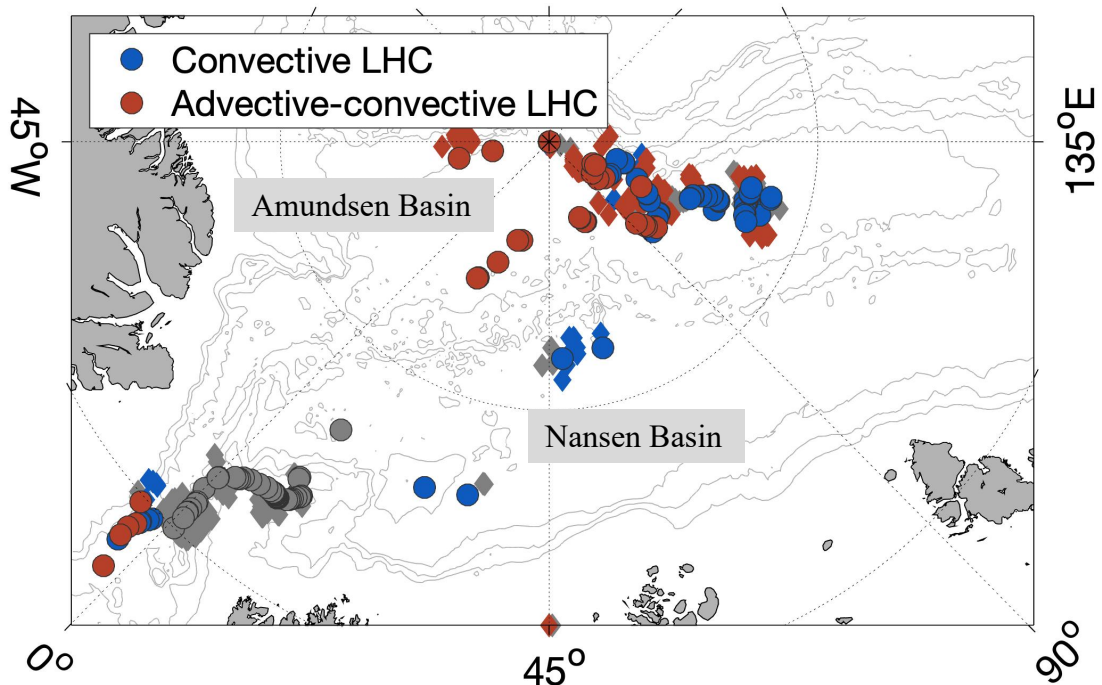


Abbildung 7: Karte der Ausbreitung unterschiedlicher Haloklinenwasser. In rot sind Positionen der hydrographischen Profile gekennzeichnet, die eine Signatur entsprechend advektiv-konvektiv gebildeter Haloklinenwasser zeigen, in blau gekennzeichnete Positionen markieren hydrographische Profile, die Signaturen einer konvektiv gebildeten Halokline aufweisen. Die gefüllten Kreise kennzeichnen MOSAiC Daten und die gefüllten Karos die historischen Daten.

Desweiteren zeigen Beobachtungsdaten des warmen Atlantikwassers im Amundsenbecken innerhalb MOSAiC multiple Temperaturmaxima im Tiefenbereich von 200 bis 400m Wassertiefe (s. Abb. 8). Dies konnten Anzeichen für verschiedene Atlantikwasser-Modi, die sich auf unterschiedlichen Pfaden ausbreiten. Auch hierüber sollen die Konzentrationen an Sauerstoff und Fluorchlorkohlenwasserstoff geben. Die

entsprechenden Daten befinden sich noch im finalen Prozessierungsschritt und sollten bald in ausreichender Qualität verfügbar sein.

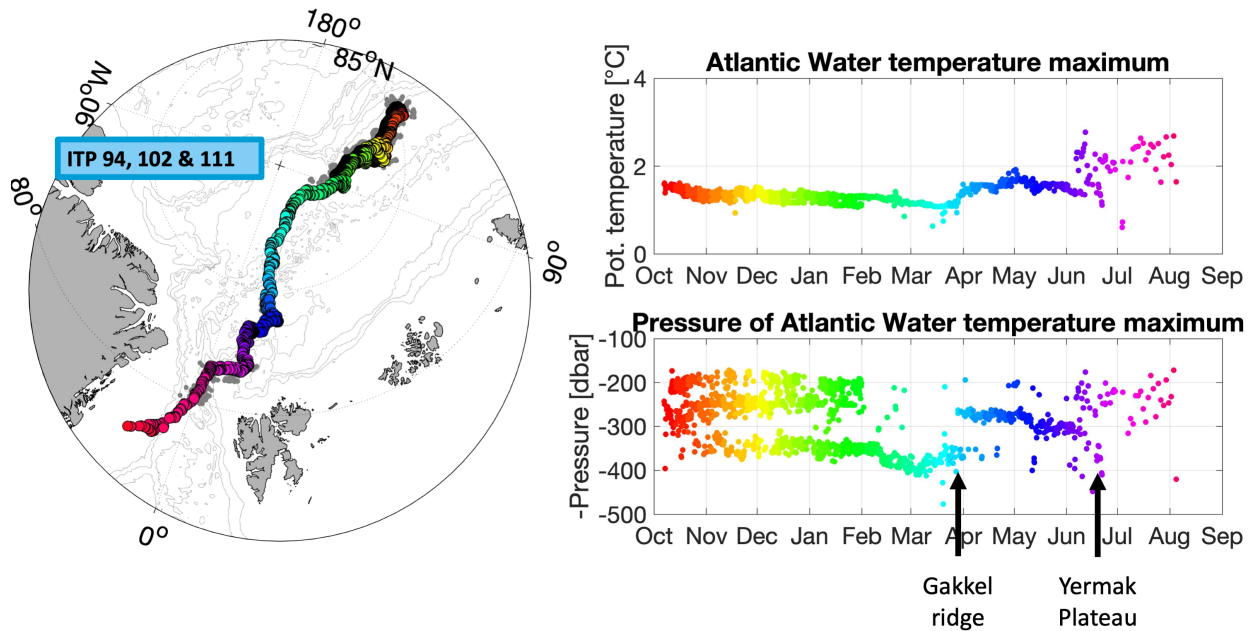


Abbildung 8: Atlantikwassertemperatur und -tiefe während der Eisdrift innerhalb MOSAiC. Geographische Positionen der Temperaturprofile von autonom messenden Bojen (ITP 94, 102 und 111) innerhalb MOSAiC (links) sowie Atlantikwasser-Temperaturmaxima und entsprechende Tiefe (rechts). Die Farben kennzeichnen jeweils eine Woche der Eisdrift.

Die Ergebnisse wurden auf verschiedenen internationalen Konferenzen vorgestellt und eine entsprechende Publikation befindet sich in Vorbereitung.

#### Referenzen:

Kikuchi et al. (2004) Distribution of convective lower halocline water in the eastern Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109 (C12). <https://doi.org/10.1029/2003JC002223>

Rudels et al. (2012) Arctic Ocean circulation and variability – advection and external forcing encounter constraints and local processes. *Ocean Science*, 8 (261-286). <https://doi.org/10.5194/os-8-261-2012>

Smith et al. (2021). A changing Arctic Ocean: How measured and modeled 129I distributions indicate fundamental shifts in circulation between 1994 and 2015. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016740. <https://doi.org/10.1029/2020JC016740>

## 1.5 Synthese der momentanen und künftigen Änderungen in arktischer Biogeochemie und Ökosystemen

Projektwissenschaftlerin Myriel Vredenburg analysierte die Nährstoff-Flaschendaten hinsichtlich Wassermassen-Signaturen. Wasser aus dem Pazifik hat im Vergleich zu Wasser aus dem Atlantik relativ hohe Nährstoffkonzentrationen. Dies zeigt sich auch in den regional dargestellten Mittelwerten der verschiedenen Nährstoffkonzentrationen (Abb. 9). Die Verteilung zeigt hohe Phosphat-, Nitrat- und Silikatwerte („Phosphate“, „Nitrate“, „Silicate“) auf der amerasischen Seite, wo ein hoher Anteil von Wasser aus dem Pazifik zu erwarten ist. Dies wird in dem regionalen Beaufortwirbel gesammelt. Die Verteilung wurde in Zusammenhang mit der Zirkulation und anderen Variablen (Sauerstoff, „oxygen“, und Salzgehalt und Temperatur) analysiert.

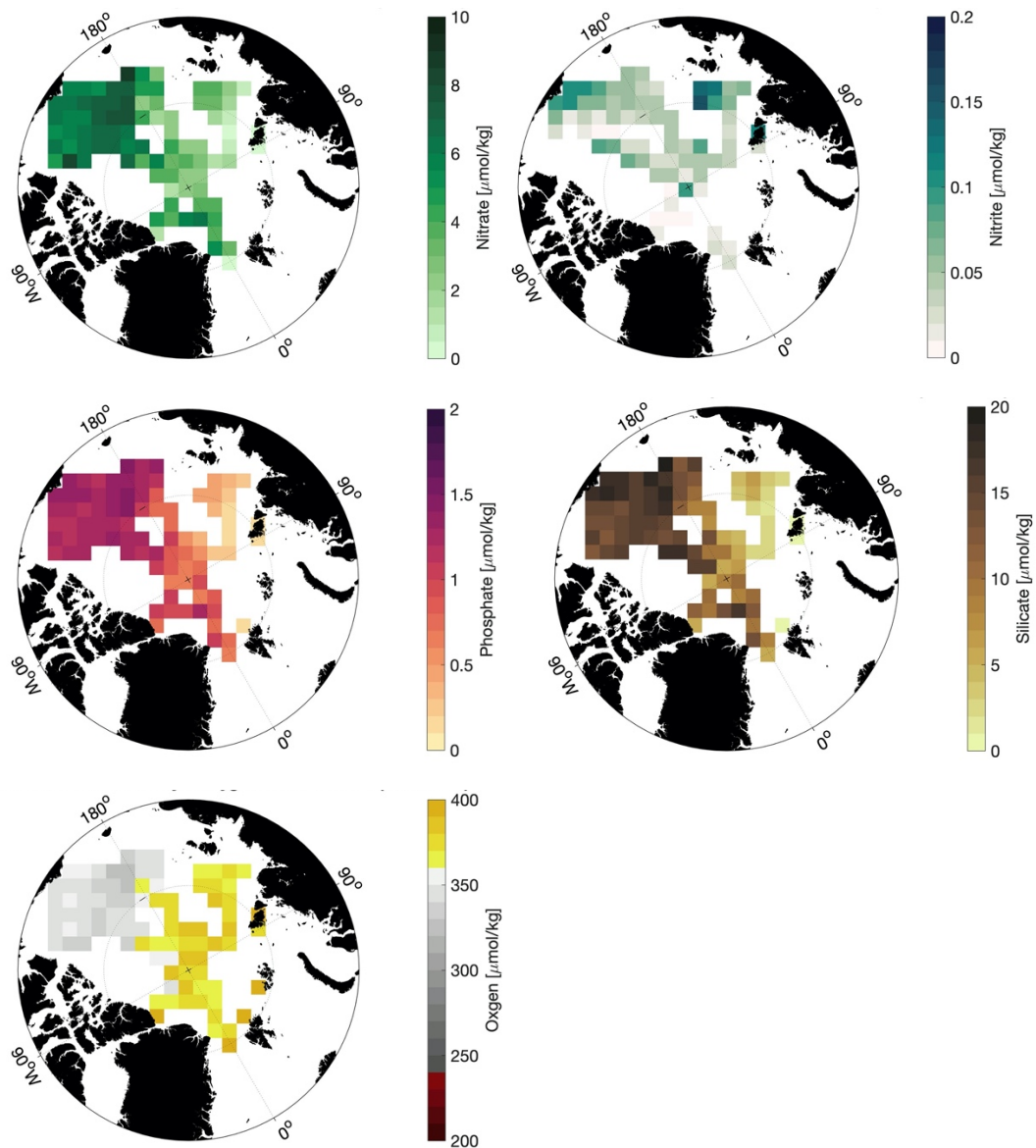


Abbildung 9: Zeitlich und räumlich gemittelte Werte der Messungen von Makronährstoffen und gelöstem Sauerstoff innerhalb der Polar Mixed Layer im Zeitraum 1984-2009. Die Mittelung ist in regelmäßig angeordneten Quadraten mit 185 km Seitenlänge erfolgt. Wo keine Schattierung gezeigt ist sind keine Daten vorhanden.

Abb. 10 a zeigt die Verteilung von Wasser mit wesentlichen Anteilen pazifischen Ursprungs und solchen atlantischen Ursprungs. In Abb. 10 b wird der Anteil des jeweiligen Wassers in den Daten durch die Nähe zu den zwei Geraden rechts bestimmt: Wasser atlantischen Ursprungs zeichnet sich durch relativ hohem Nitratgehalt bei gleichem Phosphatgehalt aus, was in der Grafik links anzusehen ist (gelbe und grüne Schattierung, hoher Salzgehalt). Wasser pazifischen Ursprungs zeigt niedrigeren Nitratgehalt bei gleichem Phosphatgehalt, rechts in der Grafik (blaue und dunkelgrüne Schattierung, niedriger Salzgehalt). Die Werte dazwischen sind Mischungen von Wasser pazifischen und atlantischen Ursprungs, besonders durch die nahezu horizontal verlaufende Gerade mit hohem Nitratgehalt bezeichnet.



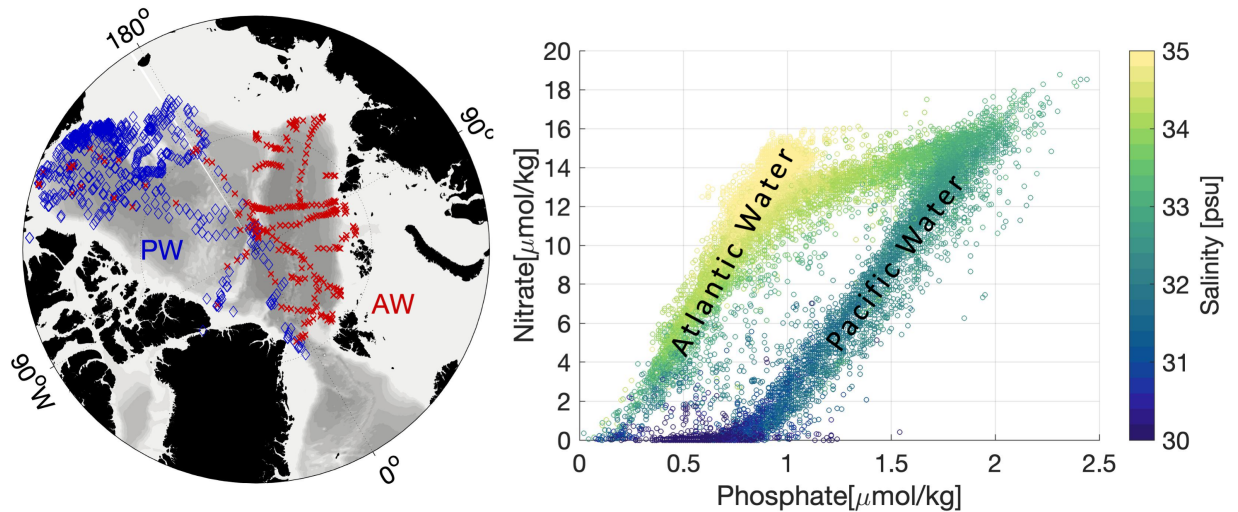


Abbildung 10: Verhältnis der Makronährstoffe Phosphat und Nitrat in Beobachtungsdaten der Arktis. Wasser atlantischen (rote Kreuze) und pazifischen (blaue Diamanten) Ursprungs kann in den links in der Karte markierten Positionen identifiziert werden (Details siehe Text).

Diese Arbeiten innerhalb des Projekts sind Grundlage einer derzeit in Vorbereitung befindlichen Synthese-Studie mit dem NERC-CAO finanzierten Projektpartner am NOC in Southampton, UK. In dieser Studie untersuchen soll die Variabilität der Wassermassenanteile atlantischen und pazifischen Ursprungs und auch die sich ändernde Advektion der Nährstoffe selbst untersucht werden.

### 1.6 Beteiligung an den vom UK-Partner geleiteten Arbeiten zur Validierung von Model-Hindcasts, biogeochemischer Modellierung und Verständnis der Ausbreitungspfade und Flüsse von ökologischen Schlüsselsubstanzen

Die von Projektwissenschaftlerin Myriel Vredenburg erstellte Datensynthese hydrographischer Beobachtungsdaten wird von den UK-Projektpartnern dazu genutzt, die im Model simulierte Hydrographie zu überprüfen. Die unteren Wassermassen (Atlantikwasser und untere Halokline) sind relativ gut abgebildet (Abb. 11). Die oberen Wassermassen (Polare Deckschicht und obere Halokline) sind teilweise etwas wärmer und salziger als die Beobachtungsdaten.

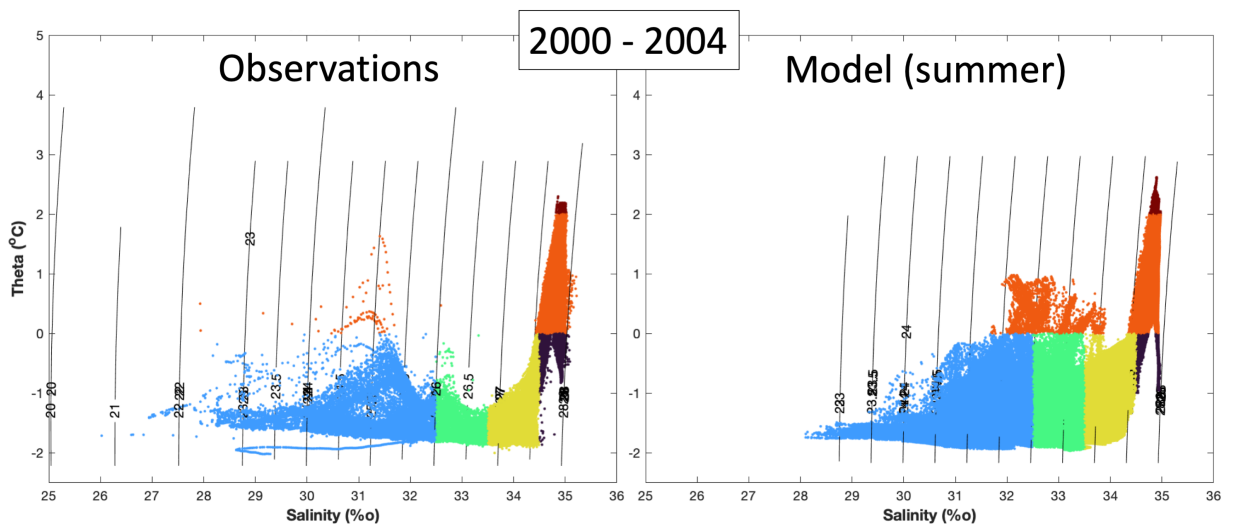


Abbildung 11: Temperatur-Salzgehalts-Diagramme aus arktischen Beobachtungsdaten (links) und Modelldaten der UK-Projektpartner (rechts, nur Sommer) für den Zeitraum 2000-2004. Die Farben kennzeichnen vereinfacht die verschiedenen Wassermassen des Nordpolarmeeres: Atlantikwasser (rot), unteres Haloklinenwasser (gelb), oberes Haloklinenwasser (grün) und Polares Deckschichtwasser (blau).

## 1.7 Weitere Arbeiten

Projektbeteiligte Wissenschaftler:innen waren an weiteren Studien zur Zirkulation beteiligt, unter Anderem über die Energie innerhalb des Randstroms und über die Verteilung und Advektion von Spurenstoffen (siehe Publikationsliste).

Der in diesem Projekt zusammengestellte und qualitätsüberprüfte Beobachtungsdatensatz hydrographischer Profile wurde von Antragsteller Benjamin Rabe dazu verwendet, monatlich aufgelöste Süßwasserinhalte für das zentrale Nordpolarmeer mithilfe einer optimalen Interpolations-Methode zu errechnen. Eine Publikation über die daraus resultierenden Erkenntnisse steht kurz vor der Einreichung.

### Projektrelevante Publikationen der beteiligten Wissenschaftler:innen

Charette, M. A., [...], **Rabe, B.**, et al. (2020). The Transpolar Drift as a source of riverine and shelf-derived trace elements to the central Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015920, doi:10.1029/2019JC015920 .

Petrova, M. V., Krisch, S., Lodeiro, P., Valk, O., Dufour, A., Rijkenberg, M. J. A., Achterberg, E. P., **Rabe, B.**, Rutgers van der Loeff, M., Hamelin, B., Sonke, J.E., Garnier, C., Heimbürger-Boavida, L.-E., Mercury species export from the Arctic to the Atlantic Ocean (2020), *Marine Chemistry*, Volume 225, doi:10.1016/j.marchem.2020.103855 .

**Rabe, B., Heuzé, C., Schaffer, J., Schulz, K., Vredenburg, M.**, et la. (2022). Overview of the MOSAiC expedition: Physical oceanography. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10 (1), 00060, doi: 10.1525/elementa.2021.00062.

**Schulz, K.**, Janout, M., Lenn, Y-D., Ruiz-Castillo, E., Polyakov, I., Mohrholz, V., Tippenhauer, S., Reeve, K., Hölemann, J., **Rabe, B. and Vredenburg, M.** (2020). On the along-slope heat loss of the Boundary Current in the Eastern Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2020JC016375. doi:10.1029/2020JC016375 .

Smith, J. N., **Karcher, M.**, Casacuberta, N., Williams, W. J., Kenna, T., & Smethie, W. M. (2021). A changing Arctic Ocean: How measured and modeled 129I distributions indicate fundamental shifts in circulation between 1994 and 2015. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016740. <https://doi.org/10.1029/2020JC016740>

### Eingereichte Publikationen

Kong, X., Granskog, M. A., Hoppe, C. J. M., Fong, A. A., Stedmon, C. A., Tippenhauer, S., Ulfso, A., **Vredenburg, M.**, Koch, B. P. (subm.). The composition of chromophoric dissolved organic matter in Central Arctic surface waters during the MOSAiC expedition depends on regional rather than seasonal differences. *Elementa: Science of the Anthropocene*.

Bienhold, C., Schourup-Kristensen, V., Krumpfen, T., Nöthig, E.-M., Wenzhöfer, F., Korhonen, M., **Vredenburg, M.**, Hehemann, L., Boetius, A. (subm.). Effects of sea ice retreat and ocean warming on the Laptev Sea continental slope ecosystem (1993 vs 2012). *Frontiers in Marine Sciences*.

### In Vorbereitung befindliche Publikationen

**Vredenburg, M., Rabe, B., Torres-Valdés, S.** et al. (in prep.). UDAH – Unified database for Arctic Ocean hydrography and nutrients.

**Vredenburg, M., Rabe, B., Schulz, K.**, et al. (in prep.). Upper Arctic Ocean hydrography during the year-round MOSAiC ice-drift experiment in historical context.

**Vredenburg, M., Rabe, B.**, et al. (in prep.). Atmospheric drivers of salt and freshwater content co-variability in the Arctic Ocean and the Subarctic North Atlantic.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Der zahlenmäßige Nachweis kann in einem separat von der Haushaltsabteilung des AWI

übermittelten Dokument eingesehen werden und ist daher hier nicht nochmals aufgeführt.

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

Die Region Arktis befindet sich im Wandel und ist besonders von der globalen Erwärmung betroffen. Durch den Ozean und die Atmosphäre eng mit Europa und dem Nordatlantik verbunden wirken sich regionale Änderungen in der Oberflächentemperatur, der Eisbedeckung und der Ozeanzirkulation bis in mittlere Breiten hin aus. Auch kann der Ozean Änderungen innerhalb des Ozeans in niederen Breiten bis in die Arktis transportieren, so unter anderem Nährstoffgehalt, Salzgehalt und Wärme. Ausserdem ist die Arktis die direkteste Verbindung des Nordatlantiks mit dem Nordpazifik. Die Begründung für die hier aufgeführten Arbeiten, Messungen, Datenprozessierung, Datenanalyse und Modellvergleiche sind im Projektantrag detailliert aufgeführt.

### 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Da die Arbeiten Teil der Grundlagenforschung sind, ist die direkte Anwendbarkeit momentan schwer abzuschätzen. Die aus APEAR resultierenden Daten / Produkte und Forschungsergebnisse sind im nicht-kommerziellen Sinne auch nach Projektende durch die Klimaforschung nutzbar. Die Datensynthese von Myriel Vredenberg wird voraussichtlich breite Anwendung in der Forschungscommunity des Nordpolarmeeres finden, nicht nur im physikalischen Bereich, sondern auch in der Forschung zu Ökosystemen und Biogeochemie. Insbesondere die sogenannte „Baseline“ verschiedener wichtiger Ozeanvariablen, wie Temperatur/Salzgehalt und der weniger zahlreich gemessenen Nährstoffe, ist in der Arktis immer noch nicht robust, da zeitliche Variabilität in den räumlich / zeitlich ungleich verteilten Messungen die mittleren Werte schwer abschätzbar macht. Das fast finale Datenprodukt kann hier zu einer wesentlichen Verbesserung führen. Desweiteren können innerhalb des Projekts durchgeführte Modellvergleiche und Synthesen weiter ausgebaut werden, so z.B. auf anderen Modellsimulationen. Teile des Datenprodukts werden auch jetzt schon für Bachelorarbeiten unter Betreuung von Benjamin Rabe genutzt, um weitergehende Berechnungen zum saisonalen Nährstoffverbrauch und Primärproduktion durchzuführen. Zuletzt kann das Datenprodukt für die Assimilation in entsprechende Computermodelle verwendet werden.

Das Datenprodukt wird nicht nur in einer wissenschaftlichen Abhandlung publiziert werden sondern auch der Community über die PANGAEA Datenbank frei zur Verfügung stehen.

Es besteht weiterhin Nutzen der Projektergebnisse für die Lehre, u.A. durch am Projekt beteiligte Wissenschaftler-innen, die an der Uni-Bremen und der Hochschule-Bremerhaven unterrichten, und sind in zukunftsweisenden Übersichtspublikationen („White Paper“) eingeflossen, mit Koautorschaft von am Projekt beteiligten Wissenschaftlern, z.B. B. Rabe (Lee et al., 2019; Palmer et al., 2019; Sloyan et al., 2019). Die Ergebnisse des Teilprojekts gingen bereits in Outreach-Materialien und -Veranstaltungen innerhalb des CAO-Verbunds (NERC und BMBF) ein.

Die oben genannten Erfolgsaussichten könnten zu einer Fortführung der Analysen benutzt werden:

- Weiterentwicklung des Datenprodukts und zeitliche Ausweitung
- Weitergehende Modellvergleiche und -assimilation
- Nach Erhebung / Bearbeitung werden die Messdaten in öffentlich zugängliche Datenarchive (PANGAEA, BODC) eingepflegt.
- Ergebnisse des bilateralen Projekts werden zur Verringerung der Unsicherheiten in Vorhersagen des Ozeans / Biogeochemie innerhalb künftiger IPCC Klimareports beitragen.

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

Es sind uns keine entsprechenden Ergebnisse bekannt geworden.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die erfolgten und geplanten Publikationen sind unter II.1.7 gelistet.

### **III. Erfolgskontrollbericht**

1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen soweit dies möglich ist

Der Verbund Changing Arctic OCEAN (CAO) ist eine Kooperation zwischen UK und DE mit dem übergeordneten Ziel der Untersuchung von Änderungen im Nordpolarmeer („Changes in the Arctic Ocean“). Hierzu gehören der Einfluss des schwindenden Meereises und der Einfluss der physikalischen Änderungen auf marine Organismen und den biogeochemischen Kreislauf. Das Projekt APEAR trug, zusammen mit unseren Projektpartnern in UK, zu diesen Zielen bei, indem Änderungen in der Zirkulation und Nährstoffausbreitung untersucht wurden, auch im Hinblick auf Änderungen in den Umweltbedingungen (e.g. Wind und Eisdrift). Hierzu wurden historische Daten aufgearbeitet und neue Messungen erhoben um die oben genannten Änderungen quantitativ und qualitativ zu untersuchen.

2. Wissenschaftlicher Erfolg, Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

Im Rahmen des Projekts wurde ein Datenprodukt für das Nordpolarmeer entwickelt, was Messungen aus verschiedenen Quellen zusammengefügt und einer umfangreichen Qualitätsprüfung unterzogen hat. Die Daten wurden innerhalb des Projekts zur Analyse der Änderungen in der Ozeanzirkulation im oberflächennahen Nordpolarmeer und der damit assoziierten advektiven Pfade von Nährstoffen untersucht. Dabei wurden sowohl Vergleiche mit vorangegangenen Arbeiten als auch mit state-of-the-art hochaufgelösten Computernmodellen des flüssigen Ozeans und des Meereises vorgenommen. Die Publikation der Ergebnisse der Untersuchungen ist in Arbeit.

Weiterhin wurden Modellstudien der Ausbreitung des in die Arktis strömenden Atlantikwassers mit Messungen und Modellläufen vorgenommen und publiziert. Weitere, bereits publizierte Analysen beinhalteten die Dynamik und Vermischung innerhalb des Randstroms sowie die Ausbreitung von Spurenmetallen und Quecksilber.

Details finden sich unter II.1.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Siehe II.4.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Wie unter III.6. beschrieben, gab es Verzögerungen, die dazu geführt haben, dass ein Teil der Arbeiten erst nach Projektende fertiggestellt werden kann. Die Analyse der Verankerungsdaten wurde durch einen stärkeren Fokus auf die anderen im Projekt genutzten Beobachtungsdaten ersetzt.

Die Publikation einiger Analysen wird über den Projektzeitraum hinaus erfolgen.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Die veröffentlichten und in Veröffentlichung befindlichen Messdaten stehen der Community endgültig über das Datenportal PANGAEA zur Präsentation zur Verfügung. Vorträge wurden innerhalb des Verbunds CAO (NERC/BMBF) gehalten und ständen auf Anfrage zur Verfügung.

## 6. Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans

Insgesamt sind die Meilensteine, die im Projektantrag aufgeführt wurden, am Ende der Projektlaufzeit alle erreicht worden, wobei die Publikationen erst nach Projektende erfolgen. Eine Ausnahme bildet die Verfügbarkeit der CFC/SF6-Beobachtungsdaten. Der Zeitrahmen des Projekts wurde kostenneutral auf Ende 2021 verlängert. Ein Teil der Verzögerungen sind auf die Elternzeit der Projektwissenschaftlerin Myriel Vredenburg in 2020 und covid-bedingte Einschränkungen zurückzuführen. Weitere Details sind dem Schreiben „Antrag auf Änderung der Personal- und Finanzplanung“ des AWI vom 13.12.2019 zu entnehmen. Die Arbeiten zur Analyse von Verankerungsdaten zur Saisonalität konnten in 2020 nicht durchgeführt werden, da ursprünglich geplantes Personal (Zerlina Hoffmann, E13/1) am Ende nicht zur Verfügung stand und eine andere geeignete Person covid-bedingt nicht kurzfristig gefunden werden konnte. Es wurde daher mehr Aufmerksamkeit auf die Analyse und Vorbereitung der MOSAiC-Daten gelegt (M2 und M5).

Die Aufgabenplanung in Bezug auf die Meilensteine im Projektantrag sind wie folgt durchgeführt worden:

- M1 – die Messdaten wurden in ein Syntheseprodukt zusammengefasst, inklusive einer umfangreichen Qualitätskontrolle. Die Datensynthese hatte sich während des Projekts verzögert, da ein wichtiger Nährstoffdatensatz zwischenzeitlich aktualisiert wurde. Weiterhin hat die Vorbereitung der Expedition MOSAiC (siehe M2) mehr Zeit in Anspruch genommen, als erwartet.
- M2 und M5 – Die MOSAiC-Feldarbeiten wurden erfolgreich geplant und durchgeführt, wobei während der Elternzeit von Frau Vredenburg die entsprechenden Arbeiten im Feld durch Frau Schaffer durchgeführt wurden. Die Beprobung auf Nährstoffe und CFC/SF6 wurden erfolgreich durchgeführt, aber die Datenanalyse hatte sich durch verschiedene Umstände (u.A. covid19) verzögert. Die Datensätze werden endgültig erst nach Projektende verfügbar sein.
- M3 – die Wassermassenanalyse wurde durchgeführt, eine Publikation ist in Arbeit und wird nach Projektende zusammen mit der Analyse der MOSAiC-Daten veröffentlicht (siehe auch M6).
- M6 – die Analyse der MOSAiC-Daten hat sich durch mehrere Faktoren (siehe auch M2/M5) verzögert, weswegen die Analysen erst nach Projektende abgeschlossen sein und publiziert werden.
- M7 – Die Synthese wird durch die Verzögerungen in M3 erst nach Projektende gemeinsam mit den Kooperationspartnern vom NOC/UK publiziert.

Die beteiligten Wissenschaftler:innen des AWI trugen innerhalb der gelisteten Publikationen (Karcher, Rabe, Torres) ohne projektgebundene Finanzierung zum Projekt bei. Ebenso trug das AWI durch die durchgeführten Feldarbeiten und die damit in Zusammenhang bereitgestellten Ressourcen (Polarstern, e.g. MOSAiC „berth fee“) zu APEAR bei.